

SYMPOSIUM

16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19. März 2020

Klima, Risse und Co.

Betonbau im herausfordernden Umfeld



Ulrich Nolting, Frank Dehn und Vanessa Mercedes Kind (Hrsg.)

SYMPOSIUM

Klima, Risse und Co.

Betonbau im herausfordernden Umfeld

SYMPOSIUM

16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19. März 2020

Klima, Risse und Co.
Betonbau im herausfordernden Umfeld

Herausgegeben von
Ulrich Nolting, Frank Dehn und Vanessa Mercedes Kind

Mit Beiträgen von

Jan Akkermann	Christoph Müller
Kévin Bastian	Andreas Schaab
Peter Braesicke	Annika Schultheiß
Frank Dehn	Jens Tauchmann
Wibke Hermerschmidt	André Weisner

Veranstalter:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
76128 Karlsruhe
VDB – Verband Deutscher Betoningenieure e. V.
Regionalgruppen 9 und 10
InformationsZentrum Beton GmbH
Gerhard-Koch-Straße 2+4
73760 Ostfildern

Titelbildcollage

Alle Bilder von stock.adobe.com, oben: © jamesteohart, unten links: © merrypoppins, unten Mitte: © marvlc, unten rechts : © Kirill Gorlov

Hinweis der Herausgeber

Für den Inhalt namentlich gekennzeichnete Beiträge ist die jeweilige Autorin bzw. der jeweilige Autor verantwortlich.

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2020 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-0994-3

DOI 10.5445/KSP/1000099592

Vorwort

Im Zuge einer sich ständig wandelnden Umwelt verändern sich auch die Anforderungen, denen die Betonbauweise ausgesetzt ist. Steigende Temperaturen in den Sommermonaten, andauernde Hitzeperioden oder eine Zunahme von Extremwetterereignissen stellten die am Bau Beteiligten in den letzten Jahren vor immer größer werdende Herausforderungen. Zum einen können Risse durch frühen Zwang und eine schlechtere Verarbeitbarkeit des Frischbetons infolge hoher Temperaturen die Betonbauqualität reduzieren. Zum anderen führt das Nichteinhalten normativ geforderter Frischbetontemperaturen häufig zu Rechtsstreitigkeiten. Zielsetzung des 16. Symposiums Baustoffe und Bauwerkserhaltung ist es, Ihnen einen Überblick über diese Entwicklungen zu geben und diese hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die zukünftige Betontechnologie sowie das zukünftige Bauen mit Beton zu bewerten.

Das Programm der Veranstaltung beginnt mit einer Einführung von Seiten der Klimaforschung, in welcher klimatische Entwicklungen auf globaler und regionaler Ebene beleuchtet werden. Anschließend wird die Bedeutung dieser Entwicklungen für die verschiedenen Beteiligten der Baubranche erläutert. In weiteren Vorträgen werden bisher gewonnene Erfahrungen von Seiten der Planer und Bauunternehmer vorgestellt. Es wird auf normative, technische und bauvertragliche Grundlagen eingegangen. Zudem wird der Einfluss erhöhter Temperaturen auf die Eigenschaften des Zements und der Betonzusatzmittel erläutert. Abschließend werden Lösungsvorschläge für das Betonieren bei hohen Temperaturen vorgestellt.

Die Veranstalter

Inhalt

	Vorwort	V
Peter Braesicke	Klimaforschung	1
Frank Dehn Annika Schultheiß	Auswirkungen des Klimas auf das Bauen mit Beton	9
Jan Akkermann Kévin Bastian	Brauchen wir einen neuen Beton? - Erfahrungen aus der Planungspraxis	21
André Weisner	Betonagen bei hohen Temperaturen - Bauvertrag, Betontechnologie und Bausführung	33
Christoph Müller Wibke Hermerschmidt	Einfluss höherer Temperaturen auf die Zement- und Betoneigenschaften	37
Andreas Schaab	Klimaänderung - Erfahrungen aus der Praxis einer international tätigen Baufirma	43
Jens Tauchmann	Möglichkeiten der Verfahrenstechnik zur aktiven Betonkühlung	51
	Programm der Veranstaltung	59
	Autorenverzeichnis	61
	Übersicht über Tagungsbände vergangener Symposien	63

Klimaforschung

Peter Braesicke

Zusammenfassung

Dieses kurze Essay zur Klimaforschung kann nur einen Ausschnitt beleuchten, der mit einer gewissen Subjektivität – bzgl. bevorzugter Themen des Autors – ausgewählt wurde. In der Einführung werden die Begriffe Wetter und Klima zueinander verortet. Einer generellen Betrachtung zur global gemittelten Temperatur – als Metrik um Aspekte des (atmosphärischen) Klimawandels zu beschreiben – folgt eine Illustration der Temperaturänderung der letzten Dekaden. Hier wird auch erklärt, wie ein kleines Änderungssignal vor dem Hintergrund eines großen Jahresgangs detektiert werden kann. Der klassische CO₂(Treibhausgas)-verursachte bodennahe (gemittelte) Temperaturanstieg wird dann von der globalen zur regionalen Erwärmung in Deutschland „verfolgt“. Abschließend wird eine Perspektive für das zukünftige Wetter und seine Relevanz für die Gesellschaft gegeben. Vor uns liegende Herausforderungen – inklusive Forschungsbedarf – werden zum Ende dieses Essays thematisiert.

1 Einführung

Die Klimaforschung ist heutzutage ein weites Feld. In diesem Essay wird es vor allem um eine atmosphärische Perspektive gehen, die den Bogen vom Wetter zum Klima und wieder zurück, zum zukünftigen Wetter im geänderten Klima, spannen wird. Dieser Überblick kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern soll weitere Fragen und Diskussionen stimulieren.

1.1 Wetter und Klima

Wetter und Klima werden oft nicht sauber getrennt. Gleichwohl sind eine sorgfältige Definition und Abgrenzung der beiden Begriffe unverzichtbar. Wetter ist das, was um uns herum in der Atmosphäre geschieht. Wir können seine Zustandsgrößen messen und erleben diese auch tagtäglich. Klima ist, ein wenig kongenial gesprochen, eine statistische Analyse des gewesenen Wetters und in der Zukunftsperspektive das sich kontinuierlich ändernde „Umfeld“ für das sich dann entwickelnde Wetter. Für Freunde von Differentialgleichungen kann man dies auch anders zusammenfassen. Möchte ich Wetter vorhersagen, benötige ich eine genaue Kenntnis des Anfangszustands (Wetter ist ein Anfangswertproblem/Initialwertproblem). Möchte ich Klima projizieren, wird der Anfangszustand unwichtiger – entscheidender werden dann Randwertentwicklungen (Klima ist also ein Randwertproblem). Natürlich sind sowohl Wetter als auch Klima nichtlinear und selbst bei präziser Kenntnis von Anfangszustand und Randwerten sind keine perfekten Vorhersagen und Projektionen möglich, denn selbst kleine Fehler können sich amplifizieren – und wer misst schon ohne Fehler oder kennt sogar den Energieverbrauch der Weltbevölkerung Jahre im

Voraus? Daher ist es sowohl für Wettervorhersagen als auch für Klimaprojektionen wichtig nicht nur in deterministischen Aussagen zu verharren, sondern auch Unsicherheiten zu kommunizieren. Bei der Wetter-App auf dem Handy findet das z. B. schon bei den Regenwahrscheinlichkeiten statt. Ab welcher Wahrscheinlichkeit nehmen sie einen Schirm mit? Sind sie eher risikofreundlich (erst ab 80 % Regenwahrscheinlichkeit) oder risikoavers (schon ab 20 % Regenwahrscheinlichkeit)? Beim Klima gibt es ein ähnliches Problem bezüglich der Unsicherheiten. Eine wichtige Randbedingung ist die Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre (dazu mehr im nächsten Abschnitt). Diese wichtige Kenngröße hängt aber von vielen Elementen im Klimasystem ab und nicht zuletzt vom Menschen selbst und wie wir uns zukünftig ernähren, heizen, wohnen und fortbewegen. So gibt es dann eine Unsicherheit bzgl. unserer Klimamodelle und ihrer Randwerte die unvermeidbar ist. Trotz allem können wir sinnvolle Szenarien annehmen und testen, um zu simulieren wie sich das Klima zukünftig ändern wird. IPCC und WMO/WCRP schaffen dafür saubere Rahmenbedingungen, in denen klar die Annahmen für die Simulationen erklärt sind und die Ergebnisse möglichst vollständig – und mit Unsicherheiten – diskutiert und zugänglich gemacht werden. National (in Deutschland) spielen natürlich auch Ressortforschungseinrichtungen (z. B. DWD und UBA) und universitäre (viele) und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen (z. B. MPG und Helmholtz) eine wichtige Rolle in der Klimaforschung (sowohl für die Beobachtungen als auch für die Modellierung und den damit verbundenen Vorhersagen und Projektionen).

1.2 Der Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt ist als Begriff vielen bekannt, und doch ist er irgendwie schwer greifbar. Wie können Gase, die nur in kleinen Beimengungen in der Luft (die wir atmen) enthalten sind, eine so große Wirkung haben? Dazu zunächst ein kleines Gedankenexperiment, welches auf grundlegender Physik beruht. Die Sonne scheint auf eine sich drehende Kugel (die Erde). Etwa 1368 W/m² Strahlungsflussdichte (SFD, umgangssprachlich auch Solarkonstante (S₀) genannte - obwohl die Zahl nicht ganz konstant ist) erreichen die Erde. Nur ¼ davon ist effektiv umsetzbar (das Verhältnis der Kugel zur projizierten Kreisfläche). Für eine erste Abschätzung der Temperatur auf einer idealisierten Erde (ohne wirksame Atmosphäre) kann man nun die effektiv eingehende SFD gleich der ausgehenden SFD eines schwarzen Körpers (unserer idealisierten Erde) setzen.

$$\frac{S_0}{4} = \sigma T^4 \tag{1}$$

Aus dieser Gleichung können wir nun die Gleichgewichtstemperatur unserer idealisierten Erde bestimmen.

$$T = \sqrt[4]{\frac{S_0}{4\sigma}} \tag{2}$$

Mit einem

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \tag{3}$$

ergibt sich dann eine Temperatur (T) von ca. 278 K oder ca. 5 °C. Also eine recht kalte Erde, denn wir beobachten ca. 15 °C als bodennahe (global gemittelte) Temperatur. Rechnen wir jetzt noch mit einer Albedo (α), also einer gewissen Reflexion von Strahlung, die dann nicht in Wärme umgesetzt wird, erhalten wir eine noch kältere Erde.

$$(1 - \alpha) \frac{S_0}{4} = \sigma T^4 \tag{4}$$

Für ein α = 0,3 ergibt sich dann eine Temperatur (T) von ca. 255 K oder ca. -18 °C. Somit wäre (unter der eigentlich realistischen Annahme einer Reflexion) die Erde sogar noch einmal deutlich kälter. Es gibt also noch weitere Effekte, die den Albedo Effekt überkompensieren. Diese können in der sogenannte Emissivität (ε) zusammengefasst werden, denn die Erde – mit ihrer komplexen Atmosphäre – ist eben kein perfekter schwarzer Körper.

$$(1 - \alpha) \frac{S_0}{4} = \epsilon \sigma T^4 \tag{5}$$

Für eine Emissivität ε = 0,74 ergibt sich dann eine Temperatur (T) von ca. 288 K oder ca. 15 °C, einem Wert der nahe an den Beobachtungen liegt. Aber was bestimmt nun diese Emissivität? Es sind vor allem auch die Treibhausgase in der Atmosphäre, und dabei in erster Linie das natürliche Treibhausgas Wasserdampf (H₂O), welches räumlich und zeitlich hoch

variabel ist. Weitere wichtige Anteile an dieser Emissivität haben aber auch Treibhausgase, die noch in viel kleineren Mengen vorhanden sind und im Fall von z. B. CO₂ keine hohe Variabilität (bezogen auf die mittlere Konzentration) aufweisen. Ähnliche Darstellungen der physikalischen Grundlagen finden sich in [1] und [2].

Tab. 1: (nach Buchal and Schönwiese [1]): Leicht idealisierte Übersicht zu den wichtigsten und bekanntesten Treibhausgasen. Obwohl die Konzentrationen gering sind, ist die Wirkung der Spurengase erheblich. Beim Wasserdampf (H₂O) ist die hohe räumliche und zeitliche Variabilität hervorzuheben. Beim CO₂ handelt es sich auch um ein natürliches Treibhausgas, aber sein starker Anstieg während der Industrialisierung ist menschgemacht und ohne unseren Einfluss wäre der Wert deutlich niedriger (ein gängiger Referenzwert ist 280 ppm).

Molekül	Konzentration	Effektive Temperaturerhöhung	Relativer Beitrag zum Treibhauseffekt
H ₂ O	~2,6 %	~20 K	60 %
CO ₂	>400 ppm	~9 K	26 %
O ₃	~0.04 ppm (Bodennah)	~2 K	7 %
N ₂ O	~0,32 ppm	~1 K	4 %
CH ₄	~1,8 ppm	~1 K	3 %

Zu jedem der in Tabelle 1 aufgeführten Spurengase (und seiner Wirkung als Treibhausgas) könnte man einen eigenen Artikel verfassen – dies würde jedoch diesen Beitrag sprengen. Daher hier nur eine kurze Übersicht und eine kleine Vertiefung bzgl. des CO₂ und seiner zeitlichen Entwicklung.

Wasser (H₂O) ist eine wichtige Komponente des Erdsystems und wird durch die Atmosphäre effizient umverteilt. Gleichzeitig ist es das in Summe effektivste Treibhausgas - was aber in anderen Aggregatzuständen, z. B. flüssige Tröpfchen und Eiskristallen, die eine Wolke bilden oder als Schnee fallen, auch die Albedo vergrößern kann.

Ozon (O₃) ist ein besonders spannendes Gas. Das bodennahe Ozon (hier relevant) ist ein Schadstoff (also auch relevant bzgl. Luftreinhaltungsfragen) und Treibhausgas. Das Ozon in großen Höhen (dort gibt es wesentlich mehr, mit Werten mit bis zu ~10 ppm) ist die natürliche Sonnenbrille unserer Erde und schützt das Leben vor harter UV-Strahlung (siehe auch [5]).

Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) haben sowohl natürliche als auch anthropogene Quellen und sind trotz ihrer geringen Mengen wichtige Treibhausgase. Außerdem gibt es noch einen ganzen Zoo von weiteren Gasen, die wir hier nicht behandeln können.

Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist aber das bei weitem bekannteste Treibhausgas und mit großen anthropogenen Quellen, welche in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen sind. Die Messungen der atmosphärischen CO_2 Konzentrationen auf dem Mauna Loa sind in Abbildung 1 gezeigt. Natürlich ist die Konzentration in der Atmosphäre durch komplexe Quellen und Senken (Land/Vegetation und Ozean) bestimmt – daher ist auch ein Jahrgang in Abbildung 1 erkennbar (rote nicht geglättete Messreihe), aber der generelle Anstieg ist klar mit dem Verbrauch fossiler Brennstoffe verknüpft.

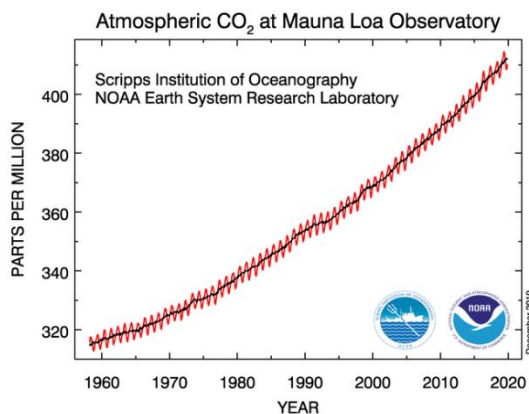


Abb. 1: Anstieg der CO_2 Konzentrationen in der Atmosphäre, gemessen auf dem Mauna Loa. Deutlich ist der kontinuierliche Anstieg von unter 320 ppm auf über 400 ppm von 1960 bis heute zu sehen – ein Anstieg um ca. 25 %. Quelle: [A]

2 Klimawandel vom Jahrhundert zum Jahrzehnt

In diesem Abschnitt soll es um einige Details des Klimawandels in den letzten Jahrhunderten und Jahrzehnten gehen. Wenn wir über den historischen Klimawandel sprechen, müssen wir stets den Kontext im Auge behalten. Das Klima der Erde hat auf geologischen Zeitskalen große Schwankungen durchgemacht – allerdings war es während der letzten 10000 Jahre relative beständig, was auch der Entwicklung des Menschen und seiner Hochkulturen zugutekam. Dies darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch auf Zeitskalen von Jahrhunderten und Dekaden erhebliche Schwankungen möglich sind. Allerdings geht es dann auch darum einen zugrundeliegenden Trend zu erkennen, der „physikalisch“ mit dem CO_2 -Anstieg verbunden werden kann.

2.1 Globaler Temperaturanstieg

Der globale bodennahe Temperaturanstieg der vergangenen Jahrzehnte ist ausführlich in der Literatur dokumentiert und auch noch bestehende Möglichkeiten diesen zu beschränken – siehe auch [3]. Kolleginnen und Kollegen haben dazu (historische) Thermometerzeitserien aufbereitet und bearbeitet und diese dann analysiert (und auch gemittelt) – inklusive einer Betrachtung von Unsicherheiten. Außerdem gab und gibt es große Anstrengungen sogenannte Re-Analysen anzufertigen, die historische Messungen mit aktuellen Wettermodellen verbinden und so globale (lückenlose) Analysen zulassen. Auch diese Analysen sind nicht ohne Probleme und Herausforderungen, dennoch zeigen alle Methoden ein ähnliches Bild der globalen Erwärmung (der bodennahen Temperatur) für die letzten Jahrzehnte.

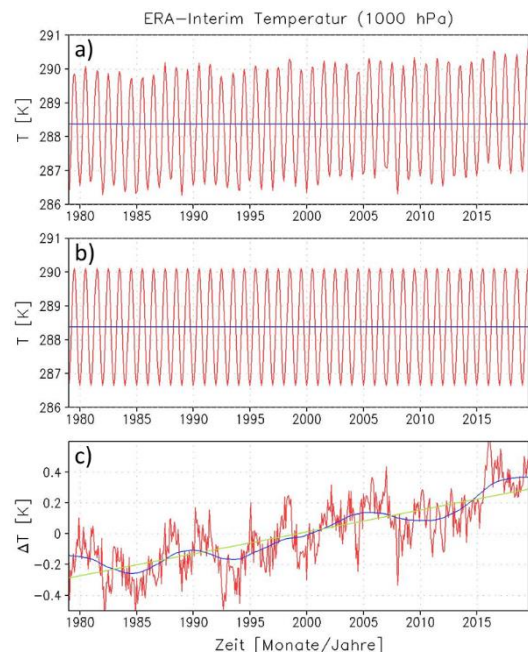


Abb. 2: Analyse der bodennahen global gemittelten Temperatur – Re-Analyse Daten sind lückenlos vorhanden – hier ERA-Interim. Quelle: [B]

Die in Abbildung 2 verwendeten Daten werden mit einem Modell des ECMWF erzeugt, welches Beobachtungsdaten assimiliert (Assimilation beschreibt hier den Vorgang, dass ein Vorhersagemodell durch Beobachtungsdaten „geführt“ wird). Dadurch lassen sich einfach globale Mittel der (bodennahen) Temperatur berechnen. Panel a zeigt die global gemittelte Temperatur in 1000 hPa (in der Meteorologie wird der Druck oft als vertikale Koordinate genutzt; er nimmt exponentiell nach oben hin ab). Deutlich ist der Jahrgang zu erkennen (im langjährigen Mittel ergibt sich ein Wert von 288,4 K, siehe oben). Panel b

zeigt den mittleren Jahresgang, der sich aus allen Jahren ergibt (dieser wird für jedes Jahr wiederholt). Panel c zeigt dann die Differenz (in rot) zwischen den Temperaturdaten in Panel a und dem (sich jährlich wiederholenden) mittleren Jahresgang in Panel b. Deutlich zeigt sich dann eine hohe zwischenjährliche Variabilität, die sich aber gut (durch eine Mittelung) dämpfen lässt. In diesem Beispiel durch die zweifache Anwendung eines gleitenden Mittels von plus/minus 24 Monaten (in blau). Natürlich lässt sich nun auch ein linearer Trend ausrechnen (in grün), der klar die generelle Erwärmung der bodennahen Temperatur zeigt. Hier ergibt sich ein Wert von 0,14 K/Dekade. Literaturwerte können davon abweichen, da sie direkt aus Stationsdaten abgeleitet werden oder andere Methoden zur Trendberechnung verwenden.

Ein weiteres Indiz dafür, dass die Erwärmung am Boden auf Treibhausgase zurückzuführen ist, liefert uns die fundamentale Physik des Strahlungstransports. Wir können berechnen, dass die bodennahe Erwärmung mit einer Abkühlung in höheren Schichten einhergehen muss. Sowohl einzelne Stationen als auch die bereits eingeführten Re-Analysedaten zeigen dies. Dies verdeutlicht Abbildung 3, die im oberen Teil (Panel a) die Abkühlung in der Stratosphäre zeigt (10 hPa, etwas oberhalb von 30 km).

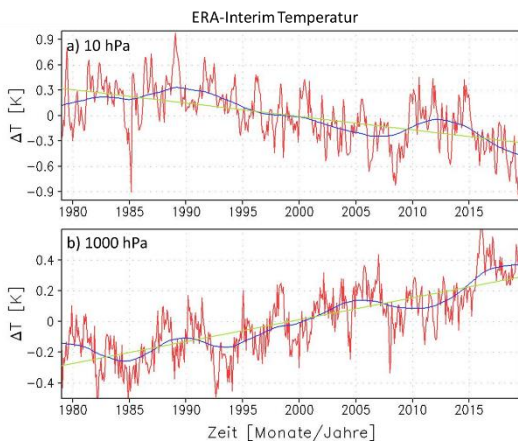


Abb. 3: Panel b entspricht dem Resultat aus Abbildung 1 (Panel c). Panel a basiert ebenfalls auf ERA-Interim Daten, allerdings wird hier die Temperatur in der Stratosphäre (in 10 hPa, etwas oberhalb von 30 km) analysiert. Die Analyseschritte entsprechen denen, die in Abbildung 1 dargestellt sind.

2.2 Temperaturanstieg in Deutschland

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, setzt sich das globale Bild aus unzähligen lokalen Messungen zusammen. Natürlich ist die globale Aussage als eine Metrik oder Maßzahl wichtig, aber als Menschen leben wir in unseren Regionen und sind lokalen Änderungen ausgesetzt. Daher ist es auch wichtig,

regionale Veränderung separat zu betrachten. Eine der längsten Thermometer-Temperaturzeitserien gibt es in Deutschland am heutigen DWD Observatorium Hohenpeißenberg (Quelle [C]). Dort werden seit dem späten 18. Jahrhundert meteorologische Beobachtungen durchgeführt. Auch diese Zeitserie zeigt eine klare Erwärmung, deren Verlauf in Abbildung 4 dargestellt ist. In den Jahren seit 1960 ist die bodennahe Jahresmitteltemperatur mit einem Trend (hier 0,4 K/Dekade, Panel b), der deutlich über dem Trend der geglätteten global gemittelten Monatsmitteltemperatur liegt, angestiegen.

Hier soll auch darauf verwiesen werden, dass alle hier verwendeten Daten frei und ohne Beschränkungen zugänglich sind. Somit kann sie jeder selbst herunterladen und diese Zeitserien analysieren. Stationsdaten für Deutschland können über den DWD Datendienst abgerufen werden. ERA-Interim Daten sind über ein Web API erhältlich (siehe Links unter Datenquellen).

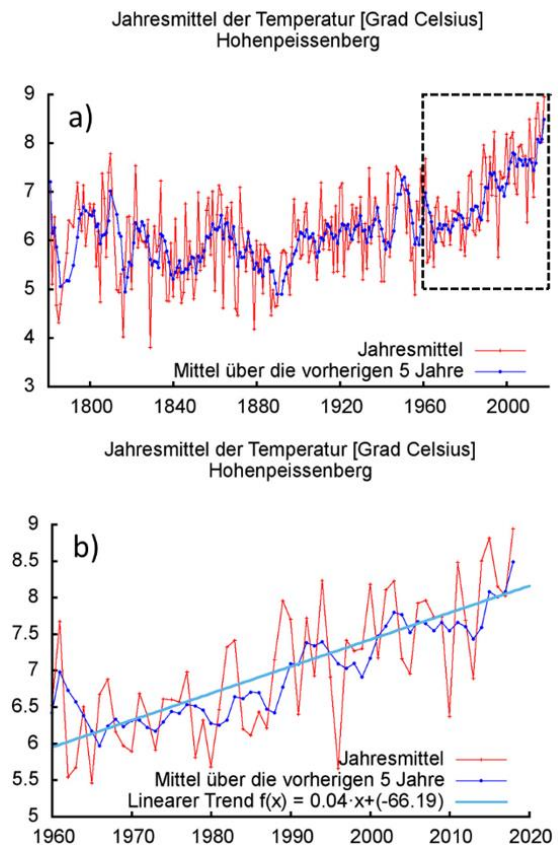


Abb. 4: Analyse der Jahresmitteltemperaturen vom Hohenpeißenberg in Bayern (Quelle: [C]). In Panel a ist die gesamte verfügbare / historische Zeitreihe gezeigt. Panel b fokussiert sich auf die Jahre seit 1960. Für diesen Zeitraum liegt auch die bekannte CO₂ Zeitserie vom Mauna Loa Observatorium vor (Abbildung 1).

3 Klimawandel in den kommenden Jahrzehnten

Was erwartet uns in der Zukunft? Eine Frage, die uns generell bewegt und die wichtige Konsequenzen für unsere Planungen hat. Wie bereits erwähnt, bedeutet ein weiterer Anstieg der Treibhausgase eine weitere Erhöhung der bodennahen Temperaturen – einfache Physik. Eine genaue Projektion dieser Erhöhung ist aber trotzdem schwierig und wir benötigen umfangreiche Modellsysteme dafür, die viele verschiedene physikalische Prozesse über diverse Skalen hinweg gut abbilden können. Die zu bewertenden Szenarien und die verwendete Modellkomplexität müssen „intelligent“ gewählt werden, um aussagekräftige Simulation / Projektionen durchführen zu können.

- **Szenarien:** Wir müssen Annahmen darüber machen, wie sich unser Energiemix in der Zukunft entwickeln wird. Wie viele Menschen werden wie heizen, sich fortbewegen und sich ernähren? Was bedeutet das dann für viele Faktoren im Klimasystem (wie zum Beispiel auch Landnutzung) und schlussendlich für den Anstieg von Treibhausgasen in der Atmosphäre? (Andere Umweltprobleme wie Einschränkungen der Artenvielfalt und Ozeanversauerung blenden wir nun schon aus ...)
- **Modellkomplexität:** Wie entwickeln sich die Rückkopplungen im Klimasystem? Wenn es wärmer wird haben wir wahrscheinlich mehr Wasserdampf in der Luft, dies könnte zu mehr Wolken führen, einem Anstieg der Albedo und einer kleinen Abkühlung, die der Erwärmung entgegenwirkt. Allerdings verringern höhere Temperaturen Gletscher und Eisschilde, deren Abschmelzen eine niedrigere Albedo hinterlässt und dem davor genannten Effekt entgegenwirkt. Dies sind nur zwei einfache Beispiele von komplexeren Rückkopplungen im atmosphärischen Klimasystem die zwar in Modellen berücksichtigt werden, die aber dazu führen, dass sich Unsicherheiten vergrößern.

Um Unsicherheiten besser abbilden zu können, werden Projektionen des zukünftigen Klimas (inklusive der bodennahen Temperaturen) von unterschiedlichen internationalen Modellsystemen für unterschiedliche Szenarien mehrfach durchgeführt. Mit dieser Vielfalt erreicht man dann eine Abdeckung verschiedener zukünftiger Entwicklungen, die man dann gegeneinander abwägen kann. Auch hier spielt das IPCC eine koordinierende Rolle.

4 Perspektiven für zukünftiges Wetter

Wie schon am Anfang angesprochen ist (atmosphärisches) Klima in gewisser Weise die Statistik des Wetters. Wenn wir also Modelle (und Daten) in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung betrachten (und nicht nur wie oben beschrieben in Mitteln und deren

langzeitlichen Änderungen – obwohl es auch dafür gute Gründe gibt), dann können wir unsere Klimaprojektion auch als einen „Simulator/Generator“ zum Betrachten des künftigen Wettergeschehens begreifen. Womit wir wieder bei den Regionen und den lokalen Manifestationen des Klimawandels wären. Niemand erlebt eine „gemittelte Temperatur“. Obwohl diese Mittel eine wichtige Metrik zur Beschreibung des allgemeinen Klimawandels sind, sind diese Größen nicht für uns erlebbar. Allerdings erleben wir sehr extremes Wetter und seine Folgen (auch in dem Sinne, dass wir uns gut an diese Ereignisse erinnern): Starkregen, Stürme, Gewitter, Hitzewellen und vieles mehr. Hitzewellen und der Mangel an Niederschlag können natürlich auch zu bedrohlichen Dürren führen – und damit z. B. zu Ernteausfällen. Natürlich können wir das Wetter für z. B. das Jahr 2060 nicht voraussagen, wir können aber die sich ändernden Statistiken und Charakteristiken von Extremen studieren und uns somit informieren was auf uns zukommt.

4.1 Relevanz für die Gesellschaft

Wetter und seine Extreme sind selbstverständlich relevant für unser Leben. Schon seit Anbeginn unserer Existenz hängen wir vom Wetter und den damit verbundenen Konsequenzen bezüglich der Nahrungsmittelversorgung ab. Die Entwicklung von Hochkulturen waren dem Wettergeschehen unterworfen und wenn sich dieses änderte, hatte dies auch große Konsequenzen für die Menschen. Ein prominentes Beispiel ist dafür sicherlich auch das Nil Hochwasser im alten Ägypten. Aber auch heute noch beeinflusst das Wetter unsere Entscheidungen. Sei es nur der morgendliche Blick auf die Wettervorhersage als Entscheidungshilfe für die Bekleidung, oder für die Planung von Freizeitaktivitäten. Natürlich – und wohl viel wichtiger – ist aber auch das Zusammenspiel von eintretenden Extremen (hoffentlich rechtzeitig vorhergesagt) und Erhalt und Betrieb von Infrastrukturen. Beim starken Regen das Management des Abwassers, um Überschwemmungen zu vermeiden, bei stark eingeschneiten Straßen und Schienen das Räumen des Schnees, um einen reibungslosen Straßen- und Schienenverkehr zu ermöglichen, und natürlich gibt es viele weitere Beispiele.

Für eine Klimawissenschaft, die in den Regionen zuhause ist und die Helmholtz-Zentren in verschiedenen Regionen und über diverse Spezialisierung hinweg verbindet, steht auch die regionale Klimainitiative REKLIM (www.reklim.de). Im Netzwerk dieser Klimainitiative wird nicht nur geforscht, sondern auch aktiv mit den Bürgerinnen und Bürgern kommuniziert. Dies geschieht nicht nur in großen internationalen Konferenzen und ihrem Begleitmaterial (z. B. REKLIM 2019 [4]), sondern auch in kleineren Regionalkonferenzen, die sich mit den Problemen und Fragestellungen einer bestimmten Region beschäftigen.

In jedem Jahr ist diese Veranstaltung in einer anderen Region in Deutschland zu Gast (siehe auch <https://www.reklim.de/aktuelles-und-aktivitaeten/reklim-veranstaltungen/>) und beschäftigt sich dort mit den lokalen Herausforderungen. Es soll nicht verschwiegen werden, dass es natürlich auch weitere Initiativen in und außerhalb von Helmholtz gibt.

4.2 Relevanz für die Baubranche

Diese allgemeine Relevanz für die Gesellschaft gilt natürlich auch für die Baubranche. Fragestellungen, die dabei auch schon im REKLIM Kontext betrachtet wurden, betrafen vor allem Starkniederschläge und entsprechende Planungen für die effiziente Entwässerung. Aber wenn wir an mögliche Überflutungen denken, ist auch ganz klar, dass die Frage, wo was gebaut werden darf, zentral sein kann. Wenn diese Frage geklärt ist und ein Bauvorhaben begonnen wird, ist natürlich der Bau selbst sehr vom Wetter abhängig und eine gute Bauleitung wird natürlich auch immer einen Blick auf die Wettervorhersage haben (mal mit größerem und mal mit kleinerem Erfolg - wie jeder bestätigen kann, der auch schon einmal selbst (mit) gebaut hat). Je nach den Arbeiten und verwendeten Baustoffen sind natürlich unterschiedliche Zielgrößen wichtig.

Basierend auf <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/eigenschaften/temperaturen-und-wetterabhaengigkeiten-150946> (letzter Zugriff 16.12.19) soll hier ein kleiner Blick auf den Beton das Bild abrunden. Auch hier ist das Wetter eine wichtige Randbedingung für das Verarbeiten von Beton im Außenbereich. Der „Wohlfühlbereich“ liegt dabei zwischen +5 °C und +30 °C. Für Baustellen und Transportbeton ist dieser Temperaturbereich durch DIN 1045-3 mandatiert. Unterschiedliche zusätzliche Wetterparameter tangieren dabei die Qualität der resultierenden Betonstruktur. **Regen** kann den Wasserzementwert erhöhen und verschlechtert damit die Struktur und das Gefüge des Betons. Im Gegensatz dazu führt **Hitze** zum zu schnellen und ungleichmäßigen Abbinden. **Frost** und **Kälte** verursachen diverse Probleme, bis hin zur Bildung von Eiskristallen, die die Struktur lockern und sprengen. **Wind** beeinflusst ebenfalls die Verdunstung und damit auch die Geschwindigkeit des Austrocknens. All die genannten Parameter werden sich unter Klimawandel ändern und besonders die Häufigkeit und Ausprägung ihrer Extreme in verschiedenen Regionen.

Natürlich kommt erschwerend hinzu, dass Planungsvorläufe und Vorhersagbarkeit nicht immer gut aufeinander abgestimmt sein können. Die Vorhersagbarkeit der Temperaturbereiche auf Zeitskalen von mehreren Tagen ist dabei wohl meist nicht das Problem, aber Regenvorhersagen haben potenziell größere Unsicherheiten. Natürlich spielt dabei der Klimawandel auch eine Rolle, denn mit generell höheren

Temperaturen wird auch mit einer größeren Wahrscheinlichkeit z. B. die 30 °C Marke häufiger „gerissen“. Dies könnte heißen, dass die Anzahl der Tage im Sommer an denen Beton im Außenbereich problemlos verarbeitet werden kann, kleiner wird. Um hier zuverlässige Änderungen prognostizieren zu können, bedarf es eines Nutzerdialogs (für die richtigen Diagnostiken) und (noch) besserer Modelle.

5 Forschungsbedarf in der Klimaforschung

Natürlich, wie in allen Naturwissenschaften, benötigen wir ein immer weiter verbessertes Prozessverständnis, um dieses dann in Modelle zu implementieren (umsetzen zu können), die wir dann für Vorhersagen (Wetter auf verschiedenen Zeitskalen) und Projektionen (auf klimatologischen Zeithorizonten) nutzen können. Der Übergang von Wettervorhersagen zu Klimaprojektionen wird dabei immer fließender (Übergang von Anfangswert- zu Randwertproblemen). Das bedeutet auch, dass räumliche Skalen „nahtlos“ (im Englischen wird der Begriff „seamless“ verwendet) miteinander interagieren können müssen. Hier werden zurzeit in der Modellierung große Fortschritte gemacht, aber es gibt auch noch weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um wirklich ein über (fast alle) Skalen „nahtloses“ Modell für möglichst viele Anwendungen zu konzipieren. Hinzu kommt die große Rolle der Luftzusammensetzung und ihre komplexe Interaktion mit der thermischen Struktur der Atmosphäre. Ein einfaches Beispiel dafür ist die gut verstandene Erwärmung der bodennahen Luftschicht, wenn sich das CO₂ erhöht. Ein weiteres bekanntes Beispiel ist die Rolle des stratosphärischen Ozons, welches die vertikale Temperaturstruktur der Stratosphäre bestimmt. Zusätzlich ist aber der Übergang zwischen Troposphäre (dem untersten Atmosphärenstockwerk) zur Stratosphäre (dem darüber liegenden Stockwerk) wichtig für die sogenannte Klimasensitivität. Die Klimasensitivität gibt an, wie stark sich die bodennahen Luftschichten erwärmen, wenn sich das CO₂ in der Atmosphäre verdoppelt. Dieser Wert wird durch unterschiedliche Rückkopplungen beeinflusst, wie z. B., wie sich der Wassergehalt und die Wolken in der Atmosphäre ändern, aber eben auch, wie sich der Übergang zwischen Troposphäre und Stratosphäre verhalten wird - und dort spielt auch das stratosphärische Ozon eine wichtige Rolle [5].

Diese zahlreichen Rückkopplungen mit modernen „nahtlosen“ Modellsystemen weiter zu untersuchen und Unsicherheiten zu charakterisieren, wird viele Klimaforscher in den nächsten Jahren beschäftigen. Wichtig ist dann auch in der Kommunikation der Klimaprojektionen klar zu erklären, dass Unsicherheiten nicht „kein Wissen“ bedeuten, sondern das gut

quantifizierte Unsicherheiten auch wichtige Entscheidungsgrundlagen liefern können. Natürlich werden zentrale Antworten auf wichtige Fragen gesucht: Wie groß ist die Klimasensitivität und wie können wir noch bessere Klimaprojektionen erzielen? Dies ist wichtig, wenn es zum Beispiel um die Einhaltung von Schwellwerten geht, wie z. B. dem 1,5 °C Ziel [3] bei der Beschränkung der globalen Erwärmung. Wie werden sich Wetterextreme im zukünftigen Klima ändern? Wie können wir die Wetterextreme zukünftig noch besser vorhersagen?

Mit neuen und verbesserten Beobachtungssystemen, Modellen und Datenanalysetechniken (inklusive Datenassimilation und „big data analytics“) werden wir neue Pakete schnüren können, die uns bessere Projektionen und Vorhersagen ermöglichen werden. Zusätzlich müssen wir aber auch in die Kommunikation investieren, um unsere Ergebnisse in Produkte zu verwandeln, die von den Menschen verstanden werden. Es gibt viel zu tun und eine produktive Zukunft liegt vor uns – als Klimawissenschaftler und als Nutzer von Klimainformationen.

6 Literatur

[1] Buchal, C. and Schönwiese, C. D.: KLIMA Die Erde und ihre Atmosphäre in Wandel der Zeiten (<https://e-pic.awi.de/id/eprint/35183/>), Jülich/Frankfurt, Heraeus-Stiftung, Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, 2010.

[2] Goose, Hugues: Climate System Dynamics, Cambridge University Press, ISBN: 9781107445833, 2015.

[3] IPCC 2018: IPCC Special Report Global Warming of 1.5°C: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

[4] REKLIM 2019: REKLIM Magazin "Klimawandel vor unserer Haustür": <https://www.reklim.de/magazin/>

[5] WMO 2018: WMO UN Environment Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018: <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2018/>

7 Bild- und Datennachweis

[A] CO₂ Zeitreihe vom Mauna Loa: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> (initiiert wurden die Messungen von Charles David Keeling (1928-2005), daher wird auch manchmal der Begriff Keeling-Kurve für diese Darstellung verwendet)

[B] ERA-Interim Daten: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (asimilierter meteorologischer Datensatz des ECMWF – ein neueres Produkt löst diesen Datensatz nun ab)

[C] Hohenpeißenberger (DWD OHP) Temperaturreihe: <https://cdc.dwd.de/portal/> (das Auffinden und

Auswählen der Daten basiert zunächst auf der Auswahl der Station in der Datenbank, hier dem DWD Observatorium Hohenpeißenberg)

8 Abkürzungen

DWD: Deutscher Wetterdienst, <https://www.dwd.de/>

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <https://www.ecmwf.int/>

IPCC: The Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/>

REKLIM: Helmholtz-Klimainitiative Regionale Klimaänderungen, <https://www.reklim.de/>

UBA: Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/>

WCRP: World Climate Research Program, <https://www.wcrp-climate.org/>

WMO: World Meteorological Organization, <https://public.wmo.int/>

Autor

Prof. Dr. Peter Braesicke

Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Karlsruher Institut für Technologie
H.-v.-Helmholtz-Platz 1
76344 Leopoldshafen

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.

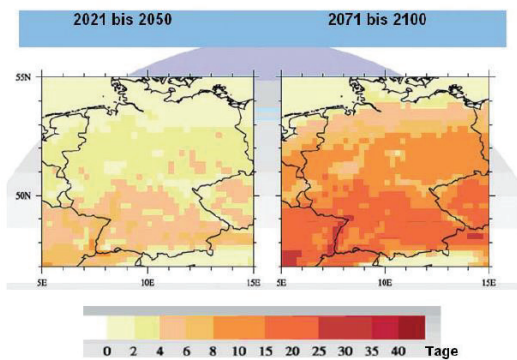


Abb. 1: Gemittelte Änderung der mittleren Häufigkeit heißer Tage (Tagesmaximumtemperatur mindestens 30 °C) relativ zu 1961 bis 1990 aus [1]

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.

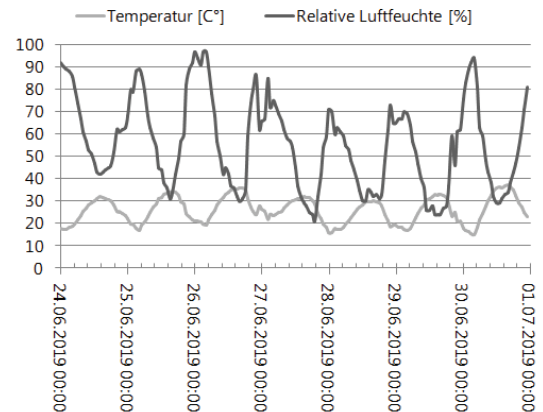


Abb. 2: Lufttemperaturen und relative Luftfeuchte einer beispielhaften Hitzewelle in Rheinstetten bei Karlsruhe im Juni 2019 [Messstation 4177, CDC DWD]

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).

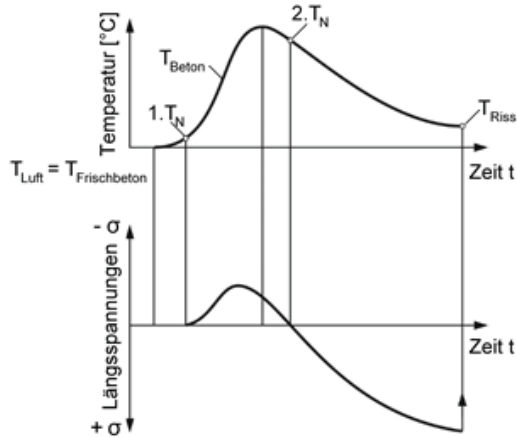


Abb. 3: Temperatur und Spannungsentwicklung in einem verformungsbehinderten Bauteil nach [6]

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 Umgebungsluft [kPa]

h = relative Feuchte der Umgebungsluft [-]

v = Windgeschwindigkeit [km/h]

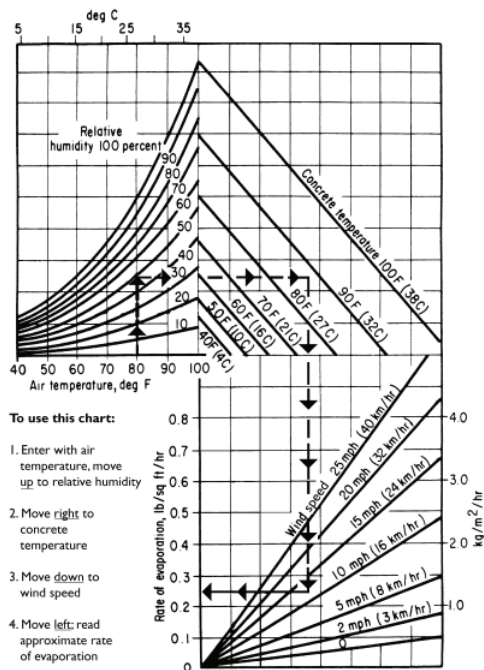


Abb. 4: Nomogramm zur Abschätzung der Verdunstungsrate [3]

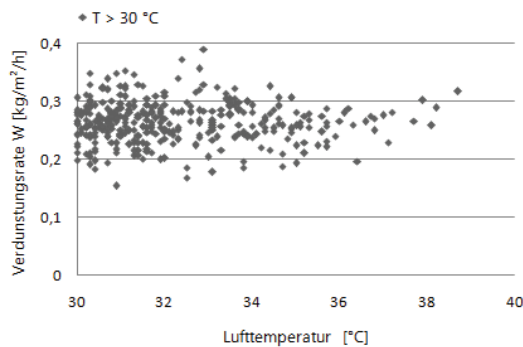


Abb. 5: Verdunstungsraten aller Temperaturereignisse größer 30 °C in Rheinstetten bei Karlsruhe bei einer Betontemperatur von 30 °C im Zeitraum 12.07.2018 bis 08.01.2020 [Messstation 4177, CDC DWD]

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.

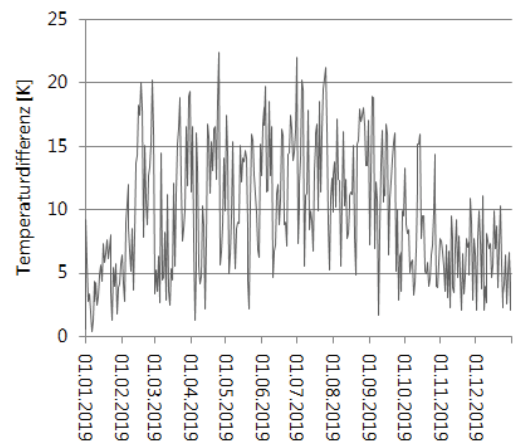


Abb. 6: Tägliche maximale Temperaturdifferenz in Rheinstetten bei Karlsruhe im Jahr 2019 [Messstation 4177, CDC DWD]

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].

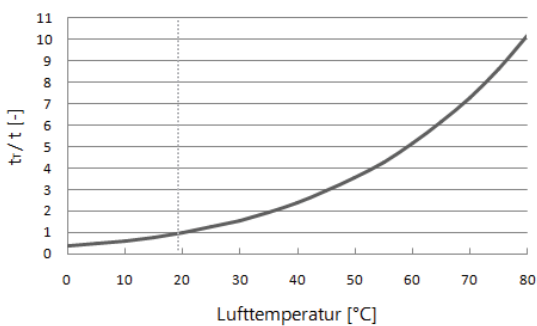


Abb. 7: Temperaturangepasstes (wirksames) Betonalter t_r , bezogen auf das tatsächliche Betonalter t nach *fib* MC 2010 [9]

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 °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 °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.

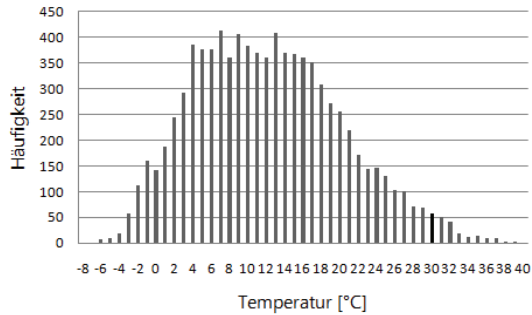


Abb. 8: Histogramm der stündlichen Lufttemperaturen in Rheinstetten bei Karlsruhe im Jahr 2019 [Messstation 4177, CDC DWD]

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 Trocknungsschwindung $\epsilon_{cd,0}$ 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.

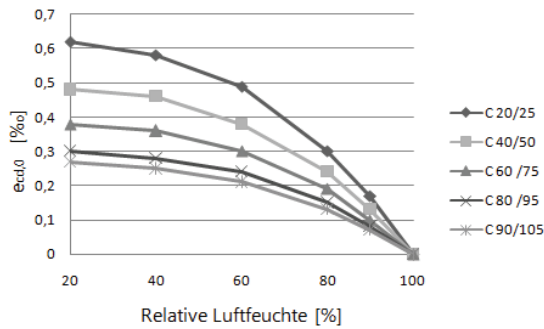


Abb. 9: Grundwerte für die unbehinderte Trocknungsschwinddehnung $\epsilon_{cd,0}$ in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit $f_{ck}/f_{ck,cube}$ [N/mm²] nach DIN EN 1992-1-1

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.

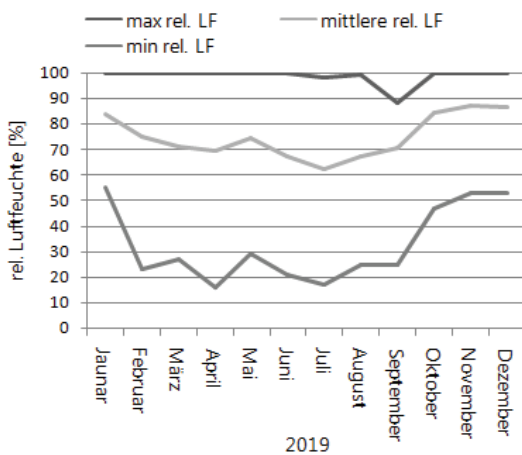


Abb. 10: Monatliche relative Luftfeuchte in Rheinstetten bei Karlsruhe im Jahr 2019. [Messstation 4177, CDC DWD]

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

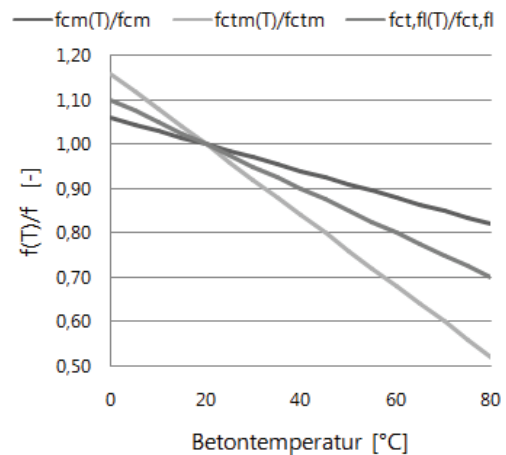


Abb. 11: Auswertung der Betonfestigkeiten in Abhängigkeit der Betontemperatur nach *fib* Model Code 2010 [9]

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 Hydratationswärmeentwicklung 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].

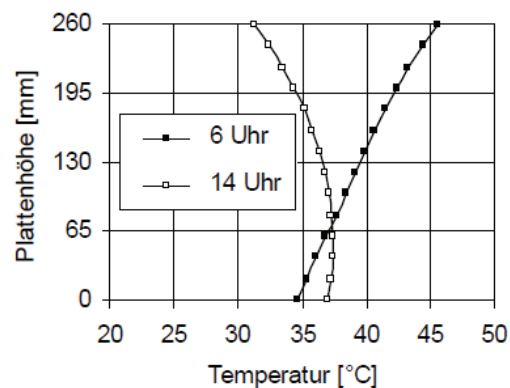


Abb. 12: Verlauf der Nullspannungstemperatur in einer Betonplatte mit einer Dicke von 260 mm nach einer Herstellung am Morgen (6 Uhr) und am Nachmittag (14 Uhr) eines heißen Sommertags aus [6]

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.

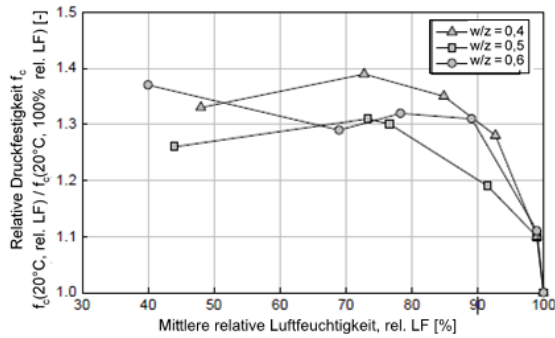


Abb. 13: Relative Druckfestigkeit von Beton nach Erhärten und Lagerung bei 20 °C unter verschiedenen Umgebungsfeuchten aus [13]

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].

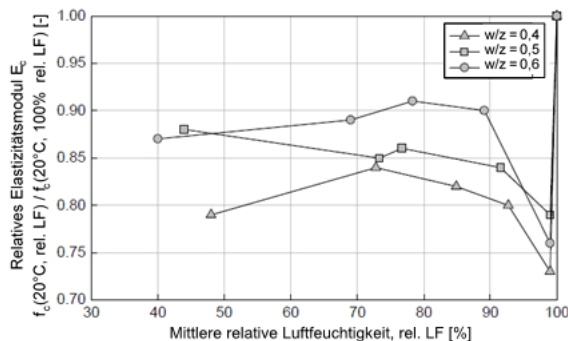


Abb. 14: Relativer E-Modul von Beton nach Erhärten und Lagerung bei 20 °C unter verschiedenen Umgebungsfeuchten aus [13]

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].

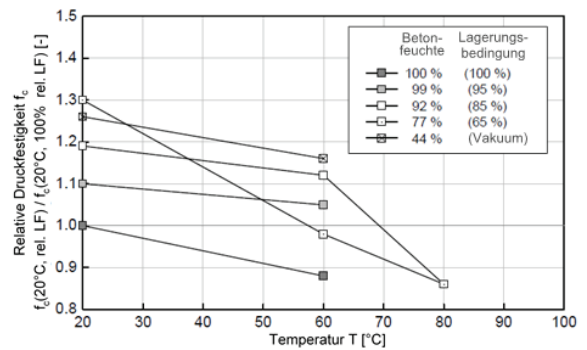


Abb. 15: Relative Druckfestigkeit eines Referenzbetons, welcher bei verschiedenen Feuchtegehalten erwärmt wurde. Die Umgebungsbedingungen während der Erhärtung sind in der Legende angegeben [13]

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.

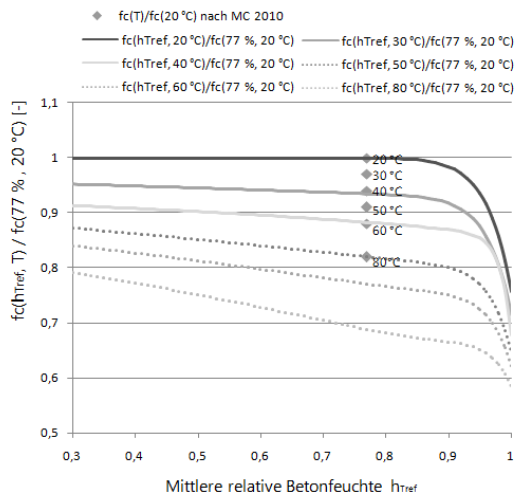


Abb. 16: Druckfestigkeiten für verschiedene Beton-temperaturen in Abhängigkeit der mittleren relativen Betonfeuchte nach [13] sowie Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Betontemperatur nach *fib* Model Code 2010 [9]

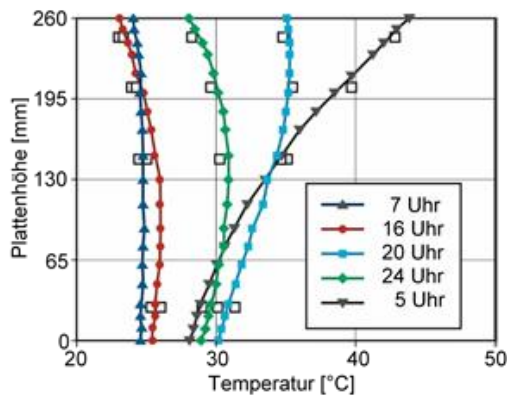


Abb. 17: Errechnete Temperaturverteilung in einer Betonplatte zu verschiedenen Zeitpunkten an einem heißen Sommertag und gemessene Werte in den verschiedenen Tiefen aus [6]

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

Brauchen wir einen neuen Beton? – Erfahrungen aus der Planungspraxis

Jan Akkermann und Kévin Bastian

Zusammenfassung

Zur Beurteilung des Einflusses klimatischer Extremereignisse kann in der Planung zunächst auf vorhandene Belastungs- und Berechnungsansätze zurückgegriffen werden. Deren Anpassung und Anwendung ermöglicht die Beurteilung von Varianzen bei Temperaturen und Starkregenereignissen. Wesentliche Randbedingung hierbei ist die verlässliche Angabe der Materialkennwerte des Betons. Betontechnologische Maßnahmen und Qualitätssicherungen vor und während der Ausführung sichern die Prognose ab. Obgleich leistungsfähige Berechnungsmodelle, Materialqualitäten und Qualitätssicherungsmethoden prinzipiell zur Verfügung stehen, gestaltet sich deren Anwendung – insbesondere in technologisch schwächer entwickeltem Kontext – als schwierig. Grundsätzlich werden daher robuste, zielsicher erreichbare Betoneigenschaften benötigt, an die sich die Planung umstandsweise auch anzupassen hat.

1 Einleitung

Die aktuell für Europa diskutierten Folgen eines Klimawandels, wie Temperaturerhöhungen, Anstieg des Meeresspiegels und Starkregenereignisse, aber auch die Zunahme der solaren Einstrahlung und länger anhaltende Dürre, treffen bereits jetzt für weite Regionen anderer Kontinente zu. Planungs- und Realisierungserfahrungen aus dem außereuropäischen Ausland sind daher für eine Statusbetrachtung hilfreich.

Zusätzliche Herausforderungen ergeben sich dort aufgrund unterschiedlich entwickelter Technologiekompetenz. In Entwicklungs- und Schwellenländern stehen oftmals die baupraktischen Randbedingungen zum Einsatz hochtechnisierter Bauprodukte nicht zur Verfügung.

Aber auch im europäischen und bundesdeutschen Kontext ist die robuste und nachhaltige Umsetzung des technisch Möglichen nicht selbstverständlich. Sie scheitert immer wieder an Kapazitätsengpässen in planerischer und ausführungstechnischer Hinsicht sowie auch an der Materialsensitivität vor und während der Herstellung.

Es stellt sich also die Frage: Brauchen wir angesichts dieser Randbedingungen einen neuen Beton, der einerseits widerstandsfähig genug gegen die gestiegenen klimatischen Herausforderungen und andererseits ausreichend robust für eine zielsichere Herstellung ist?

Im Folgenden werden zu verschiedenen, im weitesten Sinn mit den klimatischen Randbedingungen verbundenen Aspekten Praxiserfahrungen im Umgang mit Betonkonstruktionen aufgezeigt, um dieser Fragestellung nachzugehen.

2 Planungs- und Bemessungsgrundlagen

2.1 Lastansätze Außentemperatur

Die Temperaturlastansätze üblicher Ingenieurbauwerke sind den einschlägigen Vorschriften zu entnehmen. Für Brückenbauwerke enthält beispielsweise Eurocode 1, Teil 5 [1] für die Bemessung anzusetzende Extremtemperaturen. Charakteristische Werte für die minimale und maximale Außenlufttemperatur sind für die geographische Lage des Bauwerks aus nationalen Isothermenkarten zu entnehmen, die im Nationalen Anhang festgelegt werden können. Für Deutschland gilt aktuell eine maximal anzusetzende Außenlufttemperatur T_{\max} von $+37\text{ °C}$. Für Stahlbetonbrücken resultiert hieraus ein maximaler konstanter Temperaturanteil im Bauwerk für die Zwangsermittlung von

$$T_{e,\max} = T_{\max} + 2 = 39\text{ °C} . \quad (1)$$

Der bundesdeutsche Hitzerekord lag 2019 bei $42,6\text{ °C}$ (Lingen). Einerseits weisen Massivbauwerke zwar eine thermische Trägheit gegenüber Außentemperaturen auf. Andererseits bestätigen aktuelle Simulationen für dicht besiedelte Städte aufgrund der dortigen Flächenversiegelung und Wärmespeicherung einen signifikanten Temperaturanstieg gegenüber dem Umland [2]. Ein moderater Anstieg der durchschnittlichen Umgebungstemperatur aufgrund des Klimawandels bedingt demnach eine überproportionale Erhöhung der Maximaltemperatur innerstädtischer Bauwerke.

Für hinsichtlich Verformungen temperatursensible Bauwerke, wie beispielsweise weit spannende Stahltragwerke oder Bauteile mit großen Temperaturgradienten aufgrund einseitiger Sonneneinstrahlung (Abb. 1), empfehlen sich die Auswertung von örtlichen Klimadaten oder im Planungsvorfeld durchgeführte Messungen.

Baulastträger geben z. T. spezifische Vorgaben für Temperaturgradienten am Massivbauwerk vor. So definiert DIN 19702 [3] zwar die Temperaturlastansätze für Wasserbauwerke, für detaillierte Betrachtungen des Temperaturzwangs massiger Bauteile der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) wurden darüber hinaus in jüngerer Zeit Berechnungsansätze unter der Berücksichtigung von Wasserkontakt, Erdberührung, Verschattung etc. entwickelt [4].

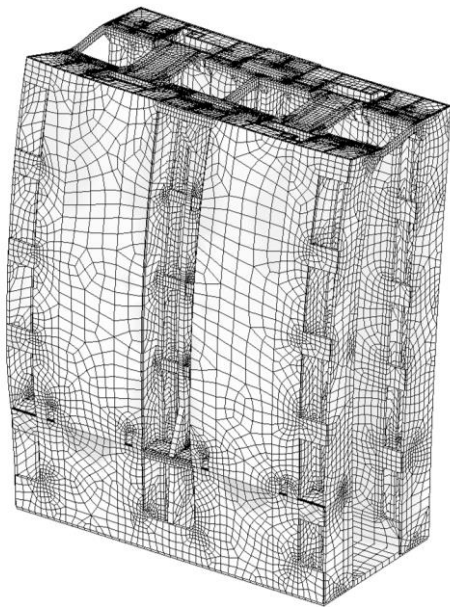


Abb. 1: Simulierte Temperaturverformung, Massivbau des Schiffshebewerks am Drei-Schluchten-Staudamm, China [KREBS+KIEFER]



Abb. 2: Schiffshebewerk am Drei-Schluchten-Staudamm, China [5]

In Abb. 1 ist hierfür exemplarisch die Temperaturzwang-Simulation für das Schiffshebewerk am Drei-Schluchten-Staudamm in China (Abb. 2) dargestellt. Auf Basis lokaler Klimadaten am Jangtse und der Bauwerksorientierung zum Sonnenstand wurden in Verbindung mit [3] Temperatursimulationen berechnet, um die Beanspruchungen der massiven Koppelriegel zwischen den vier 169 m hohen Stahlbetontürmen zu simulieren. Im Zuge der Bauausführung wurde die Korrelation zwischen Temperaturen und Verformungen validiert [5].

In internationalen Hitzegebieten, wie z. B. der Sahararegion Algeriens (Abb. 3), sind die im Extremfall zu erwartenden Temperaturen offenkundig weit höher. In der maßgeblichen Algerischen Stahlbetonnorm [6] werden für den Südteil des Landes nur pauschal +50 °C und -30 °C als Temperaturbereich für die Bemessung vorgegeben. Für die Herstellung und das Temperaturverhalten von Betonkonstruktionen sind daher weitere Informationen einzuholen.

Bei fehlenden oder unzureichenden normativen Temperaturvorgaben empfiehlt es sich, auf lokale Klimadaten der Länder oder internationaler Geoinformationsdienste, z. B. der *World Meteorological Organization* (public.wmo.int), zurückzugreifen.

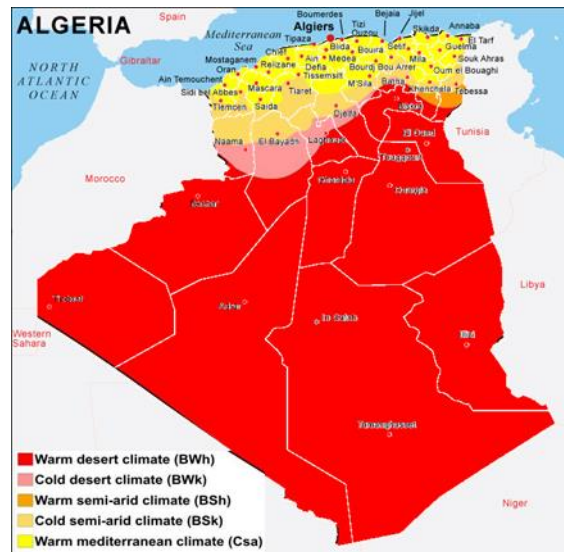


Abb. 3: Klimazonen in Algerien mit weiten Wüstenbereichen [mapsopensource]

Die Extremwerte der Außentemperaturen werden i. d. R. für Verformungsberechnungen oder bei der Betrachtung von spätem Zwang maßgebend. Für den Herstellungsprozess ist es sinnvoll, die tatsächlich zu erwartenden Temperaturen anhand von Klimadaten abzuschätzen, um die hierbei zu berücksichtigenden Effekte, wie z. B. das Abfließen von Hydratationswärme oder Schwinden, nicht zu konservativ zu bewerten.

2.2 Bauteiltemperaturen bei Herstellung

Die exothermen Vorgänge bei der Hydratation von Beton sind hinlänglich bekannt [7] und lassen sich bei Kenntnis der erforderlichen, betontechnologischen Parameter, wie Zement- und Flugaschegehalt, die zugehörige spezifische Hydratationswärme sowie die Wärmeleitfähigkeit und die spez. Stoffwärme, gut simulieren [8].

Zur späteren Analyse aufgetretener Effekte, wie bspw. Rissbildung oder Verformungen, können Temperatursonden im Bauteil integriert werden, welche die Eingangswerte von strukturmechanischen Berechnungen bilden.

2.3 Extreme Hitze

Höhere und höchste Temperaturen treten zumeist bei Brandereignissen auf. Neben den Einheitstemperaturkurven der Vorschriften finden auch Naturbrandmodelle Anwendung [9].

2.4 Dürre

Phasen länger anhaltender Trockenheit, die in den letzten Jahren auch in Deutschland zu beobachten waren, spielen insbesondere bei der Betonnachbehandlung eine Rolle. Wetterdaten und -prognosen geben auch hier Auskunft über mögliche Zeiträume.

2.5 Starkregenereignisse

Neben einer Gefahr durch Hochwasser in Flüssen und bei flächigen Überschwemmungen ist der Einfluss von Starkregen bei der lokalen Wasserabführung am Bauwerk sowie der Beeinträchtigung des Frischbetons zu berücksichtigen.

Auch für den Niederschlag lassen sich lokale Klimadaten heranziehen. Da sich jedoch gerade Regenereignisse weltweit im Wandel befinden, können hier nur Tendenzen abgegeben werden [10]. Für die Planung sind daher präventiv konstruktive Maßnahmen wie Überlaufsysteme und Wetterschutzeinrichtungen bei der Herstellung zu berücksichtigen.

2.6 Starkwind

Während die europäischen Windlastnormen als konservativ gelten können, bedarf es im Ausland – gerade in Gebieten mit Orkangefahr – einer Auswertung der Wetterdaten. In Entwicklungsländern stehen hierfür kaum Informationen und Prognosemöglichkeiten zur Verfügung. Es werden daher dort oft konservative Annahmen getroffen, wie bspw. Hurrikan-Geschwindigkeiten von bis zu 250 km/h in Haiti.

3 Berechnungsmöglichkeiten

3.1 Thermische Strömungssimulation

Aktuelle Berechnungsmethoden mittels Computational-Fluid-Dynamics (CFD) ermöglichen thermische Simulationen der Bauwerks- und Bauteilumgebung

und können so Aufschluss über tatsächlich mögliche Oberflächentemperaturen geben.

Neben der Anwendung im konstruktiven Brandschutz bei Naturbrandsimulationen [9] wird die Methode mittlerweile beim Wärmeschutz nicht nur in Bauteil- oder Gebäudedimension angewendet, sondern kann auch bei ganzen Stadtgebieten oder Baufeldern für klimatische Untersuchungen dienen (Abb. 4). Hierdurch lässt sich gleichsam auch der Einfluss klimatischer Veränderungen simulieren.

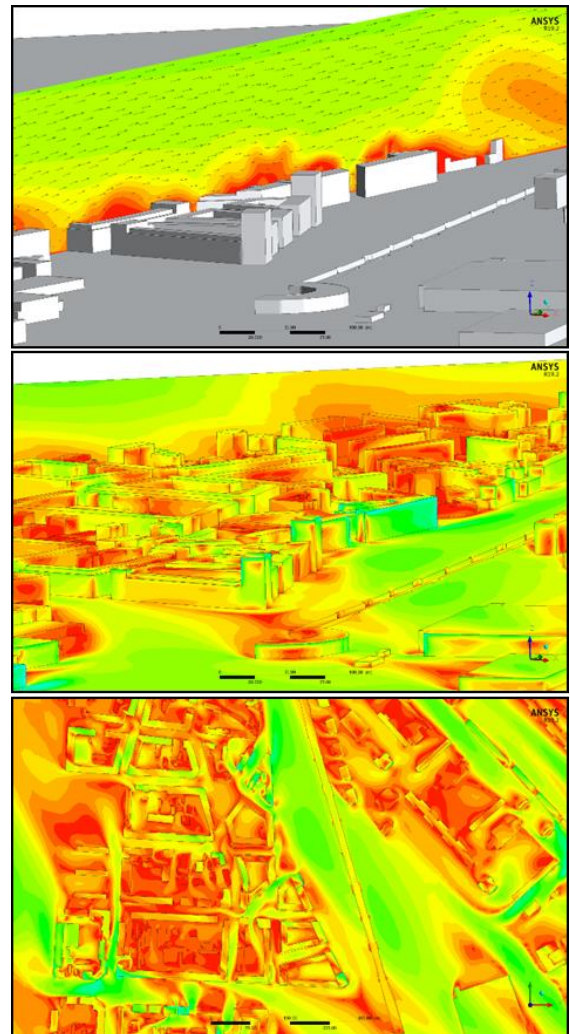


Abb. 4: Thermische Strömungssimulation eines Neubaugebiets zur mikroklimatischen Temperaturabschätzung [KREBS+KIEFER]

3.2 Temperatur- und Heißbemessung

Für strukturmechanische Heißbemessungen im Brandfall steht mittlerweile auch im kommerziellen Bereich eine Vielzahl von Berechnungsprogrammen zur Verfügung, welche die Interaktion zwischen Wärmetransport und kontinuumsmechanischer Spannungsantwort simulieren (Abb. 5). Prinzipiell lassen sich diese Programme auch mit transienten Temperaturumgebungen koppeln.

Der Einsatz dieser Programme wird baupraktisch zu-
meist bei Bestandsnachweisen im brandschutztech-
nisch kritischen Bereich oder bei außergewöhnlichen
Konstruktionselementen, wie schlanken Stützen, ver-
wendet.

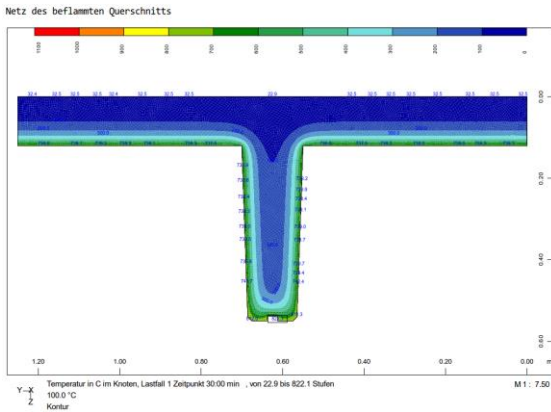


Abb. 5: Brandsimulation Stahlbeton-Rippendecke [KREBS+KIEFER]

Diese thermomechanischen Berechnungen sind
grundsätzlich auch geeignet, um den Einfluss
von größeren, transienten Temperaturschwankungen
jenseits der üblichen baustatischen Berechnungsan-
sätze eines konstanten und linear veränderlichen
Temperaturanteils in der Struktur zu simulieren. Bei-
spielsweise können Temperaturfelder [11] bei der
Nachrechnung von komplexen Stahlbetonbrücken in
Stufe 3 (Messungen) und Stufe 4 (wissenschaftliche
Methoden) der Nachrechnungsrichtlinie (NRR) des
Bundesverkehrsministeriums für Straßenbrücken [12]
genauere und damit ggf. günstigere Zwangsbean-
spruchungen als nach Eurocode 1 [1] ergeben. Die
Berechnungen lassen sich durch stundenaktuelle
Klimadaten (Temperaturen, Sonnenstand, Verschät-
tungen) präzisieren.

Wesentliche Berechnungsparameter neben den
Umgebungstemperaturen sind die betontechnologi-
schen Kenngrößen, welche in die Differentialgleich-
ung der Wärmeleitung einfließen. Für eine verläss-
liche Prognose von Neubauten ist daher eine Vorab-
information aus der zu verwendenden Betonrezeptur
oder eine Vorgabe von Grenzwerten durch die Pla-
nung erforderlich. Gleiches gilt bei strukturmechani-
schen Fragestellungen, wie bspw. der Rissbildung, für
die mechanischen Kenngrößen.

3.3 Hydratationsberechnung

In Erweiterung der Temperaturberechnungen spielt
bei der Hydratationsberechnung der Beton selbst als
exotherme Wärmequelle eine entscheidende Rolle.

Hierfür stehen ebenfalls kommerzielle Programm-
codes zur Verfügung. Bei Kenntnis der Randbedingen
hinsichtlich betontechnologischer Parameter und
Umgebungs-klima lassen sich damit Temperaturent-
wicklungen und thermomechanische Strukturant-
worten simulieren.

So konnten beispielsweise die wiederkehrenden
Rissmuster in Stahlbetonfundamenten von Onshore-
Windenergieanlagen (Abb. 6) auf ein systemimma-
nentes, bauformbedingtes Zusammenwirken zwi-
schen Temperaturentwicklung (Abb. 7) und Zwangs-
spannungen (Abb. 8) zurückgeführt werden [13].

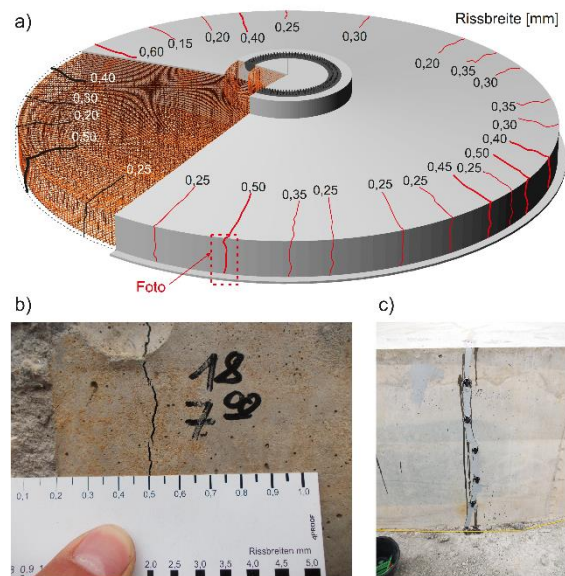


Abb. 6: Systemimmanente Rissmuster aufgrund von Hydratationswärmeabfluss in WEA-Fundamenten [13]

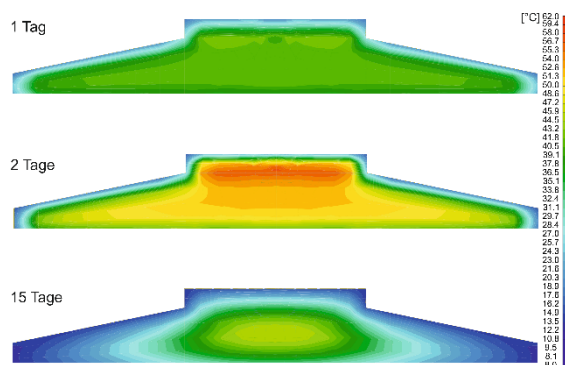


Abb. 7: Transiente Temperatursimulation bei Hydratation im WEA-Fundament [13]

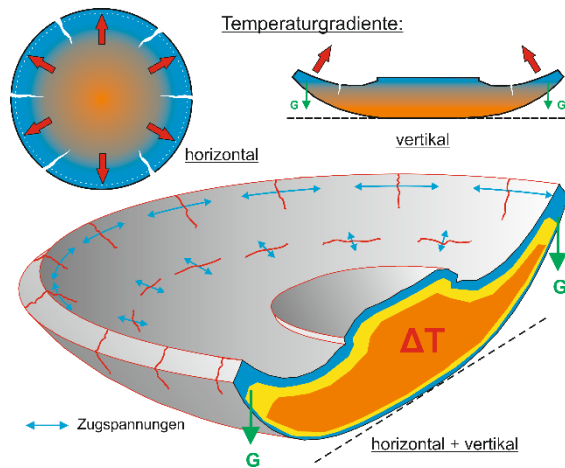


Abb. 8: Zwangsverformung aus Temperatur im WEA-Fundament [13]

Einflussparameter waren neben den zeitlichen Entwicklungen der mechanischen und thermischen Materialeigenschaften des Betons auch die Umgebungs- und Frischbetontemperatur. Beide Parameter werden maßgeblich auch durch das Klima beeinflusst. Für eine hinreichend genaue Berechnung ist daher die Prognose der Klimadaten am Betoniertermin und der darauffolgenden Tage notwendig.

Im Zuge der Sensitivitätsanalyse [13] war jedoch ein größerer Einfluss durch die betontechnologischen Parameter festzustellen. Die Prognose der Frischbetoneigenschaften war damit von größerer Bedeutung als die Klimaschwankung.

4 Betontechnologische Planung

4.1 Vorgaben Betoneigenschaften

Wie bereits aus den Berechnungsmethoden abgeleitet, spielen für die Planung von Betonkonstruktionen im Zusammenhang mit Temperaturrelevanz die betontechnologischen Parameter eine größere Rolle als die Bestimmung der Außentemperatur selbst.

Die oftmals aus bauphysikalischen Gründen von der Planung geforderte Frühfestigkeit, z. B. für Einbauteile im Wasserbau, führt i. d. R. zu stärkerer Temperaturentwicklung. Während sich im Hochbau höher- und hochfester Beton etabliert haben, ist deren Anwendung bei massigen Ingenieurbauwerken (z. B. Brückenpfeilern, Wasserbauwerke) trotz eklatanter Vorteile bei Dauerhaftigkeit und Ressourceneffizienz in der Diskussion. Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) schreibt daher für massige Bauteile gemäß ZTV-W LB 215, Anlage 1 [15] eine Eignungsprüfung des Betons anhand von

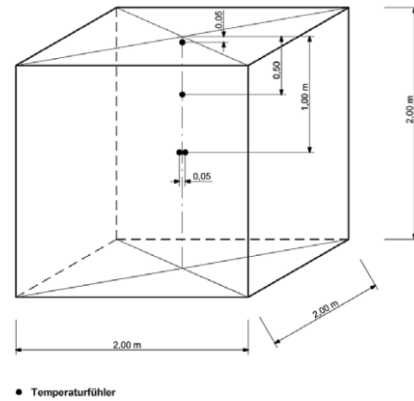


Abb. 9: Probewürfel zur Ermittlung der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung [14]

Probewürfeln mit Kantenlänge 2 m (Abb. 9) vor, was bei der Ausschreibung zu berücksichtigen ist.

Sofern die Planungsergebnisse stark von der Streuung der Betoneigenschaften abhängig sind, sollten bei der Berechnung Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Dies ist z. B. von der Zugfestigkeitsentwicklung bei der Prognose der Rissbreiten bekannt. Bei massigen Bauteilen von Wasserbauwerken ist der frühe Zwang nachzuweisen [15]. Hierbei angenommene Betonkennwerte für die quasiadiabatische Temperaturerhöhung sind im Zuge der Ausführung in jedem Fall durch eine Eignungsprüfung zu verifizieren [14].

4.2 Nachbehandlung

Die Bedeutung der Nachbehandlung des Betons bei höheren Temperaturen und bei großer Trockenheit zur Vermeidung von Schwind Schäden ist hinlänglich bekannt. Bei klimatisch extremen oder unbeständigen Verhältnissen sind zudem Maßnahmen vorzusehen, welche die der Planung zugrundeliegenden Randbedingungen absichern.

Sind z. B. erhebliche Temperaturschwankungen absehbar, sollten Bautenschutzmatte oder Schalungen die Temperaturexposition verringern. Temperatur- oder Schwindgassen reduzieren das Risiko unvorhergesehener Auswirkungen.

Die Maßnahmen sind bereits in der Entwurfs- und Ausführungsplanung von Bedeutung, da sie oftmals die statischen Berechnungen und die Ausführungspläne beeinflussen. Ferner sind die Maßnahmen als verlässliche Kalkulationsgrundlage in den Ausschreibungsunterlagen durch Verweis auf die einschlägigen Vorschriften und Leistungsbeschreibung zu integrieren.

5 Realisierung

5.1 Beispielprojekt

Am Beispiel des Großprojekts „Große Moschee von Algerien“ [16] werden die zuvor beschriebenen Aspekte im Zuge der Realisierung verdeutlicht. Die weltweit drittgrößte Moschee (Abb. 10), deren Minarett – ein Hochhaus mit 265 m Höhe – das höchste der Welt ist, stellt das neue Wahrzeichen Algeriens dar. Der Moscheekomplex erstreckt sich auf eine Grundfläche von 600 m x 150 m und besteht aus einer Vielzahl von Stahlbeton- und Stahlverbundkonstruktionen [17].

Die Besonderheit des Projektes in Zusammenhang mit der hier beschriebenen Thematik ergibt sich aus:

- klimatischen Randbedingungen (Hitze, Trockenheit, Starkregen),
- lokalen Realisierungsmöglichkeiten und normativen Randbedingungen und
- außergewöhnlichen und anspruchsvollen Konstruktionen im Starkbebengebiet [18].



Abb. 10: Die Große Moschee von Algerien, Fertigstellung 2019 [KREBS+KIEFER]

5.2 Eignungsprüfung massige Bauteile

Aufgrund der hohen Erdbebeneinwirkung in Algier ist das Minarett (Abb. 11) als Kragarm mittels 60 Baretten, die 46 m tief in den Baugrund einbinden und durch eine 3 m dicke Bodenplatte zusammengefasst werden, gegründet. Das aus einem Stahl-Verbundtragwerk bestehende Aussteifungssystem des Minaretts verwendet einen in Algerien untypischen C50/60, während ansonsten C25/30 und C30/37 zur

Anwendung kommen. Auch bei anderen hochbelasteten Bauteilen kam bereichsweise ein C50/60 zum Einsatz. Ziel der betontechnologischen Planungen vor dem Hintergrund der lokalen Realisierungsmöglichkeiten war daher die Begrenzung auf wenige, i. d. R. in der Feldfabrik des Projektes (Abb. 15) zielsicher reproduzierbare Betonrezepturen. Die Konstruktionen waren bereits in der Planung, z. B. hinsichtlich Dimensionierung und Exposition, auf diese Betonsorten anzupassen.

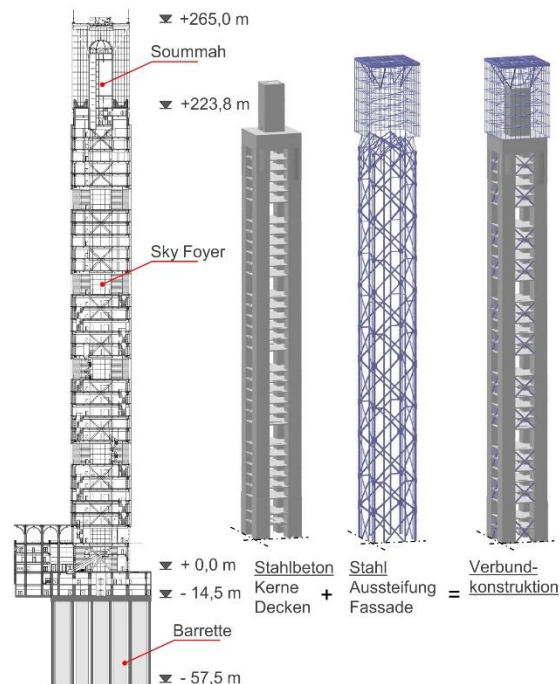


Abb. 11: Vertikalschnitt und Tragwerk Minarett [16]

Der von einer Kuppel überkronete Gebetssaal (Abb. 12) mit einer Grundfläche von 145 m x 145 m ist komplett seismisch isoliert. Die 256 Erdbebenisolatoren stehen auf mittels einer Bodenplatte zusammengefassten, massigen Stahlbetonssockeln [18] (Abb. 13).

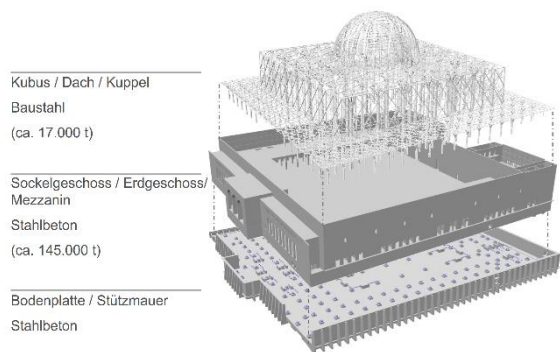


Abb. 12: Tragwerk Gebetssaal [16]



Abb. 13: Sockel für seismische Isolierung [KREBS+KIEFER]

Die Verwendbarkeit der für die massigen Bauteile zur Ausführung kommenden Betonsorten war gemäß Ausschreibung an Probelwürfeln nach [14] nachzuweisen (Abb. 14). Aufgrund der örtlichen Klimaverhältnisse im Sommer (bis 40 °C), aber insbesondere aufgrund der lokal eingeschränkten Verfügbarkeit von geeigneten Zementen für die im Projekt verwendete Feldfabrik, gestaltete sich der Temperaturnachweis als schwierig. Es wurden für den höherfesten Beton C50/60 mehrfach zu hohe Temperaturen festgestellt, die neben potenziellen Zwangsrissen auch eine schädigende Bildung von Sekundärettringit ermöglichen.



Abb. 14: Probelwürfel für quasiadiabatische Temperaturentwicklung [KREBS+KIEFER]

Begleitende Temperaturmessungen in massigen Bauteilen zeigten insbesondere im Sommer Probleme bei der Begrenzung der Kerntemperatur auf <math>< 65 \text{ °C}</math>. So wurde an ersten Massivsockeln für die Basisisolierung (Abb. 13) vermehrt Zwangsrissbildung festgestellt.

5.3 Temperaturbeeinflussung

Für die Betonage der Bodenplatte des Minarets wurde aufgrund der Erfahrungen an den Probelwürfeln in Abstimmung mit der ausführenden Firma ein spezielles Temperaturbeeinflussungsprogramm entwickelt. Das 50 m x 50 m x 3 m große Bauteil wurde aus statischen Gründen fugenlos in einem Betoniervorgang über 5 Tage hinweg hergestellt (Abb. 16).

Nach anfänglichen, ineffizienten Versuchen, die Frischbetontemperatur durch die Zugabe von Eiswürfeln in der Feldfabrik (Abb. 15) zu beeinflussen, wurden die Zuschläge benässt und das Zugabewasser gekühlt.



Abb. 15: Baustelleneinrichtung mit Betonzentrale (2013) [KREBS+KIEFER]



Abb. 16: Betonage Bodenplatte $d=3,0$ m Minarett [16]

Darüber hinaus wurde in die Bodenplatte ein Rohrleitungssystem zur Wasserkühlung integriert (Abb. 17). Mittels einer Simulationsberechnung wurde die Entwicklung der Kerntemperatur im sicheren Bereich prognostiziert.

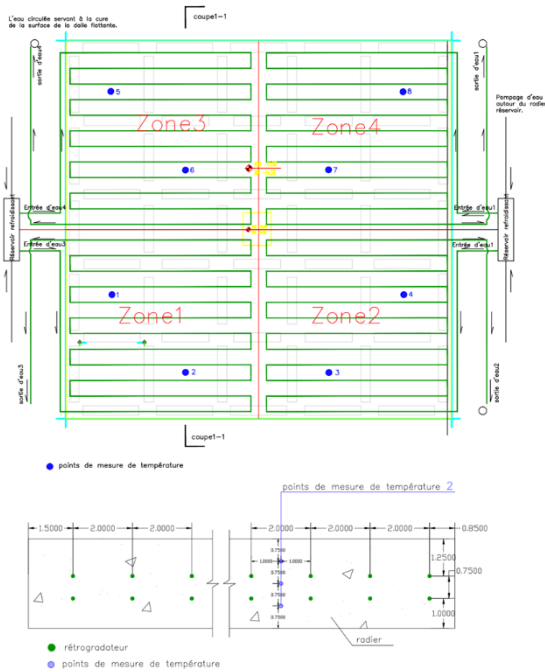


Abb. 17: Rohrleitungssystem und Messstellen Bodenplatte Minarett [China State Constr. Eng. Corp.]

5.4 Qualitätskontrolle

Für die Sicherstellung der Qualität erfolgte durch die beauftragten Prüfinstitute neben den üblichen Konsistenz- und Festigkeitsversuchen im auf der Baustelle installierten Betonlabor auch eine kontinuierliche Temperaturverfolgung.

Gemäß [14] darf bei massigen Bauteile der Frischbeton nicht mit einer Temperatur $>25\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingebaut werden. Als problematisch hat sich hierbei z. B. erwiesen, dass aufgrund der geringen Anwendungsmengen höherfesten Betons der Zement für den C50/60 oft direkt aus dem Herstellwerk mit einer Temperatur von noch $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ angeliefert wurde.

5.5 Einbau des Betons

Höhere Umgebungstemperaturen verbunden mit schnellem Ansteifen des Betons an der Schüttfuge führen beim Betonieren zu Gefügestörungen in der Konstruktion und damit zu Festigkeits- und Dichtigkeitsbeeinträchtigungen. Insbesondere, wenn der Beton dezentral angeliefert werden musste, wurden diese Probleme bei anderen Baustellen in Algerien festgestellt. Die Betonzentrale vor Ort, die für kleine Bauwerke unüblich ist, war im Projekt zusammen mit dem Einsatz von Erstarrungsverzögerern hilfreich.

Insbesondere bei der Herstellung der Aussteifungskerne und Decken des Minarets (Abb. 18) kamen stationäre Betonpumpen zum Einsatz. Für die Einbaubarkeit des Betons in die bereichsweise hoch bewehrten Konstruktionen waren Konsistenzklassen von mindestens F3 erforderlich. Festere Betone waren nicht mehr verdichtbar.

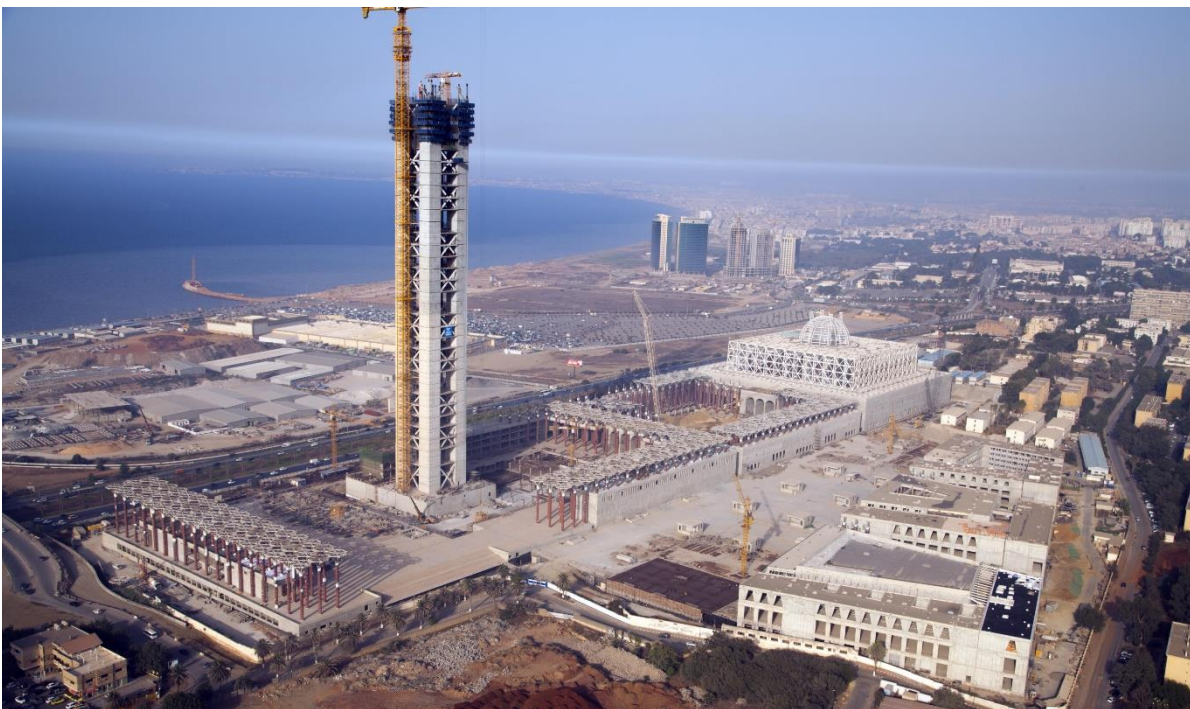


Abb. 18: Rohbau Moscheekomplex 2015 [KREBS+KIEFER, Foto: Zebar]

5.6 Nachbehandlung

Das monolithische Sockelgeschoss des Gebetssaals (Abb. 12) mit einer Grundfläche von 145 m x 145 m und durchgehendem Trägerrost aus Wänden und Decken als steife Gebäudebasis auf der seismischen Isolierung war absehbar nicht in einem Abschnitt herstellbar. Ferner konnte auf der Baustelle für den Massenbeton aus der Feldfabrik keine spezielle Betonrezeptur garantiert werden. Zur Vermeidung von Zwang aus Schwinden und Hydratationswärme wurden daher Schwindgassen belassen, die erst nach Fertigstellung des gesamten Sockels vergossen wurden.

Aufgrund der hohen Temperaturen im Sommer wurden sowohl die Bodenplatte des Minarets als auch die Decken des Gebetssaals mittels eines Vlies geschützt und über lange Zeiträume feucht gehalten (Abb. 19).



Abb. 19: Nachbehandlung und Schwindgassen Bodenplatte Gebetssaal [KREBS+KIEFER]

5.7 Starkregen

Während der Bauzeit waren zwei Regenereignisse, die in Algier häufiger vorkommen, für den Rohbau bautechnisch relevant. Zum einen führte ein länger anhaltender Starkregen zu großer Ansammlung von Oberflächenwasser auf dem Baufeld, welches sich in den kurzzeitig zuvor betonierten Untergeschossen der Moschee (als Tiefgarage vorgesehen) sammelte. Zum anderen führte ein heftiger Starkregen zu großflächigen Unebenheiten auf der ungeschützten frischen Betonoberfläche einer Decke im Gebetssaal.

Aufgrund der Durchfeuchtung der Betonoberfläche besteht die Gefahr lokal zu hoher w/z-Werte und damit einhergehender Qualitätsverluste in der Oberflächenfestigkeit und der Dichtigkeit.

6 Praxisempfehlungen

6.1 Planungsphase

Wie zuvor verdeutlicht, stehen heute leistungsfähige und mittels EDV-Unterstützung auch baupraktisch umsetzbare Berechnungsverfahren zur Verfügung, die Prognosen der geänderten Klimarandbedingungen für Baukonstruktionen zulassen. Wesentliche Eingangsparameter sind jedoch

- Klimarandbedingungen und
- betontechnologische Kenngrößen.

Für die Betrachtung von Klimaereignissen jenseits der normativen Standardbemessungsverfahren empfiehlt es sich daher, im Rahmen von Grundlagenermittlung und Vorplanung die verfügbaren Daten abzustimmen. Bleiben die Eingangswerte im Bereich des spekulativen, wird durch die Berechnungskomplexität eine Scheingenauigkeit vorgetäuscht.

Für die Klimadaten stehen zwar prinzipiell aufgrund der internationalen Bedeutung der Thematik viele Messwerte zur Verfügung. Historische Messungen bedürfen jedoch einer Übertragung in Bemessungssituationen. Der probabilistische Rahmen hierfür steht mit Eurocode 0 [19] zur Verfügung, allerdings wird dieser Weg in der Baupraxis nur selten beschritten. I. d. R. werden „ingenieurtechnische“ Sicherheitszuschläge auf Messdaten gewählt, um Eingangswerte in die Berechnungen „auf der sicheren Seite“ zu generieren.

Die Datenerhebung wird für die frühe Planung auch problematisch, wenn die Betontechnologie erst im Zuge der Ausführung durch die Baufirmen abschließend festgelegt wird. Die Schnittstelle zwischen Planung und Ausführung über Vorschriften und technische Vertragsbedingungen alleine ist nur bedingt zielführend, da hierbei oftmals projektspezifische Fragestellungen, wie z. B. lokale Verfügbarkeit, offen bleiben. So lässt sich bei der in [12] beschriebenen Rissproblematik von WEA-Fundamenten die betontechnologisch sinnvolle Lösung mit LH-Zementen nur bei lokaler Verfügbarkeit derselben im Lieferbetonwerk realisieren. Die vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) propagierte „BBQ-Lösung“ [20] stellt hierfür einen Schritt in die richtige Richtung dar. Auch werden dort Vorgaben für klimatische Abweichungen behandelt.

Die Problematik wird im Ausland nochmals verstärkt, da gerade in Entwicklungs- und Schwellenländern die Informationslage an Daten und Vorschriften geringer ist.

Vor Verwendung detaillierter Berechnungsverfahren sollte daher die Verlässlichkeit der damit erzielbaren Prognosen überprüft werden. Alternativ wäre ein robustes Planungskonzept zu entwickeln, das notfalls auch die Konstruktion beeinflusst. Hierin gestalten sich verlässliche Eingangswerte, wie z. B. ein zielsicher herstell-, liefer- und einbaubarer Beton als sinnvoller.

6.2 Realisierungsphase

Die zuvor genannte Robustheit der Betonrezeptur muss in der Realisierung zielsicher umgesetzt werden. Die kurzfristigen Wetterprognosen sind mittlerweile i. d. R. ausreichend zuverlässig. Bei zu erwartenden, höheren Umgebungstemperaturen sollten die Betonrezepturen daher entsprechend angepasst werden. Bei der Auswahl der Betonrezepturen ist ggf. auf Alternativen zu achten.

Neben den bekannten Maßnahmen zur Herstellungsbegleitung und Nachbehandlung des Betons können zusätzliche Witterungsschutzmaßnahmen wie z. B. Einhausungen, wie sie bei Abdichtungsarbeiten im Hochbau oder Schweißarbeiten im Stahlbau üblich sind, überlegt werden (Abb. 20).



Abb. 20: Maschineller Einbau Fahrbahn-Spezialbeton in Wetterschutzzelt, Rheinbrücke Maxau [KREBS+KIEFER]

7 Fazit

Extreme Klimaereignisse sind für die Planung als Einwirkung nur bedingt relevant, da sowohl Lastart als auch Berechnungsmethoden hierfür grundsätzlich bekannt und erprobt sind. Zukünftige Klimaveränderungen verstärken allerdings die bereits jetzt schon bei der Betonherstellung und -verarbeitung bekannten Probleme in Temperaturfragen. Die Planung hat sich in diesem Kontext mehr am zielsicher Realisierbaren als am technisch Möglichen zu orientieren.

Es wird daher für den Klimawandel kein neuer Beton benötigt. Vielmehr bedarf es der Vorgabe verlässlicher Berechnungsparameter und der Verwendung robuster Betonsorten und Herstellverfahren für das Zutreffen derselben.

8 Literatur

- [1] DIN EN 1991-1-5:2010-12 mit DIN EN 1991-1-5/NA:2010-12 (2010) Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen.
- [2] Hackenbruch, J. (2018) Anpassungsrelevante Klimaänderungen für städtische Baustrukturen und Wohnquartiere. Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie; 77. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- [3] DIN 19702:2013-02 (2013) Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.
- [4] Ehmann, R., Turner, K. (2017) Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten. FuE-Abschlussbericht, Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe.
- [5] Akkermann, J., Wu, X. (2016) Das Schiffshebewerk am Drei-Schluchten-Staudamm, China – Bau des größten Fahrstuhls der Welt. Bautechnik 93, Heft 12, S. 899-906.
- [6] D.T. R.-B.C. 2-41 (1993) Règles de conception et de calcul des structures en béton armé C.B.A.93. Ministère de l'Habitat, Algerien
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (2010) DAfStb-Richtlinie, Massige Bauteile aus Beton. Beuth, Berlin.
- [8] Bödefeld, J. (2010) Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 92, Karlsruhe.
- [9] Müller, H. S., Nolting, U., Link, J. (Hrsg.). (2017) Sicherheit durch Beton: Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen. 13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- [10] Deutscher Wetterdienst (2010) KOSTRA-DWD-2010, Starkniederschlagshöhen für Deutschland. Abschlussbericht.
- [11] Sanio, D., Mark, P., Ahrens, A. (2017) Temperaturfeldberechnung für Brücken. Beton- und Stahlbetonbau 112, H. 2, S. 85-95.
- [12] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2011) Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Ausgabe 5/2011.

- [13] Akkermann, J., Weiler, S. (2017) Risse in Fundamenten von Onshore-Windenergieanlagen. Beton- und Stahlbetonbau 112, H. 1, S. 2-11.
- [14] ZTV-W LB 215 (2012) Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton.
- [15] Bundesanstalt für Wasserbau (2019) BAWMerkblatt Rissbreitenbegrenzung für Zwang in massiven Wasserbauwerken (MRZ). Gelbdruck 2019.
- [16] Akkermann, J., Bastian, K., Fischer, E., Bouthiba, A. (2018) Realisierung der Großen Moschee von Algerien. Bautechnik 95, H. 6, S. 410-419.
- [17] Akkermann, J., Constantinescu, D., Hewener, A. (2015) Die Große Moschee von Algerien – ein Monument im Starkbebengebiet. Bautechnik 92, H. 1, S. 57-64.
- [18] Akkermann, J., Hewener, A. (2015) Seismische Isolierung des Gebetssaals der Großen Moschee von Algerien. Beton- und Stahlbetonbau 110, H. 2, S. 155-161.
- [19] DIN EN 1990:2010-12 mit DIN EN 1990/NA:2010-12 (2010) Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- [20] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2019) DAfStb-Richtlinie „Betonbauqualität für Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton (BBQ-Richtlinie)“. Entwurf Oktober 2019.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Jan Akkermann

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät für Architektur und Bauwesen
Moltkestraße 30
76133 Karlsruhe

Kévin Bastian M. Eng.

KREBS+KIEFER Ingenieure GmbH
Stephanienstr. 55
76133 Karlsruhe

Betonagen bei hohen Temperaturen – Bauvertrag, Betontechnologie und Bauausführung

André Weisner

Zusammenfassung

Will man bei hohen Temperaturen betonieren, so sind Anstrengungen bei der planerischen und praktischen Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung der Betonage erforderlich. Bauvertraglich wird das Thema leider nur selten ausreichend erfasst. Im Beitrag werden vertragliche Lösungsansätze aufgezeigt und technische Vorschläge gemacht, wie man auch bei hohen Temperaturen mangelfreie Betonbauwerke errichtet. Dabei stehen die Begrenzung der Frischbeton- und Bauteiltemperatur, der Verlauf der Hydratationswärmeentwicklung und die Vermeidung unplanmäßiger Risse und Rissbreiten mit herkömmlichen betontechnologischen Mitteln im Fokus des Beitrages.

1 Einleitung und Allgemeines

Hohe Temperaturen vor, während und nach dem Betonieren werden in der Praxis häufig unterschätzt und bisher bauvertraglich kaum oder gar nicht berücksichtigt. Die Regelungen in der VOB und zum Teil auch in den Normen reichen, vor allem bei anspruchsvolleren Bauwerken, nicht aus. Deshalb sind weitergehende technische Überlegungen und Abstimmungen im Vorfeld erforderlich und besondere Anstrengungen während und nach der Betonage ratsam.

2 Bauvertragliche Regeln beim Betonieren bei hohen Temperaturen

2.1 Was sagt die VOB?

Die VOB-C Norm DIN 18331 [1] verweist im Abschnitt „Stoffe, Bauteile“ auf die für die Bemessung, den Baustoff und die Bauausführung in Deutschland relevanten Normen [2], [3], [4]. Diese werden somit im Bauvertrag verankert und unter Abschnitt 2.2 näher betrachtet. Die Formulierungen im Abschnitt 4.2.10 [1] sind, vorsichtig formuliert, „unglücklich“ und tragen dazu bei, dass der Bauunternehmer sich im Bereich der „Besonderen Leistungen“ wähnt. Vorsorge- und Schutzmaßnahmen werden dort als solche beschrieben, wenn vor dem Betonieren „über einen Zeitraum von 48 h anhaltende Lufttemperaturen von durchschnittlich über 30 °C“ herrschen. Das tritt in der Praxis in Deutschland nicht ein.

2.2 Regelungen zu hohen Temperaturen in den Betonnormen

2.2.1 Vorgaben aus der Planung und Bemessung

Für das Betonieren bei sommerlichen Temperaturen gibt es nach den Bemessungsnormen [2] allgemeine, indirekte und direkte Vorgaben.

Eine direkte Vorgabe ist nach der A1-Änderung der DIN EN 1992-1-1-NA [4] enthalten. Demnach ist, bei wirtschaftlichen Stahlbetonbauweisen, die in der Tragwerksplanung angesetzte Zugfestigkeitsentwicklung des Betons im Bauvertrag anzugeben. Insbesondere der Zusammenhang zwischen $f_{ct,eff}$ und $f_{ct,m}$ ist für die Wahl der Betonausgangsstoffe und die Festigkeitsentwicklung eine wichtige und erforderliche Angabe. Diese wirkt sich auf das Rissverhalten und die erforderliche Bewehrungsmenge aus.

2.2.2 Was muss der Hersteller beachten?

Nach Anhang 4 der DIN EN 206-1 und DIN 1045 Teil 2 [3] sind i. A. die Erstprüfungen bei Frischbetontemperaturen zwischen 15 °C bis 22 °C durchzuführen.

2.2.3 Randbedingungen für die Bauausführung

Die Nachbehandlungsdauer ist u. a. abhängig von der Bauteil- bzw. Lufttemperatur und verkürzt sich demnach im Sommer. Die normative Bauteiltemperatur für ein Bauteil in nasser bzw. wechselnd nasser Umgebung ist auf 70 °C begrenzt [4]. In der Praxis sind die Vorgaben aus 2.2.1 und 2.2.2 oft unbekannt.

Die Folgen, die sich bei Abweichungen ergeben, werden – insbesondere bei hohen Temperaturen – unterschätzt. In der Baustoffnorm [2] heißt es z. B. dazu: „Werden Betonierarbeiten auf der Baustelle bei stark abweichenden Temperaturbedingungen ausgeführt (in Bezug auf Abschnitt 2.2.2) ... sollte der Betonhersteller informiert werden, damit entsprechende Auswirkungen der Betoneigenschaften berücksichtigt werden und der Hersteller die Notwendigkeit zusätzlicher Prüfungen in Betracht ziehen kann“.

2.3 Vorschläge für den Bauvertrag

Will der Bauherr unabhängig vom Wetter die Bauzeit einhalten, sind wie für den „Winterbau“ auch Leistungen für den „Sommerbau“ sinngemäß zusätzlich auszusprechen. Denkbar wären Zulage-Positionen auf die Betonposition bei bestimmten hohen Außentemperaturen oder eine Begrenzung der Frischbetontemperatur.

Ein anderer Weg wäre auch denkbar. Dann empfiehlt es sich schon in den Verdingungsunterlagen darauf hinzuweisen, dass im bauvertraglichen Bauzeitenplan Pufferzeiten für zu warmes Wetter aufgenommen werden müssen. Dies vermindert spätere Spannungen bei der Vertragsabwicklung zwischen den Vertragspartnern.

3 Betontechnologie

3.1 Bauteile im üblichen Hochbau

Bei Bauteilen im Hochbau, zu denen u. a. Gründungsplatten gehören, an die keine besonderen Anforderungen gestellt werden und deren Bauteilmaße und Druckfestigkeitsklassen dem üblichen Hochbau entsprechen, sollten Betone verwendet werden, deren Festigkeitsentwicklung maximal „mittel“ ist.

Technologisch ist u. a. auf das Ansteifverhalten des Betons, aber auch auf die temperaturabhängige Wirkung von Betonzusatzmitteln, z. B. bei LP-Beton, zu achten.

3.2 Bauteile mit hohen Anforderungen oder besonderer Kubatur

Bei massigen Bauteilen mit kleinsten Abmaßen ab 80 cm [5], [6] und Weißen Wannen [7], [8] sind höhere Anforderungen an die Betonzusammensetzung und an die Frischbetontemperatur zu stellen. Dabei sollte eine Abstimmung im Hinblick auf die Tragwerkswerksplanung erfolgen.

Es sollten Zemente mit geringer Frühfestigkeit und geringer Zementdruckfestigkeitsklasse gewählt werden. Am besten bieten sich hier Hochofenzemente und LH-Zemente an.

Falls auf Grund hoher Außentemperaturen die Gefahr besteht, dass Betonierlagen nicht mehr sicher frisch in frisch eingebaut werden können, sollten Verzögerer eingesetzt werden.

Es empfiehlt sich eine Begrenzung der Frischbetontemperatur auf ≤ 25 °C. Kommen neben hohen Außentemperaturen noch weitere kritische Randbedingungen hinzu, wird eine Verschärfung der Untergrenze auf 20 °C empfohlen. Dies kann bei teil- oder vollgezwängten WU-Bauteilen der Fall sein, wenn weitere ausführungstechnische Maßnahmen nicht ergriffen werden [9].

4 Bauausführung

Sind hohe oder sehr hohe Außentemperaturen angekündigt, muss die grundsätzliche wirtschaftliche Entscheidung getroffen werden, ob betoniert wird oder nicht.

Eine Absage der Betonage kann z. B. Sinn machen, wenn auch an den Folgetagen hohe Temperaturen angesagt sind und es sich um Bauwerke nach Abschnitt 3.2 handelt und die erforderlichen Aufwendungen unverhältnismäßig wären. Die Entscheidung sollte jedoch so rechtzeitig wie möglich mit dem Betonmischwerk abgestimmt werden.

Kritisch für eine Rissbildung sind dabei nicht nur die Frischbetontemperatur und die anfängliche Hydrationswärmeentwicklung, sondern auch die Abkühlung des Bauwerkes in der Nacht.

Eine Verschiebung der Betonierzeit bei dünnen Bauteilen auf den späten Nachmittag kann sinnvoll sein [10], [11]. Dicke Bauteile hingegen sollten so begonnen werden, dass der Bauteilkern zur kältesten Tages- bzw. Nachtzeit betoniert wird.

Nachfolgend werden praktische Maßnahmen vorgeschlagen, die einzeln oder kombiniert zur Lösung des Temperaturproblems führen können:

- kurze Transportwege zur Baustelle
- zügiger Betoneinbau
- bei Pumpbeton Leitungen wärmedämmen
- Begrenzung der Frischbetontemperatur und der Ausgangsstoffe; im Vorfeld der Bestellung mit dem Mischwerk abstimmen
- Frischbetonfahrzeug kühlen
- Mischfahrzeuge nicht in der Sonne auf den Einbau warten lassen
- zügige Nachbehandlung zur Vermeidung zusätzlicher Risse aus Schwinden
- Einsatz eines Verzögerer (VZ)
- wärmedämmende Nachbehandlung zur allmählichen Abkühlung; möglichst ab der maximalen Bauteiltemperatur
- helle Nachbehandlungsfolien verwenden
- Betonierbeginn und -ablauf sinnhaft wählen
- Frischbetonkühlung mit Stickstoff oder Scherbenis (besondere Maßnahmen)

Zur Vermeidung von unplanmäßigen Rissen und zur Begrenzung der Rissbreiten sind eine konsequente

Nachbehandlung und deren sofortiger Beginn erforderlich. Der Beton muss dazu noch mattfeucht sein. Selbst bei üblichen Bodenplatten ist bei hoher Außentemperatur ein Nachbehandlungsbeginn schon während der Betonage oft ratsam.

Die Qualitätssicherung bei hohen Außentemperaturen sollte erhöht werden. Der Umfang nach Überwachungskategorie 1 reicht hierfür nicht aus.

Autor

Dipl.-Ing. (FH) André Weisner
InformationsZentrum Beton GmbH
Hannoversche Straße 21
31319 Sehnde

5 Literatur

- [1] VOB Teil C - Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen Betonarbeiten - DIN 18331 (9/2019), Abschnitte 4.2.10, 2 und 2.1
- [2] DIN EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung u. Konstruktion von Stahlbeton- u. Spannbetonwerken - Teil 1-1 u. DIN EN 1992-1-1 NA Nationaler Anhang - Eurocode 2: Bemessung u. Konstruktion von Stahlbeton- u. Spannbetonwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln u. Regeln für den Hochbau u. DIN EN 1992-1-1/NA/A1 Änderung
- [3] DIN EN 206-1 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung u. Konformität u. DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton u. Spannbeton - Teil 2: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung u. Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [4] DIN EN 13670 Ausführung von Tragwerken aus Beton u. DIN 1045-3 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
- [5] DAfStb-Richtlinie - Massige Bauteile aus Beton (2010)
- [6] Zement-Merkblatt B11 - Massige Bauteile aus Beton, InformationsZentrum Beton, A. Weisner, T. Richter (2019)
- [7] DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (2017)
- [8] Zement-Merkblatt H10 - Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton, InformationsZentrum Beton, D. Bosold, T. Bose (2019)
- [9] Hinweise u. Erläuterungen zur Neuauflage der DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton, Beton-Kalender C. Alfes, F. Fingerloss, C. Flohrer (2018)
- [10] Einfluss sommerlicher Bedingungen auf die Rissbildung im jungen Beton, Vortragsskript Fachtagung IZB: Betonieren im Sommer, N. V. Tue (2016)
- [11] Massige Bauteile aus Beton sicher herstellen - BauPortal, A. Weisner (2016)

Einfluss höherer Temperaturen auf die Zement- und Betoneigenschaften

Christoph Müller und Wibke Hermerschmidt

Zusammenfassung

Im Hinblick auf den Klimaschutz stehen die Zement- und die Betonindustrie sowohl bezüglich der Rohstoffauswahl und der Herstellungsprozesse als auch im Hinblick auf die Anwendung von Zement und Beton vor neuen Herausforderungen. Aktuell werden mehrere Wege verfolgt, um die spezifischen CO₂-Emissionen von Zementen weiter zu senken. Hierzu gehören neben neuen Lösungsansätzen wie der Abscheidung von CO₂ in Zementwerken bewährte Konzepte wie der Einsatz alternativer Brennstoffe, die Steigerung der Energieeffizienz in Zementwerken sowie die Senkung des Klinker/Zement-Faktors, die in unterschiedlicher Art und Weise weiter optimiert werden können. Im Bereich der Anwendung von Zement und Beton gilt es in Zukunft u. a., sich auf veränderte Wetterbedingungen und zunehmende Extremwetterereignisse einzustellen. Erhöhte Temperaturen haben eine beschleunigte Frühfestigkeitsentwicklung des Betons zur Folge, unabhängig davon, ob sie durch einen Zement mit hoher Anfangsfestigkeit, einen erhöhten Zementgehalt, höhere Frischbeton- oder Umgebungstemperaturen oder durch einen langsamen Wärmeabfluss hervorgerufen werden. Darüber hinaus beeinflusst der Temperaturverlauf im Bauteil die Entstehung von Eigen- und Zwangsspannungen und die damit verbundene Rissbildung bzw. die notwendige Menge der Rissbreiten beschränkenden Bewehrung. Zur Verminderung der Temperaturerhöhung infolge Hydratationswärme hat sich, z. B. für massige Bauteile, der Einsatz von LH bzw. VLH-Zementen bewährt, wenn die langsamere Festigkeitsentwicklung erwünscht ist bzw. toleriert werden kann. Klinkereffiziente Zemente, z. B. unter Verwendung von Hüttsand, leisten hier einen entsprechenden Beitrag zur Begrenzung der Wärmeentwicklung bei gleichzeitiger Verminderung der spezifischen CO₂-Emissionen der Betonbauweise.

1 Allgemeines

Aufgrund des anhaltend hohen Ausstoßes von Treibhausgasen und der damit verbundenen steigenden CO₂-Konzentration in der Atmosphäre wird von einem weiteren Anstieg der Erdtemperatur ausgegangen, welcher eine ernstzunehmende Bedrohung für das globale Ökosystem in vielerlei Hinsicht darstellt. Da die Zementherstellung einen entsprechenden Anteil der globalen CO₂-Emissionen verursacht, ist es aus Klimaschutzsicht zwingend notwendig, Möglichkeiten einer CO₂-armen Zementherstellung zu finden und die Ressourceneffizienz der Betonbauweise zu steigern. Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens vom Dezember 2015, also die Begrenzung der globalen Erwärmung auf 2 °C, zu erreichen, wird es notwendig sein, an mehreren Maßnahmen zur Minderung der spezifischen CO₂-Emissionen der Zement- und Betonindustrie parallel zu arbeiten.

Im Zuge der offenbar bereits spürbaren Auswirkungen des Klimawandels wie andauernden Hitzeperioden oder der Zunahme von Extremwetterereignissen entstehen auch im Bereich der Anwendung von Zement und Beton neue Herausforderungen.

Bereits in der Frischbetonphase wirken sich erhöhte Temperaturen auf die Leistungsfähigkeit des Betons aus. Hier kommt es ganz wesentlich darauf an, Betonzusammensetzungen mit robusten Eigenschaften unter wechselnden Randbedingungen zu konzipieren.

Im jungen Alter beeinflusst die Umgebungs- bzw. die Betontemperatur die Festigkeitsentwicklung sowie die Intensität und Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung. Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturverläufe auf die Festigkeitsentwicklung eines bestimmten Betons lässt sich quantitativ mithilfe von Reifemodellen abschätzen. Insbesondere bei massigen Bauteilen beeinflusst der Temperaturverlauf während der Erhärtung die Entstehung von Eigen- und Zwangsspannungen und die damit verbundene Rissbildung bzw. die notwendige Menge der Rissbreiten beschränkenden Bewehrung.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick zum Stand der Kenntnisse hinsichtlich der Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Zementproduktion sowie dem Einfluss höherer Temperaturen auf die Zement- und Betoneigenschaften. Neben den explizit genannten Literaturstellen werden hierbei insbesondere Informationen aus [1] verwendet.

2 Wege zur Reduktion der CO₂-Emissionen bei der Zementproduktion

Da die Zementherstellung einen erheblichen Anteil der globalen CO₂-Emissionen verursacht, kommt der Erarbeitung von Methoden zur Reduktion der CO₂-Emissionen eine besondere Bedeutung zu.

Einen maßgeblichen Beitrag zur bisher erreichten Reduktion der CO₂-Emissionen bei der Zementproduktion leistet der Einsatz alternativer Brennstoffe durch die damit einhergehende Einsparung fossiler Brennstoffe. Gleichzeitig wurde durch die Reduzierung des Klinkergehalts im Zement eine Verminderung der spezifischen CO₂-Emissionen von Zement erreicht. Beide Konzepte sind noch nicht vollständig ausgeschöpft und werden daher stetig weiter optimiert. Ein weiterer Ansatz, der sich aktuell in der Entwicklung befindet, ist die Abscheidung von CO₂ bei der Klinkerherstellung. Ziel dieses Konzepts ist es, das abgeschiedene CO₂ langfristig zu speichern (Carbon Capture and Storage) oder einer anderen Nutzung zukommen zu lassen (Carbon Capture and Use) [2].

Neue klinkereffiziente Zemente wie CEM II/C-M und CEM VI mit hohem Kalkstein- und Hüttensandgehalt bieten Möglichkeiten für eine weitere Reduktion des Klinker/Zement-Faktors. CEM II/C-M Zemente enthalten mindestens 50 M.-% Portlandzementklinker, CEM VI Zemente mindestens 35 M.-%. Untersuchungen des VDZ und anderer Forschungsstellen zeigen, dass mit diesen Zementarten vergleichbare Festigkeiten im Beton wie mit den aktuell für die Anwendung in Betonen gemäß DIN 1045-2 bzw. DIN EN 206 zugelassenen Zementarten erreicht werden können [2, 3, 4]. Bei einer geplanten Verwendung der Zemente für Außenbauteile muss neben der Druckfestigkeit auch die Dauerhaftigkeit betrachtet werden. Bei üblichen Außenbauteilen des Hochbaus sind dies konkret die Expositionsklassen XC3 beziehungsweise XC4 in Kombination mit XF1. Untersuchungen des VDZ weisen darauf hin, dass bei der Verwendung von CEM II/C-

Zementen ein ausreichender Karbonatisierungswiderstand sowie Frostwiderstand bei mäßiger Wassersättigung zielsicher erreicht werden kann [2, 4]. Die zugehörigen Ergebnisse der Karbonatisierungs- und Frostversuche sind in Abbildung 1 und 2 dargestellt.

3 Robuste Frischbetoneigenschaften

Die Verarbeitungseigenschaften eines Betons werden von der Betonzusammensetzung, den Eigenschaften der Betonbestandteile und der Betontemperatur bestimmt. Der Wasserbedarf von Beton wird überwiegend durch Art, Zusammensetzung und Menge der Gesteinskörnung beeinflusst.

Demgegenüber ist der Einfluss der verwendeten Zementart in der Regel gering. Betone mit CEM II/B-Zementen und CEM III/A-Zementen zeigen i. d. R. ein günstiges Ansteifverhalten, insbesondere bei höheren Außentemperaturen und längeren Transportzeiten. Darüber hinaus ist aufgrund der optimierten Korngrößenverteilung von CEM II- und CEM III/A-Zementen von einer guten Verarbeitbarkeit der damit hergestellten Betone auszugehen. Sie bieten sich daher auch zur Herstellung von Betonen der Konsistenzklassen F5 und F6 an. Auch für den Einsatz in größeren, frisch-in-frisch herzustellenden Bauteilen sind die für CEM II/B und CEM III/A-Betone tendenziell längeren Verarbeitungszeiten durchaus erwünscht [5].

In der Transportbetonherstellung war nach Daten des Europäischen Transportbetonverbandes ERMCO [6] im Zeitraum 2000 bis 2012 eine Zunahme der weicheren Betonkonsistenzen feststellbar. Der Anteil der Konsistenzklassen F4 und F5 nahm von 4 % auf 11 % zu, was mehr als einer Verdoppelung entspricht. Der Anteil der Konsistenzklasse F6 sowie SVB betrug 2012 2 %. Zur gleichen Zeit nahm der Anteil der Konsistenzklassen F1 bis F3 von 96 % auf 87 % ab. Die weicheren Betone dürften im Wesentlichen im Bereich von Bauteilen mit komplizierten Geometrien und hohen Bewehrungsgraden zum

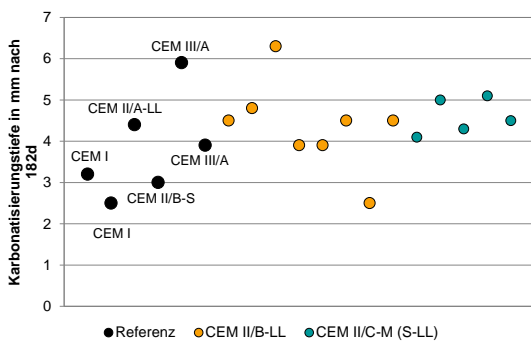


Abb. 1: Karbonatisierungstiefen von Betonen mit einem Zementgehalt von 260 kg/m³ und einem Wasserzementwert von w/z = 0,65 im Alter von 182 Tagen [4]

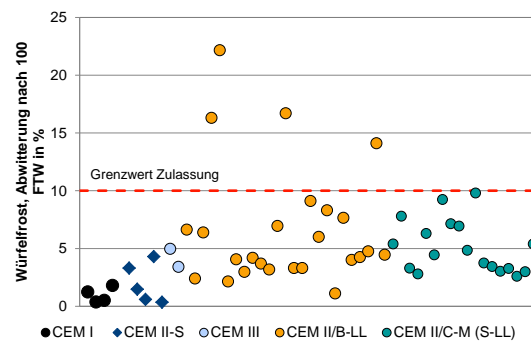


Abb. 2: Abwitterung von Betonen mit einem Zementgehalt von 280 kg/m³, und einem Wasserzementwert von w/z = 0,60 im Würfelfrostverfahren [4]

Einsatz kommen. Diese Entwicklung geht einher mit der verstärkten Nachfrage nach dem Betoneinbau mittels Pumpe und der Anforderung, die Konsistenz über einen längeren Zeitraum zu halten. Um weichere Betone robust herstellen zu können, genügt es aber im Regelfall nicht, nur den Fließmittelgehalt zu erhöhen. Meist muss der Zement- bzw. Leimanteil angepasst werden. Zu diesem Thema wurden in jüngster Zeit an verschiedenen Stellen Untersuchungen durchgeführt.

Abbildung 3 zeigt Ergebnisse aus [7] zur zeit- und temperaturabhängigen Veränderung der Konsistenz zweier Betone, die sich nur im Leimvolumen unterscheiden. In Abbildung 3 wird ersichtlich, wie deutlich die Erhöhung des Leimgehaltes um ca. 30 l/m^3 bei gleichzeitiger Verringerung des Fließmittelgehaltes von 0,7 auf 0,2 M.-% bezogen auf den Zement das temperaturabhängige Verhalten der Betonkonsistenz beeinflusste:

Bei einer Frischbetontemperatur von 10°C und 20°C verflüssigte der Beton B1 mit einem Leimgehalt von 300 l/m^3 nach. Bei Frischbetontemperaturen von 25°C und 30°C war der Nachverflüssigungseffekt nicht vorhanden. Bei dem Beton B3 mit einem Leimgehalt von 331 l/m^3 war weder bei einer Frischbetontemperatur von 10°C noch bei 20°C eine Nachverflüssigung festzustellen. Der Beton zeigte über 90 min eine praxisübliche gute Konsistenzhaltung mit geringen Schwankungen innerhalb der Streubreite der Ausbreitmaßprüfung.

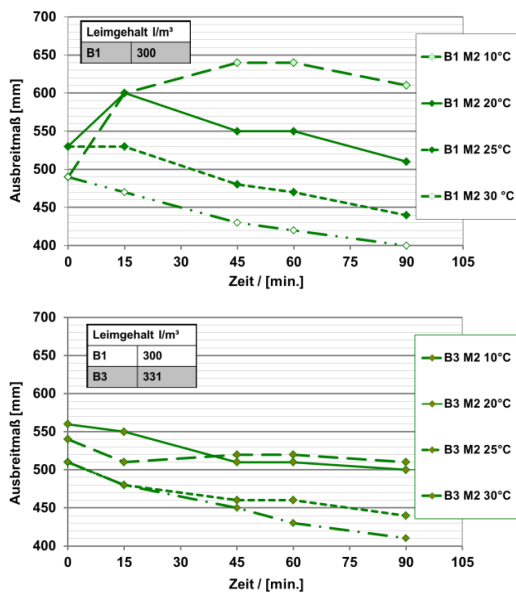


Abb. 3: Ausbreitmaße zweier Betone B1 (Leimgehalt 300 l/m^3) und B3 (Leimgehalt 331 l/m^3) in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur - Mischregime M2: Gesteinskörnungen 20 s, Wasser inkl. FM 10 s, Zement 30 s, Nassmischzeit 120 s [7]

4 Einfluss der Temperatur auf die Festigkeitsentwicklung

Je höher die Betontemperatur ist, umso schneller wird infolge der beschleunigt ablaufenden Hydratation Wärme freigesetzt und umso schneller nimmt die Festigkeit im jungen Alter zu. Entsprechend führen erhöhte Frischbetontemperaturen zu einem schnelleren Anstieg der Frühfestigkeit und einer höheren Bauteiltemperatur infolge der Hydratationswärmeabfuhr. Bei niedrigeren Frischbetontemperaturen steigt die Frühfestigkeit langsamer und die Temperatur im Bauteil bleibt niedriger. Der Temperatureinfluss kann somit gezielt als Werkzeug zur Steuerung der Frühfestigkeit eingesetzt werden. Zur Steigerung der Frühfestigkeit stehen folgende Maßnahmen zur Verfügung: Eine Betonzusammensetzung mit hoher Frühfestigkeit durch entsprechende Wahl von Zement, Wassereinstromwert und Zusatzmittel, eine erhöhte Temperatur des Frischbetons sowie eine Wärmebehandlung des verdichteten Betons. Diese Maßnahmen lassen sich teilweise miteinander kombinieren.

Frischbetontemperaturen oberhalb von 20°C beschleunigen die Festigkeitsentwicklung erheblich [1]. Aus dem in Abbildung 4 dargestellten Beispiel wird ersichtlich, dass unter den angegebenen Wärmeabflussbedingungen die Festigkeit im Alter von zwölf Stunden bei einer Frischbetontemperatur von 25°C im Vergleich zu einer Frischbetontemperatur von 20°C nahezu doppelt so hoch ist.

Die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit ist für jeden Beton hauptsächlich von der Zusammensetzung und den Lagerungsbedingungen abhängig. Für die Ermittlung der altersabhängigen Druckfestigkeit können empirische Rechenansätze angewendet werden, die eine rechnerische Abschätzung der Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der Erhärtungsdauer und -temperatur ermöglichen.

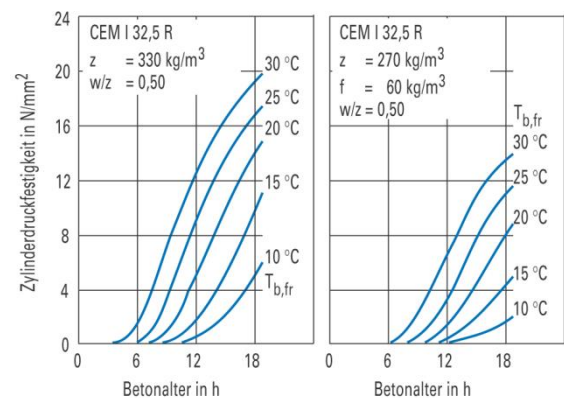


Abb. 4: Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur für zwei Betone in einem Bauteil mit 0,6 m Dicke in Stahlschalung [8]

Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturverläufe auf die Festigkeitsentwicklung eines bestimmten Betons lässt sich quantitativ anhand des wirksamen Betonalters oder der Reife abschätzen. Beide Kenngrößen sind ein Maß für den Erhärtungszustand zu einem bestimmten Betonalter in Abhängigkeit von der dazugehörigen Temperaturgeschichte. In den meisten Reifemodellen wird davon ausgegangen, dass die Temperatur ausschließlich die Geschwindigkeit der Hydratation beeinflusst und die Eigenschaften nach vollständiger Erhärtung unabhängig von der Temperatur dieselben bleiben. Die Reife ist so definiert, dass ein unter verschiedenen Temperaturverläufen erhärtender Beton gleicher Zusammensetzung die gleiche Druckfestigkeit erreicht, wenn er die gleiche Reife hat. Alternativ kann der Einfluss der Temperatur auf den Erhärtungsprozess über die Definition des wirksamen Betonalters beschrieben werden. Das wirksame Betonalter ist definiert als die Zeit, die der Beton bei einer konstanten Referenztemperatur (in Europa in der Regel 20 °C) gebraucht hätte, um den gleichen Erhärtungszustand zu erreichen wie unter der betrachteten realen Temperaturgeschichte. Mit beiden Ansätzen (Reife und wirksames Betonalter) kann die Festigkeitsentwicklung bei einem bestimmten Temperaturverlauf abgeschätzt werden, wenn die Festigkeitsentwicklung bei einer Normlagerung bei 20 °C oder einer anderen Referenztemperatur bekannt ist.

Die einfachste Beziehung für die Bestimmung der Reife ist die Reifefunktion nach Saul [9], die einen linearen Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Erhärtungsgeschwindigkeit unterstellt. Die Annahme dieser linearen Funktion führt in der Praxis allerdings für Temperaturen oberhalb von 30 °C zu recht ungenauen Ergebnissen [10]. Ein weiterer Nachteil dieser Reifefunktion ist, dass der Einfluss der Betonzusammensetzung unberücksichtigt bleibt. Insbesondere die Zementart und ggf. vorhandene reaktive Zusatzstoffe haben jedoch einen deutlichen Einfluss auf die Temperaturempfindlichkeit der Erhärtungsreaktion.

Eine genauere Möglichkeit zur Beschreibung des Temperatureinflusses auf die Hydratation bietet die Anwendung der Arrhenius-Gleichung, aus der in [11] erstmals eine Formulierung für das wirksame Betonalter abgeleitet wurde. Der Einfluss des Zements wird dabei über die Wahl der Aktivierungsenergie erfasst. Abbildung 5 zeigt ein Anwendungsbeispiel aus [12] für das wirksame Alter auf Basis der Arrhenius-Gleichung anhand der Festigkeitsentwicklung eines Betons mit 300 kg/m³ CEM III/A 32,5 N und einem Wassermenge-Wert von 0,47. Als Aktivierungsenergie wurde $E_A = 45,5$ kJ/mol angenommen. Aus der Darstellung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Erhärtungszeit (Abbildung 5 oben) wird ersichtlich, dass die Druckfestigkeit erwartungsgemäß

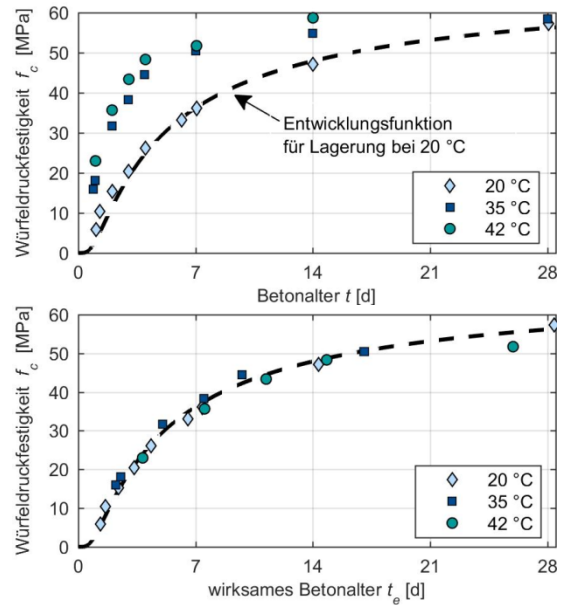


Abb. 3: Würfeldruckfestigkeit bei verschiedenen Lagerungstemperaturen in Abhängigkeit der Lagerungsdauer bzw. des wirksamen Betonalters, Daten aus [12]

mäß umso schneller ansteigt, je höher die Erhärtungstemperatur ist. Im Alter von 28 Tagen wurde bei allen Erhärtungstemperaturen in etwa die gleiche Festigkeit erreicht, da die Hydratation bis zu diesem Zeitpunkt in allen Fällen so weit vorangeschritten ist, dass die Temperatur eine untergeordnete Rolle spielt. Nach der Transformation der Erhärtungszeit auf das wirksame Betonalter folgen die Festigkeiten unabhängig von der Temperatur näherungsweise dem gleichen Verlauf (Abbildung 5 unten), womit die Gültigkeit der Arrhenius-Gleichung belegt wird.

Die Methode zur Ermittlung einer gewichteten Reife nach de Vree [13] liefert ähnliche Ergebnisse wie die Anwendung des wirksamen Betonalters auf Basis der Arrhenius-Gleichung. Der Einfluss der Zementart wird hierbei über den sogenannten c -Wert erfasst, der in Abhängigkeit des Klinkergehalts des Zements abgeschätzt oder aus Versuchsergebnissen bei unterschiedlichen Temperaturen experimentell bestimmt werden kann.

Die Anwendbarkeit der Reifemodelle wurde in der Fachliteratur bisher vor allem für Betone mit Portlandzement oder Hochofenzement, teilweise in Kombination mit Flugasche, gezeigt. Mit der Einführung neuer Zementarten bzw. dem vermehrten Einsatz weiterer Zementhauptbestandteile und der Verwendung moderner Betonzusatzmittel wird die Frage zu beantworten sein, ob die bekannten Reifefunktionen weiterhin uneingeschränkt anwendbar sind oder ob alternative oder modifizierte Ansätze entwickelt werden müssen.

5 Zwangsspannungen infolge abfließender Hydratationswärme

Die in erhärtenden Betonbauteilen durch die freigesetzte Hydratationswärme entstehende Temperaturerhöhung führt zum Aufbau von Eigen- und Zwangsspannungen, die wiederum beim Überschreiten der Zugfestigkeit Risse zur Folge haben.

Eigenstressungen treten auf, wenn zwischen dem Kern und der Oberfläche eines Bauteils ein Temperaturgradient vorhanden ist. Es handelt sich um einen Gleichgewichtszustand, der für den Fall, dass der Kern wärmer ist als die Oberfläche des Bauteils, durch Zugspannungen an der Oberfläche und Druckspannungen im Kern gekennzeichnet ist. Im jungen Beton können durch Eigenstressungen Risse im oberflächennahen Bereich (sogenannte Schalenrisse) entstehen.

Bei einer nicht zwangsfreien Lagerung entstehen durch die behinderte Wärmedehnung des Bauteils Zwangsspannungen. Abbildung 6 zeigt schematisch die Temperatur- und Spannungsentwicklung in einem verformungsbehinderten Bauteil während der Erhärtung. Durch die anfängliche Erwärmung und die behinderte Ausdehnung entstehen Druckspannungen, die verhältnismäßig gering bleiben, da der E-Modul des jungen Betons noch gering ist und der Beton ein ausgeprägtes viskoelastisches Verhalten aufweist, das einen Spannungsabbau bewirkt. Nach Überschreiten des Temperaturmaximums erfolgt eine Kontraktion des Bauteils und damit ein Abbau der Druckspannung. Da der

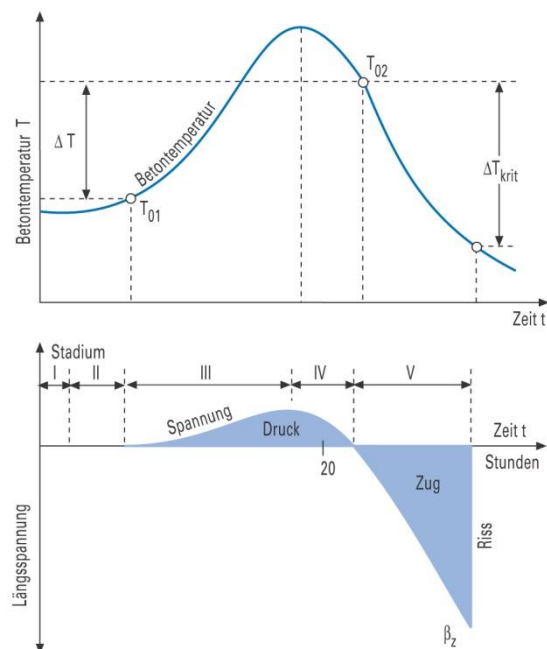


Abb. 4: Temperaturverlauf und Zwangsspannungen im jungen Beton bei behinderter Temperaturverformung (schematisch) nach [14, 15]

E-Modul in der Abkühlphase größer ist als in der Erwärmungsphase, entstehen bei fortschreitender Abkühlung Zugspannungen, die beim Überschreiten der Zugfestigkeit zur Entstehung von Trennrissen führen. Da die Zwangsspannungen erst in der Abkühlphase das Vorzeichen von Druck auf Zug wechseln, entstehen Trennrisse infolge Zwang in der Regel später als durch Eigenspannungen bedingte Schalenrisse. Oberflächliche Anrisse durch Eigenspannungen können durch den verminderten wirksamen Querschnitt die Entstehung von Trennrissen fördern.

Zur Vermeidung bzw. Verminderung der Rissbildung infolge abfließender Hydratationswärme bestehen hinsichtlich der Betontechnologie folgende Maßnahmen: Die Auswahl von Zementen mit langsamer und niedriger Wärmeentwicklung, die Begrenzung des Zementgehalts sowie die Wahl einer niedrigen Frischbetontemperatur. Konstruktive bzw. ausführungstechnische Maßnahmen sind die Anordnung von Fugen, die Wahl kurzer Betonierabschnitte und das Betonieren bei kühlem Wetter.

Eine weitere Reduktion des Klinker/Zementfaktors (vgl. Abschnitt 2) ist hinsichtlich der Zwangsspannungsproblematik grundsätzlich als positiv anzusehen, da die Höhe der freisetzbaren Hydratationswärme in der Regel mit sinkendem Gehalt an Portlandzementklinker abnimmt. Demgegenüber stehen jedoch die bereits jetzt spürbaren Folgen des Klimawandels, die dazu führen könnten, dass Betonagen auch bei sehr hohen Außentemperaturen mit entsprechend hohen Frischbetontemperaturen durchgeführt werden. Weiterhin ist zu beachten, dass es sich bei den aktuell angewendeten Bemessungsansätzen für die Rissbreitenbegrenzung überwiegend um empirische Ansätze handelt, die auf Erfahrungen der letzten Jahrzehnte basieren. Bei einer zunehmenden Veränderung der Zementzusammensetzung und der damit verbundenen Betontechnologie sowie veränderten Wetterbedingungen muss die Anwendbarkeit dieser Bemessungsansätze überprüft werden.

Temperatur- und Spannungssimulationen für erhärtende Bauteile bieten durch die realitätsnahe Berücksichtigung der Randbedingungen und Baustoffeigenschaften Möglichkeiten für eine genauere Bemessung der Rissbreiten beschränkenden Bewehrung bei gleichzeitiger Optimierung der Stahlmenge, vgl. u. a. [16, 17]. Die Anwendung hat sich bis jetzt jedoch überwiegend für spezielle Großprojekte durchgesetzt. Die aktuellen Entwicklungen bzgl. der Steigerung der Rohstoffeffizienz beim Bauen mit Stahlbeton bei gleichzeitiger Beibehaltung einer hohen Qualität unter zunehmend anspruchsvollen Rahmenbedingungen dürften dazu führen, dass solche Planungswerkzeuge in Zukunft an Bedeutung gewinnen.

6 Literatur

[1] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zement-Taschenbuch 2008, 51. Ausgabe, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik (2008), ISBN 978-3-7640-0499-6

[2] Schneider, Martin: The cement industry on the way to a low-carbon future. Cement and Concrete Research 124 (2019)

[3] Proske, T.; Rezvani, M.; Palm, S.; Müller, C.; Graubner, C.-A.: Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone, Cement and Concrete Composites 89 (2018), pp. 107-119.

[4] Müller, C.; Palm, S.; Hermerschmidt, W.: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen: Auswertung vorhandener Studien. Beton 69 (2019) 10, S.362-371

[5] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau - Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton (2008) - zu beziehen über www.beton.org

[6] ERMCO - European Ready Mix Concrete Organization: Statistics 2003 - 2017; abrufbar unter <http://ermco.eu/new/statistics-2003-2016/>; zuletzt geprüft 27.01.2020

[7] Küchlin, D.: Gleichmäßige Frischbetoneigenschaften unter schwierigen Randbedingungen - sind „moderne“ Betone zu empfindlich für die Praxis? In: HeidelbergCement - NEWSLETTER TECHNIK | Nr. 18 | Oktober 2013

[8] Hintzen, W.; Grube, H.: Verminderung der Ribbildung in Tunnelinnenschalen aus Ortbeton. In: Betonbau in Forschung und Praxis: Festschrift zum 60. Geburtstag von György Iványi, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 1999, S. 177-184

[9] Saul, A. G.: Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Magazine of Concrete Research 2 (1951) 6, p. 127-140

[10] Röhling, S.: Zwangsspannungen infolge Hydrationswärme. 2. Auflage (2009), Düsseldorf: Verlag Bau+Technik

[11] Freiesleben Hansen, P.; Pedersen, E. J.: Malinstrument til kontrol af betons haerdning. Nordisk Betong 1 (1977) 19, pp. 21-24

[12] Hermerschmidt, W.: Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons. Dissertation (2016), TU Braunschweig

[13] Vree, R.T. de; Tegelaar, R.A.: Gewichtete Reife des Betons: Kontinuierliche, zerstörungsfreie Ermittlung der Betondruckfestigkeit. Beton 48 (1998) 11, S. 674-678

[14] Springenschmid, R.; Nischer, P.: Untersuchungen über die Ursache von Querrissen im jungen Beton. Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973) 9, S. 221-226

[15] Weigler, H.; Karl, S.: Junger Beton: Beanspruchung, Festigkeit, Verformung. TH Darmstadt, Institut für Massivbau: Forschungsberichte 20 (1974)

[16] Schlicke, D.; Tue, N. V.: Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite unter Berücksichtigung des tatsächlichen Bauteilverhaltens - Teil 1: Verformungsbasiertes Bemessungsmodell und Anwendung für Bodenplatten. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 3: S. 120-131.

[17] Bödefeld, J.: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydrationswärme, Mitteilungsblatt Nr. 92 der Bundesanstalt für Wasserbau (2010), Karlsruhe

Autoren

Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ gGmbH
Tannenstr. 2
40476 Düsseldorf

Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt

VDZ gGmbH
Tannenstr. 2
40476 Düsseldorf

Klimaänderung – Erfahrungen aus der Praxis einer international tätigen Baufirma

Andreas Schaab

Zusammenfassung

Die Veränderungen unseres Klimas sind mittlerweile spürbar. Diese veränderten Bedingungen zeigen sich durch eine Zunahme von Extremwetterlagen wie Starkregen und Stürme und langanhaltende trockene und heiße Sommerperioden. Diese Wetteränderungen beeinflussen unser Baugeschehen durch überschwemmte Baugruben, unpassierbare Baustraßen und umgewehte, nicht ausreichend gesicherte Strukturen. HOCHTIEF hat begonnen seine Baumaßnahmen auf diese veränderten Randbedingungen zu untersuchen, um rechtzeitig Vorsorgemaßnahmen zu treffen, um allzu große Schäden und Bauzeitverluste zu vermeiden. Die hohen und langanhaltenden Sommertemperaturen machen eine Kühlung von Beton zur Einhaltung von zulässigen Frischbetontemperaturen unumgänglich. Die Konzepte der Frischbetonkühlung sind uns aus den heißeren Zonen der Erde bekannt und müssen auf die jeweiligen baustellenspezifischen Randbedingungen angepasst werden. Dies ist dann relativ leicht möglich, wenn der Bauausführende eine Baustellenmischanlage installieren kann. In innerstädtischen Regionen müssen meist die stationären Transportbetonmischanlagen genutzt werden, welche aktuell nur eingeschränkt die Möglichkeit einer Betonkühlung besitzen. Dies bedarf zukünftig einer Anpassung, um die Bauaufgaben auch unter veränderten Randbedingungen unserer Sommer zu ermöglichen. Die Bauteilinnenkühlung zur gezielten Abführung von Hydratationswärme im Bauwerk zur Reduktion von Zwangsspannungen ist eine neue, in Teilen Skandinaviens bereits etablierte Methode. Diese sollte zumindest an einigen Pilotbauwerken auf ihr wirtschaftliches und technisches Potential unter den Randbedingungen in Deutschland überprüft werden.

1 Allgemeines

Die globale Erwärmung unseres Lebensraumes nimmt in der aktuellen öffentlichen Diskussion einen hohen Stellenwert ein, auch weil sich durch die Erwärmung unsere Lebensgrundlage mehr oder weniger stark verändern wird. Beton, als unser universellster Baustoff, trägt durch seine hohen herstellbedingten CO₂-Emissionen in der öffentlichen Wahrnehmung mit zur Klimaerwärmung bei. Deshalb arbeitet die Zement- und Bauindustrie seit längerer Zeit an einer kontinuierlichen Reduktion dieser Emission. Dies führt zunehmend zu Veränderungen der Betonzusammensetzungen durch die Verwendung klinker-reduzierter Zemente und von Ersatzstoffen. Zusätzlich entstehen durch die immer länger andauernden und heißeren Hitzeperioden in unseren Regionen neue Herausforderungen in der Betonverarbeitung, aber auch für die Baukonstruktion. Diese Herausforderungen sind uns aus klimatisch heißeren Zonen weitestgehend bekannt.

Nachfolgend wird sich dieser Beitrag mit den Veränderungen bei der Betonverarbeitung und auch mit den Einflüssen auf die Baukonstruktion befassen. Die Diskussion zur Klimaerwärmung zeigt zwei wesentliche Veränderungen in unserem Wettergeschehen

auf. Dabei handelt es sich um höhere Lufttemperaturen mit längeren und heißeren Sommerperioden, aber auch um die Zunahme von Extremwetterereignissen mit Starkregen und Orkanböen. Auf die Auswirkungen dieser Hauptwetterveränderungen auf Baustellen wird im Nachfolgenden eingegangen.

2 Extremwetterlagen und deren Auswirkungen auf Baustellen

2.1 Starkregen und Orkanböen

Starkregenereignisse sind meist lokal begrenzte Starkregen mit einer sehr hohen Wassermenge auf einen begrenzten Raum. Sie sind mit unseren aktuellen Wetterprognosemodellen lokal kaum vorhersehbar, weshalb kurzfristige Interventionen unmittelbar vor oder während des Regenereignisses nicht zu einer Verhinderung von größeren Schäden wie beispielsweise Wasser- und Schlammereinbrüche in Baugruben führen. HOCHTIEF wurde von derartigen Extremwetterlagen in den beiden letzten Sommern auch nicht verschont. Insbesondere große Überflutungen in Baugruben, aber auch instabile Bergeinschnitte und unbenutzbare Baustraßen waren die Folgen.

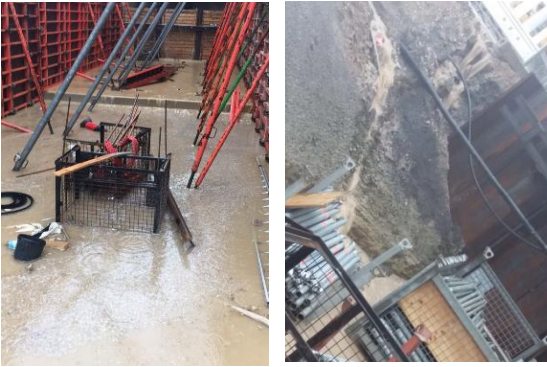


Abb.1: Auswirkungen von kurzfristigen Starkregenereignissen

HOCHTIEF hat deshalb in einigen Projekten entschieden, bereits vorbeugend Baustraßen in kritischen Abschnitten in Asphalt auszuführen, damit die Nutzbarkeit dieser kritischen Versorgungswege erhalten bleibt. Baugrubenböschungen und Geländeeinschnitte werden im Vorfeld analysiert, um mögliche Auswirkungen bei einem Starkregenereignis speziell in terminkritischen Abschnitten möglichst zu vermeiden. In vergleichbarer Weise werden kritische windempfindliche Strukturen bei der Baustelleneinrichtungsplanung detektiert und Maßnahmen zur Sicherung dieser Strukturen getroffen.

Trotz all dieser Maßnahmen können negative Auswirkungen auf Baustellen nicht mit absoluter Sicherheit verhindert werden. Beispielsweise entstand bei einer Großbetonage eines zweizelligen Tunnelrahmens in offener Bauweise durch eine auf wenige 100 m begrenzte Gewitterzelle mit einer kurzzeitig extremen Wassermenge großer Schaden. Durch umfangreiche Kernbohrungen und zerstörungsfreie Prüfungen musste nach Fertigstellung die fehlerfreie Betonage nachgewiesen werden.

Die Diskussion mit Bauherren nach einem Extremwetterereignis hinsichtlich Verantwortung und Kosten zeigt immer deutlicher auf, dass im Rahmen zukünftiger Projektplanungen und Ausschreibungen diese Extremwetterereignisse während der Bauphase mit zu berücksichtigen sind. Dabei sollen vorbeugende Maßnahmen zur Reduktion von Schäden geplant werden und diese in das Leistungsverzeichnis übernommen werden.

2.2 Betonagen bei hochsommerlichen Umgebungsbedingungen

Betonagen bei hochsommerlichen Temperaturen werden schon lange in vielen Teilen der Welt, speziell auf der Südhalbkugel ausgeführt. Insofern ist die Technologie zur Herstellung und Verarbeitung von Beton bekannt und erprobt.

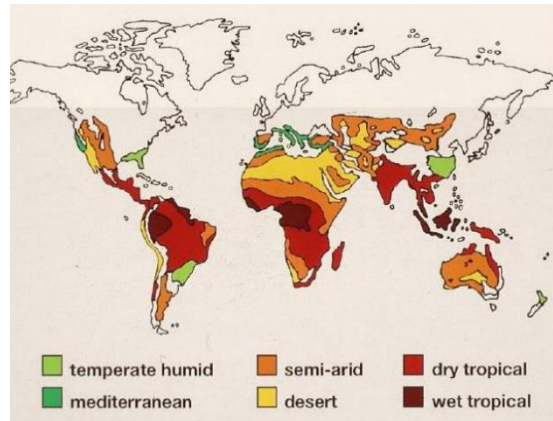


Abb. 2: Weltkarten mit Klimazonen

Auf den ersten und schnellen Blick erscheint es, als ob man die Erfahrungen aus diesen Regionen nur übertragen muss. Dies ist aber aufgrund unserer winterlichen, noch immer kalten und feuchten Jahreszeit nicht möglich, weil unsere Betone häufig auch einem Frost- oder Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt sein können. Speziell die Verkehrsbauwerke werden durch den Einsatz von Taumitteln beansprucht, was kleine Rissbreiten (0,2 mm) und eine dichte Betonrandzone, um den Stahl dauerhaft vor Korrosion zu schützen, erfordert. Insbesondere die Einhaltung dieser maximalen Rissbreiten führt deshalb zur Forderung nach geringen Zwangsspannungen infolge abfließender Hydrationswärme. Daher wird die zulässige maximale Frischbetontemperatur von normalerweise 30 °C bei massigen Bauteilen oder Tunnelbauwerken verschärfend auf 25 °C begrenzt. Insbesondere diese zusätzlichen Anforderungen der Beschränkung der Zwangsspannungen sind in den heißen Zonen der Erde nicht üblich, denn hierzu gibt es meist keine technische Notwendigkeit.

Viele skandinavische Länder haben weitergehende Anforderungen an die Baukonstruktion. Für Infrastrukturbauwerke werden häufig nahezu rissfreie oder zumindest rissarme Konstruktionen angestrebt. Dies gelingt nur durch aktive Bauteilkühlung in Verbindung mit einem ausgereiften Berechnungsprogramm zur Spannungsberechnung auf Bauteilebene. Diese Berechnungen werden meist in einem 2D Model, aber immer mehr auch in einem 3D Model erstellt. Die für diese Berechnung benötigten Baustoffmaterialkennwerte müssen im Rahmen einer äußerst umfassenden Erstprüfung bestimmt werden. Hierbei werden altersabhängige Materialparameter ausschließlich am Beton wie z. B. kalorimetrische Kenndaten, Festigkeiten, Elastizitätsmodul, autogenes Schwinden und Kriechen geprüft. Die Berechnungen werden im ersten Schritt weit vor der Ausführung mit den bei zur Ausführung möglichen jahreszeitlichen Temperaturdaten berechnet. Unmittelbar vor

der Ausführung werden diese Berechnungen nochmals mit den aktuellen Temperaturvorhersagen angepasst und überprüft. Grundsätzlich werden die Betone bei der Herstellung nicht zusätzlich gekühlt. Die Kühlleistung wird über die Kühlwassertemperatur und die Verweildauer des Kühlwassers in den eingebauten Kühlschlangen und über die Kühlschlangenlänge geregelt. Aufgrund der im Vergleich zu Deutschland kühleren Sommer wird das Kühlwasser normalerweise nicht gekühlt und besitzt Grundwasser- oder Gewässertemperatur. Werden beispielsweise Tunnelblöcke in Reihe betoniert, wird der schon hergestellte Tunnelblock mit warmem Wasser leicht erwärmt und der frische Betonblock wird gekühlt. Die Temperaturregelungen werden so aufeinander abgestimmt, dass möglichst in allen Querschnitten keine Zugspannungen, sondern leichte Druckspannungen herrschen. Überwacht wird dieser Prozess durch eine Vielzahl von Temperaturmessstellen im Bauteil. Im Vergleich zu Deutschland wird in Skandinavien eine deutlich geringere Stahlmenge bei vergleichbaren Konstruktionen verbaut.

Im Allgemeinen werden die Betonzusammensetzungen an die klimatischen Randbedingungen angepasst. Üblicherweise erfolgt hier eine Abstufung zwischen Rezepturen für winterliche und sommerliche Randbedingungen. Aufgrund der Erfahrungen der letzten beiden Sommer wird HOCHTIEF zukünftig für ausgewählte Bauwerke im Sommer auch noch eine Abstufung für hochsommerliche Randbedingungen und dabei auch die sommerliche Verknappung von Steinkohleflugasche berücksichtigen. Wie allgemein üblich werden für diese hochsommerlichen Temperaturbedingungen Bindemittelsysteme mit sehr niedriger Hydratationswärmentwicklung mit einer Druckfestigkeitsentwicklung am Beton $r \leq 0,15$ angestrebt. Zusätzlich sind Verarbeitungsversuche zur Sicherstellung eines ausreichenden Verarbeitungszeitfensters angeraten. Dabei ist zu beachten, dass bei höheren Betontemperaturen die Reaktivität des Zementklinkers steigt und die Löslichkeit der erstarrungsverzögernden Sulfate im Zement sinkt, was zu einem deutlich schnelleren Rücksteifen des Betons führt. Hier sollten Versuche mit verschiedenen Betonzusatzmitteln und Zusatzmittelkombinationen im Vorfeld im Klimaraum durchgeführt werden, um die für diese Randbedingungen geeignete Lösungen zu finden.

Zur Erlangung einer dauerhaften Betonrandzone kommt der Nachbehandlung der Betonoberfläche immer eine große Bedeutung zu. Unter sommerlichen Randbedingungen muss der Verdunstungsschutz jedoch den höheren Verdunstungsraten angepasst werden. Deshalb sind wasserhaltende feuchte Vliese und eine Folie als Verdunstungsschutz die richtige Wahl. Zusätzlich sollte die Folie möglichst noch verschattet werden, um das Aufheizen der Betonrandzone zu vermeiden.

2.3 Beispiele nationaler und internationaler Baustellen

2.3.1 Baustellen in Katar

Die Besonderheiten dieses arabischen Landes sind geprägt von den folgenden Randbedingungen:

- Heiße bis sehr heiße Tagestemperaturen bis 45 °C, Nachttemperaturen knapp unter 30 °C;
- Kurze und kühlere Zeiträume mit Tagestemperaturen um ca. 25 °C bei Nachttemperaturen um ca. 15 °C;
- Hohe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Betonkonstruktionen aufgrund hoher Salinität des Grundwassers mit extrem hohen Chlorid- und Sulfatgehalten von deutlich mehr als 4000 mg/l SO₄. Daraus folgen Forderungen zu niedrigen Wasser-Bindemittelverhältnissen von ca. 0,35 und Zugabe von Mikrosilika zum Bindemittel;
- Alle Betonausgangsstoffe wie Zement, Sand und Gesteinskörnungen werden importiert, d. h. keine oder kaum Eigenfeuchten von Sand und Gesteinskörnungen;
- Begrenzte Zementauswahl, meist wird ein hochwertiger CEM I Zement (42,5 der 52,5) mit Hütensand in der Betonmischanlage zu einem Kompositzement verschnitten;
- Betonage in den Sommermonaten fast ausschließlich nachts, auch weil die Fahrzeiten der Trucks kürzer sind;
- Maximal zulässige Betontemperatur 32 °C.

Diese zuvor geschilderten Randbedingungen führen im heißen Zeitraum zu einer Zugabe von Wasser ausschließlich in fester Form als Eisflakes oder Kunstschnee. Dadurch wird die Schmelzenthalpie zur zusätzlichen Kühlung genutzt, allerdings mit dem negativen Nebeneffekt spürbar längerer Mischzeiten.



Abb. 3: Dosierung von Eisflakes als „Zugabewasser“

Üblicherweise wird in Doha ein höherer Zementgehalt für die Betone verwendet, zum einen um den niedrigen w/z-Wert einhalten zu können, aber vielmehr um eine ausreichend hohe Menge an Eisflakes zur Kühlung des Frischbetons zugeben zu können.

In relativ bescheidenem Ausmaß erfolgt die Kühlung der Gesteinskörnung zur Einhaltung der maximal zulässigen Temperatur. Dieses Konzept wurde erstmals durch die Zusammenarbeit zweier österreichischer Unternehmen erarbeitet. Dabei werden zwei

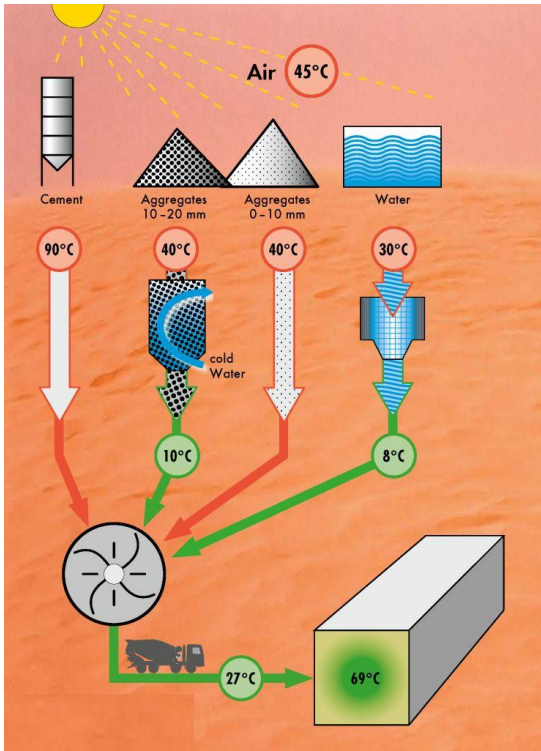


Abb. 4: Prinzip einer Kühlung der groben Gesteinskörnung

Hochsilos jeweils mit grober Gesteinskörnung so ausgelegt, dass ein Silo aktiv mit gekühltem Wasser geflutet wird und dabei die Gesteinskörnung abkühlt. Nach einem definierten Zeitraum läuft dieses Kühlwasser wieder ab, um es erneut zu kühlen. Danach erfolgt im Wechsel die Kühlung des zweiten Silos. Die gekühlte Gesteinskörnung wird zusammen mit gekühltem Anmachwasser und den restlichen warmen Ausgangsstoffen wie Zement, Hüttensandmehl und Sand gemischt. Die wesentlichen Vorteile dieses Konzeptes sind zum einen eine normale Mischdauer und zum anderen ein reduzierter Zementgehalt im Vergleich zur Kühlmethode mittels Eisflakes. Zusätzlich können etwas niedrigere Frischbetontemperaturen von ca. 27 °C erreicht werden. Des Weiteren erwärmt sich der so gekühlte Beton aufgrund der hohen Energiespeicherkapazität der Gesteinskörnung beim Transport und Einbau langsamer als bei der Kühlung aller Komponenten mittels Eisflakes.

2.3.2 Baustellen in Griechenland

HOCHTIEF realisierte in der Vergangenheit mit anderen nationalen und internationalen Partner zwei größere Autobahnprojekte mit mehreren Tunneln und Brücken. Die klimatischen Randbedingungen auf dem Peloponnes in Griechenland sind im Sommer im Vergleich zu Katar etwa um 10 °C gemäßiger, aber noch immer sehr heiß.

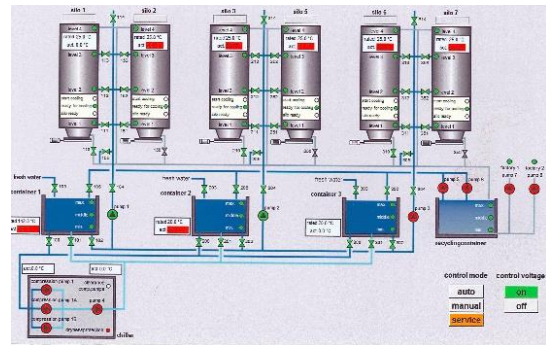


Abb. 5: Konzeption und Ausführung einer Kühlung der groben Gesteinskörnung im Hochsilo einer Betonmischanlage der Firma Mobilbaustoffe Katar in Zusammenarbeit mit der Firma Keckeis

Im Vergleich zu Katar ist die Verfügbarkeit von Kühlanlagen für Beton im Allgemeinen nicht vorhanden, da sich die wirtschaftliche Krise des Landes auch hier sehr deutlich zeigt. Günstig wirkt sich hingegen die Verfügbarkeit von Zementen mit sehr niedriger Hydrationswärmeentwicklung auf Basis natürlicher Puzzolane aus. Basis des gewählten Mischungsentwurfes für Tunnelinnenschalen war ein Zement CEM IV/B 32,5 R. Im Hochsommer wurde dieser zu 100 % eingesetzt, in den kühleren Jahreszeiten wurde ein etwas reaktiverer Zement CEM II/B (P-W) 42,5 anteilig verwendet. Die Gesteinskörnung bestand zu 100 % aus gebrochenem Kalkstein. Aufgrund der Verfügbarkeit konnte nur ein sehr geringer Anteil an natürlich gerundetem Sand verwendet, der restliche Sand bestand ebenfalls aus Kalksteinbruch. Die durchschnittliche Frischbetontemperatur im Sommer betrug 32 °C, vereinzelt wurden auch Temperaturen bis 35 °C gemessen.

Die Herausforderung bestand darin, unter derartigen Randbedingungen unbewehrte ca. 40-50 cm dicke Tunnelinnenschalen für einen zweispurigen Autobahntunnel zu erstellen. Nach den Regelwerken und Erfahrungen der D A CH Länder sind für derartige Konstruktionen maximale Frischbetontemperaturen von 25 °C bis 27 °C möglich, um Risse in diesen unbewehrten Konstruktionen aufgrund von Zwangs-

spannungen aus abfließender Hydratationswärme zu vermeiden. Es wurde deshalb versucht, weitere Risse fördernde Randbedingungen zu minimieren, um dann unter realen Bedingungen erste Baustellenversuche im Bereich von Tunnelverbindungsbauwerken durchzuführen. Dabei wurde insbesondere auf folgende ungünstige Bedingungen geachtet:

- Regenschirmabdichtung zwischen Spritzbetonaußenschale und Ortbetoninnenschale ohne Durchdringungen oder Festhaltepunkte;
- Sehr ebene Spritzbetonoberfläche zur Reduktion von Reibung zwischen Ortbetoninnenschale und Spritzbetonaußenschale in Verbindung mit der Regenschirmabdichtung;
- Betonage der Fundamentstreifen für die Ortbetoninnenschale nur mit einem sehr geringen zeitlichen Vorlauf, möglichst 1 bis 3 Tage;
- Ausschalen der frisch betonierten Tunnelinnenschale bei niedrigen Betondruckfestigkeiten von ca. 2 MPa mit dem Ziel der Überdrückung der sich gerade entwickelnden Zugspannungen im Gewölbequerschnitt;
- Einsatz eines Nachbehandlungswagens direkt nach dem Ausschalen zum Schutze vor Zugluft und zur Reduktion des Temperaturgradienten im Tunnelquerschnitt; der Temperaturgradient sollte max. 15 °C betragen, anzustreben waren 10-13 °C Temperaturdifferenz zwischen Kern und Oberfläche.

Die aufgezeigten Maßnahmen zur Betontechnologie und zur Baukonstruktion erlaubten es, unbewehrte Tunnelinnenschalen auch bei sehr hohen Frischbetontemperaturen rissfrei herzustellen. Hilfreich war hier auch eine Baustellenmischanlage direkt am Tunnelportal, wodurch kurze Transportzeiten für den Beton realisiert werden konnten. Die maximal gemessene Kerntemperatur im Tunnelblock betrug 53 °C.

2.3.3 Baustellen in Deutschland und Österreich

In Deutschland und Österreich wurden von HOCHTIEF in den vergangenen beiden heißen Sommern Wasser- und Tunnelbauwerke in offener und geschlossener Bauweise realisiert. Bei diesen Bauwerken

war durch die mitgeltenden Regelwerke der ZTV-Ing und ZTV-W die maximale Frischbetontemperatur auf 25 °C bzw. 27 °C (Österreich) begrenzt. Im Gegensatz zu den Erfahrungen in der Vergangenheit gab es in den Jahren 2018 und 2019 langanhaltende Hitzeperioden mit Tagestemperaturen von über 30 °C und maximale Temperaturen von über 40 °C. Aufgrund der typischen Baustellenrandbedingungen konnte die Kühlung des Frischbetons nicht mit einheitlichen Konzepten durchgeführt werden. Folgende Konzepte wurden realisiert:

- Kühlung des Zementes beim Einblasen in das Zementsilo mittels flüssigem Stickstoffs; Realisierung an einer innerstädtischen Baustellenmischanlage mit beengten Platzverhältnissen;
- Kühlung der groben Gesteinskörnungen mittels Beregnung mit ca. 3-5 °C gekühltem Wasser; die Wasserkühlung erfolgte entweder elektrisch im Durchlaufkühlerprinzip ähnlich einer überdimensionierten Bier- oder Milchkühlanlage oder alternativ durch schmelzende Eisflakes in einem Wasserbehälter; die Beregnungszeit betrug ca. 8 Stunden, um die Zieltemperatur der Gesteinskörnung von 6-10 °C zu erreichen; da die gesamte Gesteinskörnung der Großbetonagen auf Halde liegend vorgekühlt wurde, konnte die Kühlleistung zusätzlich zur Kühlung des Zugabewassers während der Betonproduktion genutzt werden;
- Vorkühlung der groben Gesteinskörnung mittels Seewasser in der Kiesgrube bzw. im Steinbruch und Umfüllung in ein Hochsilo einer Betonanlage; zusätzliche Abkühlung der vorgekühlten Gesteinskörnungen mittels gekühlter Kaltluft; zusätzliche Verwendung von gekühltem Zugabewasser.

Jedes dieser Kühlkonzepte hat aufgrund seiner projektspezifischen Randbedingungen seinen Einsatzbereich. Aufgrund seiner Einfachheit ist die Vorkühlung der Gesteinskörnung eine robuste und überaus einfache Lösung zum Erreichen der zulässigen Frischbetontemperatur auch in den letzten beiden Hochsommern.



Abb. 6: Vorkühlung der Gesteinskörnung auf Halde mittels Wasserkühlung durch Eisflakes der Firma Krebs Beton

2.3.4 Baustellen in Schweden

Wie schon einleitend erwähnt, müssen in Schweden für alle Infrastrukturbauwerke Spannungsberechnungen auf Bauteilebene durchgeführt werden. Hierzu sind umfangreiche Betonprüfungen mit einer Vielzahl altersabhängiger Kennwerte wie Schwinden und Kriechen, Druck- und Zugspannungsentwicklung sowie kalorimetrische Temperaturmessungen zu ermitteln. Die Berechnungen führen dann je nach vorgesehener Ausführungszeitpunkt zur Empfehlung und ggf. Vordimensionierung aktiver Bauteilinnenkühlung. Dabei werden Rohrregister aus Stahl- bzw. Kunststoffwasserleitungen zwischen der Bewehrung eingebaut, die dann die entstehende Hydratationswärme kontrolliert abführt. Zur Kontrolle der Kühlung sind diverse Temperaturmessstellen im Bauteil angeordnet, um die Bemessung mit der Ausführung zu verifizieren, die Festigkeitsentwicklung im Beton über Reifefunktionen zu kalkulieren bzw. zur Steuerung und

Nachregelung der Kühlung. Die Steuerung der Kühlung erfolgt in Schweden normalerweise nur durch die Steuerung der Durchflussgeschwindigkeit des ungekühlten Grund- oder Flusswassers. In seltenen Fällen wird auch das Kühlwasser durch einen Chiller gekühlt.

HOCHTIEF hat in Stockholm eine Autobahnüberdeckung hergestellt. Dieses Deckelbauwerk dient zum einen als Lärmschutz für die umgebende Bebauung und sollte gleichzeitig noch als Basis für eine neue Wohnbebauung auf der Deckelfläche dienen. Dadurch sind relativ stark bewehrte Wand- und Deckenkonstruktionen mit einer Dicke von 1,2 m notwendig geworden. Diese Bauteilabmessungen haben eine Bauteilinnenkühlung notwendig gemacht, auch weil Risse weitestgehend zu vermeiden waren und nur wenige Risse eine maximal zulässige Rissbreite <0,2 mm aufweisen durften.

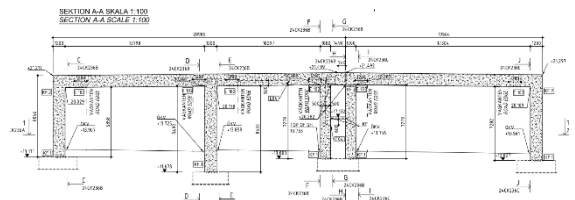


Abb. 7: Querschnitt der Autobahnüberdeckung; aktive Bauteilinnenkühlung mittels Rohrleitungsregister

Die Bauteilinnenkühlung wurde von einem schwedischen Ingenieurbüro dimensioniert und zeigte sich in der Ausführung als recht wirksam. Es wurden umfangreiche Spannungsberechnungen auf Bauteilebene durchgeführt, um die Bauteilinnenkühlung entsprechend festzulegen. Die Abbildung 8 zeigt beispielsweise eine derartige Vordimensionierung für verschiedene Umgebungstemperaturen.

ARBETISKRIVNING 2K072701 69 (69)

Upprättad av: Projekt: Teräsboda – Håga södra

Redigerad av: 2012-08-13 2 Terästar, 241 Betongarmen, NS13

Projektingenjör: Normaltillstånd (normalt) S/G; betongstruktur, väggar och

Ansvarig konstruktör: vår.

Rev D: measures for higher fresh concrete temperature, tunnel part 2

	Ambient air temperature (daily mean value)			
	+5°C	+10°C	+15°C	+18°C
Fresh concrete temperature	< -13°C	< at temp + 10°C	< at temp + 10°C	< at temp + 10°C > 20°C
Wall S, all				
Form stripping time	7 days	7 days	4 days	4 days
Number of cooling pipes	7 x 2 = 14 = alternating cc 530, inside reinforcement, spacing 200, 2x400, 2x500, alternating cc 500			
Cooling time @ temperature	48h @ max 5°C	48h @ max 8°C	48h @ max 12°C	30h @ max 10°C
Temperature sensors	6 according to sketch			
Wall S, all				
Form stripping time	7 days	7 days	4 days	4 days
Number of cooling pipes	7 x 2 = 14 = alternating cc 530, inside reinforcement, spacing 200, 2x400, 2x500, alternating cc 500			
Cooling time @ temperature	48h @ max 5°C	48h @ max 8°C	48h @ max 12°C	48h @ max 10°C
Temperature sensors	6 according to sketch			
Roof slab against roof slab, part 2				
Form stripping time	7 days	7 days	4 days	4 days
Number of cooling pipes	10*7=70, 8*80, outside and in the center, spacing 200, 2x400, 2x500, up to 7000			
Cooling time @ temperature	48h @ 5°C – 60h @ 8°C	36h @ 8°C – 48h @ 8°C	24h @ 8°C – 48h @ 12°C	24h @ 8°C – 48h @ 10°C
Temperature sensors	none			
DBI, EDB, roof slab	See 9.12.9.14			

Abb. 8: Vordimensionierung der Kühlung eines Wandabschnittes für verschiedene Umgebungstemperaturen

Die Bilder der nachfolgenden Abbildung zeigen zum einen die Kühlwasserleitungsrohre innerhalb des Bewehrungskorbes. Weiterhin ist schon auf den ersten Blick erkennbar, dass vergleichbare Konstruktionen in Deutschland einen wesentlichen höheren Bewehrungsanteil aufweisen.

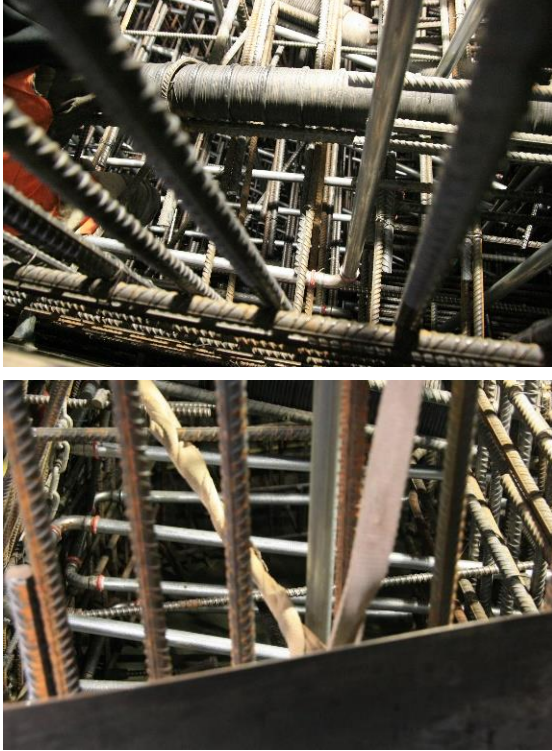


Abb. 9: Bewehrungskorb mit Kühlleitungen (glatt und silberfarben) eines Deckelabschnittes mit Vorspannleerrohren.

2.4 Diskussion der unterschiedlichen Konzepte zur Reduktion von Zwangsrissen und Bauteilschäden infolge Hydratationswärme

Im Kapitel 2.3 wurden verschiedene Konzepte zur Reduktion von Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme anhand von realisierten Projekten erläutert. Die Konzepte wurden aufgrund der projektspezifischen Randbedingungen bzw. der lokalen normativen oder technischen Regelungen entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass unter Beachtung von konstruktiven und ausführungsspezifischen Randbedingungen auch mit hohen Frischbetontemperaturen mit geeigneten Bindemitteln rissfreie Tunnelinnenschalen hergestellt werden können. Diese speziellen Randbedingungen können aber nicht immer realisiert werden.

In diesen Fällen ist die Kühlung des Frischbetons meist eine sinnvolle Alternative. Um den Frischbeton auf eine zulässige maximale Frischbetontemperatur zu kühlen, bieten sich verschiedene Lösungen an. Die

meist am einfachsten zu realisierende technische Lösung ist die Kühlung der groben Gesteinskörnung mittels gekühltem Wasser und die Dosierung von gekühltem Zugabewasser. Diese Lösung benötigt aber entsprechenden Platz bzw. besondere Silostrukturen mit speziellen Dosierklappen. Aufwändiger in der Anlagentechnik ist die Kühlung der Gesteinskörnung mittels gekühlter Luft oder der Kühlung des Zementes beim Einblasen in das Silo der Betonanlage mittels flüssigen Stickstoffs.

Alle bisher diskutierten Lösungen benötigen zur Kühlung zusätzliche Energie, weshalb eine bisher kaum diskutierte Lösung die werksmäßige Kühlung des Zements unmittelbar nach der Mahlung mittels Wärmetauscher die energetisch sinnvollste Lösung ist. Diese nur vereinzelt angewandte Technologie bietet die Möglichkeit, die bei der Kühlung rückgewonnene Energie im technischen Maßstab bei der Zementherstellung sinnvoll zu nutzen und die Zementtemperatur im Sommer von ca. 80 °C auf ca. 40 °C zu reduzieren. Dadurch könnte die Frischbetontemperatur um ca. 4-5 °C reduziert werden.

Eine Kühlung der Bauwerke durch aktive Innenkühlung bietet speziell bei massigen Bauwerken ebenfalls eine sinnvolle aber bisher scheinbar teurere Lösung. Um diese Lösung in Deutschland anwenden zu können, fehlt es aktuell an Ausführungsbeispielen die zeigen, dass durch die konsequente Anwendung dieser Technologie auch Bewehrungsmengen reduziert werden könnten. Inwiefern sich durch eine Kostenreduktion bei der Bewehrung der Aufwand der rechnerischen Modellierung und des Einbaus der Kühlregister im Vergleich zur globalen Frischbetonkühlung egalieren lässt, sollte anhand einiger Musterprojekte untersucht werden.

Sollte sich herausstellen, dass die wirtschaftlich sinnvollere Variante die Frischbetonkühlung ist, sollte dies im künftigen Regelwerk (BBQ-Richtlinie) zumindest für die Herstellung und Lieferung von Beton für anspruchsvolle Bauwerke als bindende Voraussetzung festgeschrieben werden.

Autor

Dipl.-Ing. Andreas Schaab
 HOCHTIEF Infrastructure GmbH
 Technical Competence Centrum, Materials
 Farmstraße 91-97
 64546 Mörfelden Walldorf

Möglichkeiten der Verfahrenstechnik zur aktiven Betonkühlung

Jens Tauchmann

Zusammenfassung

Ist eine Frischbetonkühlung im Sommer notwendig? Wenn das Wetter mitspielt ⇒ **NEIN!**

Bereits diese Aussage verdeutlicht die Problematik der Bauindustrie im Zuge zunehmend steigender Sommertemperaturen. Aktuell bestehen verschiedene Möglichkeiten zur aktiven Kühlung von Frischbeton, wobei jedes Verfahren Vor- und Nachteile mit sich bringt. Neben den technischen müssen auch die wirtschaftlichen Aspekte betrachtet werden. Denn jedes Kühlverfahren ist zwangsläufig mit Kostensteigerungen verbunden. Um aktuellen Anforderungen und neuen Materialien noch besser zu entsprechen, werden existente Verfahren, wie das Zementkühlverfahren, mit dem Ziel weiterentwickelt, eine Just-in-Time-Kühlung bei einer Energieausnutzung von oberhalb 95 % zu realisieren.

1 Einleitung

An Beton als einen der wichtigsten Bauträger unserer Zeit werden höchste Anforderungen gestellt. Schon bei normalen Bauwerken sind zahlreiche qualitätssichernde Vorkehrungen zu treffen, um die Langlebigkeit des Objektes sicherzustellen. Noch anspruchsvoller gestalten sich die Vorgaben für Bauprojekte, die außergewöhnliche Qualitätsstandards erfüllen müssen, zum Beispiel Tunnel, Kraftwerke oder Staudämme.



Abb. 1: Tunnelbaustelle mit aktiver Kühlung

Die Reaktion zwischen Wasser und Zement beim Abbinden von Beton ist ein exothermer Prozess, bei dem sich das entsprechende Betonteil erwärmt. Vor allem bei massigen Bauteilen entstehen Temperaturspitzen, bei denen durch die thermische Ausdehnung Spannungen im Gefüge des Betons erzeugt werden,

die bei der späteren Abkühlung zu Rissen führen können. Als Folge sinkt die Druckfestigkeit des Betons, und die Langlebigkeit des Bauwerkes wird gemindert. Durch die Senkung der Temperatur des Frischbetons kann diese Rissbildung wirksam vermindert werden. Die Abkühlung geschieht in den meisten Fällen über eine Kühlung der Betonausgangsstoffe, die Zugabe von Scherbeneis oder über eine direkte Kühlung des Frischbetons im Fahrmischer.

2 Vorgaben zur Frischbetonkühlung

Auf Grund von gesetzlichen Empfehlungen, Vorschriften und Richtlinien sowie projektgebundenen Vorgaben wird die Temperatur von Frischbeton in vielen Ländern in Europa zunehmend begrenzt. Es liegen zahlreiche Anfragen zur Frischbetonkühlung aus Deutschland, Polen, Tschechien, Frankreich, Spanien, Slowenien und insbesondere Österreich vor.

In Österreich ist das Kühlen von Frischbeton in den Sommermonaten weit verbreitet. Von den österreichischen Frischbetonmischanlagen besitzen ca. 30 % der Anlagen die Möglichkeit zur Kühlung von Frischbeton.

Grundsätzlich muss Frischbeton überall dort gekühlt werden, wo die Temperatur des Betons die Grenze von 30 °C überschreitet (EU-Richtlinie) [1]. Diese Forderung gilt für alle Betonsorten, unabhängig vom Bauwerk.

Eine Besonderheit stellen in Österreich die Vorschriften für den „Weiße Wanne - Beton“ dar. Hier liegen die Temperaturvorgaben im Bereich von 22 °C (Einbautemperatur).

Daraus ergeben sich für die Anwendung der Kühlverfahren zwei Zielgruppen:

- örtlich stationäre Frischbetonanlagen, die einzelne Baustellen versorgen und mittlere bis große Betonmengen produzieren,
- mobile Frischbetonanlagen, die auf Großbaustellen eingesetzt werden und große Betonmengen produzieren.

Basierend auf der EU-Richtlinie müssen alle Mitgliedsstaaten der EU diese Richtlinien, in Form von Gesetzen und Vorschriften, in nationales Recht umsetzen. Dabei kommt es dann zu länderspezifischen Unterschieden, die in den unterschiedlichen Gegebenheiten der jeweiligen Länder begründet sind.

Allen Ländern ist allerdings gemein, dass mit den Technologien, die dem Stand der Technik entsprechen, eine gute Betonqualität einzuhalten ist. Dies beinhaltet auch eine Überwachung der Betontemperatur. Viele Vorschriften geben keine genaue Temperaturgrenze an. Meistens wird die Empfehlung ausgesprochen, Beton nicht oberhalb von 27 °C oder 30 °C zu verarbeiten.

In Deutschland liegen diese Grenzen in Abhängigkeit von der Betonsorte bei 25 °C für wasserdichte Betone im Tiefbau (projektspezifische Vorgaben, insbesondere Tunnelbau) [3] [4] und für alle anderen Sorten laut DIN 1045 [2] bei 30 °C.

Eine aktive Kühlung des Frischbetons ist immer mit zusätzlichen Kosten verbunden. In den seltensten Fällen wurden diese Kosten bei einer Angebotserstellung berücksichtigt.

Daher sollten in erster Linie alle Möglichkeiten zur passiven Reduzierung der Frischbetontemperatur ausgenutzt werden [5]. Die im Grunde beste Möglichkeit würde die Verschiebung der Betonage in kühlere Zeiträume darstellen.

2.1 Wärmeentwicklung des Frischbetons

Da der Temperaturverlauf von vielen Faktoren, wie z. B. Zementart und -menge, Verhältnis von Wasser zu Zement, Umgebungstemperatur, Frischbetontemperatur, Bauteildicke und Zusatzmitteln abhängt, gibt es auch verschiedene Wege die Hydratationswärmeentwicklung zu beeinflussen.

Die Kühlung des Frischbetons zielt auf die Senkung der Starttemperatur und beeinflusst dadurch die Temperaturentwicklung während des Abbindeprozesses.

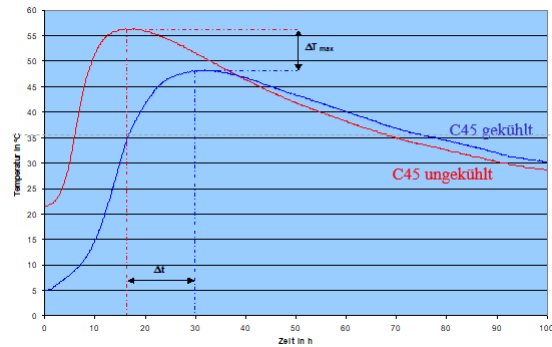


Abb. 2: Vergleich der Temperaturentwicklung von Frischbeton mit unterschiedlichen Starttemperaturen

3 Möglichkeiten zur Kühlung des Frischbetons

Die zur Kühlung von Frischbeton notwendige „Kälteenergie“ kann entweder über Kälteaggregate auf Basis von elektrischer Energie in Form von Kaltwasser oder Kaltluft oder durch den Einsatz von Flüssigstickstoff (LIN) bereitgestellt werden.

Dabei unterscheidet man zwischen der Kühlung der Ausgangsstoffe vor dem Mischen, der Kühlung des Frischbetons während des Mischens und der Kühlung nach dem Mischen im Transportfahrzeug.

Die Betonkühlung vor dem Mischen kann erfolgen durch

- Kühlung des Zementes
- Kühlung der Zuschläge
- Kühlung des Wassers.

Generell ist aber der Energietransport vom Kälte Träger zum kühlenden Stoff zu beachten. Es gelten folgende Zusammenhänge:

- Feststoffe (außer Metalle) und Gase sind schlechte Wärmeleiter
- Große Temperaturunterschiede zwischen Kälte Träger und zu kühlendem Medium ergeben eine schnelle Abkühlung
- Je größer die Oberfläche des zu kühlenden Mediums, desto schneller die Abkühlung
- Flüssigkeiten sind bessere Kälte Träger als Gase
- Eine schnelle Erneuerung des Kälte Trägers an der Grenzfläche führt zur schnelleren Abkühlung

So ist eine Kühlung mit kalten Gasen bei großer Gesteinskörnung nur bei langer Verweildauer möglich.

Aufgrund der mittleren Zusammensetzung eines Standardbetons ergibt sich eine Absenkung der Frischbetontemperatur um 1 K, wenn die Temperatur [6]

- des Zementes um 10,0 K oder
- des Zuschlags um 1,6 K oder
- des Wassers um 3,5 K verändert wird.

Eine Kühlung der Zuschläge durch Berieselung mit kaltem Wasser ist eine gängige Methode, bringt aber nur Erfolg, wenn große Zuschlagdeponien vorhanden sind und eine Wassersammlung und -aufbereitung erfolgen kann. Des Weiteren muss die Betonmischanlage in der Lage sein, die veränderten Zuschlagsfeuchten zu verarbeiten.

Eine weitere Möglichkeit ist die Kühlung des Zugabewassers mittels Kältemaschine, was wegen der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser zu einer Abkühlung des Frischbetons führt.

Hier gibt es zahlreiche Anbieter solcher Anlagen, die inzwischen auch eine Kaltluftkühlung der Zuschläge anbieten.

Bei der Kaltluftkühlung muss jedoch auf die Verweilzeit des Zuschlages im Kaltgasstrom geachtet werden. Durch den schlechten Wärmeübergang von Gas zu Feststoff in Verbindung mit einem relativ geringen ΔT benötigt der Zuschlag viel Zeit zur Kühlung bis zum Kern. In der Praxis erfolgt daher oftmals nur eine Oberflächenkühlung, was sich dann während des Abbindeprozesses mit erhöhten Temperaturen bemerkbar macht.

Oftmals kann durch die Änderung der Wassertemperatur allein die gewünschte Frischbetontemperatur nicht erreicht werden und somit müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. Eingesetzt werden zurzeit folgende Verfahren:

- Ersatz von Wasser durch sog. Scherbeneis
- Bauteilinnenkühlung
- Zugabe von kalten Gasen (Luft; Stickstoff) oder flüssigem Stickstoff in die Zuschlagschüttung
- Zugabe von Flüssigstickstoff in den Fahrmischer oder Zwangsmischer
- Zementkühlung
- Wasserkühlung

3.1 Scherbeneis-Kühlung

Als man den entscheidenden Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Rissneigung von Bauwerken erkannt hatte, suchte man zu den oben genannten Verfahren nach weiteren Möglichkeiten, den Frischbeton im Sommer so kühl wie möglich herzustellen. 1982 wurde beim Bau des Wasserkraftwerkes Zillergründl in Österreich erstmals eine Scherbeneisanlage eingesetzt.

Das Scherbeneis-Verfahren kombiniert gewissermaßen die Kühlung vor und während des Mischens: Das zum Anmachen benötigte Wasser wird mittels Kältemaschine auf Temperaturen um -5 °C gefroren, in einer Klimakammer zwischengelagert und dem Mischer, gewichtsmäßig dosiert, in gefrorenen Schuppen zugefügt. Dabei kann die laut Betonrezeptur benötigte Menge an Wasser ganz oder teilweise durch Eis ersetzt werden, wobei moderne Mikroprozessor-Dosiereinrichtungen den gewünschten Prozentsatz einstellen und die restliche Menge als Zugabewasser zufügen.

Scherbeneis wird erzeugt durch Besprühen der Innenflächen eines zylindrischen Klimaapparates mit Wasser, wobei die entstehenden Eisschichten durch einen rotierenden Schaber abgekratzt werden.

Da bei diesem Verfahren der Kühleffekt durch elektrische Energie erzeugt wird, liegen die Betriebskosten vergleichsweise niedrig gegenüber denjenigen Verfahren, bei denen technische Gase als Kälte-träger eingesetzt werden. Komplette Anlagen zur Herstellung und zum Eintrag von Scherbeneis verursachen andererseits aber hohe Investitionskosten und sind daher nur bei Großprojekten wirtschaftlich einsetzbar.



Abb. 3: Anlage zur Herstellung von Scherbeneis

4 Kühlung mit flüssigem Stickstoff – Stand der Technik

4.1 Stickstoff als Kälte-träger

Die abkühlende Wirkung des flüssigen Stickstoffs stellt sich bei der Verdampfung der Flüssigkeit ein, für die ein Wärmebetrag, die sog. Verdampfungsenthalpie, aufgewendet werden muss. Diese wird dabei von umgebenden Medien geliefert, welche sich als Folge abkühlen. Unter Umgebungsdruck weist flüssiger Stickstoff eine Siedetemperatur von $-195,8\text{ °C}$ und eine Verdampfungsenthalpie von 201 kJ/kg auf [7].

Für die Nutzung in Kühlprozessen stellt Stickstoff oftmals bei Verfahren, die eine hohe Kälteleistung erfordern, die einzig praktikable und wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Kälteanlagen dar. Grund sind neben der niedrigen Siedetemperatur (technischer Aspekt), die in der Regel geringeren Anlageninvestitionen (Kostenaspekt). Denn im Vergleich zur Kompressionskälteanlage entfallen bei der Stickstoffkühlanlage Verdichter und Kältemittelkreislauf sowie deren umfangreicher Regelungstechnik.

4.2 Lanzenkühlung im Fahrmischer / Zwangsmischer

Dieses Verfahren war bis 2005 das am Bau meist angewandte Verfahren zum Kühlen von Frischbeton. Es wurde auf Großbaustellen im In- und Ausland beim Kraftwerks-, Tunnel- und Brückenbau eingesetzt.

Bei der Betonkühlung im Zwangsmischer wird flüssiger Stickstoff entweder aus einem mobilen oder stationären Tank entnommen. Über Rohrleitungen und Schläuche wird er zur Mischertrommel geführt und mittels spezieller Düsensysteme direkt in den Mischer eingedüst. Allerdings kommt es bei dieser Methode zum direkten Kontakt zwischen dem Mischer (den Mischarmen und der Wandung), so dass eine Versprödung der Mischerarme und damit deren Bruch die Folge sein kann.

Also hat es sich als sinnvoll herausgestellt, die Kühlung mittels Sprühlanzen in LKW-Transportmischern durchzuführen (Abbildung 4).



Abb. 4: Kühlung von Frischbeton im Fahrmischer

Die Lanzen werden durch die Beschickungsöffnung in die Mitte der Trommel eingebracht, welche sich im Schnellgang drehen sollte.

Nachteilig bei dem Verfahren sind die langen Bedienzeiten an den Kühlstationen von 12-15 min je Charge und die damit verbundene Einschränkung der Produktionskapazität. Außerdem führt die Eindüsung von Stickstoff zu einem Konsistenzverlust durch Ausbildung von Eisschichten und sogar vereiste Brocken. Dies führt dann zur Beschädigung der Mischertrommel bis hin zum Entlacken oder dem Bruch von Schweißnähten

Weiterhin wird nur ein geringer Teil der eingesetzten Kälteenergie des flüssigen Stickstoffs ausgenutzt. In der Praxis wurden Werte zwischen 30 und max. 50 % ermittelt. Die restliche „Kälteenergie“ wird ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Zur Ermittlung der Betriebskosten bei diesem Verfahren geht man von einem Bedarf von 12 bis 20 kg Flüssigstickstoff pro m³ Frischbeton bei einer Abkühlung um 1 °C aus.

Es hat sich auch herausgestellt, dass der direkte Kontakt zwischen dem Kälte Träger „Flüssigstickstoff“ und dem Frischbeton eine schädigende Wirkung auf die Betonzusatzstoffe hat. Dadurch wird die Fließfähigkeit des Frischbetons erheblich beeinträchtigt.

Aus diesem Grund wird dieses Verfahren nur noch sporadisch eingesetzt. Bei vielen Projekten wird durch die Bauherren inzwischen der direkte Kontakt zwischen Flüssigstickstoff und Frischbeton komplett ausgeschlossen.

4.3 Zementkühlung I

Beim Zementkühlen wird der im Straßentankwagen angelieferte Zement beim Einlagern in die örtlichen Zementsilos auf die gewünschte Zieltemperatur abgekühlt. Dazu wird vor die Steigleitung zum Zementsilo ein spezielles Düsensystem eingebaut, welches die Vermischung von Zement und Flüssigstickstoff oder Flüssig-CO₂ ermöglicht. Der Querschnitt des Zementstromes muss dazu geringfügig reduziert werden, um einerseits eine möglichst homogene Vermischung mit dem Kühlmedium und andererseits das nötige Rohrvolumen für das „Abgas“ zu schaffen. Dadurch wird die Abtankzeit des Zements geringfügig erhöht.

Das Kühlmedium verdampft bei diesem Vorgang, und das nunmehr entstandene Gas wird mit dem Zement in das Silo gefördert. Auf diesem Weg kühlt das Gas den Zement weiter ab, es wird somit die gesamte Kälteenergie des Gases bis zur Zieltemperatur ausgenutzt. Dadurch erfolgt eine 99%-ige Ausnutzung der eingesetzten Kälteenergie des flüssigen Stickstoffs oder flüssigen CO₂.

Die Ableitung des Gases erfolgt über die vorhandene Filteranlage des Zementsilos, die allerdings auf

die erhöhten Gasmengen ausgelegt sein muss. In den meisten Fällen sind diese Filteranlagen zu erweitern.

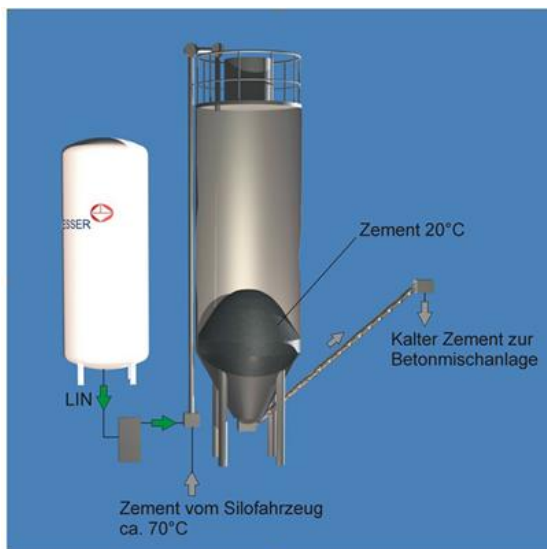


Abb. 5: Schematische Darstellung der Zementkühlung I (Cryoment Flow)

Auf Grund der verwendeten Materialien stellt die Zementtemperatur von -20 °C die Leistungsgrenze dieses Verfahrens dar. In der Praxis wird der Zement von ca. 70 °C auf Umgebungstemperatur abgekühlt (ca. 20 °C), somit entstehen keine Verluste an Energie bei einer späteren Verarbeitung des abgekühlten Zementes. Mittels einer Zementkühlung von 70 °C auf 20 °C wird die Temperatur des Frischbetons bei einer „normalen“ Rezeptur (350 kg Zement) um 5 °C gesenkt. Bei einer Abkühlung auf -20 °C um 9 °C . Allerdings muss bei der zweiten Variante mit Energieverlusten auf Grund der raschen Anwärmung des Zementes bis zur Umgebungstemperatur gerechnet werden.

Beim Verfahren Zementkühlung I wird nahezu die gesamte „Kälteenergie“ des eingesetzten Kühlmediums bis zur Zieltemperatur ausgenutzt. Der Bedarf an Flüssigstickstoff wurde mit 7 kg Flüssigstickstoff oder Flüssig- CO_2 bei der Abkühlung eines m^3 Frischbetons um 1 °C ermittelt. Das stellt einen erheblichen Vorteil gegenüber dem Verfahren zur Frischbetonkühlung mittels Lanze im Fahrmischer dar.

Dieses Verfahren kann auf allen Baustellen unabhängig von der zu kühlenden Betonmenge eingesetzt werden. Bei großen Betonmengen ist auf Grund des erhöhten Verschleißes der Steigleitung die vorhandene gegen eine doppelwandige Steigleitung aus kaltzähem Edelstahl auszutauschen.

4.4 Wasserkühlung

Reicht die Abkühlleistung der Zementkühlung oder der Lanzenkühlung nicht aus, um das gewünschte Ergebnis in den heißen Sommermonaten zu erzielen, müssen weitere Kühlmöglichkeiten genutzt werden.

Aus diesem Grund wurde ein neues Verfahren zur Kühlung des Zugabewassers mittel LIN entwickelt, das basierend auf den Rippenrohren der älteren Generation der Druckzusatzverdampfer der Messer-Tankanlagen in einem beliebigen Behälter auf der Baustelle eingebaut werden kann.

Die Anlage kühlt die Wassermenge des Behälters in kurzer Zeit auf die Zieltemperatur ab und stellt somit die stündlich benötigte Wassermenge mit der Zieltemperatur zur Verfügung. Dazu wird eine bestimmte Länge des Rippenrohres als Wärmetauscher in den Behälter eingebaut und mit flüssigem Stickstoff als Kältemittel beaufschlagt.

Der flüssige Stickstoff verdampft im Rippenrohr, nimmt dabei die Wärmeenergie des Wassers auf, kühlt dadurch ab und strömt als gasförmiges Medium aus dem Rippenrohr. Anschließend wird der gasförmige Stickstoff nicht in die Umgebung abgegeben, sondern in das Wasser zurückgeführt. Dadurch wird zum einen die Umwälzung des Wassers erreicht und somit die notwendige Anströmung der Rippenrohre sichergestellt. Weiterhin wird dadurch auch noch die Entspannungskälte des Stickstoffs ausgenutzt. Um eine saubere Trennung der beiden Medien Flüssigstickstoff und Wasser zu erreichen, werden am Ende der Rohrleitung für den gasförmigen Stickstoff selbstschließende Düsen eingebaut (siehe Anlagenschema Abbildung 6).

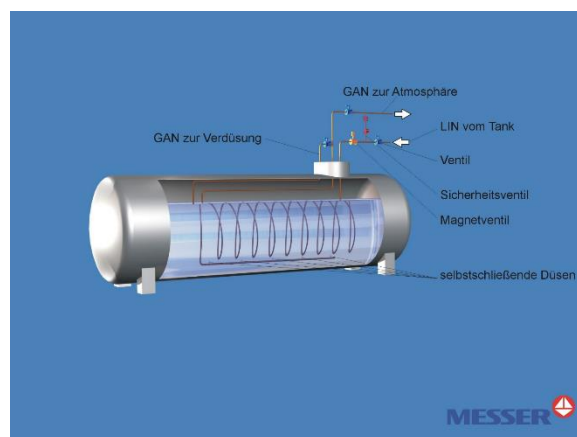


Abb. 6: Schematische Verfahrensdarstellung der Wasserkühlung

4.5 Verfahrensauswahl und Frischbetonrechner

Welches Verfahren soll nun bei einem Projekt zum Einsatz kommen?

Entscheidend für die richtige Auswahl eines oder einer Kombination von Verfahren zur Betonkühlung ist zum einen die Menge an Frischbeton die gekühlt werden muss. Zum anderen die geforderte Frischbetontemperatur und die somit ermittelbare Abkühlrate. Auf Grund von Erfahrungswerten kann die zu erwartende maximale Frischbetontemperatur in den

Sommermonaten ermittelt und berechnet werden. In Mitteleuropa beträgt sie zwischen 30 °C und 34 °C, in seltenen Fällen wurden Temperaturen bis 36 °C gemessen.

Bei der Ermittlung der notwendigen Abkühlrate muss neben der geforderten Frischbetontemperatur, die Erwärmung im Transportfahrzeug auf dem Weg zu Baustelle, die Erwärmung durch das Pumpen des Frischbetons und ein Sicherheitszuschlag von 1 °C berücksichtigt werden.

Somit liegt die notwendige Frischbetontemperatur bei Auslieferung aus dem Mischwerk in der Regel um 3 °C unter der geforderten Frischbetontemperatur. Ausgehend von einer maximalen Temperatur von 31 °C in den heißen Monaten eines Jahres ergibt sich die Notwendigkeit den Frischbeton um maximal 12 °C zu kühlen.

Derzeit wird daher eine Kombination der Verfahren Zementkühlung I und Wasserkühlung eingesetzt. Abkühlraten von bis zu 12 °C können somit realisiert werden. Allerdings muss dann das logistische Konzept für die Zementanlieferung den Erfordernissen der geringen Lagerzeit bei Zementtemperaturen von -20 °C angepasst werden.



Abb. 7: Vergleich der einzelnen Verfahren zur Frischbetonkühlung

Zur besseren Abschätzung der möglichen Frischbetontemperaturen wurde ein Programm zur Berechnung der Frischbetontemperatur (Frischbetonrechner (FBTR)) erstellt.

Dabei wird die Formel:

$$T_{bo} = \frac{(m_z \cdot c_z \cdot T_z + m_g \cdot c_g \cdot T_g + m_w \cdot c_w \cdot T_w)}{c_{bo}} \quad (1)$$

- mit z = Zementgehalt [kg/m³]
- g = Zuschlaggehalt [kg/m³]
- w = Wassergehalt [kg/m³]
- c_z = 1,0 kJ/kgK: spezifische Wärmekapazität des Zements

c_g = 1,0 kJ/kgK: spezifische Wärmekapazität des Zements

c_w = 4,2 kJ/kgK: spezifische Wärmekapazität des Zements

T_z = Temperatur des Zements [K]

T_g = Temperatur des Zuschlags [K]

T_w = Temperatur des Wassers [K]

verwendet.

Abhängig von der eingegebenen Rezeptur des Betons wird im ersten Schritt die spezifische Wärmekapazität ermittelt.

$$C_{bo} = m_z \cdot c_z + m_g \cdot c_g + m_w \cdot c_w \quad [kJ/K] \quad (2)$$

Das Berechnungsprogramm ermittelt mit den eingegebenen Daten und dem gewählten Kühlverfahren die erreichbare Frischbetontemperatur, berücksichtigt dabei Energieverluste und gibt Daten zur Wirtschaftlichkeit an.

Somit ist eine schnelle Bewertung der zur Verfügung stehenden Kühlverfahren mit den baustellen-spezifischen Daten möglich.

4.6 Wirtschaftlichkeit

Neben den technischen Aspekten ist die Wirtschaftlichkeit ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz von Technologien zum Frischbetonkühlen. Auf Grund der Kostenstruktur verteuert die Kühlung den Frischbeton zum Teil erheblich (Kostensteigerung von 10 % bis zu 50 %). Daher ist der Einsatz einer dem Bedarf angepassten Kühltechnologie bei höchstmöglicher Energieausnutzung notwendig.

Vergleicht man die drei derzeit am häufigsten eingesetzten Kühltechnologien Lanzen-, Wasser und Zementkühlung auf der Basis praktischer Daten, ausgehend von Betonmengen von 500 m³ bis 10.000 m³, wird deutlich, dass jedes Verfahren seine Berechtigung besitzt. Im Vordergrund steht immer das Verhältnis von Anlageninvestition gegenüber den Betriebskosten.

Es wird aber deutlich, dass unabhängig von der zu kühlenden Frischbetonmenge die Wasserkühlung trotz der geringen Abkühlrate in jedem Fall einen sinnvollen Beitrag zur Zielerreichung leistet.

Weiterhin wird deutlich, dass in jedem Fall die Zementkühlung I eine direkte Alternative zur Lanzenkühlung darstellt. Dies ist neben der technischen Überlegenheit bei der Abkühlrate auch im wirtschaftlichen Vorteil durch die wesentlich bessere Energieausnutzung begründet.

5 Neue Entwicklungsprojekte Zementkühlung III

Die begrenzte Abkühlleistung des Zementkühlverfahrens I bei einer verlustfreien Abkühlung auf Umgebungstemperatur und die nur kurze Verweilzeit des Zementes bei Temperaturen im Bereich der Umgebungstemperatur bis minimal -20 °C und den Forderungen der Betonhersteller von Großprojekten, die Frischbetontemperatur im Bereich von 12 bis max. 18 °C über das gesamte Jahr zu halten, wird derzeit ein neues Verfahren zur Zementkühlung mit einer hohen Abkühlrate (ΔT) von über 22 °C und einer hohen Energieausnutzung entwickelt.

Dieses neue Verfahren zeichnet sich durch die Möglichkeit aus, den Zement bis zur minimal möglichen Temperatur von -160 °C abzukühlen. Auf Grund der Anlagentechnik erfolgt eine Just-In-Time-Produktion des Zementes. Somit wird auf eine energieintensive Zwischenlagerung des kalten Zementes verzichtet. Durch die Aufteilung der geforderten Gesamtzementmenge in einen Teil tiefkalten Zement und einen Teil warmen Zemente kann die Frischbetontemperatur auf Grund dieses Mischungsverhältnisses exakt eingestellt werden.

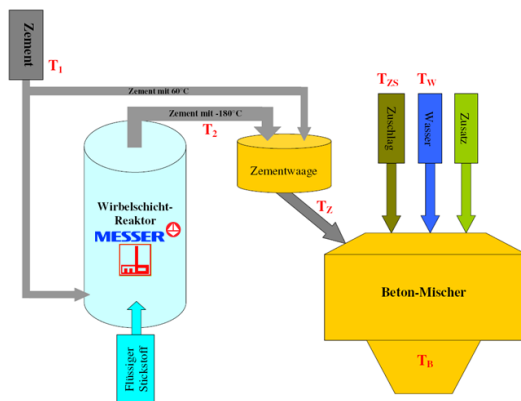


Abb. 8: Schematische Darstellung des Verfahrens Zementkühlung III (Cryoment In Time)

Das neue Verfahren weist bei einer hohen Abkühlrate auch eine hohe Energieausnutzung auf. Dies wird dadurch erreicht, dass der eingesetzte Stickstoff, der mit der Zementtemperatur (-120 °C bis -160 °C) den Reaktionsraum verlässt, zur Wasserkühlung eingesetzt wird. Wir gehen von einer Energieausnutzung von über 98% aus.

6 Literatur

- [1] DIN EN 206 Concrete- Specification, performance, production and conformity, European Standards, Beuth Verlag, Berlin; 2016
- [2] DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin; August 2008
- [3] ZTV ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil3: Massivbau, Bundesanstalt für Straßenwesen, Fassung 12/2014
- [4] 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
- [5] Fachtagung „Beton für alle Wetter“: Erfahrungsberichte aus der Bauausführung bei extremen Temperaturen, Dr.-Ing. Monika Helm, Berlin, 22.11.2012
- [6] Zement Merkblatt Betontechnik B21 „Betonieren bei extremen Temperaturen“ VDZ; 12.2016
- [7] Gasehandbuch, Messer Griesheim GmbH, 3. Auflage 1989

Autor

Dipl.-Ing. Jens Tauchmann

Messer Group GmbH
Messer-Platz 1
65182 Bad Soden

Programm des Symposiums

19. März 2020, Tulla Hörsaal, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

09:00 Uhr	Anmeldung Kaffee	13:45 Uhr	Zementeigenschaften unter höheren Temperaturen Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt VDZ gGmbH
09:30 Uhr	Begrüßung Moderation Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH	14:15 Uhr	Einfluss höherer Temperaturen auf die Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln Dipl.-Ing. Peter Löschnig Sika Deutschland GmbH
09:45 Uhr	Klimaforschung Prof. Dr. Peter Braesicke Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	14:45 Uhr	Kaffeepause
10:15 Uhr	Auswirkungen des Klimas auf das Bauen mit Beton Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	15:15 Uhr	Klimaänderung - Erfahrungen aus der Praxis einer international tätigen Baufirma Dipl.-Ing. Andreas Schaab HOCHTIEF Infrastructure GmbH
10:45 Uhr	Kaffeepause	15:45 Uhr	Möglichkeiten der Verfahrenstechnik zur aktiven Betonkühlung Dipl.-Ing. Jens Tauchmann Messer Group GmbH
11:15 Uhr	Brauchen wir einen neuen Beton? – Erfahrungen aus der Planungspraxis Prof. Dr.-Ing. Jan Akkermann Krebs + Kiefer Ingenieure GmbH Hochschule Karlsruhe	16:15 Uhr	Zusammenfassung Schlusswort Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH
11:45 Uhr	Betonagen bei hohen Temperaturen – Bauvertrag, Betontechnologie und Bauausführung Dipl.-Ing. (FH) André Weisner InformationsZentrum Beton GmbH		
12:15 Uhr	Mittagspause	16:30 Uhr	Umtrunk Imbiss

Autorenverzeichnis

16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Klima, Risse und Co. – Betonbau im herausfordernden Umfeld

Prof. Dr.-Ing. Jan Akkermann

Krebs + Kiefer Ingenieure GmbH, Stephanienstr. 55, 76133 Karlsruhe

Kévin Bastian, M.Eng.

Krebs + Kiefer Ingenieure GmbH, Stephanienstr. 55, 76133 Karlsruhe

Prof. Dr. Peter Braesicke

Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
H.-v.-Helmholtz-Platz 1, 76344 Leopoldshafen

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt

VDZ gGmbH, Tannenstr. 2, 40476 Düsseldorf

Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ gGmbH, Tannenstr. 2, 40476 Düsseldorf

Dipl.-Ing. Andreas Schaab

HOCHTIEF Infrastructure GmbH, Technical Competence Centrum, Materials, Farmstraße 91-97,
64546 Mörfelden-Walldorf

Annika Schultheiß, B.Sc.

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Jens Tauchmann

Messer Group GmbH, Messer-Platz 1, 65182 Bad Soden

Dipl.-Ing. (FH) André Weisner

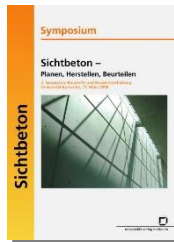
InformationsZentrum Beton GmbH, Hannoversche Str. 21, 31319 Sehnde

Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Themen vergangener Symposien (2004-2019)



1. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Vogel, M. Haist
ISBN 978-86644-098-2



2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-937300-43-0



3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Innovationen in der Betonbautechnik
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-86644-008-1



4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Industrieböden aus Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-120-0



5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonbauwerke im Untergrund – Infrastruktur für die Zukunft
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-214-6



6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-341-9

bitte wenden



7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Beherrschung von Rissen in Beton
 Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
 ISBN 978-3-86644-487-4



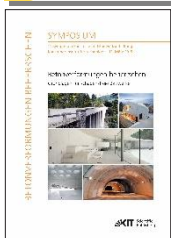
8. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Schutz und Widerstand durch Betonbauwerke bei chemischen Angriff
 Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
 ISBN 978-3-86644-654-0



9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Nachhaltiger Beton – Werkstoff, Konstruktion und Nutzung
 Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
 ISBN 978-3-86644-820-9



10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Gestalteter Beton – Konstruieren in Einklang von Form und Funktion
 Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
 ISBN 978-3-73150-179-4



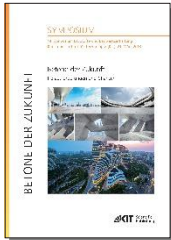
11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonverformungen beherrschen – Grundlagen für schadensfreie Bauwerke
 Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
 ISBN 978-3-7315-0343-9



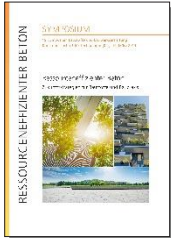
12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau
 Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
 ISBN 978-3-7315-0474-0



13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sicherheit durch Beton – Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, J. Link
ISBN 978-3-7315-0629-4



14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link
ISBN 978-3-7315-0767-3



15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link; V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0993-6

Alle Bände sind kostenfrei als Download bei **KIT Scientific Publishing** (<http://www.ksp.kit.edu>) oder für einen Unkostenbeitrag im Buchhandel erhältlich.

Im Zuge einer sich ständig wandelnden Umwelt verändern sich auch die Anforderungen, denen die Betonbauweise ausgesetzt ist. Steigende Temperaturen in den Sommermonaten, andauernde Hitzeperioden oder eine Zunahme von Extremwetterereignissen stellen die am Bau Beteiligten in den letzten Jahren vor immer größer werdende Herausforderungen. Zum einen können Risse durch frühen Zwang und eine schlechtere Verarbeitbarkeit des Frischbetons infolge hoher Temperaturen die Betonbauqualität reduzieren. Zum anderen führt das Nichteinhalten normativ geforderter Frischbetontemperaturen häufig zu Rechtsstreitigkeiten. Zielsetzung des 16. Symposiums Baustoffe und Bauwerkserhaltung ist es, Ihnen einen Überblick über diese Entwicklungen zu geben und diese hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die zukünftige Betontechnologie sowie das zukünftige Bauen mit Beton zu bewerten.

Das Programm der Veranstaltung beginnt mit einer Einführung von Seiten der Klimaforschung, in welcher klimatische Entwicklungen auf globaler und regionaler Ebene beleuchtet werden. Anschließend wird die Bedeutung dieser Entwicklungen für die verschiedenen Beteiligten der Baubranche erläutert. In weiteren Vorträgen werden bisher gewonnene Erfahrungen von Seiten der Planer und Bauunternehmer vorgestellt. Es wird auf normative, technische und bauvertragliche Grundlagen eingegangen. Zudem wird der Einfluss erhöhter Temperaturen auf die Eigenschaften des Zements und der Betonzusatzmittel erläutert. Abschließend werden Lösungsvorschläge für das Betonieren bei hohen Temperaturen vorgestellt.