Betonieren bei hohen sommerlichen Temperaturen

Betoneinbau bei hohen sommerlichen Temperaturen

Beim Betonieren im Sommer steigen bei hohen Lufttemperaturen auch die Frischbetontemperaturen durch Erwärmung der Ausgangsstoffe an. Hohe Einbautemperaturen führen zu einem frühzeitigeren Ansteifen und einer schnelleren Erhärtung des Betons. Damit ist wiederum eine höhere Wärmefreisetzung durch Hydratationswärme verbunden, die sich je nach Bauteilgeometrie und Konstruktion ungünstig auswirken kann. Insgesamt höhere Betontemperaturen während der Hydratation sowie hieran anschließende größere Temperaturunterschiede zwischen Kern- und Randzone führen innerhalb eines Bauteils zu erheblichen Eigenspannungen, die Risse auslösen können. Alle planerischen, betontechnologischen und ausführungstechnischen Maßnahmen im Sommer zielen darauf ab, möglichst geringe Frischbetontemperaturen, geringe Hydratationswärmeentwicklungen und eine Vergleichmäßigung der Bauteiltemperatur beim Abfließen der Hydratationswärme zu fördern. Hohe Temperaturunterschiede im Bauteil sind durch günstige Maßnahmen zu vermeiden. Die Maßnahmen können zunächst in ausführungstechnische und betontechnologische Maßnahmen unterschieden werden. Hinzu kommen konstruktive Randbedingungen, die planerisch im Vorfeld festgelegt werden und sich günstig oder ungünstig auswirken können. Hierzu gehören z.B. die Größe von Betonierabschnitten oder Sollrissfugen, die Dicke der Bauteile (Wärmestau), die Festlegung von LH-Zementen oder Vereinbarung späterer Nachweiszeitpunkte für die Druckfestigkeit, die Höhe der Druckfestigkeitsklasse, reibungsarme Lagerungen und viele Weitere.

Betontechnologische Maßnahmen werden im Vorfeld zwischen den Beteiligten oder vom Planer diskutiert und festgelegt. Ausführungstechnisch günstige Maßnahmen auf der Baustelle unterstützen den Einbau bei hohen sommerlichen Temperaturen, um übermäßige Rissbildungen und Verformungen in den Betonbauteilen zu vermeiden.

Bei hohen sommerlichen Temperaturen können auf der Baustelle besondere Vorsorgemaßnahmen oder wärmedämmenden Abdeckungen erforderlich bzw. sinnvoll sein, die der Planer im Leistungsverzeichnis (LV) hinreichend beschreiben muss. Übliche Nachbehandlungsmaßnahmen nach DIN EN 13670 und DIN 1045-3 bei Lufttemperaturen zwischen +5 °C bis + 30 °C sind vom Bauausführenden immer zu erbringen, besondere Maßnahmen zur Temperaturverringerung oder Vergleichmäßigung stellen jedoch besondere Nebenleistungen dar. Das Betonieren bei hohen sommerlichen Temperaturen stellt hinsichtlich der Rissbildung meist ein größeres Risiko als der Betoneinbau in der kälteren Jahreszeit dar.

Anforderungen aus Regelwerken an zulässige Temperaturen

DIN EN 13670 und DIN 1045-3:

Einzuhaltende Frischbetontemperaturen in Abhängigkeit der Lufttemperatur:

	Lufttemperatur			
	hohe sommerliche Temperaturen	zwischen +5 °C und –3 °C		Frost unter –3 °C
Randbedingung	-	-	wenn Zementgehalt < 240 kg/m³ oder LH-Zement (low heat)	-
Frischbetontemperatur	≤ + 30 °C	≥ +5 °C	≥ +10 °C	≥ +10 °C
Maßnahmen	(evtl. Kühlung des Frischbetons im TB-Werk anfragen)		Evtl. Winterbaumaßnahmen beachten	Frischbetontemperatur mindestens 3 Tage lang halten; Beton schützen, bis Festigkeit ausreichend (Winterbaumaßnahmen planen)

Grundsätzlich ist die Frischbetontemperatur im Sommer auf maximal 30 °C zu begrenzen. Sie stellt das Ausgangsniveau dar, zu der ein Temperaturanstieg ΔT durch Hydratationswärme hinzukommt. In der Summe ergibt sich je nach Dicke des Bauteils eine maximale Kerntemperatur. Diese sollten so niedrig wie möglich gehalten werden. Erst nach Überschreiten der Maximaltemperatur im Bauteil (ca. nach 12 – 24 h) beginnt kurz danach durch die einsetzende Abkühlung die Entstehung von Zugspannungen,

weil der Beton nunmehr schon einen ausreichenden Bauteilwiderstand gegenüber Formänderungen entwickelt hat. Wenn die Zugspannung schnell anwächst und die (ebenfalls erst anwachsende) Zugfestigkeit erreicht, entspannt sich das Bauteil durch Risse. Typische Risszeitpunkte liegen bei etwa 2-6 Tagen. Bleibt die Zugspannung gering bzw. wird der Anstieg verzögert, kann das Bauteil u.U. komplett rissfrei bleiben.

Vermeidung von Zwangsspannungen beim Betonieren

Während der Ausführung sollte durch günstige Maßnahmen versucht werden, Zwangs- und Eigenspannungen in den ersten Tagen nach Betoneinbau zu minimieren. Dies vermindert die Rissgefahr im jungen Beton. Neben den ausführungstechnischen können auch betontechnische Maßnahmen von der Bauleitung berücksichtigt werden. Es ist sinnvoll, alle Maßnahmen zur Temperatursteuerung sowie die Anordnung von Betonierfeldern frühzeitig mit dem Tragwerksplaner abzustimmen, da die Fugenplanung und möglicherweise das Bemessungskonzept hiervon beeinflusst wird.

Ausführungstechnische Maßnahmen:

- Frischbetontemperaturen kontrollieren; im Allgemeinen $t_{Frischbeton} \leq +30$ °C
- Übermäßige Temperaturschwankungen im Bauzustand vermeiden.
- Bei dickeren Bauteilen Betontemperaturunterschiede zwischen Kern und Rand vermindern (z.B. Wärmestau durch wärmedämmende Auflagen in der Randzone erzeugen; Kontrolle der Kern- und Randtemperaturen. Alternativ können auch Schalzeiten (Holz-/Kunststoffschalung) verlängert werden. Hierdurch entsteht ebenfalls ein Wärmestau in der Betonrandzone hinter der Schalhaut.)
- Unzulässige Austrocknung in der frühen Erhärtungsphase vermeiden (fehlende Nachbehandlung führt zu unkontrolliertem Frühschwinden und Rissbildung)
- Nachbehandlungsmaßnahmen so abstimmen, dass das Bauteil in der Randzone keinen Temperaturschock erfährt. Daher keinesfalls mit kaltem Wasser besprühen. Ebenso starke Auskühlung der Randzone vermeiden.
- Schnelle Oberflächenabkühlungen nach Überschreiten des Temperaturmaximums vermeiden
- Bewehrung kontrollieren: Sind Bewehrungszulagen bei Auswechselungen oder an Orten mit Zugspannungskonzentrationen (z.B. Ecken von Wandöffnungen) vorgesehen und vollständig eingebaut?
- Betonierzeitpunkte günstig wählen (z.B. später Nachmittag), um Aufheizungen durch Sonneneinstrahlung nicht mit dem Anstieg der Hydratationswärmeentwicklung zu überlagern.
- Betoniertakte benachbarter Felder sinnvoll wählen. Nicht schachbrettartig betonieren, sondern seitlich angrenzend oder Vor-Kopf-Betonage, um zweiseitige Einspannungen in der Abkühlphase der Hydratationswärme zu vermeiden. Vor-Kopf-Betonage bei Bauwerken mit Längsausdehnung ist vorteilhaft.
- Fallhöhen beim Betoneinbau kontrollieren. Schüttlagen nicht zu hoch anordnen (30 bis 50 cm). Bei dickeren Bauteilen sollten übereinander liegende Betonierabschnitte versetzt angeordnet werden
- Ausschalzeitpunkte ggf. nach hinten verschieben; rechtzeitige Folienabdeckung, um vor Wind und Austrocknung zu schützen.
- Unzulässig hohe Belastungen oder zu frühe Belastungen aus dem Baustellenbetrieb auf junge Betonbauteile vermeiden.
- Gefahr durch Regen (plötzliche Temperaturabkühlung)
- Zwang im Bauteil mindern durch z.B. Gleitschichten, Entkopplung des Baugrubenverbaus von Wänden oder ggf. Anordnung von Hydratationsgassen in Sohlplatten

Betontechnische Maßnahmen:

- Niedrige Frischbetontemperaturen im Sommer anstreben. Evtl. planerisch im LV begrenzen. Geringe Frischbetontemperaturen reduzieren die Zwangbeanspruchung signifikant.
- Geringe Temperatursteigerung bzw. –differenzen während der Erhärtung anstreben. Nach Möglichkeit langsam erhärtende Zemente verwenden (N-Zemente, CEM III-Zemente, LH-Zemente). Ggf. Ersatz von Zement durch Flugasche (Mindestzementgehalt beachten)
- bei flächigen ausgedehnten Bauteilen „schwindarme“ Betonzusammensetzungen bevorzugen (Zementleimgehalte ≤ 290 l/m³); Verringerung des Größtkorns nur vornehmen, wenn unbedingt nötig.
- Möglichst niedrige Zementgehalte verwenden.

- Bei größeren Bauteilen oder hohen Temperaturen ggf. Einsatz von verzögernden Zusatzmitteln prüfen, um einem frühen Ansteifen bei lagenweisen Einbau entgegenzuwirken.
- Der Nachweis der Druckfestigkeit sollte bei dickeren oder massigen Bauteilen abweichend von der üblichen 28-Tage Druckfestigkeit zu einem späteren Zeitpunkt z.B. nach 56 Tagen vereinbart werden. Dann können langsam erhärtende Zemente eingesetzt werden.

Maßnahmen zur Temperaturreduzierung wirken sich auch auf die Festigkeitsentwicklung aus. Eine langsamere Erhärtungsgeschwindigkeit geht mit einer langsamer wachsenden Zugfestigkeit einher. Dies ist bei der Einschätzung der Zwangsschnittgrößen im Rahmen der Bemessung zu berücksichtigen. Weiterhin sind ggf. die Ausschalzeitpunkte anzupassen.

Bei massigen Bauwerken aus Beton sind Eigen- und Zwangsspannungen in besonderer Weise zu berücksichtigen und betontechnologisch darauf abzuzielen, eine Verminderung der Wärmeentwicklung zu erreichen oder mindestens eine Vergleichmäßigung der Bauteiltemperatur sicherzustellen.

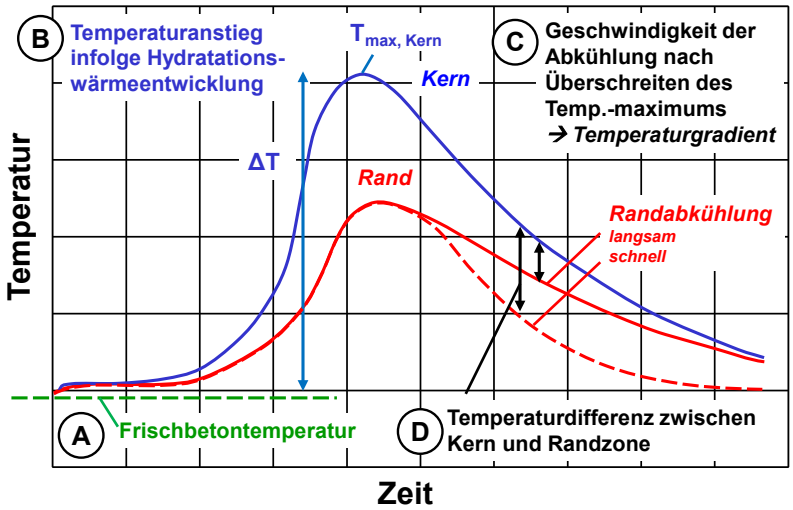

Bild: Einflussgrößen auf die Temperaturentwicklung vor allem bei dicken Bauteilen und Reduzierung der Eigen- und Zwangsspannungen durch Temperaturkontrolle während der Ausführung

Ziel zur Verringerung von Eigen- und Zwangsspannungen:
Alle vier Parameter A bis D gering halten!

Ausschalen und Nachbehandlung

DIN EN 13670 in Verbindung mit DIN 1045-3 gibt Ausschalfristen nicht verbindlich vor. Die Verantwortlichkeit liegt beim Bauleiter, wenn von der Traggerüstbemessung oder Schalungsplanung keine Hinweise zu Mindestfestigkeiten enthalten sind. Als Verantwortlicher muss er auf eine ausreichende Festigkeit zum Zeitpunkt des Ausschalens achten. Das Eigengewicht und alle zusätzlichen Lasten aus dem Arbeitsbetrieb müssen sicher aufgenommen werden können. Bauteilverformungen sollten gering bleiben. Gerade zu frühes Belasten von Betonbauteilen kann zu einer unplanmäßigen Erhöhung der Kriechverformungen führen, da die Endkriechzahl von dem Zeitpunkt des Belastungsbeginns abhängt. Gegebenenfalls sind Hilfsstützen anzuordnen.

Hohe Betontemperaturen bewirken einen sehr schnellen Temperaturanstieg infolge Hydratation. Dadurch entstehen große Temperaturdifferenzen zwischen Kern und Rand im Bauteil. Diese können ab ca. $\Delta T \geq 15$ K in der Abkühlungsphase mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Rissen führen. Temperaturschocks auf der Betonrandzone kurz nach dem Ausschalen sind vermeiden.

Vorschlag/Anhaltswerte für Ausschalfristen in Tagen nach DBV-Merkblatt „Ausschalen und Ausschalfristen“ (Vorauss.: max. 6 m lange Platten/Balken, Annahme $E = 0{,}70 \cdot E_{28d}$, Lastausnutzungsfaktor 70 %, Bauteiltemperatur ≥ 5 °C)

Bauteiltemperatur in °C	Festigkeitsentwicklung des Betons (s. Lieferschein)		
	schnell	mittel	langsam
≥ 15 °C	4 Tage	8 Tage	14 Tage
15 °C > Temp. ≥ 5 °C	6 Tage	12 Tage	20 Tage

Kühlen von Beton

In den Sommermonaten kann in Einzelfällen ein Kühlen des Betons in Erwägung gezogen werden. Dies ist immer mit zusätzlichen Kosten verbunden. Bei der Begrenzung von Frischbetontemperaturen werden i.d.R. die Ausgangsstoffe wie Gesteinskörnungen oder Wasser gekühlt. Durch Vorplanung der Silobeschickung kann eventuell auch Einfluss auf zu hohe Zementtemperatur im TB-Silo genommen werden.

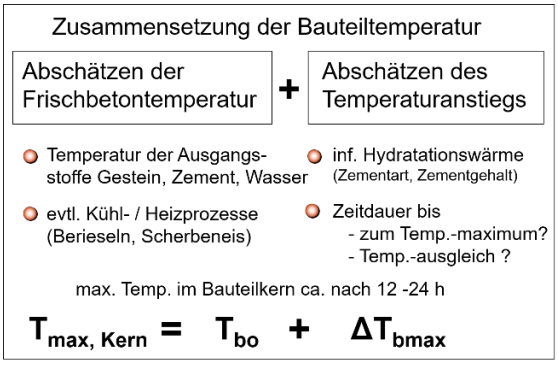

Bild: Komponenten der Betontemperatur im Bauteil

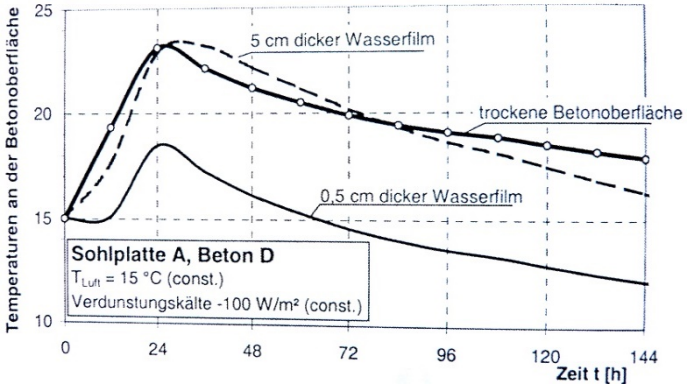

Bild: Besprühen mit dünnen Wasserfilmen bis zum Erreichen T_{max} im Kern kann durch die Verdunstungskälte (Phasenwechsel flüssig-dampfförmig) viel Wärme abführen (Quelle Springenschmid). Nach Überschreiten T_{max} Wasserbesprühen einstellen und Fläche abdecken.

Kühlmaßnahmen sind im Vorfeld sorgfältig zu planen und in Abstimmung mit den Transportbetonwerken festzulegen. Speziell das Kühlen mit Scherbeneis kann nicht von jedem Werk durchgeführt werden.

Kühlmaßnahmen bei der Herstellung des Frischbetons

- Zementtemperatur im Silo (Anlieferungszustand) minimieren (Zement wird frisch im Silofahrzeug mit teilweise bis zu 70°C angeliefert. Dies kann vermieden werden, wenn länger gelagerter Zement verfügbar ist).
- Ausgangsstoffe kühlen (Grobzuschlag in TB-Anlage durch Besprühen/Berieseln mit Wasser kühlen);
  Abkühlung des Frischbetons um etwa 2 bis 4 K ist möglich.
- Gekühltes Zugabewasser (ca. +8 °C Grundwasser statt Restwasser aus aufgeheiztem Becken); Abkühlung des Frischbetons um etwa 2 bis 4 K ist möglich.
- Teilweiser Ersatz von Zugabewasser durch Scherbeneis (ca. -5 °C kalte geraspelte Eissplitter); Umbau der TB-Mischanlage erforderlich; kleine ca. 1 bis 2 cm große Eissplitter, die während des Mischprozesses auftauen müssen. Sehr wirksame Kühlmethode: die Abkühlung des Frischbetons um etwa 5 bis 15 K ist möglich.

Kühlmaßnahmen des Frischbetons auf der Baustelle oder des Festbetons im eingebauten Zustand

- Einblasen Stickstoff N_2 in den Fahrmischer flüssig oder gasförmig; Betonabkühlung auf +5 °C möglich; je Kelvin Absenkung ist ca. 16 kg N_2 erforderlich; Temp. N_2 ist ca. – 196 °C, meist Lanzenkühlung im Fahrmischer, GAN : gaseous nitrogen; LIN : liquid nitrogen, Dauer des Einblasens ca. 8 min je Fahrzeug;
- Oberflächenkühlung des jungen Betons durch Aufsprühen von Wasser (nur in der Phase der Wärmeausdehnung bis zum Erreichen des Temperaturmaximums). Temperaturgradient kontrollieren: < 20 K anstreben
- Rohrinnenkühlung im Bauteil bei massigen Bauteilen. Anschließend Zementleimverpressung der Rohre.
  Betonabkühlung nach Einbau ist auf gewünschte Temperatur möglich
- Oberflächen von Sohlplatten: eine wirksame Wärmeabfuhr ist nach Springenschmid (s. Literatur) durch Besprühen mit Wasser in den ersten Stunden während des Temperaturanstiegs möglich. Nach dem Erreichen von T_{max} im Kern sollte das Wasserbesprühen eingestellt und Fläche vor Verdunstung geschützt werden. Bei dicken Platten hilft eine wärmedämmende Auflage (z.B. Winterschutzmatten), die Temperaturunterschiede zwischen Kern und Rand während der Abkühlung zu verringern.

Möglichkeiten zur Abkühlung des Frischbetons

Kühlverfahren	Abkühlung des Frischbetons*
Kühlung des Zugabewassers	um 2 bis 4 K
Zugabe von Scherbeneis	um 5 bis 15 K
Besprühen der Grobzuschläge	um 2 bis 4 K
Vakuumkühlung der Zuschläge	um 5 bis 8 K
Flüssig -Stickstoff	auf rd. 5 °C

* Zementgehalt: rund 300 kg/m³; w/z-Wert: rd. 0,50

Quelle: Springenschmid, R. und R. Breitenbücher in: Zement und Beton 32, 1987

Besondere Regelungen nach ZTV-W LB 215

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt

Für Bauteile mit kleinsten Abmessungen < 0,8 m ist die Frischbetontemperatur T_{Beton} an der Übergabestelle auf die zulässige Frischbetontemperatur an der Einbaustelle (max. +30 °C) abzustimmen. Für Planiebereiche (=Planum; abgezogene horizontale Betonoberfläche) ist die zulässige Frischbetontemperatur an der Einbaustelle auf max. +25° C zu begrenzen.

Tabelle aus ZTV-W LB 215: Begrenzung der Frischbetontemperaturen $T_{b,0}$, der adiabatischen Temperaturerhöhungen $\Delta T_{adiab,\ 7d}$ infolge Hydratationswärme sowie der maximalen Betondruckfestigkeit bei massigen Bauteilen (≥ 80 cm kleinste Abmessung).

Expositionsklassen (Tabelle gilt nur massige Bauteile)	Temperaturerhöhung $T_{adiab,\ 7d}$ [K]	max. Bauteiltemperatur $T_{b,0}$ + $\Delta T_{adiab,\ 7d}$ [K]	Begrenzung der Betondruckfestigkeit $f_{cm,\ 28d}$ [N/mm²]
XC1/XC2	≤ 28 (33)	≤ 53	≤ 41
XC1/XC2 + XA1	≤ 31 (36)	≤ 56	≤ 43
XC1/XC2 + XA2 (+XS2)	≤ 36 (41)	≤ 61	≤ 46
XC1…4 + XF3 (+XM1)	≤ 36 (41)	≤ 61	≤ 46
XC1…4 + XF4 + XS3 + XA2 + (XM1)	≤ 40 (45)	≤ 65	≤ 49

Klammerwerte: wenn $T_{b,0}$ ≤ 15 °C

Weiterführende Literatur

Springenschmid, R.: Zum Einfluß der Temperatur während der Nachbehandlung auf Risse in Bodenplatten und Weißen Wannen; Beton- und Stahlbetonbau, 2003, Band 98, Heft 11, Seite 654-660

Rostásy, F.S; Krauß, M; Budelmann, H.: Planungswerkszeuge zur Kontrolle der frühen Rissbildung in massigen Betonbauteilen, Teile 1 bis 7. In: Bautechnik 79 (2002)