

Peter Nischer und Uwe Zückert

Temperaturanstieg bei der Erhärtung von Beton

Univ. Doz. DI Dr. Peter Nischer, Forschungsinstitut der VÖZ

DI Dr. Uwe Zückert, Forschungsinstitut der VÖZ

Abschätzung der Höchsttemperatur von Beton BS1 gemäß ÖVBB Richtlinie
„Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“

1. Problemstellung

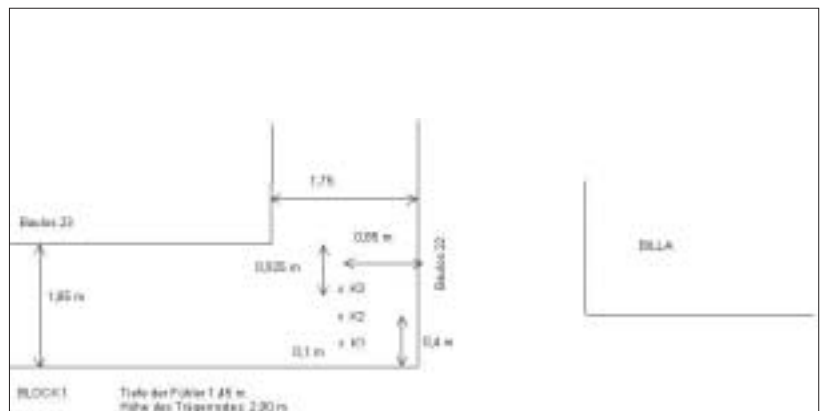
Risse sind bei Stahlbeton systemimmanent – zu große Risse schränken jedoch die Gebrauchstauglichkeit – insbesondere von wasserundurchlässigen Bauteilen – ein. Bei großen fugenlosen Betonbauwerken (Brücken, Behältern), aber auch bei Bodenplatten und Betonstraßen (z.B. vor dem Schneiden der Fugen) treten mitunter in den ersten Tagen durchgehende Risse auf. [1] hat bereits 1973 gezeigt, dass Hauptursache für diese Rissbildung die Temperaturentwicklung bei der Erhärtung ist. Auf Grund umfangreicher Versuche wurden damals unter anderem nachstehende Schlussfolgerungen gezogen:

- Um Querrisse in langgestreckten Betonbauteilen zu verhindern, soll sich der junge Beton in den ersten 8 Stunden (bei Frischbetontemperaturen von + 30° C) bzw. in den ersten 12 Stunden (bei + 20° C) möglichst wenig erwärmen (Sonneneinstrahlung, Hydratationswärme), damit ihm nur wenig plastische „Stauchung“ aufgezwungen wird.
- Nach diesem Zeitraum der starken Hydratationswärmeentwicklung und Erwärmung soll sich der Beton nur sehr langsam abkühlen, damit die entstehenden Zugspannungen durch Relaxation möglichst abgebaut werden können.
- Zemente mit anfänglich langsamer Hydratationswärmeentwicklung sind zweckmäßig, ebenso wie Betonzusammensetzungen, die zum Erreichen der Festigkeit nur niedrige Zementgehalte erfordern

Bild 1: Ansicht Baustelle



Bild 2: Lageskizze (Grundriss): Temperaturfühler in Rost gemäß Bild 1



Zur zielsicheren Herstellung wasserundurchlässiger Betonbauwerke wurde von der Österreichischen Vereinigung für Beton und Bautechnik (ÖVBB) 2002 die auf Grundlage der neuen Betonnorm ÖNORM B 4710-1 [3] überarbeitete Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – weiße Wannen“ [2] herausgegeben. Sie schreibt als wesentliche betontechnische Maßnahme eine Betonzusammensetzung vor, die unter genormten Bedingungen einen Grenzwert für den maximal zulässigen Temperaturanstieg einhalten muss und davon ausgeht, dass bei Bauteilen üblicher Dicke (Wand- oder Plattenstärken bis 1,0 m) bei Einhaltung dieser Forderung der Beton im Bauwerk eine festgelegte Betontemperatur nicht überschreitet. Bei größeren Dicken ist der Temperaturanstieg größer und damit die Einhaltung der Betontemperatur nicht sichergestellt. Die Richtlinie fordert daher, dass bei Dicken über 1,0 m (ohne Berücksichtigung örtlicher Verdickungen) unter Bedachtnahme auf die tatsächliche zeitliche Entwicklung der Wärmeabgabe des Bindemittels (geprüft nach ÖNORM EN 196-9 [4]), der möglichen Frischbetontemperatur und den zu erwartenden Umgebungsbedingungen für die vorgesehene Betonzusammensetzung die Höchsttemperatur bei der Erhärtung rechnerisch zu ermitteln ist.

Die Grundlagen der Berechnung [5] und die für einen durchschnittlichen Beton BS1 bei verschiedenen Randbedingungen voraussichtlichen Höchsttemperaturen werden im Folgenden dargestellt.

Die Untersuchungen [6], die mit Förderung des Forschungsfonds der gewerblichen Wirtschaft (FFF) unter Beteiligung von HL-AG und ÖBB im Forschungsinstitut der österreichischen Zementindustrie (VÖZFI) durchgeführt wurden, zeigten, dass ohne Berechnung und zeitgerechte Planung der zusätzlich erforderlichen Maßnahmen in vielen Fällen eine Überschreitung der gemäß ÖVBB-Richtlinie zulässigen Höchsttemperaturen auftreten wird, was zu schädlichen Rissweiten führen kann. Die Wasserdichtigkeit des Bauwerkes ist dann nicht mehr sichergestellt.

2. Berechnung des Temperaturanstieges im Beton

2.1 Grundlagen

Die Berechnung von Temperaturverläufen und insbesondere der Höchsttemperatur in Bauteilen erfolgt in folgenden Schritten:

1. Ermittlung der Leistungsabgabe des Bindemittels des Bauteiles:

Der gemäß [4] ermittelte Verlauf der Hydrationswärme (Einheit: J/g) wird numerisch nach der Zeit abgeleitet. Somit erhält man die Leistungsabgabe über die Zeit in W/g. Mit dem Bindemittelgehalt je m^3 und den Abmessungen des Bauteiles wird die zeitliche Leistungsabgabe des Bauteiles ermittelt.

2. Modellieren des Bauteiles in einem PC-Programm zur Berechnung von Temperaturfeldern (z.B. „Heat“ [7]):

Die Geometrie des Betonkörpers und allfälliger anliegender Materialien wie Schalung oder Boden wird mit gegebenen Stoffparametern wie Wärmeleitfähigkeit (λ), Wärmekapazität (C) und Frischbetontemperatur sowie den Randbedingungen wie Wärmeübergangswiderstand (R), Wärmefluss an der Oberfläche (q/m^2) und Umgebungstemperatur eingegeben.

3. Zuweisung der in Punkt 1 ermittelten Leistungsabgabe des Bindemittels dem Betonkörper im PC-Programm „Heat“.

4. Berechnung des Temperaturverlaufes am Ort der Höchsttemperatur (meist in der Mitte) des Bauteiles.

5. Ermittlung eines neuen Verlaufes der Leistungsabgabe nach dem Arrhenius-Ansatz [5] mit dem Verlauf der Bauteiltemperatur, Leistungsabgabe nach Punkt 1 und dem Temperaturverlauf der Prüfung nach [4].

6. Wiederholung (Iteration) der Schritte 3 bis 5, bis der Unterschied der Höchsttemperatur im Bauteil zwischen der letzten und der vorletzten Wiederholung $0,1^\circ C$ unterschreitet.

Für sich häufig wiederholende Berechnungen an Körpern gleichbleibender Geometrie (Parameterstudien) wurde für die Berechnung der Bauteiltemperatur (Schritte 2 bis 4) ein eigenes, schnelleres Verfahren entwickelt [5]. Eine detaillierte Behandlung des Rechenverfahrens und der in den nachfolgenden Kapiteln zusammengestellten Ergebnisse wurde in [5] durchgeführt.

2.2 Nachrechnung einer Baustellenbetonierung

Die Nachrechnung des Temperaturverlaufes erfolgte mit der Wärmeentwicklung des verwendeten Bindemittels und der vor Ort herrschenden durchschnittlichen Umgebungstemperatur.

Betoniert wurde ein 1,85 m breiter und 2,9 m hoher Rost (Bild 1 und 2)

Der gemäß [2] verwendete BS1A Beton besteht aus 240 kg/m^3 CEM I 32,5R WT 33 C₃A-frei und 70 kg/m^3 Flugasche gemäß ÖNORM B 3309. Bei Prüfung gemäß ÖNORM B 3303 wurden nachfolgende Kennwerte ermittelt:

- Wärmeentwicklung des Bindemittels (77 % CEM I 32,5R WT 33 und 23 % Flugasche) gemäß ÖNORM B 3303, Abschnitt 9.3: 18 K
- Temperaturanstieg des Betons durch Hydrationswärme gemäß ÖNORM B 3303, Abschnitt 7.17.1 (dünne Bauteile, 3 cm Isolierung): 9 K
- Temperaturanstieg des Betons durch Hydrationswärme gemäß ÖNORM B 3303, Abschnitt 7.17.2 (dicke Bauteile, 10 cm Isolierung): 14 K

Die in 10 cm Abstand von der seitlichen Schalung gegenüber der errechneten Temperatur gemessene höhere Temperatur ist auf eine zusätzliche Erwärmung von außen zurückzuführen. Dieser Einfluss einer zusätzlichen Kühlung oder Heizung ist bereits in 40 cm Abstand von der seitlichen Schalung kaum mehr feststellbar.

2.3 Rechnerische Abschätzung der zu erwartenden Höchsttemperaturen

Wenn nicht anders angegeben, erfolgten die nachstehenden Berechnungen mit dem Beton BS1A und dem Bindemittel gemäß Abschnitt 2.2

(1) Einfluss der Wandstärke auf die Höchsttemperatur bei der Erhärtung und deren Zeitpunkt

Die Berechnungen, deren Ergebnisse in Bild 4 zusammengestellt sind, wurden mit einer Windgeschwindigkeit von 0 m/s für nachstehende Parameter durchgeführt:

Bild 3: Gemessener und errechneter Temperaturverlauf im Bauteil gemäß Bild 2 (gerechnet mit der bei der Betonierung im Jänner gemessenen durchschnittlichen Umgebungstemperatur von 4°C).

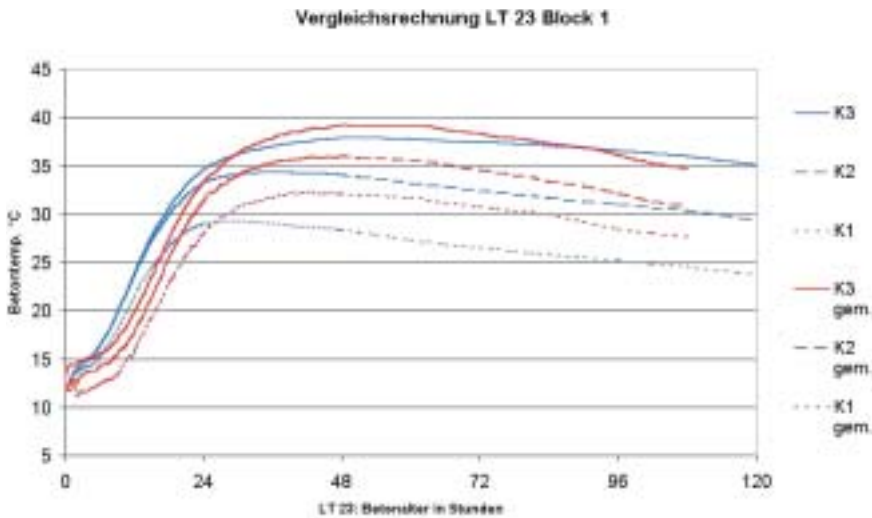


Bild 4: Einfluss der Wanddicke auf die bei der Erhärtung zu erwartende Höchsttemperatur (und deren Zeitpunkt) von Beton BS1A in Abhängigkeit von der Frischbeton- und Lagerungstemperatur.

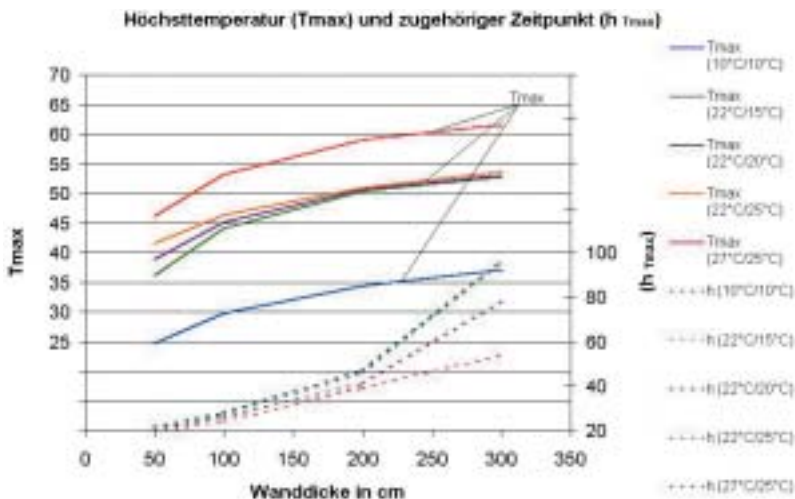
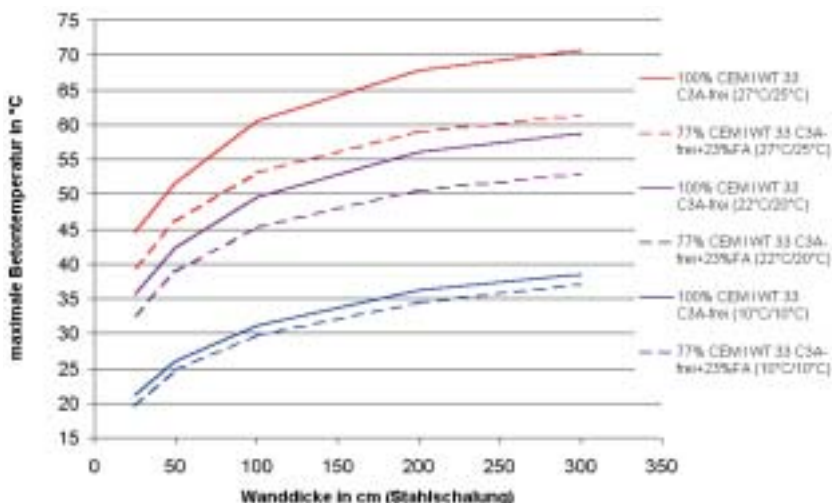


Bild 5: Maximale Betontemperatur bei der Erhärtung in Abhängigkeit von der Wanddicke. Beton mit einem anrechenbaren Bindemittelgehalt von 296 kg/m³ mit und ohne Flugasche



- 1) Frischbeton 10° C, Lufttemperatur 10° C
- 2) Frischbeton 22° C, Lufttemperatur 15° C
- 3) Frischbeton 22° C, Lufttemperatur 20° C
- 4) Frischbeton 22° C, Lufttemperatur 25° C
- 5) Frischbeton 27° C, Lufttemperatur 25° C

Bild 4 zeigt, dass selbst bei Einhaltung aller Anforderungen an die Betonzusammensetzung und an die maximal zulässige Frischbetontemperatur ab 1 m Wanddicke bei der Erhärtung mit Betontemperaturen von über 45° C zu rechnen ist. Für die Berechnung wurde ein Bindemittel verwendet, dessen Temperaturanstieg um fast 50 % kleiner als nach [2] zulässig ist.

Werden statt der bei der Berechnung angenommenen Stahlschalung Holzschalungen verwendet, ist insbesondere bei dünnen Bauteilen mit etwas höheren Temperaturen zu rechnen, bei Bodenplatten auf nicht stark erwärmtem Untergrund mit etwas geringeren.

(2) Einfluss bei Ersatz eines Teiles des Zementes durch Flugasche auf die Höchsttemperatur bei zwei verschiedenen C₃A-freien Zementen

Berechnet wurden beide Betone mit dem gleichen anrechenbaren Bindemittelgehalt von 296 kg/m³ (k-Wert der Flugasche gemäß ÖNORM B 3309 = 0,8, vgl. ÖNORM B 4710-1). Der Beton aus 100 % CEM I WT 33 C₃A-frei (296 kg/m³) hat nachstehende Kennwerte:

- Wärmeentwicklung des Zementes gemäß ÖNORM B 3303, Abschnitt 9.3: 24 K
- Temperaturanstieg des Betons durch Hydrationswärme gemäß ÖNORM B 3303, Abschnitt 7.17.1 (dünne Bauteile, 3 cm Isolierung): 12 K
- Temperaturanstieg des Betons durch Hydrationswärme gemäß ÖNORM B 3303, Abschnitt 7.17.2 (dicke Bauteile, 10 cm Isolierung): 19 K

Bild 5 zeigt, dass sich erwartungsgemäß eine Verringerung der freigesetzten Wärme (Ersatz von Zement durch Flugasche) bei niederen Temperaturen (10° C), unabhängig von der Wandstärke nur relativ wenig auf die Höchsttemperatur bei der Erhärtung auswirkt. Bei mittleren Temperaturen (20° C) entspricht der Einfluss bis etwa 0,7 m

Wandstärke dem bei der Prüfung nach ÖNORM B 3303, Abschnitt 7.17.2 gemessenen Temperaturunterschied und nimmt bis 2 m Wandstärke auf etwa das 1,5fache zu. Bei hohen Temperaturen (25° C) ist der Einfluss schon bei 0,7 m Wandstärke größer als bei der Normprüfung und nimmt bis 2 m Wandstärke auf das fast 3fache zu.

(3) Einfluss einer Sandwichbauweise bei sehr dicken Platten

Der für nachfolgende Berechnungen verwendete BS1A Beton besteht aus 220 kg/m³ CEM I WT 33 C₃A-frei und 80 kg/m³ Flugasche gemäß ÖNORM B 3309. Die Platte BS1A besteht über die ganze Dicke aus Beton BS1A, die Sandwichplatte (gemäß Bild 6) aus einer beidseitigen 0,5 m dicken Schicht aus Beton BS1A und einer 1,8 m dicken Massenschicht, im Kern aus 145 kg/m³ CEM I WT 33 C₃A-frei und 145 kg/m³ Flugasche gemäß ÖNORM B 3309. Zement und Flugasche sind ident mit den vorhergehenden Berechnungen. Die Berechnungen wurden für eine Frischbetontemperatur von 22° C, eine Lagerungstemperatur von 16° C, ohne Sonneneinstrahlung und 0 m/s Windgeschwindigkeit durchgeführt.

Bild 6 zeigt, dass durch die Herstellung als Sandwichplatte bei sehr dicken Platten die Höchsttemperatur im Kern um etwa 5° abgesenkt wird, im Bereich der Auflagerung auf dem Boden und in oberflächennahen Schichten dagegen nur um 2–3° C. (Würde man die gesamte, sehr dicke Platte aus Massenschicht ausführen, wäre dadurch eine weitere Absenkung der Höchsttemperatur um etwa 1K möglich. Der W/B-Wert wäre jedoch so hoch, dass der Korrosionsschutz der Stahleinlagen gemäß ÖNORM B 4710-1 nicht mehr sichergestellt und daher eine Ausführung in Stahlbeton nicht zulässig wäre.)

(4) Einfluss von Wind auf die Höchsttemperatur von Beton in geschalteten Wänden

Bild 7 lässt erkennen, dass sich – insbesondere bei dünneren Bauteilen – die Höchsttemperatur bei der Erhärtung des Betons durch bewegte Luft (im Vergleich zu stehender Luft) verringert, dass jedoch der Einfluss einer höheren Windgeschwindigkeit (mehr als ca. 2m/s) nahezu bedeutungslos ist.

Bild 6: Temperaturverlauf bei der Erhärtung einer 2,8 m dicken Platte. Frischbetontemperatur 22° C, Lagerungstemperatur 16° C.

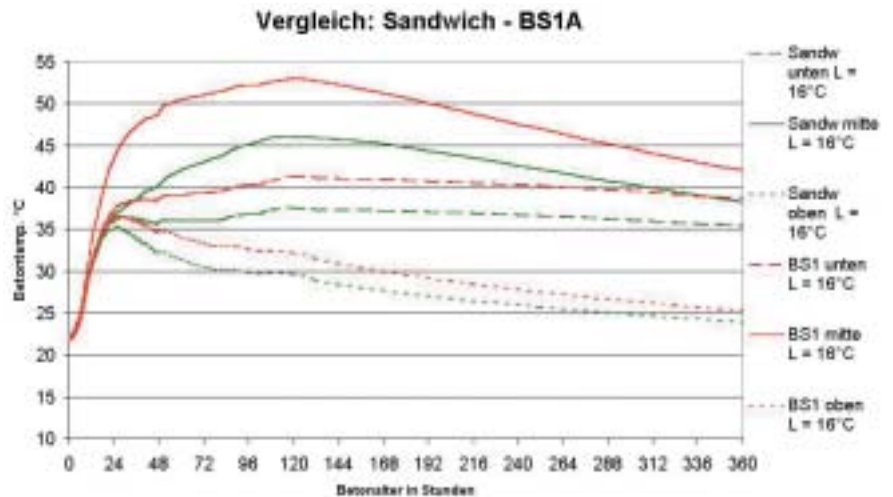


Bild 7: Einfluss von Wind auf die bei der Erhärtung zu erwartende Höchsttemperatur von Beton BS 1A. Frischbetontemperatur 22° C, Lagerungstemperatur 20° C

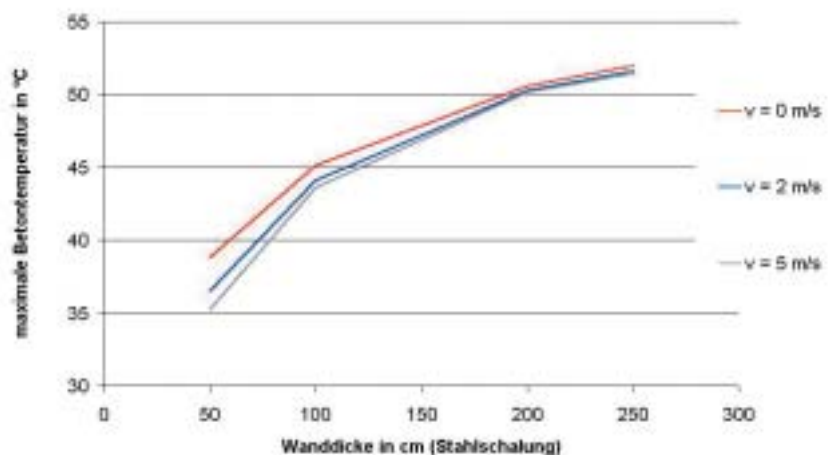


Bild 8: Einfluss einer Wasserverdunstung von der Beton- bzw. Schalungsoberfläche auf die bei der Erhärtung von Beton BS 1A zu erwartende Höchsttemperatur und die Temperatur in etwa 20 cm Tiefe. Frischbetontemperatur 22° C, Lagerungstemperatur 25° C.

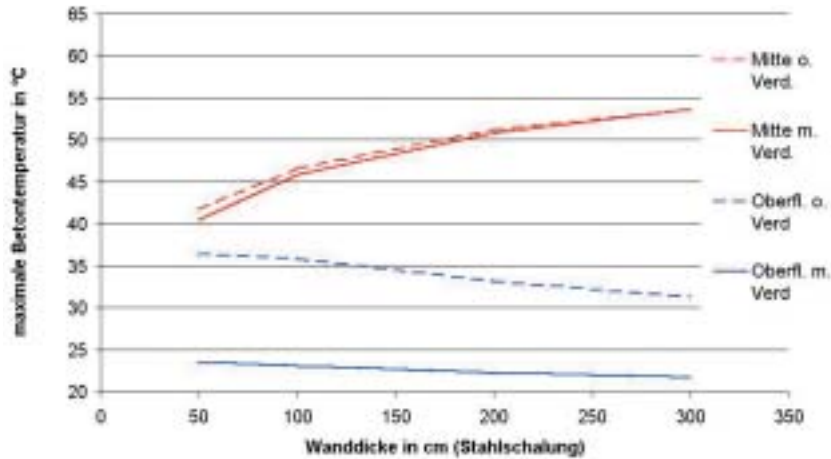


Bild 9: Einfluss einer Sonneneinstrahlung ab Betonherstellung bei weißen und schwarzen Oberflächen auf die bei der Erhärtung zu erwartende Höchsttemperatur von Beton BS 1A. Frischbetontemperatur 22° C, Lagerungstemperatur 25° C.

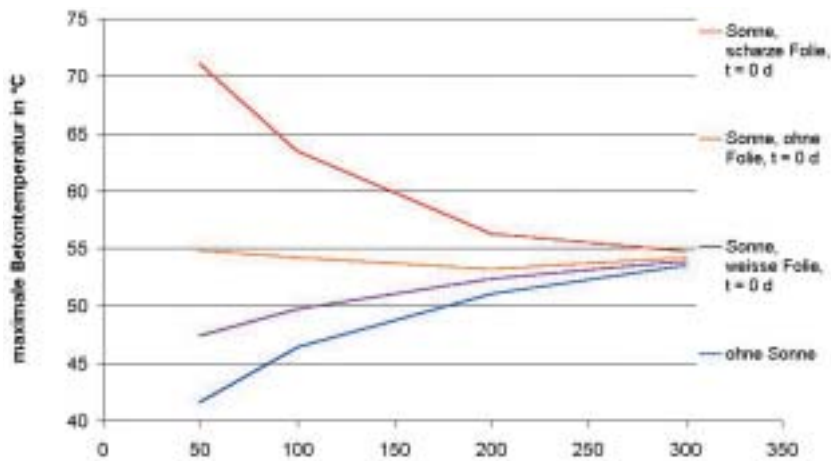
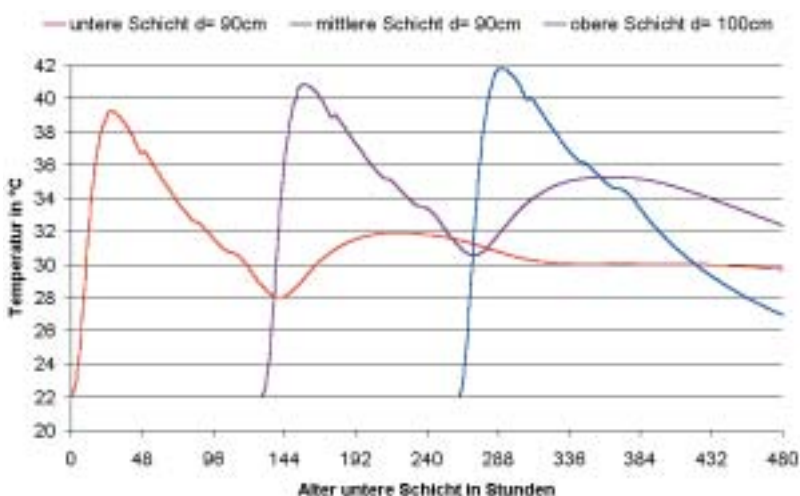


Bild 10: Temperaturverlauf beim Erhärten einer 2,8 m dicken Platte, hergestellt aus Beton BS 1A, betoniert in 3 Schichten im Abstand von 5,5 Tagen. Frischbetontemperatur 22° C, Lagerungstemperatur 16° C.



(5) Einfluss einer Wasserverdunstung an der Beton- oder Schalungsoberfläche auf die Höchsttemperatur von Beton

Gerechnet wurde mit 70 % relativer Luftfeuchtigkeit, was dem Durchschnitt im Freien entspricht, und 0 m/s Windgeschwindigkeit.

Bild 8 zeigt, dass erwartungsgemäß der Einfluss einer Wasserverdunstung von der Oberfläche auf die Höchsttemperatur bei der Erhärtung von 50 cm Wandstärke feststellbar ist (etwa 2 K), ab etwa 1,5 m Wandstärke aber nicht mehr. Unabhängig von der Wandstärke ist die Oberflächentemperatur bei Wasserkühlung um etwa 10 K niedriger als ohne Kühlung.

(6) Einfluss der Sonneneinstrahlung bei weißen und schwarzen Oberflächen

Gerechnet wurde mit 0 m/s Windgeschwindigkeit. Die Sonneneinstrahlung entspricht jener auf eine Südwand Anfang Juli in Wien (Sinusverlauf, $Q_{max} = 550 \text{ W}$, $Q_{min} = 0 \text{ W}$, Periodendauer 24 Std.). Die Adsorptionsverhältnisse wurden gemäß Literatur für die weiße Folie mit $A = 30 \%$, die schwarze Folie mit $A = 95 \%$ und eine glatte, graue Betonoberfläche mit $A = 55 \%$ angenommen.

Auf Bild 9 sieht man, dass der Einfluss der Abdeckung (hell, dunkel, weiß = reflektierend) bei Sonneneinstrahlung bedeutend größer ist als der Einfluss der im Allgemeinen möglichen betonotechnologischen Maßnahmen. Bei durchschnittlichen Wandstärken kann bei Nichtbeachtung die Höchsttemperatur um 20 K größer sein als bei Abdeckung (Schalung) mit hellem Material.

(7) Zeitlich versetzter Einbau in mehreren Schichten bei der Betonierung sehr dicker Platten

Die Frischbeton- und Lagerungstemperatur sowie die Plattenstärke sind ident (3). Angenommen wurde, dass die 2,8 m dicke Platte in 3 Schichten betoniert wird: Zuerst eine 90 cm dicke Schicht, nach 5,5 Tagen wieder eine 90 cm dicke Schicht und nach weiteren 5,5 Tagen noch eine 1 m dicke Schicht. Der dabei in der Mitte der einzelnen Schichten entstehende Temperaturverlauf ist in Bild 10 dargestellt.

Ein Vergleich der Bilder 6 und 10 zeigt, dass durch das schichtenweise, zeitlich versetzte Betonieren von sehr dicken Platten die Höchsttemperatur bei der Erhärtung um etwa 10 K abgesenkt wird. Die Absenkung ist fast doppelt so groß wie bei einer Herstellung als Sandwichplatte gemäß Bild 6 (bei der ein 1,8 m dickes Mittelteil aus einem Beton geringerer Güte hergestellt wird).

(8) Geänderter Bindemittel- und Wassergehalt des Betons

Gemäß Bild 11 führt eine Änderung des Bindemittelgehaltes um etwa 10 % (30 kg/m^3) zu einer Änderung der Höchsttemperatur bei der Erhärtung um etwa 6 %.

Eine Änderung des Wassergehaltes des Frischbetons um 40 l/m^3 ändert die spezifische Wärme des Betons um 1,5 %. Änderungen des Wassergehaltes haben somit praktisch keinen Einfluss auf die Höchsttemperatur bei der Erhärtung.

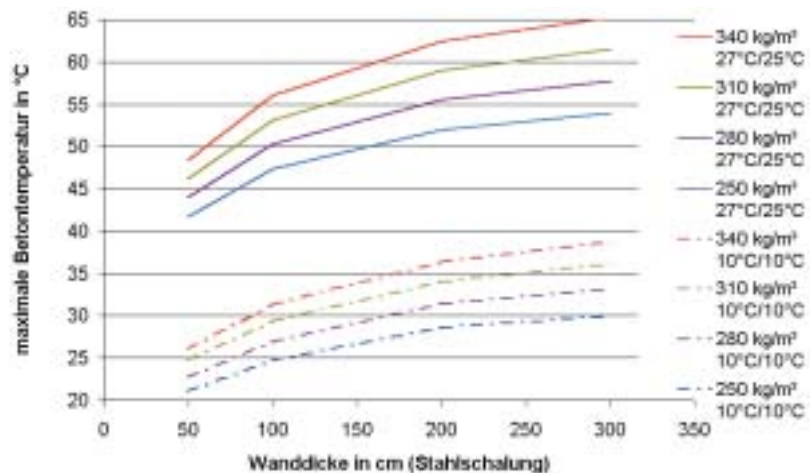
3. Zusammenfassung und Ausblick

Die neue Fassung aus dem Jahre 2002 der Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – weiße Wannen“ der Österreichischen Vereinigung für Beton und Bautechnik (ÖVBB) fordert für Plattendicken über 1,0 m, dass bereits bei der Planung die zu erwartenden Erhärtungstemperaturen zu berechnen sind, damit die notwendigen konstruktiven und betontechnischen Maßnahmen zeitgerecht eingeplant werden können. Bei bekannten Randbedingungen ist mit dem beschriebenen Rechenprogramm diese Berechnung der Erhärtungstemperatur ganz einfach möglich.

Die durchgeführten Berechnungen bestätigten die bekannten Einflussfaktoren:

- Bindemittelart und -menge sind von entscheidendem Einfluss auf die Erhärtungstemperatur
- Bei dicken Bauteilen (2 m) ist die Erhärtungstemperatur um mindestens 15 K höher als bei dünnen (50 cm)

Bild 11: Höchsttemperatur bei der Erhärtung in Abhängigkeit von der Wanddicke bei unterschiedlichen Bindemittelgehalten und Temperaturen.



- Am einfachsten kann bei gegebener Betonzusammensetzung die Erhärtungstemperatur durch eine Absenkung der Frischbetontemperatur gesenkt werden.
- Dunkles Schalungsmaterial ist bei Sonneneinstrahlung unbedingt zu vermeiden. Es kann bis zu 20 K höheren Erhärtungstemperaturen führen.

4. Literatur

- [1] Springenschmid R., Nischer P.: Untersuchungen über die Ursache von Querrissen im jungen Beton. Beton- und Stahlbetonbau Heft 9/1973
- [2] Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – weiße Wannen“: ÖVBB, 2002
- [3] ÖNORM B 4710-1
- [4] ÖNORM EN 196-9: Prüfverfahren für Zement – Teil 9: Hydratationswärme – Teiladiabatisches Verfahren
- [5] Zückert, U.: Hydratationswärme im Beton – Einflüsse und Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung, Dissertation 2002 TU Graz
- [6] Forschungsvorhaben „Temperaturanstieg bei der Erhärtung – Wasserundurchlässige Betonbauwerke“ Forschungsförderungsfond der gewerblichen Wirtschaft (FFF) Zl. 804203, 2002
- [7] Blomberg, T.: Heat2 A PC-program for heat transfer in two dimensions. Manual with brief theory and examples. Version 5.0. Department of Building Physics, Lund University, Lund 2000