

Prüfverfahren zur Voraussage der Temperaturerhöhung im Beton infolge Hydrationswärme des Zements

Test method for predicting the temperature rise in concrete caused by the heat of hydration of the cement

Méthode de test pour la prédiction de l'augmentation de température dans le béton du fait de la chaleur d'hydratation du ciment

Horst Grube und Wilhelm Hintzen, Düsseldorf

Übersicht

Die Hydrationswärme des Zements führt zu einer mehr oder weniger großen Erwärmung des Betons innerhalb der ersten Tage. Die Temperaturerhöhung fördert die Festigkeitsentwicklung, aber auch die Möglichkeit der Rißbildung in zwangbeanspruchten Bauteilen. Die Grundlagen des Hydrationsvorgangs werden beschrieben und die Vor- und Nachteile der damit verbundenen Wärmefreisetzung diskutiert. Die verschiedenen Prüfverfahren zur Bestimmung der Hydrationswärme des Zements, die sich u.a. durch die Lagerungsbedingungen, nämlich isotherm, adiabatisch oder teiladiabatisch unterscheiden, werden insbesondere im Hinblick auf ihre praktische Bedeutung vergleichend dargestellt. Ein einfaches praxisnahes Prüfverfahren für die Ermittlung der Temperaturerhöhung im Beton unter teiladiabatischen Wärmeabflußbedingungen und die rechnerische Ableitung der adiabatischen Temperaturkurve werden im Detail angegeben.

Abstract

During its first few days a concrete is heated to a certain extent by the heat of hydration of the cement. The temperature rise promotes strength development, but it also promotes the possibility of crack formation in components liable to constraint stresses. A description is given of the fundamental principles of the hydration process, and the advantages and disadvantages of the associated liberation of heat are discussed. The different test methods for determining the heat of hydration of cement which differ in, among other things, the storage conditions, i. e. isothermal, adiabatic or semi-adiabatic, are presented and compared, especially with respect to their practical importance. A simple practical test method for determining the temperature rise in concrete under semi-adiabatic heat flow conditions and the calculated derivation of the adiabatic temperature curve are specified in detail.

Abrégé

Pendant ses premiers jours, le béton est chauffé dans une certaine mesure par la chaleur d'hydratation du ciment. L'augmentation de température promeut le développement de la résistance, et fait également augmenter la possibilité de formation de fissures dans les éléments soumis à des contraintes forcées. Le présent exposé fournit une description des principes fondamentaux de l'hydratation, et discute les avantages et inconvénients de la libération de chaleur qui va de pair avec elle. Les différentes méthodes d'essais en vue de la détermination de la chaleur de l'hydratation du ciment qui se différencient entre autres choses par les conditions de stockage, soit isothermes, adiabatiques ou semi-adiabatiques sont présentées et comparées, en particulier en ce qui concerne leur importance pratique. Une méthode de test simple et proche de la pratique pour la détermination de l'augmentation de la température dans le béton dans des conditions d'écoulement thermique semi-adiabatiques et les courbes de température adiabatique sont spécifiées en détail.

1 Einleitung

Unmittelbar nach dem ersten Kontakt des Zements mit Wasser im Frischbeton beginnen an der Grenzfläche zwischen Zementkorn und Wasser chemische Reaktionen, die man als Hydratation bezeichnet. Dabei entstehen wasserhaltige Verbindungen — sogenannte Hydratphasen — die sich im wassergefüllten Porenraum ausbreiten (Bild 1). Man kann dabei 3 Reaktionsstufen unterscheiden [L1, R1]:

○ Die erste Stufe ist durch eine in den ersten Minuten stürmische Reaktion gekennzeichnet, bei der sich insbesondere feinkörniger Ettringit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) auf den Klinkerkörnern und Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bilden. Die dabei entstehende Wärme führt direkt zu einer Erhöhung der Frischbetontemperatur um ca. 1 bis 3 K. Anschließend kommen die Reaktionen in der sogenannten „Ruheperiode“ weitgehend zum Stillstand. Die Konsistenz des Frischbetons ändert sich innerhalb der ersten Stunden in Form eines leichten Ansteifens. In dieser Zeit ist der Frischbeton verarbeitbar.

○ Die zweite Stufe, die nach etwa 2 bis 3 Stunden einsetzt, ist durch das Wachstum zunächst lang-, dann kurzfasriger Calciumsilicathydrate (CSH) und von weiterem Ettringit gekennzeichnet. Bei der Bildung der Calciumsilicathydrate wird Calciumhydroxid freigesetzt. Die Hydrate überbrücken zunehmend den wassergefüllten Raum zwischen den Zementkörnern und bewirken dadurch das Erstarren und den Beginn der Erhärtung. In dieser Phase (ca. 6 bis 12 Stunden nach dem Anmischen mit Wasser) wird bei allen Normzementen die größte Wärmemenge/Zeiteinheit freigesetzt. Für die spätere Festigkeit und Dichtigkeit des Gefüges ist ein ungestörtes langfaseriges Wachstum des Calciumsilicathydrats innerhalb dieser ersten 24 Stunden bei möglichst wenig erhöhter Temperatur vorteilhaft.

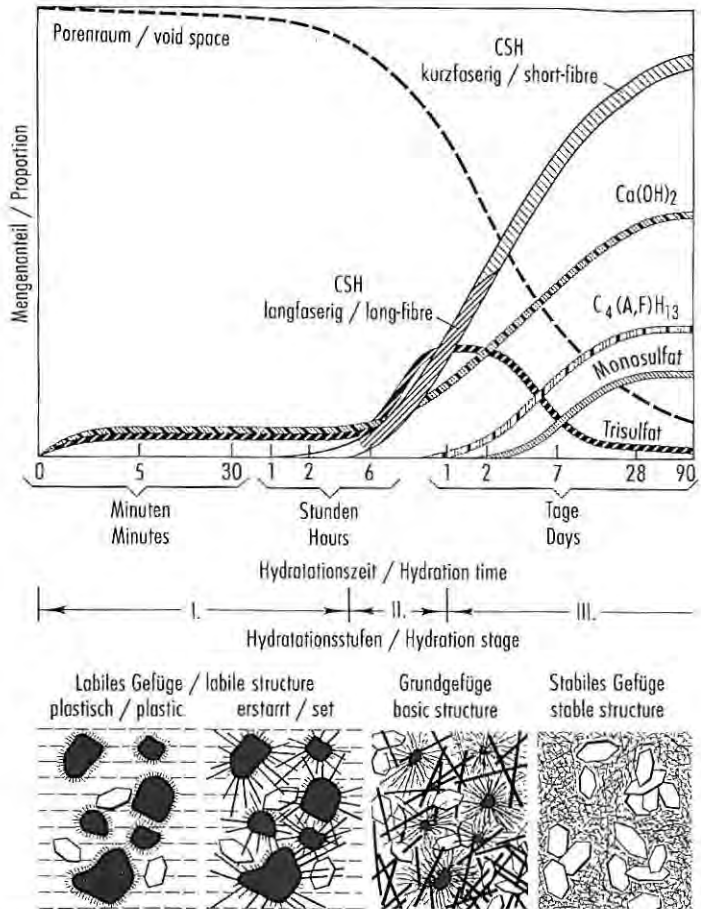


Bild 1 Schematische Darstellung der Bildung der Hydratphasen und der Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zements (aus [L1, R1]). CSH = Calciumsilicathydrat, $\text{C}_4(\text{A,F})\text{H}_{13}$ = Eisenoxidhaltiges Tetracalciumaluminathydrat

Fig. 1 Diagrammatic representation of the formation of the hydrate phases and the development of the internal structure during the hydration of the cement (from [L1, R1]) CSH = calcium silicate hydrate, $\text{C}_4(\text{A,F})\text{H}_{13}$ = tetracalcium aluminate hydrate containing iron oxide

○ Die dritte Hydrationsstufe umfaßt den Zeitraum von rund 1 Tag bis zur vollständigen Hydratation. Dabei werden die noch vorhandenen wassergefüllten Poren zunehmend mit Calciumsilicathydrat und Calciumaluminathydrat ausgefüllt. Das Gefüge wird dichter und nimmt an Festigkeit zu. Erhebliche Mengen Calciumhydroxid fallen in kristalliner Form im Gefüge aus. Der Ettringit wird zu einer sulfatärmeren Variante des Calciumaluminatsulfathydrats umgewandelt, dem sogenannten Monosulfat.

Die gesamte Hydratation ist ein exothermer Vorgang. Die dabei freigesetzte Wärmemenge nennt man Hydrationswärme H_z (kJ/kg Zement). Wenn die im Bauteil pro Zeiteinheit entstehende Wärmemenge größer als die abfließende Wärmemenge ist, erhöht sich die Temperatur des Betons. Dies hat folgende Auswirkungen auf die Ausführung von Betonbauwerken und auf die Gebrauchseigenschaften der Bauteile:

Die Wärmeentwicklung während der Hydratation ermöglicht z. B. bei Lufttemperaturen unter 0°C das Erhärten des Betons ohne Wärmezufuhr von außen. Sie ermöglicht sogar die Herstellung spezieller Bauteile auf gefrorenem Untergrund. Sie führt darüber hinaus zu einer beschleunigten Erhärtung. Sie fördert damit frühe Ausschulfristen und rationelle Arbeitstakte, z. B. im Freivorbau, im Fertigteilbau und im Tunnelbau.

Insbesondere im Sommer kann es infolge ohnehin hoher Frischbetontemperaturen, Erwärmung durch Sonneneinstrahlung oder infolge Rührens während längerer Transportzeiten zu einer Verkürzung der „Ruheperiode“ kommen. Die dann entstehende Hydrationswärme kann schnell dazu führen, daß sich die Temperatur des Betons weiter erhöht und daß der Beton unerwartet früh nicht mehr verarbeitbar ist.

Werden Betonbauteile auf bereits bestehende Bauteile aufbetoniert, so hat die Temperaturerhöhung im zuletzt betonierten Bauteil Zwangzugspannungen zur Folge, bald nachdem die Höchsttemperatur überschritten ist [B3, C1, H1, H2, R2, S1, S2, T1, T2, W1, W2]. Ursache dafür ist vor allem das Ansteigen des E-Moduls und die größere Relaxationsfähigkeit des Betons während der Erwärmung des noch „jungen“ Betons [T1]. Nach weiterem Abkühlen und Überschreiten der Zugbruchdehnung des Betons entstehen sogenannte Spaltrisse [H1].

Bei starker Erwärmung dicker Bauteile (z. B. Schleusenwände, Talsperren) entstehen Eigenspannungszustände, die durch Zugspannungen im oberflächennahen Bereich der Bauteile gekennzeichnet sind. Bei großen Temperaturunterschieden und steilen Temperaturgradienten kann dadurch im oberflächennahen Bereich die Zugbruchdehnung des Betons überschritten werden; dann entstehen sogenannte „Schalenrisse“ [H2]. Sie schließen sich zwar nach dem Temperatenausgleich weitgehend wieder, sind jedoch als Schwachstellen zur Auslösung von Spaltrissen und wegen einer eventuellen Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit unerwünscht.

Die Temperaturerhöhung des Betons in massigen Bauteilen kann 50 K und mehr betragen. Durch hohe Temperaturen während der Erhärtung können nennenswerte Einbußen bei der Druckfestigkeit hervorgerufen werden, die gegebenenfalls in einer speziellen Eignungsprüfung berücksichtigt werden müssen, siehe Bild 2 aus [K3]. Das Bild zeigt die Festigkeitsentwicklung von Normalbeton, der bei erhöhten und erniedrigten Betontemperaturen hergestellt und bis zum Alter von 28 Tagen gelagert wurde. Bezugstemperatur ist 23°C . Die erhöhte bzw. erniedrigte Frühfestigkeit korrespondiert mit einer erniedrigten bzw. erhöhten Endfestigkeit.

Man erkennt, daß es zahlreiche Gründe gibt, vor der Bauausführung die mögliche Temperaturerhöhung im Betonbauteil abzuschätzen und erforderlichenfalls zu verringern. Die dafür geeigneten be-

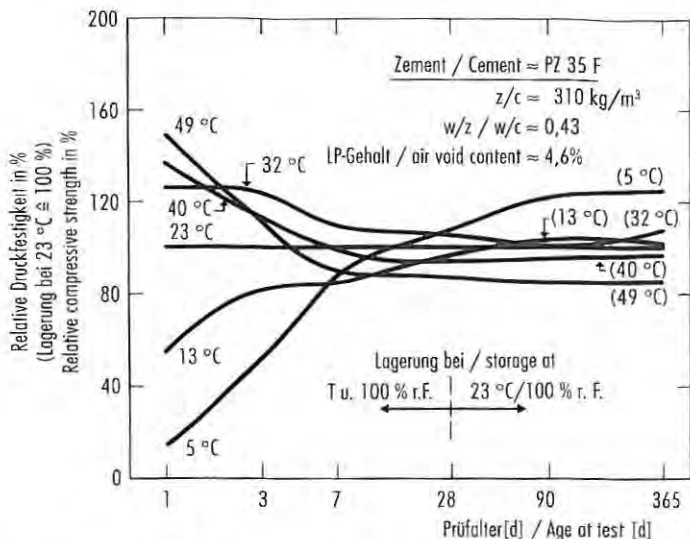


Bild 2 Einfluß hoher und niedriger Frischbeton- und Lagerungstemperaturen in den ersten 28 Tagen auf die Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit (15-cm-Würfel) von Normalbeton (bezogen auf die Festigkeit bei $23^\circ\text{C} \pm 100\%$) nach [K3]

Fig. 2 Influence of high and low temperatures of unset concrete and storage in the first 28 days on the development of the cube compressive strength (15 cm cube) of normal concrete (relative to the strength at $23^\circ\text{C} \pm 100\%$) according to [K3]

tontechnischen und meßtechnischen Maßnahmen werden nachstehend beschrieben.

2 Hydratationswärmeentwicklung unter isothermen, teiladiabatischen und adiabatischen Bedingungen

2.1 Definitionen

Die unterschiedlichen Temperaturbedingungen, unter denen die Hydratation erfolgen kann, sind im Bild 3 im Prinzip dargestellt. Als „isotherm“ (griechisch: isos (gleich), thermós (warm)) werden Änderungen des chemischen oder physikalischen Zustands eines Stoffs bezeichnet, die bei gleichbleibender Temperatur stattfinden. Falls bei den Reaktionen Wärme freigesetzt oder verbraucht wird, können isotherme Bedingungen nur aufrecht erhalten werden, wenn entsprechend Wärme ab- oder zugeführt wird.

Als „adiabatisch“ (griechisch: adiábatos (nicht hindurchtretend)) werden Änderungen des chemischen oder physikalischen Zustands eines Stoffs bezeichnet, ohne daß während der Zustandsänderung Wärme zwischen Stoff und Umgebung ausgetauscht wird. Entstehende Reaktionswärme wird dementsprechend vollständig zur Temperaturerhöhung des Stoffs und des Reaktionsprodukts genutzt. Dieser Fall tritt z. B. im Innern sehr dicker Betonbauteile auf, solar-

ge der Wärmeabfluß vernachlässigbar klein gegenüber der entstehenden Wärmemenge bleibt. Die Temperatur im Innern derartiger Bauteile erhöht sich dann (fast) proportional zu der bei steigender Temperatur freigesetzten Wärmemenge.

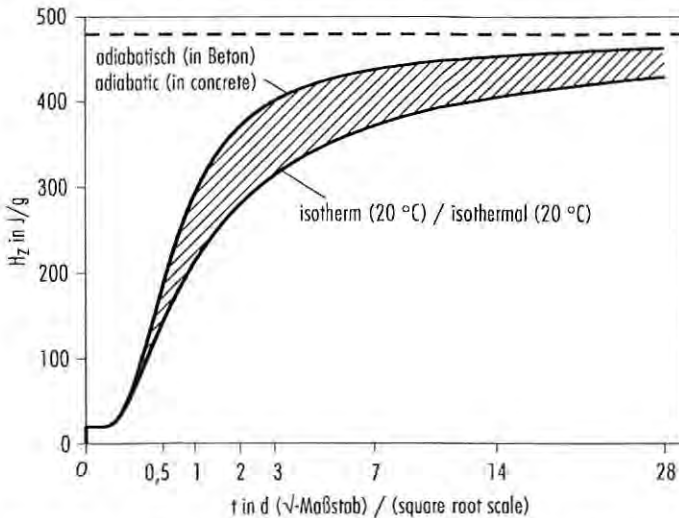
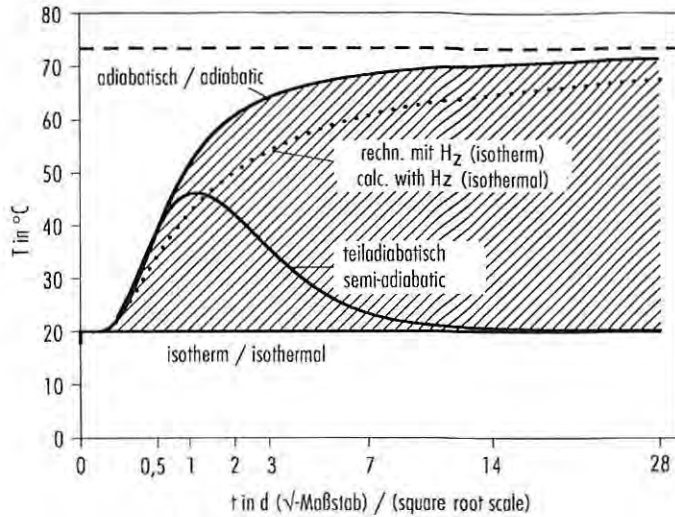


Bild 3 Zeitliche Entwicklung der Hydrationswärme bei einem PZ 35F unter isothermen und adiabatischen Bedingungen (unten) und möglicher Temperaturverlauf in einem Beton (oben) bei verschiedenen Wärmeabflußbedingungen

Fig. 3 Evolution of the heat of hydration with time for a PZ 35 F Portland cement under isothermal and adiabatic conditions (bottom) and possible temperature behaviour in a concrete (top) under various heat dissipation conditions

Übliche Bauteilabmessungen führen dazu, daß die Hydratation des Zements weder unter isothermen noch unter adiabatischen Bedingungen abläuft. Wir bezeichnen solche Temperaturverläufe als „teiladiabatisch“, siehe Bild 3 oben. Der Vorgang ist dadurch gekennzeichnet, daß nur die schnelle Anfangsreaktion zu fast adiabatischen Verhältnissen führt [H3]. Das Temperaturmaximum wird erreicht, sobald sich ein Gleichgewicht zwischen entstehender und abfließender Wärmemenge einstellt.

Die Hydratationswärmeentwicklung, die im Labor bei isothermen oder adiabatischen Bedingungen ermittelt wird, stellt demnach für eine bestimmte Mörtel- oder Betonzusammensetzung einen definierten unteren und oberen Randwert dar (siehe Bild 3). Das baupraktische Verhalten liegt dazwischen, sofern die Umgebungsbedingungen nicht einen Temperaturverlauf unterhalb des isothermen erzwingen.

2.2 Größe der Hydratationswärme von Zement

Für die Herstellung von Zementklinker benötigt man in modernen Trockenöfen eine Wärmemenge von rd. 3000 bis 3500 kJ/kg Klinker [L2]. Davon enthält der abgekühlte Klinker ein Energieniveau (reale Reaktionsenthalpie) über dem der Ausgangskomponenten von rd. 1800 kJ/kg [K1, L3].

Bei vollständiger Hydratation werden aus dem Zement nur die in Tafel 1 [L1] angegebenen Wärmemengen $H_{Z\infty}$ frei. Auf Portlandzement einschließlich Gipsanteil bezogen (d. h. rd. 90 % Klinker), folgt daraus, daß mit z.B. $H_{Z\infty} = 480$ kJ/kg insgesamt nur rd. 25 % der Energie als Hydratationswärme freigesetzt werden, die thermodynamisch für die Bildung der Klinkerphasen aus den Rohstoffen erforderlich war. Daraus folgt, daß auch die Hydratphasen noch ein höheres Energieniveau aufweisen als die Rohstoffe des Klinkers.

In Tafel 1 fällt auf, daß sich die Mittelwerte der bis zur vollständigen Hydratation freisetzbaren Hydratationswärmen aller Portlandzemente sowie aller Eisenportland- und Hochofenzemente, also der allgemein gängigen Konstruktionszemente, nur um rd. 70 kJ/kg, d. h. um rd. 20 % voneinander unterscheiden. Bei sonst gleicher Betonzusammensetzung und adiabatischen Verhältnissen (sehr dicke Bauteile), sind die Unterschiede der Zemente bezüglich der Höchsttemperatur im Bauteil demnach nur gering. Es hat allerdings

Tafel 1 Freisetzbare Wärmemengen $H_{Z\infty}$ bei vollständiger Hydratation (isotherme Lagerung), [L1]

Table 1 Quantity of heat $H_{Z\infty}$ which can be liberated on complete hydration (isothermal storage), [L1]

Portlandzement	375 bis 525 kJ/kg
Eisenportland- und Hochofenzement	355 bis 440 kJ/kg
Traßzement	315 bis 420 kJ/kg
Tonerdezement	545 bis 585 kJ/kg

keinen Sinn, die adiabatische Wärmeentwicklung an Zement(-stein) ermitteln zu wollen. Die Temperaturen würden bald 100°C überschreiten und zu praxisfernen Hydratationsbedingungen führen. Deshalb gibt es „die Hydrationswärmeentwicklung eines Zements“ unter adiabatischen Bedingungen nicht, sondern nur verschiedene adiabatische Temperaturverläufe in Mörtel und Beton. Die Höchsttemperatur richtet sich u. a. nach der Wärmekapazität der Mischung und dem Zementgehalt (siehe Abschnitt 2.3).

Bestimmt man die freigesetzte Hydrationswärme unter isothermen Bedingungen gemäß DIN 1164 Teil 8 [D1], so sind die Unterschiede bei den verschiedenen Zementarten und Festigkeitsklassen in frühem Erhärtungsalter sehr groß, siehe Tafel 2 [W3]. Trägt man die Hydrationswärme über der erreichten Druckfestigkeit [S3] auf (siehe Bild 4), so sieht man, daß Festigkeit und Hydrationswärme in einem engen Zusammenhang stehen. Daraus folgt, daß in Betonen mit NW-Zementen, bei denen entsprechend DIN 1164 Teil 1 die nach isothermer Lagerung ermittelte Hydrationswärme auf $H_{Z(7d)} \leq 270 \text{ kJ/kg}$ begrenzt ist, auch bei teiladiabatischen Bedingungen eine geringere Bauteilerwärmung zu erwarten ist (Bild 3), häufig jedoch auf Kosten einer baupraktisch nicht akzeptablen Festigkeitsentwicklung. Die Begrenzung der Höchsttemperatur im Bauteil während der Hydratation einerseits und das Erreichen einer ausreichend schnellen Festigkeitsentwicklung andererseits ist demnach eine betontechnische und ausführungstechnische Optimierungsaufgabe.

2.3 Maßgebende Hydrationswärme für die Erhöhung der Temperatur in einem Betonbauteil

Für die von einem Zement insgesamt freisetzbare Hydrationswärme $H_{Z\infty}$ (Tafel 1) wird auch der Begriff „Wärmetönung“ [K2] verwendet. Man kann damit die erreichbare Höchsttemperatur unter adiabatischen Bedingungen abschätzen [E1, G1]. Dazu ein Beispiel:

Tafel 2 Hydrationswärme von deutschen Zementen, bestimmt als Lösungswärme nach DIN 1164 Teil 8 (Ausgabe November 1978), [W3]

Table 2 Heat of hydration of German cements determined as heats of solution in accordance with DIN 1164, Part 8 (issued November 1978), [W3]

Zementfestigkeitsklasse	Hydrationswärme H_Z (t) in J/g nach Tagen			
	1	3	7	28
Z 25, Z 35 L	60...175	125...250	150...300	200...375
Z 35 F, Z 45 L	125...200	200...335	275...375	300...425
Z 45 F, Z 55	200...275	300...350	325...375	375...425

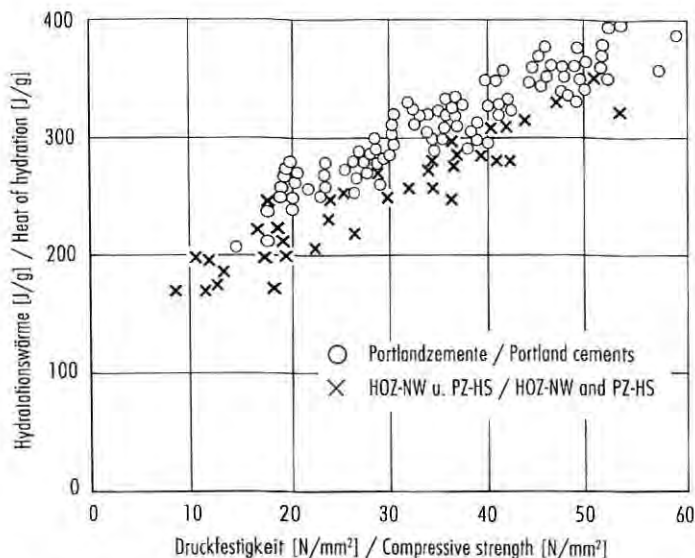


Bild 4 Hydrationswärme verschiedener Zemente in Abhängigkeit von der erreichten Druckfestigkeit nach Spohn [S3]

Fig. 4 Heats of hydration of various cements as a function of the compressive strength reached, according to Spohn [S3]

Bei einer Wärmekapazität eines Normalbetons von

$$Q_b = c_b \cdot \rho_b \approx 1,1 \cdot 2350 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) = 2585 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$$

reicht eine insgesamt freigesetzte Wärmemenge von $H_{z\infty} = 480 \text{ kJ/kg}$ unter adiabatischen Verhältnissen aus, einen Normalbeton mit $z = 300 \text{ kg Portlandzement}/\text{m}^3$ um rd.

$$\Delta T_b = \frac{z \cdot H_{z\infty}}{Q_b} = \frac{300 \cdot 480}{2585} \approx 56 \text{ K}$$

zu erwärmen ($c_b \triangleq$ spez. Wärme ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); $\rho_b \triangleq$ Rohdichte (kg/m^3)).

Die „Wärmelöschung“ hat allerdings, außer bei adiabatischer Erhärtung, nur geringe Bedeutung für die erreichbare Höchsttemperatur im Bauwerk — und gerade diese ist für viele baupraktische Fragen, z. B. für die Rißbildung unter Zwang, maßgebend [B1, T1]. Das kommt daher, daß adiabatische Bedingungen in der Praxis kaum vorkommen, die Wirklichkeit also zwischen den in Abschnitt 2.1 erläuterten Extremen der isothermen und der adiabatischen Bedingungen liegt. So sind annähernd isotherme Bedingungen im Bauteil nur dann möglich

- wenn sehr dünne Bauteile eine Frischbetontemperatur oberhalb der Umgebungstemperatur aufweisen und die freigesetzte Wärmemenge genau so groß ist wie die abfließende Wärmemenge,
- wenn bei beliebig dicken Bauteilen die entstehende Wärme z. B. durch eine Rohrkühlung vollständig abgeführt wird. In

diesem Fall kann man aus den isotherm ermittelten Hydrationswärmern (Tafel 2) die abzuführende Wärmemenge im jeweiligen Betonalter errechnen [E1, G1].

Im allgemeinen Fall ergibt sich die Höchsttemperatur im Bauwerk aus der Differenz zwischen entstehender und abfließender Hydrationswärme, wodurch ein „teiladiabatischer“ Temperaturverlauf hervorgerufen wird (siehe Bild 3 oben). Darin spielt auch die Geschwindigkeit, mit der die Hydrationswärme entsteht, eine ausschlaggebende Rolle. Wesentliche betontechnische und ausführungstechnische Einflußgrößen zur Voraussage des teiladiabatischen Temperaturverlaufs im Beton lassen sich wie folgt benennen:

Von seiten des Zements [K2] sind es alle chemischen und physikalischen Eigenschaften, die für die insgesamt freisetzbare Hydrationswärme (Hydrationsenthalpie) sowie für den zeitlichen Verlauf der Hydrationswärmefreisetzung maßgeblich sind. Dies sind im wesentlichen:

- Chemische Zusammensetzung des Zements (Klinkerphasen),
- Korngrößenverteilung (Mahlfeinheit),
- Lagerung vor dem Verbrauch (geringe Vorhydratation mit Luftfeuchtigkeit),
- Wasserzementwert (je größer das Wasserangebot, um so größer die Hydrationsgeschwindigkeit und der Hydrationsgrad).

Von seiten der Betonzusammensetzung und der Bauausführung [G1]:

- Bauteildicke,
- Zementgehalt,
- Wärmekapazität des Betons (z. B. abhängig von der Art und Rohdichte des Zuschlags),
- Wärmeleitfähigkeit des Betons,
- Wärmeübergangsbedingungen an den Grenzen Beton/Schalung/Luft usw.,
- Frischbetontemperatur,
- Lufttemperatur (Umgebungsbedingungen),
- Künstliche Kühlungsmaßnahmen.

Aus der Vielfalt der Einflußfaktoren sowie aus ihrer gegenseitigen Beeinflussung wird ersichtlich, daß eine rechnerische Vorherbestimmung der Bauteilerwärmung infolge Hydrationswärme unter Berücksichtigung der maßgeblichen baupraktischen Einflüsse erhebliche Unsicherheiten aufweist. Dies gilt selbst bei Heranziehung verfeinerter Rechenmodelle, z. B. von Breughel [B4] entwickelt, weil die Einflußparameter in der Regel nicht ausreichend vorherbestimmbar sind.

Schon die Untersuchungen von Klieger [K3], siehe Bild 2, lassen erkennen, daß die Temperatur während der Hydratation auch die Struktur und Art der Hydrationsprodukte beeinflusst, z. B. die erreichbare Druckfestigkeit. Dadurch wird die Berechnung der Hydrationswärme aus den Klinkerphasen nicht einfacher [B4], weil die freigesetzte Wärme nicht nur in ihrer zeitlichen Entwicklung, sondern auch in der Gesamthöhe temperaturabhängig ist.

Für den praktischen Bedarf ist es deshalb zweckmäßig, mit der vorgesehenen Frischbetontemperatur den adiabatischen Temperaturverlauf für die vorgesehene Betonzusammensetzung auf der Basis von adiabatischen oder näherungsweise auch teiladiabatischen Hydratationsverläufen zu ermitteln. Neben adiabatischen und isothermen Meßverfahren wird nachfolgend die Durchführung und Auswertung eines teiladiabatischen Versuchs beschrieben einschließlich der näherungsweisen Ermittlung des adiabatischen Temperaturverlaufs.

3 Prüfverfahren zur Ermittlung der Hydratationswärme

3.1 Isotherme Prüfverfahren

Wie bereits erwähnt, läßt sich die Hydratationswärme der verschiedenen Zemente unter isothermen Erhärtingsbedingungen (20 °C, konservierte Lagerung) gemäß DIN 1164 Teil 8 [D1] ermitteln. Gemessen wird die Lösungswärme mit einer Mischung aus Salpeter- und Flußsäure im sogenannten Lösungskalorimeter, und zwar des nicht hydratisierten Zements sowie des hydratisierten Zementsteins mit Wassorzementwert $w/z = 0,40$. Aus der Differenz der Lösungswärmen ergibt sich die Hydratationswärme $H_{Z(t)}$ (siehe Tafel 2). Die Hydratationswärme im Alter von 7 Tagen $H_{Z(7\text{ d})}$ dient zur Beurteilung der Eigenschaft NW (niedrige Wärmeentwicklung). Für NW-Zemente wird $H_{Z(7\text{ d})} \leq 270 \text{ kJ/kg}$ verlangt.

Ein weiteres (fast) isothermes Prüfverfahren wurde in Form des Wärmefluß-Kalorimeters entwickelt [K1]. Es arbeitet mit wenigen Gramm Zement und gestattet insbesondere auch die Messung der Wärmeentwicklung beim ersten Kontakt des Zements mit Wasser. Es wird deshalb auch dazu benutzt, um Veränderungen in den Anfangsreaktionen des Zements, z. B. mit Zusatzmitteln, festzustellen. Gemessen werden geringste Temperaturerhöhungen in dem wärmeleitenden Träger der Probe. Daraus ergibt sich, daß die Genauigkeit des Geräts dann begrenzt ist, wenn nur noch wenig Wärme/Zeiteinheit entwickelt wird. Damit scheidet das Gerät auch aus, um die Gesamthydratationswärme eines Zements, die Wärmetönung, ausreichend genau zu ermitteln.

3.2 Adiabatische Prüfverfahren

Schon früh wurden adiabatische Kalorimeter entwickelt, um die Hydratationswärme des Zements in Mörtel oder Beton zu ermitteln [B2, K4, V1]. Die Kalorimeter zeichnen sich dadurch aus, daß man eine Mörtel- oder Betonprobe in ein Gefäß füllt und dieses in einen weiteren Behälter einbringt. Durch meß- und regeltechnische Einrichtungen muß sichergestellt werden, daß die Temperatur zwischen Gefäß und Behälter stets dem zeitlichen Verlauf der Betontemperatur entspricht, damit keine Wärme aus dem Beton abfließt. Die Temperaturentwicklung im Beton entspricht dann adiabatischen Bedingungen. Sie kann mit Hilfe der spezifischen Wärme des Betons und des bekannten Zementgehalts in Hydratationswärme des Zements umgerechnet werden. Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren besteht darin, daß aus regeltechnischen Gründen zwischen Beton und Umgebung stets ein Temperaturunterschied vorhanden sein muß, um die Temperaturregelung auszulösen. Dadurch besteht die Gefahr,

daß die gesuchte adiabatische Betontemperatur durch die Regelungseinrichtung „geführt“ wird. Erst die moderne Meß- und Regeltechnik scheint hier zu befriedigenden Ergebnissen zu führen [E2, L4].

3.3 Teiladiabatische Prüfverfahren allgemein

Praktisch alle Temperaturverläufe in Bauteilen weisen „teiladiabatischen“ Charakter auf (siehe Bilder 3 und 5). Wenn es gelingt, in ei-

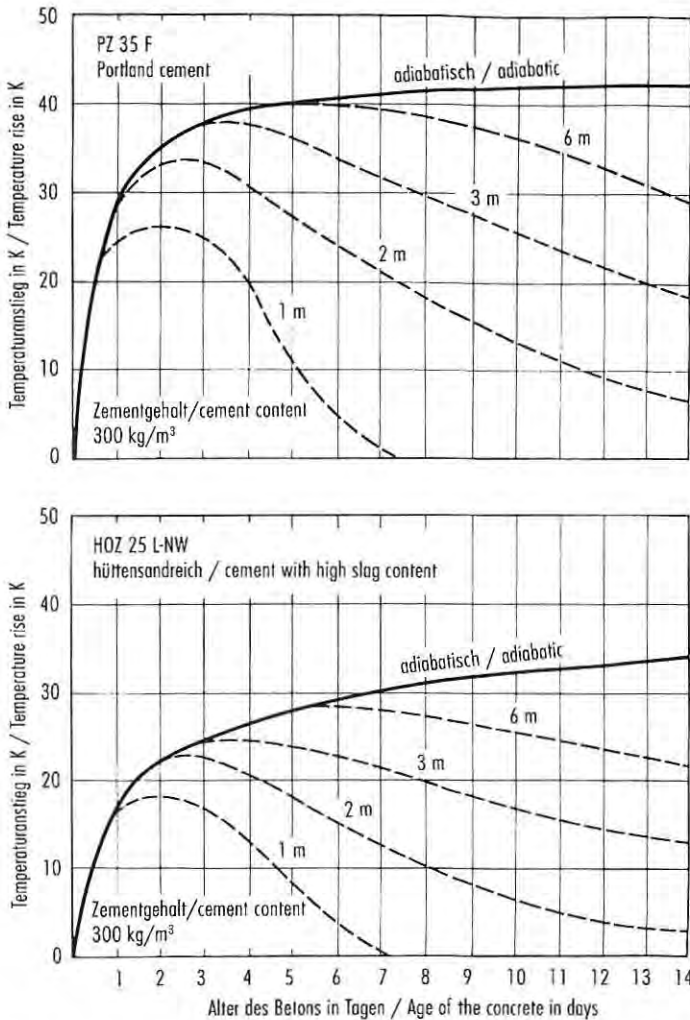


Bild 5 Verlauf des Temperaturanstiegs im Kern von Betonbauteilen unterschiedlicher Dicke nach Basalla [B1]

Fig. 5 Progress of the temperature rise at the centre of concrete components of varying thickness, according to Basalla [B1]

nem Meßgerät einen ähnlichen Temperaturverlauf nachzufahren und Wärmeverluste zu registrieren, ergeben sich drei Vorteile:

- a) Im Gegensatz zum isothermen Versuch wird stets ein erheblicher Einfluß der Temperaturerhöhung auf die Wärmeentwicklung berücksichtigt.
- b) Die Prüfung bedarf keiner Temperaturregelung und kann deshalb auch nie „außer Kontrolle“ geraten.
- c) Unter Berücksichtigung der Verluste läßt sich die zugehörige Hydrationswärme berechnen. Sie stellt im Regelfall eine untere Abschätzung der adiabatisch freigesetzten Wärme dar. Mit Hilfe einer zutreffenden Reifefunktion läßt sich zusätzlich die beschleunigte Wärmeentwicklung infolge der erhöhten Temperatur berücksichtigen. Daraus läßt sich der adiabatische Temperaturverlauf wirklichkeitsnah berechnen.

Man unterscheidet teiladiabatische Versuche, die an standardisierten Mörtel- oder Betonzusammensetzungen durchgeführt werden und solche, die sich auf aktuelle Betonzusammensetzungen beziehen. Den ersten Fall erfaßt die französische Norm NF P 15-436 [N1] mit dem Kalorimeterversuch nach Langavant. Der untersuchte Mörtel $Z:G:W = 1:3:0,5$ enthält den zu untersuchenden Zement als einzigen Versuchsparameter. Die Mörtelmasse beträgt stets $350 + 1050 + 175 = 1575$ g. Als Ergebnis wird in einem genormten Thermosgefäß die Hydrationswärme des Zements bis zum Alter von 7 Tagen ermittelt. Auch das Schnellverfahren [H3] zur Überprüfung gleichbleibender Anfangsreaktionen arbeitet mit einem Standardmörtel. Das nachstehend beschriebene teiladiabatische Prüfverfahren zur Ermitt-

Tafel 3 Vergleich der Prüfverfahren zur Bestimmung der Hydrationswärme des Zementes

Table 3 Comparison of the test methods for determining the heat of hydration of cement

Verfahren	Probe	Temperatur-lagerung	Ergebnis
Lösungs-wärme	Zement-leim	isotherm (i. d. R. 20 °C)	Joule / Gramm bis zum Zeitpunkt der Prüfung
Wärme-fluß-kalorimeter	Zement-leim (hoher w/z)	isotherm	Joule/(Gramm · Stunde) als Funktion der Zeit bis ca. 3 Tage
Adiabatisches Kalorimeter	Beton	adiabatisch	Temperaturerhöhung als Funktion der Zeit
Teiladiabatische Kalorimetrie nach NF P 15-436	Norm-mörtel	teiladiaba-tisch	Joule / Gramm als Funktion der Zeit bis ca. 7 Tage
Teiladiabatische Kalorimetrie nach FIZ	Beton	teiladiaba-tisch	Temperaturerhöhung als Funktion der Zeit bis ca. 5 Tage

lung der adiabatischen Temperaturerhöhung eines Betons beliebiger Zusammensetzung wird seit einigen Jahren im Forschungsinstitut der Zementindustrie angewendet. In Tafel 3 werden die wesentlichen Merkmale des Verfahrens, nämlich Probenart, Temperaturlagerung und Art des Ergebnisses mit den zuvor beschriebenen Prüfverfahren verglichen.

4 Teiladiabatische Betonuntersuchung im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ)

Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie zu Fragen der teiladiabatischen Kalorimetrie durchgeführten Untersuchungen wurden finanziell von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) unterstützt.

4.1 Meßprinzip

In Abwandlung des Verfahrens von Langavant [N1] wird hier als Ergebnis entsprechend dem Gebrauch der Baupraxis die Temperaturerhöhung des Betons direkt ermittelt. Die Prüfung läuft folgendermaßen ab:

Eine Betonprobe wird direkt nach dem Mischen in ein Isoliergefäß (Thermos-Gefäß) eingebracht. Die entwickelte Hydrationswärme teilt sich in drei Anteile auf:

- a) Anteil, der zur Temperaturerhöhung der Betonprobe führt
- b) Anteil, der zum Aufwärmen des Gefäßes erforderlich ist (Wärmekapazität des Gefäßes)
- c) Anteil, der entsprechend der Isolationscharakteristik der Gefäßwandungen in die Umgebung abfließt

Der Temperaturverlauf der Betonprobe wird direkt gemessen. Der Wärmeverlust ist näherungsweise proportional zur Differenz zwischen Beton- und Umgebungstemperatur. Der Proportionalitätsfaktor wird für den jeweiligen Beton bestimmt, indem nachträglich an der künstlich erhitzten Betonprobe die Temperaturabklingkurve im Thermos-Gefäß gemessen wird. Die Probe ist dabei soweit hydratisiert, daß sie keine ins Gewicht fallende Hydrationswärme mehr entwickelt. Die Wärmekapazität des Gefäßes wird einmalig ermittelt.

4.2 Prüfgerät

Bild 6 zeigt das verwendete Thermos-Gefäß (Typ 29, Baureihe B, Hochvakuum, Hersteller: Karlsruher Technische Werke). Es kann eine Norm-Konservendose mit einem Durchmesser von 99 mm und einer Höhe von 230 mm aufnehmen. Damit das Isoliergefäß nicht beschädigt wird, ist der Zwischenraum zur Blechdose mit Schaumstoff ausgekleidet. Die Temperatur der Betonprobe wird mittig mit einem PT 100 Widerstandsmeßfühler gemessen. Er taucht in ein dünnes ölgefülltes Röhrchen aus Messing ein. Wegen der geringen elektrischen Leistung des PT 100 (Meßstrom 2,5 mA, Meßspannung ($\approx$ 300 mV) kann kontinuierlich gemessen werden. Die Umgebungstemperatur ($\approx$ 20 °C) wird ebenfalls mit einem PT 100 ermittelt. Sie wird auf ± 1 K konstant gehalten. Wärmequellen (z. B. Strahler) und starker Luftzug ($> 0,5$ m/s) sind zu vermeiden. Bei

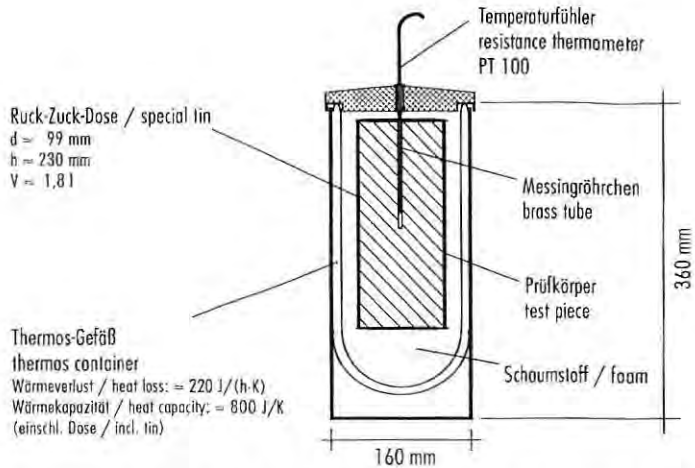


Bild 6 Thermos-Gefäß für die Bestimmung der Hydrationswärme in Betonen

Fig. 6 Thermos container for determining the heat of hydration in concretes

mehreren Gefäßen soll der gegenseitige Abstand mindestens 10 cm betragen.

4.3 Verwendete Bezeichnungen

t	= Zeit in h
T_P	= Temperatur des Prüfkörpers in $^{\circ}\text{C}$
ΔT_P	= Temperaturerhöhung des Prüfkörpers in K
$T_{P, V}$	= Temperatur der erwärmten hydratisierten Probe in $^{\circ}\text{C}$
T_U	= Konstante Umgebungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$
ΔT_{HW}	= Temperaturerhöhung, die der freigesetzten Hydrationswärme entspricht, in K
C_P	= Wärmekapazität des Prüfkörpers in J/K
C_{Therm}	= Wärmekapazität des Thermosgefäßes (einschl. Dose) in J/K
K_{Therm}	= Isolierwirkung des Thermosgefäßes in $\text{J/(h} \cdot \text{K)}$
a_P	= Zeitkonstante des Thermosgefäßes für den individuellen Prüfkörper in 1/h
P	= elektrische Leistung für die Kalibrierung des Thermosgefäßes in J/h
R	= Reife (äquivalentes Alter) in h
k_T	= Temperaturfaktor nach Arrhenius
$\Delta T_{\text{adiab.}}$	= Quasiadiabate in K
$T_{b, fr}$	= Frischbetontemperatur in $^{\circ}\text{C}$

4.4 Kalibrierung

Die Wärmekapazität C_{Therm} des Thermos-Gefäßes, siehe Gleichung (1), kann in Anlehnung an die in NF P 15-436 [N1] beschriebene Methode ermittelt werden: Die Isolationscharakteristik K_{Therm} des Thermos-Gefäßes erhält man durch Messung der Ausgleichstemperaturen T_P bei verschiedenem konstanten Eintrag elektrischer Energie, siehe Gleichung (2). Erwartet wird näherungsweise eine

Temperaturunabhängigkeit der Isolationscharakteristik, also $K_{\text{Therm}} \approx \text{const.}$ Weiterhin wird die Temperaturabfallkurve eines Probekörpers mit bekannter Wärmekapazität C_p (z.B. einer Wasserfüllung des Probenbehälters) ermittelt. Daraus wird die zugehörige Zeitkonstante a_p gemäß Gleichung (5) bestimmt. Mit Hilfe von Gleichung (1) läßt sich nun die Wärmekapazität C_{Therm} des Thermos-Gefäßes berechnen.

$$C_{\text{Therm}} = \frac{K_{\text{Therm}}}{a_p} - C_p \quad (1)$$

$$K_{\text{Therm}} = \frac{P}{[T_p - T_u]} \quad (2)$$

$$\Delta T_{\text{HW}} = [\Delta T_p - \Sigma (\Delta T_{p,v})_i] \cdot \left(1 + \frac{C_{\text{Therm}}}{C_p} \right) \quad (3)$$

$$(\Delta T_{p,v})_i = -a_p \cdot [T_p - T_u]_i \cdot \Delta t_i \quad (4)$$

$$a_p = \frac{-\frac{dT_{p,v}}{dt}}{[T_{p,v} - T_u]} \approx \text{const.} \quad (5)$$

4.5 Durchführung der Prüfung

Die Temperatur des Frischbetons soll mit der Umgebungstemperatur übereinstimmen und nicht mehr als $\pm 2 \text{ K}$ davon abweichen. Die Messung des Temperaturanstiegs soll rd. 10 Minuten nach dem Mischen beginnen und erstreckt sich über rd. 5 Tage. Danach wird die Betonprobe entnommen und mit der dicht verschlossenen Dose rd. 3 Wochen bei 20°C gelagert, um die Hydratation abklingen zu lassen. Anschließend wird die Betonprobe mit der Dose auf rd. 50°C in einem Wärmeschrank aufgeheizt und wieder in das Thermos-Gefäß eingesetzt. Mit Hilfe der gemessenen Temperaturabklingkurve wird die für diese Probe gültige Zeitkonstante a_p nach Gleichung (5) ermittelt. Die Wärmekapazität des Prüfkörpers C_p wird aus seiner Masse m_p und der geschätzten spezifischen Wärme c_p berechnet (s. Tafel 4). Die Berechnung von C_p nach Gleichung (1) aus den Kalibrier- und Prüfwerten bringt keinen Gewinn an Genauigkeit für die Berechnung der Temperaturerhöhung ΔT_{HW} .

Die Probe ist zu Beginn und während aller Prüfschritte zu wiegen. Der Gewichtsverlust dient als Kontrolle der Dichtigkeit des Probenbehälters und muß kleiner 2 Gramm betragen.

4.6 Berechnung des Temperaturanstiegs entsprechend der entwickelten Gesamtwärme

Die drei im Abschnitt 4.1 angegebenen Anteile, in die sich die Gesamtwärme aufteilt, sind in Gleichung (3) enthalten. Sie werden als Temperaturanteile (siehe Bild 7) in $\frac{1}{2}$ -Stunden-Intervallen aufsummiert, siehe Gleichungen (3), (4) und (5). Tafel 4 zeigt in etwas größeren Zeitintervallen ein Beispiel für die Berechnung. Das Ergebnis ist der Temperaturanstieg ΔT_{HW} der Betonprobe aufgrund der verlustfreien Hydrationswärme, die unter den beobachteten teilladiabatischen Bedingungen entstanden ist.

Tafel 4 Beispiel für die Berechnung des der Hydratationswärme entsprechenden Temperaturanstiegs

Table 4 Example of the calculation of the temperature rise corresponding to the heat of hydration

t	Δt	T_P	ΔT_P	T_U	$T_P - T_U$	$\Delta T_{P,V}$	$\Sigma \Delta T_{P,V}$	$\frac{\Delta T_{P^*}}{\Sigma \Delta T_{P,V}}$	ΔT_{HW}
h	h	°C	K	°C	K	K	K	K	K
0	1,0	19,9	0,0	19,9	0,3	-0,01	0,00	0,00	0,0
1	1,0	20,5	0,6	20,0	0,6	-0,02	-0,01	0,61	0,7
2	1,0	20,7	0,8	20,0	0,9	-0,03	-0,03	0,83	1,0
3	1,0	21,0	1,1	20,0	1,3	-0,05	-0,06	1,16	1,4
4	1,0	21,5	1,6	20,0	2,0	-0,08	-0,11	1,71	2,1
5	1,0	22,4	2,5	19,9			-0,19	2,69	3,2
...		...	...	...				...	...
15	1,0	40,1	20,2	20,1	20,2	-0,81	-5,14	25,34	30,4
16	1,0	40,4	20,5	20,1	20,4	-0,82	-5,95	26,45	31,7
17	1,0	40,5	20,6	20,1	20,4	-0,82	-6,77	27,37	32,8
18	1,0	40,5	20,6	20,1	20,4	-0,82	-7,59	28,19	33,8
19	1,0	40,4	20,5	20,1	20,4	-0,82	-8,41	28,91	34,7
20	1,0	40,2	20,3	20,0	20,3	-0,82	-9,23	29,53	35,4
...		...	...	...				...	...
80	4,0	22,9	3,0	20,0	2,8	-0,44	-33,08	36,08	43,3
84	4,0	22,6	2,7	20,0	2,5	-0,40	-33,52	36,22	43,5
88	4,0	22,3	2,4	19,9	2,2	-0,35	-33,92	36,32	43,6
92	4,0	22,0	2,1	20,0	1,9	-0,31	-34,27	36,37	43,7
96	4,0	21,9	2,0	20,1	1,8	-0,29	-34,58	36,58	43,9
100		21,7	1,8	19,9			-34,87	36,67	44,0

$$m_p = 4.040 \text{ kg} \quad c_p = 1000 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$C_p = 4.040 \cdot 1000 = 4040 \text{ J/K}$$

$$\text{Verlustfaktor/loss factor } a_p = 0.0403 \text{ l/h}$$

$$1 + C_{\text{Therm}}/C_p = 1 + 800/4040 = 1.20$$

4.7 Übertragung des Ergebnisses auf adiabatische Bedingungen durch Berücksichtigung der Reife

Wegen der teiladiabatischen Bedingungen liegt die berechnete Temperaturanstiegskurve unterhalb der gesuchten Temperaturanstiegskurve für adiabatische Prüfbedingungen. Ein besserer Näherungswert für die adiabatische Temperaturkurve wird erreicht, wenn man die höhere Reife des Betons in der berechneten Temperaturanstiegskurve gegenüber dem gemessenen teiladiabatischen Temperaturverlauf berücksichtigt. Dafür eignet sich die Temperaturgewichtungsfunktion von Arrhenius (siehe Gleichungen (6) und (7) sowie Bild 8).

Für die anzusetzende Aktivierungsenergie werden für Portlandzemente der Wert nach Freiesleben [F1] und für Hochofenzemente der Wert nach Roy und Idorn [R3] vorgeschlagen. Unter der Voraussetzung, daß die Reifefunktion zutrifft, kann man die veränderte Reaktionsgeschwindigkeit für beliebige Temperaturverläufe berechnen. Dies gilt besonders für näherungsweise adiabatische Bedingungen, wo die im Versuch ermittelte Hydratationswärme lediglich zeitlich zu einem früheren Zeitpunkt auftritt.

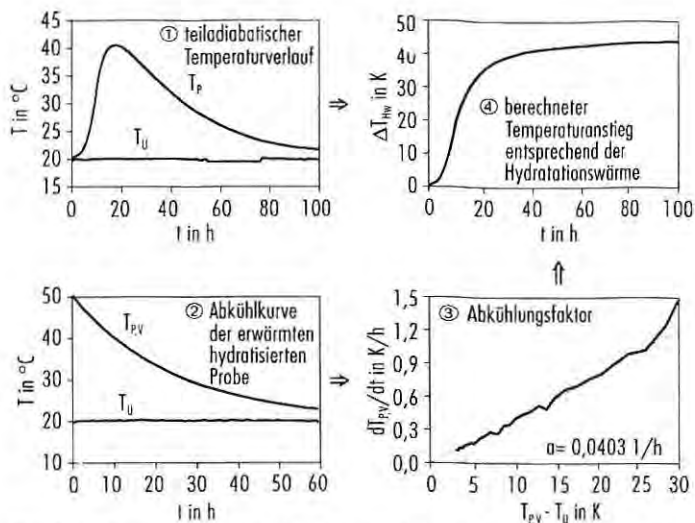


Bild 7 Bestimmung der zur Hydrationswärme zugehörigen Temperaturerhöhung aus einem teiladiabatischen Kalorimeterversuch

Fig. 7 Determination of the temperature rise associated with the heat of hydration from a semi-adiabatic calorimeter test

- ① semi-adiabatic temperature curve
- ② cooling curve of the heated hydrated sample
- ③ cooling factor
- ④ calculated temperature rise corresponding to heat of hydration

$$k_T = e^{\frac{A}{R_g} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T} \right)} \quad (6)$$

A : Aktivierungsenergie (J/mol)

R_g: Allgemeine Gaskonstante (8.314 J/(mol · K))

$$\frac{A}{R_g} \approx \begin{cases} 4000 & \text{für } T \geq 20^\circ\text{C} \\ 4000 + 175 \cdot (20 - T) & \text{für } T < 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{für Portland-} \\ \text{zement (PZ)} \end{matrix}$$

$$\frac{A}{R_g} \approx 6000 \quad \text{für Hochofenzement (HOZ)}$$

$$\text{Reife } R = \int_0^t k_T dt \quad (7)$$

Die Korrektur wird schrittweise entsprechend den Gleichungen (8), (9) und (10) vorgenommen, siehe auch Bild 9.

$$\Delta T_{\text{adiab.}}(t) = \Delta T_{\text{HW}}(R) \quad (8)$$

$$\text{mit Zeit } t = \int_0^R \frac{1}{k_T} dt \quad (9)$$

$$\text{und } T = T_{b, fr} + \Delta T_{\text{HW}}(R) = T_{b, fr} + \Delta T_{\text{adiab.}}(t) \quad (10)$$

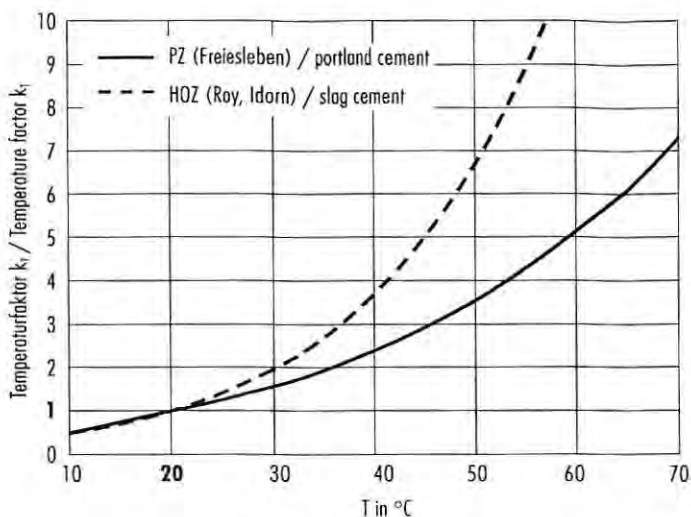


Bild 8 Temperaturfaktor nach Arrhenius zur Berücksichtigung einer von 20° abweichenden Lagerungstemperatur für Werte der Aktivierungsenergie nach Freiesleben [F1] bzw. Roy und Idorn [R3]

Fig. 8 Arrhenius temperature factor for taking account of storage temperatures deviating from 20°C for values of the activation energy according to Freiesleben [F1], and Roy and Idorn [R3]

Tafel 5 Beispiel für die Abschätzung der adiabatischen Temperaturerhöhung

Table 5 Example of the estimation of the adiabatic temperature rise

teiladiabatisch/semi-adiabatic						$\Delta T_{HW} =$	adiabatisch/adiabatic				
I	Δl	T_P	k_T	ΔR	R	$\Delta T_{adiab.}$	$T_{adiab.}$	k_T	Δt	t	
h	h	°C	-	h	h	K	°C	-	h	h	
0		19,9				0,0	0,0	20,0		0,0	
1	1,0	20,5	20,2	1,009	1,01	1,0	0,7	20,7	20,4	1,017	0,99
2	1,0	20,7	20,6	1,028	1,03	2,0	1,0	21,0	20,9	1,041	0,99
3	1,0	21,0	20,9	1,040	1,04	3,1	1,4	21,4	21,2	1,057	0,98
4	1,0	21,5	21,3	1,060	1,06	4,1	2,1	22,1	21,7	1,084	0,98
5	1,0	22,4	22,0	1,094	1,09	5,2	3,2	23,2	22,7	1,130	0,97
...		...				...	...	...			...
15		40,1				23,0	30,4	50,4			13,1
16	1,0	40,4	40,3	2,417	2,42	25,4	31,7	51,7	51,1	3,700	0,65
17	1,0	40,5	40,5	2,437	2,44	27,9	32,8	52,8	52,3	3,876	0,63
18	1,0	40,5	40,5	2,442	2,44	30,3	33,8	53,8	53,3	4,031	0,61
19	1,0	40,4	40,5	2,437	2,44	32,7	34,7	54,7	54,2	4,173	0,58
20	1,0	40,2	40,3	2,422	2,42	35,2	35,4	55,4	55,1	4,300	0,56
...		...				...	...	...			...
80		22,9				130,2	43,3	63,3			34,1
84	4,0	22,6	22,8	1,135	4,54	134,8	43,5	63,5	63,4	5,815	0,78
88	4,0	22,3	22,5	1,120	4,48	139,3	43,6	63,6	63,5	5,846	0,77
92	4,0	22,0	22,2	1,105	4,42	143,7	43,7	63,7	63,6	5,865	0,75
96	4,0	21,9	22,0	1,094	4,38	148,0	43,9	63,9	63,8	5,898	0,74
100	4,0	21,7	21,8	1,087	4,35	152,4	44,0	64,0	64,0	5,935	0,73

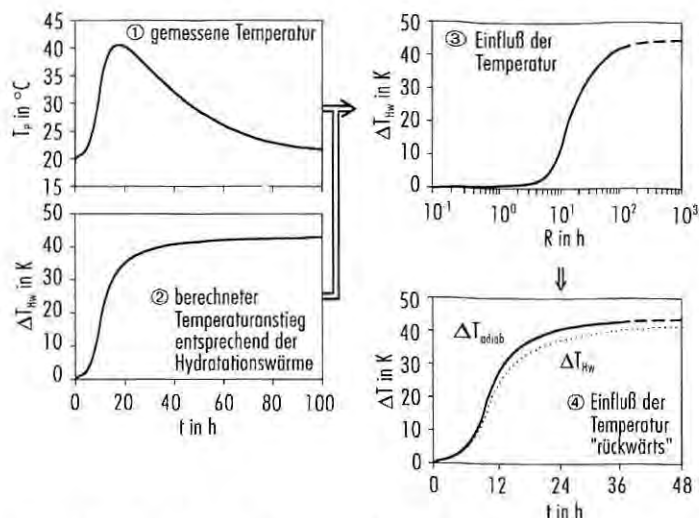


Bild 9 Abschätzung der adiabatischen Temperaturerhöhung aus einem teiladiabatischen Kalorimeterversuch

Fig. 9 Estimation of the adiabatic temperature rise from a semi-adiabatic calorimeter test

- ① measured temperature
- ② calculated temperature rise corresponding to heat of hydration
- ③ influence of the temperature
- ④ influence of the temperature "in reserve"

Tafel 5 zeigt entsprechend Tafel 4 die Durchführung der schrittweisen Berechnung. Der über 100 Stunden teiladiabatisch ermittelte Temperaturverlauf entspricht, verglichen mit der errechneten adiabatischen Temperaturkurve nur einem (adiabatischen) „Alter“ von rd. 38 Stunden. Daraus läßt sich für eine Prüfdauer von rd. 100 Stunden unter adiabatischen Bedingungen eine Temperaturerhöhung für den untersuchten Beton von rd. $\Delta T_{HW\infty} \approx 45 \text{ K}$ durch exponentielle Extrapolation ermitteln.

4.8 Vergleich mit adiabatischem Versuch

In Bild 10 werden die Ergebnisse zweier Versuche unter weitgehend adiabatischen Bedingungen mit denen der teiladiabatischen Versuche verglichen. Es handelt sich um Betone mit einem Zementgehalt von 330 kg/m^3 (PZ 35 F bzw. HOZ 35 L NW-HS) und einem Wasserzementwert von 0,50. Der Wärmeverlust der großvolumigen Probekörper ($\approx 150 \text{ dm}^3$), die mit 30 cm dickem Styrolhartschaum isoliert waren, wurde aus dem Temperaturverlust im Alter von mehreren Wochen abgeleitet. Die gemessenen Temperaturerhöhungen wurden entsprechend dem beschriebenen Verfahren korrigiert, wobei sich in den ersten Tagen nur kleine Abweichungen zwischen gemessener Temperaturerhöhung und berechneter Adiabate ergeben. In Bild 10 unten ist zu erkennen, daß im Vergleich mit diesen „wahren“ Adiabaten der teiladiabatische Kalorimeterversuch unter Zu-

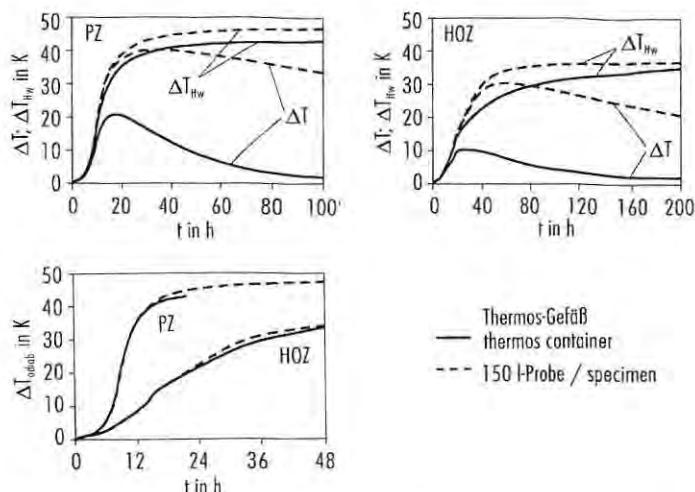


Bild 10 Vergleich des teiladiabatischen Kalorimeterversuchs mit einem nahezu adiabatischen Versuch für zwei Betone

Fig. 10 Comparison of the semi-adiabatic calorimeter test with a virtually adiabatic test for 2 concretes

grundlage der unterschiedlichen Aktivierungsenergie für die beiden Zemente jeweils eine gute Abschätzung der adiabatischen Temperaturentwicklung für die ersten Tage erlaubt.

4.9 Abschätzung der Erwärmung bei beliebiger Bauteildicke

Wenn sich aus dem teiladiabatischen Kalorimeterversuch — wie in Abschnitt 4.8 gezeigt — der Erwärmungszeitverlauf eines sehr dicken Bauteils gut abschätzen läßt, so ist dies auch für andere beliebige Bauteildicken durch eine entsprechende rechnerische Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Hydratationsgeschwindigkeit möglich. Im Gegensatz zu dem rechnerisch sehr einfach zu handhabenden Grenzfall der Adiabate (vgl. Abschnitt 4.7) ist hier allerdings der Einsatz aufwendigerer numerischer Methoden notwendig, um formal exakte Lösungen zu berechnen. Dazu kommen für einfache Bauteilgeometrien Rechenprogramme in Frage, die die allgemeine Wärmeleitungsgleichung für die angesetzten Randbedingungen mit dem Finite-Differenzen-Verfahren lösen, im allgemeinen Fall der Einsatz der Finite-Elemente-Methode. Dabei kann die aus dem Laborversuch abgeleitete Hydratationswärme-Reife-Kurve als Modellgleichung für den Wärmequellenterm angesetzt werden.

5 Zusammenfassung

Die Voraussage der Temperaturentwicklung in einem Bauteil ist wesentlich zur Abschätzung der Festigkeitsentwicklung sowie unerwünschter Eigen- und Zwangspannungszustände. Dafür gibt es unterschiedliche Verfahren, die kurz erläutert werden. Die Berech-

nung der Temperaturentwicklung des Betons aus der Hydrationswärmebestimmung des Zementes mittels Lösungskalorimetrie nach DIN 1164 Teil 8 ergibt zu niedrige Werte, weil die Hydrationswärme ebenso wie die Festigkeit bei konstanter Lagerungstemperatur von 20°C ermittelt wird und somit lediglich einen Materialkennwert darstellt. Unter adiabatischen Bedingungen erhält man für einen gegebenen Beton den maximal erreichbaren Temperaturverlauf infolge Hydrationswärme in einem massigen Bauteil. Daraus lassen sich die teiladiabatischen Temperaturverläufe in Bauteilen, insbesondere die Höchsttemperatur, je nach Bauteilabmessungen und Wärmeabflußbedingungen gut abschätzen.

Da die Messung der Temperaturerhöhung eines Betons unter adiabatischen Bedingungen erhebliche prüftechnische Probleme aufweist, wird ein einfach und sicher zu handhabendes teiladiabatisches Prüfverfahren vorgestellt. Verwendet werden Prüfkörper mit Durchmesser $d = 99 \text{ mm}$ und $h = 230 \text{ mm}$ und ein hoch wärmedämmendes Thermosgefäß. Der Temperaturverlauf im Beton wird mit einem Widerstandsfühler PT 100 gemessen. Aus dem teiladiabatischen Temperaturverlauf kann der adiabatische Temperaturverlauf mit Hilfe der Wärmeverlustcharakteristik und einer Reifefunktion näherungsweise berechnet werden. Damit steht eine leicht zu handhabende Prüfmethode zur Verfügung, um verschiedene Betonzusammensetzungen im Hinblick auf ihr Hydrationswärmepotential zu vergleichen. Der benutzte Probenbehälter eignet sich im übrigen zur Herstellung von zylindrischen Prüfkörpern für Festigkeitsbestimmungen, so daß punktweise Festigkeitswerte an die Hydrationswärmeentwicklung gekoppelt werden können.

5 Summary

Prediction of the temperature development in a component is important for estimating the strength development and any unwanted internal or constrained stress conditions. Various methods are available for this purpose which are described briefly. Calculation of the temperature development of the concrete from determination of the heat of hydration of the cement using dissolution calorimetry in accordance with DIN 1164, Part 8, gives values which are too low because the heat of hydration as well as the strength are determined at a constant storage temperature of 20°C, and therefore represent only a material parameter. Adiabatic conditions give the maximum temperature curve which can be reached with a given concrete as a result of the heat of hydration in a massive component. From this it is possible to make a good estimate of the semi-adiabatic temperature behaviour in components, especially the highest temperature, on the basis of component dimensions and heat flow conditions.

Measurement of the temperature rise in a concrete under adiabatic conditions exhibits considerable problems from the point of view of test procedure, so a semi-adiabatic test method is proposed which is simple and reliable to use. Test pieces of diameter $d = 99 \text{ mm}$ and $h = 230 \text{ mm}$ and a highly heat-insulating thermos container are used. The temperature behaviour in the concrete is measured with a PT 100 resistance thermometer. From the semi-adiabatic temperature behaviour it is possible to make an approximate calculation of

the adiabatic temperature behaviour with the aid of the heat loss characteristic and a maturity function. This means that an easy-to-use test method is available for comparing the potential heats of hydration of different concrete compositions. The sample holder used is also suitable for making cylindrical specimens for strength measurements, so that spot strength values can be linked to the generation of the heat of hydration.

SCHRIFTTUM / LITERATURE

- [B1] Basalla, A.: Wärmeentwicklung im Beton. Zementaschenbuch 1964/65, S. 275/304, Bauverlag, Wiesbaden 1963
- [B2] Basalla, A.: Ein adiabatisches Kalorimeter zur Bestimmung der Wärmeentwicklung im Beton. Zement-Kalk-Gips 15 (1962) H. 3, S. 136/140
- [B3] Breitenbücher, R.: Zwangsspannungen und Rißbildung infolge Hydrationswärme, Dissertation TU München, 1989
- [B4] Breughel, K. van: Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based Materials. Dissertation TU Delft, 1991
- [C1] Carlsson, R. W.: Temperatures and stresses in mass concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 34 (1937/38), S. 497/515
- [D6] DIN 1164 Teil 8: Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement. Bestimmung der Hydrationswärme mit dem Lösungskalorimeter.
- [E1] Eisenmann, O.: Grundlagen der Temperaturberechnung des frischen und des erhärtenden Betons. Beton-Informationen 3/1970, S. 36/41
- [E2] ENEL-CRIS: Apparecchiature per la caratterizzazione termica dei materiali strutturali non omogenei — calorimetro, Milano 1991
- [F1] Freiesleben, Hansen, P., und Pederson, E.J.: Måleinstrument til kontrol af betons hærdning, Nordisk Betong, Nr. 1, 1977, S. 21-25
- [G1] Grube, H.: Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton. Elsner Verlag, Darmstadt, 1982
- [H1] Hampe, B.: Temperaturschäden im Beton, im besonderen im Massenbeton, und Maßnahmen zu ihrer Verhütung. 2. Aufl. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1944
- [H2] Hampe, B.: Temperaturschäden im Beton und Maßnahmen zu ihrer Verhütung. Der Bauingenieur 33 (1958) H. 1, S. 6/10
- [H3] Huber, H.: Schnellmethode zur Prüfung einer gleichmäßigen Wärmeentwicklung von Zementen. Zement und Beton, 33 (1988) H. 3, S. 162/163
- [K1] Keil, F.: Zement, Herstellung und Eigenschaften. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1971
- [K2] Kühl, H.: Zement-Chemie, Bände I, II und III, VEB Verlag Technik, Berlin 1956
- [K3] Klieger, P.: Effect of mixing and curing temperature on concrete strength. Proc. Amer. Concr. Inst. (1957/58), S. 1063/1083
- [K4] Karsch, K. H. und Schwiete, H. E.: Adiabatisches Kalorimeter zur Bestimmung der Hydrationswärme eines Zements. Zement-Kalk-Gips 16 (1963), S. 165/169
- [L1] Locher, F. W.: Chemie des Zements und der Hydrationsprodukte. Zementaschenbuch 48, Ausgabe, Bauverlag, Wiesbaden-Berlin 1984

- [L2] Locher, F. W. und Sillem, H.: Zementherstellung. Zementtaschenbuch 48. Ausgabe, Bauverlag, Wiesbaden-Berlin 1984
- [L3] Lea, F. M.: The Chemistry of Cement and Concrete. Edward Arnold (Publishers) Ltd., London 1956
- [L4] LCPC: Laboratoire central des Ponts et Chaussées. Adiabatisches Kalorimeter Bauart CERILH
- [N1] Norme française NF P 15-436: Mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique (dite méthode du calorimètre de Langavant)
- [R1] Richartz, W.: Über die Gefüge- und Festigkeitsentwicklung des Zementsteins. Betontechnische Berichte 1969, S. 67/83, Beton-Verlag, Düsseldorf 1970
- [R2] Rostásy, F. S. und Henning, W.: Zwang und Rißbildung in Wänden auf Fundamenten. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 407, 1990
- [R3] Roy, D.M., und Idorn, G.M.: „Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete“, ACI JOURNAL, Proceedings V. 79, No. 6, Nov.-Dez. 1982, pp. 444-457
- [S1] Springenschmid, R. und Nischer, P.: Untersuchungen über die Ursachen von Querrissen im jungen Beton. Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973) H. 9, S. 221/226
- [S2] Springenschmid, R.: Risse im Beton infolge Hydrationswärme. Zement-Kalk-Gips 44 (1991) H. 3, S. 132/138
- [S3] Spohn, E.: Zemente für Mass beton, Heidelberger Portländer 1963, H. 3, S. 25/29 (Werkszeitschrift der PZW Heidelberg)
- [T1] Thielen, G. und Grube, H.: Maßnahmen zur Vermeidung von Rissen im Beton. Beton- und Stahlbetonbau 85 (1990) H. 6, S. 161/167
- [T2] Temperatureffecten in zware betonconstructies tengevolge van de hydrateringwarmte van cement, C.U.R. Rapport 19 (1961)
- [V1] Vorläufiges Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter. beton 20 (1970) H. 12, S. 545/549
- [W1] Wischers, G.: Betontechnische und konstruktive Maßnahmen gegen Temperaturrisse in massigen Bauteilen. Betontechnische Berichte 1964, S. 21/58, Beton-Verlag, Düsseldorf 1965
- [W2] Wischers, G. und J. Dahms: Untersuchungen zur Beherrschung von Temperaturrissen in Brückenwiderlagern durch Raum- und Scheinfugen. Betontechnische Berichte 1968, S. 145/175, Beton-Verlag, Düsseldorf 1969
- [W3] Wischers, G.: Bautechnische Eigenschaften des Zementsteins, Zementtaschenbuch 48. Ausgabe, Bauverlag, Wiesbaden-Berlin 1984