

Der Blick in die Tiefe – ein Rechenmodell zur Temperaturentwicklung im jungen Beton

DI Dr. Jürgen Macht

Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Wien

Einleitung

Zwangsbeanspruchungen und Eigenspannungen infolge Temperaturbeanspruchung können in vielen Betonbauwerken nicht vermieden werden und führen zu Rissen in den Bauwerken [1]. Durch ausführungstechnische und beton-technologische Maßnahmen kann allerdings die Höhe dieser Zwangsbeanspruchung und somit die Rissebildung begrenzt werden, sodass es zu keinen Einschränkungen in der Gebrauchstauglichkeit kommt. Besonders bei wasserundurchlässigen Bauwerken hat dies eine sehr große Bedeutung. Daher wurde von der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) im Jahre 2002 die Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ [2] herausgegeben. Die Richtlinie schreibt eine maximal zulässige Bauteilerwärmung sowie höchstzulässige Bauteiltemperatur vor, da die Risswahrscheinlichkeit direkt von der Höhe der erreichten Höchsttemperatur abhängt [1]. Somit soll sichergestellt werden, dass die durch Erwärmung und Abkühlung resultierenden Zugbeanspruchungen die Zugdehnfähigkeit des Betons nicht oder nur selten überschreiten. Für Bauteile üblicher Dicken (bis maximal 1,0 m) wird davon ausgegangen, dass durch Vorgabe einer Betonzusammensetzung diese maximale Temperatur bzw. der maximale Temperaturanstieg eingehalten werden kann. Für Bauteile mit größeren Dicken ist dies nicht sichergestellt. Daher heißt es in der Richtlinie [2] im Abschnitt 4.5.2 (Zusätzliche Hinweise für dicke Bodenplatten): „Bei Plattendicken über 1,0 m (ohne Berücksichtigung örtlicher Verdickungen) ist unter Berücksichtigung der tatsächlichen zeitlichen Entwicklung der Wärmeabgabe des Bindemittels (geprüft nach ÖNORM EN 196-9), der möglichen Frischbetontemperatur und den zu erwartenden Umgebungsbedingungen für die vorgesehene Betonzusammensetzung die Höchsttemperatur bei der Erhärtung rechnerisch zu ermitteln

(siehe Anhang 1)“ (siehe auch [3]). In Anhang 1 (Vorausberechnung der Temperaturentwicklung in Bauteilen) ist ein Verfahren zur Prognose der Höchsttemperatur beschrieben. Dieses Verfahren wurde bereits in [4; 5; 6] ausführlich vorgestellt. Im Folgenden wird es nochmals kurz zusammengefasst und es werden weitere Ergebnisse präsentiert.

Allgemeines

Für die rechnerische Ermittlung der Temperaturentwicklung sowie –verteilung in Bauteilen kommen numerische Verfahren zum Einsatz. Hier stehen die Finite Elemente Methode (FEM), die Finite Differenzen Methode (FDM) sowie die Randelementenmethode (REM) zur Auswahl. Dabei reicht die Leistungsfähigkeit dieser Verfahren weit über die alleinige Berechnung der Temperatur in Bauteilen hinaus. So lässt sich z. B. der Auslastungsgrad von Spritzbetontunnelschalen während des Tunnelvortriebs berechnen [7]. Voraussetzung hierfür sind allerdings ein entsprechendes Materialmodell für den Beton [8] sowie die Bestimmung aller relevanten Materialparameter. Neben der Wärmeabgabe des Bindemittels während der Hydratation werden für derartige Berechnungen alle maßgebenden mechanischen Parameter wie Festigkeiten, Elastizitätsmodul, Schwinden, Kriechen usw. benötigt. Für die Berechnung der Bauteilerwärmung gemäß der Richtlinie „Weiße Wannen“ [2], die die Einhaltung einer höchstzulässigen Bauteilerwärmung sowie eine höchstzulässige Bauteiltemperatur vorschreibt, ist die numerische Ermittlung der Temperaturentwicklung im Bauteil während der Hydratation ausreichend. Ein am Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZFI) im Zuge eines Forschungsvorhabens [6] entwickeltes Verfahren erlaubt eine sehr rasche Bestimmung eben dieser Bauteiltemperaturen und eignet sich daher sehr gut für

praxisrelevante Fragestellungen bezüglich der Einhaltung der Vorschriften der Richtlinie „Weiße Wannen“ [2].

Für diese Verfahren wird folgende Soft- und Hardware benötigt:

- ein Programm zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung - hierfür wird vom VÖZFI das FDM-Programm HEAT [9] verwendet
- ein Tabellenkalkulationsprogramm
- Dewar-Gefäße (siehe Abbildung 1) zur Bestimmung der Hydratationswärme des Bindemittels gemäß ÖNORM EN 196-9 [3], dem so genannten Langavant-Verfahren



Abbildung 1: Dewar-Gefäße zur Ermittlung der Hydratationswärme gemäß ÖNORM EN 196-9 [3]

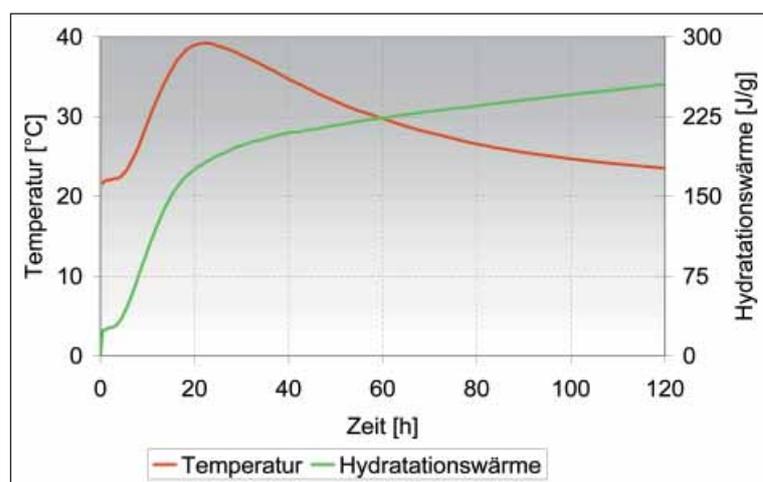
Vorgehensweise und Berechnungsablauf

Bevor mit der numerischen Ermittlung der Bauteiltemperatur begonnen werden kann, wird mit dem Langavant-Versuch gemäß ÖNORM EN 196-9 [3] die Temperaturentwicklung $T(t)$ des verwendeten Bindemittels unter bekannten Randbedingungen ermittelt (siehe Abbildung 2, rote Kurve). Aufgrund der bekannten Wärmeverluste der Dewar-Gefäße kann daraus die zeitliche Entwicklung der Hydratationswärme $Q(t)$ (Abbildung 2, grüne Kurve) berechnet werden. Für die Berechnung mit dem Programm HEAT [9] wird die zeitliche Entwicklung der Leistungsabgabe benötigt, d. h. es wird die Hydratationswärme nach der Zeit abgeleitet (dQ/dt). Mit dem bekannten Bindemittelgehalt je m^3 Beton und den bekannten Bauteilabmessungen wird die Leistungsabgabe des Bauteils bestimmt.

Im Programm HEAT [9] wird der Bauteil modelliert. In der Richtlinie „Weiße Wannen“ [2] sind die Materialparameter für Beton, Boden und Schalung angegeben. Um das Modell möglichst einfach zu halten, sollten Symmetrien ausgenutzt werden. Dies geschieht mit entsprechenden Symmetriebedingungen. Des Weiteren müssen die vorherrschenden Umgebungsbedingungen angegeben werden. Dies geschieht durch Eingabe der Umgebungstemperatur. Wind kann mithilfe des Wärmeübergangs Bauteil zur Luft berücksichtigt werden, Sonnenbestrahlung durch Angabe eines Wärmeflusses an der Oberfläche, siehe [2].

Nun wird das in Abbildung 3 abgebildete Iterationsschema durchlaufen. Im nullten Iterationsschritt ($n = 0$) wird die im Langavant-Versuch ermittelte Leistungsabgabe dem Bauteil im Rechenprogramm HEAT [9] zugeordnet. Das Rechenprogramm liefert die Bauteiltemperatur (T_{n+1}). Diese wird im Tabellenkalkulationsprogramm mit der Temperaturentwicklung des Langavant-Versuches (T_n) verglichen. Ist das Abbruchkriterium erfüllt, ausgedrückt durch $T_{n+1} - T_n < \epsilon$ (z. B.: $\epsilon=0,1$ K), entspricht die Wärmeentwicklung des Bauteils der Wärmeentwicklung des Langavant-Versuches und die Berechnung ist beendet. Andernfalls wird ein Temperaturfaktor k_T [10], der auf dem Arrhenius-Ansatz [11] basiert, errechnet. Dieser dient zur Ermittlung einer neuen Leistungsabgabe des Bauteils $dQ/dt|_{n+1}$. Mit diesen nun rechnerisch ermittelten Werten für die Temperaturentwicklung (zur Überprüfung des Abbruchkrite-

Abbildung 2: Temperatur- und Hydratationswärmeentwicklung eines Bindemittels beim Langavant-Versuch [3]



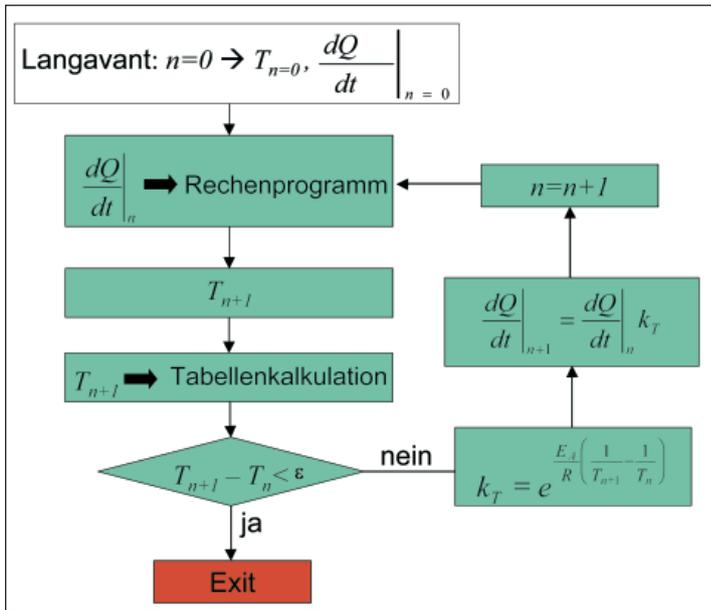


Abbildung 3: Berechnungsschema

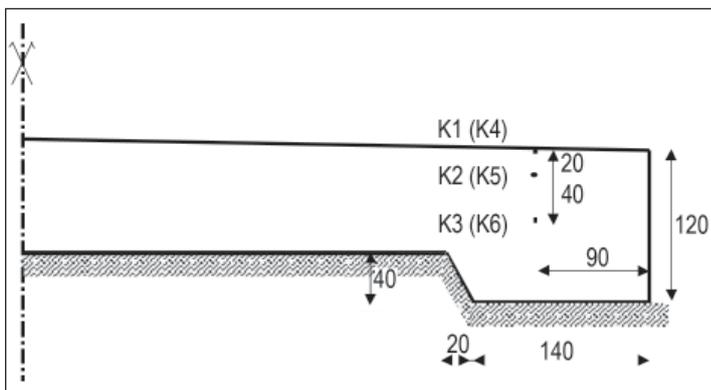


Abbildung 4: Nachrechnung einer Bodenplatte - Abmessungen der Bodenplatte sowie Positionen der Temperaturmessfühler

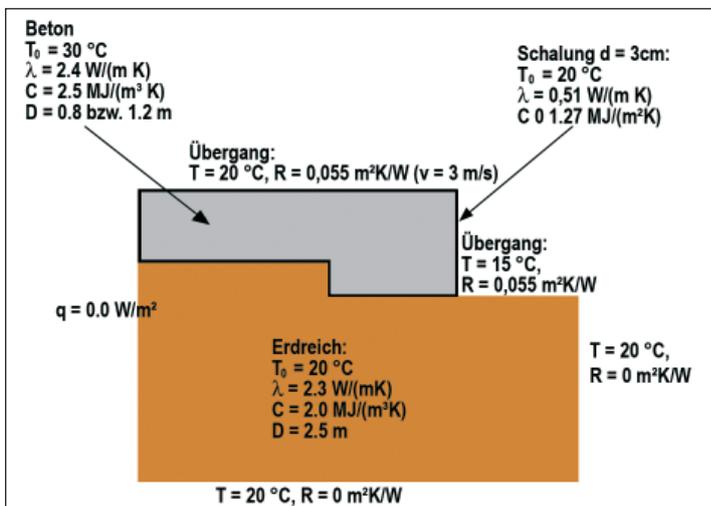


Abbildung 5: Nachrechnung einer Bodenplatte - Modell der Bodenplatte mit Angabe aller Randbedingungen und Materialparameter

riums) und die Leistungsabgabe wird eine neue Iteration gestartet. Dieses Schema wird so lange durchlaufen, bis das Abbruchkriterium erfüllt wird.

Beispiele

Beispiel 1 – Nachrechnung einer Bodenplatte

Dieses Beispiel ist ausführlich in [5;6] dokumentiert. Hier wird es nur kurz präsentiert, um die Leistungsfähigkeit des Berechnungsverfahrens aufzuzeigen. Die Geometrie der Bodenplatte ist in Abbildung 4 ersichtlich. Es wurden Messfühler vor der Betonierung in unterschiedlichen Tiefen installiert, um die tatsächliche Temperaturentwicklung mit den errechneten Temperaturentwicklungen vergleichen zu können. Die Positionen der Messfühler sind ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt.

Angaben über Betonzusammensetzung sowie die Temperatur- und Hydratationswärmeentwicklung des Bindemittels können [5;6] entnommen werden. Abbildung 5 zeigt das Modell der Bodenplatte sowie alle Randbedingungen und Materialparameter.

Der Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Temperatur, erhalten aus Messung und Rechnung, ist in Abbildung 6 wiedergegeben. In Bauteilmitte ($t = 60 \text{ cm}$, rote Kurven) stimmen Messung (dünne Kurve) und Rechnung (dicke Kurve) nahezu exakt überein. In der geringeren Bauteiltiefe ($t = 20 \text{ cm}$, blaue Kurven) ist ein minimaler Unterschied zwischen Messung (dünne Kurve) und Rechnung (dicke Kurve) in der Höchsttemperatur feststellbar. Bei den Messungen in dieser Tiefe können leichte Schwankungen im Verlauf festgestellt werden. Dies könnte von Schwankungen in den Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur) her stammen, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurden. Diese Schwankungen wirken sich offensichtlich nicht bis in Bauteilmitte aus (siehe rote, dünne Kurve).

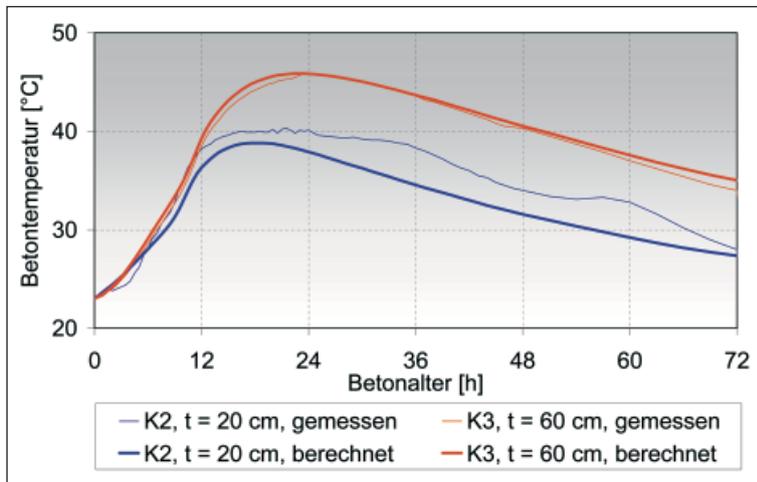


Abbildung 6: Nachrechnung einer Bodenplatte - Vergleich der Messungen mit den Berechnungsergebnissen in 20 cm und 60 cm Tiefe

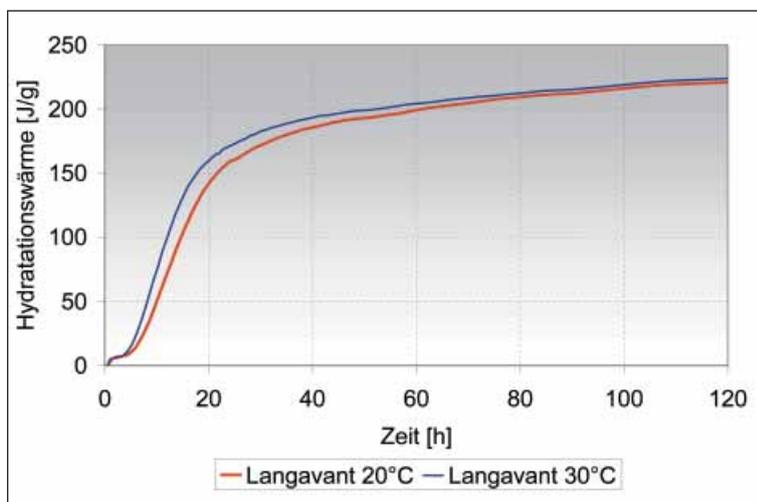


Abbildung 7: Verlauf der Hydrationswärme des Bindemittels bei zwei unterschiedlichen „Frischbetontemperaturen“ ermittelt mit dem Langavant-Verfahren

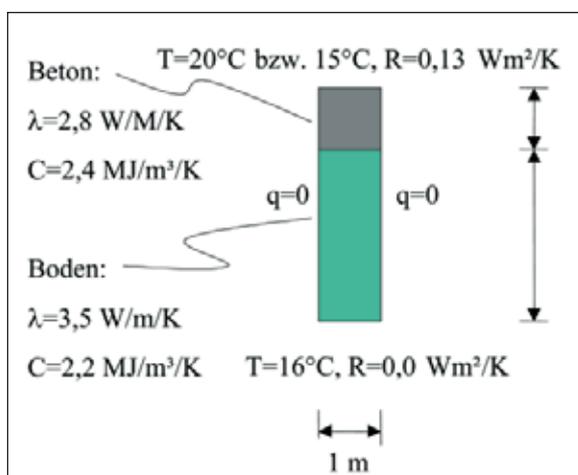


Abbildung 8: Modell für die Bestimmung des Einflusses der Frischbetontemperatur auf die maximale Bauteiltemperatur

Beispiel 2 – Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Wärmeentwicklung in einer Bodenplatte

In diesem Beispiel wird der Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Temperaturentwicklung in Bodenplatten untersucht. Gemäß der Richtlinie „Weiße Wannen“ [3] ist für dicke Platten eine Frischbetontemperatur bis 27°C zulässig, wenn mit dieser vor Bauausführung die Einhaltung der für die konstruktiven Maßnahmen maximal zulässigen Bauteiltemperatur rechnerisch nachgewiesen wird. Bei dünnen Platten ist eine maximale Frischbetontemperatur von 27°C unter gewissen Voraussetzungen zulässig [3]. Daher werden die beiden Grenzfälle 22°C Frischbetontemperatur (allgemein höchstzulässige Frischbetontemperatur für Betonstandard BS1 – siehe [3]) sowie 27°C Frischbetontemperatur bei unterschiedlichen Plattendicken (60 cm, 130 cm und 180 cm) untersucht. Des Weiteren wird der Einfluss der Umgebungstemperatur (15°C und 20°C) auf die maximale Bauteiltemperatur simuliert.

Da der Hydrationsprozess temperaturabhängig ist [11], wurde der Langavant-Versuch bei zwei unterschiedlichen „Frischbetontemperaturen“ durchgeführt. Die ermittelte Hydrationswärme ist für beide Versuche in Abbildung 7 dargestellt. Es ist deutlich die schnellere Freisetzung der Hydrationswärme im frühen Alter bei der höheren „Frischbetontemperatur“ (blaue Kurve) feststellbar. Der Endwert ist wie nicht anders zu erwarten für beide Temperaturen gleich, da die gesamte freigesetzte Wärme nicht von der Anfangstemperatur, sondern nur vom verwendeten Bindemittel selbst abhängt.

Das Modell für die numerische Berechnung ist in Abbildung 8 dargestellt. Der Bindemittelgehalt im Beton wurde mit 340 kg/m^3 festgesetzt.

In Abbildung 9 sind die maximalen Bauteiltemperaturen über der Plattendicke aufgetragen, wobei die tatsächlich berechneten Werte durch Punkte gekennzeichnet sind. Die stetigen

Kurven wurden durch quadratische Interpolation erhalten.

Der Einfluss der Frischbetontemperatur auf die maximale Bauteiltemperatur steigt mit zunehmender Plattendicke. Bei der dünnsten berechneten Platte (60 cm) liegt der Einfluss der Frischbetontemperatur auf die maximale Bauteiltemperatur in der Größenordnung des Frischbetontemperaturunterschiedes. So ist bei dieser Plattendicke bei 20 °C Lufttemperatur der Unterschied in der maximalen Bauteiltemperatur 5,5 °C (Frischbetontemperaturunterschied 5,0 °C). Bei den dicken Platten (180 cm) wächst der Unterschied in der maximalen Bauteiltemperatur auf 164 % des Frischbetontemperaturunterschiedes an -8,2 °C gegenüber 5,0 °C bei 20 °C Lufttemperatur.

Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die maximale Bauteiltemperatur nimmt mit zunehmender Plattendicke ab. Der Unterschied in der maximalen Bauteiltemperatur beträgt bei einer Frischbetontemperatur von 22 °C bei 60 cm Plattendicke 1,1 °C, bei 180 cm nur noch 0,3 °C.

Bei einer Frischbetontemperatur von 22 °C wird die für Betonstandard BS1 (siehe [3]) maximal zulässige Bauteiltemperatur von 45 °C bis zu einer Plattendicke von rd. 120 cm eingehalten. Diese 120 cm definieren in der Richtlinie „Weiße Wannen“ [3] den Grenzwert zwischen dünnen bzw. allgemeinen Platten und dicken Platten. Bei dicken Platten sind unter Einhaltung entsprechender konstruktiver Maßnahmen auch maximale Bauteiltemperaturen von 50 °C (Bodenplatte auf Gleitschicht) bzw. 55 °C (vorgespannte Bodenplatte) zulässig [3]. Für das untersuchte Bindemittel müssen dicke Platten bei 22 °C Frischbetontemperatur daher mit einer Gleitschicht hergestellt werden.

Bei einer Frischbetontemperatur von 27 °C können mit diesem Bindemittel dicke Platten bis maximal 150 cm und nur vorgespannt hergestellt werden. Als Maßnahme zur Temperaturreduzierung kann z.B. der zeitlich versetzte Einbau in mehreren Schichten angewandt werden [5]. Aber auch bei dünnen Platten kann mit diesem Bindemittel bei einer Frischbetontemperatur von 27 °C die maximal zulässige Bauteil-

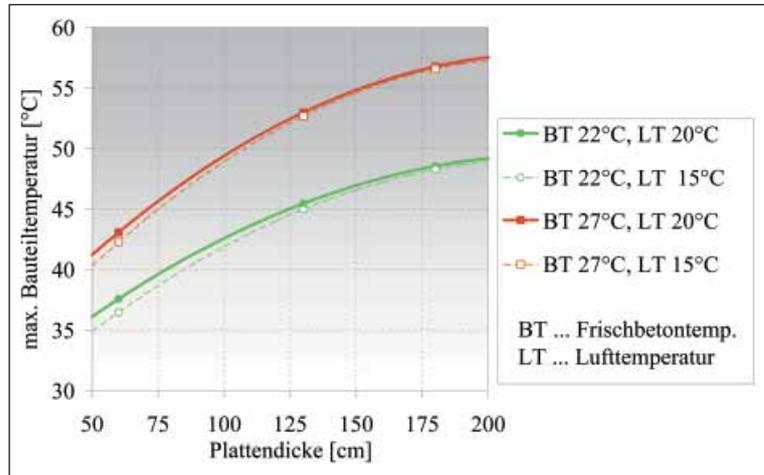


Abbildung 9: Korrelation zwischen Plattendicke und maximaler Bauteiltemperatur (die Punkte sind die berechneten Werte, die Kurvenverläufe wurden durch quadratische Interpolation erhalten)

temperatur von 45 °C ab Plattenstärken von ca. 70 cm nicht mehr eingehalten werden.

Zusammenfassung

Die Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ [3] fordert für Bauteildicken ab 1,0 m bereits bei der Planung den rechnerischen Nachweis der Einhaltung der maximal zulässigen Bauteiltemperaturen. Das im Anhang 1 der Richtlinie beschriebene, am Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie entwickelte Berechnungsverfahren [4; 5; 6] ist ein geeignetes Instrument hierfür. Der Vergleich von Rechnungen mit durchgeführten Temperaturmessungen an realen Bauwerken zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Somit lassen sich mithilfe der Hydratationswärme des Bindemittels, die normgemäß [3] bestimmt werden kann, die Einhaltung dieser maximal zulässigen Bauteiltemperaturen nachweisen sowie notwendige konstruktive Maßnahmen festlegen.

Literatur

- [1] Hintzen W., Thielen G.: Betontechnische Einflüsse auf die Rissbildung infolge Hydratationswärme (Teil 1). Beton 10/1999
- [2] Richtlinie Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen. Ausgabe Dezember 2002, Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik, Wien

- [3] ÖNORM EN 196-9: Prüfverfahren für Zement – Teil 9: Hydratationswärme Teiladiabatisches Verfahren
- [4] Nischer P., Zückert U.: Temperaturanstieg bei der Erhärtung von Beton. Zement und Beton, Sonderheft 2002
- [5] Zückert U.: Hydratationswärme im Beton – Einflüsse und Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung, Dissertation, TU Graz, 2002
- [6] Forschungsvorhaben „Temperaturanstieg bei der Erhärtung – Wasserundurchlässige Betonbauwerke“. Forschungsförderungsfond der gewerblichen Wirtschaft (FFF) ZI 804203, 2002
- [7] Macht J., Lackner R., Hellmich Ch., Mang H.A.: Quantification of stress states in shotcrete shells. Numerical Simulation in Tunneling, Beer G. (Hrsg.), Springer, Berlin, 2003
- [8] Hellmich Ch., Lackner R., Mang H.A. : Thermochemomechanical material model for shotcrete. Numerical Simulation in Tunneling, Beer G. (Hrsg.), Springer, Berlin, 2003
- [9] 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
- [10] Hintzen W.: Zum Verhalten des jungen Betons unter zentrischem Zwang beim Abfließen der Hydratationswärme. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 59. Düsseldorf, 1998
- [11] Arrhenius S.: Quantitative Laws in Biological Chemistry, G.Bell & Sons, London, 1915