



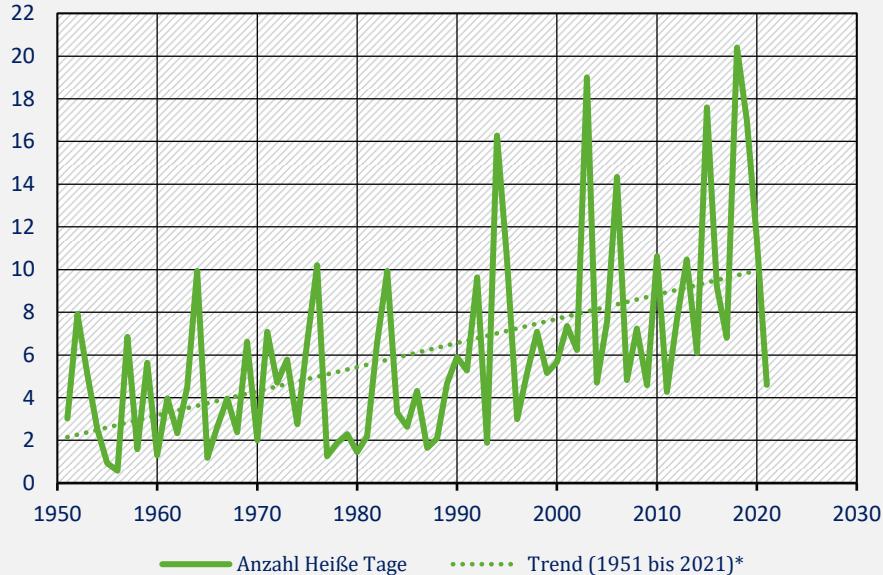
RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

# AUSWIRKUNGEN HOHER BETONTEMPERATUREN AUF DIE FRISCH- UND FESTBETONEIGENSCHAFTEN

M.Sc. Julia Neumann

# Aktuelle Situation

## Anzahl der Tage mit einem Lufttemperatur-Maximum über 30 Grad Celsius (Gebietsmittel)



\* lineare Regressionsgerade über alle dargestellten Indikator-Werte

Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), Mitteilung vom 15.11.2021

- **DIN 1045-2 / DIN 1045-3:**  
„Die Frischbetontemperatur darf im Allgemeinen +30 °C nicht überschreiten, sofern nicht durch geeignete Maßnahmen sichergestellt ist, dass keine nachteiligen Folgen zu erwarten sind“
- Regelungen in DIN 1045 seit 1972 festgeschrieben
- Lufttemperaturen > 30°C damals selten / Grenze praktisch nie überschritten
- „Vorsichtsgrenze“
- Heutzutage: Einhaltung der Temperaturgrenze in den Sommermonaten wird zunehmend schwerer
- Sommer weiterhin Hochphase der Baubranche
- Weiterhin Frost und Niederschläge im Winter

# Temperaturen im Betonbau

## • Umgebungstemperatur ( $T_{UB}$ )

- Lufttemperatur der unmittelbaren Umgebung zum Bauteil/Bauwerk

## • Frischbetontemperatur ( $T_{FB}$ )

- Temperatur des Betons im verarbeitbaren Zustand
- Veränderlich (Transportwege, Sonneneinstrahlung, etc.)
- Vertraglich relevant

## • Erhärtungstemperatur ( $T_{ERH}$ )

- Temperatur des Betons während der Erhärtung
- Veränderlich
- Beeinflusst von: Frischbetontemperatur, freigesetzter Hydrationswärme, Umgebungstemperatur, Bauteilgeometrie

## • Wie kommen hohe Frischbetontemperaturen zu Stande?

- Temperaturen der Ausgangsstoffe (hauptsächlich)
  - Beeinflusst durch Lagerung (z.B. Gesteinskörnung direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt)
  - Herstellung (z.B. Zement zeitnah nach der Herstellung ausgeliefert)
- Transport / Einbau:
  - Lange Fahrwege im Transportmischer
  - Direkte Sonneneinstrahlung bei der Verarbeitung
  - Pumpen durch aufgeheizte Schläuche
  - ...

# Hohen Betontemperaturen und deren Auswirkungen vorbeugen

## • Planung

- Zu kühleren Tageszeiten Betonieren
- Verzögerungen vermeiden
- kleine Bauabschnitte
- Dehnungsfugenabstände verringern
- Schalungsmaterial anpassen (Stahl heizt sich schneller auf als Holz, kühlt aber auch schneller ab)
- Anpassung der Betonzusammensetzung
- Lagerungstanks weiß lackieren
- Kurze Anfahrtswege bei Transportbeton
- Ersatzlieferwerke
- Ausreichend und sorgfältig nachbehandeln
- ...

## • Kühlmaßnahmen

- Gesteinskörnung kühlen (z.B. Wasserberieselung)
- Zement kühlen (z.B. Flüssiggase)
- Wasser kühlen (z.B. teilweise durch Scherbeneis ersetzen)
- Frischbeton kühlen (z.B. Flüssigstickstoff)

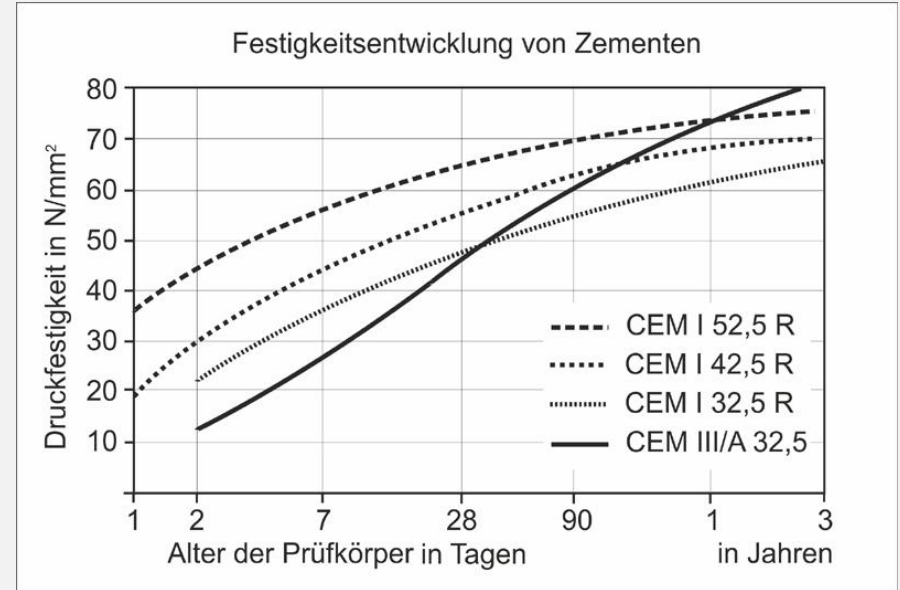
**Kühlmaßnahmen sind meist aufwändig und kostenintensiv!**

**Hohe Temperaturen während der Betonage bedeuten:**  
**Beeinflussung der Verarbeitbarkeit**  
**Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften und**  
**Dauerhaftigkeit**



# Auswirkungen hoher Betontemperaturen

- Entscheidend sind Temperaturen in den ersten Tagen nach der Betonage  
→ Großteil des Betongefüges bildet sich aus
- Mit zunehmender Hydratationsdauer nimmt Temperatureinfluss ab
- Frischbeton- und Verarbeitungseigenschaften
  - Größten Einfluss hat Frischbetontemperatur
- Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit
  - Sowohl Frischbetontemperatur als auch Umgebungsbedingungen haben großen Einfluss



Entwicklung der Druckfestigkeit von Mörtelprismen mit verschiedenen Zementarten und -festigkeitsklassen über den Zeitraum von drei Jahren [1].

# Auswirkungen auf das Betongefüge

- Höhere Temperaturen beschleunigen chemische Reaktionen → schnellere Bildung des Betongefüges [2]
- Anfängliche Hydratation: verstärkte Ettringitbildung, gleichzeitiger Rückgang der Monosulfat-Phasen → rascheres Ansteifen des Betons [3]
- Veränderung der Morphologie der Hydratphasen [3, 4, 5]
  - C-S-H-Phasen bilden sich schneller, aber bleiben kürzer → Gefüge weniger dicht und stabil
  - Dichtere Strukturen im Innern der C-S-H Phasen
  - Abnahme des Ettringitgehalts ab 40 °C und höher
  - Unterschiede in der Morphologie des Ettringits (sehr kurze Nadeln bei 40 °C).
  - heterogene Verteilung der Hydratationsprodukte und somit größere Porosität
- Transportvorgänge von flüssigen Medien und Gasen verändert

# Auswirkungen auf die Betoneigenschaften

## • Frischbeton

- Schnelleres Ansteifen
- schlechtere Verdichtbarkeit
- Kürzere Verarbeitbarkeit
- höherer Zusatzmittelanspruch
- Sinkender Luftgehalt

## • Festbeton

- Mechanische Eigenschaften
  - Höhere Früh- und niedrigere „End“-Festigkeiten
  - Veränderung des E-Moduls

## • Dauerhaftigkeit

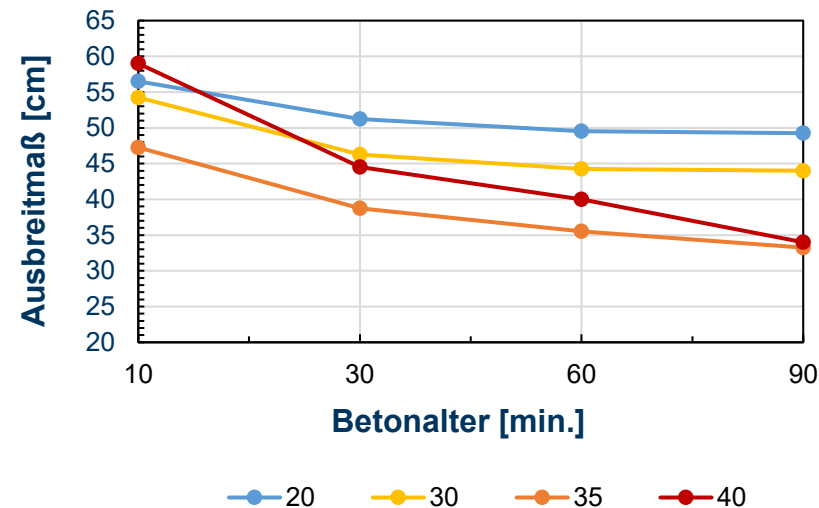
- Geringerer Frost- und Frost-Tausalzwidehrstand
- Geringerer Chloridmigrationswiderstand
- Geringerer Carbonatisierungswiderstand
- Höhere Reißneigung
- Größeres Schwinden



# Auswirkungen auf Frischbeton und Verarbeitungseigenschaften

## • Schnelleres Ansteifen [6, 7, 8, 9]

- Vor allem in ersten 30 min. nach Herstellung
- Effekt nimmt mit ansteigender Temperatur zu
- Materialtechnologische Einflüsse (w/z-Wert, Mahlfeinheit Zement, Zementart, etc.) werden teilweise durch Temperatureinfluss überlagert
- Veränderung der Konsistenzklassen innerhalb von 60 min. nach Herstellung (Anhaltswerte)
  - 20 °C ca. 0 Konsistenzklassen
  - 30 °C bis zu 1 Konsistenzklasse
  - 35 °C bis zu 1 Konsistenzklasse
  - 40 °C bis zu 2 Konsistenzklassen

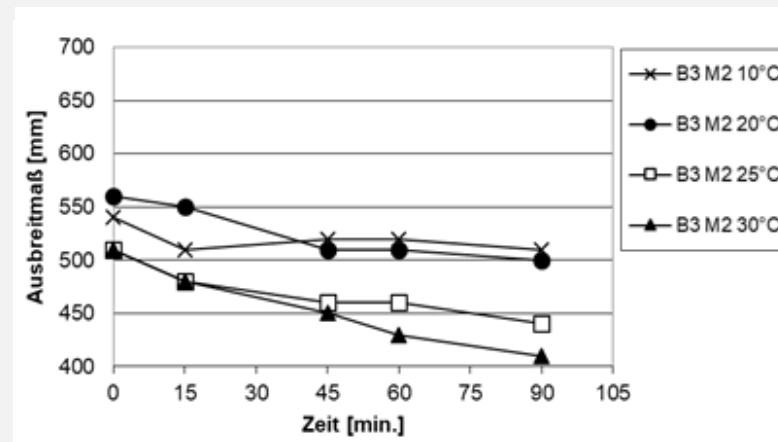


Ausbreitmaß eines Betons mit CEM II/A-LL 42,5 N, A/B 16, w/z = 0,50 und 300 l/m<sup>3</sup> Leimgehalt [7].

# Auswirkungen auf Frischbeton und Verarbeitungseigenschaften

## • Schnelleres Ansteifen [6,7, 8, 9]

- Vor allem in ersten 30 min. nach Herstellung
- Effekt nimmt mit ansteigender Temperatur zu
- Materialtechnologische Einflüsse (w/z-Wert, Mahlfeinheit Zement, Zementart, etc.) werden teilweise durch Temperatureinfluss überlagert
- Veränderung der Konsistenzklassen innerhalb von 60 min. nach Herstellung (Anhaltswerte)
  - 20 °C ca. 0 Konsistenzklassen
  - 30 °C bis zu 1 Konsistenzklasse
  - 35 °C bis zu 1 Konsistenzklasse
  - 40 °C bis zu 2 Konsistenzklassen



Ausbreitmaße von Beton mit 331 l/m<sup>3</sup> Leimgehalt in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur [8].

# Auswirkungen auf Frischbeton und Verarbeitungseigenschaften

## • höherer Zusatzmittelanpruch [6, 7, 8, 9]

- Steigt im Allgemeinen mit der Temperatur
- Fließmitteldosierung (Anhaltswerte)
  - Hochbaubetone (PCE)
    - Änderung  $T_{FB}$  von 20 °C auf 30 °C  
→ 30 % bis 100 % höherer FM-Anspruch
  - Straßenbetone (Maleinsäurederivat)
    - 20 °C: meist kein FM erforderlich
    - 30 °C: 0,0 - 1,2 M.-% v. Z.
    - 35 °C: 0,4 - 1,3 M.-% v. Z.
    - 40 °C: 0,4 - 1,5 M.-% v. Z.

- Starke Abhängigkeit vom verwendeten Zusatzmittel und der Betonzusammensetzung
  - Bsp: moderne LP-Bildner erfordern häufig keine/geringe Dosierungsanpassung
- Vorsicht: gegenseitige Beeinflussung von mehreren Zusatzmitteln möglich!
- Nachverflüssigende Effekte von Konsistenzhaltern können eingeschränkt werden

# Auswirkungen auf Frischbeton und Verarbeitungseigenschaften

## • Kürzere Verarbeitbarkeit [6]

- Folgen des schnelleren Ansteifens und Erstarrens
- Relevanz abhängig von den Randbedingungen (Betonzusammensetzung usw.)
  - Straßenbetone müssen min. 45 Minuten einbaubar sein  
→ in eigenen Labor-Versuchen Verarbeitbarkeit bei  $T_{FB} > 30\text{ °C}$  deutlich verkürzt im Vergleich zu  $T_{FB} = 20\text{ °C}$  aber immer länger als 60 Minuten [6]

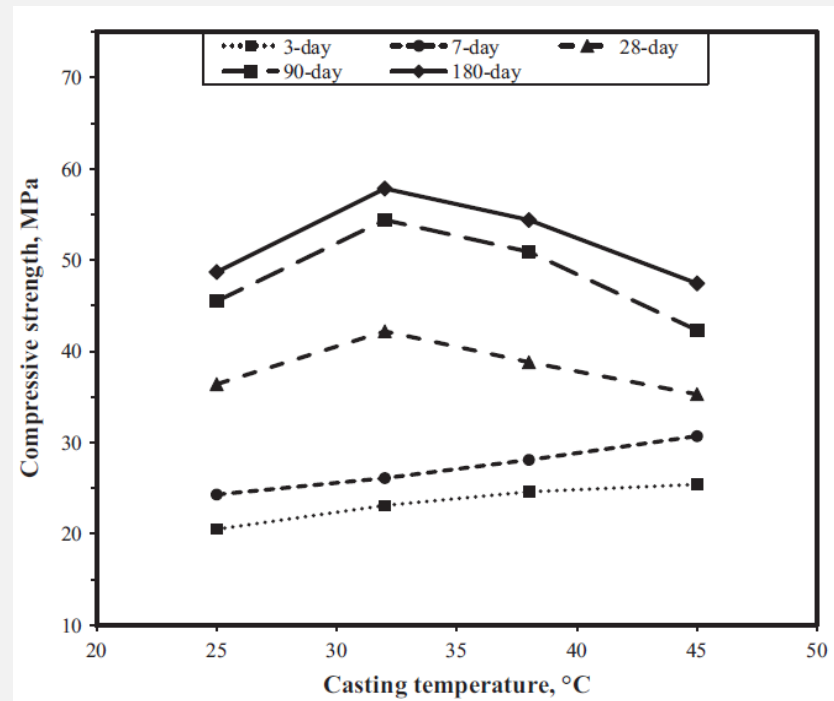
## • schlechtere Verdichtbarkeit [6]

- Betone müssen länger/intensiver verdichtet werden
- Nicht ausreichende Verdichtung verstärkt Effekte des Temperatureinflusses auf den Festbeton
  - z.B. sinkende Druckfestigkeit, sinkender Frost-Tausalz-Widerstand

# Auswirkungen auf Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit

## • Festigkeiten [3, 8, 10, 11, 12]

- „Crossover- Effekt“
  - Steigende Frühfestigkeiten
  - Sinkende „End“-Festigkeiten
  - „Crossover“ tritt nicht immer im gleichen Betonalter auf
- Temperaturen ab denen negative Auswirkungen auftreten variieren in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung (teilweise 32 °C, 35 °C, 38 °C)
- Anhaltswerte :
  - Änderung von  $T_{FB} = 20\text{ °C}$  auf 40 °C:
    - Frühfestigkeiten ca. 5 – 15 MPa höher (1d)
    - „End“-Festigkeiten ca. 5 – 10 MPa niedriger (max. 180d)

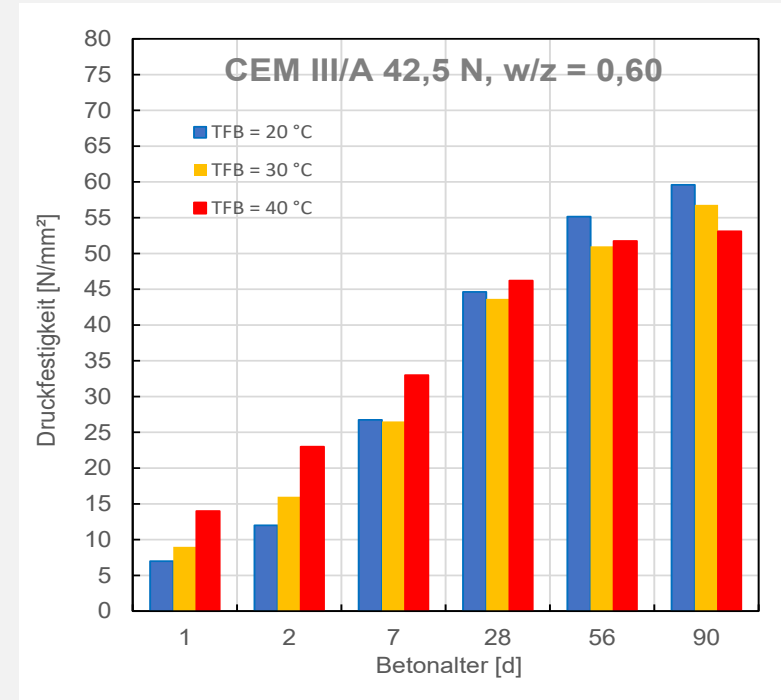


Druckfestigkeit eines Betons mit Portlandzement bei unterschiedlichen Frischbetontemperaturen [10].

# Auswirkungen auf Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit

## • Festigkeiten [3, 8, 10, 11, 12]

- „Crossover- Effekt“
  - Steigende Frühfestigkeiten
  - Sinkende „End“-Festigkeiten
  - „Crossover“ tritt nicht immer im gleichen Betonalter auf
- Temperaturen ab denen negative Auswirkungen auftreten variieren in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung (teilweise 32 °C, 35 °C, 38 °C)
- Anhaltswerte :
  - Änderung von  $T_{FB} = 20\text{ °C}$  auf 40 °C:
    - Frühfestigkeiten ca. 5 – 15 MPa höher (1d)
    - „End“-Festigkeiten ca. 5 – 10 MPa niedriger (max. 180d)



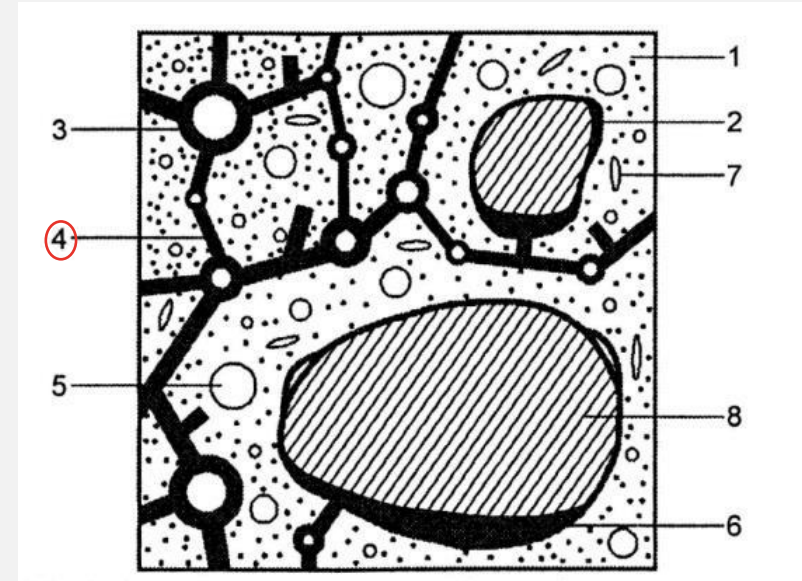
Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit CEM III/A 42,5 N\_w/z = 0,60 unter Temperatureinfluss [8].



# Auswirkungen auf Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit

## • Dauerhaftigkeit [3, 13, 14]

- Maßgebend sind Dichtigkeit und Festigkeit → Starke Abhängigkeit vom Porensystem des Betons
  - Porengrößenverteilung hat großen Einfluss
  - Gesamtporenraum nur untergeordneter Einfluss
- Kapillarporen (Größe (0,01...0,05) - 5 µm) sind für Transportmechanismen im Betonstein verantwortlich
  - Kapillarporenanteil < ca. 25 % → Poren nicht miteinander verbunden → kein Stofftransport → dichter Beton
- Hohe Temperaturen führen zu in sich dichteren aber kürzeren C-S-H-Phasen, heterogene Verteilung der Hydratationsprodukte → größere Porosität

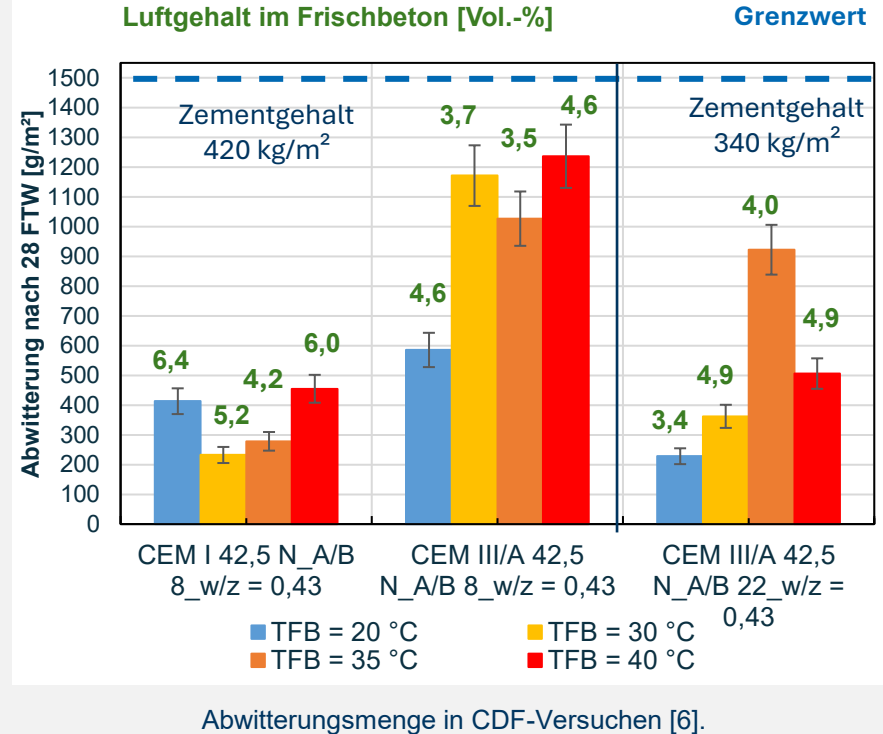


Schematische Darstellung der porösen Struktur von Zementbeton: 1 – Gelporen, 2 – Poren in der Kontaktzone zwischen Zuschlagstoffkörnern und Zementleim, 3 – luftgefüllte Poren, 4 – Kapillarporen im Zementleim, 5 – geschlossene Poren, 6 – Sedimentporen, 7 – Mikrorisse, 8 – Zuschlagstoffkorn [15].

# Auswirkungen auf Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit

## • Frost-Tausalz-Widerstand

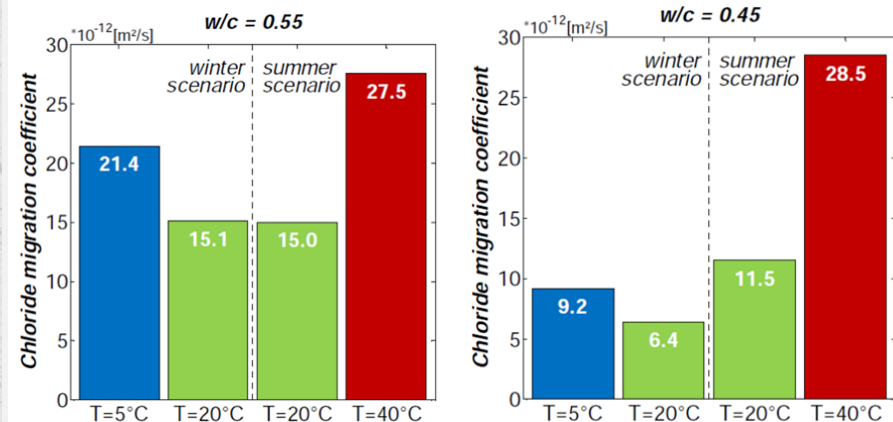
- Mikroporen als Expansionsräume müssen ausreichend viel und mit ausreichend geringem Abstand vorliegen
- Ggf. mit künstlichen Luftporen durch LP-Bildner
- Höhere Temperaturen hemmen LP-Bildung und bewirken schnelleres Ansteifen [16, 17] → kann höheren Verdichtungsaufwand bedeuten → Gefahr Luftporen teilweise wieder auszutreiben
- Größere Porosität kann zu mehr Flüssigkeitseintrag in den Beton führen
- Große Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung
- Temperaturanstieg von  $T_{FB} = 20\text{ °C}$  auf  $40\text{ °C}$  bis dreifache Abwitterungsmenge (eigene Labor-Versuche)



# Auswirkungen auf Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit

## • Chloridmigrationswiderstand [8, 18, 19]

- Sinkt mit zunehmender Temperatur
- Starke Abhängigkeit der Betonzusammensetzung und der Umgebungsbedingungen
- Versuche teilweise mit hoher Frischbeton- und/oder Erhärtungstemperatur durchgeführt → Beeinflussung der Ergebnisse
  - Anstieg von  $T_{FB} = 20\text{ °C}$  auf  $T_{FB} = 40\text{ °C}$ : 2 bis 4-fach höherer Chloridmigrationskoeffizient
- Eigene Versuche:
  - Einfluss der Temperatur kleiner als der der Zusammensetzung
  - maßgeblicher Einfluss der Zementart
  - Einfluss des w/z-Werts im Vergleich eher gering

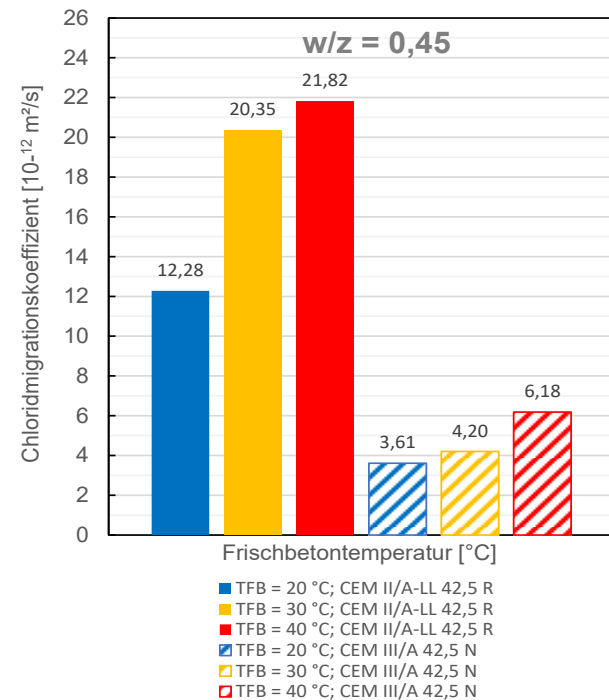


Einfluss unterschiedlicher Erhärtungstemperaturen auf den Chloridmigrationswiderstand für einen Beton mit CEM I im Alter von 28 Tagen (links: w/z = 0,55; rechts: w/z = 0,45) [18].

# Auswirkungen auf Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit

## • Chloridmigrationswiderstand [8, 18, 19]

- Sinkt mit zunehmender Temperatur
- Starke Abhängigkeit der Betonzusammensetzung und der Umgebungsbedingungen
- Versuche teilweise mit hoher Frischbeton- und/oder Erhärtungstemperatur durchgeführt → Beeinflussung der Ergebnisse
  - Anstieg von  $T_{FB} = 20\text{ °C}$  auf  $T_{FB} = 40\text{ °C}$ : 2 bis 4-fach höherer Chloridmigrationskoeffizient
- Eigene Versuche:
  - Temperatureinfluss kleiner als Einfluss der Zusammensetzung
  - maßgeblicher Einfluss der Zementart
  - Einfluss des w/z-Werts im Vergleich eher gering

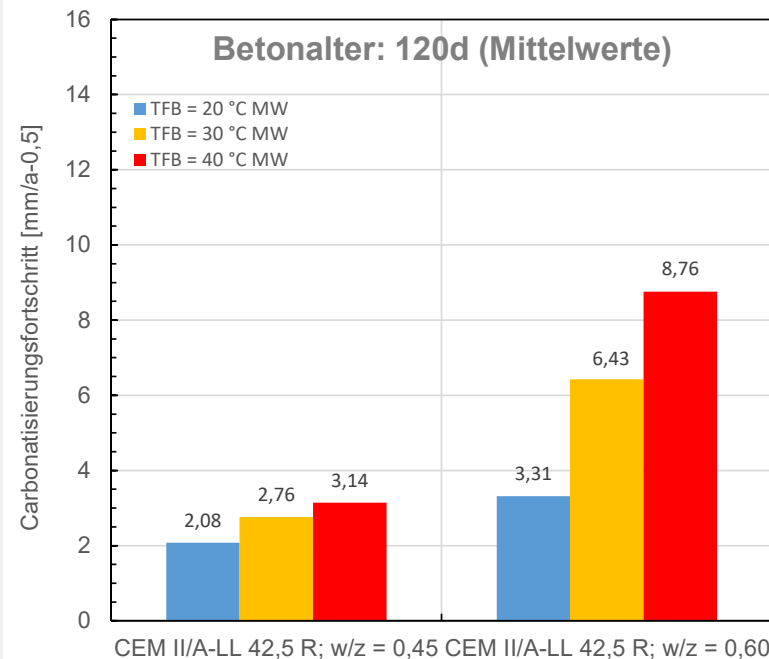


Chloridmigrationskoeffizienten von Betonen mit CEM III/A 42,5 N<sub>0,45</sub> und CEM II/A-LL 42,5 R<sub>0,45</sub>, A/B 16, Zementleimgehalt 300 l/m<sup>3</sup> [8].

# Auswirkungen auf Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeit

## • Carbonatisierungswiderstand [8]

- Ähnliches Verhalten wie Chlordimigrationswiderstand
- Anstieg von  $T_{FB} = 20\text{ °C}$  auf  $T_{FB} = 40\text{ °C}$ : 1,5 bis 3-fach höherer Carbonatisierungsfortschritt (eigene Labor-Versuche, Anhaltswerte)



Chloridmigrationskoeffizienten von Betonen mit CEM II/A-LL 42,5 R w/z = 0,45 und 0,60, A/B 16, Zementleimgehalt 300 l/m<sup>3</sup> [8].

# Zusammenfassung

## • Frischbetoneigenschaften und Hydratation:

- Erhöhte Frischbetontemperaturen → schnelleres Ansteifen und Erstarren → u. U. ungünstig für die Verarbeitbarkeit
- Insbesondere nimmt die Thixotropie der Betone zu → u.U. ungünstige Auswirkungen auf Verbund von Schüttilagen
- Bei höheren Frischbetontemperaturen sind für Betonzusatzmittel i. d. R. höhere Zugabemengen erforderlich, um die angestrebte Wirkung zu erzielen
- Nachverflüssigungseffekt von verflüssigenden Betonzusatzmitteln im Frischbeton eingeschränkt
- Unzureichende oder übermäßige Verdichtung kann Effekte des Temperatureinflusses verstärken
- Der Hydratationsgrad wird maßgeblich von der Erhärtungstemperatur bestimmt

## • Mechanische Eigenschaften:

- reine Portlandzementbetonen: Frischbetontemperaturen oberhalb von 30 °C führen tendenziell zu verminderten Festigkeiten im höheren Alter
- Bei gleichzeitiger Verwendung von latent-hydraulischen / puzzolanen Hauptbestandteilen bzw. Zusatzstoffen zeigen sich die für Portlandzementbetone beobachteten Festigkeitseinbußen erst bei höheren Frischbetontemperaturen (ab etwa 35 °C).
- Betone, die bei höheren Temperaturen erhärten, weisen gegenüber bei niedrigeren Temperaturen hydratisierenden Betonen höhere Frühfestigkeiten, aber geringere Festigkeiten in späterem Alter auf (Crossover-Effekt).



# Zusammenfassung

## • Dauerhaftigkeit und Porenstruktur:

- Mit steigender Erhärtungstemperatur bilden sich kürzere und gleichzeitig dichtere C-S-H-Phasen aus, was jedoch mit einer Erhöhung der Kapillarporosität einhergeht
- Erhöhte Lagerungs- bzw. Erhärtungstemperaturen führen zu einem erhöhten Chloridmigrationskoeffizienten und demnach zu einem reduzierten Chlorideindringwiderstand
- Erhöhte Lagerungs- bzw. Erhärtungstemperaturen führen zu einer Zunahme der Karbonatisierungstiefe
- Die Frischbetontemperatur beeinflusst die Reißneigung infolge Hydratationswärme signifikant

## • Möglichkeiten negativen Effekten entgegenzuwirken

- Größere Vorhaltemaße u.a. bei Konsistenzen vorsehen
- Betonzusammensetzungen anpassen, wenn hohe Temperaturen erwartet werden
- Sorgfältige Planung
- ...

# **Ich bedanke mich für Ihre Aufmerksamkeit!**

**M.Sc. Julia Neumann**

**Ruhr-Universität Bochum**

**Lehrstuhl für Baustofftechnik**

**E-mail: [Julia.Neumann-a4n@rub.de](mailto:Julia.Neumann-a4n@rub.de)**

**[www.rub.de/baustoffe](http://www.rub.de/baustoffe)**

# Literaturverzeichnis

- [1] Kroboth, K: Zement / Herstellung - Eigenschaften - Hydratation. in Gesundes Wohnen. Beton-Verlag, Düsseldorf, S. 336-348, 1986.
- [2] InformationsZentrum Beton GmbH,: Betonieren unter extremen Temperaturen, Zement-Merkblatt B 21, 2014.
- [3] Lothenbach, B.; Winnefeld, F.; Alder, C.; Wieland, E.; Lunk, P.: Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. In: Cement and Concrete Research, Nr. 37, S. 483-491, 2007.
- [4] Verbeck, G.J.; Helmuth, R.H. Principal Paper: Structures and Physical Properties of Cement Paste. In: 5th International Symposium Chemistry of Cement, Nr. 3, S. 1-32, 1968.
- [5] Schindler, A.K.; Dossey, T.; McCullough, B.F.: Temperature control during construction to improve the long term performance of portland cement concrete pavements. Texas Department of Transportation, USA, 2002.
- [6] Bundesanstalt für Straßenwesen: FE 08.0272/2022/CGB Betonieren bei heißen Temperaturen – Untersuchung der Frisch- und Festbetoneigenschaften (noch nicht veröffentlicht)
- [7] Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V.: Auswirkungen erhöhter Frischbeton- und Erhärtungstemperaturen auf die Dauerhaftigkeit von Beton (noch nicht veröffentlicht)
- [8] Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V.: Gemeinsamer Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Auswirkungen erhöhter Frischbeton- und Lagerungstemperaturen auf Frisch- und Festbetoneigenschaften“, 2023.
- [9] Küchlin, D. & Jäger, F.: Mischungsstabiler Beton mit PCE-Fließmitteln. HeidelbergCement AG: Newsletter Dezember 2016.

# Literaturverzeichnis

- [10] Nasir, M.; Al-Amoudi, O.S.; Al-Gahtani, H.J.; Maslehuddin, M.: Effect of casting temperature on strength and density of plain and blended cement concretes prepared and cured under hot weather conditions. In: Construction and Building Materials, Nr. 112, S. 529-537, 2016.
- [11] Ortiz, J.; Aguado, L.; Agullo, L. & Garcia, T.: Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions. Cement and Concrete Research, Nr. 35, pp. 1970-1979, 2005.
- [12] Kim, J-K.; HAN, S.H. & Song, Y.C.: Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Experimental results. Cement and Concrete Research 32 (2002). 1087–1094, 2002.
- [13] Stark, J. & Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton, 2. Aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Vieweg. Berlin Heidelberg, 2013.
- [14] Lothenbach, B.; Winnefeld, F.; Alder, C.; Wieland, E. & Lunk, P.: Einfluss der Temperatur und Lagerungsbedingungen auf die Festigkeitsentwicklung von Mörteln und Betonen, Beton 55 (12) 604–609, 2005.
- [15] Bołtryk, M. & Pawluczuk, E.: Properties of recycled aggregate concretes modified by asphalt paste. 10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques. 41-49, 2010.
- [16] Vance, H. & Dodson, P.D.: Concrete admixtures. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [17] Eickschen, E.: Wirkungsmechanismus Luftporen bildender Zusatzmittel und dem Nachaktivierungspotenzial. Dissertation. Ruhr-Univ. Bochum, 2009.
- [18] Gerlach, J.; Werner, M.; Lohaus, L.; Steinborn, T.: Influence of construction site conditions on the properties of hardened concrete. In: Proceedings of fib Symposium Tel-Aviv, S. 213-216, 2013.
- [19] Skazlić, M.; Baričević, M.; Karla, I.: Influence of different curing conditions on mechanical and durability properties of fly ash high strength concrete. In: Performance-based Specifications for Concrete, S. 176-182, 2011.