

Beton wird als dauerhaft bezeichnet, wenn er sich zum einen als widerstandsfähig gegenüber seiner geplanten Nutzung erweist. Andererseits muss er bereits während der Bauausführung genug Widerstand gegen die vorherrschenden Wetterverhältnisse aufbringen, da Temperatur, Wind, Feuchtigkeit, Luftdruck, Sonneneinstrahlung und Niederschlag die Frisch- und Festbetoneigenschaften maßgeblich beeinflussen können. So trägt z. B. Wind wesentlich zur schnelleren Verdunstung des Wassers im Frischbeton bei oder durch Regen kann im Extremfall der Wasserzementwert erhöht und das Betongefüge somit verschlechtert werden. Niedrige Temperaturen haben hinsichtlich des Erstarrungsverhaltens eher eine verzögernde Wirkung, hohe Temperaturen führen dagegen zu einer beschleunigten Festigkeitsbildung. Trotz extremer Wetterverhältnisse gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, guten und dauerhaften Beton herzustellen und einzubauen. Dabei wird zwischen Maßnahmen unterschieden, die der Betonhersteller – im Normalfall das Transportbetonwerk – und die der Verwender (die Baustelle) ergreifen kann. Seitens des Transportbetonwerks sind dies die Anpassung der Betonzusammensetzung an die Temperatur (Winter-, Sommerrezepteuren) und die Betonherstellung durch Steuerung der Frischbetontemperatur. Auf der bauausführenden Seite ist dies die Vorbereitung der Betonage, die Betonverarbeitung und eine unmittelbar nach dem Einbau anschließende, sorgfältig auf das Bauvorhaben abgestimmte Nachbehandlung.

A Betonieren bei niedrigen Temperaturen

■ 1 Allgemeines

Ebenso wie für das Betonieren bei heißem Wetter gibt es in der DIN EN 13670 [1] und der deutschen Anwendungsrichtlinie DIN 1045-3 [2] auch Forderungen für das Betonieren bei niedrigen Temperaturen. Niedrige Temperaturen sind nach dem Verständnis der Regelwerke Temperaturen $\leq 5^{\circ}\text{C}$.

Gefordert werden deshalb Mindesttemperaturen für den Frischbeton in Abhängigkeit der Lufttemperatur (Tafel 1).

Der frische bzw. junge Beton besitzt bei niedrigen Temperaturen prinzipiell zwei Energiequellen von denen die Festigkeitsentwicklung abhängig ist. Einerseits ist es die Energie-/Wärmemenge, die dem Frischbeton im Transportbeton-

Tafel 1: Mindesttemperaturen des Frischbetons in Abhängigkeit der Lufttemperatur nach [2]

Lufttemperatur	Mindesttemperatur des Frischbetons
+5 °C bis -3 °C	+5 °C allgemein
	+10 °C bei Zementgehalten < 240 kg/m ³
unter -3 °C	+10 °C über mindestens 3 Tage

werk zugesetzt wird, damit er unter Berücksichtigung aller Transportverluste noch ausreichend warm auf die Baustelle kommt und eingebaut werden kann. Andererseits setzt der Zement bei der Hydratation und der damit verbundenen Festigkeitsentwicklung eine Wärmeenergie frei, die das Bauteil spürbar erwärmt. Dieser Zusammenhang ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Sinkt die Temperatur, wird die Festigkeitsbildung gehemmt (grauer Bereich).



Bild 1: Schematischer Temperaturverlauf vom Frischbeton hin zum Festbeton bei niedrigen Temperaturen

Um die geforderte Betontemperatur bei der Übergabe bzw. beim Einbau auf der Baustelle sicherzustellen, ist die Frischbetontemperatur im Transportbetonwerk unter Berücksichtigung des Transports und der Hydratationswärmeentwicklung einzustellen. Bei Betontemperaturen nahe dem Gefrierpunkt kommt die Festigkeitsentwicklung praktisch zum Stillstand. Gefriert junger Beton, kann das Betongefüge gestört und dauerhaft geschädigt werden. Nach Erreichen einer hinreichenden Reife ist junger Beton in der Lage, ein einmaliges Durchfrieren ohne dauerhafte Gefügeschäden zu überstehen. Dies ist durch eine entsprechende Betonzusammensetzung und den im Zuge der Nachbehandlung zu gewährenden Schutz vor niedrigen Temperaturen zu gewährleisten. Ein schadloses einmaliges Durchfrieren von jungem Beton ist möglich,

- wenn der Beton beim Einbau und für mindestens drei weitere Tage eine Temperatur von $+10^{\circ}\text{C}$ nicht unterschreitet (siehe Tafel 1) oder
- in einer Erhärtungsprüfung eine Druckfestigkeit von mindestens 5 N/mm² nachgewiesen wurde.

So erhärteter Beton entwickelt seine Festigkeit nach Durchfrieren und Auftauen normal weiter, wenn die erforderliche Nachbehandlung sachgerecht durchgeführt wird. Trotz regelgerechtem Betonieren bei geringen Temperaturen ist jedoch zu bedenken, dass bei kühlem Wetter eine Verzögerung des Erstarrens und der Festigkeitsentwicklung des Betons eintritt. So benötigt z. B. ein bei 5°C erhärtender Beton eine deutlich längere Zeit, um die gleiche Festigkeit zu erreichen, als ein bei 20°C gelagerter gleicher Beton (Bild 2 und Tafel 5 – (siehe Betonieren bei heißem Wetter)).

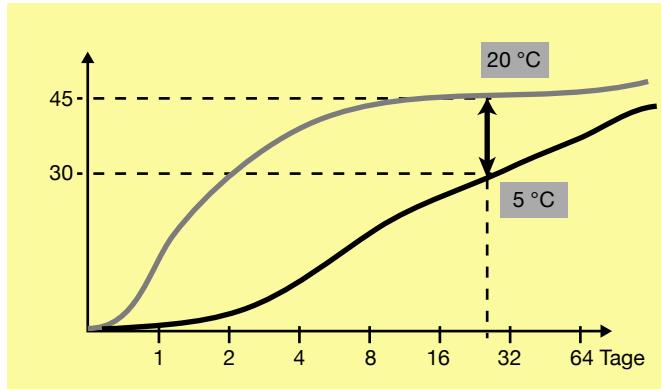


Bild 2: Verzögerte Druckfestigkeitsentwicklung eines Betons in Abhängigkeit der Temperatur (Beispiel)

Die Auswirkungen des Betonierens bei niedrigen Temperaturen

- Verzögerung des Erstarrens und der Festigkeitsentwicklung,
- Gefrieren des ungebundenen Wassers im Beton,
- Temperaturdifferenzen über den Betonquerschnitt,

stehen den baubetrieblichen Anforderungen

- schnelles Erreichen der Gefrierbeständigkeit,
- Ausschalen in vertretbaren Fristen,
- zeitnahe Belastung der Bauteile

vielfach gegenüber.

■ 2 Maßnahmen durch den Betonhersteller

Anpassung der Betonzusammensetzung an kalte Wetterbedingungen

Die Hydratationswärme des erhärtenden Betons kann in den ersten Tagen nach dem Betonieren genutzt werden, die Temperatur im Bauteil ausreichend hoch zu halten, damit sich die gewünschte Festigkeitsentwicklung im Bauteil einstellen kann. Zum Einsatz kommen häufig Zemente, die innerhalb der ersten Tage eine ausreichend hohe Hydratationswärme freisetzen. Dies sind insbesondere Zemente der Festigkeitsklassen 32,5 R, 42,5 R und 52,5 R. Die Tafeln 4 und 5 (siehe Betonieren bei heißem Wetter) geben Anhaltswerte zur Hydratationswärmeentwicklung und zur Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente.

Weitere betontechnologische Maßnahmen beim Betonieren bei niedrigen Temperaturen können sein:

- Erhöhung des Zementgehalts ($z > 300 \text{ kg/m}^3$)
- Verzicht auf Zusatzstoffe als Zementersatz
- Herabsetzung des Wasserzementwerts

Diese Maßnahmen sollten jedoch mit dem Tragwerksplaner abgestimmt werden.

Gegenüber der Festigkeitsentwicklung der Zemente ist für die Bauausführung die Festigkeitsentwicklung der Betone von weit aus größerem praktischem Interesse. Die Festigkeitsentwicklung des Betons kann über den r -Wert beschrieben werden. Dieser Wert beschreibt das Verhältnis der 2-Tage-Druckfestigkeit zur 28-Tage-Druckfestigkeit eines Betons bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C. Die hierfür erforderlichen Prüfkörper (in aller

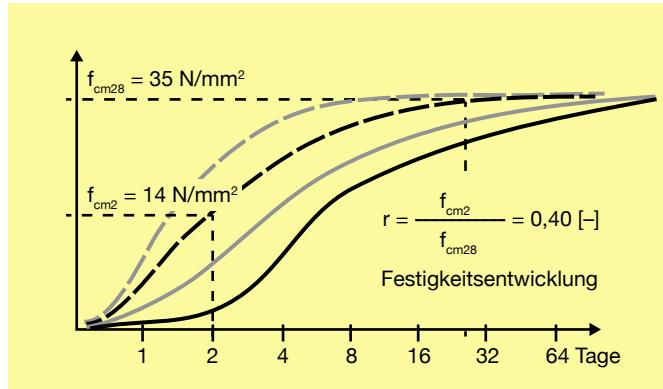


Bild 3: Festigkeitsentwicklung verschiedener Betone

Regel Würfel) werden nach DIN EN 12390 hergestellt und gelagert. DIN EN 206-1 teilt die Festigkeitsentwicklung der Betone in vier Klassen ein (vgl. Tafel 2). Mit der Festigkeitsentwicklung ist weitestgehend auch die Menge an entstehender Hydratationswärme verbunden. Bild 3 zeigt exemplarisch die Druckfestigkeitsentwicklung verschiedener Betone und beispielhaft die Herleitung des r -Werts.

Während im Sommer bei hohen Temperaturen und bei massigen Bauteilen eher Betone mit langsamer oder sehr langsamer Festigkeitsentwicklung eingesetzt werden, sind im Winter vielfach schnelle und mittlere Festigkeitsentwicklungen von Interesse. In der Planung muss aber unbedingt berücksichtigt werden, dass Bauteile mit entsprechend schneller oder mittlerer Festigkeitsentwicklung besonderen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Aufgrund der hydratationsbedingten Temperaturdifferenzen zwischen Bauteilkern und Bauteiloberfläche können große Eigenspannungen entstehen. Vorbeugend sollte dies in der Planung der Nachbehandlung bereits berücksichtigt werden.

Vor dem Betonieren ist es ratsam, nochmals zu überprüfen, ob die zugrunde gelegte Festigkeitsentwicklung des Betons auch aufgrund zu erwartender Wetterverhältnisse eintreten kann.

Auch Zusatzmittel können das Verhalten des Betons bei niedrigen Temperaturen positiv beeinflussen. Betonverflüssiger ermöglichen durch die Verminderung des Wasseranspruchs bei gleich bleibender Verarbeitbarkeit geringere Wasserzementwerte. Beschleuniger sollten nur im Ausnahmefall und nach Rücksprache mit einem erfahrenen Betontechnologen zur Anwendung kommen. Luftporenbildner erhöhen zwar den Widerstand gegen Frost- und Tausalzangriff im Festbeton, sie verbessern hingegen nicht das Gefrierverhalten des jungen Betons. Verzögerer sollten in der Regel nicht verwendet werden.

Die erforderlichen Mindesttemperaturen des Frischbetons sind in Tafel 1 aufgeführt. Bei Lufttemperaturen ≤ 5 °C muss bei Beton der Überwachungsklassen 2 und 3 die Frischbetontemperatur gemessen und im Bautagebuch aufgezeichnet werden. Wenn der frische Beton oder Teile seiner Ausgangsstoffe in der kalten Jahreszeit beheizt werden, ist darauf zu achten, dass die Frischbetontemperatur + 30 °C nicht überschreitet. Die Temperatur des Frischbetons kann einfach und wirtschaftlich durch Erwärmen des Zugabewassers erhöht werden. Zugabewasser mit einer Temperatur von mehr als 70 °C ist zuerst mit der Gesteinskörnung zu mischen, bevor der Zement zugegeben wird. Damit wird ein verfrühtes Ansteifen des Betons vermieden.

Wird zur Herstellung von Betonen für niedrige Temperaturen stark erhitztes Wasser oder sogar Heißdampf eingesetzt, so ist zu beachten, dass der Zement zum spontanen Reagieren und damit zur Klumpenbildung neigen kann.

Die Frischbetontemperatur lässt sich auch durch das Anwärmen der Gesteinskörnungen erhöhen. Die sich einstellende Frischbetontemperatur kann bei einem Zementgehalt von ca. 300 kg je m³ Beton mit der nachfolgenden Näherungsformel ermittelt werden:

$$T_{c,fr} = 0,1 \cdot T_z + 0,2 \cdot T_w + 0,7 \cdot T_g \quad [\text{°C}]$$

Gl. 1

$T_{c,fr}$ = Frischbetontemperatur [°C]

T_z = Zementtemperatur [°C]

T_w = Wassertemperatur [°C]

T_g = Temperatur der Gesteinskörnungen [°C]

(Gefrorene Gesteinskörnungen dürfen bei der Betonherstellung nicht verwendet werden.)

Näherungsweise Berechnung der Frischbetontemperatur

Beispiel 1:

Für eine Baustelle soll ein Beton geliefert werden. Das Transportbetonwerk verfügt über eine offene Sternsiloanlage und unbeheizte Bindemittelsilos sowie eine Warmwasserbereitung für das Zugabewasser. Die Temperaturen der Ausgangsstoffe sind entsprechend den Werten der unten stehenden Tabelle ermittelt worden. Welche Frischbetontemperatur ist unter diesen Voraussetzungen zu erwarten?

Ausgangsstoff	Masse [kg/m ³]	Temperatur [°C]
Zement	300	8
Gesteinskörnung	1800	5
Zugabewasser	150	45

Unter Verwendung des vereinfachten Berechnungsansatzes nach Gl. 1 bleiben die Massenanteile je m³ unberücksichtigt und es ergibt sich:

$$T_{c,fr} = 0,1 \cdot 8 \text{ °C} + 0,2 \cdot 45 \text{ °C} + 0,7 \cdot 5 \text{ °C} = 13,3 \text{ °C}$$

Trotz des geringsten Massanteils kann über die Erwärmung des Zugabewassers ein ausreichend wirksamer Effekt erreicht werden. Allerdings sollte bedacht werden, dass es sich bei Gl. 1 um einen Näherungsansatz handelt. Genauere Werte liefert der Ansatz in Teil B – Betonieren bei heißer Witterung. Auch muss auf ein ausreichend großes Vorhaltemaß zum Ausgleich von Temperaturverlusten während des Transports geachtet werden. Die Mischungstemperatur T_m muss bei der Übergabe des Betons den geforderten Werten für T_L entsprechen (Bild 4).

■ 3 Maßnahmen durch den Verwender (ausführende Bauunternehmung)

Vorbereitung der Betonage

Im Vorfeld einer geplanten Betonage bei niedrigen Temperaturen sollten einige grundsätzliche Punkte überprüft bzw. sichergestellt werden:

- Sicherstellung einer ungehinderten Baustellenzufahrt: vor allem bei niedrigen Außentemperaturen ist besonders auf sichere An- und Abfahrtswege für die Fahrzeuge zu achten.
- Aufstellplätze für Pumpenfahrzeuge im Hinblick auf einen vereisten oder teilvereisten Untergrund untersuchen (Stand sicherheit)
- Arbeitsvorbereitung und Bautätigkeiten unter Einhaltung aller Regeln des Arbeitsschutzes und der Unfallverhütung: Niedrige Temperaturen führen zu einer schnelleren Ermüdung, Arbeitsbereiche und Wege dürfen nicht rutschig sein.
- Alle Geräte und Hilfsmittel für den Einbau und die Verdichtung sind frühzeitig auf ihre Funktion zu testen und ggf. ist Ersatz bereitzustellen.
- Kurze Fahrzeit vom Transportbetonwerk zur Baustelle organisieren
- Schalung und Bewehrung müssen frei von Schnee und Eis sein.
- Temperaturmessgeräte für die Abnahme des Betons bereithalten
- Klären, wie die Temperatur des Betons aufrechterhalten werden soll: durch die Hydratationswärme und wärmedämmende Abdeckungen, durch Fremdheizung oder Einhausung des Bauteils?

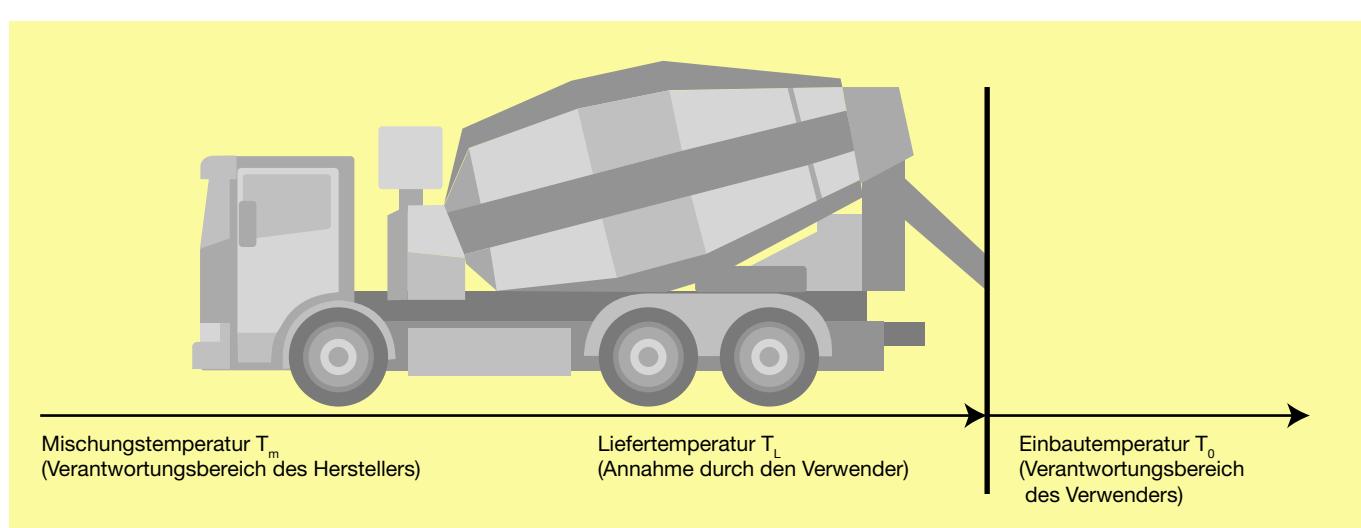


Bild 4: Verantwortungsbereiche für die Einhaltung der Frischbetontemperatur



Bild 5: Messung der Frischbetontemperatur (T_L) bei der Übergabe des Betons

Einbringen und Verarbeiten von Beton

Nach der Abnahme des Betons hat das verarbeitende Unternehmen (Verwender) dafür Sorge zu tragen, dass die Frischbetontemperatur in dem erforderlichen Temperaturbereich bleibt. Mögliche Maßnahmen, die dazu beitragen können, sind z. B.:

- Liefertemperatur (T_L) des Betons mit Temperaturmessgerät (Bild 5) prüfen. Nicht nur bei der ersten Abnahmeprüfung, sondern regelmäßig über die Zeit der Entladung.
- Vermeidung langer Wartezeiten auf der Baustelle, Taktzeiten beachten
- Betonförderung: ggf. Pumpenschläuche wärmedämmen oder Kübel mit Isoliermaterial abdecken
- Beton nicht offen gegenüber der Umgebungsluft auskühlen lassen: Förderbänder sind daher im Winter ungeeignet, ggf. auch unabhängig von der Schütt Höhe Schüttenschläuche verwenden.
- Verwendung von Warmbeton (siehe Kapitel 2: Maßnahme durch den Betonhersteller)
- Einhalten einer vereinbarten Einbautemperatur T_0 , die bereits frei von allen Temperaturverlusten durch Fördern, Einbringen und Verarbeiten bis zum Beginn der Nachbehandlung ist. Es können stichprobenartig Temperaturmessungen in der Schalung vorgenommen werden.
- Schalung und Bewehrung müssen frei von Schnee und Eis gehalten werden.
- Die Wärmeleitfähigkeit der Schalung ist zu berücksichtigen, Stahlschalungen leiten die Wärme gut ab, Holzschalungen eher weniger, ggf. muss die Schalung gedämmt werden.
- Auf gefrorenen Baugrund darf nicht betoniert werden, ebenfalls nicht an gefrorene Bauteile oder Bodenbereiche. In diesem Fall ist jedoch ebenfalls zu beachten, dass kalte

aber nicht gefrorene Flächen dem Frischbeton dennoch Wärmeenergie entziehen und die Festigkeitsbildung des Betons herabgesetzt werden kann.

- Durch Frost geschädigter Beton ist vor dem Weiterbetonieren zu entfernen.
- Personal im Hinblick auf eine frühzeitige Nachbehandlung abstellen

Auf das Bauvorhaben abgestimmte Nachbehandlung

Gerüste, Schalungen und andere stützende Bauhilfsmaßnahmen dürfen erst entfernt werden, wenn der Beton eine ausreichende Festigkeit hat. Bei kühler Witterung und Frost kann das wesentlich länger dauern als bei Normalbedingungen (Bild 2). Im Zweifel sind Erhärtungs- oder Reifegradprüfungen durchzuführen.

Nach dem Einbau ist ein guter Wärmeschutz des jungen Betons notwendig, um den Wärmeabfluss möglichst gering und die Erhärzungstemperaturen auf dem normgerechten Niveau zu halten. Die erforderlichen Schutzmaßnahmen sind rechtzeitig vorzubereiten und für den notwendigen Zeitraum in vollem Umfang zu erhalten. Sie richten sich insbesondere nach den Witterungsbedingungen, der Art und den Abmessungen der Bauteile sowie der Schalung. Die Nachbehandlung mit Wasser ist bei Frost nicht erlaubt. In kurzen Frostperioden können wärmedämmende Abdeckungen (wie Brettschalung, Luftpolstermatten oder -folien, trockene Stroh- und Schilfmatte, Leichtbauplatten und Kunststoffmatten) ausreichend sein. Die Abdeckung wird zweckmäßig beidseitig mit Folie vor Durchfeuchtung geschützt. Folienkaschierte Kunststoffmatten sind sehr gut geeignet und einfach zu handhaben. Bei strengem Frost und während längerer Frostperioden muss die den Frischbeton umgebende Luftsicht erwärmt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Betonoberfläche nicht austrocknet. Dies kann durch Einhausung des umgebenden Bereichs (z. B. durch Arbeitszelte) erreicht werden. Für Temperaturen von 5 °C bis 10 °C und Temperaturen unter 5 °C können den Tafeln 2 und 3 die Mindestdauer für die erforderliche Nachbehandlung entnommen werden. Zur Nachbehandlung siehe auch Teil B dieses Merkblatts und Zement-Merkblatt B 8 „Nachbehandlung und Schutz von jungem Beton“ [4].

Bei Verwendung der Tafeln 2 und 3 dürfen Zwischenwerte eingeschaltet werden und anstelle der Oberflächentemperatur des Betons darf die Lufttemperatur angesetzt werden. Betone, die der Expositionsklasse XM (Verschleißwiderstand) entsprechen sollen, müssen bis zum Erreichen von 70 % der charakteristischen Festigkeit nachbehandelt werden. Ohne Nachweis

Tafel 2: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen nach DIN EN 13670 [2] / DIN 1043-3 [3] für alle Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM für Temperaturen zwischen 5 °C und 10 °C, bzw. für Temperaturen < 5 °C

Oberflächentemperatur	Mindestdauer Nachbehandlung ¹⁾ [Tage]			
	Festigkeitsentwicklung Beton $r = f_{cm2}/f_{cm28}$			
	schnell	mittel	langsam	sehr langsam
[°C]	$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$
10 > $\vartheta \geq 5$	3 (6) (6/12)	6 (12) (12/24)	10 (20) (20/40)	15 (30) (30/60)

¹⁾ Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlung um die Tage zu verlängern, an denen die Temperatur unter 5 °C liegt (max. erforderlich siehe grau dargestellte Werte).

Tafel 3: Alternativverfahren für die Expositionsklassen XC2, XC3, XC4 und XF1

Frischbetontemperatur	Mindestdauer Nachbehandlung ¹⁾ [Tage]			
	Festigkeitsentwicklung Beton $r = f_{cm2}/f_{cm28}$			
	schnell	mittel	langsam	sehr langsam
[°C]	$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$
$10 > \vartheta_b \geq 5$	4 (8)	8 (16)	14 (28)	sehr langsam

¹⁾ Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlung um die Tage zu verlängern, an denen die Temperatur unter 5 °C liegt (max. erforderlich siehe grau dargestellte Werte).

Tafel 4: Hydratationswärmeentwicklung in Abhängigkeit von der Zementart [5]

Festigkeitsklasse des Zements	Hydratationswärme des Zements [J/g] bestimmt mit dem Lösungskalorimeter in Tagen			
	1 Tag	3 Tage	7 Tage	28 Tage
VLH 22,5	in den ersten 7 Tagen < 220 J/g Zement			keine Angabe
32,5 LH; 42,5 LH	in den ersten 7 Tagen < 270 J/g Zement			keine Angabe
32,5 N	60 – 175	125 – 250	150 – 300	200 – 375
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

sind die Werte der Tafel 2 zu verdoppeln (siehe in Klammern stehende Werte).

Alternativ kann für die Expositionsklassen XC2, XC3, XC4 und XF1 die Ermittlung der Nachbehandlungsdauer über die Messung der Frischbetontemperatur zum Einbauzeitpunkt in Abhängigkeit der Festigkeitsentwicklung des Betons erfolgen (siehe Tafel 3).

B Betonieren bei heißem Wetter

■ 1 Allgemeines

Die DIN EN 13670 [1] bzw. die deutsche Anwendungsrichtlinie DIN 1045-3 [2] fordert in Abschnitt 2.8 „*Die Frischbetontemperatur darf im Allgemeinen +30 °C nicht überschreiten, sofern nicht durch geeignete Maßnahmen sichergestellt ist, dass keine nachteiligen Folgen zu erwarten sind*“. Hintergrund dieser Forderung ist, dass durch die erhöhte Frischbetontemperatur die Reaktivität des Zementklinkers steigt und die Löslichkeit des erstarrungsregelnden Sulfatzusatzes abnimmt. Dies führt im Allgemeinen zu einem schnelleren Ansteifen und Erstarren, einer schlechteren Verarbeitbarkeit (Konsistenz), zu höheren Frühfestigkeiten und kann bei Nichtbeachtung zur Rissbildung an der Betonoberfläche führen. Durch Wind kann dieser Effekt noch verstärkt werden. Die Frischbetontemperatur darf größer als 30 °C sein, wenn spezielle, auf diese erhöhten Temperaturbereiche ausgelegte Erstprüfungen durchgeführt und dokumentiert sind.

Bei besonderen Bauwerken, wie z. B. Tunnelbauwerken, Wasserbauwerken oder Bauteilen, die gemäß der Richtlinie des DAfStb „Massenbeton“ [3] erstellt werden, weichen die Vorgaben für die Temperaturbegrenzung von den Festlegungen der DIN EN 13670 [1] / DIN 1045-3 [2] ab. So ist bei der ZTV-W LB 215 [6] die Frischbetontemperatur für massive Bauteile auf 25 °C an der Übergabestelle begrenzt. In einigen Fällen, bei denen es erforderlich ist, adiabatische Temperaturerhöhungen im Bauteil zu begrenzen, sind sogar noch niedrigere Frischbetontemperaturen einzuhalten. Ebenso ist in der ZTV-Ing [7] im Normalfall, bis auf bauvorhabenbedingte Ausnahmefälle, die zulässige Frischbetontemperatur für Tunnelbauwerke auf 25 °C festgesetzt.

■ 2 Maßnahmen durch den Betonhersteller

Anpassung der Betonzusammensetzung an heiße Wetterbedingungen

Zur Verminderung der Hydratationswärmeentwicklung sollten vorrangig langsam erhartende Zemente zum Einsatz kommen. Dies können N-Zemente, LH-Zemente (low heat) oder auch für ganz spezielle Anforderungen VLH-Zemente (very low heat) sein. Auch mit diesen Zementen können Betone höherer Festigkeitsklassen hergestellt werden. Gegebenenfalls ist dabei der Zementgehalt zu erhöhen.

Die Tafeln 4 und 5 zeigen die Hydratationswärmeentwicklung und die Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente. Weiterführende Angaben können dem Zementmerkblatt B1 „Zemente und ihre Herstellung“ entnommen werden.

Tafel 5: Festigkeitsentwicklung von Beton (Anhaltswerte)

Zementfestigkeitsklasse	ständige Lagerung bei	Entwicklung der Betondruckfestigkeit ¹⁾ in % nach				
		3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	90 Tagen	180 Tagen
VLH III 22,5	+ 20 °C + 5 °C	20 ... 30 ²⁾ 10 ... 20	40 ... 55 10 ... 20	100 45 ... 60	115 ... 140 ²⁾	130 ... 160 ²⁾
32,2 N	+ 20 °C + 5 °C	30 ... 40 10 ... 20	50 ... 65 20 ... 40	100 60 ... 75	110 ... 125 ²⁾	115 ... 130 ²⁾
32,5 R; 42,5 N	+ 20 °C + 5 °C	50 ... 60 20 ... 40	65 ... 80 40 ... 60	100 75 ... 90	105 ... 115 ²⁾	110 ... 120 ²⁾
42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	+ 20 °C + 5 °C	70 ... 80 40 ... 60	80 ... 90 60 ... 80	100 90 ... 105	100 ... 105 ²⁾	105 ... 110 ²⁾

¹⁾ Die 28-Tage-Druckfestigkeit bei ständiger 20 °C-Lagerung entspricht 100 %. In Anlehnung an frühere Werte für verschiedene Zementfestigkeitsklassen, vgl. Dahms/Wischers: Zement-Taschenbuch 1984, S. 261 ff., ermittelt an Betonen ohne Zusatzstoffe.

²⁾ Für eine ständige Lagerung bei +5 °C liegen keine Werte vor.

Aufgrund des zu erwartenden Wasserverlusts durch Verdunstung während des Transports und wegen des schnelleren Erstarrens muss der Beton bei hohen Temperaturen weicher ausgeliefert werden als bei kühltem Wetter. Daher sollte bei der Auslieferung des Betons ein höheres Vorhaltemaß für die Konsistenz berücksichtigt werden, damit der Beton an der Übergabestelle der bestellten Konsistenz entspricht.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Zugabe von erstarrungsverzögernden und/oder verarbeitungsverlängernden Zusatzmitteln. Bei Verzögerern ist allerdings zu beachten, dass die Wirkung bei heißem Wetter stark von der Ausgangskonsistenz abhängig ist. Es sollte ein Beton der Konsistenzklasse F4/F5 oder weicher gewählt werden, da unterhalb dieser Konsistenzbereiche die verzögernde Wirkung nicht wirksam wird. Bei steifen Betonen, wie z. B. bei Konsistenzklasse C1, hilft die Zugabe von Verzögerern nicht.

Auch kann es passieren, dass bei hohen Temperaturen ein Umsschlagen des Zusatzmittels in eine beschleunigte Abbindereaktion stattfindet. Deshalb sind für diese Maßnahmen umfangreiche, auf die vorgesehenen Temperaturbereiche abgestimmte, Erstprüfungen durchzuführen.

Ebenfalls hilfreich kann die Reduzierung des Zementleimgehalts bei gleichzeitiger Verwendung verflüssigender Zusatzmittel sein.

Reduzierung der Frischbetontemperatur

Eine Reduzierung der Frischbetontemperatur kann i. d. R. durch Senken der Temperaturen der verwendeten Ausgangsstoffe erzielt werden.

Der Zement kommt im Sommer meistens fabrikwarm zur Misch-anlage. Es existieren zwar getestete Methoden zur Zementkühlung in einer Betonmischanlage [8], jedoch ist der Einfluss der Zementtemperatur auf die Betontemperatur eher gering. Ist der Zement um 10 °C kühler, reduziert sich die Betontemperatur nur um ca. 1 °C (siehe unten stehende Modellrechnungen). Mehr Erfolg bringen die Kühlung des Zugabewassers und vor allem die Kühlung der Gesteinskörnungen.

Eine gängige Methode ist es, die Gesteinskörnungen nicht der direkten Sonneneinstrahlung auszusetzen. Sinnvoll sind Überdachungen oder ein Abdecken durch Matten oder Planen und eine Berieselung der groben Gesteinskörnung mit Wasser. In letzter Zeit sind spezielle Kühlsysteme entwickelt worden, bei denen die Gesteinskörnungen über mehrere Kammern durch Wasser gekühlt werden können. Mit diesem Verfahren ist es möglich, dass die Gesteinskörnung bei einer Wassertemperatur von ca. 6 °C somit auf ca. 8 °C abgekühlt werden kann. Der Vorteil ist, dass das gekühlte Wasser gleichzeitig als Zugabewasser eingesetzt werden kann.

Gesteinskörnungen (im Regelfall ab 8 mm) können ggf. auch mit flüssigem Stickstoff oder Eis gekühlt werden.

Die Wassertemperatur kann herabgesenkt werden, wenn z. B. kühles Brunnenwasser als Zugabewasser verwendet wird. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Wasser durch Scherbeneis, welches beim Mischen zugegeben wird, zu ersetzen. Einige größere Mischanlagenhersteller bieten auch bereits entsprechende Anlagensysteme zur Scherbeneisherstellung an. Alternativ kann sich auch der Einsatz von Kunstschnee,

der einen Teil des Zugabewassers ersetzt, als sinnvoll erweisen, wobei hierbei jedoch eine entsprechende Anlagentechnik erforderlich ist. Mit beiden Verfahren kann in Abhängigkeit der Zugabemenge des Scherbeneises bzw. des Kunstschnees eine Abkühltemperatur des Frischbetons von max. bis zu 8 K erreicht werden.

Modellrechnungen zur Ermittlung der Frischbetontemperatur

Grundlage ist die bereits in Abschnitt A Betonieren bei kalter Witterung vorgestellte Näherungsformel (Gl. 2) für die Ermittlung der Frischbetontemperatur bei einem Zementgehalt von 300 kg/m³,

$$T_{c,fr} = 0,1 \cdot T_z + 0,2 \cdot T_w + 0,7 \cdot T_g \quad [^{\circ}C] \quad \text{Gl. 2}$$

$T_{c,fr}$ = Frischbetontemperatur [°C]

T_z = Temperatur des Zements [°C]

T_w = Wassertemperatur [°C]

T_g = Temperatur der Gesteinskörnung [°C]

oder auch mit der in Bild 6 dargestellten grafischen Abschätzung.

Eine Möglichkeit der Abschätzung der Frischbetontemperatur bei beliebigen Betonzusammensetzungen liefert Gl. 3. Durch Umstellung können auch die erforderlichen Temperaturen der verwendeten Ausgangsstoffe ermittelt werden.

$$T_{c,fr} = \frac{0,84 \cdot (z \cdot T_z + g \cdot T_g + f \cdot T_f) + 4,2 \cdot w \cdot T_w}{0,84 \cdot (z + g + f) + 4,2 \cdot w} \quad [^{\circ}C] \quad \text{Gl. 3}$$

$T_{c,fr}$ = Frischbetontemperatur [°C]

T_z = Temperatur des Zements [°C]

T_g = Temperatur der Gesteinskörnung [°C]

T_f = Temperatur der Zusatzstoffe [°C]

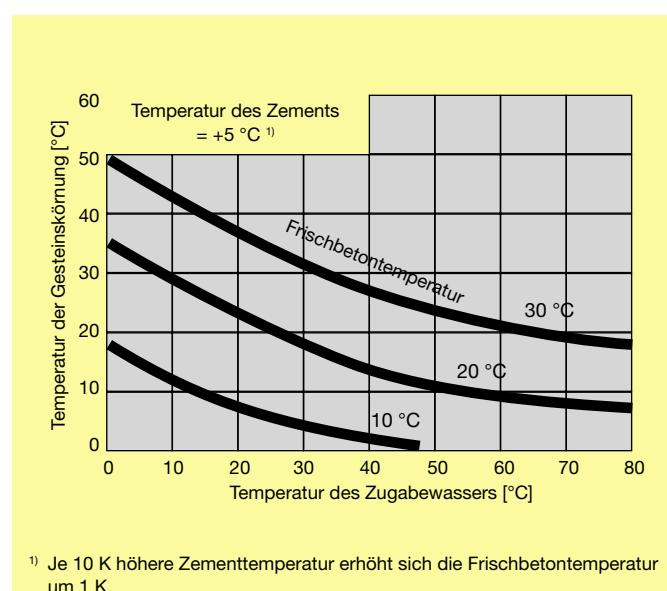
T_w = Temperatur des Wassers [°C]

z = Masse Zement [kg/m³]

g = Masse Gesteinskörnung [kg/m³]

f = Masse Zusatzstoffe [kg/m³]

w = Masse Wasser [kg/m³]



¹⁾ Je 10 K höhere Zementtemperatur erhöht sich die Frischbetontemperatur um 1 K.

Bild 6: Grafische Abschätzung der zu erwartenden Frischbetontemperatur

Beispiel 2:

Folgende Kennwerte der geplanten Betonzusammensetzung liegen vor. Welche Frischbetontemperatur ist unter diesen Voraussetzungen zu erwarten?

Ausgangsstoff	Masse [kg/m ³]	Temperatur [°C]
Zement	340	75
Gesteinskörnung	1800	27
Zugabewasser	150	25

$$T_{c,fr} = \frac{0,84 \cdot (340 \cdot 75 + 1800 \cdot 27 + 0 \cdot 0) + 4,2 \cdot 150 \cdot 25}{0,84 \cdot (340 + 1800 + 0) + 4,2 \cdot 150}$$

$$T_{c,fr} = 32,1 \text{ °C}$$

- Maßnahmen zur Senkung der Frischbetontemperatur sind erforderlich!

Beispiel 3:

Wie kalt muss das Zugabewasser sein, wenn die Gesteinskörnung durch Berieseln auf 21 °C abgekühlt werden kann, um eine Frischbetontemperatur von 26 °C zu erreichen?

$$26 = \frac{0,84 \cdot (340 \cdot 75 + 1800 \cdot 21 + 0 \cdot 0) + 4,2 \cdot 150 \cdot T_w}{0,84 \cdot (340 + 1800 + 0) + 4,2 \cdot 150}$$

$$26 = \frac{53172 + 630 \cdot T_w}{2427,6}$$

$$T_w = 15,8 \text{ °C}$$



Bild 7: Vermehrte Kontrolle der Frischbetontemperatur auch nach Probekörperherstellung

Aus diesen Modellrechnungen ist deutlich erkennbar, dass der größte Effekt über die Kühlung der Gesteinskörnung erreicht werden kann.

■ 3 Maßnahmen durch den Verwender (ausführende Bauunternehmung)

Vorbereitung der Betonage

Das Baustellenpersonal sollte mit den Besonderheiten und den Anforderungen an das Betonieren bei hohen Temperaturen vertraut sein. Manchmal ist es sinnvoll, einen Qualitätssicherungsplan mit den vorgesehenen Maßnahmen zu erstellen. Auf der Baustelle sollten genügend Maschinen, Gerätschaften und Personal vorgehalten werden, um ein reibungsloses und zügiges Betonieren zu garantieren. Um ein Aufheizen der Schalung und der Bewehrung zu vermeiden, sollte die Schalung und die Unterlage vor dem Einbringen des Frischbetons mit Wasser benetzt werden. Ein übermäßiges Wässern (Ansammlung von Wasserlachen) sollte aber vermieden werden.

Einbringen und Verarbeiten von Beton

Da sich auf dem Transport vom Produktionsort zur Baustelle das Fahrzeug bzw. der Beton aufheizen kann, sollte bei der Auswahl des beauftragten Transportbetonwerks darauf geachtet werden, dass möglichst ein Herstellwerk mit kurzen Anfahrwegen gewählt wird. Im Vorfeld sollte zwischen Bauleitung und Transportbetonwerk eine Abstimmung über die genaue Einbauleistung und die vorgesehenen Lieferintervalle erfolgen. Oft ist es sinnvoll, die Betonage auf eine kühlere Tageszeit, z. B. in die sehr frühen Morgenstunden oder in die späten Abendstunden, zu verlegen.

Des Weiteren ist darauf zu achten, dass Wartezeiten weitgehend ausgeschlossen werden. Sind unvorhergesehene Wartezeiten nicht zu vermeiden, muss das Transportbetonfahrzeug vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden, wenn möglich durch Beschattung des Fahrzeugs. Die Fahrmechertrommel kann z. B. auch mit Wasser berieselten werden. Außerdem sollte das Lieferwerk und ein Betontechnologe verständigt werden.

Falls organisatorisch möglich, ist das Fördern des Betons mit der Pumpe dem Krankübel vorzuziehen.

Handelt es sich um eine Baustelle der Überwachungsklasse 2 oder 3, empfiehlt es sich, die Frischbetontemperatur nicht nur bei der Probekörperherstellung zu messen und zu dokumentieren, sondern darüber hinaus auch in regelmäßigen Abständen weitere Kontrollen durchzuführen. Gerade im Zusammenhang mit einem eventuell temperaturbedingten schnelleren Ansteifen des Betons kann diese Maßnahme sehr sinnvoll sein. Die Betonprobekörper sollten zur Vermeidung eines möglichen Festigkeitsverlustes direkt nach der Herstellung bei ca. 20 ± 2 °C gelagert werden.

Auf das Bauvorhaben abgestimmte Nachbehandlung

Die Nachbehandlung hat unmittelbar nach dem Einbau zu erfolgen. In DIN EN 13670 [1] / DIN 1045-3 [2] sind verschiedene Nachbehandlungsarten aufgeführt. Für heiße Umgebungsbedingungen über 25 °C sind dies:

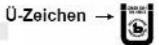
Name des Werkes Mustermann GmbH & Co.KG Beton		Ü-Zeichen → 	28.03.2014
Hugo GmbH		X	LF: 005521
6 m³ 125434 XC4, XF1 WF C30/37 F3 16	mittel	60	30
CEM III/A 42,5 N EFA-KM/C BV	CI 0,4	Do-J-7705	
			
			

Bild 8: Lieferschein mit Angaben zur Festigkeitsentwicklung

- Abdecken oder Nachbehandlungsfilm (Curing) aufsprühen und mit Wasser benetzen
- Zusätzlich:
 - Holzschalung nassen,
 - Stahlschalung vor Sonne schützen und
 - freie Betonoberflächen in der Schalung abdecken und benetzen

Das Nachbehandlungsmittel Curing sollte jedoch nur als erster Verdunstungsschutz betrachtet werden. Es kann mit handelsüblichen Geräten, wie z. B. einer Gloriaspritze, auf die mattfeuchte Betonoberfläche gesprüht werden. Das Aufbringen muss vollflächig und so früh wie möglich erfolgen. Bei warmen Temperaturen, starker Sonneneinstrahlung und/oder Wind sind

Tafel 6: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen nach DIN EN 13670 [1]/DIN 1043-3 [2] für alle Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM für Temperaturen $\geq 25^\circ\text{C}$

Oberflächentemperatur	Mindestdauer Nachbehandlung ¹⁾ [Tage]			
	Festigkeitsentwicklung Beton $r = f_{cm2}/f_{cm28}$			
	schnell	mittel	langsam	sehr langsam
$^\circ\text{C}$	$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$
$^\circ\text{C} \geq 25$	1 (2)	2 (4)	2 (4)	3 (6)

¹⁾ Klammerwerte gelten bei Anwendung für Betone der Expositionsklasse XM

Tafel 7: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen nach dem Alternativverfahren für die Expositionsklassen XC2, XC3, XC4 und XF1

Frischbetontemperatur	Mindestdauer Nachbehandlung [Tage]			
	Festigkeitsentwicklung Beton $r = f_{cm2}/f_{cm28}$			
	schnell	mittel	langsam	sehr langsam
$^\circ\text{C}$	$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$
$^\circ\text{C}_{fb} \geq 15$	1	2	4	sehr langsam

zusätzliche Maßnahmen, wie Abdecken des Frischbetons mit Folie und Isoliermatten als Hitzeschutz oder auch Auflegen wasserspeichernder Materialien und ständiges Feuchthalten, eventuell in Verbindung mit Folie als Verdunstungsschutz, erforderlich. Beim Aufsprühen von Wasser ist darauf zu achten, dass es nicht auf die erhitze Betonoberfläche aufgebracht wird, und dass kein

Tafel 8: Bauteilbezogene Nachbehandlungstabelle

Pos.	Durch Betonzusammensetzung abgedeckte Expositionsklasse	Festigkeitsklasse	Festigkeitsentwicklung M = mittel S = schnell	Nachbehandlungsdauer in Abhängigkeit der Lufttemperaturen					Bauteil (Beispiele)
				5 – 10 °C	10 – 15 °C	15 – 25 °C	$\geq 25^\circ\text{C}$	< 5 °C	
				[Tage]	[Tage]	[Tage]	[Tage]	[Tage]	
1	X0	C12/15	—	—	—	—	—	—	Sauberkeitsschicht
2	XC4, XF1, XA1, (WU)	C25/30	M	6	4	2	2		Fundamente, Bodenplatten - mit WU-Anspruch - ohne WU-Anspruch
3	XC4, XF1, XA1, (WU)	C25/30	M	6	4	2	2		
4	XC4, XF1, XA1	C30/37	M	6	4	2	2		C30/37 (CEM III/A 42,5) Wände, Decken - Innenraum - Außenbereich - erdberührend
5	XC4, XF1, XA1	C30/37	M	6	4	2	2		
6	XC4, XF1, XA1	C30/37	M	6	4	2	2		
7	XC4, XF1, XA1	C30/37	M	6	4	2	2		
8	XC4, XF1, XA1	C30/37	M	6	4	2	2		
9	XC4, XF1, XA1	C30/37	M	6	4	2	2		
10	XC4, XF1, XA1	C35/45	M	6	4	2	2		
11	XC4, XF1, XA1	C35/45	M	6	4	2	2		
12	XC4, XF1, XA1	C35/45	M	6	4	2	2		
13	XC4, XF1, XA1	C45/55	M	6	4	2	2		
14	XC4, XF1, XA1	C45/55	M	6	4	2	2		
15	XC4, XF1, XA1	C35/45	S	3	2	1	1		Stützen in Weißbeton

Die Nachbehandlungsdauer ist um die Zeit zu verlängern, während die Temperatur unter 5 °C lag.

fließendes und auch kein kaltes Wasser verwendet werden darf (Temperaturschock, Rissbildung).

Die Nachbehandlungsdauer richtet sich auch hier nach den Expositionsklassen, der Luft- bzw. der Oberflächentemperatur und der Festigkeitsentwicklung des Betons (siehe auch Zementmerkblatt B 8 „Nachbehandlung von Beton“ [4]). Der Vollständigkeit halber sind aus [4] die wesentlichen Auszüge, die die Nachbehandlung bei hohen Temperaturen betreffen, nachfolgend aufgeführt.

Die Festigkeitsentwicklung r gibt das Verhältnis der 2-Tagefestigkeit zur 28-Tagefestigkeit (Bild 3) an und ist abhängig von der Betonzusammensetzung. Der r -Wert wird vom Transportbetonwerk angegeben und findet sich neben dem Betoneigenschaftsverzeichnis auch auf dem Lieferschein (Bild 8) wieder. Bei heißen Witterungsbedingungen sollte man eher auf Betone mit schneller Festigkeitsentwicklung verzichten und stattdessen Betonzusammensetzungen mit mittlerer oder langsamer Festigkeitsentwicklung wählen.

Den Tafeln 6 und 7 kann die Mindestdauer der Nachbehandlungszeit beim Betonieren über 25 °C bzw. über 15 °C entnommen werden.

Für die Fußnoten und die in Klammer aufgeführten Werte gilt sinngemäß das Gleiche wie in Abschnitt A für die Tafeln 2 und 3.

C Bauteilbezogene Nachbehandlungstabelle

Bei größeren Bauvorhaben bzw. Baustellen mit erhöhten Anforderungen an die Qualitätssicherung bietet es sich an, der Baustelle eine bauteilbezogene Nachbehandlungstabelle mit Angaben der erforderlichen Betonzusammensetzung und den entsprechenden Daten für die Nachbehandlungsdauer an die Hand zu geben. Diese Methode gilt für alle Temperaturbereiche

und hat sich bei vielen Bauvorhaben bewährt. Tafel 8 zeigt exemplarisch eine solche Tabelle.

D Messung von Bauteiltemperaturen

Eine weitere Möglichkeit im Rahmen der Qualitätssicherung auf Baustellen besteht in der Messung von Bauteiltemperaturen, die auch Aussagen über die erforderliche Nachbehandlungszeit liefern können. Dies gilt sowohl für kalte, normale und heiße Umgebungstemperaturen, als auch alternativ für Massenbetone, und zwar zur Kontrolle der Begrenzung der Temperaturunterschiede zwischen Betonkern und Randzone.

Hierfür ist z. B. ein Reifecomputer [9] geeignet, der neben dem Reifegrad (Druckfestigkeit als Hinweis auf den Ausschaltertermin) auch Temperaturmessungen im Bauteil und an der Luft messen kann. Es werden an drei über den Querschnitt verteilten Punkten (oben, Mitte, unten) drei Messfühler fixiert, welche über einen gewissen Zeitraum, z. B. von ca. 21 Tagen die Bauteiltemperaturen messen und aufzeichnen (Bild 9). Der 4. Sensor misst die Umgebungstemperatur.

Die ermittelten Werte können direkt per Internet abgerufen werden und dann die Nachbehandlung entsprechend fortgeführt oder abgesetzt werden.

E Besonderheiten bei Sichtbeton und Straßenbaubetonen

Hinsichtlich der Ausführung von Sichtbetonbauwerken empfiehlt es sich, die Betonagen eher bei Lufttemperaturen zwischen ca. 12 °C und ca. 25 °C durchzuführen. Ebenso gilt für Arbeiten im Betonstraßenbau, dass die Einbaurbeiten nur im Temperaturbereich von 5 °C bis max. 25 °C auszuführen sind. Ansonsten sind die geschilderten Maßnahmen zu beachten.

Baustelle Massenfundament, Ergebnisse der Temperaturmessung

Beton: C35/45 – 360 kg CEM III/A 42,5 Frischbetontemperatur: 15 - 16 °C / Lufttemperatur max. 13 °C, min. 10 °C

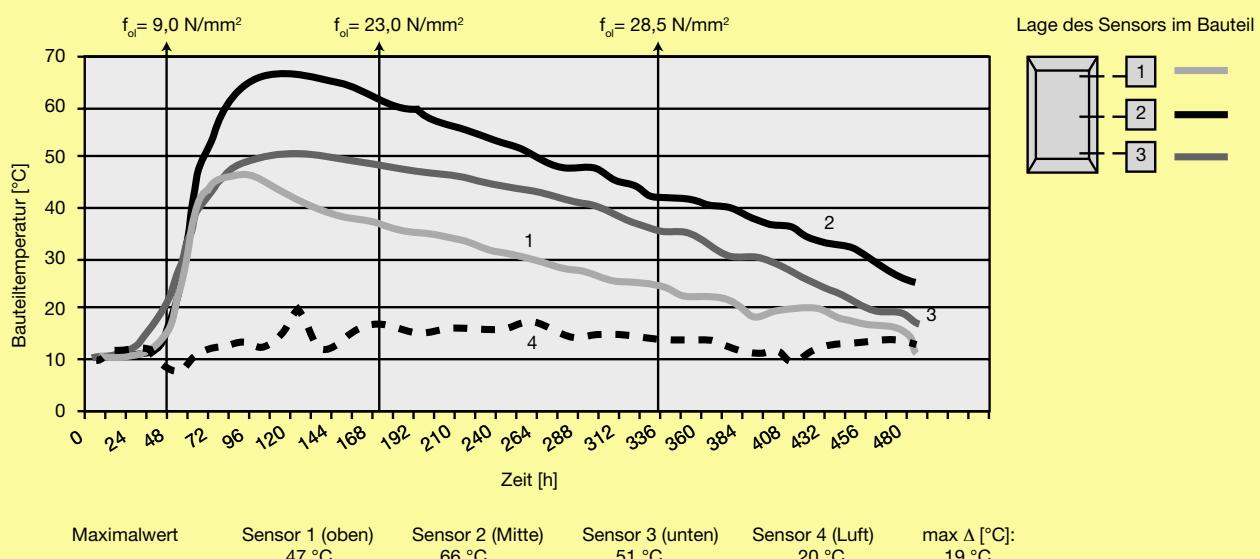


Bild 9: Beispiel für Temperaturmessungen im Bauteil

F Literatur

- [1] DIN EN 13670: 2011-03 Ausführung von Tragwerken aus Beton; Deutsche Fassung EN 13670:2009
- [2] DIN 1045-3: 2012-03 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN EN 13670
- [3] Richtlinie des DAFStb „Massige Bauteile aus Beton“, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, Ausgabe 2010-04
- [4] Zementmerkblatt B 8 „Nachbehandlung von Beton und Schutz von jungem Beton“, Ausgabe 2014, Verein Deutscher Zementwerke
- [5] Beton – Herstellung nach Norm. Arbeitshilfe für Ausbildung, Planung und Baupraxis, 20. überarbeitete Auflage, Düsseldorf 2014, BetonMarketing Deutschland GmbH
- [6] ZTV-W LB 215: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton, (Leistungsbereich 215). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Ausgabe 2004 mit Änderungen und 2010
- [7] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 3: Massivbau. Bundesanstalt für Straßenwesen, Fassung April 2012-03
- [8] Fachtagung „Beton für alle Wetter“: Erfahrungsberichte aus der Bauausführung bei extremen Temperaturen, Dr.-Ing. Monika Helm, Berlin, 22.11.2012
- [9] www.reifecomputer.de

Beratung und Information zu allen Fragen der Betonanwendung

Herausgeber

InformationsZentrum Beton GmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

www.beton.org

Kontakt und Beratung vor Ort

Büro Berlin, Kochstraße 6–7, 10969 Berlin, Tel.: 030 3087778-0, berlin@beton.org

Büro Hannover, Hannoversche Straße 21, 31319 Sehnde, Tel.: 05132 502099-0, hannover@beton.org

Büro Beckum, Neustraße 1, 59269 Beckum, Tel.: 02521 8730-0, beckum@beton.org

Büro Ostfildern, Gerhard-Koch-Straße 2+4, 73760 Ostfildern, Tel.: 0711 32732-200, ostfildern@beton.org

Verfasser

Dipl.-Ing Michaela Biscoping, Dr.-Ing. Matthias Beck, InformationsZentrum Beton GmbH