

Untersuchungen über die Wärmebehandlung von Beton*)

In einer Gemeinschaftsarbeit wurden in Belgien (Laboratoire d'Essais et de Contrôle des Groupements de Producteurs des Ciment de Belgique, Brüssel), Deutschland (Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf) und Holland (Commissie voor Uitvoering van Research, C-6, Betonvereniging, Den Haag) Untersuchungen über den Einfluß verschiedenartiger Wärmebehandlungen auf die Festigkeit von Beton durchgeführt.

Nachdem die deutschen Untersuchungen, die sich besonders mit dem Einfluß des Zements befaßten, im Jahre 1960 veröffentlicht [1] und die belgischen Ergebnisse in den Berichten des LABORATOIRE G.P.C., Bruxelles, Januar 1961, mitgeteilt wurden, erschien jetzt der holländische Bericht C.U.R.-RAPPORT 25 unter dem Titel „Onderzoek betreffende het stomen van beton“. In einer kurzen Übersicht sollen hieraus die wesentlichen Feststellungen aufgeführt werden.

Unter der Wärmebehandlung wird – ebenso wie in Deutschland – die Einwirkung einer Temperatur bis zu 100 °C verstanden. (Bei einer Einwirkung von Temperaturen über 100 °C in Verbindung mit gespanntem Dampf spricht man im allgemeinen von Dampfhärtung.)

1. Zweck der Untersuchung: In Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung (Zementart und -güteklasse, Wasserzementwert, Zementgehalt) sowie dem Verlauf der Wärmebehandlung sollte geprüft werden, in welchem Maße die Anfangserhärtung des Betons durch eine Wärmebehandlung beschleunigt werden kann, wie sich die Festigkeit nach einer Wärmebehandlung (Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit) in höherem Alter entwickelt und ob die Errechnung der Festigkeit aus dem Reifegrad R des Betons nach Saul ($R = \sum T \cdot \Delta t$)¹⁾ auch bei einer Wärmebehandlung seine Gültigkeit behält.

2. Betonzusammensetzung: Die Mischungen wiesen 4 verschiedene, handelsübliche Zemente (je 1 PZ der Klassen A und B und je 1 HOZ der Klassen A und B²⁾), 3 Zementgehalte (250, 325 und 400 kg/m³) und 2 Konsistenzgrade auf (knapp weich – leicht rüttelbar; steif – nur durch Rütteln zu verdichten). Die beiden

*) Onderzoek betreffende het stomen van beton, Commissie voor Uitvoering van Research. Betonvereniging, Rapport 25, Den Haag 1962.

1) t = Dauer der Wärmebehandlung; T = Temperatur in °C; \sum über die Zeit von t = 0 bis t = t.

2) Klasse A entspricht in Deutschland etwa einem Z 275 und Klasse B etwa einem Z 375.

Konsistenzen wurden bei einem Zementgehalt von 250 kg/m^3 mit Wasserzementwerten von 0,65 und 0,55, bei 325 kg/m^3 Zement mit Wasserzementwerten von 0,55 und 0,45 und bei 400 kg/m^3 Zement mit Wasserzementwerten von 0,45 und 0,35 erreicht. In einem Ergänzungsversuch wurde einem Beton mit 325 kg/m^3 Zement und einem Wasserzementwert von 0,45 rd. 2% CaCl₂ zugesetzt (bezogen auf das Zementgewicht).

3. Temperaturverlauf und Prüfaller: Die aus den insgesamt 24 verschiedenen Betonen hergestellten Balken $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ wurden nach einer meist 2stündigen Vorlagerung bei normaler Temperatur anschließend einer „langen“ oder „kurzen“ Wärmebehandlung unterzogen.

„Lange“ Wärmebehandlung:

Aufheizen mit $12 \text{ }^\circ\text{C/h}$
Verweilen bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ während 16 h 20 min
oder bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ während 9 h 40 min
oder bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$ während 3 h
Abkühlen mit $4 \text{ }^\circ\text{C/h}$ auf $40 \text{ }^\circ\text{C}$, dann rascher

„Kurze“ Wärmebehandlung:

Aufheizen mit $40 \text{ }^\circ\text{C/h}$
Verweilen bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ während 4 h
oder bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$ während 3 h
Abkühlen mit $20 \text{ }^\circ\text{C/h}$ auf $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Die wärmebehandelten Körper wurden immer nach insgesamt 20 h entformt. Anschließend lagerten sie zusammen mit Vergleichsbalken (ohne Wärmebehandlung „normal“ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$) unter Wasser von $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; sie wurden nach 1, 3, 7, 28, 90 und z.T. (Zemente Klasse A) nach 365 Tagen auf Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft.

4. Ergebnisse der Untersuchung: Eine Wärmebehandlung bewirkte immer eine Erhärtungsbeschleunigung und damit eine höhere Anfangsfestigkeit. Nach 1 Tag erreichten die wärmebehandelten Körper eine Biege- und Druckfestigkeit, die das 3fache, in einem Fall sogar das 7fache der 1 Tage-Festigkeit des normal gelagerten Betons betrug. Die 1 Tage-Frühfestigkeit der Wärmebehandlung ergab sich bei Normallagerung je nach Wasserzementwert, Zementart und Güteklasse des Zements erst nach 2 bis 6 Tagen. Mit zunehmendem Alter ging der Festigkeitsvorsprung aus der Wärmebehandlung zurück.

Die Endfestigkeiten der wärmebehandelten Betone lagen im allgemeinen unter den Festigkeiten der normal gelagerten (je nach Mischung bis zu 15%). Im einzelnen wurde folgendes festgestellt:

4.1 Eine Verkürzung der Vorlagerungszeit von 2 Stunden auf eine halbe Stunde ergab bei der „kurzen“ Wärmebehandlung bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zu rd. 15% geringere Festigkeiten. Die Betonprismen zeigten außerdem an der oberen Fläche zahlreiche Risse, so daß sich eine rd. 2stündige Vorlagerung empfiehlt.

4.2 Die höchste *Biegezugfestigkeit* des Betons aus Portlandzement wurde in jedem Alter nach einer Wärmebehandlung bei 60 °C und beim Beton aus Hochofenzement nach einer Wärmebehandlung bei 80 °C erhalten. Die größte *Anfangsdruckfestigkeit* entstand mit allen Zementen durch die Wärmebehandlung bei 80 °C. Eine Erhöhung der Temperatur von 40 auf 60 °C bzw. von 60 auf 80 °C wirkte sich bei Beton aus Hochofenzement sowohl auf die Druckfestigkeit als auch auf die Biegezugfestigkeit stärker aus als bei solchem aus Portlandzement.

4.3 Die „lange“ Wärmebehandlung von insgesamt 20 h lieferte in allen Altersstufen immer eine größere Festigkeit als die „kurze“ von 8 h. Der Unterschied zwischen beiden Behandlungen war bei Hochofenzement größer als bei Portlandzement.

4.4 Mit *zunehmendem Alter* holten die normal gelagerten Körper den Vorsprung der wärmebehandelten Körper in der Erhärtung rasch ein. Nach 3 Tagen war die Festigkeit mit und ohne Wärmebehandlung etwa gleich, und nach 7 Tagen war in vielen Fällen die Festigkeit der wärmebehandelten Körper kleiner als die der normalgelagerten Körper. Gemittelt über alle Betonzusammensetzungen und Wärmebehandlungsarten ergab sich bei wärmebehandelten Betonen nach 28 und mehr Tagen eine bis zu 7% kleinere Biegezugfestigkeit und eine bis zu 14% kleinere Druckfestigkeit, bezogen auf gleiche normal gelagerte Betone. Der Abfall der Festigkeit in höherem Alter gegenüber normal gelagertem Beton wird – mit Ausnahme der 40 °C-Behandlung – durch die Art der Wärmebehandlung wenig beeinflusst. Für die Praxis ist von Bedeutung, daß die geringere Festigkeit der wärmebehandelten Betone während der Nacherhärtung in Wasser vom 28. bis 365. Tag prozentual etwa gleich blieb.

4.5 Abgesehen von der „kurzen“ Wärmebehandlung bei 60 °C, bei der die Festigkeitssteigerung mit allen Zementen fast gleich groß war, ergaben die übrigen Wärmebehandlungen bei Betonen aus Hochofenzement einen größeren Festigkeitsanstieg als bei solchen aus Portlandzement. (Eine Erklärung dafür konnte nicht gegeben werden.)

4.6 Mit abnehmendem *Wasserzementwert* (0,65 bis 0,35) nahm die Anfangsfestigkeit (bezogen auf die jeweils zugehörige 28 Tage-Festigkeit) zu. Dies traf sowohl für den wärmebehandelten Beton als auch für den normal gelagerten Beton zu.

4.7 Auch die *Konsistenz* beeinflusste bei gleichem Wasserzementwert in gewissen Grenzen die Frühfestigkeit nach Wärmebehandlung. Sowohl mit Portlandzement als auch mit Hochofenzement wurde die höchste Anfangsdruckfestigkeit bei steifem Beton erreicht; für die Biegezugfestigkeit konnte in dieser Hinsicht keine klare Abhängigkeit gefunden werden.

4.8 Eine Zugabe von rd. 2% CaCl_2 zum Beton bewirkte auch bei einer Wärmebehandlung einen Anstieg der Frühfestigkeit. Vergleicht man die 1 Tage-Festigkeit (Biegezug- und Druckfestigkeit) von wärmebehandeltem Beton mit und ohne CaCl_2 mit der 28 Tage-Festigkeit von normal erhärtetem Beton derselben Zusammensetzung, dann ergibt sich, daß die Verhältniswerte bei den Betonen aus Portlandzement mit und ohne CaCl_2 fast gleich sind, bei Hochofenzement findet man deutlich größere Verhältniszahlen bei Zugabe von CaCl_2 , d. h. also eine besondere Steigerung der Frühfestigkeit durch 2% CaCl_2 .

4.9 Langsames Abkühlen (4 °C/h) oder rascheres Abkühlen (5,7 °C/h) nach einer Wärmebehandlung von 60 °C wirkte sich auf die Festigkeit nicht unterschiedlich aus (Mischung mit Zementgehalt von 325 kg/m³, Wassorzementwert von 0,50).

4.10 Der Reifegrad nach Saul eignet sich für die Vorausbestimmung der Betonfestigkeit bei Wärmebehandlung nicht. Die erreichten 1 Tage-Festigkeiten waren wesentlich höher, als sie nach dem Reifegrad zu erwarten waren. Die Beziehung konnte auch für die Wärmebehandlung nicht einfach abgeändert werden, da gleiche Wärmebehandlung je nach Betonzusammensetzung und Prüfung sehr unterschiedliche Festigkeiten zur Folge hatte. Betone aus Hochofenzement wichen bei diesen Untersuchungen stärker vom Reifegrad ab als solche aus Portlandzement.

J. Dahms

SCHRIFTTUM :

- [1] Walz, K.: Der Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Festigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen. Belontechnische Berichte 1960. Beton-Verlag, Düsseldorf 1961, S. 29/57.