

Auswirkungen des Klimas auf das Bauen mit Beton

Frank Dehn und Annika Schultheiß

Zusammenfassung

Durch den Klimawandel werden sich auch die Einwirkungen auf das Bauen im Allgemeinen, vor allem aber auf den Baustoff Beton im Speziellen verändern. In diesem Zusammenhang sind die zukünftig höchstwahrscheinlich häufig auftretenden Maximaltemperaturen über 30 °C zu nennen. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Frisch- und Festbeton abschätzen zu können, wurden im Rahmen dieses Beitrags unterschiedliche Regelwerke auf deren Gültigkeit überprüft, für den Fall, dass perspektivisch mit höheren Lufttemperaturen zu rechnen ist. Die Bemessungsmodelle der Regelwerke wurden mit Hilfe von aktuellen Klimadaten exemplarisch für Rheinstetten bei Karlsruhe bewertet. Aufgrund der Bewertung lässt sich Folgendes ableiten: der Einfluss steigender Lufttemperaturen wird sich auf die Frischbetoneigenschaften in der Zukunft kritischer auswirken. Sowohl die Hydratationswärmeentwicklung des Zements als auch die Oberflächenverdunstung des Frischbetons rücken stärker in den Fokus. Sie müssen durch praxistaugliche technologische Maßnahmen auf ein sinnvolles Maß reduziert werden. Die Eigenschaften des Festbetons sind von der Betontemperatur und dessen relativem Feuchtegehalt abhängig. Hierfür liegen jedoch noch keine normierten Materialmodelle vor. Jedoch führen nur wesentlich erhöhte Temperaturen in Kombination mit einem hohen Feuchtegehalt des Betons zu kritischen Festigkeitsverlusten. Derzeit wird nicht davon ausgegangen, dass die vom Klimawandel verursachten erhöhten Temperaturen solche kritischen Umgebungsrandbedingungen erzeugen werden, dass diese zu einer Beeinträchtigung der Festbetoneigenschaften führen werden. Jedoch berücksichtigen die gegenwärtig verfügbaren Regelwerke weder für die Frischbeton- noch für die Festbetoneigenschaften, die sich offensichtlich verändernden Klimarandbedingungen.

1 Allgemeines

Wie andere Industriezweige ebenfalls, so wird auch die Baubranche von den vorherrschenden Wetter- und Klimabedingungen beeinflusst. Bereits während der Planung eines Bauwerks muss das örtliche, ggf. auch regionale Wetter- und Klimageschehen beachtet werden. Entsprechend der geltenden nationalen und internationalen Regelwerke des Betonbaus müssen beispielweise wetterbedingte Einwirkungen, z. B. Wind, Schnee und Temperatur, bei der Bemessung von Betonbauwerken berücksichtigt werden. Auch während der Bauphase ist das Wetter und Klima für das Bauen – insbesondere mit Beton – von großer Bedeutung. Ungünstige Witterungsbedingungen wie Frost, Starkregen, Hitze und Sturm können teils in Kombination, den Baubetrieb negativ beeinflussen, wenn nicht gar gänzlich unterbinden.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) dokumentiert Tage mit Wetterextremen, welche das Arbeiten auf Baustellen nachweislich erschweren oder unmöglich machen, als sogenannte Schlechtwettertage. Allerdings werden für deren Bestimmung nur Lufttemperaturen unter 0 °C, die erreichten Schneehöhen und Niederschlagsmengen sowie die Niederschlagsdauer berücksichtigt.

Im Hoch-, Industrie- und Ingenieurbau ist die Betonbauweise weltweit von größter Bedeutung. Für den Baustoff Beton sind konstitutive Bemessungsmodelle und Stoffgesetze zur Beschreibung der Frisch- und Festbetoneigenschaften in verschiedensten Regelwerken erfasst. Diese basieren jedoch zumeist teilweise auf veralteten Wetter- bzw. Klimadaten. Daher muss deren Gültigkeit auf Grund der aktuellen Diskussionen zum Klimawandel verifiziert und ggf. neu bewertet werden.

1.1 Bauen im Klimawandel

Um den Einfluss des Klimawandels auf das Bauen im Allgemeinen zu beschreiben, wurden von Wienert et al. [1] die aus der Klimaprojektionen des IPCC [2] ableitbaren Eintretenswahrscheinlichkeiten extremer Witterungsereignisse untersucht (vgl. Tabelle 1). Die Auswirkungen des Klimawandels wurden anschließend für die Projektionszeiträume 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 analysiert.

Die Prognose zeigt, dass die Anzahl der Schlechtwettertage grundsätzlich zurückgehen wird. Dies wird vor allem auf den Rückgang der Frosttage zurückgeführt. Für das Bauen bedeutet dies, dass zukünftig besonders im Winterhalbjahr die Bautätigkeit gegenüber heute an weiteren Tagen aufrechterhalten werden kann.

Tab. 1: Wahrscheinlichkeit des Auftretens extremer Witterungsereignisse auf Basis beobachteter Trends und Analysen von Klimaprojekten für das 21. Jahrhundert nach IPCC 2007 [1]

Phänomen und Veränderung	Eintretenswahrscheinlichkeit im 21. Jahrhundert
Zunahme warmer / heißer Tage (90. Perzentil der Tagesmaximumtemperatur)	sehr wahrscheinlich
Häufigere Hitzewellen	sehr wahrscheinlich
Weniger kalte Tage, z. B. Frosttage (10. Perzentil der Tagesminimumtemperatur)	sehr wahrscheinlich
Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlag	sehr wahrscheinlich
Zunahme des Auftretens von Dürre	wahrscheinlich
Intensivierung außertropischer Stürme	unsicher
Zunehmende Häufigkeit von Gewittern und Tornados	unsicher

Das Auftreten von Schlechtwettertagen aufgrund von Starkniederschlag ist zwar sehr wahrscheinlich, jedoch wird dies durch den Rückgang der Frosttage überkompensiert. Daher kann für die Baubranche ein Rückgang von Schlechtwettertagen erwartet werden.

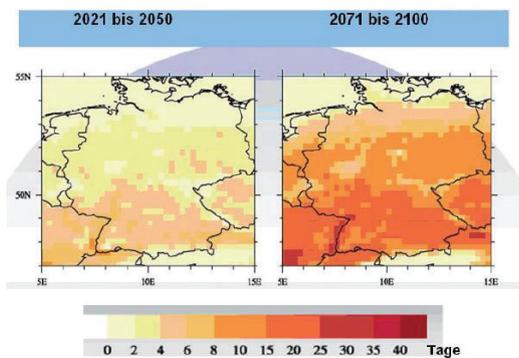


Abb. 1: Gemittelte Änderung der mittleren Häufigkeit heißer Tage (Tagesmaximumtemperatur mindestens 30 °C) relativ zu 1961 bis 1990 aus [1]

Die Anzahl der heißen Tage mit Temperaturen über 30 °C wird in Zukunft vor allem in Süddeutschland deutlich zunehmen (vgl. Abbildung 1). Die Prognose zeigt, dass es dort zum Ende des Jahrhunderts über 20 zusätzliche heiße Tage mehr als im Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 geben wird [1]. Diese höheren Absoluttemperaturen können zu einer erheblichen Behinderung des Baubetriebs führen. Insbesondere die Herstellung, die Verarbeitbarkeit sowie die Nachbehandlung des Baustoffs Beton können durch

die höheren Temperaturen mehr und mehr eingeschränkt sein. Trotz dieser erschwerten Umstände werden Hitzeperioden (zumindest gegenwärtig) nicht durch die Schlechtwettertage erfasst.

1.2 Planen und Klimawandel

Der Klimawandel beeinflusst den gesamten Planungssektor im Bauwesen. Auf städtebaulicher Ebene muss beispielsweise der Effekt der urbanen Wärmeinseln reduziert und der Umgang mit einem erhöhten Oberflächenabfluss durch Starkregen berücksichtigt werden.

Auch die ingenieurmäßige Planung neuer Bauwerke ist generell vom Klimawandel betroffen. Zukünftig gilt es, das zu starke Aufheizen des Gebäudeinneren im Sommerhalbjahr zu verhindern. Hierfür sind bauphysikalische Maßnahmen, wie Dämmung und Verschattung, konventionellen Klimaanlage vorzuziehen, um den Energieverbrauch des Gebäudes möglichst gering zu halten. Die Wärmedämmung der Gebäudeaußenhülle gegen Kälte bleibt trotz voraussichtlich milderer Winter weiterhin von großer Bedeutung, um den Heizenergiebedarf zu minimieren. Durch das häufigere Auftreten von Starkregenereignissen [1] wird zudem die Gebäudedichtigkeit und die Gebäudeentwässerung verstärkt in den Fokus des Planers rücken müssen.

Ebenfalls von den neuen klimatischen Bedingungen betroffen sind die Baustoffe, welche der Witterung ausgesetzt sind und trotzdem ihre Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit erhalten sollen. Daher werden im Folgenden die Einwirkungen des Klimawandels auf den Massenbaustoff Beton diskutiert.

1.3 Betonbau und Klimawandel

Der Betonbau und der Klimawandel stehen in einem engen Verhältnis zueinander. So entsteht bei der Herstellung einer Tonne des Hauptbindemittels Zement ca. 1 Tonne CO₂. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist bspw. durch den partiellen Ersatz des Portlandzementklinkers durch reaktive Zementersatzstoffe, z. B. durch Flugasche und Hüttensand, gegeben. Allerdings ist in Deutschland die zukünftige Verfügbarkeit dieser Betonzusatzstoffe fraglich: die Flugasche ist ein Abfallprodukt aus den bald abzuschaltenden Kohlekraftwerken und auch der Hüttensand fällt in den in Deutschland immer seltener werdenden Stahlwerken an. Dies hat zur Folge, dass sich die Betonzusammensetzung zwangsläufig ändern wird und somit auch die Stoff- und Bemessungsnormen anzupassen sind. Neue betontechnologische Konzepte, wie bspw. ein leistungsbezogenes Entwurfskonzept für den Baustoff Beton gewinnen daher in Zukunft mehr und mehr an Bedeutung. Aber auch der Klimawandel wird stärker an Beachtung gewinnen müssen und dessen Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften konsequenter zu bewerten sein.

1.3.1 Frischbeton

Für den Frischbeton sind neben Frost- auch die künftig häufiger vorkommenden heißen Tage (vgl. Abbildung 1) kritisch. Bei hohen Lufttemperaturen muss die Frischbetontemperatur begrenzt werden, um die mechanisch-physikalischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit zielsicher und reproduzierbar zu erreichen. Als Beispiele seien hierfür die technologische Beherrschung des plastischen Schrumpfen, die temperaturinduzierte Rissbildung sowie das Trocknungsschwinden des Betons genannt [3].

Zudem kann es an heißen Tagen mit hohen Verdunstungsraten, also niedriger Luftfeuchtigkeit und gleichzeitigem Windeinfluss, zu einer ungewollten Änderung des w/z-Werts im oberflächennahen, freibewitterten Bereich des Frischbetons kommen. Besonders anfällig hierfür sind Betone mit üblichen und ultrafeinen puzzolanischen Betonzusatzstoffen sowie anderen zementären Bindemitteln [3].

1.3.2 Festbeton

Auch die Festbetoneigenschaften können sich bei freibewitterten Bauteilen durch Wetterextreme verändern. So haben die mit der äußeren Witterung gekoppelte relative Feuchte des Betons sowie die Oberflächen- und -innentemperaturen einen bedeutenden Einfluss auf die erzielbaren Druck-, Zug- und Biegefestigkeiten sowie auf den E-Modul des Betons.

Auch die Dauerhaftigkeit des Betons kann durch die durch den verursachten Klimawandel erhöhten Temperaturen herabgesenkt werden. Baustoffdegradationen verlaufen bei erhöhten Temperaturen (vgl. bspw. die Arrhenius-Gleichung) deutlich beschleunigt ab. Dies betrifft sowohl die betonschädigenden mechanischen, physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse als auch die carbonatisierungs- und chloridinduzierte Bewehrungskorrosion.

Durch den zunehmenden CO₂-Gehalt in der Atmosphäre wird sich zudem die Carbonatisierungsgeschwindigkeit des Betons geringfügig erhöhen [4]. Der globale CO₂-Gehalt der Luft lag im Jahr 2018 im Durchschnitt bei $(407,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ (~0,04 %) und ist in den letzten 10 Jahren pro Jahr durchschnittlich um $2,26 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ gestiegen [5]. Da Abgase aus Verkehr und Industrie eine wesentlich höhere CO₂-Konzentration enthalten, können bereits kleine Mengen den CO₂-Gehalt der Luft lokal stark erhöhen. In Tunneln oder Parkgaragen kann dieser beispielsweise auf bis zu 0,1 % ansteigen [4].

2 Grundlagen zur Verdeutlichung des Klimawandels

Der mögliche Einfluss des Klimawandels auf den Betonbau in Deutschland wurde für die nachfolgenden Ausführungen mit Hilfe von frei verfügbaren Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus dem Climate Data Center (CDC) analysiert. Da im süddeut-

schen Raum der höchste Zuwachs an heißen Tagen prognostiziert wird, wurden hinsichtlich der Ableitung etwaiger Einwirkungsszenarien und der daraus denkbaren Konsequenzen, die Klimadaten der Messstation 4177 in Rheinstetten bei Karlsruhe zur Analyse herangezogen.

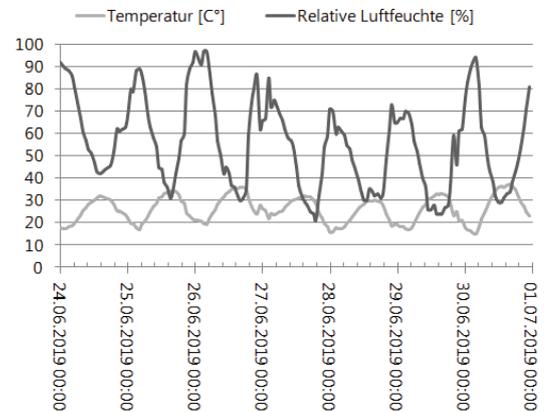


Abb. 2: Lufttemperaturen und relative Luftfeuchte einer beispielhaften Hitzewelle in Rheinstetten bei Karlsruhe im Juni 2019 [Messstation 4177, CDC DWD]

Eine beispielhafte einwöchige Hitzewelle, mit Temperaturen von über 30 °C, ist Ende Juni 2019 in Rheinstetten bei Karlsruhe aufgetreten. In Abbildung 2 sind die Verläufe der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte für diese Hitzewelle abgebildet.

3 Aktuelle Regelwerke für den Betonbau

3.1 Frischbeton

Das Erhärten des Zements ist ein exothermer, d.h. ein unter Wärmefreisetzung ablaufender Prozess, bei dem die unterschiedlichen Klinkerphasen des Bindemittels mit dem Wasser chemisch reagieren und ein energetisch niedrigeres, stabiles Niveau anstreben.

Die dabei entstehende Hydratationswärme ist von mehreren Parametern abhängig, zu denen in erster Linie die Zementart, die Zementmenge sowie die mit den äußeren Temperaturbedingungen korrelierende Frischbetontemperatur zu nennen sind. Hinzu kommen die spezifischen Wärmespeicherkapazitäten der Ausgangsstoffe und somit des Betons insgesamt. Zudem werden die Bauteildicke, das Alter sowie die Art und Dauer, mit der der Beton nachbehandelt wird, für die Betontemperatur maßgebend, vor allem dann, wenn der Beton mit der Umgebung wechselwirkt und Wärme abgeben kann. Besonders kritisch ist dann die Umgebungstemperatur. Bei einer Temperaturerhöhung von 10 K - im Temperaturbereich zwischen etwa 3 und 45 °C - wird die Wärmeentwicklung sowie die Hydratationsgeschwindigkeit des Zements verdoppelt [6].

Die Entwicklung der Betontemperatur beeinflusst den Eigenspannungszustand eines verformungsbehinderten Betonbauteils. Im Zuge seiner Erhärtung herrscht bei zwei unterschiedlichen Temperaturen im Beton ein spannungsfreier Zustand, die sogenannten Nullspannungstemperaturen (T_N).

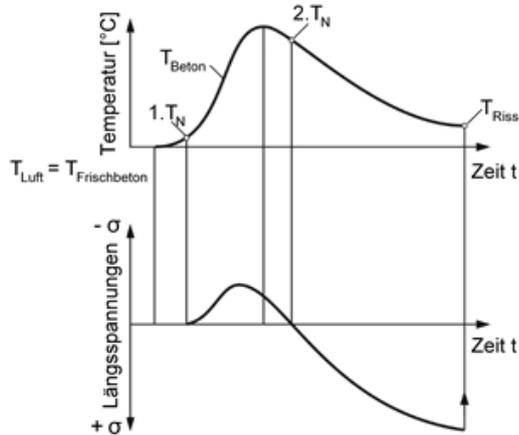


Abb. 3: Temperatur und Spannungsentwicklung in einem verformungsbehinderten Bauteil nach [6]

Wird die erste Nullspannungstemperatur überschritten, so steht das Bauteil zunächst unter Druck ($-\sigma$) (vgl. Abbildung 3). Kurz nach dem Erreichen der maximalen Betontemperatur wird die zweite Nullspannungstemperatur erreicht, ab welcher sich Zugspannungen ($+\sigma$) im Bauteil aufbauen. Die temperaturbedingten Eigenspannungen innerhalb eines (voll-)hydratisierten Betonbauteils sind von der Differenz des vorliegenden Temperaturgradienten zwischen äußere Lufttemperatur (T_{Luft}) und der Frischbetontemperatur (T_{Beton}) sowie der zweiten Nullspannungstemperaturverteilung abhängig. Da eine hohe zweite Nullspannungstemperatur auf eine hohe Rissgefahr hindeutet, sollte die Frischbetontemperatur begrenzt werden [6].

3.1.1 DIN 1045-3 und DIN EN 13670

Nach DIN EN 13670 in Verbindung mit DIN 1045-3 [7] muss bei Betonen der Überwachungsklasse 2 und 3, bei Lufttemperaturen größer als 30 °C, die Frischbetontemperatur gemessen werden. Die Frischbetontemperatur darf nur dann einen Wert von 30 °C überschreiten, wenn "durch geeignete Maßnahmen sichergestellt ist, dass keine nachteiligen Folgen [für den Beton] zu erwarten sind" [7]. Zudem muss mit geeigneten Nachbehandlungsmaßnahmen sichergestellt werden, dass die Verdunstungsrate des Wassers

an der Betonoberfläche des jungen Betons gering bleibt oder, dass die Betonoberfläche ständig feucht ist. Erst ab einer relativen Luftfeuchte über 85 % darf auf diese Maßnahmen verzichtet werden.

Nachbehandlungsmaßnahmen sollten jedoch nicht nur zur Vermeidung von Austrocknungen dienen. Auch eine zu starke Erwärmung des jungen Betons, beispielweise durch eine direkte Sonneneinstrahlung, sollte verhindert werden [6]. Dieser Tatsache wird momentan jedoch weder in der DIN 1045-3 noch in der DIN EN 13670 in ausreichendem Maße Rechnung getragen. Die Nachbehandlungsdauer von Beton in Abhängigkeit der jeweiligen Expositions-klasse ist in der DIN 1045-3 festgelegt [7]. Mit steigender Temperatur und schnellerer Festigkeitsentwicklung des Zements sinkt die Nachbehandlungsdauer, da auch der Hydratationsprozess demensprechend schnell abläuft. Die kürzeste Nachbehandlungsdauer benötigen Betone, die den Expositions-klassen X0 und XC1 nach DIN 1045-2 genügen. Sie müssen nur einen halben Tag nachbehandelt werden.

Die für die temperaturbedingten Eigenspannungen maßgebende zweite Nullspannungstemperatur (vgl. Abbildung 3) stellt sich üblicherweise ca. 8 bis 14 Stunden nach der Herstellung des Betons ein [6]. Der kritische Zeitraum in der Hydratationswärmeentwicklung ist daher in den meisten Fällen durch die eingeleiteten Nachbehandlungsmaßnahmen abgedeckt.

3.1.2 ACI Code 305.1-06

Im ACI Code 305.1-06 [3] werden Frischbetontemperaturen bis zu 35 °C zugelassen, wobei geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von der Oberflächenfeuchtigkeitsverdunstung nur dann getroffen werden müssen, wenn die Verdunstungsrate W einen Wert von 1,0 kg/m²/h überschreitet. Die Verdunstungsrate W [kg/m²/h] der Oberflächenfeuchtigkeit kann entweder mit aufbereiteten Nomogrammen (vgl. Abbildung 4) oder mit der sogenannten Menzel-Formel abgeschätzt werden (vgl. Gleichung 1):

$$W = 0,315 \cdot (e_0 - e_a \cdot h) \cdot (0,253 + 0,06 \cdot v) \quad (1)$$

mit:

e_0 = Sättigungsdampfdruck an der Verdunstungs-
oberfläche unter Berücksichtigung der
Betontemperatur als Oberflächentemperatur
[kPa]

e_a = Sättigungsdampfdruck der Umgebungs-
luft [kPa]

h = relative Feuchte der Umgebungsluft [-]

v = Windgeschwindigkeit [km/h]

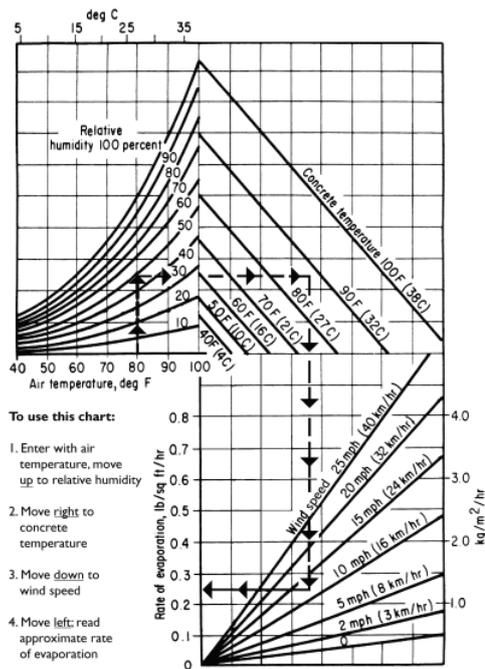


Abb. 4: Nomogramm zur Abschätzung der Verdunstungsrate [3]

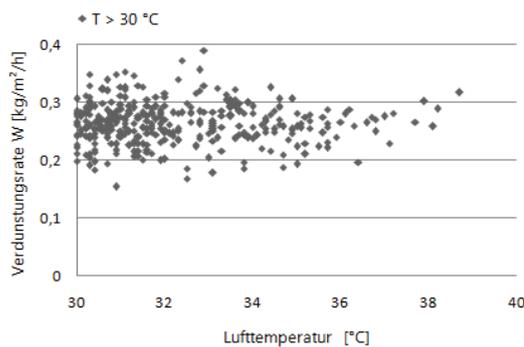


Abb. 5: Verdunstungsraten aller Temperaturereignisse größer 30 °C in Rheinstetten bei Karlsruhe bei einer Betontemperatur von 30 °C im Zeitraum 12.07.2018 bis 08.01.2020 [Messstation 4177, CDC DWD]

Zur Abschätzung, ob der oben angegebene Ansatz auch für örtliche Klimabedingungen berücksichtigt werden kann, wurden die stündlichen Klimadaten (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit) exemplarisch für die Wetterstation in Rheinstetten bei Karlsruhe mit Hilfe der Menzel-Formel (vgl. Gleichung 1) untersucht. In Abbildung 5 werden die Verdunstungsraten für alle Temperaturereignisse größer 30 °C unter der konservativen Annahme einer Betontemperatur von 30 °C dargestellt. Es wird deutlich, dass in dem betrachteten Zeitraum, der Grenzwert von 1,0 kg/m²/h nie auch nur annähernd erreicht wird. Wetterereignisse mit maximalen

Windgeschwindigkeiten erzielten ebenfalls keine kritischen Verdunstungsmengen, da die Lufttemperaturen entsprechend gering waren.

Temperaturstürze von warm zu kalt wirken sich grundsätzlich sehr ungünstig auf die Bauteilverformung aus, vor allem aber wenn sie dann auftreten, bevor die maximale Bauteiltemperatur und somit auch die zweite Nullspannungstemperatur erreicht wurde [8]. Dieser Aspekt wird bereits durch den ACI Code 305.1-06 [3] aufgegriffen. Darin wird empfohlen, Bauteile nach dem Betonieren unter heißen Bedingungen vor Temperaturstürzen von über 22 °C innerhalb der ersten 24 Stunden zu schützen, um thermisch-induzierte (Schwind-) Risse zu vermeiden.

In Abbildung 6 sind die täglichen Temperaturschwankungen exemplarisch für Rheinstetten bei Karlsruhe aufgetragen. Es wird deutlich, dass die täglichen Temperaturdifferenzen im Winter unbedenklich sind. Im Rest des Jahres sind besonders Tage mit hohen Lufttemperaturen von Temperaturstürzen betroffen. Bei der in Abbildung 2 dargestellten Hitzeperiode lag beispielsweise ein Temperatursturz von 22 °C vor.

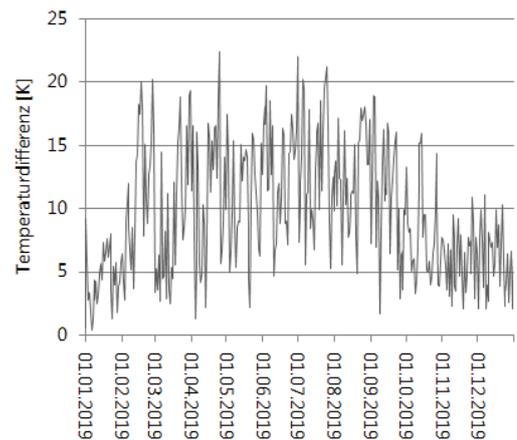


Abb. 6: Tägliche maximale Temperaturdifferenz in Rheinstetten bei Karlsruhe im Jahr 2019 [Messstation 4177, CDC DWD]

3.1.3 fib Model Code 2010

Die Umgebungstemperatur beeinflusst die Reaktionskinetik der Zementhydratation sowie den zeitlichen Erhärtungsverlauf des noch jungen Betons, bevor dieser 50 % der 28-Tage-Festigkeit erreicht hat. Im fib Model Code 2010 [9] wird für Betone unter Verwendung eines Portlandzements CEM I die Möglichkeit gegeben, das Betonalter für alle Verwendungszwecke unter Berücksichtigung der mittleren Temperatur pro gewähltem Zeitintervall (z. B. pro Tag) rechnerisch zu ermitteln. Das temperaturangepasste, d. h. wirksame Betonalter t_{tr} entspricht dann dem Alter eines Betons mit dem gleichen sogenann-

ten Reifegrad R , wenn der Beton unter einer konstanten Temperatur von 20 °C erhärten konnte (vgl. hierzu auch den nichtlinearen Ansatz in [11]).

Die Abbildung 7 veranschaulicht die im *fib* Model Code 2010 definierte, exponentielle Beziehung zwischen dem Betonalter und der Lufttemperatur. Wird die Letztere um 10 K auf sommerliche 30 °C gesteigert, so wird der Erhärtungsprozess bereits um ca. 50% beschleunigt. Temperaturen über 65 °C sollten vermieden werden, da diese eine verzögerte (sekundäre) Ettringitbildung im erhärteten Beton hervorrufen können. Es wird empfohlen, das temperaturangepasste (wirksame) Betonalter beispielsweise zur Bestimmung einer angemessenen Nachbehandlungszeit anzusetzen [10].

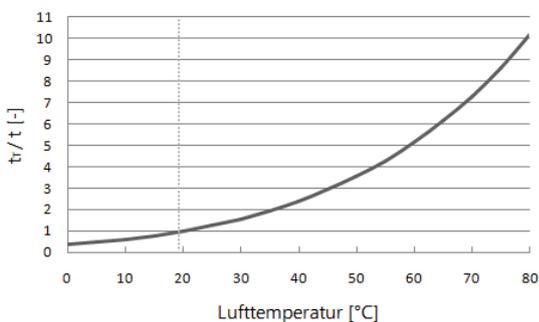


Abb. 7: Temperaturangepasstes (wirksames) Betonalter t_r , bezogen auf das tatsächliche Betonalter t nach *fib* MC 2010 [9]

3.2 Festbeton

3.2.1 DIN EN 1991-1-5

Bei der Bemessung von Tragwerken müssen nach DIN EN 1991-1-5 [12] die Temperatureinwirkungen zwingend berücksichtigt werden. Hierbei sollen die charakteristischen Werte der Temperatureinwirkungen eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von $0,02$ aufweisen. In DIN EN 1991-1-5 [12] wird die minimale Außenlufttemperatur auf -24 °C und die maximale Außenlufttemperatur auf $+37\text{ °C}$ festgelegt. Zudem wird die maximale Bemessungstemperatur je nach Oberflächenfarbe um bis zu 4 °C bei dunklen Oberflächen erhöht.

Eine exemplarische Auswertung der stündlichen Lufttemperaturen in Rheinstetten bei Karlsruhe (vgl. Abbildung 8) zeigt, dass im Jahr 2019 das 98 %-Quantil bei $29,9\text{ °C}$ lag. Zudem ist die maximale Bemessungstemperatur von 37 °C bei den stündlichen Messungen nur an drei Tagen überschritten worden.

Dies verdeutlicht, dass die Bemessungstemperatur des nationalen Anhangs von DIN EN 1991-1-5 [12] derzeit noch eine konservative Abschätzung ist. Die Prognosen zum Klimawandel deuten jedoch darauf hin, dass sich die Temperaturen im Allgemeinen erhöhen. Daher sollte die maximale Bemessungstemperatur in regelmäßigen Intervallen neu bewertet werden.

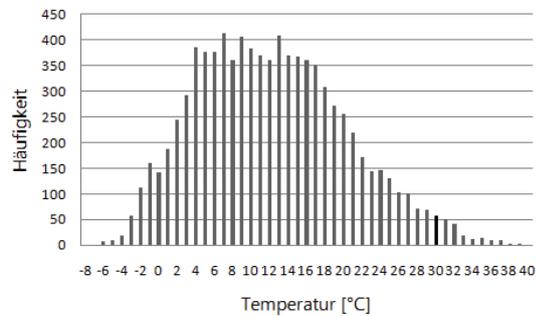


Abb. 8: Histogramm der stündlichen Lufttemperaturen in Rheinstetten bei Karlsruhe im Jahr 2019 [Messstation 4177, CDC DWD]

3.2.2 DIN EN 1992-1

Die Abhängigkeiten zwischen den Betoneigenschaften und den Klimaeinflüssen wird bislang in den Bemessungsnormen nur unzureichend berücksichtigt. Die Betondruck- und Zugfestigkeiten sowie der E-Modul werden nach DIN EN 1992-1-1 [11] nur in Abhängigkeit des Betonalters bestimmt. Bei wärmebehandelten Betonen darf das Betonalter angepasst werden. Das Berechnungsverfahren entspricht hierbei dem bereits vorgestellten Verfahren aus dem *fib* Model Code 2010 für das temperaturangepasste (wirksame) Betonalter t_r . In allen anderen Fällen werden Klimaeinwirkungen, wie z. B. Temperatur und relative Feuchte, auf die Betoneigenschaften nicht erfasst. Beim Schwinden und Kriechen hingegen wird die Umgebungfeuchte als maßgebende Klimaeinwirkung in der DIN EN 1992-1-1 berücksichtigt. Der Grundwert der unbehinderten Trocknungsschwinddehnung $\varepsilon_{cd,0}$ ist in Abbildung 9 in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte und der Betondruckfestigkeit dargestellt. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um erwartbare Mittelwerte mit einem Variationskoeffizienten von ca. 30% . Es wird deutlich, dass das Trocknungsschwinden bei niedriger relativer Luftfeuchte bei höherfesten Betonen weniger stark ausgeprägt ist als bei normalfesten Betonen.

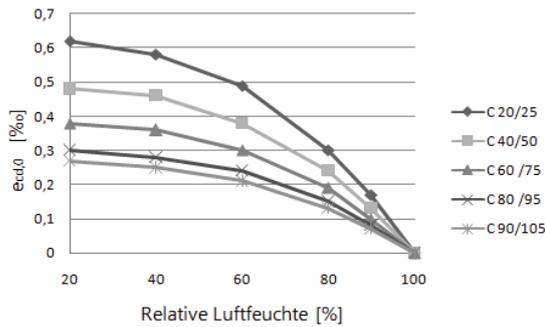


Abb. 9: Grundwerte für die unbehinderte Trocknungsschwinddehnung $\epsilon_{cd,0}$ in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit $f_{ck}/f_{ck,cube}$ [N/mm²] nach DIN EN 1992-1-1

In Abbildung 10 wurde die relative Luftfeuchtigkeit des Jahres 2019 in Rheinstetten bei Karlsruhe ausgewertet. Die mittlere monatliche Luftfeuchtigkeit unterliegt übers Jahr betrachtet keinen großen Schwankungen. Sie liegt stets zwischen 62 % und 87 %. Es wird jedoch auch deutlich, dass die relative Feuchtigkeit im Frühjahr und Sommer großen Schwankungen unterliegt und sich tagsüber wesentliche geringere Luftfeuchten einstellen können (vgl. Abbildung 2). Bei einer Bemessung mit der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit kann, im Vergleich zur Bemessung mit den Minimalwerten, das Trocknungsschwinden um dem Faktor 3,5 unterschätzt werden. Welcher Wert der relativen Luftfeuchtigkeit bei der Bemessung maßgebend wird, sollte ggf. einzelfallbezogen entschieden werden.

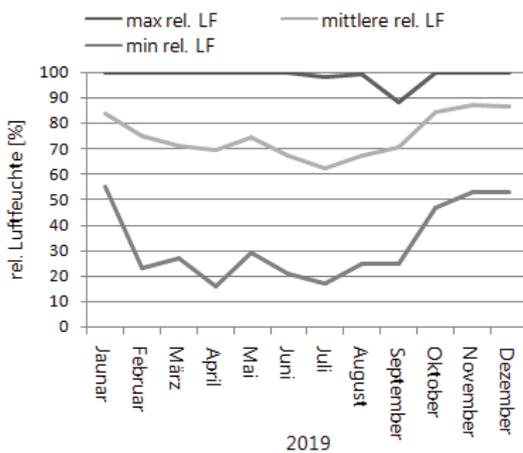


Abb. 10: Monatliche relative Luftfeuchte in Rheinstetten bei Karlsruhe im Jahr 2019. [Messstation 4177, CDC DWD]

Beim Kriechen kann bei der Berechnung der Kriechzahl $f(t,t_0)$ neben der relativen Umgebungfeuchte auch der Einfluss der Umgebungstemperatur durch das temperaturangepasste (wirksame) Betonalter t_t

berücksichtigt werden. Zudem kann die Endkriechzahl $f(\infty,t_0)$ mit Hilfe von einem Nomogramm bestimmt werden. Bei der Bemessung wird dann nur noch zwischen trockenen Innenräumen (50 % rel. LF) und Außenluft (80 % rel. LF) unterschieden.

In DIN EN 1992-1-2 werden bei der Tragwerksbemessung für den Brandfall ebenfalls Temperatureinwirkungen berücksichtigt. Die Materialmodelle sind jedoch nur für Erwärmungsgeschwindigkeiten zwischen 2 K/min und 50 K/min gültig [13] und können daher nicht für die Berechnung der witterungsbedingten Erwärmung von Beton angewendet werden.

3.2.3 fib Model Code 2010

Der Einfluss der Temperatur auf die Betoneigenschaften ist pränormativ im *fib* Model Code 2010 [9] ausführlicher beschrieben.

Die allgemeinen Bemessungsformeln zur Bestimmung der Betonfestigkeiten nach *fib* Model Code 2010 sind für die mittlere Temperatur (20 °C), unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankungen im Bereich von -20 °C und +40 °C gültig. Nachfolgende Abbildung 11 zeigt die Auswertung von üblichen Betonfestigkeitsmerkmalen in Abhängigkeit der Temperatur. Dabei ist $f_{cm}(T)$ die mittlere Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur, f_{cm} die mittlere Druckfestigkeit bei 20 °C, $f_{ctm}(T)$ die mittlere einachsige Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur, f_{ctm} die mittlere einachsige Zugfestigkeit bei 20 °C sowie $f_{ct,fl}(T)$ die mittlere Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur mit $f_{ct,flex}$ als mittlere Biegezugfestigkeit bei 20 °C

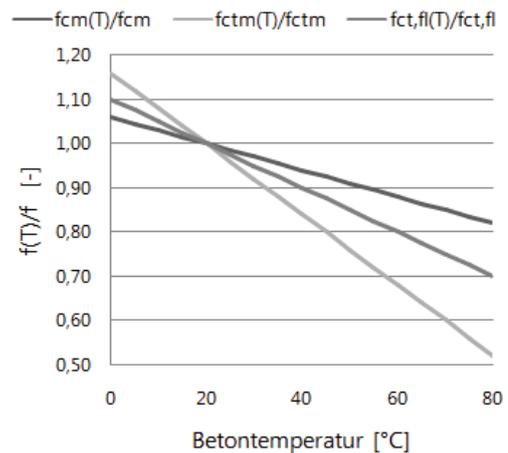


Abb. 11: Auswertung der Betonfestigkeiten in Abhängigkeit der Betontemperatur nach *fib* Model Code 2010 [9]

Aus Versuchen mit Portlandzement CEM I und Hochofenzement CEM III wurden Modelle entwickelt, welche den Einfluss der Temperatur auf die Betoneigenschaften genauer beschreiben. Um wesentliche

Abweichungen von der mittleren Betontemperatur zu berücksichtigen, können im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 80 °C, die Druck-, Zug- und Biegezugfestigkeiten angepasst werden. In Abbildung 11 sind die nach *fib* Model Code 2010 berechneten Festigkeiten unter Berücksichtigung der tatsächlichen Betontemperatur im Verhältnis zur Referenzfestigkeit bei 20 °C dargestellt. Es wird deutlich, dass erhöhte Temperaturen die Betoneigenschaften negativ beeinflussen. Nach dem *fib* Model Code 2010 nimmt bspw. die mittlere Druckfestigkeit f_{cm} pro 10 K Temperatursteigerung um 3 % ab, die Zugfestigkeit f_{ctm} weist sogar 5 % Festigkeitsverlust auf. Auch der E-Modul $E_{cm,28d}$ sinkt um 5 % pro 10 K Temperatursteigerung.

Im Allgemeinen ist das Ausmaß des Temperatureinflusses auf die Betoneigenschaften von dessen Feuchtegehalt und den Austrocknungsbedingungen abhängig. Auch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Zementsteins und der Gesteinskörnung haben einen bedeutenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Betons [10].

Im Temperaturbereich von 0 °C bis 80 °C hingegen sind die Änderungen der Betondruck- und -zugfestigkeit fast ausschließlich auf physikalische Effekte zurückzuführen, welche eine Änderung der kohäsiven Van der Waal'schen Anziehungskräfte, der Porosität und der Oberflächenenergie hervorrufen. Zudem wird insbesondere die Zugfestigkeit durch Mikrorissbildung reduziert. Diese entstehen zu einem Teil aus zunächst lastunabhängigen Eigenspannungen, welche durch nichtlineare Temperaturgradienten hervorgerufen werden und zu einem ungleichmäßigen Schwinden führen [10].

4 Neue Ansätze aus der Forschung

4.1 Betonsorten

Die Wärmeentwicklung während der Hydratation ist stark von der Betonzusammensetzung abhängig. Für das Betonieren an heißen Sommertagen ist die Verwendung von Zementen mit einer niedrigen Hydrationswärmeentwicklung eine wichtige Maßnahme zur Vermeidung von Rissen [6]. Daher ist es speziell für massige Bauteile sehr sinnvoll, zwischen Winter- und Sommerrezepturen zu unterscheiden, um die adiabatische Temperaturentwicklung zu begrenzen [8].

4.2 Frischbeton

Bei der Herstellung von dicken Bauteilen beeinflusst ein mäßiges Umgebungsklima die Frischbetontemperatur und den Erhärtungsprozess positiv. Als besonders günstig gelten winterliche Randbedingungen, bei welchen die Frischbetontemperatur nicht

größer als 15 °C und die mittlere Umgebungstemperatur während der Hydratationsphase nie über 10 °C steigt [8]. Da die Klimaprognosen [1] tendenziell eine Abnahme von Frosttagen ausweisen, könnten diese Bedingungen zukünftig im Winter häufiger vorherrschen. An heißen Sommertagen ist der Zeitpunkt der Betonage von großer Bedeutung. Betrachtet man die numerisch ermittelten Verläufe der zweiten Nullspannungstemperaturen der in Abbildung 12 dargestellten Betonplatte, wird deutlich, dass sich je nach Tageszeit gänzlich unterschiedliche Verläufe einstellen. Beim Betonieren am frühen Morgen entsteht ein positiver Nullspannungstemperaturgradient innerhalb der Betonplatte. Die Betonage am Nachmittag hingegen ist günstig, da sich ein negativer Gradient einstellt, welcher sich positiv auf das thermische Wärmeausdehnungsverhalten auswirkt [6].

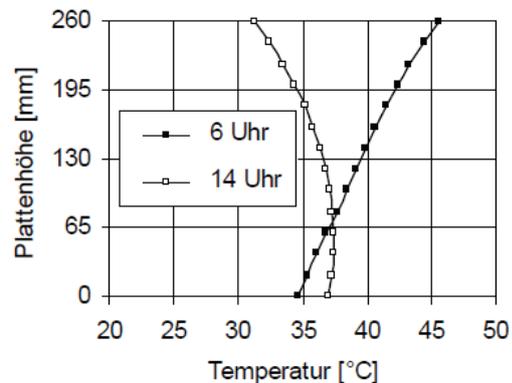


Abb. 12: Verlauf der Nullspannungstemperatur in einer Betonplatte mit einer Dicke von 260 mm nach einer Herstellung am Morgen (6 Uhr) und am Nachmittag (14 Uhr) eines heißen Sommertags aus [6]

4.3 Festbeton

Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von Beton unter erhöhten Temperaturen bis 100 °C haben ergeben, dass neben der Betontemperatur die relative Feuchte des Betons nicht vernachlässigt werden darf [13]. Die Betonfeuchte wird bei langfristiger Lagerung unter konstanten Umgebungsbedingungen stark von der relativen Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Daher wird in Abbildung 13 der Einfluss der relativen Feuchte der Umgebungsluft auf die Druckfestigkeit für Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichen Wasser-Zementwerten (w/z -Werte) dargestellt. Es wird ersichtlich, dass das Herabsenken der relativen Luftfeuchte von 100 % auf ca. 80 % die Druckfestigkeit signifikant steigert. Bei relativen Luftfeuchten unter 80 % ist kein weiterer Druckfestigkeitszuwachs zu erkennen [13]. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass relative Luftfeuchten von über 80 % die Druckfestigkeit des Betons herabsetzen.

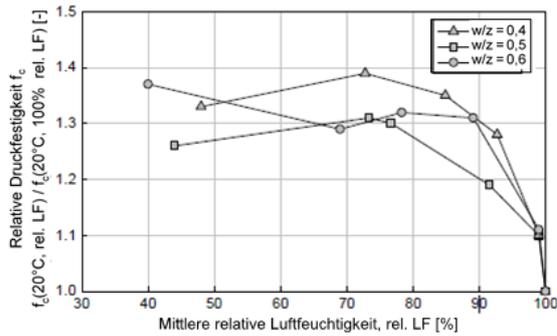


Abb. 13: Relative Druckfestigkeit von Beton nach Erhärten und Lagerung bei 20 °C unter verschiedenen Umgebungsfeuchten aus [13]

Dass der E-Modul ebenfalls stark von der relativen Betonfeuchte und somit auch von der relativen Luftfeuchte der Umgebung abhängig ist, wird in Regelwerken nicht berücksichtigt. Die Steifigkeit des Betons ist unter vollständiger Sättigung am höchsten [13]. Doch bereits eine geringe Absenkung der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit führt zu einer rapiden Absenkung des E-Moduls (vgl. Abbildung 14). Bei weiterer Absenkung der relativen Luftfeuchte gewinnt er jedoch wieder rasch an Steifigkeit. Im Bereich des relativen Luftfeuchtegehalts von ca. 50 % bis ca. 80 % stabilisiert sich der Wert des E-Moduls unterhalb des Maximalwerts [13].

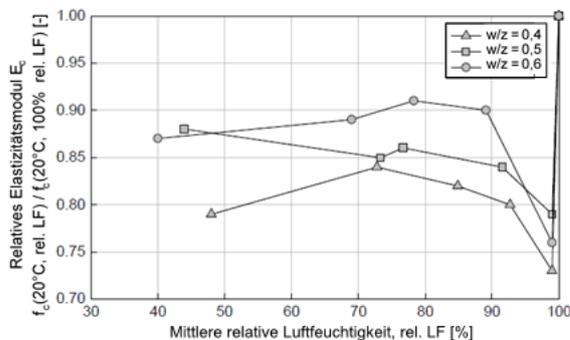


Abb. 14: Relativer E-Modul von Beton nach Erhärten und Lagerung bei 20 °C unter verschiedenen Umgebungsfeuchten aus [13]

Im Winter könnten daher hohe Betonfeuchten die Betoneigenschaften beeinflussen. Aus Abbildung 10 wird ersichtlich, dass in Rheinstetten bei Karlsruhe im Winter 2019 die relative Luftfeuchte im Mittel über 80 % lag und nie unter 50 % fiel. Freibewitterte Bauteile könnten zudem zukünftig im Winter einer erhöhten Feuchte ausgesetzt sein, wenn der Niederschlag aufgrund der Abnahme von Frosttagen [1] in Form von Regen und nicht als Schnee auftritt.

Erhöhte Temperaturen beeinflussen die Festigkeit und Steifigkeit des Betons negativ. Nach [13] sinkt im Temperaturbereich von 20 °C bis 100 °C die Druck-

und Zugfestigkeit von Beton um 5 % je 10 K Temperaturzunahme. Auch der E-Modul sinkt in diesem Bereich um ca. 3 % ab. Der Abfall der Betonfestigkeit in Abhängigkeit der Betontemperatur ist auch in Abbildung 15 zu erkennen. Die Annahme, dass der Einfluss der Temperatur und der relativen Feuchte superponiert werden kann, trifft bei Betonen mit hohem Feuchtegehalt nicht zu, da die Kombination von hoher Temperatur, hohem Feuchtegehalt und der Wahl der Gesteinskörnung (in Abbildung 15 silikatisch) eine hydrothermische Reaktion auslösen kann [13].

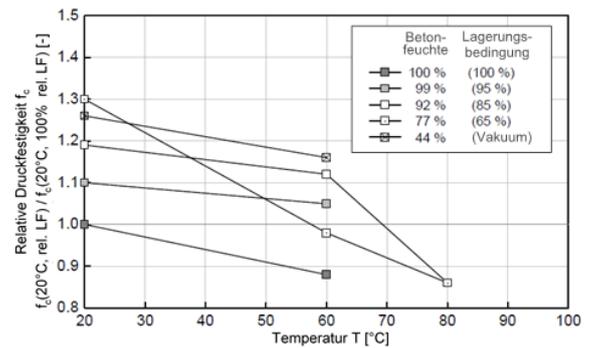


Abb. 15: Relative Druckfestigkeit eines Referenzbetons, welcher bei verschiedenen Feuchtegehalten erwärmt wurde. Die Umgebungsbedingungen während der Erhärtung sind in der Legende angegeben [13]

Zur Bestimmung der Betoneigenschaften für Temperaturen unter 100 °C wurde in [13] ein Materialmodell entwickelt, welches sowohl die Betontemperatur als auch die relative Betonfeuchte berücksichtigt. Die Druckfestigkeiten bezogen auf die Druckfestigkeit unter Lagerungsbedingungen nach DIN EN 12390-2 sind für verschiedene Betontemperaturen in Abhängigkeit der mittleren Betonfeuchte auf Grundlage der Untersuchungen in [13] ermittelt worden und in Abbildung 16 graphisch dargestellt. Die Abnahme der Druckfestigkeit bei steigender Temperatur ist deutlich zu erkennen. Zudem sind die Druckfestigkeiten für verschiedene Temperaturen nach *fib* Model Code 2010 in Abbildung 16 (Legende MC 2010) integriert worden. Die Umgebungsbedingungen für die Referenzdruckfestigkeit betragen 20 °C und 65 % relative Luftfeuchte (gemäß DIN EN 12390-2). Diese Umgebungsbedingung entsprach bei Versuchen in [13] einer Betonfeuchte von 77 % (vgl. Abbildung 15). Die nach *fib* Model Code 2010 berechneten Druckfestigkeiten überschätzen die nach [13] berechneten Werte - vor allem im höheren Temperaturbereich - deutlich. Die mittlere Betonfeuchte senkt ab ca. 90 % die Druckfestigkeit maßgeblich herab. Zudem ist erkennbar, dass der Einfluss der Feuchtigkeit mit steigender Temperatur zunimmt.

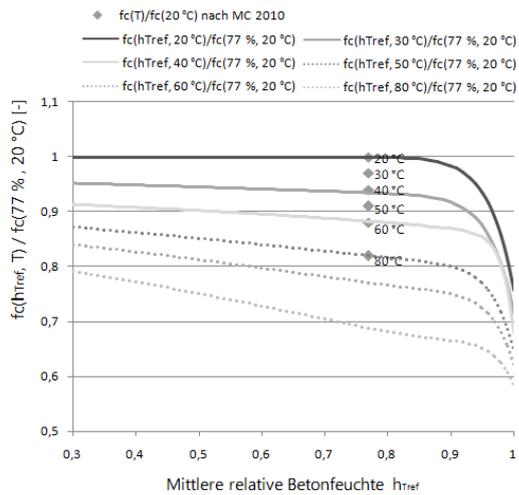


Abb. 16: Druckfestigkeiten für verschiedene Betontemperaturen in Abhängigkeit der mittleren relativen Betonfeuchte nach [13] sowie Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Betontemperatur nach *fib* Model Code 2010 [9]

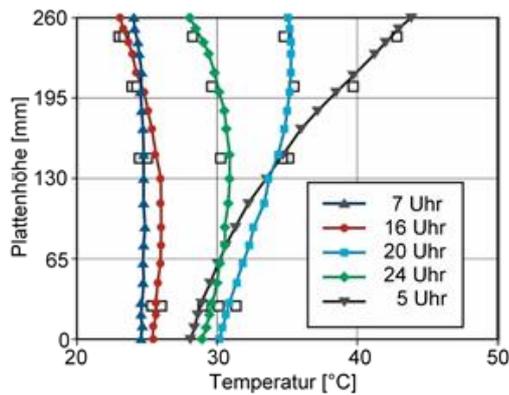


Abb. 17: Errechnete Temperaturverteilung in einer Betonplatte zu verschiedenen Zeitpunkten an einem heißen Sommertag und gemessene Werte in den verschiedenen Tiefen aus [6]

Um praxisnahe maximale Betontemperaturen abzuschätzen, kann die Temperaturverteilung innerhalb einer Betonplatte eines repräsentativen Sommertags aus [6] herangezogen werden (vgl. Abbildung 17). Die maximale, rechnerische Temperatur der Betonplatte betrug um 16 Uhr 44 °C an der Oberfläche. Über den Querschnitt klang die Temperatur jedoch auf unter 30 °C ab. Gegen Abend nahm der Gradient der Temperaturverteilung immer weiter ab, bis die Bauteiltemperatur in den Morgenstunden wieder bei ca. 25 °C lag. Betrachtet man Abbildung 16, so wird deutlich, dass die Betonfestigkeit im Temperaturbereich kleiner 40 °C nur geringfügig abnimmt, wenn keine hohe Betonfeuchtigkeit vorliegt. Leider werden

in [6] keine Angaben zur Betonfeuchte in der Betonplatte gemacht. Betrachtet man jedoch das Zusammenspiel zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchte während einer beispielhaften Hitzeperiode (vgl. Abbildung 2), so kann angenommen werden, dass im oberflächennahen Bereich eine geringe Betonfeuchte vorliegt. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass maximale Lufttemperaturen die Betonfestigkeit zwar abmindern, aber dennoch keine Gefahr für den Grenzzustand der Tragfähigkeit besteht.

Eine ausführliche Untersuchung der Betonfestigkeit unter Berücksichtigung der Betontemperatur und relativen Betonfeuchte unter realistischen Klimabedingungen einer Hitzewelle wäre nötig, um die Betonfestigkeit exakter vorhersagen zu können.

5 Fazit

Der Klimawandel wird den Betonbau in der Zukunft wohl hauptsächlich durch die häufiger vorkommenden heißen Tage mit Temperaturen von über 30 °C beeinflussen. Am Beispiel von aktuellen Wetterdaten aus Rheinstetten bei Karlsruhe konnten verschiedene klimabetreffende Aspekte in den aktuell gültigen Regelwerken bewertet und der Einfluss neuer Parameter eingeordnet werden.

Zusammenfassend sind folgende Aspekte beim Arbeiten mit Frischbeton unter erhöhten Lufttemperaturen zu beachten: Die Betonage an heißen Sommertagen sollte am Nachmittag erfolgen, um eine günstige Nullspannungsverteilung zu erreichen. Die Frischbetontemperatur muss zur Begrenzung der Hydratationswärmeentwicklung und zur Vermeidung einer thermisch-induzierten Rissbildung überwacht und begrenzt werden. Bei der Nachbehandlung sollten neben dem Befeuchten der Betonoberfläche auch Maßnahmen ergriffen werden, um die zu starke Erwärmung des Bauteils durch die Sonneneinstrahlung zu verhindern. Auch das zu schnelle Abkühlen des jungen Betons innerhalb der ersten 24 Stunden sollte durch geeignete Nachbehandlungsmaßnahmen verhindert werden.

Die globale Erhöhung des CO₂-Gehalts in der Luft durch den Klimawandel ist im Vergleich zur lokalen Luftverschmutzung nicht signifikant. Für die Festbetoneigenschaften bedeutend sind Hitzewellen, welche die Betontemperatur erhöhen und damit die Festigkeit und den E-Modul herabsetzen können. Erhöhte Feuchtegehalte im Beton wirken sich ebenfalls nachteilig auf dessen Festigkeitseigenschaften aus. Vor allem in Kombination mit erhöhten Temperaturen kann es zu signifikanten Festigkeitsverlusten kommen. Derzeit gibt es jedoch noch keine Hinweise, dass die durch den Klimawandel häufiger vorkommenden heißen Tage kritische Bedingungen (hohe Betontemperatur mit gleichzeitig hoher Betonfeuchte) hervorrufen werden.

6 Literatur

- [1] Wienert, U. & Walter, A. (2011) Klimawandel und Bauen. Klimastatusbericht 2011, Deutscher Wetterdienst (DWD)
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis - Summary for Policymakers.
- [3] American Concrete Institute, ACI Committee 305 (Hrsg.) (2007) Specification for Hot Weather Concreting - ACI Standard 305.1-06.
- [4] Stark, J. & Wicht, B. (2013) Carbonatisierung von Beton. In J. Stark & B. Wicht (Hrsg.), Dauerhaftigkeit von Beton (S. 103-160). Berlin, Heidelberg: Springer.
- [5] World Meteorological Organisation (Hrsg.) (2019) WMO Greenhouse Gas Bulletin No.15.
- [6] Foos, S. (2006) Unbewehrte Betonfahrbahnplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
- [7] DIN 1045-3:2012-03 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670 (2012).
- [8] Tue, N. V. & Schlicke, D. (2020) Zwangsbeanspruchung und Rissbreitenbeschränkung in Stahlbetonbauteilen auf Grundlage der Verformungskompatibilität. In Beton-Kalender 2020: Wasserbau, Konstruktion und Bemessung (Bd. 2, S. 836-839).
- [9] fédération internationale du béton (Hrsg.). (2013). fib Model Code for Concrete Structures 2010.
- [10] fédération internationale du béton (2013). Bulletin 70, Code-type models for structural behaviour of concrete.
- [11] DIN EN 1992-1-1 (2010) Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. (2010).
- [12] DIN EN 1991-1-5 (2010) Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatureinwirkungen; Deutsche Fassung EN 1991-1-5:2003 + AC: 2009
- [13] Acosta Urrea, F. (2018). Influence of elevated temperatures up to 100 °C on the mechanical properties of concrete. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe

Annika Schultheiß, B.Sc.

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe