

Über den Einfluß erhöhter Zement- und Betontemperaturen

Von Justus Bonzel, Düsseldorf

1. Einleitung

In Konjunkturzeiten der Bauindustrie, die trotz der starken Förderung des Winterbaues auch heute noch mit den wärmeren Jahreszeiten zusammenfallen, hat sich der Betonbauer häufig mit dem Einfluß zu befassen, den erhöhte Temperaturen auf die Betoneigenschaften ausüben. Während die Betontemperatur in den kälteren Monaten normalerweise eine untere Grenze von + 5 °C nicht unterschreiten soll, wird hier die Frage nach der oberen Temperaturgrenze, ab welcher die Eigenschaften des frischen und erhärteten Betons geschädigt werden können, und nach der Art der möglichen Schäden aufgeworfen. In diesem Zusammenhang ist es von Interesse, welche Temperaturen frischer und erhärtender Beton bei vorgegebener Zusammensetzung erreichen kann und welche Bedeutung „heißem Zement“ beim Entstehen der Betontemperaturen zukommt.*)

2. Vorausbestimmung der Betontemperaturen

2.1 Temperatur des Frischbetons

Die Temperatur des Frischbetons ist vorwiegend von der Temperatur der Ausgangsstoffe und von der Zusammensetzung des Betons abhängig. Vernachlässigt man Wärmeverluste und Erwärmungen durch die Außenluft und das Mischen, so kann die Temperatur des Frischbetons aus dem Vergleich der Gesamtwärmemenge des Frischbetons mit der Summe der Wärmemengen der Ausgangsstoffe nach Gleichung (1) errechnet werden [1]. Dabei wird vorausgesetzt, daß sich die Temperatur der drei Komponenten (Zement, Zuschlag und Wasser) schnell ausgleicht. Dies trifft sicherlich für den feinen Zuschlagstoff, besonders aber für Zement und Wasser zu, da der Zement wegen seiner Feinheit eine im Verhältnis zu seinem Volumen große Oberfläche aufweist und da das Wasser sich beim Mischen rasch über alle Oberflächen verteilt und somit bei seiner vergleichsweise höheren spezifischen Wärme ein idealer Wärmeverteiler ist.

$$t_B = \frac{(Z \times t_Z + G \times t_G) \times c_1 + W \times t_W \times c_2}{(Z + G) \times c_1 + W \times c_2} \quad (1)$$

*) Kurzbericht auf der 10. Sitzung des Betontechnischen Ausschusses des Vereins Deutscher Zementwerke am 9. Juli 1959 in Norderney.

In dieser Gleichung bedeuten:

t_B = Temperatur des Frischbetons in °C

t_Z = Temperatur des Zementes in °C

t_G = Temperatur des Zuschlags in °C

t_W = Temperatur des Wassers in °C

c_1 = 0,2 kcal/kg (mittlere spezifische Wärme des Zementes und des Zuschlags)

c_2 = 1,0 kcal/kg (spezifische Wärme des Wassers)

Z = Zementgehalt in kg je m³ Beton

G = Zuschlagstoffgehalt in kg je m³ Beton

W = Wassergehalt in kg je m³ Beton

Beträgt nun z. B. bei einem Kiessandbeton üblicher Zusammensetzung ($Z = 300$ kg/m³; $G = 1900$ kg/m³; $W = 170$ kg/m³; $W/Z = 0,57$; Rohwichte $\gamma = 2,37$ kg/dm³) die Zementtemperatur 60 °C, die Zuschlagtemperatur 20 °C und die Wassertemperatur 15 °C, so ergibt sich nach Gleichung (1) folgende Frischbetontemperatur:

$$t_B = \frac{(300 \times 60 + 1900 \times 20) \times 0,2 + 170 \times 15 \times 1,0}{(300 + 1900) \times 0,2 + 170 \times 1,0} \approx 23 \text{ °C}$$

Bei sonst gleichen Verhältnissen, aber einer Zementtemperatur von 40 °C, beträgt die Temperatur des Frischbetons rd. 21 °C. Weitere Rechenbeispiele zeigen, daß die Temperatur dieses Frischbetons sich unter sonst gleichen Voraussetzungen um 1 °C ändert, wenn entweder die Temperatur

des Zementes um 10 °C

oder die des Zuschlags um 1,6 °C

oder die des Wassers um 3,6 °C

verändert wird. Dies bedeutet aber, daß eine Erhöhung der Zementtemperatur um 40 °C die Betontemperatur nicht mehr verändert als eine Erhöhung der Zuschlagtemperatur von 6,4 °C oder eine Erhöhung der Wassertemperatur von 14,4 °C. Die Temperatur des Frischbetons wird in jedem dieser drei Fälle um 4 °C erhöht. Da die als Beispiel gewählte Betonzusammensetzung der bei den meisten Betonbauten üblichen Zusammensetzung sehr ähnlich ist, liegen in der Praxis meist vergleichbare Verhältnisse vor.

Diese Überlegungen zeigen, daß die Temperatur des Frischbetons in viel größerem Maße von der Temperatur des Zuschlags und des Wassers beeinflusst wird als von der Zementtemperatur. Der Wirkungsgrad einer Zementkühlung ist aus diesem Grunde sehr gering. Bei zu hohen Frischbetontemperaturen sollte man daher möglichst kaltes Anmachwasser benutzen. Wenn dies nicht ausreicht, kann durch Abdecken freiliegender Zuschläge oder durch Berieseln der groben Korngruppen in Silos die Betontemperatur merklich gesenkt werden.

2.2 Erhöhung der Betontemperatur infolge Hydratationswärme bei verhindertem Wärmeabfluß

Die Zemente binden während des Erhärtungsvorganges Wasser. Diese Wasserbindung oder Hydratation ist ein exothermer Vor-

gang, d. h. ein Vorgang, bei dem Wärme frei wird, die man als Hydratationswärme der Zemente bezeichnet. Die Menge der freiwerdenden Wärme und die Geschwindigkeit, mit der sie frei wird, sind unter sonst gleichen Verhältnissen von der Art, Zusammensetzung und Güte der Zemente abhängig [2, 3]. Die Entwicklung der Hydratationswärme wird – ähnlich wie die Erhärtung – durch höhere Temperaturen beschleunigt und durch niedrigere verzögert. Nach F. Keil [3, 4] kann bei unseren deutschen Zementen etwa mit den in Tafel 1 angegebenen Mengen an Hydratationswärme gerechnet werden.

Tafel 1 Hydratationswärme von deutschen Zementen auf Grund der Bestimmung der Lösungswärme (Erhärtung bei 23 °C)

Zemente	Hydratationswärme WE in kcal/kg bis zum Alter von			
	1 Tag	2 Tagen	7 Tagen	28 Tagen
I	2	3	4	5
Zemente mit hoher Hydratationswärme Z 475	50 bis 65	70 bis 85	85 bis 90	90 bis 100
Übliche Zemente Z 275 und Z 375	30 bis 50	50 bis 70	60 bis 80	75 bis 100
Zemente mit niedriger Hydratationswärme *)	15 bis 35	40 bis 60	45 bis 65	55 bis 80

*) Vorzugsweise Portlandzement mit wenig oder keinem errechneten C_3A -Gehalt und Hüttenzement mit hohem Schlackengehalt.

Die freiwerdende Hydratationswärme erhöht die Betontemperatur um so mehr, je geringer der Wärmeabfluß ist. Im Kern massiger Bauteile und dort, wo ein Wärmeabfluß durch Schalungen mit großem Wärmedurchlaßwiderstand (Wärmedämmzahl) oder durch andere Maßnahmen verhindert wird, kann die Temperaturerhöhung des Betons infolge Hydratationswärme nach Gleichung (2) errechnet werden [1]:

$$t_B = \frac{Z \times WE}{(Z + G) \times c_1 + W \times c_2} \quad (2)$$

WE ist die Hydratationswärme des Zementes in kcal/kg nach Tafel 1. Die übrigen Größen der Gleichung (2) haben die gleiche Bedeutung wie in Gleichung (1).

Beträgt bei einem Kiessandbeton üblicher Zusammensetzung ($Z = 300 \text{ kg/m}^3$; $G = 1900 \text{ kg/m}^3$; $W = 170 \text{ kg/m}^3$; $W/Z = 0,57$; Rohwichte $\gamma = 2,37 \text{ kg/dm}^3$) z. B. die Hydratationswärme eines Zementes Z 275 nach 1 Tag 40 kcal/kg und nach 3 Tagen 60 kcal/kg, so erhöht sich dadurch die Temperatur des Betons unter den genannten Voraussetzungen bis zum Alter von 1 Tag um:

$$t_B = \frac{300 \times 40}{(300 + 1900) \times 0,2 + 170 \times 1,0} \approx 20 \text{ °C}$$

und bis zum Alter von 3 Tagen insgesamt um rund 30 °C.

Bei Zementen mit höherer oder schneller freiwerdender Hydratationswärme stellen sich entsprechend höhere Betontemperaturen ein. Durch die Verwendung von Zementen mit niedriger oder langsamer freiwerdender Hydratationswärme kann die Er-

wärmung des Betons unter sonst gleichen Verhältnissen auch im Kern massiger Bauteile und dort, wo die Wärme langsam abfließt, geringer gehalten werden. Durch die Hydratationswärme des Zementes bis zu einem Tag wird die Temperatur des Betons in den meisten Fällen aber bereits bedeutend mehr erhöht als durch erhöhte Zementtemperaturen.

3. Einfluß des heißen Zements

3.1 Heißer Zement

Unter „heißem“ oder auch „warmem“ Zement versteht man Zemente, die mit erhöhter Temperatur – oft mit 70 bis 80 °C – zur Baustelle geliefert werden. Da es in Konjunkturzeiten vorkommt, daß der Klinker nicht lange abkühlen kann, bevor er vermahlen wird, unterscheidet man den heißen Zement aus heißem Klinker und den heißen Zement aus abgekühltem Klinker [5]. Der heiße Zement aus frischem, heißem Klinker, der in noch heißem Zustand vermahlen wird, erhält seine erhöhte Temperatur vom Klinker und vom Mahlvorgang. Der heiße Zement aus abgekühltem Klinker erhält seine erhöhte Temperatur allein vom Mahlvorgang. In beiden Fällen kann der Zement bei seiner Lagerung im Silo nicht genügend abkühlen.

3.2 Beeinflussung der Zement- und Betoneigenschaften durch erhöhte Zementtemperaturen

Zahlreichen Vergleichsversuchen [6] mit heißem und kaltem Zement ist zu entnehmen, daß Mörtel und Betone bei Verwendung heißer Zemente einen geringfügig höheren Wasseranspruch besitzen und daß die heißen Zemente etwas kürzere Erstarrungszeiten aufweisen. Die Normenforderungen der DIN 1164 über das Erstarren wurden – abgesehen von nur wenigen Ausnahmen – aber auch von den heißen Zementen erfüllt. Um Zemente mit „falschem Erstarren“ [7, 8], das selten auftritt und sich bei üblicher Betonherstellung auch meist nicht ungünstig auswirkt, erkennen zu können, sind heiße Zemente vor ihrer Verwendung stets auf Erstarren nach DIN 1164 zu prüfen (Dies wird nach den Gewährleistungsbedingungen immer verlangt). Da insbesondere bei sehr fein gemahlten Zementen und Portlandzementen mit höherem C_3A -Gehalt, die bei 20 °C normal erstarren, bei höheren Temperaturen das störende, nicht rückgängige schnelle Erstarren auftreten kann, sollte das Erstarren des Zements auch stets bei 30 °C ermittelt werden, wenn erhöhte Mörtel- und Betontemperaturen zu erwarten sind. Von Zementen für Autobahnen und Bundesfernstraßen wird verlangt, daß ihr Erstarren bei der 30 °C-Prüfung im Sommer nicht vor einer Stunde beginnt. Hinsichtlich der Raumbeständigkeit wurde ein unterschiedliches Verhalten zwischen heißen und kalten Zementen durchweg nicht festgestellt [6].

Nach den bisherigen Versuchsergebnissen [5, 6] werden die Mörtel- und Betonfestigkeiten durch die Verwendung von heißem Zement unter sonst gleichen Verhältnissen nicht beeinflusst. Lediglich für die Zug- und die Biegezugfestigkeit der Mörtel werden einige Ausnahmen angeführt, bei denen teils von einer Zunahme und teils von einer geringfügigen Abnahme der Festigkeiten bei Verwendung von heißem Zement gesprochen wird.

In den Versuchsberichten wurden jedoch nur die Zementtemperaturen mitgeteilt, nicht aber die auch von anderen Bedingungen abhängigen und hier vermutlich höheren Mörteltemperaturen. Inwieweit insbesondere die Zug- und Biegezugfestigkeit durch erhöhte Mörtel- oder Betontemperaturen nachteilig beeinflusst werden können, ist Gegenstand der Betrachtungen des Abschnittes 4. Da Zug- und Biegezugfestigkeiten auf geringfügige Änderungen der Lagerungsbedingungen sehr deutlich ansprechen, können die sich widersprechenden Angaben auch durch Überlagerung der Festigkeitsergebnisse von Schwind- und Temperaturspannungen entstanden sein.

Längenänderungsmessungen an feucht bzw. trocken gelagerten Betonen aus kaltem und heißem Zement zeigten keine Unterschiede. *Betonstraßen*, bei deren Herstellung heißer Zement verwendet wurde, verhielten sich unter sonst gleichen Verhältnissen bei frühzeitiger, starker Beanspruchung ebenso gut wie solche aus kaltem Zement. K. Walz [9] konnte nachweisen, daß die Rißbildung auf einer im Jahre 1935 gebauten Autobahnstrecke nicht – wie zunächst vermutet – auf die Verwendung von frischem und warmem Zement zurückzuführen war, sondern auf unsachgemäße Verarbeitung des zweischichtig eingebauten Betons. Auch nach *amerikanischen Erfahrungen* [10] wirkt sich die Verwendung heißen Zements nicht nachteilig auf die Eigenschaften des Betons aus. Im Hinblick auf die Temperaturerhöhung im Beton soll der Zement dort jedoch nicht heißer als mit einer Temperatur von 77 °C zur Betonherstellung verwendet werden.

4. Beeinflussung der Betoneigenschaften durch erhöhte Betontemperaturen

Wenn auch nach den Überlegungen zu Abschnitt 2.1 der heiße Zement die Betontemperatur nur unbedeutend erhöht, wird man im Sommer trotzdem mit etwas höheren Betontemperaturen rechnen müssen, da dann auch die Temperatur der Zuschläge, des Wassers und der Luft sowie die Sonneneinstrahlung zur Erhöhung beitragen.

Frischbeton mit höheren Temperaturen kann für die gleiche Verarbeitbarkeit etwas mehr Wasser benötigen und etwas schneller erstarren (vgl. Abschnitt 3.2). Die Oberfläche des eingebauten, aber noch nicht erhärteten Betons kühlt sich bei erhöhter Frischbetontemperatur in der Regel etwas stärker ab. Bei nicht sorgfältiger Nachbehandlung kommt zum schädlichen Temperaturgefälle noch die gesteigerte Verdunstung der Oberflächenfeuchtigkeit. Solche Vorgänge haben oft kleine, nur wenige mm tief gehende Schrumpfrisse im erstarrenden Beton zur Folge. Diese Risse treten an der freien Oberfläche meist scharenweise und gleichgerichtet auf, weil das stärkere Schrumpfen des Betons durch den darunterliegenden Beton und durch Reibung an der Bodenfläche behindert ist [11, 12]. Nach A. Hummel [13] können im noch weichen Mörtel und Beton durch ein starkes Schrumpfen auch äußerlich nicht erkennbare Gefügelockerungen auftreten, die bei späterem Schwinden zu Rissen führen können.

Da Betone mit höheren Frischbetontemperaturen in der Regel etwas schneller erhärten und ihre Hydratationswärme schneller

freigeben, ist auch beim jungen, aber bereits mit dem Erhärten begonnenen Beton mit höheren Temperaturen als sonst zu rechnen. Dadurch entsteht in den Querschnitten des jungen Betons bei geringem Wärmeabfluß und abgekühlter Oberfläche ebenfalls ein größeres Temperaturgefälle, welches zu Temperaturspannungen führt. Bei nicht sorgfältiger Nachbehandlung ist ein stärkeres Verdunsten der Feuchtigkeit und damit ein größeres Schwinden zu erwarten, welches bei Behinderung Schwindspannungen zur Folge hat. Hinzu kommen Eigenspannungen, die während des Austrocknens bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt zwischen Randzone und Kern des Betonkörpers entstehen, und Gefügespannungen, die sich aus dem unterschiedlichen Schwinden und der unterschiedlichen Elastizität von Zementstein und Zuschlagstoff ergeben [12, 14]. Mit zunehmendem Austrocknen des Betons wird in Abhängigkeit von seinem Kriechvermögen ein Teil dieser Spannungen abgebaut. Überschreiten die aus gleichmäßigem und ungleichmäßigem Schwinden, aus Temperatur- und sonstigen Beanspruchungen entstandenen Zugspannungen die Zugfestigkeit des jungen Betons, so sind Gefügelockerungen und größere Risse die Folge. Sie treten oft an Stellen auf, an denen der Betonquerschnitt geschwächt ist.

Schrumpfrisse, Gefügelockerungen und Risse aus Temperatur- und Schwindspannungen können vermieden werden, wenn das Temperaturgefälle im Querschnitt des jungen Betons klein gehalten wird und wenn durch sorgfältiges Nachbehandeln ein Austrocknen des jungen Betons von Anfang an verhindert wird. Neben der üblichen Nachbehandlung wird daher für Betonfahrbahndecken neuerdings empfohlen [15], die freie Betonoberfläche möglichst frühzeitig (spätestens nach 6 bis 8 Stunden) mit Folien und Wärmedämmschichten oder mit ähnlich wirkenden Bahnen abzudecken.

Bei amerikanischen Versuchen [16] hatten höhere Misch- und Lagerungstemperaturen (wie z. B. 32 °C, 40 °C und 49 °C) etwa bis zum Alter von 7 Tagen höhere, danach jedoch bis zu 25% geringere Betonfestigkeiten zur Folge als die ständige Lagerung bei 23 °C. Zur Erlangung hoher 1 Jahres-Festigkeiten ergab sich für die untersuchten Zemente eine optimale Lagerungstemperatur des Betons bis zu 28 Tage, die für die amerikanischen Zementtypen I und II bei etwa 13 °C und für Typ III bei etwa 4,5 °C lag. Eine Vermehrung des Wasserzusatzes bei gleichbleibender Zementmenge wird als eine der Ursachen für die geringeren Festigkeiten bei höheren Temperaturen angesehen. Aus diesem Grund bezeichnen die amerikanischen Vorschriften [10] 15,5 °C als günstige Frischbetontemperatur und 32,2 °C als obere Temperaturgrenze, die der Frischbeton bei heißem Wetter nicht überschreiten darf. Nach deutschen Vorschriften [17] darf bei hohen Außentemperaturen die Frischbetontemperatur 30 °C nicht überschreiten.

Bei massigen Bauteilen kann die Betontemperatur durch die Wahl eines Zements mit niedriger Hydratationswärme, durch Unterteilung in Betonierabschnitte und nötigenfalls durch kaltes Anmachwasser, durch Kühlung der Zuschlagstoffe, durch Zugabe von Eis oder auch durch Kühlung des bereits eingebauten Betons niedrig gehalten werden.

5. Zusammenfassung

5.1 Die etwa zu erwartende Frischbetontemperatur kann aus der Betonzusammensetzung und den Temperaturen der Ausgangsstoffe nach Gleichung (1), die Temperatur des erhärtenden Betons bei verhindertem Wärmeabfluß aus der Hydratationswärme nach Gleichung (2) errechnet werden.

5.2 Die Frischbetontemperatur sollte bei hohen Außentemperaturen 30 °C nicht überschreiten. Da die Zementtemperatur nur einen unbedeutenden Einfluß hat, ist es zur Senkung der Frischbetontemperatur wirkungsvoller, kaltes Anmachwasser zuzugeben und, wenn dies nicht ausreicht, die Zuschläge zu berieseln oder abzudecken.

5.3 Zur Vermeidung von Rissen und Gefügelockerungen muß durch frühzeitiges Abdecken mit Folien und wärmedämmenden Matten das Temperaturgefälle im Betonquerschnitt klein gehalten und ein Austrocknen des jungen Betons von Anfang an verhindert werden.

5.4 Heißer Zement beeinflusst die Betoneigenschaften in der Regel nicht nachteilig, wenn seine Temperatur bei Verwendung 80 °C nicht überschreitet.

SCHRIFTTUM:

- [1] Walz, K.: Über den Einfluß heißen Zements auf die Mischtemperatur des Betons. Rundschreiben der Belontechnischen Abteilung des Forschungsinstituts der Zementindustrie vom 20. 4. 1959.
- [2] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure. Bauverlag G.m.b.H., Wiesbaden 1959, S. 94.
- [3] Keil, F.: Zement und Zementindustrie, Abschnitt Hydratationswärme, Zement-Taschenbuch 1960, Bauverlag G.m.b.H., Wiesbaden, S. 72/77.
- [4] Keil, F.: Zement in der neuzeitlichen Bautechnik. Die Wasserwirtschaft 50 (1960) H. 12, S. 323/328.
- [5] Seidel, K.: Über die Verwendung von warmem Zement beim Betonieren. Zement-Kalk-Gips 8 (1955) H. 1, S. 1/6.
- [6] Walz, K.: Verwendung von heißem Zement (Literaturzusammenstellung). Zement-Kalk-Gips 8 (1955) H. 9, S. 315/319.
- [7] Keil, F.: „Störungen beim Erstarren der Zemente und deren Beseitigung“. Rundschreiben des Vereins Deutscher Zementwerke 1959 Nr. 15.
- [8] Kuhs, R.: Einfluß des Gipses auf Klinker mit verschiedenem Aluminatgehalt. Schriftenreihe der Zementindustrie 1958, Heft 22.
- [9] Walz, K.: Aufklärung der Ribbildung an einer im Jahre 1935 gebauten Autobahnstrecke. Zement-Kalk-Gips 8 (1955) H. 9, S. 308/315.
- [10] ACI Committee 605: Recommended practice for hot weather concreting, ACI Standard 605—59.
- [11] Hummel, A.: Vom Schwinden zementgebundener Massen, seiner Messung und seinen Auswirkungen. Zement-Kalk-Gips 7 (1954) H. 8, S. 293/302.
- [12] Walz, K.: Längenänderungen und Spannungen durch Schrumpfen und Schwinden des Betons. beton 7 (1957) H. 7, S. 203/205.
- [13] Hummel, A.: Reißneigung bei hydraulischen Bindemitteln. Tonindustrie-Zeitung 58 (1934) S. 1043.
- [14] Wischers, G.: Die mathematische Erfassung der Spannungen infolge Schwindens. beton 10 (1960) H. 6, S. 273/276.
- [15] Walz, K.: Nachbehandeln von Betonfahrbahndecken. beton 10 (1960) H. 4, S. 170.
- [16] Klieger, P.: Effect of mixing and curing temperature on concrete strength. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1957/58) S. 1063/1081.
- [17] Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen: Richtlinien für Betonfahrbahndecken, 3. Ausgabe, Köln 1956, S. 33.