

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>Kurzfassung</b>   |    |
| 1.1      | Deutsch . . . . .  | 3  |
| 1.2      | Englisch . . . . .   | 3  |
| <b>2</b> | <b>Einleitung</b> . . . . .  | 4  |
| <b>3</b> | <b>Bindemittleigenschaft „Hydratationswärme“</b>                         |    |
| 3.1      | Hydratation des Zements . . . . .  | 5  |
| 3.2      | Einflussfaktoren auf die Hydratationswärmeentwicklung . . . . .          | 7  |
| 3.3      | Zemente nach DIN 1164 . . . . .  | 11 |
| <b>4</b> | <b>Hydratationswärmeentwicklung im Beton</b>                             |    |
| 4.1      | Allgemeines zur Wärmeentwicklung . . . . .                               | 13 |
| 4.2      | Einflüsse aus der Betonrezeptur . . . . .                                | 13 |
| 4.3      | Einflüsse der Umgebungs- und bautechnischen<br>Randbedingungen . . . . . | 17 |
| 4.4      | Besonderheiten von hochfesten Betonen . . . . .                          | 19 |
| <b>5</b> | <b>Prüfverfahren</b>   |    |
| 5.1      | Definitionen . . . . .   | 21 |
| 5.2      | Isotherme Prüfverfahren . . . . .  | 22 |
| 5.3      | Adiabatische Prüfverfahren . . . . .                                     | 23 |
| 5.4      | Teiladiabatische Prüfverfahren allgemein . . . . .                       | 24 |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>6</b> | <b>FE-Berechnung der Temperaturniveaus in Probekörpern</b>                        |           |
| 6.1      | Ziel der FEM-Berechnung . . . . .   | 25        |
| 6.2      | Einstieg in die Temperaturberechnung . . . . .                                    | 26        |
| 6.3      | Teiladiabatischer Temperaturverlauf des Vorversuchs . . . . .                     | 29        |
| 6.4      | Berechnung des zeitlichen Verlaufs der<br>Hydratationswärme freisetzung . . . . . | 30        |
| 6.5      | Berechnung der Exponentialfunktion . . . . .                                      | 32        |
| 6.6      | FE-Berechnung der Temperaturverteilung im Probekörper . . .                       | 33        |
| 6.7      | Fehlerabschätzung . . . . .   | 36        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung</b> . . . . .  | <b>40</b> |
| <b>8</b> | <b>Ausblick</b> . . . . .   | <b>42</b> |
| <b>9</b> | <b>Literatur</b> . . . . .  | <b>43</b> |

## 1 Kurzfassung

### 1.1 Deutsch

Der Hydratationsprozess in Betonbauteilen ist von vielen Faktoren abhängig. Nicht nur die Zementzusammensetzung, sondern die Gesamtheit der Betonrezeptur im Zusammenspiel mit den Rand- und Übergangsbedingungen bestimmt sowohl die Höhe als auch den zeitlichen Verlauf der Hydratationswärmeentwicklung.

Die Besonderheiten des hochfesten Betons erschweren zusätzlich eine Vorhersage des sich einstellenden Prozessablaufes.

In dieser Arbeit werden die Abläufe während der Reaktion so weit erarbeitet, dass darauf aufbauend im zweiten Teil eine mathematische Beschreibung der Hydratation eines hochfesten Betons möglich wird.

Im letzten Schritt werden die zu erwartenden Temperaturverteilungen infolge der Hydratationswärmeabfuhr in einem Probewürfel unter Zuhilfenahme eines FE-Programms ermittelt.

### 1.2 Englisch

The process of hydration in concrete structures depends on many factors. Not only the kind of cement, but the totality of the concrete composition and the boundary conditions determines the quantity and the quality of the heat of hydration.

The special quality of high-strength concrete makes it very difficult to make assumptions about the progress of hydration.

In this work the process of hydration will be investigated so that it will be possible to calculate the hydration of a high-strength concrete.

At last it will be possible to predict the distribution of the temperature in a specimen with the assistance of a FE-program.

## 2 Einleitung

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie sind in den vergangenen Jahren verschiedene Bauteile aus Beton untersucht worden, die Schäden durch Rissbildung zeigten. Dabei handelte es sich um Treppenstufen, Kühlturmstützen, Bodenplatten, Schleuderbetonmaste oder Spannbetonschwellen. Die Schäden waren erst nach mehrjähriger Nutzung in feuchter Umgebung erkennbar und traten nur an Bauteilen auf, die bei der Herstellung wärmebehandelt worden waren. Anfangs bildeten sich wenige Haarrisse, deren Anzahl allmählich zunahm. Im Laufe der Zeit erweiterten sich die Risse, bis schließlich die Bauteile ausgebaut und ersetzt werden mussten.

Mikroskopische, röntgenographische und mikrofluoreszenzanalytische Untersuchungen zeigten in Rissen und um Zuschläge nadelförmige Kristalle, die dem Ettringit in seiner Morphologie ähnlich waren, jedoch neben Aluminium und Kieselsäure auch noch Karbonat ( $\text{CO}_3$ ) enthielten. Dieser Befund deutete auf sekundäre Bildung von Mischkristallverbindungen zwischen Ettringit und Thaumazit hin, die zu Treibeffekten in zuvor im Mikrobereich entstandenen Rissen sowie zu einer Entfestigung führten /S2/.

Kommentiert [BK1]: 18991

Daran anschließende Forschungen haben gezeigt, dass eine wesentliche Voraussetzung für das Auftreten dieses verspäteten Ettringittreibens die hohe Wärmebehandlung während dem Fertigungsprozess im Fertigteilwerk ist. In der Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton des DAfStb /D1/ wurden daher die maximalen Betontemperaturen auf 60° bzw. 80°C begrenzt.

Kritiker werfen nun die Frage auf, ob es in Bauteilen aus hochfestem Beton nicht auch zu verspätetem Ettringittreiben kommen kann. Häufig treten während dem Hydratationsprozess in den Bauteilen Temperaturen über 70° bis 80°C auf.

Beispielhaft hierfür ist das in /B2/ dokumentierte Projekt einer Brücke aus hochfestem Spannbeton. Während dem Betonieren des Widerlagerfundaments wurden im Kern Temperaturen von über 70°C gemessen /B3/.

Kommentiert [BK2]: 7139

Im Anschluss an diese Arbeit werden mit dem dort verwendeten Beton Proben hergestellt, die sich auf 60 bzw. 80°C erwärmen. Diese werden dann im weiteren auf ein sekundäres Ettringittreiben untersucht.

### 3 Bindemittleigenschaft Hydratationswärme

#### 3.1 Hydratation des Zementes

Als Hydratation bezeichnet man den gesamten exothermen Reaktionsmechanismus vom ersten Kontakt des hydraulischen Bindemittels mit Wasser bis zur vollständigen Erhärtung des Zementsteins. Dabei wird Energie in Form von Wärme freigesetzt.

Die Hydratation beginnt sofort nach der Wasserzugabe. Es kommt zu einer chemisch-physikalischen Reaktion zwischen dem Zement und dem Zugabe-wasser, die an der Oberfläche der Zementkörner beginnt und im weiteren Verlauf zu deren Kern hin vordringt.

Die Hydratationsentwicklung der Zemente wird nach **Locher/Richartz/Sprung** /G3/ in **drei Phasen** /B1/ gegliedert:

##### Phase I

Die Reaktion des Zementes beginnt unmittelbar nach der Zugabe des Anmachwassers und wird i. w. vom  $C_3A$  und Sulfat (Gips) bestimmt. Die aluminathaltigen Klinkerphasen reagieren sehr intensiv unter der Beteiligung des gelösten Sulfats.

Bei der Hydratation des Tricalciumaluminats ( $C_3A$ ) entsteht Trisulfat, das auch mit „Ettringit“ bezeichnet wird.

Die Reaktion kommt nach wenigen Minuten durch die Bildung der sehr feinen, säulenförmigen Ettringitkristalle auf den Zementkornoberflächen zum Stillstand und verhindert für mehrere Stunden die Reaktion des Tricalciumsilikats ( $C_3S$ ) und Dicalciumsilikats ( $C_2S$ ). Die Verlangsamung des Reaktionsprozesses praktisch bis zum Stillstand wird darauf zurückgeführt, dass die reaktionshemmende Gelschicht den freien Zutritt des Wassers zum Inneren der Zementkörner behindert /B1/.

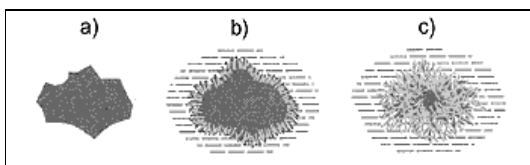


Abb. 3.1 /S3/: Hydratation des Zementkorns

- Zementkorn vor Wasserzugabe
- Zementkorn kurz nach Wasserzugabe; um das gesamte Zementkorn hat sich eine Schicht aus Zementgel gebildet.
- Der größte Teil des Zementkorns hat sich in Zementgel umgewandelt.

**Kommentiert [BK3]:** IBMB-Braunschweig, heft 140: Stoffeigenschaften jungen Betons – Versuche und Modelle, Braunschweig 1998

**Kommentiert [BK4]:** DafStb, Heft 482: Rissbreitenbeschränkung zwangsbeanspruchter Bauteile aus hochfestem Normalbeton, Seiten 15 - 18

**Kommentiert [BK5]:** Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure. 3. Auflage, Bauverlag Wiesbaden und Berlin, 1977 (bzw DafStb Heft 482...)

**Phase II**

Etwa vier bis sechs Stunden nach der Zugabe des Wassers ist ein deutlicher Fortschritt der chemischen Reaktion festzustellen. Die Trisulfatbildung, die das Erstarren des Zementgels maßgebend beeinflusst, aber praktisch nicht zur Erhärtung beiträgt, schreitet fort.

Gleichzeitig brechen die Ettringithüllen langsam auf und die Hydratation der Calciumsilikate setzt verstärkt ein. Es bilden sich langfaserige, ineinander verschlungene Kristalle, die CSH-Phasen, die in den wassergefüllten Raum wachsen. Der Zementstein verfestigt sich zusehends.

Die beiden Silikatkomponenten  $C_3S$  und  $C_2S$  tragen über 80 % zur Festigkeitsentwicklung bei.

**Phase III**

Nach etwa 36 Stunden ist der Gipsanteil des Klinkers nahezu vollständig zur Bildung von Trisulfat verbraucht worden. Weitere, meist kurze CSH-Phasen bilden sich, die den Porenraum weiter ausfüllen und zur Festigkeitsentwicklung beitragen. Das Sulfat ist jetzt weitgehend als Ettringit gebunden. Es reagiert mit dem  $C_3A$  und  $C_4AF$  ohne Auswirkung auf die Festigkeit zu Monosulfat (vgl. Abb. 3.2).

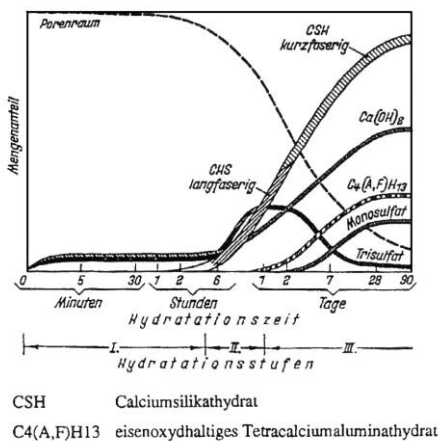


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Hydratphasen und der Gefügeentwicklung /B1/

**Kommentiert [BK6]:** DafStb, Heft 482: Rissbreitenbeschränkung zwangsbeanspruchter Bauteile aus hochfestem Normalbeton, Seite 16

### 3.2 Einflussfaktoren auf die Hydratationswärmeentwicklung

Die in Kapitel 3.1 beschriebene Hydratation ist eine exotherme, chemische Reaktion, bei der Energie in Form von Wärme freigesetzt wird.

Die insgesamt freisetzbare Hydratationswärme (Hydratationsenthalpie) sowie deren zeitlicher Verlauf hängt von den chemischen, wie auch von den physikalischen Eigenschaften des Zementes /G2/ ab.

Diese sind im wesentlichen:

- Mineralogische Zusammensetzung des Zementes (Klinkerphasen)
- Einflüsse von Nebenbestandteilen und Zusatzstoffen
- Korngrößenverteilung (Mahlfeinheit)
- Lagerung vor dem Verbrauch (geringe Vorhydratation mit Luftfeuchtigkeit)
- Wasserzementwert

#### *Mineralogische Zusammensetzung (Klinkerphasen)*

Durch die chemische Zusammensetzung des Zementes (die bis auf die Zusatzstoffe der des Rohmehles entspricht) und die beim Brennprozess herrschenden Temperaturen ist näherungsweise auch die mineralogische Zusammensetzung definiert /V1/. Daraus folgen wiederum die chemischen Eigenschaften des Zementes, wozu die Hydratationsgeschwindigkeit und die gesamte Wärmemenge (Hydratationsenthalpie), die dabei freigesetzt wird, gehören.

In Tabelle 3.1 sind die wesentlichen Klinkerphasen, sowie die Wärmemenge, die die einzelnen Reaktionen bei vollständiger Hydratation freisetzen, für einen durchschnittlichen Portlandzement aufgelistet.

Auffallend ist hierbei der hohe Einfluss des C<sub>3</sub>A auf die Energiefreisetzung.

Tabelle 3.1: Phasenzusammensetzung des Zementklinkers nach /V1/, Mittelwerte

| Klinkerphasen         | Chemische Formel   | Kurzbezeichnung       | Gehalt [Gew-%] | Hydratationswärme [J/g] |
|-----------------------|--|-----------------------|----------------|-------------------------|
| Tricalciumsilikat     | 3 CaO * SiO <sub>2</sub>   | C <sub>3</sub> S      | 63             | 500                     |
| Dicalciumsilikat      | 2 CaO * SiO <sub>2</sub>   | C <sub>2</sub> S      | 16             | 250                     |
| Calciumaluminatferrit | 2 CaO * (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | C <sub>2</sub> (A, F) | 8              | 420                     |
| Tricalciumaluminat    | 3 CaO * Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                     | C <sub>3</sub> A      | 11             | 1340                    |
| Freies CaO            | CaO  |                       | 1              | 1150                    |
| Freies MgO            | MgO  |                       | 1              | 840                     |

**Kommentiert [BK7]:** Betontechnische Berichte; Beton 5/1993: Prüfverfahren zur Voraussage der Temperaturerhöhung im Beton infolge Hydratationswärme des Zements; Seite 233

### *Einflüsse von Nebenbestandteilen und Zusatzstoffen*

Der Einsatz von Nebenbestandteilen hat nach der Einführung der DIN 1164-Teil 1, Ausgabe Oktober 1994, an Bedeutung gewonnen, da die Anzahl der möglichen Nebenbestandteile erweitert wurde.

Nebenbestandteile sind gemäß DIN 1164-1 Füller nach Abschnitt 4.7 oder Hauptbestandteile des Zementes nach den Abschnitten 4.2 bis 4.6 dieser Norm.

Die wichtigsten Zusatzstoffe lassen sich in die drei Klassen *Puzzolane*, *latent hydraulische Stoffe* und *inerte Stoffe* einteilen.

Zu den Puzzolanen zählen sowohl Steinkohlenflugasche als auch Silica-Staub. Natürliche Puzzolane sind Tuff, Lava und kiesel-saure Sedimente. Durch teilweisen Ersatz von Portlandzementklinker gegen einen puzzolanischen Stoff, z.B. Flugasche, wird die Wärmeentwicklung vermindert. Die Reduktion der Hydratationsenthalpie folgt jedoch nicht im gleichen Maße wie der Austausch, da die puzzolanische Reaktion auch einen geringen Wärmebeitrag liefert. Dadurch wird die Hydratationswärmeentwicklung nicht nur in ihrer absoluten Höhe, sondern vor allem in ihrem zeitlichen Verlauf verändert.

Flugaschen sind immer Zusatzstoffe, d.h. in der Praxis wird kein Portland-flugaschezement eingesetzt, sondern einem flugaschefreiem Zement wird Flugasche als Zusatzstoff hinzu gegeben. Das gleiche gilt für den Silikastaub, der in fast allen Fällen als Mikrosilika Slurry hinzugegeben wird.

Latent hydraulische Stoffe besitzen im Gegensatz zu den Puzzolanen die Fähigkeit selbstständig mit Wasser zu reagieren. Der wichtigste latent hydraulische Stoff in der Betontechnologie ist der Hüttensand.

Die Zemente CEM II/A-S, CEM II/B-S und CEM III werden zusammenfassend auch als Hüttenzemente bezeichnet (s.a. Kapitel 3.3). Ihre Erhärtung erfolgt mit wachsendem Hüttensandgehalt zunehmend träger als die von Portlandzement, wegen der vergleichsweise langsameren Reaktion des Hütten-sandes /S3/. Die Temperaturkurve verläuft bei sonst gleichen Voraus-setzungen ausgeglichener und flacher, d. h. weniger Hydratationswärme wird langsamer freigesetzt.

Hüttensand gibt es in Deutschland nicht frei zu kaufen. Daher erfolgt seine „Zugabe“ immer über die Wahl des entsprechenden hüttensandhaltigen Zements und nicht wie bei der Flugasche durch die Zugabe von reinem Hüttensand.

Wie gering die Wärmefreisetzung dieser Zusatzstoffe im Vergleich zu den anderen Zementklinkern ist, zeigt ein Vergleich der Tabellen 3.1 und 3.2.



Tabelle 3.2: Hydratationswärme freisetzung von Steinkohlenflugasche und Hüttensand [J/g]

| Zusatzstoff | [J/g] |
|-------------|-------|
| Hüttensand  | 290   |
| Flugasche   | 35    |

Als inerte Stoffe kommen verschiedene Arten von Gesteinsmehlen zum Einsatz. Durch den teilweisen Ersatz von Zement durch Gesteinsmehl kommt es zu einem Rückgang der Hydratationsenthalpie. Der zeitliche Verlauf kann jedoch beschleunigt werden, da die sehr feinen Gesteinspartikel als Kristallisationskeime wirken. Des Weiteren wird durch die Zugabe von Gesteinsmehl die Verarbeitbarkeit positiv beeinflusst [S3].

#### Korngrößenverteilung (Mahlfeinheit)

Je feiner ein Zement gemahlen ist, umso größer ist seine Oberfläche und umso schneller ist seine Reaktion mit dem Anmachwasser. Dies zeigt sich wiederum im zeitlichen Verlauf der Hydratationswärme freisetzung (vgl. Tab. 3.3) und in der Festigkeitsentwicklung, jedoch nicht in der Hydratationsenthalpie.

Tabelle 3.3: Hydratationswärme freisetzung (in J/g) nach [K1] in Abhängigkeit von Mahlfeinheit und Hydratationsdauer

| Hydratationsdauer | Zement 2500 cm <sup>2</sup> /g | Zement 4500 cm <sup>2</sup> /g |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 Tag             | 163                            | 222                            |
| 2 Tag             | 205                            | 259                            |
| 3 Tag             | 272                            | 318                            |

Die Mahlfeinheit des Zementes wird nach seiner spezifischen Oberfläche beurteilt und nach EN 196, Teil 6 an Hand von Luftdurchlässigkeitsmessungen in cm<sup>2</sup>/g errechnet („Blaine-Wert“). Die Norm stellt keine Anforderungen an die Mahlfeinheit, so dass die Festigkeitsklasse gleicher Zementarten i. d. R. ausschließlich über den Blaine-Wert gesteuert wird.

D.h. ein CEM I 42,5 unterscheidet sich von einem CEM I 52,5 nur durch seine geringere Mahlfeinheit. Dadurch ist sein Hydratationsprozess und damit auch seine Festigkeitsentwicklung nach 28 Tagen nicht so weit fortgeschritten, wie bei dem CEM I 52,5. Indiz dafür ist die Hydratationswärme freisetzung. Nach

sieben Tagen hat der CEM I 42,5 etwa 340 J/g freigesetzt. Bei dem CEM I 52,5 sind es bis zu diesem Zeitpunkt 380 J/g /J1/. Die Endfestigkeit beider Zemente ist annähernd identisch.

**Kommentiert [BK9]:** 66535: TFB aktuell

#### *Lagerung vor dem Verbrauch (geringe Vorhydratation)*

Schon die Einwirkung von Luftfeucht führt dazu, dass ein Teil der  $C_3A$ -Phasen frühzeitig reagiert. Die dabei freigesetzte absolute Wärmemenge ist bei fachgerechter Lagerung jedoch sehr gering und muss daher nicht weiter in Betracht gezogen werden /L1/.

**Kommentiert [BK10]:** Lang, Eberhard: Einfluss von Nebenbestandteilen und Betonzusatzmitteln auf die Hydratationswärmeentwicklung von Zement, Beton-Information 2-1997 Lit.Nr: 54572

#### *Wassermenge*

Zur vollständigen Hydratation von Portlandzement ist Wasser in einer Menge von etwa 38% des Zementgewichtes erforderlich (entspricht einem w/z-Wert von 0,38).

Dabei wird eine Wassermenge von etwa 26 Gew.-% des Zementes chemisch gebunden, d. h. es wird als Kristallwasser eingelagert. Die verbleibende Menge (etwa 12% des Zementgewichtes) wird physikalisch, in verdampfbarer Form gebunden (Oberflächenkräfte). Dieses Wasser ist im Feststoff so angeordnet (z.B. als Zwischenschichtwasser in Calciumsilikathydraten oder in Calciumaluminathydraten), dass es zur Hydratation nicht zur Verfügung steht und dem Feststoff zugerechnet werden kann /T1/.

**Kommentiert [BK11]:** RWTH-Aachen, Dr. Thielen: Vertiefer-Umdruck des 7. Semesters

Da erst ab einem w/z-Wert von 0,38 der Zement vollkommen hydratisiert, kann auch erst bei Zugabe dieser Menge Wasser die gesamte Hydratationsenthalpie frei gesetzt werden.

Gleichzeitig ist festzustellen, dass nach einer Anlaufzeit von einem Tag die Hydratationsgeschwindigkeit mit zunehmendem w/z-Wert steigt.

Eine Erklärung hierfür kann aus dem Modell des Hydratationsvorganges nach Catharin /C1/ abgeleitet werden. Bei der Hydratation werden die Zementkörner von außen vom Wasser angegriffen, wobei sich um jedes Körnchen eine Gelschicht bildet. Damit nun der noch nicht hydratisierte Kern jedes Kornes weiter reagieren kann, muss Wasser durch die bereits gebildete Gelschicht dringen.

Zu Beginn der Hydratation bzw. bei höherem w/z-Wert ist die Gelschicht gering, so dass Wasser leicht eindringen kann und die Hydratation unbehindert vor sich gehen kann. Dies scheint bis zu einer bestimmten Gelschichtdicke der Fall zu sein. Ab diesem Punkt ist die Hydratationsgeschwindigkeit von der Diffusionsgeschwindigkeit des Wassers durch das gebildete Gel abhängig.

Liegt der w/z-Wert unter 0,38, so reicht das freie Wasser nicht zur vollständigen Hydratation aus, sie kommt zum Erliegen. Folglich wird auch nicht die gesamte Hydratationsenergie ( $HW_{\infty}$ ) freigesetzt (vgl. /C1/).

### 3.3 Zemente nach DIN 1164

Die Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die in Deutschland zugelassenen Zemente und ihre Zusammensetzung nach der neuen DIN 1164 Teil 1.

Tab. 3.4: Zementarten und Zusammensetzung nach DIN 1164-Teil 1 /D2/

| Zementart                      | Benennung                 | Kurzzeichen | Hauptbestandteile          |                  |                              |   |                             |                | Nebenbestandteile <sup>2)</sup> |
|--------------------------------|---------------------------|-------------|----------------------------|------------------|------------------------------|---|-----------------------------|----------------|---------------------------------|
|                                |                           |             | Portlandzementklinker<br>K | Hütten sand<br>S | Natürliches<br>Puzzolan<br>P | Kieselsäure<br>reiche<br>Flugasche<br>V | Gebrannter<br>Schiefer<br>T | Kalkstein<br>L |                                 |
| CEM I                          | Portlandzement            | CEM I       | 95 – 100                   | -                | -                            | -                                       | -                           | -              | 0 – 5                           |
| CEM II                         | Portlandhüttenzement      | CEM II/A-S  | 80 – 94                    | 6 – 20           | -                            | -                                       | -                           | -              | 0 – 5                           |
|                                |                           | CEM II/B-S  | 65 – 79                    | 21 – 35          | -                            | -                                       | -                           | -              | 0 – 5                           |
|                                | Portlandpuzzolan zement   | CEM II/A-P  | 80 – 94                    | -                | 6 – 20                       | -                                       | -                           | -              | 0 – 5                           |
|                                |                           | CEM II/B-P  | 65 – 79                    | -                | 21 – 35                      | -                                       | -                           | -              | 0 – 5                           |
|                                | Portlandflugasche zement  | CEM II/A-V  | 80 – 94                    | -                | -                            | 6 – 20                                  | -                           | -              | 0 – 5                           |
|                                | Portlandölschiefer zement | CEM II/A-T  | 80 – 94                    | -                | -                            | -                                       | 6 – 20                      | -              | 0 – 5                           |
|                                |                           | CEM II/B-T  | 65 – 79                    | -                | -                            | -                                       | 21 – 35                     | -              | 0 – 5                           |
|                                | Portlandkalkstein zement  | CEM II/A-L  | 80 – 94                    | -                | -                            | -                                       | -                           | 6 – 20         | 0 – 5                           |
| Portlandflugasche hüttenzement | CEM II/B-SV               | 65 – 79     | 10 – 20                    | -                | 10 – 20                      | -                                       | -                           | 0 – 5          |                                 |
| CEM III                        | Hochofenzement            | CEM III/A   | 35 – 64                    | 36 – 65          | -                            | -                                       | -                           | -              | 0 – 5                           |
|                                |                           | CEM III/B   | 20 – 34                    | 66 – 80          | -                            | -                                       | -                           | -              | 0 – 5                           |

1)Die in der Tafel angegebenen Werte beziehen sich auf die aufgeführten Haupt- und Nebenbestandteile des Zementes ohne Calciumsulfat und Zementzusatzmittel  
2)Füller oder ein oder mehrere Hauptbestandteile, soweit sie nicht Hauptbestandteile des Zementes sind

In der Bundesrepublik Deutschland kommen größtenteils Zemente der Klassen CEM I und CEM III zum Einsatz. Diese werden dann im weiteren durch die geeigneten Zusatzstoffe an die jeweiligen Bedürfnisse angepasst.

Abbildung 3.2 zeigt die Hydratationswärmeentwicklung einiger Zemente innerhalb der ersten sieben Tage.

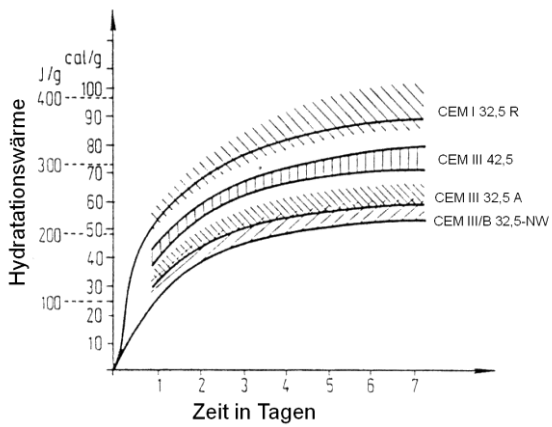


Abb. 3.2: Hydratationswärmeentwicklung genormter Zement /V2/

Kommentiert [BK13]: 7337

## 4 Hydratationswärmeentwicklung im Beton

### 4.1 Allgemeines zur Wärmeentwicklung

Beton besteht neben dem Zementleim noch aus Zuschlag und Betonzusatzmitteln. Daher ergeben sich einige Besonderheiten des Hydratationsvorgangs gegenüber dem „reinen“ Zement und dessen Reaktionsablauf (vgl. Kapitel 3). Die im Beton entstehende Temperaturerhöhung infolge des Hydratationsprozesses ist bei einigen Bauaufgaben unerwünscht, bei anderen vorteilhaft. Von Nachteil ist sie bei allen massigen Bauteilkonstruktionen, weil durch die auftretenden Temperaturunterschiede Spannungen entstehen, die unter Umständen zur Rissbildung führen. In der Praxis begegnet man dieser Problematik mit verschiedenen Lösungsansätzen:

- Der Einsatz von NW-Zementen führt zu einer langsameren, ausgeglicheneren Wärmeentwicklung, so dass sich die Temperaturgradienten flacher einstellen.
- Eine niedrigere Frischbetontemperatur führt zu einer geringeren Maximaltemperatur, so dass auch hier die Temperaturunterschiede zwischen Bauteil-innerem und der Umgebung möglichst gering bleiben.
- Unterstützend kann eine wärmedämmende Schalung angebracht werden.

Vorteilhaft können sich die Temperaturerhöhungen bei Bauteilen geringerer Dicke, wie zum Beispiel bei Decken im Wohnungs- und Industriebau, vor allem beim Betonieren bei niedrigen Außentemperaturen auswirken. Durch die erhöhte Betontemperatur wird die Festigkeitsentwicklung beschleunigt, was zu kürzeren Schalungsfristen und zur schnelleren Erreichung der Widerstandsfähigkeit des jungen Betons gegen Frosteinwirkung führt /B5/.

Kommentiert [BK14]: 65963: Basalla; Seite 275

### 4.2 Einflüsse aus der Betonrezeptur

Im Kapitel 3 wurde detailliert der Hydratationsvorgang der Zemente beschrieben. Einflussfaktoren aus der Zementzusammensetzung wurden ebenso erläutert, wie die Auswirkungen verschiedener Mahlfineinheiten und W/Z-Werte.

Die Hydratationswärmeentwicklung in einer Betonmischung hängt von den folgenden Parametern ab:

*Höhe und zeitlicher Verlauf der Hydratationswärmeabgabe des Zementes*  
Von Seiten des Zements sind es alle chemischen und physikalischen Eigenschaften, die für die insgesamt freisetzbare Hydratationsenthalpie sowie

für den zeitlichen Verlauf der Hydratationswärmeabgabe maßgeblich sind (vgl. Kap. 3.3).

#### Wärmekapazität des Betons

Die Wärmekapazität ist diejenige Wärmemenge, die notwendig ist, um die Raumeinheit eines Stoffes um 1°C zu erwärmen. Teilt man die Wärmekapazität durch die Rohdichte des Stoffes, so erhält man die spezifische Wärmekapazität  $c$  [J/(kg\*K)].  $C$  ist die Wärmemenge, die man benötigt um die Masseneinheit von einem Kilogramm um 1°C zu erwärmen.

Haupteinflussgröße auf die Wärmekapazität des Betons ist der verwendete Zuschlag. Weiterhin ist zu beachten, dass sich die Wärmekapazität im Laufe der Hydratationsprozesse in dem Maße verändert, wie das Wasser gebunden wird.

Die Wärmekapazität von erhärtetem Leichtbeton liegt bei etwa 1500 kJ/(kg\*K), von Normalbeton bei bis zu 2800 kJ/(kg\*K) /W1/.

Je größer die Wärmekapazität des Betons ist, desto mehr Energie muss aufgewendet werden, um seine Temperatur um 1 Kelvin zu erhöhen. D.h. bei gleichem Zementgehalt und gleicher Zementart ist der maximal Temperaturanstieg umso geringer, je größer die Wärmekapazität des Betons ist (vgl. Gleichung (6.14)).

#### Wärmeleitfähigkeit

Genau wie die Wärmekapazität steht auch die Wärmeleitfähigkeit in enger Relation zur Rohdichte des Betons.

Sie ist vor allem abhängig von Porengehalt, von der Zuschlagart (von Kalkstein mit 0,7 W/(K\*m) bis Quarz mit 6,6 W/(K\*m)) und vom Feuchtegehalt /S3/.

Nach DIN 4108 gelten folgende Rechenwerte für Normalbeton:

|                  |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| Betongüte ≤ B 10 | $\lambda = 1,51 \text{ W/(K*m)}$ |
| Betongüte ≥ B 15 | $\lambda = 2,04 \text{ W/(K*m)}$ |

Jedoch gelten diese Rechenwerte für den erhärteten Beton. Während des Hydratationsprozesses liegt die Wärmeleitfähigkeit deutlich über diesen Werten, da das freie Wasser eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Je höher die Wärmeleitfähigkeit ist, desto mehr Hydratationswärme fließt aus dem Inneren des Bauteils an die Umgebung ab und desto flacher stellen sich die Temperaturgradienten (Temperaturgefälle vom Inneren des Bauteils zur Umgebung) ein.

Betrachtet man Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit noch einmal im Zusammenhang, stellt man fest, dass beide in engem Zusammenhang stehen. Betone mit hohen Festigkeiten und überwiegend Kiessand als Zuschlag haben sowohl eine hohe Wärmekapazität, als auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Es muss wesentlich mehr Energie aufgebracht werden um sie zu erwärmen als

Kommentiert [BK15]: 11094 Seite 133

Kommentiert [BK16]: Umdruck Baustoffkunde  
3.Semster, RWTH-Aachen 1996, Prof. Dr. Ing. P.  
Schießl

bei einem Leichtbeton mit gleichem Zementgehalt. Hinzu kommt, dass durch die große Wärmeleitfähigkeit viel Energie aus dem Bauteilinneren abfließt. Bei einem Leichtbeton führen die geringe Wärmeleitfähigkeit und die geringe Wärmekapazität infolge der leichten Zuschläge (Blähton o.ä.) zu einer raschen Erwärmung des Bauteilkerns während nur wenig Wärme an die Umgebung abfließt. Die Maximaltemperatur liegt wesentlich höher als bei einem Mischungsgleichen Normalbeton.

### Frischbetontemperatur

Die Frischbetontemperatur hat zwei grundsätzliche Wirkungen auf den Hydratationsablauf:

Der Hydratationsprozess wird in seinem zeitlichen Verlauf stark beeinflusst. Eine Erhöhung der Frischbetontemperatur bewirkt eine Beschleunigung der adiabatischen Temperaturentwicklung /S4/. Entsprechend der Reaktionskinetik chemischer Prozesse steigt die Temperatur bei hohen Ausgangstemperaturen früher an als bei niedrigen Frischbetontemperaturen /G3/. Geht man von einer Vergleichstemperatur von 20°C aus, so kommt es nach Schöppel /S4/ bei einer Erhöhung der Reaktionstemperatur um 12 bis 13 Kelvin zu einer Verdoppelung der maximalen Reaktionsgeschwindigkeit. Eine Verringerung der Frischbetontemperatur von 20°C auf 12°C verzögert die maximale Wärmeentwicklung je nach Beton um 2 bis 4 Stunden.

Dieser Einfluss auf die adiabatische Temperaturentwicklung kann unter Einbeziehung einer Reifefunktion durch das wirksame Alter erfasst werden (vgl. Kapitel 6.2).

Unter teiladiabatischen Bedingungen wirkt sich eine geringere Frischbetontemperatur mäßigend auf die Hydratationswärmeabgabe aus. Durch eine geringere Ausgangstemperaturen läuft der Prozess langsamer ab, die Hydratationsenthalpie wird gleichmäßiger über einen längeren Zeitraum verteilt abgegeben (vgl. Abbildung 4.2).

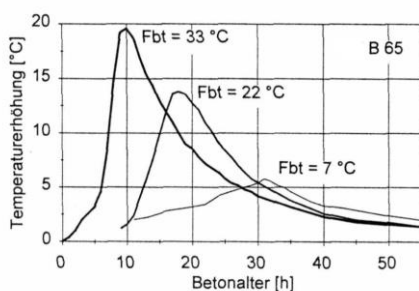


Abb. 4.1: Auswirkung der Frischbetontemperatur (Fbt) auf den Temperaturverlauf in einem kleinen Bauteil /B1/

**Kommentiert [BK17]:** 44294: Seite 79, Schöppel, K.; Entwicklung der Zwangsspannungen im Beton während der Hydratation

**Kommentiert [BK18]:** iBmB: Stoffeigenschaften des jungen Betons-Versuche und Modelle... Seite 65

**Kommentiert [BK19]:** DafStb Heft 482 Seite 22

Außer diesen Auswirkungen auf die Prozessgeschwindigkeit hat die Frischbetontemperatur nach Meinung mehrerer Autoren Auswirkung auf den maximalen adiabatischen Temperaturanstieg  $\Delta T_{HW}$ .

Nach Schöppel ist  $\Delta T_{HW}$  bei unterschiedlichen Frischbetontemperaturen annähernd gleich, teils wiesen die von ihm getesteten Beton bei niedrigeren Starttemperaturen einen etwas höheren Endwert auf. **Werthmann /W1/** sagt, dass jeder Zement bei verschiedenen Anfangstemperaturen andere Hydratationswärme freisetzt, wobei bei höheren Anfangstemperaturen mehr Hydratationswärme freigesetzt wird. Nach Gutsch nimmt die adiabatische Temperaturerhöhung am Versuchsende mit abnehmender Frischbetontemperatur zu. Er bezieht sich bei dieser Aussage auf **Byfors /B6/** und **Laube /L3/**.

Sie führen die Abnahme der adiabatischen Temperaturerhöhung mit steigender Frischbetontemperatur auf den anfangs schnellen Hydratationsfortschritt zurück. Dadurch kommt es auf mikrostruktureller Ebene zu unterschiedlicher Morphologie der CSH-Phasen. Bei hoher Frischbeton- bzw. Prozesstemperatur bilden sich eher kurzfasrige CSH-Phasen, während sich bei niedriger Temperatur und geringer Reaktionsintensität über einen größeren Zeitraum auch langfasrige CSH-Phasen **ausbilden können /G3/**.

#### *Einfluss von Betonzusatzmitteln*

Nach **Lang /L1/** ist der Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Hydratationswärmeentwicklung von der Wirkstoffgruppe, der Zugabemenge, dem Zeitpunkt der Dosierung, aber auch im erheblichen Maße von der Zementart und dem Gehalt an Nebenbestandteilen abhängig.

Den größten Einfluss zeigten alle von ihm untersuchten Fließmittel. Durch Fließmittel wird die Hydratationswärmeentwicklung verzögert. Dabei ist der verzögernde Einfluss um so größer, je niedriger die Hydratationsenthalpie der Zemente ist.

Durch die Zugabe von Betonverzögerern wird die Wärmefreisetzung in ihrem zeitlichen Verlauf ebenfalls verlangsamt.

Die Zugabe von Mikrosilika Slurry erhöht zwar die gesamte freigesetzte Energie (Reaktionsenthalpie), führt jedoch auch zu einer geringen Reduktion der maximalen Energiefreisetzungsrates, da die großen Oberflächen der sehr feinen Silikapartikel Anziehungskräfte auf die  $H_2O$ -Moleküle ausüben und so die Hydratation verlangsamen.

Aufgrund des komplexen Zusammenwirkens von Zement, Nebenbestandteilen und Zusatzmitteln sind Eignungsuntersuchungen dringend erforderlich, will man eine fundierte Aussage über die Auswirkungen der Zusatzmittel und den daraus resultierenden Reaktionsablauf treffen.

**Kommentiert [BK20]:** 11094

**Kommentiert [BK21]:** Byfors, J., Plain concrete at early ages, Swedish cement and concrete Institute, Stockholm 1980

**Kommentiert [BK22]:** Laube, M., Werkstoffmodell zur Berechnung von Temperaturspannungen in massigen Bauteilen im jungen Betonalter, Diss. TU Braunschweig 1990

**Kommentiert [BK23]:** Gutsch Seite 66

**Kommentiert [BK24]:** 54572



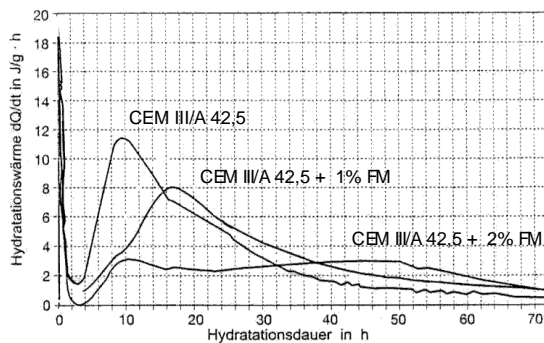


Abb. 4.2: Einfluss verschiedener Fließmittelmengen auf die Hydrationswärmeentwicklung von CEM III/A 42,5

### 4.3 Einflüsse der Umgebungs- und bautechnischen Randbedingungen

Die Höchsttemperatur im Bauwerk ergibt sich aus der Differenz von entstehender und abfließender Wärme.

Daraus folgt, dass die Hydrationswärmeentwicklung und deren zeitlicher Verlauf nicht nur durch die Betonrezeptur bestimmt wird, die verantwortlich für die entstehende Wärme ist, sondern auch durch die Randbedingungen, von denen die Verluste abhängig sind.

In Kapitel 5 werden die Begriffe isotherm, adiabatisch und teiladiabatisch erklärt.

In einem Betonbauteil herrschen Wärmeabflussbedingungen, die zwischen den Extremen des adiabatischen und des isothermen Temperaturverlaufs liegen.

Wo bei der Prüfung des Zementleims, bzw. von Betonproben durch geeignete Versuchseinrichtungen die Temperaturverläufe gesteuert werden können, werden im Bauteil die Wärmeverluste von folgenden Faktoren bestimmt:

#### *Bauteildicke*

Die Bauteildicke steht in direkter Relation zum Oberflächen-Volumen-Verhältnis.

Je dicker ein Bauteil ist, desto stärker nähert sich der Reaktionsprozess im Kern dem adiabatischen Verlauf an, da der umgebende Beton nicht nur isolierend wirkt, sondern auch selbst am exothermen Prozess beteiligt ist.

Erst in den Randbereichen verläuft die Temperaturkurve flacher. Je weiter man sich vom Bauteilinneren in die Randzonen begibt, desto größer werden die Wärmeverluste. Die Hydrationskurve zeigt einen teiladiabatischen Verlauf (vgl. Abb. 4.3).

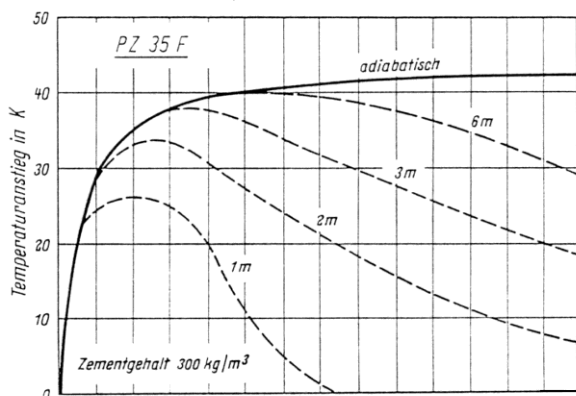


Abb. 4.3: Verlauf des Temperaturanstiegs im Kern von Betonbauteilen unterschiedlicher Dicke /B5/

**Kommentiert [BK25]:** Basalla, A.; Wärmeentwicklung im Beton. Zementtaschenbuch 1964/65 Seite 275/304, Bauverlag, Wiesbaden

#### Wärmeübergangsbedingungen an den Grenzen Beton-Schalung-Luft

Von der isolierenden Wirkung der Schalung, der Temperatur der umgebenden Luft und deren Windgeschwindigkeit hängt ab wie stark die Wärmeverluste sind.

Besonders bei dünnen Bauteilen, wo ein hohes Oberflächen-Volumen-Verhältnis zu einer großen Wärmeabgabe führt, ist bei niedrigen Umgebungstemperaturen auf eine ausreichende Wärmedämmung zu achten, damit der Hydratationsprozess nicht bei Temperaturen unter  $10^{\circ}\text{C}$  zum Erliegen kommt.

Ausreichende Isolierung ist bei Bauteilen aller Größen notwendig, damit die Temperaturdifferenz zwischen Kern und Rand möglichst gering gehalten wird und so die Eigenspannungen auf ein Minimum begrenzt werden.

#### Künstliche Kühlmaßnahmen

Bei dem Betonieren von großen Massenbauteilen können in Verbindung mit hohen Außentemperaturen Höchsttemperaturen im Inneren des Bauteils erreicht werden, die zu schädigenden Einflüssen in der Betonstruktur führen. Um dies zu vermeiden ist es möglich dem Beton durch vorher im Inneren verlegte Kühlschläuche Wärme zu entziehen und so das übermäßige Aufheizen zu verhindern.

Eine weitere Möglichkeit der Kühlung ist die Zugabe von gefrorenem Wasser oder Trockeneis zum Frischbeton.

#### 4.4 Besonderheiten von hochfestem Beton

Aufbauend auf den Grundlagen der Hydratation unter Normalbedingungen gibt es beim hochfesten Beton (im weiteren auch Hochleistungsbeton genannt) einige Besonderheiten.

Der wesentlichste Unterschied zu den normalfesten Betonen ist der niedrige  $w/z$ -Wert, der keine vollständige Hydratation mehr zulässt ( $w/z < 0,4$ ).

Nach dem Heft 482 des DAfStb /B1/ kann eine Abhängigkeit des Hydratationsverlaufes vom Wasserzementwert gefolgert werden (vgl. Abb. 4.4).

Kommentiert [BK26]: Heft 482 (grünes Buch)

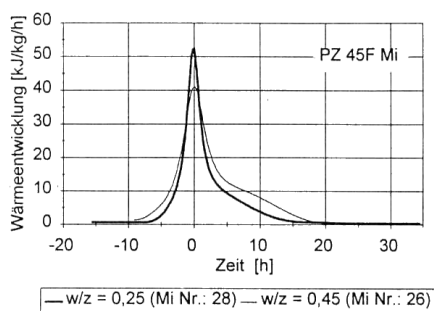


Abb. 4.4: Hydratationswärmeentwicklung in Abhängigkeit vom  $w/z$ -Wert bezogen auf den Zeitpunkt maximaler Energiefreisetzung /B1/

Bei niedrigen  $w/z$ -Werten reicht das Wasser nicht zur vollständigen Hydratation aus, so dass es zu einem Abbruch der Wärmeentwicklung nach wenigen Stunden kommt. Die Energieausbeute je kg Zement wird wegen der unvollständigen Hydratation mit sinkendem  $w/z$ -Wert kleiner.

Der hohe Zementgehalt im Hochleistungsbeton und die hohe Festigkeitsklasse (feine Körnung) des eingesetzten Zements führen jedoch zu einer hohen Energiefreisetzungsrates in einem kurzen Zeitraum. Dadurch kommt es zu einer starken Erwärmung des Bauteils, da die Wärmeverluste in so kurzen Zeiträumen gering sind. Dies bewirkt wiederum eine weitere Beschleunigung des Abbindevorgangs.

Die Überlagerung dieser beiden Effekte führen zu einem schnellen Anstieg der Hydratationswärmeentwicklung die jedoch nach wenigen Stunden (ca. 8 Stunden nach dem Ende der Ruhepause) abrupt abbricht, sobald kein Wasser mehr zur Verfügung steht.

Bei hohen  $w/z$ -Werten verläuft der Hydratationsvorgang ausgeglichener, besonders im abklingenden Bereich. Der hochfeste Beton mit geringem  $w/z$ -Wert setzt innerhalb weniger Stunden fast seine gesamte Energie frei.

Die Zugabe von Mikrosilika Slurry und Fließmitteln gleicht diesen Effekt etwas aus. Beide sind in den meisten hochfesten Betonen zu finden, da ohne dass Fließmittel keine verarbeitbare Konsistenz bei den niedrigen w/z-Werten erreicht werden könnte und nur durch die festigkeitssteigernde Wirkung des Mikrosilikas (wirkt in den Kontaktflächen zwischen Zuschlag und Zementstein) die gewünschten Druckfestigkeiten erreicht werden kann.

## 5 Prüfverfahren

### 5.1 Definitionen

Kommentiert [BK27]: 40461

Der Hydratationsprozess kann unter unterschiedlichen Temperaturbedingungen /G2/ ablaufen (vgl. Abbildung 5.1):

#### *Isotherm*

Griechisch: isos = gleich, thermós = warm

Die Änderungen des chemischen oder physikalischen Zustandes finden unter einem konstanten Temperaturniveau statt. D.h. wird durch die Reaktion Energie in Form von Wärme freigesetzt oder verbraucht, kann der isotherme Zustand nur aufrechterhalten werden, wenn die entsprechende Wärme ab- oder zugeführt wird.

#### *Adiabatisch*

Griechisch: adiábatos = nicht hindurchtretend

Während dem Reaktionsprozess kommt es zu keinem Wärmeaustausch zwischen dem Stoff und der Umgebung, d.h. die gesamte, beim Hydratationsvorgang freigesetzte Energie bleibt im System und wird dementsprechend vollständig zur Temperaturerhöhung des Stoffes bzw. Reaktionsproduktes genutzt.

Durch die Erwärmung wird der Reaktionsprozess weiter angeregt, was wiederum dazu führt, dass in noch kürzerer Zeit mehr Wärme freigesetzt wird. Der adiabatische Hydratationsvorgang ist ein sich selbst beschleunigender Prozess.

#### *Teil- bzw. Semiadiabatisch*

Zwischen dem Stoff und seiner Umgebung kommt es zu einem Wärmeaustausch. Allerdings ist dieser durch Randbedingungen und den umgebenden Beton gedämmt, so dass der Hydratationsverlauf in den ersten Stunden fast adiabatische Verhältnisse annimmt. Verantwortlich dafür ist die, dem Zement eigene, schnelle Anfangsreaktion, während der wesentlich mehr Wärme entsteht, als über die Peripherie abgegeben wird.

Das Temperaturmaximum wird erreicht, sobald sich ein Gleichgewicht zwischen entstehender und abfließender Wärmemenge einstellt.

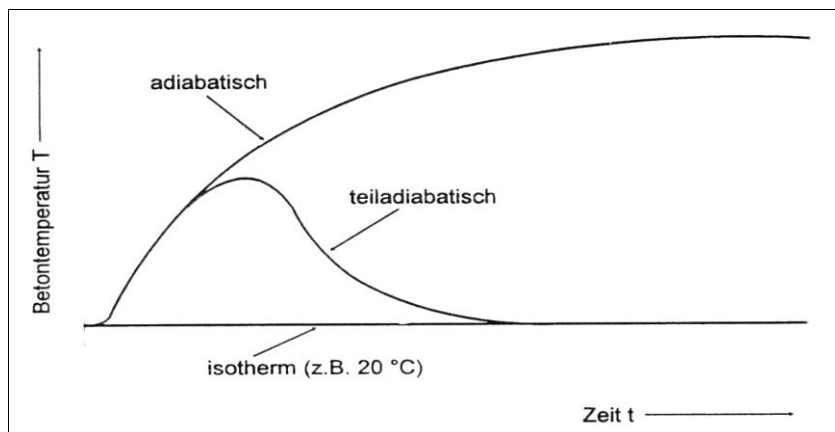


Abb. 5.1: Temperatur-Zeitverläufe bei verschiedenen Wärmeabflussbedingungen in einem Beton /S1/

## 5.2 Isotherme Prüfverfahren

Die Hydrationswärme der verschiedenen Zemente unter isothermen Erhärtingsbedingungen (20°C, konservierende Lagerung) lässt sich gemäß [DIN 1164 Teil 8 /D2/](#) mit dem Lösungskalorimeter ermitteln.

Das Verfahren dient zur Bestimmung der spezifischen Wärmemenge in J/g, die bei der Hydratation eines Zementes frei wird.

Gemessen wird die Lösungswärme der nicht hydratisierten sowie der bei 20°C hydratisierten Zementprobe (Wasserzementwert  $w/z=0,4$ ) in einem vorgeschriebenen Säuregemisch (Salpeter- und Flusssäure). Die Differenz der Lösungswärme ist die Hydrationswärme  $HW_{(t)}$ .

Die Hydrationswärme im Alter von 7 Tagen  $HW_{(7\text{ d})}$  dient zur Beurteilung der Eigenschaft NW (niedrige Wärmefreisetzung). Für NW-Zemente wird in DIN 1164-1  $HW_{(7\text{ d})} \leq 270 \text{ kJ/kg}$  verlangt.

Kommentiert [BK28]: DIN 1164 Teil 8 November 1978

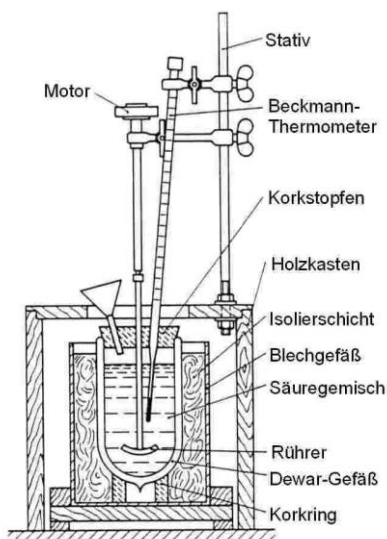


Abb. 5.2: Schematische Skizze des Lösungskalorimeters nach DIN 1164 Teil 8 /D2/

Ein weiteres isothermes Prüfverfahren wurde in Form des **Wärmefluß-Kalorimeters** /W2/ entwickelt. Es arbeitet mit wenigen Gramm Zement und gestattet insbesondere auch die Messung der Wärmefreisetzung beim ersten Kontakt des Zementes mit Wasser. Es wird deshalb auch dazu benutzt, um Veränderungen in den Anfangsreaktionen des Zementes, 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 je Zeiteinheit entwickelt wird. Damit scheidet das Gerät auch aus, um die Gesamthydratationswärme eines Zementes (Reaktionsenthalpie) ausreichend genau zu **ermitteln** /H4/.

**Kommentiert [BK29]:** Wächtler, H.J., Stephan, G., Letsch, R.: Differentialkalorimeter zur Messung Reaktionswärme heterogener Prozesse. Silikatechnik 34 (1983) Heft4, S. 121-125

**Kommentiert [BK30]:** BK27: W. Hintzen...

### 5.3 Adiabatische Prüfverfahren

Die im Laufe der Zeit entwickelten verschiedenen adiabatischen Kalorimeter dienen zur Ermittlung der Hydratationswärme des Zementes im Mörtel oder Beton.

Grundsätzlich ist die Versuchseinrichtung jedoch immer gleich:

Man füllt eine Mörtel- oder Betonprobe in ein Gefäß und bringt dieses in einen weiteren Behälter ein. 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 der Probe abfließt. Die Temperaturentwicklung 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 stets ein Temperaturunterschied zwischen Beton und Umgebung vorhanden sein muss. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass die gesuchte adiabatische Betontemperatur durch die Regeleinrichtung „geführt“ wird. Erst die moderne Mess- und Regeltechnik scheint hier zu befriedigenden Ergebnissen zu führen /H4/.

#### **5.4 Teiladiabatische Prüfverfahren**

In teiladiabatischen Prüfverfahren entfällt der gesamte Aufwand der Regelungstechnik.

Die Beton- oder Zementprobe wird in eine stark isolierende Schalung eingebracht und danach sich selbst überlassen. Durch die Wärmedämmung teilt sich die entstehende Wärmeenergie in zwei Anteile auf: Der erste führt zur Temperaturerhöhung der Probe und der zweite Anteil fließt entsprechend den Dämmeigenschaften der Schalung in die Umgebung ab.

Die einzige zu überwachende Größe ist die sich im inneren der Probe einstellende Temperatur und deren Aufzeichnung über die Versuchszeit. Teiladiabatische Prüfverfahren geben die Bedingungen, die in einem Bauteil während der Hydratation herrschen am genauesten wieder. Durch eine entsprechende Ausbildung der Isolierung können die unterschiedlichsten Bauteilabmessungen simuliert werden. Je größer die Abmessungen eines Bauteils sind, desto mehr nähern sich die Bedingungen im Kern adiabatischen Verhältnissen an (vgl. Abb. 4.3), was wiederum im Versuch mit einer stark isolierenden Schalung simuliert werden kann.



## 6 FEM-Berechnung

### 6.1 Ziel der FE-Modellierung

Grundlage für die FEM-Berechnung ist der im Pilotprojekt Sasbach /B2/ verwendete Hochleistungsbeton (hochfester Beton). Die Tabelle 6.1 zeigt die angewandte Rezeptur.

**Kommentiert [BK31]:** Sonderdruck: Beton- und Stahlbetonbau (1999) H5, S. 216-223

Tab. 6.1 /B2/: Mischungsentwurf des verwendeten hochfesten Normalbetons

|  |                |                      |
|--|----------------|----------------------|
| Beton  |                | B85                  |
|  |                | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Zement CEM I 42,5 R-HS (C <sub>3</sub> A frei)         | Z              | 450                  |
| Mikrosilika Slurry (50 % Feststoffgehalt)              | SF             | 68                   |
| Zuschlag (A-B 16)                                      |                | 1760                 |
| Sand 0/2   |                | 614                  |
| Kies 2/8   |                | 386                  |
| Moränensplitt 8/11                                     |                | 265                  |
| Moränensplitt 11/16                                    |                | 495                  |
| Wasser (reines Zugabewasser)                           | W <sub>0</sub> | 106                  |
| Fliessmittel   | FM             | 11,3                 |
| Betonverflüssiger                                      | BV             | 6,1                  |
| Beton  |                | 2401                 |
| $W/Z = (W_0 + W_{SF})/Z$                               |                | 0,32                 |
| $W/B = (W_0 + W_{SF} + W_{FM} + W_{BV})/(Z + SF_{TM})$ |                | 0,32                 |
| Zielkonsistenz   |                | KF                   |
| Ausbreitmaß [cm]                                       |                | 58                   |

In den an diese Studienarbeit anschließenden Versuchen soll mit diesem Beton die verspätete Ettringitbildung infolge hoher Hydratationswärme verifiziert werden.

Die FE-Berechnung verfolgt daher zwei Hauptziele:

Zum ersten müssen die nötigen Randbedingungen ermittelt werden, die dann im Versuch zu den gewünschten Temperaturen führen. Unveränderbare Größe ist hierbei die Betonrezeptur und damit die Hydratationsenthalpie. Beeinflussbar sind die Frischbetontemperatur und die Wärmedämmung der Schalung. Diese Größen sollen möglichst so aufeinander abgestimmt werden, das in möglichst großen Bereichen der Würfel die exakte Zieltemperatur möglichst lange eingehalten wird.

Zweites Ziel ist die Simulation der Temperaturverläufe an verschiedenen Stellen der Probekörper über die Zeit. Diese sollen dann Aufschluss darüber

geben, in welchen Bereichen mit verspäteter Ettringitbildung zu rechnen ist und welche Bereiche von vornherein aus der näheren Betrachtung ausgeschlossen werden können.

Zieltemperaturen sind die nach der DAfStb-Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton zulässigen 60°C sowie die in oben genanntem Bauprojekt vorgefundenen 80°C (vgl. Aufgabenstellung).

## 6.2 Einstieg in die Temperaturberechnung

Die endgültige Modellierung der im Prüfkörper zu erwartenden Temperaturen erfolgt mit dem Programm FEMMASSE ©.

Zur Berechnung braucht das Programm jedoch die folgenden Parameter:

- Geometrie des Probekörpers (Querschnitt) [mm]
- Umgebungstemperatur [°C]
- Wärmeleitfähigkeit der Schalung [W/(m<sup>2</sup>\*K)]
- Wärmekapazität des Betons [kJ/(m<sup>3</sup>\*K)]
- Hydratationsenthalpie [kJ/(m<sup>3</sup>\*K)]
- Exponentialfunktion des adiabatischen Temperaturverlaufs
- Bezugstemperatur und Reife (Arrhenius-Funktion)
- Frischbetontemperatur

### *Geometrie des Probekörpers*

Die Versuchskörper haben die laborüblichen Abmessungen eines Probewürfels von 300/300/300mm.

Das Programm FEMMASSE rechnet jedoch nur mit einem zweidimensionalen Modell, d.h. bei Betrachtung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass Effekte, wie die besonders hohe Auskühlungsrate in den Eckbereichen des Würfels durch die FE-Simulation nicht berücksichtigt werden.

### *Umgebungstemperatur*

Die Umgebungstemperatur wird mit 20°C angenommen, da der Versuch unter Laborbedingungen stattfindet.

### *Wärmeleitfähigkeit der Schalung*

Das Ziel der Modellierung ist die Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln, bei der sich möglichst im gesamten Probekörper die gewünschten Zieltemperaturen einstellen.

Durch ein iteratives Verändern dieses Parameters wird die nötige Wärmedämmung ermittelt, die dann später bei der Verifizierung in Laborversuchen eingesetzt wird.

### Wärmekapazität des Betons

Da der exakte Wert für den verwendeten Beton nicht bekannt ist wird ein durchschnittlicher Wert für Normalbeton angenommen /H1/:

$$c \approx 2500 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \quad (6.1)$$

### Hydratationsenthalpie

Unter der Hydratationsenthalpie versteht man die gesamte Wärmemenge, die während der Hydratation freigesetzt wird. Der exakte Wert wird in einem adiabatischen Kalorimeter ermittelt. Da im Vorfeld jedoch ein solcher Versuch nicht durchgeführt wurde, wird der Wert  $H_{z\infty}$  auf der Grundlage eines teil-adiabatischen Versuchs berechnet, dessen Daten vom Zentrallabor der Firma Bilfinger+Berger dokumentiert wurden. Der genauere Rechengang wird in Kapitel 6.3 beschrieben.

### Exponentialfunktion des adiabatischen Temperaturverlaufs

Das Programm FEMMASSE arbeitet mit der mathematischen Exponentialfunktion

$$H\{R\} = H_{z\infty} * e^{-\left(\frac{a}{R}\right)^b} \quad (6.2)$$

die den realen, adiabatischen Temperaturverlauf möglichst exakt annähern sollte /M1/.

Benötigt werden die Parameter a, b und die Hydratationsenthalpie  $H_{z\infty}$ . R ist die Reife nach der Arrhenius-Funktion.

In Kapitel 6.5 wird eingehend das Vorgehen zur Findung der Parameter beschrieben.

### Bezugstemperatur und Reife (Arrhenius-Funktion)

Zur Vorhersage der zeitlichen Hydratationswärmefreisetzung von Zementen unter adiabatischen Bedingungen ist die Kenntnis der Temperaturabhängigkeit des Hydratationsprozesses wesentlich. Für deren Erfassung sowie zur Berücksichtigung dieses Einflusses auf die Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit (Hydratationsgeschwindigkeit) wird der Ansatz auf der Basis der Arrhenius-Funktion /B4/ benutzt:

$$\frac{dQ}{dt} \propto e^{-\frac{E_A}{R_g T_K}} \quad (6.3)$$

mit  $E_A$ : Aktivierungsenergie [J/mol]  
 $R_g$ : Gaskonstante: 8,134 [J/(mol\*K)]  
 $T_K$ : absolute Temperatur [K]

Danach ist die Reaktionsgeschwindigkeit bei einem bestimmten Reaktionsgrad von der absoluten Temperatur sowie einer Aktivierungsenergie  $E_A$

**Kommentiert [BK32]:** 19787: DafStb, Heft 395 – Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach der Methode der finiten Elemente, Holger Hamfler

**Kommentiert [BK33]:** Manual of FEMMASSE, PC-Version 3.0, FEMMASSE B.V. 1997

**Kommentiert [BK34]:** Breugel, K. van: Methods for Calculating Temperatures in Hardening Cement-Based Materials. Dissertation TU Delft, 1991

abhängig (Reaktionskinetik). Die Aktivierungsenergie  $E_A$  kann dabei sowohl von der Temperatur, als auch vom Prozessgrad, d.h. dem Hydratationsgrad abhängen.

Eine temperaturabhängige Formulierung der Aktivierungsenergie ist demnach nur dann zulässig, wenn man sich auf ein fest definiertes konstantes Temperaturniveau bezieht, i.a. 20°C.

Setzt man also die Gleichung (6.2) in Beziehung zu einem isothermen Prozess bei  $T_{K1}=20^\circ\text{C}$ , so erhält man nach Umstellung den Temperaturfaktor  $k_T$ :

$$k_T = e^{\frac{E_A}{Rg} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{K2}} \right)} \quad (6.4)$$

Der Temperaturfaktor  $k_T$  beschreibt dabei, um wie viel der Prozess unter der Temperatur  $T_{K2}$  in Abhängigkeit von der Temperatur langsamer oder schneller verläuft als der isotherme Bezugsprozess bei 20°C.

Integriert man den Geschwindigkeitsfaktor  $k_T$  über die Zeit, so ergibt sich das wirksame Alter  $t_w$ :

$$t_w = \int_0^t k_t dt \quad (6.5)$$

Die in Gleichung (6.3) anzusetzende Aktivierungsenergie  $E_A$  ist abhängig von der verwendeten Zementart.

Bei der vorliegenden Rezeptur kam ein Zement CEM I 42,5 R-HS zur Anwendung, für den nach Freiesleben /G3/ ein Wert von

$$\frac{E_A}{Rg} = 4000 [\text{K}] \quad (6.6)$$

angesetzt wird.

Gutsch /G3/ liefert abweichende Angaben über die Aktivierungsenergie. Die sich daraus ergebenden Abweichungen in den Ergebnissen werden im Kapitel 6.7 im Zuge einer Fehlerabschätzung näher untersucht.

#### Frischbetontemperatur

Die Frischbetontemperatur ist ein weiterer Parameter, der im Laufe der FE-Berechnung ermittelt wird. Die Frischbetontemperatur hat den Haupteinfluss auf die zu erwartende maximale Temperatur, da über die Schalung weniger die Höchsttemperatur, als vielmehr die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung eingestellt wird.

**Kommentiert [BK35]:** Freiesleben, H., Hansen, P., Pedersen, E.J.: Maleinstrument til kontrol af betons haerding, Nordisk Beton, No1., pp21-25, Stockholm, 1977 (vgl Gutsch)

**Kommentiert [BK36]:** Gutsch, A., Stoffeigenschaften jungen Betons- Versuche und Modelle, iBMB, Braunschweig 1998

### 6.3 Teiladiabatischer Temperaturverlauf des Vorversuchs

Wie in Kapitel 6.2 schon beschrieben benötigt das Programm FEMMASSE<sup>®</sup> die Funktionsparameter a und b sowie die Hydratationsenthalpie.

Der erste Schritt zur Findung dieser Parameter ist die Berechnung des verlustfreien Temperaturverlaufs.

Da die Ergebnisse eines adiabatischen Kalorimeterversuchs nicht zur Verfügung stehen, wird dieser aus dem teiladiabatischen Temperaturverlauf des Vorversuchs ermittelt. Der Vorgang wird in Kapitel 6.4 beschrieben.

Grundlage ist die Temperaturmessung im Inneren eines Probewürfels mit dem verwendeten hochfesten Beton.

Der Versuch fand unter Laborbedingungen statt. Der Probekörper hatte die Abmessungen von 300/300/300 mm. Die Schalung bestand aus 10mm Sperrholz und einer zusätzlichen Wärmedämmung mit 100mm einer handelsüblichen Polystyrol-Hartschaumplatte.

Dabei wurden über einen Versuchszeitraum von 112 Stunden die Kern- sowie die Umgebungstemperaturen aufgezeichnet.

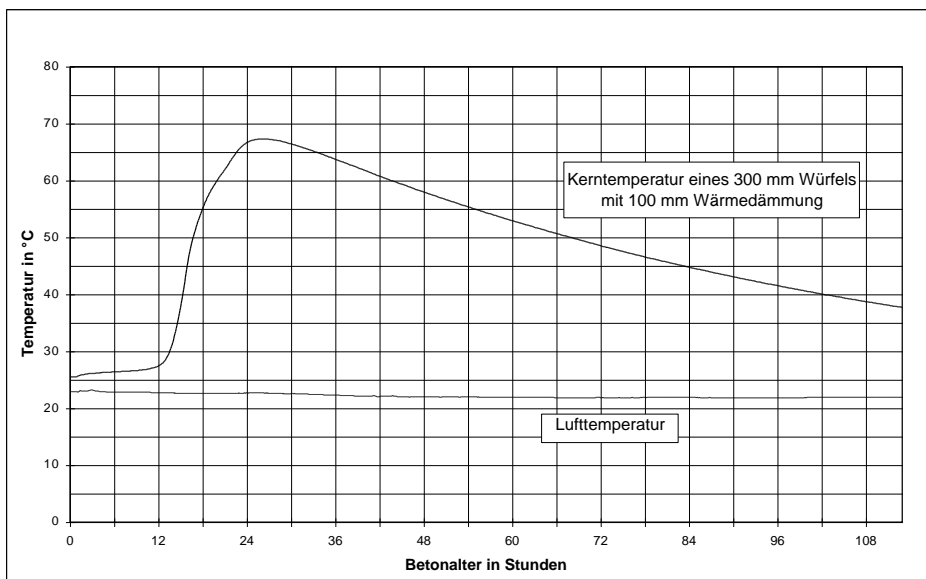


Abb. 6.1: Temperaturverlauf im Inneren des wärmegeämmten Würfels  
Daten des Zentrallabors der Firma Bilfinger+Berger

Auf der Abbildung 6.1 sieht man deutlich, dass es sich um einen teil-adiabatischen Temperaturverlauf handelt.

Zu jeder Zeit  $t_i$  teilt sich die freigesetzte Hydratationswärme in zwei Anteile auf:

- Anteil, der zur Temperaturerhöhung der Betonprobe führt:  $\Delta T_p$
- Anteil, der entsprechend den Dämmeigenschaften der Schalung in die Umgebung abfließt (Wärmeverlust):  $\sum (\Delta T_{p,v})_i$

Ab einem Betonalter von 12 Stunden entwickelt der Hydratationsprozess sehr viel mehr Wärme, als durch die gedämmte Schalung aus dem Probekörper entweicht. Die Temperatur steigt stark an, was wiederum zu einer Beschleunigung des Reaktionsvorgangs führt.

Bis zu einem Alter von 26 Stunden erhitzt sich die Probe auf 67,3 °C. Auch nach diesem Peak entwickelt der Beton zwar noch Prozesswärme, der Energieverlust durch die Schalung ist jedoch höher, die Temperatur sinkt. Das Abflachen der Temperaturkurve und damit die asymptotische Annäherung an die Umgebungstemperatur lässt sich erklären, wenn man betrachtet, dass der Wärmeverlust pro Zeiteinheit linear abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Betonprobe und umgebender Luft ist.

#### 6.4 Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Hydratationswärme-freisetzung

W.Hintzen /H4/ beschreibt in seiner Dissertation die Zusammenhänge zwischen dem teiladiabatischen und dem adiabatischen Temperaturverlauf. Darauf aufbauend werden folgende Berechnungen mit den Temperatur-daten durchgeführt:

*Berechnung des Wärmeverlustes  $\sum (\Delta T_{p,v})_i$*

Der Wärmeverlust pro Zeiteinheit ist linear abhängig von der Temperaturdifferenz  $T_p - T_U$ . Um dies zu berücksichtigen wird ein Verlustfaktor nach Gleichung (6.7) aus der Abkühlkurve ( $t \geq 40$  h) des Versuchs bestimmt:

$$a_p = \frac{-(T_{i+1} - T_i)}{\frac{T_{i+1} + T_i}{2} - T_U} \approx const. \quad (6.7)$$

mit  $T_i = T_p$  zum Zeitpunkt  $i$ : Temperatur im inneren des Würfels [°C]  
 $T_U$ : Lufttemperatur der Umgebung [°C]

**Kommentiert [BK37]:** Hintzen, W.: Zum Verhalten des jungen Betons unter zentrischem Zwang beim Abfließen der Hydratationswärme, Dissertation RWTH Aachen, 1998

**Kommentiert [BK38]:** Tmp-Probewürfel, Excel-Datei über einen teiladiabatischen Temperaturverlauf, Biffinger+Berger 1998

Eine Überlagerung von Wärmeverlusten und noch geringer Hydratationswärmefreisetzung kann man ab diesem Alter ausschließen, wenn man die Besonderheiten des hochfesten Betons beachtet (vgl. Kapitel 4.4). Für den beobachteten Versuch erhält man einen Faktor von:

$$a_p = -0,0127[1/h] \tag{6.8}$$

Daraus ergibt sich der Wärmeverlust pro Zeiteinheit  $\Delta t$  zu:

$$(\Delta T_{p,v})_i = -a_p * [T_p - T_U]_i * \Delta t \tag{6.9}$$

*Berechnung der Hydratationswärmefreisetzung  $\Delta T_{HW}$*

Zur Temperaturerhöhung des Probekörpers  $\Delta T_p$  [K] wird nun die Summe der Wärmeverluste je Zeiteinheit addiert:

$$\Delta T_{HW} = \Delta T_p - \sum (\Delta T_{p,v})_i \tag{6.10}$$

Zusammenfassend ist die Berechnung noch einmal in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die einzelnen Anteile werden in 1-Stunden-Intervallen aufsummiert. Die Berechnung wurde auch für Intervalle von 0,08 Stunden durchgeführt. Die Ergebnisse sind vergleichbar.

Tabelle 6.1: Berechnung des der Hydratationswärme entsprechenden Temperaturanstieges

| t    | $\Delta t$ | $T_p$ | $\Delta T_p$ | $T_U$ | $T_p - T_U$ | $\Delta T_{p,v}$ | $\sum \Delta T_{p,v}$ | $\Delta T_{HW}$ |
|------|------------|-------|--------------|-------|-------------|------------------|-----------------------|-----------------|
| [h]  | [h]        | [°C]  | [K]          | [°C]  | [K]         | [K]              | [K]                   | [K]             |
| 0    |            | 25,5  | 0,0          | 23,0  |             |                  | 0,00                  | 0,00            |
| 1    | 1,0        | 25,6  | 0,1          | 22,9  | 2,6         | -0,03            | -0,03                 | 0,13            |
| 2    | 1,0        | 26,0  | 0,5          | 23,1  | 2,8         | -0,04            | -0,07                 | 0,57            |
| 3    | 1,0        | 26,1  | 0,6          | 23,3  | 2,9         | -0,04            | -0,10                 | 0,70            |
| 4    | 1,0        | 26,2  | 0,7          | 23,0  | 3,0         | -0,04            | -0,14                 | 0,84            |
| 5    | 1,0        | 26,3  | 0,8          | 22,9  | 3,3         | -0,04            | -0,18                 | 0,98            |
| .... | ....       | ....  | ....         | ....  | ....        | ....             | ....                  | ....            |
| 16   | 1,0        | 45,7  | 20,2         | 22,7  | 19,0        | -0,24            | -1,08                 | 21,28           |
| 17   | 1,0        | 51,3  | 25,8         | 22,7  | 25,8        | -0,33            | -1,40                 | 27,20           |
| 18   | 1,0        | 55,1  | 29,6         | 22,7  | 30,5        | -0,39            | -1,79                 | 31,39           |
| 19   | 1,0        | 57,9  | 32,4         | 22,7  | 33,8        | -0,43            | -2,22                 | 34,62           |
| 20   | 1,0        | 60,1  | 34,6         | 22,7  | 36,3        | -0,46            | -2,68                 | 37,28           |
| 21   | 1,0        | 61,9  | 36,4         | 22,7  | 38,3        | -0,49            | -3,17                 | 39,57           |
| 22   | 1,0        | 63,9  | 38,4         | 22,7  | 40,2        | -0,51            | -3,68                 | 42,08           |
| 23   | 1,0        | 65,6  | 40,1         | 22,7  | 42,1        | -0,53            | -4,21                 | 44,31           |
| .... | ....       | ....  | ....         | ....  | ....        | ....             | ....                  | ....            |
| 32   | 1,0        | 65,6  | 40,1         | 22,6  | 43,2        | -0,55            | -9,24                 | 49,34           |
| 33   | 1,0        | 65,2  | 39,7         | 22,5  | 42,9        | -0,54            | -9,78                 | 49,48           |
| 34   | 1,0        | 64,7  | 39,2         | 22,5  | 42,5        | -0,54            | -10,32                | 49,52           |
| 35   | 1,0        | 64,2  | 38,7         | 22,4  | 42,0        | -0,53            | -10,86                | 49,56           |
| 36   | 1,0        | 63,7  | 38,2         | 22,4  | 41,6        | -0,53            | -11,38                | 49,58           |
| 37   | 1,0        | 63,3  | 37,8         | 22,3  | 41,2        | -0,52            | -11,91                | 49,71           |
| 38   | 1,0        | 62,7  | 37,2         | 22,3  | 40,7        | -0,52            | -12,42                | 49,62           |
| 39   | 1,0        | 62,3  | 36,8         | 22,2  | 40,3        | -0,51            | -12,93                | 49,73           |
| 40   | 1,0        | 61,8  | 36,3         | 22,2  | 39,9        | -0,51            | -13,44                | 49,74           |
| 41   | 1,0        | 61,3  | 35,8         | 22,2  | 39,4        | -0,50            | -13,94                | 49,74           |

Als Ergebnis errechnet sich ein Temperaturanstieg  $\Delta T_{HW}$  der Betonprobe von 49,74 K durch die verlustfreie Hydratationswärme unter den beobachteten teiladiabatischen Bedingungen.

Daraus folgt der verlustfreie Temperaturverlauf nach Gleichung (6.11) nach dem sich die Probe bis auf  $25,5\text{ °C} + 49,74\text{ K} = 75,24\text{ °C}$  erhitzt.

$$T_{HW} = T_{p_0} + \Delta T_{HW} \quad (6.11)$$

mit  $T_{p_0}$ : Frischbetontemperatur [°C]

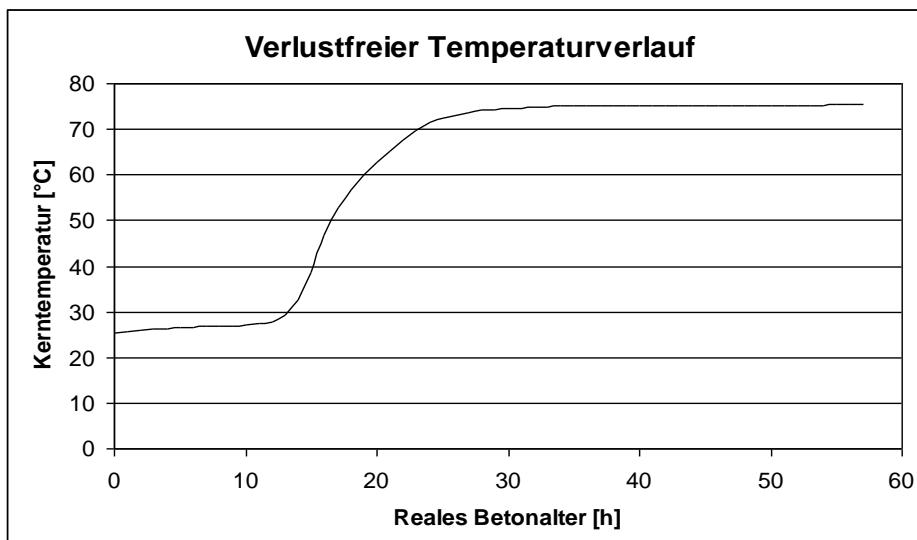


Abb. 6.2: Berechneter verlustfreier Temperaturverlauf  $T_{HW}$

### 6.5 Berechnung der Exponentialfunktion

Nachdem die adiabatische Hydratationswärmefreisetzung bekannt ist, berechnet man nun das zur einzelnen Temperatur  $T_{HW}$  zugehörige wirksame Betonalter (Reife).

Dazu werden im ersten Schritt die jeweiligen Geschwindigkeitsfaktoren  $k_T$  nach Gleichung (6.4) berechnet. Durch die Summation der in die Zeitabschnitte  $t_i$  unterteilten Reifegrade  $k_{T,i}$  ergibt sich das äquivalente Hydratationsalter zum Zeitpunkt  $t_w$  (bezogen auf eine konstante Erhärtungstemperatur von 20°C):



$$R = t_w = \sum_0^t (k_T * \Delta t) \quad (6.12)$$

Trägt man nun die Temperaturen  $\Delta T_{HW}$  über dem wirksamen Betonalter auf, so erhält man die Hydratationswärme freisetzung, wie sie unter isothermen Bedingungen bei 20°C stattfinden würde.

Mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt man nun diejenige Exponentialfunktion nach Gleichung (6.2), deren Parameter den Kurvenverlauf am exaktesten annähern.

Die Berechnung erfolgt am besten mit einem Tabellenkalkulationsprogramm, das den iterativen Rechengang automatisiert durchführen kann.

Für den hier verwendeten Beton erhält man die folgende Gleichung:

$$H\{R\} = 49,470 * e^{-\left(\frac{23,400}{R}\right)^{2,607}} \quad (6.13)$$

Der Parameter  $H_{Z\infty}=49,470$  ist in dieser Weise jedoch noch nicht für das Programm FEMMASSE geeignet. Erst die Transformation von [K] in [kJ/m³] liefert den brauchbaren Wert:

$$H_{Z\infty} [\text{kJ/m}^3] = H_{Z\infty} [\text{K}] * c [\text{kJ}/(\text{K} * \text{m}^3)] \quad (6.14)$$

mit  $c$ : Wärmekapazität des Betons [kJ/(m³\*K)]

Daraus folgt

$$H\{R\} = 123675 * e^{-\left(\frac{23,400}{R}\right)^{2,607}} \quad (6.15)$$

## 6.6 FE-Berechnung der Temperaturverteilung im Probekörper

Mit dem Programm FEMMASSE ist es nun im weiteren möglich, die sich einstellende Temperaturverteilung im Probekörper und deren zeitliche Historie zu ermitteln.

Im ersten Schritt wird über die graphische Eingabeoberfläche ein geeignetes Netz modelliert. Die Kantenlänge ist 300\*300\*300 mm.

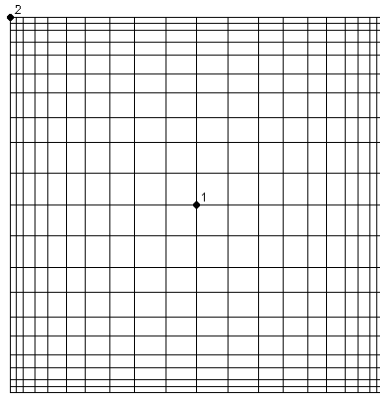


Abb. 6.3: Knotennetz des Programms FEMMASSE für die Simulation der Temperaturverteilung im Probekörper mit den ausgewählten Punkten

Das Netz wird in den Eckbereichen enger gewählt, da es hier zu stärkeren Wärmeverlusten kommt. Insgesamt besteht es aus 441 Knoten bzw. 400 Elementen. In den folgenden Berechnungen werden immer die vorhandenen Temperaturen in den Punkten 1 und 2 dargestellt.

Im nächsten Schritt wird die in Kapitel 6.5 ermittelte Funktion des adiabatischen Temperaturverlaufs eingegeben (Gl. 6.15).

Danach werden die Rand- und Übergangsbedingungen definiert. Für die Versuche wird eine Wärmedämmung aus Polysterol-Hartschaumplatten der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 030 gewählt. Unter Vernachlässigung des Wärmeübergangswiderstands (isolierende Wirkung der angrenzenden Luftschicht) erhält man einen  $k$ -Wert von  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Um das generierte Netz wird nun eine Membran mit dem errechneten  $k$ -Wert definiert.

Die zu erwartenden Lufttemperaturen im Labor während der Versuche werden mit  $22^\circ\text{C}$  angenommen.

Im Kapitel 6.5 ist ermittelt worden, dass die maximale Temperaturerwärmung unter adiabatischen Bedingungen  $49,74$  Kelvin beträgt. Die einzige Größe, mit der die zu erwartenden maximalen Temperaturen gesteuert werden können ist daher die Frischbetontemperatur.

Durch iteratives Verändern dieses Parameters in der Eingabedatei wird die Ausgangstemperatur ermittelt, bei der sich im Probewürfel die Zieltemperatur einstellt.

Für die Zieltemperatur von  $60^\circ\text{C}$  ist ein Frischbetontemperatur von  $13^\circ\text{C}$  nötig. Abbildung 6.4 zeigt den berechneten Temperaturverlauf über einen Zeitraum von 100 Stunden.

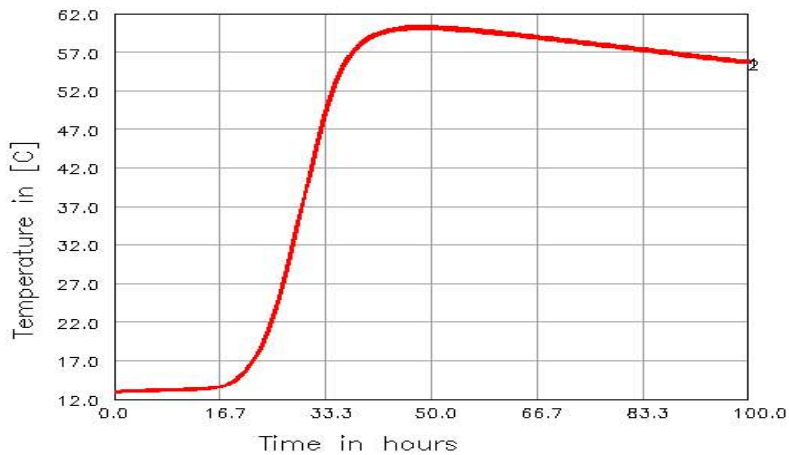


Abb. 6.4: Berechneter Temperaturverlauf mit einer Maximaltemperatur von  $59,8^{\circ}\text{C}$  ( $T_{FR} = 13^{\circ}\text{C}$ )

Bei einer Ausgangstemperatur von  $33^{\circ}\text{C}$  stellen sich die gewünschten  $80^{\circ}\text{C}$  als Zieltemperatur sowohl im Kern (Punkt 1), als auch im Eckpunkt (Punkt 2) ein, d.h. der gesamte Würfel ist der Maximaltemperatur ausgesetzt (vgl. Abb. 6.5).

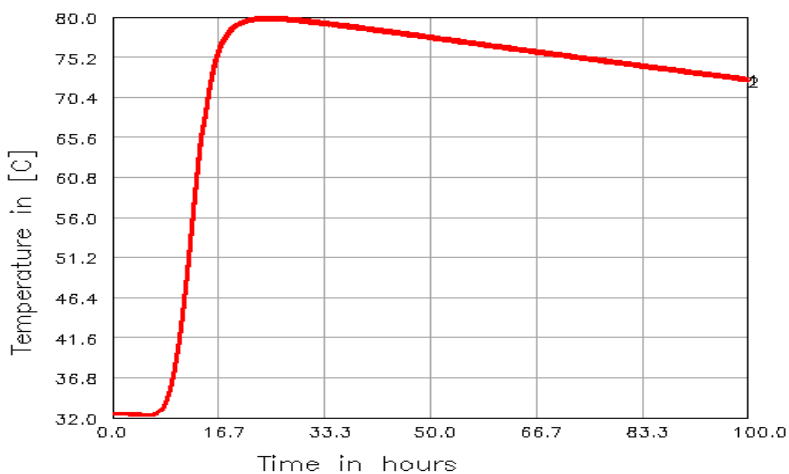


Abb. 6.5: Berechneter Temperaturverlauf mit einer Maximaltemperatur von  $80,0^{\circ}\text{C}$  ( $T_{FR} = 33^{\circ}\text{C}$ )

Sowohl in der Abbildung 6.4, als auch in der Abbildung 6.5 sind jeweils zwei Kurven dargestellt. Die obere zeigt den Temperaturverlauf in der Mitte des Elementes, die untere Kurve zeigt die Temperaturhistorie eines Eckpunktes (vgl. Abb. 6.3: Punkt 1 und 2). Man erkennt, dass der Temperaturunterschied verschwindend gering ist, was auf die starke Wärmedämmung zurück zu führen ist.

## 6.7 Fehlerabschätzungen

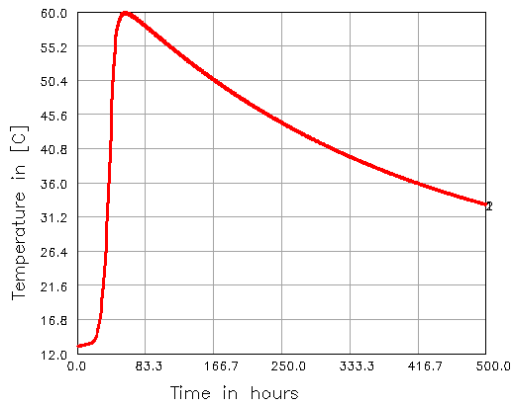
In den Kapiteln 6.5 und 6.6 wurden einige Annahmen und Vereinfachungen getroffen, um die gewünschten Parameter zu ermitteln. Bei einigen Vereinfachungen kann mit Sicherheit gesagt werden, dass ihre Auswirkungen auf den simulierten Temperaturverlauf nur gering sind bei einigen ist eine nähere Betrachtung sinnvoll.

### *Berechnung des Wärmeverlustfaktors $a_p$*

In Kapitel 6.4 wird der Wärmeverlustfaktor  $a_p$  anhand des abfallenden Astes des aufgezeichneten Temperaturverlaufs (vgl. Abb. 6.1) ermittelt. Bei einem Normalbeton besteht in diesem Fall die Gefahr, dass die Abkühlkurve noch von einer geringen Hydratationswärmeentwicklung überlagert wird. Bei dem hier untersuchten hochfesten Beton besteht diese Verzerrung nicht, da man mit Sicherheit davon ausgehen kann, dass der Hydratationsvorgang nach der 26. Stunde vollständig zum Erliegen gekommen ist, da kein Wasser mehr zur Verfügung steht (vgl. Kapitel 4.4).

### *Aktivierungsenergie $E_A$*

Für die Berechnung der Reife ist die Aktivierungsenergie ein wichtiger Parameter. In den FEM-Berechnungen wurde die Aktivierungsenergie nach Freiesleben /G3/ angesetzt (vgl. Gl. 6.6). In einer erneuten Berechnung wird nun als einziger Parameter der Quotient  $E_A/R$  verändert. Gutsch führt tabellarisch einige Werte  $E_A$  aus der Literatur auf, die für einen CEM I zwischen 40 und 60 kJ/mol schwanken. Daraus ergibt sich eine Schwankung des Quotienten  $E_A/R$  von 4800 bis 7215. Für die Vergleichsrechnung wurde der Wert mit 6000 festgelegt. Die berechnete Hydratationswärmeentwicklung ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

Abb. 6.6: Temperaturverlauf für  $E_A/R = 6000$ 

Vergleicht man die Ergebnisse mit denen aus Abbildung 6.4, so erkennt man, dass sich an der entscheidenden Zielgröße, der maximal Temperatur, nichts ändert. Lediglich der zeitliche Verlauf wird gestreckt. Der Peak ist erst nach etwa 60 Stunden erreicht ( $E_A/R = 4000 \rightarrow$  Peak bei 25 Stunden).

Dies lässt sich damit erklären, dass die Aktivierungsenergie lediglich den Ausschlag über die Reaktionskinetik gibt, d.h. wie stark der Prozess durch hohe Temperaturen beschleunigt, bzw. durch niedrige gebremst wird.

Abbildung 6.7 zeigt die Auswirkungen des Quotienten  $E_A/R$  auf den Zeitfaktor  $k_T$ .

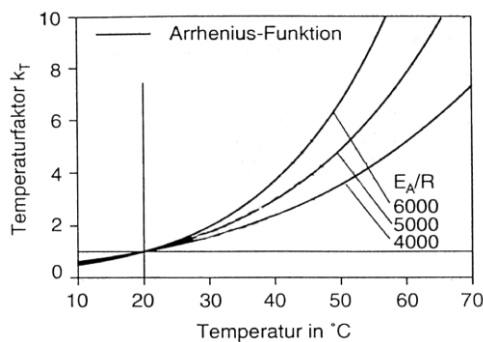


Abb. 6.8: Vergleich der Arrheniusfunktion mit unterschiedlichen Ansätzen für die Aktivierungsenergie /H4/

### *Wärmekapazität des Betons*

Die Wärmekapazität des hochfesten Normalbetons wurde mit  $c=2500$   $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K})$  angenommen.

Für einen Normalbeton liegt die spezifische Wärmekapazität zwischen 2500 und 2800  $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K})$ . Berechnet man die Hydratationswärmeentwicklung bei sonst unveränderten Parametern (hier Beispielhaft für die Zieltemperatur 60°C), mit  $c=2800$   $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K})$  so erkennt man, dass sich die Maximaltemperatur nicht verändert. Dies ist auch verständlich, wenn man beachtet, dass das Programm mit der Hydratationsenthalpie in  $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K})$  rechnet und dieser Wert aus der Gleichung (6.14) folgt, wobei die berechnete Temperaturerwärmung aus dem Vorversuch von 49,74 K unverändert bleibt.

Allerdings wird die Temperaturerhöhung durch eine Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität verlangsamt.

### *Auswirkungen der Frischbetontemperatur auf die Hydratationswärme-freisetzung*

In Kapitel 4.2 wurde beschrieben welche Auswirkungen verschiedene Frischbetontemperaturen auf die Hydratationswärmeentwicklung haben. Dadurch, dass das Programm FEMMASSE mit der Reife nach der Arrheniusfunktion rechnet, berücksichtigt es die Reaktionskinetik des Hydratationsprozesses durch den Zeitfaktor  $k_T$ .

Die Vermutung einiger Autoren, dass sich mit der Frischbetontemperatur auch die maximale Energiefreisetzung (Reaktionsenthalpie) verändert wird jedoch vernachlässigt, da aus der gefundenen Literatur weder genau Aussagen über die Qualität noch über die Quantität dieser Veränderungen gemacht werden können.

### *Ansatz der Reife*

In der Literatur werden verschiedene Möglichkeiten genannt, dass bezogene Betonalter zu ermitteln. Verschiedene Reifefunktionen bieten sich an, jedoch ist nach Meinung der meisten Autoren die Arrhenius-Funktion die genaueste. Hinzu kommt, dass das Programm FEMMASSE selber mit der Reife nach Arrhenius rechnet.

Abbildung 6.7 zeigt die Arrheniusfunktion mit dem Ansatz der Aktivierungsenergie nach F. Hansen ( $E_A=33,5$   $\text{kJ}/\text{mol}$ ) /H4/ im Vergleich zur Reife nach Saul, der eine lineare Beziehung zwischen der Temperatur und dem Temperaturfaktor  $k_T$  zugrunde legt.

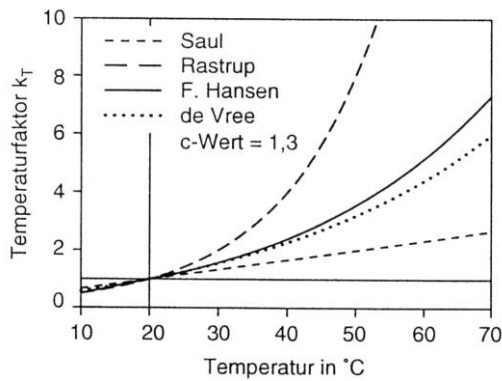


Abb. 6.8: Temperaturfaktor  $k_T$  nach verschiedenen Ansätzen für den Einfluss der Temperatur auf die Hydratationsgeschwindigkeit  $/H_4/$

Kommentiert [BK39]: Hintzen, W., blaues Buch...Seite 19

Zur Erinnerung: Der Temperaturfaktor  $k_T$  beschreibt, um wie viel der Prozess in Abhängigkeit von der Temperatur langsamer oder schneller verläuft als der isotherme Vergleichsprozess bei 20°C.

Fazit der Fehlerabschätzung ist, dass die maximale Temperaturerwärmung auch mit veränderten Annahmen gleich bleiben würde. Lediglich der zeitliche Verlauf der Hydratationswärmefreisetzung würde vom errechneten Verlauf abweichen, was jedoch für die geplanten Versuche unerheblich ist.

## 7 Zusammenfassung

Der DAfStb begrenzt in seiner Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton die maximale Temperaturerwärmung während des Fertigungsprozesses im Werk auf 60°C bzw. 80°C (je nach dem ob das Bauteil für feuchte oder trockene Umgebung vorgesehen ist).

Grund für diese Reglementierung ist die potentielle Gefahr eines sekundären Ettringittreibens, dass bei Bauteilen auftreten kann, die während ihrer Herstellung oder Nutzung hohen Temperaturen ausgesetzt sind.

Kritiker haben nun die Frage aufgeworfen, ob in Bauteilen, die sich infolge der Hydratationswärmefreisetzung stark erwärmen, ebenfalls die Gefahr einer Schädigung des Gefüges durch die nachträgliche Bildung von Ettringit besteht.

Überprüft wird diese Annahme am verwendeten hochfesten Beton des Projekts Sasbach, der sich während dem Betonieren des Widerlagerfundaments auf über 70°C erwärmt hat.

Die starke Erwärmung eines hochfesten Betons hat meist mehrere Ursachen. Die Haupteinflussgröße ist der sehr hohe Zementgehalt. Hinzu kommt die hohe Festigkeitsklasse des verwendeten Bindemittels, die meist mit einer großen Mahlfineinheit einher geht. Das hat zur Folge, dass es zu einer hohen Energiefreisetzungsrates schon am Beginn der Hydratation kommt. Diese beschleunigt wiederum den Hydratationsvorgang, so dass der hochfeste Beton seine gesamte Wärmeenergie während einem Zeitraum von wenigen Stunden abgibt. Fließmittel und der geringe W/Z-Wert führen zwar zu einer Verlangsamung der Hydratation einerseits und zu einer Reduktion der Hydratationsenthalpie andererseits, jedoch nur in geringem Maße.

Im Inneren der Bauteile erhärtet der Beton unter adiabatischen Bedingungen, da die Wärmeabgabe an die Umgebung behindert ist. Meist wird wärmedämmende Schalung verwendet, um Eigenspannungen und Rissbildungen zu vermeiden.

Für die labortechnische Untersuchung des sekundären Ettringittreibens infolge hoher Hydratationswärme werden Probekörper hergestellt, die sich durch die Wahl geeigneter Frischbetontemperaturen und wärmedämmender Schalung während der Hydratation auf 60°C bzw. 80°C erwärmen. Dadurch wird eine definierte Wärmebeanspruchung erzeugt, die zu einem verspäteten Ettringittreiben führen könnte.

Verifiziert werden die Untersuchungen mit der Rezeptur des hochfesten Betons, der beim Projekt Sasbach verwendet wurde. Für diesen Beton werden die Parameter berechnet, mit denen die Zieltemperaturen erreicht werden.



Mit dem teiladiabatischen Temperaturverlauf (gemessen in einem wärmegeprägten Probewürfel), eines im Zentrallabor der Firma Bilfinger+Berger gefahrenen Versuches, wird der adiabatische Temperaturgang des Betons errechnet.

Die in jedem Zeitintervall  $t_i$  freigesetzte Hydrationswärme teilt sich unter semiadiabatischen Bedingungen in einen Anteil auf, der zur Temperaturerhöhung der Betonprobe führt, und einen zweiten, der an die Umgebung abfließt (Wärmeverlust).

Um den Wärmeverlust zu berechnen wird der Wärmeverlustfaktor  $a_P$  aus der Abkühlkurve des Versuchs bestimmt. Er ergibt sich zu  $a_P = -0,0127$  [1/h]. Durch Multiplikation des Faktors  $a_P$  mit der zum Zeitpunkt  $t_i$  herrschenden Temperaturdifferenz zwischen dem Kern der Probe und der umgebenden Lufttemperatur (22°C) erhält man den Wärmeverlust je Zeiteinheit. Dieser wird zum teiladiabatischen Temperaturanstieg addiert.

Daraus ergibt sich eine verlustfreie Temperaturerhöhung von 49,74 Kelvin.

Der berechnete adiabatische Temperaturverlauf wird durch die Exponentialfunktion

$$H\{R\} = 123675 * e^{-\frac{23,400}{R} * 2,607}$$

näherungsweise beschrieben.

Die Hydrationsenthalpie von 123675 kJ/m<sup>3</sup> ergibt sich durch die Multiplikation der adiabatischen Temperaturerwärmung von 49,74 Kelvin mit der angenommenen Wärmekapazität von 2500 kJ/(K\*m<sup>3</sup>) (Transformation der Einheiten).

Mit dem Programm FEMMASE wird die Temperaturbeanspruchung der Probekörper berechnet.

Aufgrund der adiabatischen Erwärmung von 49,74 Kelvin ist es notwendig die Frischbetontemperatur auf 13°C zu senken, um eine Maximaltemperatur von 60°C zu erreichen, bzw. auf 33°C zu erhöhen, um die Zieltemperatur von 80°C zu erlangen.

Die Modellierung mit dem Programm FEMMASSE zeigt, dass bei einer vorgesehenen Dämmung mit einem k-Wert von 0,15 W/(K\*m<sup>2</sup>) die Temperaturverteilung im Probekörper während der Höchsttemperatur annähernd konstant ist. Nach der Berechnung werden die Würfel über einen Zeitraum von etwa 8 Stunden mit der Zieltemperatur beansprucht.

## 8 Ausblick

Im Anschluss an diese Arbeit sollen die Ergebnisse der Temperaturberechnung im Versuch verifiziert werden.

Es werden Probekörper mit der entsprechenden Schalung hergestellt, in die dann der betrachtete Hochleistungsbeton des Pilotprojekts Sasbach eingebracht wird.

Die Aufzeichnung der Temperatur während der Hydratation mit einem Widerstandsmessfühler PT100 liefert Aufschluss darüber, ob die Annahmen der FE-Simulation zutreffend waren.

Im weiteren sollten dann Betrachtungen der Probekörper in Hinblick auf eine verspätete Ettringitbildung erfolgen. Doch bei dem verwendeten Beton kam ein  $C_3A$ -freier Zement zur Anwendung, so dass die Bildung von Trisulfat (Ettringit) aus chemischen Gründen ausgeschlossen werden muss.

Es bleibt abzuwarten, ob mit anderen Betonen die Fragestellung der verspäteten Ettringitbildung aufgrund hoher Hydratationstemperatur erforscht werden wird.

Jedoch ist hierbei zu bedenken, ob die Untersuchung von Hochleistungsbetonen hierfür sinnvoll ist, da ihre dichte Struktur der Trisulfatbildung enormen Widerstand leistet.

## 9 Literatur

- B1 Bergner, H.: Rißbreitenbeschränkung zwangbeanspruchter Bauteile aus hochfestem Normalbeton. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1997), Nr. 482
- B2 Bernhardt, K. ; Brameshuber, W. ; König, G. ; Krill, A. ; Zink, M.: Vorgespannter Hochleistungsbeton: Erstanwendung in Deutschland beim Pilotprojekt Sasbach. In: Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), Nr. 5, S. 216-223
- B3 Brameshuber, W.: Hochleistungsbeton - Anwendung im Brückenbau. Leipzig : Technische Universität, 1998. - In: Beiträge zum 7. Leipziger Massivbau-Seminar "Erfahrungen mit Hochleistungsbeton", 15.-16.10.1998, 8 Seiten
- B4 Breugel van, K.: Numerical Simulation of Hydration and Microstructural Development in Hardening Cement-Based Materials. (I) Theory, (II) Applications. In: Cement and Concrete Research 25 (1995), Nr. 2, S. 319-331, Nr. 3, S. 522-530
- B5 Basalla, A.: Wärmeentwicklung im Beton. Wiesbaden : Bauverlag, 1963. - In: Zement Taschenbuch 1964/65
- B6 Byfors, J., Plain concrete at early ages, swedish cement and concrete Institute, Stockholm 1980
- C1 Catharin, P.: Hydratationswärme und Festigkeitsentwicklung. In: Zement und Beton 22 (1977), Nr. 4, S. 148-159
- D1 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; DAfStb: Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton, September 1989. Berlin : Beuth, 1989
- D2 DIN 1164, Teil8: Portland-, Eisenportland-, Hochofen und Trasszement – Bestimmung der Hydratationswärme mit dem Lösungskalorimeter, (November 1978)
- E1 Eisenmann, O.: Grundlagen der Temperaturberechnungen des frischen und erhärtenden Betons. In: Beton-Informationen (1970), Nr. 3, S. 36-41
- F1 Freyburg, E. ; Stark, J. ; Springenschmid, R. ; Mangold, M.: Einfluß der Zementeigenschaften auf die Hydratationswärmeentwicklung und die Reißneigung des Beton. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar 39 (1993), Nr. 3, S. 231-237

- G1 Grimm, R. ; König, G.: Hochleistungsbeton - Bemessung und konstruktive Ausbildung. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 61 (1995), Nr. 1, S. 69-75 = Berlin : Ernst & Sohn. - In: Betonkalender 85 (1996), Sonderdruck
- G2 Grube, H. ; Hintzen, W.: Prüfverfahren zur Voraussage der Temperaturerhöhung im Beton infolge Hydratationswärme des Zements. In: Beton 43 (1993), Nr. 5, S. 230-234, Nr. 6, S. 292-295
- G3 Gutsch, A.-W. ; iBMB: Stoffeigenschaften jungen Betons - Versuche und Modelle. Braunschweig, iBMB. - In: Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (1998), Nr. 140. - zugl.: Dissertation
- H1 Hamfler, H.: Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach der Methode der Finiten Elemente. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1988), Nr. 395
- H2 Hennecke, M.: Mindestbewehrung und Temperaturbelastung beim jungen Hochleistungsbeton. Berlin : Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 2000. - In: Beiträge zum 38. Forschungskolloquium am 2. und 3. März 2000 an der Technischen Universität München, S. 195-202
- H3 Hintzen, W.: Zum Verhalten des jungen Betons unter zentrischem Zwang beim Abfließen der Hydratationswärme. Düsseldorf : Verlag Bau und Technik. - In: Schriftenreihe der Zementindustrie (1998), Nr. 59
- J1 Jacobs, F.: Wärmeentwicklung und Temperaturverlauf beim Erhärten von Betonen. In: Cement Bulletin 68 (2000), Nr. 2, S. 2
- L1 Lang, E.: Einfluß von Nebenbestandteilen und Betonzusatzmitteln auf die Hydratationswärmeentwicklung von Zement. In: Beton-Informationen 37 (1997), Nr. 2, S. 22-25
- L2 Lang, E.: Die Bestimmung des "C-Werts". In: Beton-Informationen 37 (1997), Nr. 3, S. 46-47
- L3 Laube, M., Werkstoffmodell zur Berechnung von Temperaturspannungen in massigen Bauteilen im jungen Betonalter, Diss. TU Braunschweig 1990
- M1 Manual of FEMMASSE, PC-Version 3.0, FEMMASSE B.V. 1997

- S1 Stark, J. ; Wicht, B. ; Bauhaus-Universität Weimar: Anorganische Bindemittel - Zement - Kalk - Spezielle Bindemittel -. Weimar : F.A. Finger Institut für Baustoffkunde. - In: Schriften der Bauhaus-Universität Weimar (1998), Nr. 109
- S2 Sylla, H.-M.: Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung. In: Beton 38 (1988), Nr. 11, S. 449-454
- S3 Schießl, P.: Umdruck für Baustoffkunde des 3. Semesters, RWTH-Aachen
- S4 Schöppel, K.: Entwicklung der Zwangsspannungen im Beton während der Hydratation. In: Bericht aus dem Baustoffinstitut (1993), Nr. 1. München, Technische Universität, Diss., 1993
- T1 Thielen, Dr.: Vertiefer-Umdruck des 7. Semesters, RWTH-Aachen
- V1 Verein Deutscher Zementwerke: Zement Taschenbuch 1984. 48. Ausg. Wiesbaden : Bauverlag, 1984
- V2 Vinkeloe, R. ; Weber, R.: Ermittlung der Temperatur des frischen und erhärteten Betons. In: Beton-Informationen 26 (1986), Nr. 5, S. 47-52
- W1 Werthmann, E.: Berechnung des Temperaturverlaufes durch Hydratationswärme an dünnwandigen Betonmauern. In: Zement und Beton 27 (1982), Nr. 3, S. 131-133
- W2 Wächtler, H.J., Stephan, G., Letsch, R.: Differentialkalorimeter zur Messung Reaktionswärme heterogener Prozesse. In: Silikattechnik 34 (1983) Heft 4, S. 121-125