

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

MASTER`S THESIS

**Beitrag zur Bestimmung der Wärmeentwicklung
in Betonbauteilen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich SCHNEIDER
Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes HORVATH

am

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und
Brandsicherheit

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

Von

Milanko BOGDAN
E 610 / 0025557

Wien, 2009/2010

.....

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in Absprache zwischen Firma Alpine Bau und des Instituts für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien.

Meine Diplomarbeit „Beitrag zur Bestimmung der Wärmeentwicklung in Betonbauteilen“ nahm seinen Anfang im Sommer 2009, als ich verpflichtet war, eine wissenschaftliche Arbeit auszufassen, um mein Studium erfolgreich abschließen zu können.

Für alle Anregungen zu dieser Arbeit und für jederzeit gewährte Unterstützung möchte ich mich besonders bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. J. Horvath sehr herzlich bedanken. Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Dr.h.c. U. Schneider sowie den Mitarbeitern des Institutes danke ich auch für die entgegenkommende Hilfe und für die Ermöglichung dieser Arbeit.

Allen beteiligten Mitarbeitern der Firma Alpine Bau schulde ich besonderen Dank für die Unterstützung und Hilfe bei der Organisation und Durchführung der Versuche.

Zuletzt ebenso besonderer Dank gebührt meinen Eltern und meiner Schwester, sowie meinen Kollegen und Freunden, die mich während des Studiums unterstützt und meistens mit guter Laune begleitet haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Vorgehensweise	2
2. Grundlagen	3
2.1 Begriffsbestimmungen	3
2.2 Erhärtungsprozess des Betons	5
2.3 Wärmeentwicklung während der Betonerhärtung	7
2.4 Temperaturverlauf	16
2.5 Spannungen, Rissbildung und Rissicherheit	23
3. Stand der Forschung	35
3.1 Unterschiedliche Bedingungen der Wärmeentwicklung	35
3.2 Laboratorische Bestimmung der Wärmeentwicklung	36
3.2.1 Lösungskalorimeter	37
3.2.2 Wärmeflusskalorimeter	39
3.2.3 Adiabatische Kalorimeter	40
3.2.4 Teiladiabatische Kalorimeter – Verfahren LANGAVANT	41
3.3 Rechnerische Bestimmung der Wärmeentwicklung	43
3.3.1 Thermische Kennwerte des Betons	43
3.3.2 Rechnerische Bestimmung der Wärmeentwicklung der Normzemente	45
3.3.3 Zeitpunkt der maximalen Temperatur	46
3.3.4 Temperaturbestimmung im Bauteil unter adiabatischen Bedingungen	47
3.3.5 Temperaturbestimmung im Bauteil unter teiladiabatischen Bedingungen.....	50
3.3.6 Abschätzung der Temperatur im Bauteil	51
3.4 Erfassung und Kontrolle der Temperaturentwicklung vor Ort	54
3.4.1 Vorgangsweise	54
3.4.2 Messtechnik	54

4. Bausoftware und Messgeräte	57
4.1 Bausoftware „Cobet“	57
4.1.1 Allgemein.....	57
4.1.2 Aufbau und Leistungsbeschreibung	57
4.1.2.1 Modul STAMMDATEN	58
4.1.2.2 Modul PROGRAMM	65
4.1.2.3 Modul LABOR	76
4.1.2.3 Modul ÜBERWACHUNG	79
4.2 Messgeräte	81
4.2.1 Messgerät GSV-4GPRS	81
4.2.2 Datenlogger TESTO 177-T4	83
5. Versuchsdurchführung und Interpretation	85
5.1 Messung der Temperaturentwicklung	85
5.1.1 Versuchsstandort	85
5.1.2 Betonherstellung und Betonrezeptur	86
5.1.3 Messvorbereitungen	88
5.1.4 Ergebnis	90
5.2 Temperaturbestimmung mit COBET-Software	92
5.2.1 Eingangsparameter	92
5.2.2 Bestimmung der Betonrezeptur	96
5.2.3 Ergebnisse	97
5.3 Prüfung des Temperaturanstieges des Betons durch Hydratationswärme nach ONR 23303	99
5.4 Abschätzung der Temperaturentwicklung mit Hilfe der Faustformeln und der Tabellenwerte	103
5.4.1 Abschätzung der max. zu erwartenden Betontemperatur unter Berücksichtigung des Hydratationsgrades	103
5.4.2 Abschätzung der max. zu erwartenden Betontemperatur unter Berücksichtigung der Bauteildicke	104
5.4.3 Abschätzung der max. zu erwartenden Betontemperatur mit Hilfe von Tabellenwerten	105
5.5 Conclusio	106
6. Beispiele	108
6.1 Unterschiedliche Zemente	108
6.2 Unterschiedliche Zementmengen	112
6.3 Unterschiedliche Frischbeton- und Außentemperaturen	120

- Fazit	121
- Zusammenfassung	122
- Abstract	123
- Literaturzusammenstellung	124
Normen	124
Literatur	125

1 Einleitung

Aus der Reaktion der Zementminerale mit dem Wasser entstehen neue chemische Verbindungen, die die wasserunlösliche Struktur des Zementsteines bilden. Für diesen sehr komplexen Vorgang wird der Begriff Hydratation verwendet. Unvermeidbar mit dieser chemischen Reaktion ist auch die Freisetzung von Hydratationswärme, die zu einem beträchtlichen Temperaturanstieg in Betonbauteilen führt. Dabei ergeben sich nicht zu unterschätzende Temperaturdifferenzen zwischen dem Bauteilkern und oberflächennahen Schichten. Die Aufheizung durch entstehende Hydratationswärme und das spätere Abkühlen führen zu Eigenspannungen und/oder zu Zwangsspannungen in den Bauteilen. Die Eigenspannungen und eventuell vorhandene Verformungsbehinderungen können zu frühen Rissen in den Bauteilen führen.

Je niedriger die maximale Temperatur im Bauteil ist und je geringer die Temperaturdifferenz im Bauteil ausfällt, desto geringer ist die Risswahrscheinlichkeit. Risse können eine Reihe negativer Auswirkungen auf das Bauteil haben. Darunter fallen zum Beispiel geringere Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe, Karbonatisierung oder Frost.

1.1 Problemstellung

Um die unerwünschten Erscheinungen infolge der abfließenden Hydratationswärme zu vermeiden, werden betontechnologisch Temperaturdifferenzen von bis zu ca. 15 Kelvin als unproblematisch angesehen. Um die zulässige Temperaturdifferenzen einzuhalten, gibt es neben unterschiedlichen Kühlmethoden, die wärmeschützende Nachbehandlung des Bauteils, die Minimierung des Zementgehaltes usw. auch die Möglichkeit der Optimierung der Betonrezeptur durch zum Beispiel Verwendung von Zementen mit niedriger Hydratationswärme oder durch Verwendung der unterschiedlichen Gesteinskörnungen. Jedoch ist die Prognose der zu erwartenden Temperaturentwicklung in Betonbauteilen mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden, wegen der komplexen Zusammenwirkung der zahlreichen Parameter und der unsicheren Erfassung der herrschenden Bedingungen.

1.2 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit soll an einem praktischen Beispiel in Abhängigkeit der Materialparameter, Umweltbedingungen und Bauteilparameter die Temperaturentwicklung im Beton bestimmt werden. Dabei sollen rechnerische Ermittlungen sowie Messungen im Labor durchgeführt und die Korrelationen zwischen diesen Ergebnissen dargestellt werden. Auch die Eignung der Cobet-Bausoftware für die Bestimmung der Temperaturentwicklung und des modernen Mess-Überwachungsgerätes GSV-4GPRS soll untersucht werden. Ziel der Arbeit ist es, anhand der Versuche eine Abschätzung der maximalen Temperaturen in Betonbauteilen machen zu können.

1.3 Vorgehensweise

Nach der Vorstellung der Aufgaben und Ziele, wird in Kapitel 2 kurz in das Thema eingeführt. Zudem werden notwendige Grundlagen erörtert.

Derzeit verwendete Methoden zur Bestimmung der Temperaturentwicklung sowie unterschiedliche Bedingungen werden in Kapitel 3 erläutert. Hierzu werden aktuelle laboratorische, rechnerische sowie Methoden der Bestimmung der Temperaturentwicklung vor Ort dargestellt.

In Kapitel 4 werden der Einsatz und Möglichkeiten der COBET-Software sowie der verwendeten Messgeräten beschrieben.

Die Messung der Temperaturentwicklung an einem Bauteil wird in Kapitel 5 erläutert. Hier wird auch die COBET Software praktisch eingesetzt und die gerechneten Ergebnisse werden mit den Messergebnissen verglichen. Die Abschätzung der Temperaturentwicklung nach ONR 23303 und mit Hilfe von Faustformeln wird auch durchgeführt und die Ergebnisse werden gegenübergestellt.

Im Kapitel 6 wird der Einfluss der unterschiedlichen Bedingungen auf die Temperaturentwicklung betrachtet. Dabei werden Versuche mit unterschiedlichen Zementarten und Zementmengen sowie verschiedenen Außentemperaturen durchgeführt.

2. Grundlagen

2.1 Begriffsbestimmungen

Beton

Beton ist ein künstlicher Stein, der aus einem Gemisch von Zement, Gesteinskörnung Wasser, Zusatzstoffe und Zusatzmittel durch Erhärten des Wasser-Bindemittel-Gemisches entsteht. Beton hat eine hohe Druckfestigkeit, im Vergleich dazu sind Zugfestigkeit und Schubfestigkeit gering. Außerdem hat Beton eine hohe Wärmespeicherefähigkeit von ca. 1000 J/(kg·K) und die Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,1 W/(m·K).

Frischbeton

Frischbeton heißt der Beton, solange er verarbeitet werden kann. Er wird aus Zement, Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzstoffe und Zusatzmittel gemischt und ist noch nicht erhärtet.

Junger Beton

Junger Beton oder Jungbeton heißt der Beton während des Erstarrens in der Übergangsphase vom Frischbeton zum Festbeton: es ist erhärtende Beton.

Festbeton

Festbeton heißt der erhärtete Beton. Die Gesteinskörner sind durch das erhärtete Wasser-Bindemittel-Gemisch fest miteinander verklebt worden.

Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das heißt, ein fein gemahlener anorganischer Stoff, der mit Wasser gemischt, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt. In der derzeit gültigen ÖNORM EN 197-1 werden die 27 Produkte der Familie der Normalzemente in folgende fünf Hauptzementarten unterteilt:

- CEM I Portlandzement
- CEM II Portlandkompositzement
- CEM III Hochofenzement
- CEM IV Puzzolanzement
- CEM V Kompositzement

Die Zemente werden in ihrer Festigkeit in drei Klassen eingeteilt. Es werden die Festigkeitsklassen

32,5 ; 42,5 ; 52,5

unterschieden. Die Werte stehen dabei für Mindestnormfestigkeit nach 28 Tage.

Für jede Klasse der Normfestigkeit sind zwei Klassen für die Anfangsfestigkeit definiert: eine Klasse mit üblicher Anfangsfestigkeit, die mit N gekennzeichnet wird, und eine Klasse mit hoher Anfangsfestigkeit, gekennzeichnet mit R [ÖNORM EN 197].

Gesteinskörnung

Gesteinskörnungen bestehen aus natürlichem oder künstlichem, dichtem oder porigem Gestein mit Korngrößen, die für die Betonherstellung geeignet sind. Man unterscheidet zwischen Normalzuschlag für Normalbeton, Leichtzuschlag für Leichtbeton und Schwerzuschlag für Schwerbeton.

Zusatzmittel

Zusatzmittel verändern Betoneigenschaften. Ihr Anteil am Volumen des Betons ist gering. Sie können dem Beton zugesetzt werden, aber nur unter vorgeschriebenen Bedingungen. Zusatzmittel wirken chemisch oder physikalisch oder auf beide Arten. Zusatzmittel sind zum Beispiel Verflüssiger, Fließmittel, Luftporenbildner, ...

Zusatzstoffe

Zusatzstoffe beeinflussen bestimmte Eigenschaften des Betons. Ihr Anteil am Betonvolumen ist zu berücksichtigen. Zusatzstoffe sind fein aufgeteilte Stoffe, wie Traß, Gesteinsmehl, Flugasche oder Farben. Sie müssen einer Norm oder einer allgemeiner bauaufsichtlichen Zulassung entsprechen.

Hydratation

Exotherme chemische Reaktion zwischen Zement und Wasser, wodurch das Erstarren und später das Erhärten des Betons verursacht wird.

Hydratationswärme

Bei der Hydratation freiwerdende Wärmemenge.

2.2 Erhärtungsprozess des Betons

Mit Zugabe des Anmachwassers beginnt die als Hydratation bezeichnete exotherme chemische Reaktion des freien Wassers mit dem Zement, in dessen Folge sich wasserhaltige Calciumsilikat-Hydratverbindungen, kurz Hydrat- oder C-S-H-Phasen, ausbilden. Diese hydraulische Erhärtung vollzieht sich zum Einen durch Inlösungsgehen des Ausgangsmaterials und zum Anderen durch unmittelbare Wasseranlagerung an die feste Phase des Ausgangsmaterials, [1],[2]. Die festigkeitsbildende Verfilzung der C-S-H-Phasen ist durch die Wärmeentwicklung, chemische Wasserbindung und Porenstrukturverfeinerungen begleitet. Bei Reaktionsfortschritt können drei fließend ineinander übergehende Stadien unterschieden werden [2],[3], Bild 2.1.

• *Anfangsphase*

Die nur wenige Minuten dauernde Anfangsreaktion ist durch die Bildung einer gesättigten Ionenkonzentration im Wasser und der Verbindung von Tricalciumaluminat und Calciumsulfat zu Trisulfat (Ettringit) geprägt. Eine erste Schicht aus Reaktionsprodukten schirmt die unhydratisierten Zementpartikel ab und bewirkt im folgenden eine mehrstündige Ruhephase.

• *Mittlere Phase*

Nach rund 5 Stunden reißt diese Membran auf; der Abbindeprozess beschleunigt sich durch die Umformung des Tri- und Dicalciumsilikats zu langfaserigen C-S-H-Nadeln, die von der zementkornoberfläche ausgehend ineinander verfilzen und so die Grundlage für den festen, hochporösen Zementstein schaffen.

• *Endphase*

Die oberflächennahe Zementhydratation wird zunehmend von einem diffusionskontrollierten Prozess abgelöst, da sich der Diffusionsweg der Wassermoleküle ins Korninnere mit wachsender C-S-H-Schichtdicke verlängert. Kurze Kristallfasern verdichten die Struktur, die Basizität steigt durch Abspaltung großer Mengen von Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Das vorhandene Trisulfat wandelt sich in Verbindung mit Wasser zu Monosulfat um.

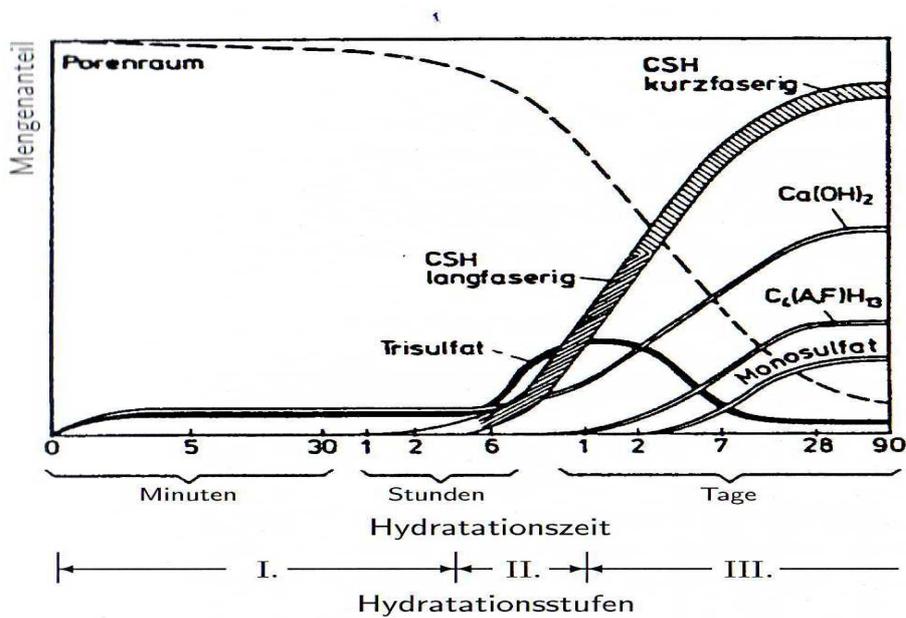


Bild 2.1: Schematische Darstellung der Hydratationsphasen [3].

Tabelle 2.1: Zusammensetzung des PZ-Klinkers und Hydratationswärmeentwicklung der Klinkerphasen nach LOCHER [4].

Klinkerphase	Kurz-bez.	chemische Formel	mittl. Gehalt [M-%]	Hydr.-wärme [J/g]	Wasser-bindung [g/g]
Tricalciumsilikat	C_3S	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	63.0	500	0.237
Dicalciumsilikat	C_2S	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	16.0	250	0.209
Tricalciumaluminat	C_3A	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	11.0	1340	0.800
Calciumaluminatferrit	C_4AF	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	8.0	420	0.334
freies Calciumoxid		CaO	1.0	1150	0.321
freies Magnesiumoxid		MgO	1.5	840	-

Für den Aufbau des Zementsteins und für die Eigenschaften des Betons ist die Dicke der Wasserschicht zwischen den einzelnen Zementkörnern maßgebend. Die Dicke dieser Wasserschicht beträgt nur wenige tausendstel Millimeter. Die Entfernung von einem Zementkorn zum Anderen wird umso größer, je mehr Wasser für die gleiche Zementmenge verwendet wird: je größer also der Wasserzementwert wird. Die Entfernung der Zementkörner nimmt fast proportional mit dem Wasserzementwert zu. Wenn die Entfernung zwischen den Zementkörnern zu groß wird, bleiben Hohlräume übrig, die von den Hydratationsprodukten nicht geschlossen werden können [5].

Neben der chemischen Zusammensetzung ist auch die Korngrößenverteilung des Zements für die Hydratationsgeschwindigkeit von Bedeutung; eine höhere Mahlfineinheit wirkt sich reaktionsbeschleunigend aus. Entscheidend sind außerdem die vorherrschenden klimatischen Bedingungen (Temperatur und Materialfeuchte).

2.3 Wärmeentwicklung während der Betonerhärtung

Der exotherme Charakter des Zements beruht auf dem besonderen Herstellungsverfahren des latent hydraulischen Bindemittels. Durch die rasche Abkühlung nach dem Sintern entstehen durch Kristallisation der Schmelze metastabile Verbindungen, die in einem ungeordneten Zustand mit hoher thermisch eingepprägter freier Energie eingefroren werden.

Die energetische Dimension des Hydratationsprozesses wird an einem Beispiel deutlich:

Beispiel: Bei einer Fundamentplatte mit einer Fläche von 40 m x 25 m und einer Dicke von 0,50 m wird bei einem Beton üblicher Zusammensetzung innerhalb der ersten 3 Tage eine Wärmemenge von etwa 35×10^6 kJ freigesetzt. Diese würde einer elektrischen Arbeit von rd. 10 000 kWh entsprechen, die bei einer Spannung von 380 V im genannten Zeitraum einen Anschlusswert von rd. 365 A erfordert [6].

Für die Geschwindigkeit und Höhe der Wärmefreisetzung bei der Hydratation sind vor allem folgende Eigenschaften maßgeblich:

- 1) chemische Zusammensetzung des Zementes
- 2) Zusatzstoffe und Zusatzmittel
- 3) Wasserzementwert
- 4) Korngrößenverteilung (Mahlfeinheit)
- 5) Temperaturverlauf während der Hydratation u.a.

Chemische Zusammensetzung des Zementes

Die Zemente, hinsichtlich ihrer Wärmeentwicklung aufgrund chemischer Zusammensetzung unterscheiden sich deutlich voneinander. Insbesondere das Tricalciumaluminat weist eine hohe und rasche Wärmefreisetzung auf, Bild 2.2.

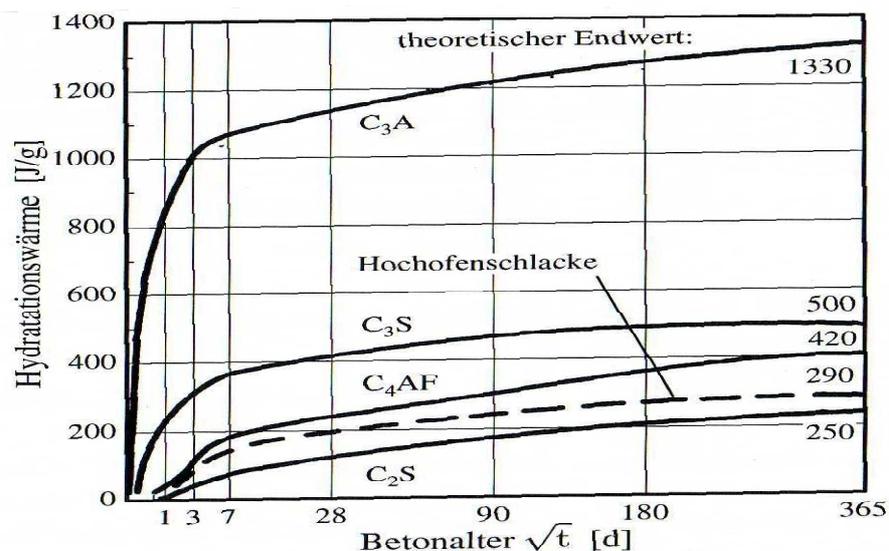


Bild 2.2: Wärmeentwicklung der Hydratphasen [5].

Die anfängliche Reaktion (Stadium I, Bild 2.3) an der Oberfläche der Zementpartikel ist mit einer kurzen, aber hohen Wärmeentwicklungsrate verbunden (etwa 40-80 J/g h). Die entstehende Wärmemenge beträgt aber lediglich etwa 10-20 J/g und ist nicht relevant, da der Vorgang weit vor dem Einbau des Frischbetons in die Schalung abgeschlossen ist und dadurch hervorgerufene Temperaturerhöhung vernachlässigt werden kann [6].

In der Ruheperiode (Stadium II, Bild 2.3) geht die Wärmeentwicklung drastisch zurück, hört aber nicht vollständig auf.

Die Beschleunigungsperiode (Stadium III, Bild 2.3) weist die größte Wärmerate auf, setzt aber bis zum Maximum lediglich ca. 20 % der Gesamtwärme frei. Die Geschwindigkeit der Wärmeentwicklung hat aber trotzdem erheblichen Einfluss auf das sich ausbildende Temperaturfeld. Maßgebend ist der sich einstellende Wärmestau [6]. Im Stadium IV (Bild 2.3) entsteht maßgebende Hydratationswärmemenge, die die maximale Temperatur im Bauteil hervorruft.

In der anschließenden Finalperiode wird zwar noch eine beträchtliche Hydratationswärme gebildet, aber so verlangsamt, dass eine weitere Temperatursteigerung nur unter adiabatischen Bedingungen auftreten kann.

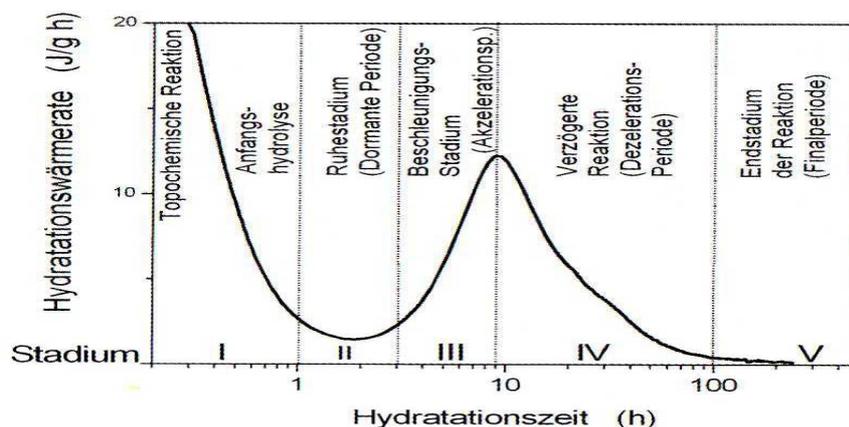


Bild 2.3: Reaktionsablauf und Reaktionsstadien bei der Hydratation des Klinkerminerals im Portlandzement

Zusatzstoffe und Zusatzmittel

Latent-hydraulische und puzzolanische Zusatzstoffe weisen ein spezifisches Hydratationsverhalten auf. Das in Anmachwasser gelöste Kalziumhydroxid regt während des Hydratationsvorganges die Reaktion der latent-hydraulischen Hauptbestandteilen (z.B. Hüttensand) an. Dieser ist die Voraussetzung, dass puzzolanische Stoffe (z.B. Flugasche, Silikastaub), die zum Aufbau der Hydrate $\text{Ca}(\text{OH})_2$ benötigen, reagieren können. In beiden Fällen ist die Reaktion gegenüber dem Portlandzementklinker zeitlich verzögert, bei Flugasche sehr beträchtlich, und demzufolge ist der Hydratationsfortschritt geringer, sodass der Beitrag zu den Maximaltemperaturen naturgemäß vermindert ist. Die Geschwindigkeit der

Wärmefreisetzung von Hüttensand bei Normtemperaturen ist von Mahlfeinheit und Anteil im Zement abhängig, die entwickelte Gesamtwärme von der chemischen Zusammensetzung. In [34] ist nachgewiesen, dass selbst ein Hüttensandanteil von 30% im Kalorimeter zu etwas höheren Temperaturen als der Portlandzement führt.

Silikastaub entwickelt eine Wärmemenge, die bis zu etwa 200% die vom Portlandzementklinker erreichen kann. Daraus resultiert, dass die Wärmeentwicklung in gleicher Größe auftritt, wie bei Portlandzementen höherer Festigkeitsklasse. Bei hochfesten Betonen mit w/z-Werten um 0,30 kann der adiabatische Temperaturanstieg 70 – 80 K betragen [36]. Die Reaktion des Silikastaubs mit Calciumhydroxid findet praktisch zeitgleich mit der Zementhydratation statt. Die Silikapartikel wirken dabei als Kristallisationskeime, wodurch der Kristallisationsprozess insgesamt etwas beschleunigt wird. Bild 2.4 zeigt die Wärmeentwicklung bei Portlandzementleim und Zugabe von Silikastaub für verschiedene Verhältnisse sf/z . Die Messung wurde unter adiabatischen Bedingungen durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei einer Zugabemenge unter 10 M.-% von Zement, wie in der Praxis üblich, keine deutliche Erhöhung der freigesetzten Wärme zu erwarten ist.

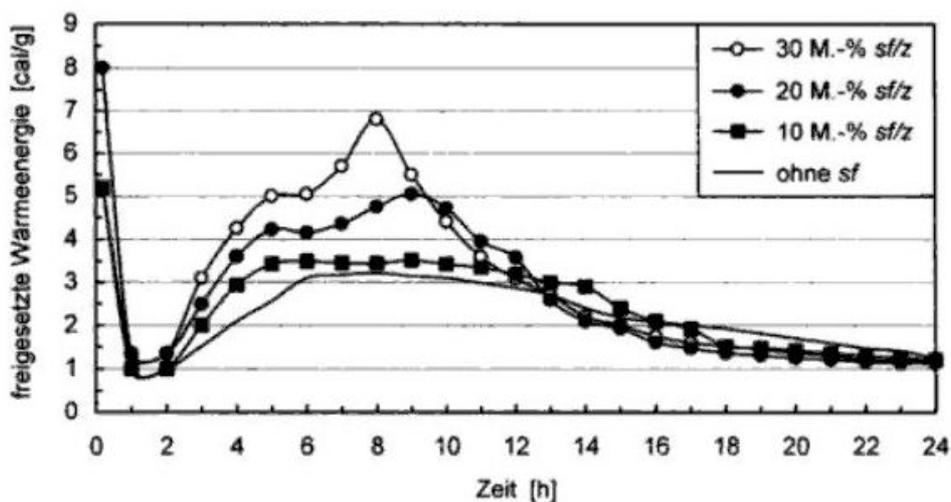


Bild 2.4: Energiefreisetzung bei Zugabe von Silikastaub [40]

Der Reaktionsgrad der Flugasche ist ebenfalls wie bei Hüttensand an den Anteil im Zement oder dem Klinkeranteil im Beton gebunden, erreicht selbst bei sehr langer Erhärtungszeit nur sehr niedrige Werte. Außerdem ist die Wärmewirkung sehr gering, aus Messungen folgt ein Beitrag von lediglich etwa 20 – 35 J/g, d.h. etwa 5 – 10 % der Wärmetönung des Portlandzementes (Bild 2.5). Die Abnahme der Wärmeentwicklung des Zementes durch den Zusatz von Flugasche ist nicht linear, sondern vom Mischungsverhältnis abhängig und verläuft gekrümmt [6]. Danach ist bei geringem Anteil an Flugasche (bis etwa 20 %) die Verminderung der Hydratationswärme geringer, bei erhöhtem Gehalt dagegen überproportional. Bei der Temperaturberechnung in der Frühphase der Erhärtung kann der Einfluss der Flugasche durchaus vernachlässigt werden.

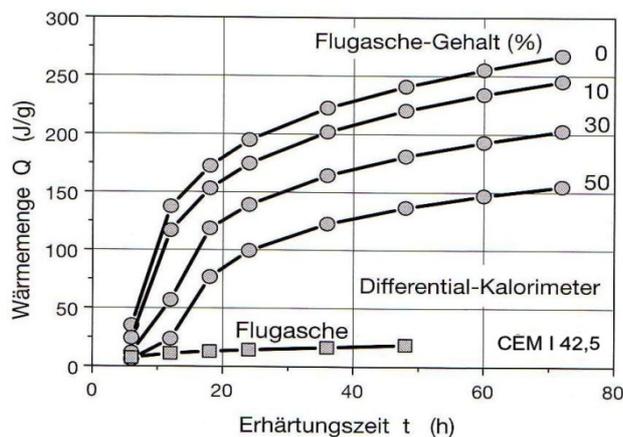


Bild 2.5: Wärmeentwicklung von Flugasche und Zementen mit unterschiedlichem Flugaschengehalt [6]

Heute gebräuchliche Zusatzmittel, wie Fließmittel und Verflüssiger oder Erhärtungsbeschleuniger und –verzögerer, greifen in den Hydratationsmechanismus ein und verändern den Ablauf der Reaktion und damit auch der Wärmeentwicklung. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass durch die Zusatzmittel die insgesamt freisetzbare Wärmemenge nicht verändert wird, sondern lediglich der zeitliche Verlauf der Wärmeentwicklung. Die Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke untersuchte in umfangreichen Versuchsreihen den Einfluss verschiedener Zusatzmittel auf die Hydratationswärmeentwicklung von Hochofenzementen mit und ohne Zusatz von Nebenbestandteilen wie Steinkohlenflugasche, Kalksteinmehl oder Silikastaub. Eine Kurzfassung ist in [40] zu finden. Beispielphaft ist die Wirkung drei verschiedener Fließmittel in Bild 2.6 dargestellt.

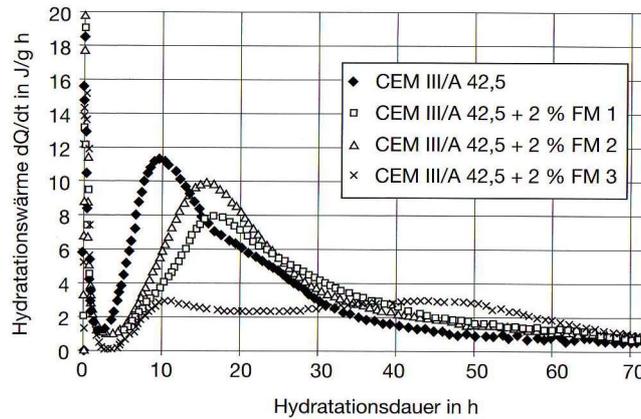


Bild 2.6: Einfluss verschiedener Fließmittel auf die Wärmeentwicklung von CEM III/A 42,5 [40]

Wasserzementwert

Eine Steigerung des w/z -Wertes führt zu einem höheren Hydratationsgrad bzw. einer größeren insgesamt entwickelten Wärmemenge (Bild 2.7). Die Wärmefreisetzung ist am Anfang nicht so stark und verläuft insgesamt ausgeglichener; die Bauteiltemperaturen sind höher. Bei hochfesten Betonen ist eine gegensätzliche Tendenz festzustellen. Die Wärmeentwicklung steigt sehr schnell und steil an, bricht aber infolge Wassermangels nach relativ kurzer Zeit (10 bis 18 h) ab. Je niedriger der w/z -Wert ist, desto ausgeprägter ist dieses Verhalten. In Verbindung mit den hohen Zementgehalten findet eine starke Aufheizung selbst in Bauteilen mit kleineren Abmessungen statt.

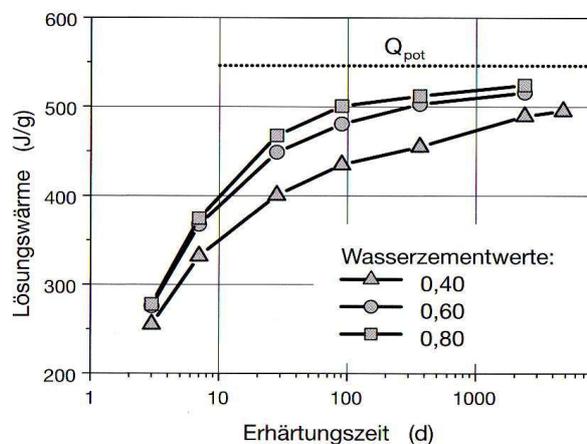


Bild 2.7: Wärmeentwicklung in Abhängigkeit vom Wasserzementwert [6]

Die Hydratationsgeschwindigkeit steigt mit der Mahlfineinheit des Zements an, die Gesamtwärmemenge aber nicht. Zementpartikel größerer Durchmesser können auch nach langer Hydratation noch über einen nicht hydratisierten Kern verfügen [6].

Temperaturverlauf während der Hydratation

Die Temperatur des Betons zu Beginn des Erhärtungsvorganges beeinflusst die Wärmefreisetzung und Entwicklung der mechanischen Eigenschaften entscheidend. Höhere Temperaturen beschleunigen die Reaktion zwischen Zement und Wasser und führen dazu, dass die Hydratationswärme schneller freigesetzt wird und die Festigkeitsentwicklung zu einem früheren Zeitpunkt beginnt (kinetischer Aspekt). Durch ansteigende Temperaturen werden reaktionsträge Zusatzstoffe, wie beispielsweise Hüttensand, angeregt, in größerem Umfang Verbindungen mit dem Anmachwasser einzugehen und tragen dann dadurch stärker zur Wärmebilanz im Bauteil bei. Kennzeichnend ist, dass Portlandzement die höchsten Wärmeraten aufweist, die durch hüttensandhaltige Zemente nicht erreicht werden kann. Der Einfluss der Temperatur auf die Reaktionskinetik des Zementes nimmt mit steigendem Hüttensandgehalt zu.

Die Temperaturhöhe während der Hydratation beeinflusst die Morphologie der Hydrate. Bei höheren Temperaturen entstehen die Reaktionsprodukte nicht mehr gleichmäßig verteilt im Anmachwasserraum, sondern zunehmend in der Nähe der Zementkornoberfläche. Die Diffusionsprozesse werden behindert und kommen frühzeitiger zum Erliegen. Der erreichbare Hydratationsgrad ist niedriger, die Wärmeentwicklung dadurch geringer und in Verbindung mit der ungünstigeren Morphologie die Festigkeit vermindert (struktureller Aspekt). Dabei ist die Auswirkung der Temperatur auf die Entwicklung der Hydratationswärmemenge geringer als auf die der Festigkeit, da neu gebildete Hydrate immer mit der Wärmefreisetzung verbunden sind, aber temperaturbeeinflusst nur einen verminderten Beitrag zur Strukturfestigkeit leisten. Erst bei einem höheren Hydratationsgrad (ab etwa $\alpha = 0,80$) zeigt sich, dass die durch die Temperatur beeinflusste Morphologie und Stöchiometrie der Hydrate zu einer veränderten Wasserbindung und Wärmemenge führt, die im Allgemeinen aber unberücksichtigt bleiben kann.

In [39] wurden Versuche mit unterschiedlichen Temperaturwirkungen während der Hydratation an zwei Zementarten gemacht. Dabei wurden Zemente mit folgender Zusammensetzung verwendet:

Tabelle 2.2: Zusammensetzung der beim Versuch verwendeten Zemente [39]

Werte in Gew.-%	CEM I 52,5 R	CEM II 42,5 R
CaO	63,2	62,1
SiO ₂	20,7	19,5
Al ₂ O ₃	5,1	5,1
Fe ₂ O ₃	2,3	2,3
MgO	1,6	1,5
K ₂ O	0,9	1
Na ₂ O	0,4	0,4
SO ₃	3,6	3,4
Glühverlust	2,2	4,7

In den nächsten beiden Diagrammen (Bild 2.8 und Bild 2.9) sind die Ergebnisse für die beiden Zemente dargestellt.

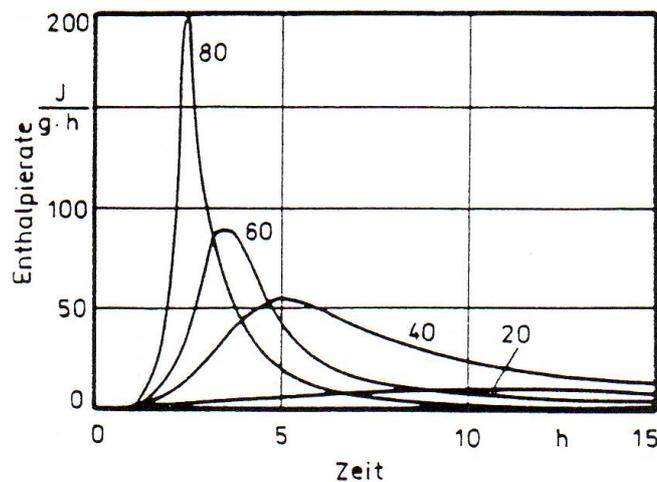


Bild 2.8: Zeitverläufe der Wärmeentwicklungsraten für CEM I 52,5 R bei 20, 40, 60 und 80 °C [39]

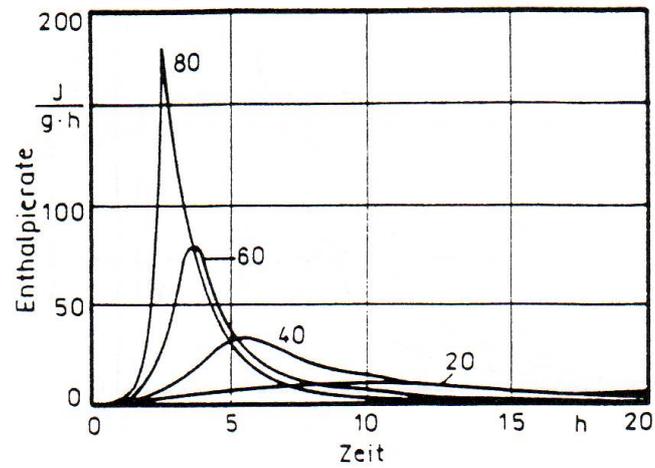


Bild 2.9: Zeitverläufe der Wärmeentwicklungsraten für CEM II 42,5 R bei 20, 40, 60 und 80 °C [39]

Durch die Temperaturerhöhung kann also die Wärmeentwicklung bedeutend beschleunigt werden, es wird dabei nicht nur ein höheres Maximum (10 fach) sondern auch ein frühzeitiges Maximum erreicht.

2.4 Temperaturverlauf

Solange in einer Zeiteinheit freigesetzte Hydratationswärme größer ist als die über die Oberfläche des Bauteils abfließende Wärme, erhöht sich die mittlere Bauteiltemperatur. Die max. Bauteiltemperatur ergibt sich somit aus der Differenz zwischen entstehender und abfließender Hydratationswärme. Aus diesen Temperaturdifferenzen stellt sich ein Wärmestrom in Richtung der niedrigen Temperatur ein und ist umso größer, je größer das Temperaturgefälle ist. Die Größe der freigesetzten Hydratationswärme und die Geschwindigkeit, mit der die Hydratationswärme entsteht, spielen dabei eine ausschlaggebende Rolle (Kapitel 2.3). Der Temperaturverlauf ist aber auch von anderen Einflussgrößen abhängig wie:

- 1) Frischbetontemperatur
- 2) Wärmeleitfähigkeit des Betons
- 3) Wärmekapazität des Betons
- 4) Wärmeübergangsbedingungen an den Grenzen
(Beton, Schalung, Luft ...)
- 5) Lufttemperatur (Umgebungsbedingungen)
- 6) Bauteildicke
- 7) Zementgehalt usw.

Frischbetontemperatur

Die Frischbetontemperatur beeinflusst die Wärmefreisetzung und Entwicklung der mechanischen Betoneigenschaften deutlich. Vereinfacht kann davon ausgegangen werden, dass die Frischbetontemperatur und der Temperaturanstieg die Maximaltemperatur im Bauteil ergeben. Die Kontrolle der Frischbetontemperatur stellt deswegen ein wichtiges Betonabnahmekriterium dar.

Bild 2.10 zeigt den Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Bauteiltemperatur für einen Beton C 50/67. Es ist zu erkennen, dass mit niedrigen Frischbetontemperaturen der Hydratationsablauf verlängert und bezüglich der Intensität gebremst wird. Es ist auch zu merken, dass sich die Verhältnisse zwischen der Frischbetontemperatur und der Bauteiltemperatur nicht proportional verhalten. Noch ein Beispiel ist am Ende dieses Kapitels beim Überblick der Auswirkung aller wesentlichen Parameter an einer 80 cm starken Wand dargestellt.

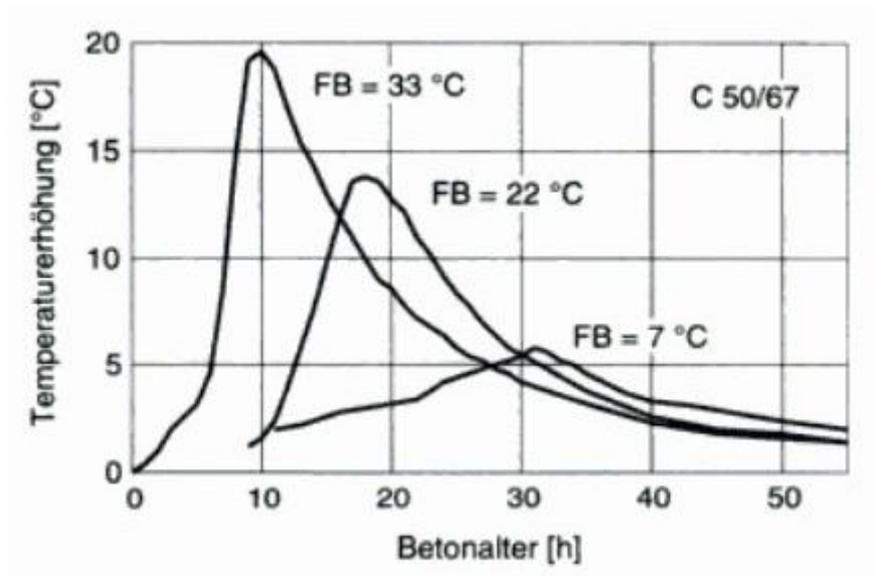


Bild 2.10: Einfluss der Frischbetontemperatur auf Bauteiltemperatur [40]

Nach ÖNORM B4710-1 darf die Frischbetontemperatur beim Einbau in die Schalung +27 °C nicht überschreiten.

Nach ÖNORM B4710-1

W40 +22 °C Einbautemperatur

W45 +27 °C Einbautemperatur

W55 +27 °C Einbautemperatur

Nach Richtlinie „Weiße Wanne“

BS1 + 22 °C Einbautemperatur

BS2 + 27 °C Einbautemperatur

Weitere Angaben über max. Betontemperaturen können in den jeweils gültigen Ö-NORMEN, RVS und Richtlinien nachgelesen werden.

Übersteigt die Frischbetontemperatur die vorgeschriebenen max. Werte, ist eine Kühlung des Frischbetons erforderlich. Heutzutage werden unterschiedliche Kühlmethoden verwendet. Bild 2.11 zeigt einen Überblick der möglichen Kühlmethoden. Nach [28] kann die Frischbetontemperatur eines Normalbetons üblicher Zusammensetzung um etwa 1 °C vermindert werden, wenn die Temperaturen der Ausgangsstoffe folgendermaßen gesenkt werden:

Zement um ca. 10 °C

Gesteinskörnung um ca. 1,5 °C

Wasserum ca. 5 °C

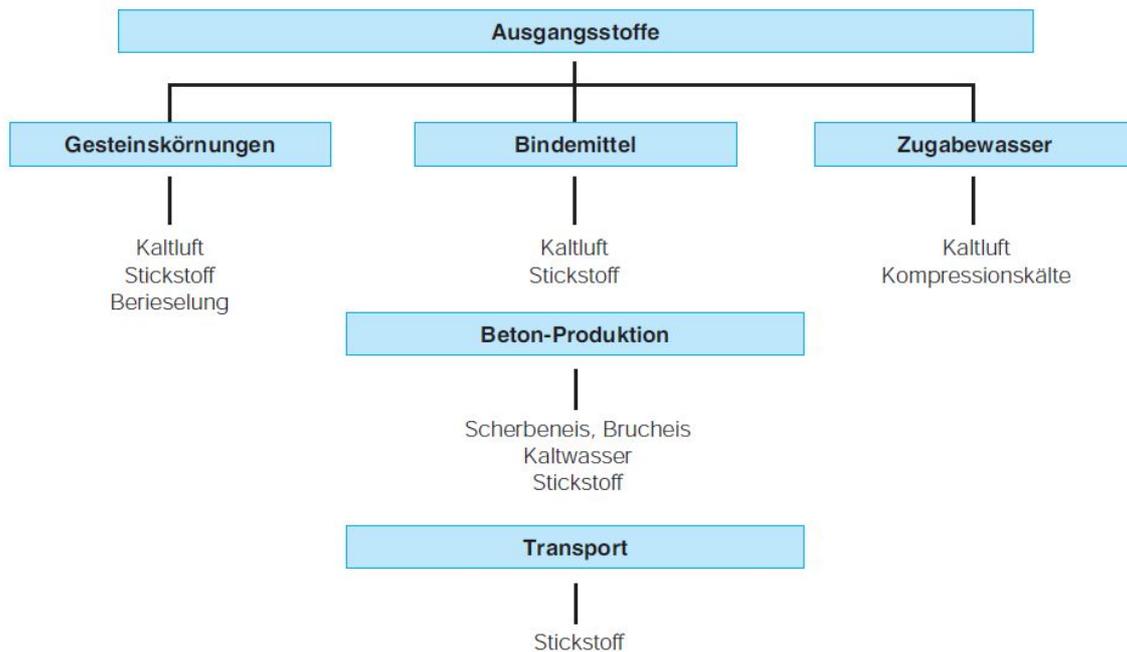


Bild 2.11: Möglichkeiten der Frischbetonkühlung

Wärmeleitfähigkeit

Je intensiver der Wärmeübergang an der Oberfläche, desto stärkere Einwirkung hat die Wärmeleitfähigkeit (Kapitel 3.3.1) an den Temperaturverlauf im Bauteil. Von großer Bedeutung ist demnach die Wärmeleitfähigkeit (Kapitel 3.3.1) für das Temperaturprofil im Querschnitt (Bild 2.12). Bei einer Änderung der Wärmeleitfähigkeit von etwa 20 % um den Mittelwert beträgt die Veränderung der Temperatur im Querschnitt lediglich 1 bzw. 1,5 K [6].

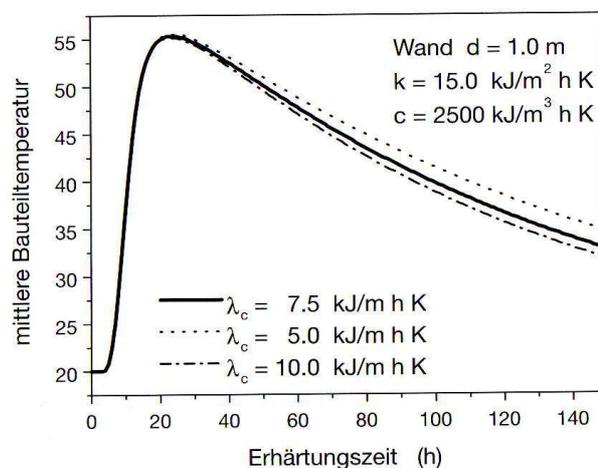


Bild 2.12: Einfluss unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten auf den Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur [6]

Wärmekapazität

Steigende Temperaturen führen zu höheren Wärmekapazitäten, die Zunahme liegt aber nur bei 3 bis 10%. Beispielsweise beträgt der Zuwachs etwa 10%, wenn die Temperatur um 55 K zunimmt. Bei einer Veränderung der mittleren Wärmekapazität um etwa 10% unterscheidet sich der Temperaturanstieg gegenüber der Ausgangstemperatur um etwa den gleichen Betrag. Dabei führt eine Zunahme der Wärmekapazität zu einer Verringerung der Bauteiltemperatur und umgekehrt (Bild 2.13).

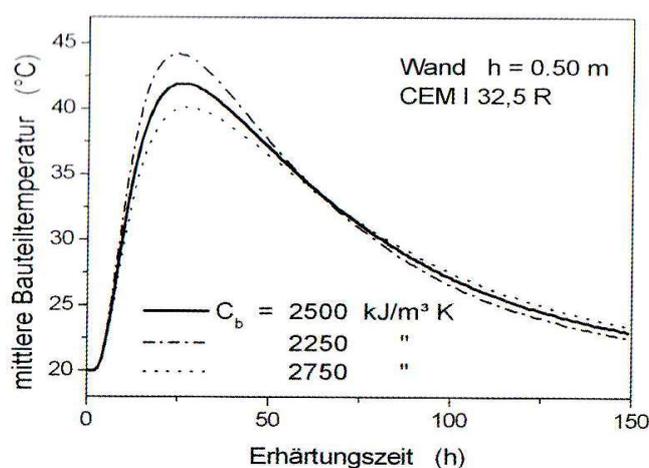


Bild 2.13: Auswirkung einer unterschiedlichen Wärmekapazität des Betons auf den Temperaturverlauf [6]

Wärmeübergangsbedingungen an den Grenzen

Der Wärmeaustausch über freien Oberflächen des Bauteiles erfolgt durch Konvektion und Strahlung und kann sich vom Bauteil zur Umgebung hin vollziehen und umgekehrt. Bei direkt bestrahlten Bauteilflächen und bei Stahlschalung kann eine beträchtliche Erwärmung der oberflächennahen Betonschicht durch Sonnenstrahlung stattfinden und ein nahezu adiabatischer Zustand eintreten. Messungen zeigen, dass dunkle Betonoberflächen bis zu 70 °C aufgeheizt werden können. Beispielsweise in Abhängigkeit von der zur Abdeckung verwendeten Materialien nahm die Oberflächentemperatur von jungen Betonplatten um bis zu etwa 30 K zu und erreichte bis zu 60°. Die Kerntemperatur von 50 cm dicken Wänden in Stahlschalung und mit Orientierung in Südrichtung wurde um 6 K (weiße Folie), 13 K (ohne Folie) und 29 K (schwarze Folie) angehoben [6].

Bei niedriger Außentemperatur von der Betontemperatur, die an Außenluft übertragene Wärmemenge ist abhängig von der Beschaffenheit, Größe und Lage der Bauteiloberfläche, der Windgeschwindigkeit und der Temperatur der umgebenden Luft. In Bild 2.14 sind die Auswirkungen einer Windgeschwindigkeit $v = 0 \text{ m/s}$ und $v = 5 \text{ m/s}$ bei einem 0,30 und 0,60 m dickem Wandbauteil gegenübergestellt.

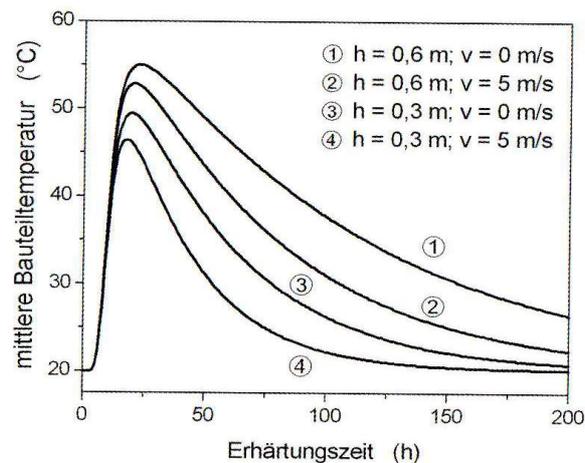


Bild 2.14: Verlauf der mittleren Bauteiltemperaturen bei verschiedenen Wanddicken und unterschiedlichem Wärmeübergang in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Holzschalung) [6]

Durch die Schalung, Nachbehandlungsmaßnahmen und die ggf. zusätzlich angeordnete Dämmung wird der Wärmeübergang ebenfalls verändert und der Wärmestrom zur Außenluft in Abhängigkeit von den thermischen Eigenschaften der verwendeten Materialien vermindert. In Bild 2.15 ist die Auswirkung veränderter Wärmeübergangsbedingungen bei einer Platte mit $d = 2,0 \text{ m}$ dargestellt (nicht abgedeckt, leichter Wind / Schutz durch dichte Plane / Regen). Während die Maximaltemperaturen im Kern nur wenig differieren, ist bei steigendem Wärmeübergang die Oberflächentemperatur erwartungsgemäß deutlich abgesenkt und die Temperaturdifferenz zwischen Kern und Rand größer. Zu frühzeitiges Ausschalen kann in diesem Sinne das Temperaturprofil ungünstig beeinflussen.

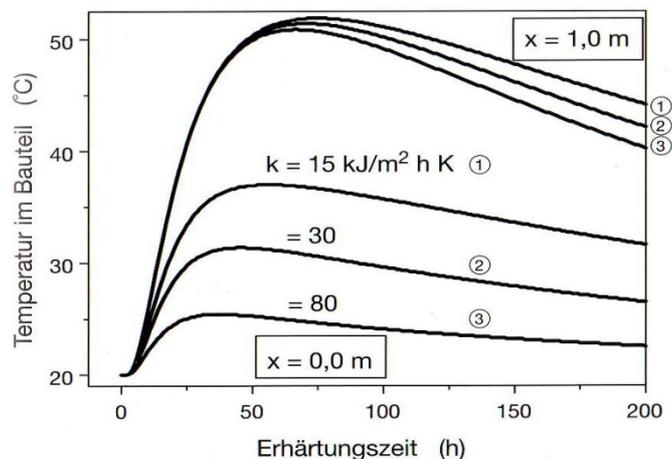


Bild 2.15: Temperaturverlauf im Kern und an der Oberfläche einer Sohlplatte ($d = 2,0 \text{ m}$) bei unterschiedlicher Wärmeübergangszahl k [6]

Lufttemperatur

Die tageszeitliche Lufttemperaturschwankungen wirken sich in Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten nennenswert nur auf einen 20 bis 50 cm dicken Randbereich aus. Nach [6] betragen die Schwankungen in 60 cm Tiefe lediglich 10 % der Temperaturänderungen an der Oberfläche (Bild 2.16).

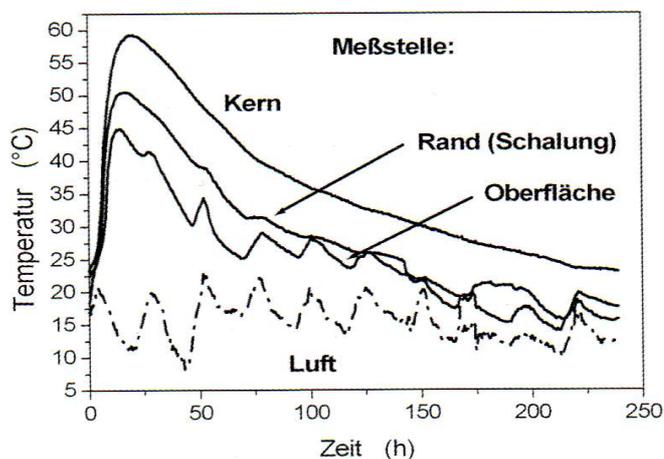


Bild 2.16: Gemessener Verlauf der Luft- und Bauteiltemperaturen in einem massigen Betonbauteil von 2,0 m Dicke [6]

Überblick der Auswirkungen unterschiedlicher Parameter

In [41] wurde ein Überblick über die Auswirkungen wesentlicher Parameter auf die Temperaturentwicklung bei einer 80 cm dicken Wand dargestellt. Dabei werden Temperaturverlauf und Temperaturhöhe in Abhängigkeit von der Zementmenge, der Zementart, der Schalung, der Bauteilgeometrie, der Frischbetontemperatur und der Lufttemperatur betrachtet (Bild 2.17).

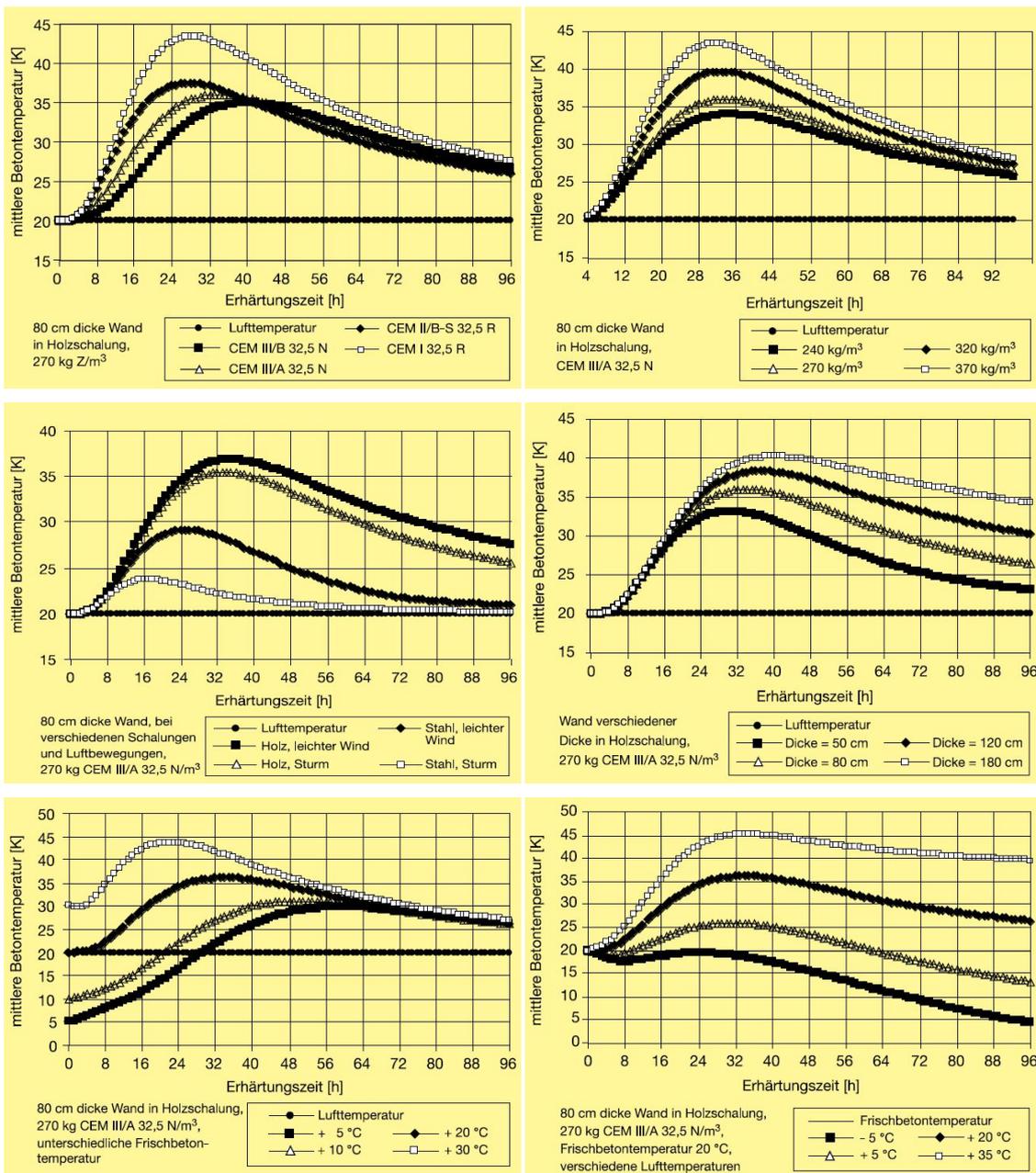


Bild 2.17: Auswirkungen der Variationen von maßgebenden Parametern auf die Temperaturhöhe und den Temperaturverlauf in massigen Betonbauteilen [41]

2.5 Spannungen, Rissbildung und Rissicherheit

Die Dehnungen im Beton sind sehr stark von den Temperaturverhältnissen und dem Betonalter abhängig. Werden die Dehnungen im Bauteil behindert, können die Spannungen die aktuellen Zugfestigkeiten überschreiten und zu Rissen führen. Hierbei werden zwischen Zwangsspannungen und Eigenspannungen unterschieden. Zwangsspannungen entstehen durch äußere Verformungsbehinderung, hervorgerufen durch geometrische Randbedingungen, während die Eigenspannungen durch das Bauteil selbst hervorgerufen werden.

Die Entstehung kann am Beispiel der Wärmeentwicklung Bild 2.3 aus Kapitel 2.3 *Wärmeentwicklung während der Betonerhärtung* erklärt werden:

Nach einer Angangsphase ohne spürbare Temperaturerhöhung (Ruheperiode der Hydratation), die mit dem Erstarrungsbeginn endet (Stadium I – Anfangshydrolyse, vgl. Bild 2.3), findet mit dem Fortgang der Hydratation ein Temperaturanstieg statt, der eine Ausdehnung des Stabes bewirkt (Stadium II - Ruhestadium). Da der Beton noch nicht erhärtet ist, wird die gesamte Dehnung durch eine plastische Verformung kompensiert (Bild 2.18).

Mit der weiteren Verfestigung und der Entwicklung der mechanischen Kenngrößen entstehen an der 1. Nullspannungsgrenze mit der zugehörigen Temperatur T_{01} Dehnungen und damit verbundene Druckspannungen, die noch niedrig sind und durch die Relaxation weitestgehend abgebaut werden. In diesem Stadium III (Beschleunigungsstadium, vgl. Bild 2.3) wachsen die elastischen Kenngrößen kontinuierlich an; die sich in der Relaxation äußernde Verformbarkeit des jungen Betons nimmt dagegen stetig ab. Am Ende des Stadiums III wächst die Bauteiltemperatur zwar noch weiter an, der Rückgang der Druckspannungen infolge Relaxation kann aber nicht mehr ausgeglichen werden, das Maximum der Druckspannungen ist erreicht (Bild 2.18) [6].

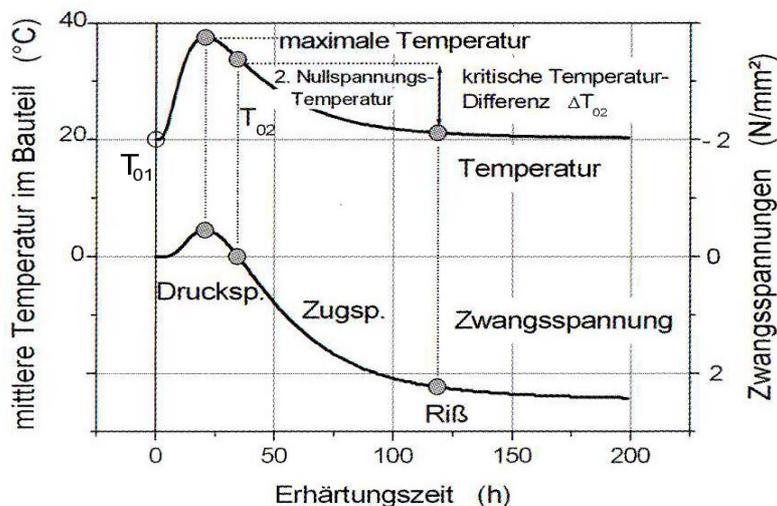


Bild 2.18: Entwicklung der mittleren Temperatur und der Zwangsspannungen [26]

Das anschließende Stadium IV (verzögerte Reaktion, vgl. Bild 2.3) ist durch den stetigen Rückgang der Druckspannungen gekennzeichnet. Nach Überschreiten der maximalen Bauteiltemperatur haben der Temperaturabfall und die Relaxation eine übereinstimmende Wirkung; die vorhandenen Druckspannungen werden sehr schnell abgebaut, die zweite Nullspannung schließt das Stadium IV ab (Bild 2.18, Bereich 3). Der weitere Abkühlungsverlauf im Stadium V (Endstadium, vgl. Bild 2.3) führt zu ständig zunehmenden Zugspannungen, die aufgrund der Entwicklung der mechanischen Kenngrößen immer weniger durch Relaxation abgebaut werden und die bei Überschreiten der Zugfestigkeit den Riss im Betonquerschnitt erzeugen (Bild 2.18, Bereich 4).

Der weitere Rissverlauf ist von der Verteilung der Zugspannungen im Querschnitt abhängig. Eigenspannungen sind im Allgemeinen nur bei dicken Bauteilen von Bedeutung und rufen Risse im Randbereich während der Erwärmung hervor (Bild 2.19). Die größte Rissbreite tritt zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums auf. Im Zuge des Abkühlungsvorganges und der Spannungsumkehrung treten im Randbereich Druckspannungen und im Kern Zugspannungen auf, die innere Risse hervorrufen können (Bild 2.19). Die Rissbreiten der Oberflächenrisse sind gering und liegen im Bereich von $w \leq 0,05$ bis $0,1$ mm und gelten für die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit als unbedenklich. Auch für korrosive Vorgänge sind diese Risse ohne Bedeutung. Eine Verminderung der Frostbeständigkeit der Randzone der Bauteile ist jedoch nicht auszuschließen.

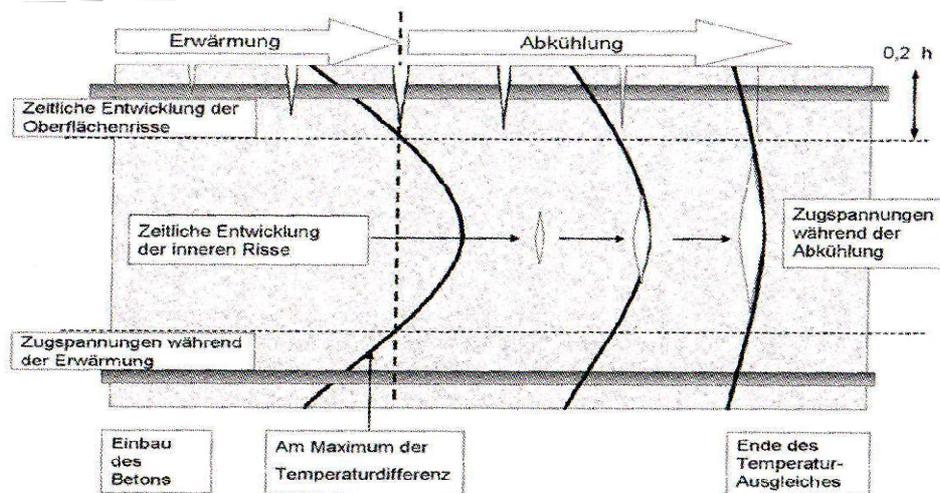


Bild 2.19: Schematische Darstellung der Rissentwicklung in dickeren Bauteilen aufgrund des zeitlich veränderlichen Temperaturprofils im Querschnitt [6]

Zentrische Zwangsspannungen lösen ebenfalls an der Stelle mit der geringsten Festigkeit den ersten Trennriss aus. Der Vorgang entspricht im Prinzip der Darstellung in Bild 2.19 während der Abkühlung, jedoch reichen die Risse bis zur Oberfläche. Ist kein nennenswertes Temperaturprofil vorhanden, entwickelt sich der Trennriss nicht im Bauteilinneren, sondern durchtrennt den gesamten Querschnitt sofort nach Erreichen der Zugfestigkeit. Dadurch wird die Zwangsspannung vermindert, es tritt eine Entspannung im System ein. Bei unbewehrten Bauteilen würde eine völlige Entlastung eintreten und weitere Verformungen lediglich zur Rissaufweitung führen. Im Stahlbetonteil dagegen wird durch die Rissbildung die Bewehrung aktiviert, die die Risskraft im Betonquerschnitt übernimmt. Nimmt die Beanspruchung weiterhin zu, wird wiederum ein Riss erzwungen, wenn die Festigkeit nicht ausreicht usw.

Es ist gegenwärtig nicht möglich, aus einem Risskriterium die zweckmäßige Zusammensetzung des Betons zu ermitteln, zulässige Bauteilabmessungen zu berechnen, maximale Frischbetontemperaturen abzuleiten usw. Es besteht nur die Möglichkeit, die Ausgangsbedingungen zu variieren und Simulationsrechnungen durchzuführen, um eine optimale betontechnologische Strategie festlegen zu können. Schematisch ist dies in Bild 2.20 dargestellt.

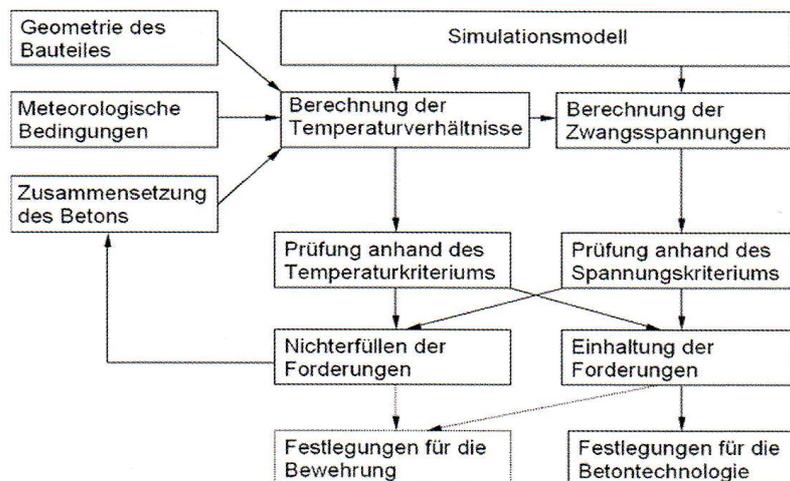


Bild 2.20: Schematische Darstellung des Ablaufes zur Anwendung der Risskriterien und der Auswahl der Betonzusammensetzung [6]

Das Kriterium, dass eine Rissbildung vermeiden wird, ist erfüllt, wenn die Zwangsbeanspruchung σ_{ctm} als Einwirkung E die wirksame Betonzugfestigkeit f_{ctme} als Bauteilwiderstand R mit einer hinreichenden Sicherheit nicht überschreitet:

$$R - E = f_{ctme} - \sigma_{ctm} > 0 \quad (2.1)$$

Die Gegenüberstellung von Einwirkung und Widerstand kann dabei deterministisch oder probabilistisch erfolgen. Die genaue Erklärung und Vorgehensweise kann in [6] gefunden werden. Die Beispiele über Bestimmung der Zugspannungen durch Zwang infolge Abfließen der Hydratationswärme und Nachweisführungen sind in [28] zu finden.

Die mit der Spannungsberechnung verbundenen Schwierigkeiten haben dazu geführt, dass oft lediglich Temperaturgrenzen vorgegeben werden. Diese sind auch deshalb weit verbreitet, da Temperaturmessungen vor Ort leicht durchzuführen sind und demzufolge eine Kontrolle der Vorgaben problemlos vorgenommen und dokumentiert werden kann. Bei dieser sehr einfachen Vorgehensweise werden die Temperaturen im Bauteil bestimmt und mit zulässigen Temperaturgrenzwerten, z.B. Temperaturdifferenz zwischen Kern und Rand, verglichen (Bild 2.21). Diese Grenzwerte beruhen in der Regel auf langjährigen baupraktischen Erfahrungen, resultieren aus Untersuchungen mit Probekörpern im Reißrahmen oder werden aus theoretischen Überlegungen abgeleitet.

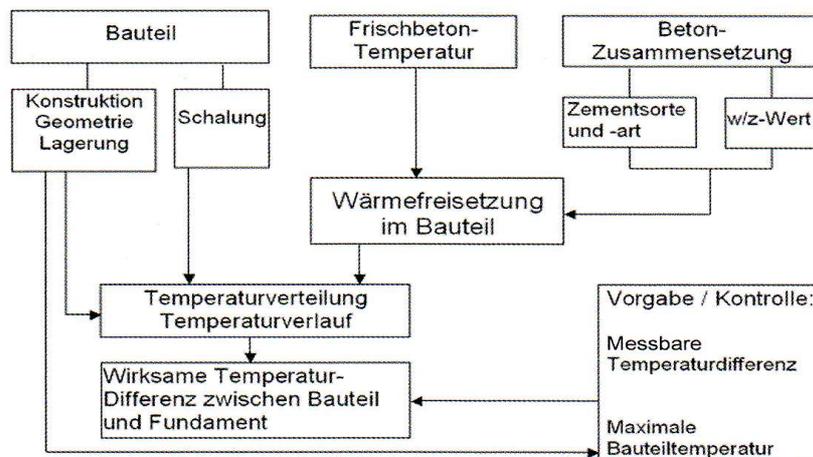


Bild 2.21: Vorgehensweise zur Beurteilung der Rissgefahr anhand des Temperaturkriteriums [6]

Grenzwerte können die Höchsttemperatur und die Temperaturdifferenz im Bauteil sowie die Differenz zwischen dem mittleren Temperaturen des neuen Bauteils und angrenzenden Konstruktionsteilen betreffen. Weiterhin werden bei größeren Bauwerken Anforderungen an die Frischbetontemperatur gestellt und teilweise auch der Temperaturgradient vorgeschrieben. Beispiele für Temperaturwerte als operative Steuergrößen sind in den Tafeln 2.3 – 2.7 enthalten.

Tabelle 2.3: Temperaturvorgaben für die maximale Frischbetontemperatur [6]

Bauvorhaben	max T_{b0} [°C]
Schließen einer Montageöffnung im Containment ($d = 0,8$ m)	5
Farobrücke (Dänemark)	6 ... 8
Gewölbesperre Zillergründl	8 ... 12
Talübergang Schottwien	8 ... 15
Bogen der Maintalbrücke Veitshöchheim	max. 10
Klärwerk München II	max. 15
Talsperre Leibis-Lichte: in Abhängigkeit vom Temperaturverlauf im Betonblock	7 ... 15
Wasserbauwerke, $d < 0,80$ m, an Übergabestelle	30
$d > 0,80$ m; zusätzlich T_{max}	25
Vorsatzschalen Wasserbauwerke, Übergabestelle	25

Tabelle 2.4: Temperaturvorgaben für die maximale Bauteiltemperatur T_{max} und den maximalen Temperaturanstieg infolge Hydratationswärme T_{ad} (nach 7 Tagen)

Bauvorhaben	T_{max} [°C]
Turbinentische, Kraftwerk 3 m Dicke	50
Weißer Wanne, Betonstandard BS1 (Österreich)	45
Wasserbauwerke (T_{max} bei $d > 0,80$ m) z.B. Schleusensole XC1/XC2	53
horizontale Flächen, Tausalz	63
Vorsatzschalen Wasserbauwerke	60
	T_{ad} [K]
Wasserbauwerke (maximaler Temperaturanstieg bei $d > 0,80$ m) z.B. Schleusensole XC1/XC2	31 ¹⁾
horizontale Flächen, Tausalz	43 ¹⁾
Vorsatzschalen Wasserbauwerke	40

¹⁾ zusätzlich: $T_{b0} + T_{ad} < T_{max}$

Tabelle 2.5: Vorgaben für die Differenz der mittleren Bauteiltemperatur und der Umgebung zur Vermeidung von Trennrissen

Bauvorhaben	max ΔT [K]
Tiefgaragen: Angrenzende Bauteile	5
Verstärkung von Brückenpfeilern ($d = 0,5$ m): zwischen Altbeton sowie Luft	5
Schließen einer Montageöffnung im Containment ($d = 0,8$ m): zwischen Altbeton sowie Luft	15
Wand und Fundament (skandinavische Regeln)	15
Talsperre Leibis-Lichte (Blockhöhe 2,5 m) Erster Block und Fels	20
Frisch betonierter und unterer Block	25
Nach Festigkeitsklassen:	
Betonklasse C25	20 ¹⁾
Normalbeton C35 – C45	15
Hochfester Beton	10
Analyse von Vorgaben in Vorschriften	12 ... 15

¹⁾ aufgrund der Relaxationsfähigkeit

Tabelle 2.6: Vorgaben für die Temperaturdifferenz zwischen Kern und Rand zur Vermeidung von Schalenrissen

Bauvorhaben	max ΔT [K]
Strahlenschutzbunker, $d = 2,30$ m (Kern/Schale)	10
Strahlenschutzeinrichtung ($d = 2,5$ m)	10
frühzeitiges Ausschalen	10 14
Sparschleuse Magdeburg-Rothensee, Winkelstütz- und Kammerwände ($d = 1,2$ m)	15
Mischwasserbehälter (d bis $4,0$ m)	15
Tunnel- und Trogbauwerke (Sohle, Wand, Decke, Pfeiler)	15
Øresund-Tunnel: bei Wasserbelastung andere Bauteile (zusätzlich noch TCI)	15 20
dicke Bauteile (mehrere Meter)	15
Talsperre Leibis-Lichte: in den ersten 14 Tagen	18
dicke Bauteile ($d < 1,0$ m)	20
Differenz zwischen Kern und Luft, dicke Bauteile	20
Bauteile $d < 1,0$ m	15 ... 20
Brückenüberbau Rudolphstein ($d = 1,60$ m)	25
Analyse von Vorgaben in Vorschriften	15 ... 20

Tabelle 2.7: Temperaturabgrenzung für die Nachbehandlung zwischen Oberfläche und Wasser

Bauvorhaben	maximale Temperaturdifferenz [K]
Betonersatz bei Sanierung Wasserbauwerke	–
Wasserzuführung	15
Fluten	10

In vielen Fällen ist die Vermeidung der Rissbildung äußerst schwierig oder gar nicht möglich und besteht die Notwendigkeit zur Berechnung bzw. Abschätzung der Rissbreite. Rechnerisch kann die Rissbreite nach Formel 2.2 bestimmt werden und hier folgen einige Erläuterungen dazu.

Nach Entstehen des ersten Risses (Einzelriss) fallen die Betonspannungen und Betondehnungen an den Rissufer bis auf den Wert Null ab. Gleichzeitig steigen die Spannungen und Dehnungen im Bewehrungsstahl an, da der Beton zur Weiterleitung der Kräfte nicht mehr zur Verfügung steht (Bild 2.22). Nach einer gewissen Einleitungslänge l_{es} wird über den Verbund die Kraft aus dem Bewehrungsstahl wieder mit auf den Beton übertragen. Nach dieser Einleitungslänge ist im Bauteil wieder der Zustand, bei dem die Betonzugspannungen unterhalb der Betonzugfestigkeit liegen, vorhanden (Bild 2.22).

Die Rissbreite w ist etwa proportional zum Rissabstand s_{rm} . Bei Erstrissbildung beträgt der Rissabstand die doppelte Lasteinleitungslänge, bei abgeschlossener Rissbildung ist s_{rm} der rechnerische Abstand zwischen Sekundärrissen. Im Nachweisverfahren wird der Rechenwert der Rissbreite w_k der maximalen Rissbreite w_{max} gleichgesetzt, weil für die Gebrauchstauglichkeit ein Riss maximaler Breite bedeutsamer ist, als die mittlere Breite aus mehreren Rissen. Der daraus resultierende Wert $s_{r,max}$ ist ein „Maximum“ innerhalb des Modells.

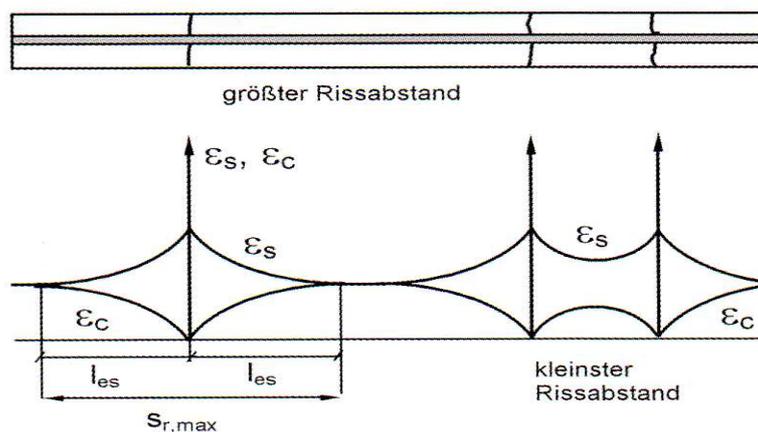


Bild 2.22: Rissabstand und Einleitungslänge bei einem Einzelriss und Übergang zur abgeschlossenen Rissbildung

Aus der Differenz der mittleren Dehnungen zwischen Stahl und Beton ($\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$) und der doppelten Einleitungslänge $2 l_e$ (=Rissabstand $s_{r,max}$) ergibt sich die rechnerische Rissbreite w_k zu:

$$w_k = 2 l_e (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = s_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (2.2)$$

mit: $\epsilon_{sm}, \epsilon_{cm}$ - mittlere Stahl- bzw. Betondehnung
 $s_{r,max}$ - maximaler Rissabstand (Bild 2.22)

Für die einzelnen Risszustände und die unterschiedliche Belastungsdauer ergeben sich die einzelnen Bestandteile der Formel 2.2, wie in Tabelle 2.8 angegeben:

Tabelle 2.8: Bestandteile der Gleichung 2.2 zur Berechnung der Rissbreite [6]

	$s_{r,max}$	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$
Einzelriss		
- Kurzzeitbeanspruchung ($k_D = 0,4$)	$\frac{\sigma_s \cdot d_s}{3,6 \cdot f_{ct,eff}} \quad (8.5a)$	$0,4 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$
- Dauerbelastung ($k_D = 0,6$)		$0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$
abgeschlossene Rissbildung		
- Kurzzeitbeanspruchung	$\frac{d_s}{3,6 \cdot eff \rho} \quad (8.5 b)$	$\frac{\sigma_s}{E_s} - 0,6 \cdot \frac{f_{ct,eff}}{E_s \cdot eff \rho} \cdot (1 + \alpha_e \cdot eff \rho)$
- Dauerlast		$\frac{\sigma_s}{E_s} - 0,4 \cdot \frac{f_{ct,eff}}{E_s \cdot eff \rho} \cdot (1 + \alpha_e \cdot eff \rho)$
$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}$	$eff \rho = A_s / A_{c,eff}$ (hier ohne Spannstahl)	vereinfachend wird oft $(1 + \alpha_e \cdot eff \rho) \approx 1$ gesetzt

Die Anwendung ist an einem allgemeinen Beispiel am Kapitelende erläutert.

Der Wirkungsbereich der Bewehrung $A_{c,eff}$ ergibt sich aus der effektiven Dicke des Bauteils h_{eff} und der Bauteilbreite b :

$$A_{c,eff} = h_{eff} \cdot b = 2,5 \cdot (h - d) \cdot b = 2,5 \cdot d_1 \cdot b \quad (2.3)$$

h – Bauteildicke; d – statische Höhe

Der Abstand der Bewehrungsmittellage vom Bauteilrand beträgt dabei z.B. für einlagige Bewehrung:

$$d_1 = c_{\text{nom}} + d_s/2 \quad (2.4)$$

c_{nom} – Bewehrungsdeckung; d_s – Bewehrungsdurchmesser

Nach [38] ist $h_{\text{eff}} = 2,5 \cdot d_1$ nur bei Bauteilen bis $h / (h - d) < 5$ berechtigt. Bei dicken Bauteilen ($h / (h - d) \geq 5$) und zentrischem Zug kann der Wirkungsbereich bis auf $h_{\text{c,eff}} = 5,0 \cdot d_1$ anwachsen (Bild 2.24 nach [38]). Die Zusammenhänge sind durch die Versuche nachgewiesen.

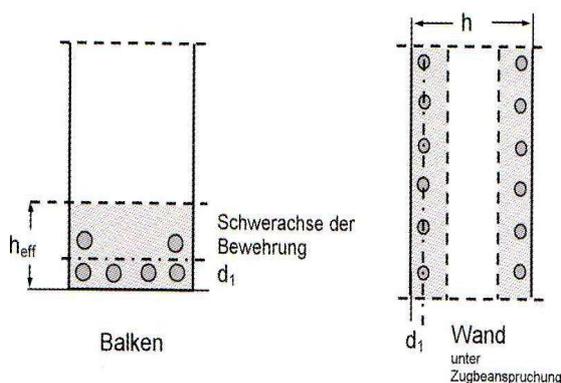


Bild 2.23 Schematische Darstellung des Wirkungsbereiches der Bewehrung

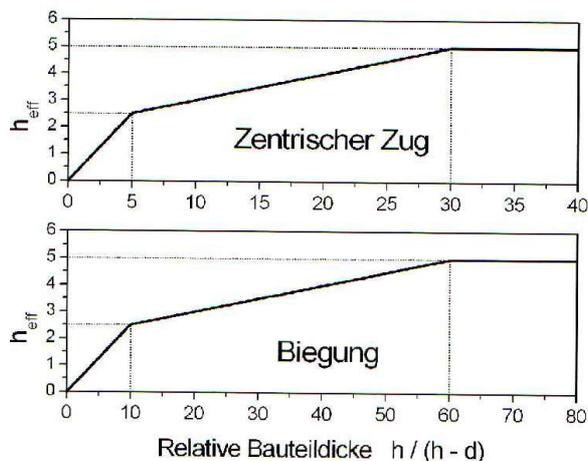


Bild 2.24: Wirkungsbereich der Bewehrung und effektive Dicke h_{eff} nach [38]

Der maximale Rissabstand ergibt sich für die beide Risszustände (Tabelle 2.8) zu:

$$s_{r,max} = \frac{d_s}{3,6 \cdot \text{eff } \rho} \leq \frac{\sigma_s \cdot d_s}{3,6 \cdot f_{ct,eff}} \quad (2.5)$$

Der rechte Term in der Gleichung 2.5 ist der obere Grenzwert (Einzelriss), der nicht überschritten werden kann. Der kleinere Zahlenwert in der Gleichung 2.5 charakterisiert demnach den maßgebenden Risszustand.

Für die Dehnungsdifferenz ($\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$) gelten die Gleichungen aus der Tabelle 2.8 und somit wird:

$$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s}{E_s} - 0,4 \cdot \frac{f_{ct,eff}}{E_s \cdot \text{eff } \rho} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (2.6)$$

Der rechte Term in der Gleichung 2.6 ist der untere Grenzwert, der nicht unterschritten werden kann. Der größere Zahlenwert ist demnach maßgebend.

Beispiel

Wenn die Eingangsgrößen $h = 400 \text{ mm}$, $k = 0,75$, $d_s = 12 \text{ mm}$, $A_s = 11,5 \text{ cm}^2/\text{m}$, $c_{nom} = 3,5 \text{ cm}$ und $f_{ct,eff} = 2,0 \text{ N/mm}^2$ betragen, ergibt sich:

$$h_{eff} = 2,5 (35 + 6) = 102,5 \text{ mm}$$

$$A_{c,eff} = 102,5 \cdot 1000 = 102500 \text{ mm}^2$$

$$\text{eff } \rho = 1150 / 102500 = 0,01122$$

$$\sigma_s = \frac{1}{2} 400 \cdot 1000 \cdot 2,0 \cdot 0,75 / 1150 = 261 \text{ N/mm}^2$$

Der maximale Rissabstand (Gleichung 2.5) beträgt:

$$s_{r,max} = \text{Min: } \begin{array}{l} | \frac{\sigma_s \cdot d_s}{3,6 \cdot f_{ct,eff}} = \frac{261 \cdot 12}{3,6 \cdot 2,0} = 435 \text{ mm} \\ | \frac{d_s}{3,6 \cdot \text{eff } \rho} = \frac{12}{3,6 \cdot 0,01122} = 297 \text{ mm} \end{array}$$

Da der kleinere Wert entscheidend ist, liegt ein abgeschlossenes Rissbild mit entsprechender Verkleinerung des Rissabstandes vor.

Mit der vorgenannten Zahlwerten ergibt sich für die Dehnungsdifferenz (Gleichung 2.6):

$$\begin{aligned} | \frac{\sigma_s}{E_s} - 0,4 * \frac{f_{ct,eff}}{E_s * \text{eff } \rho} &= \frac{261}{200 * 10^3} - 0,4 * \frac{2,0}{200 * 10^3 * 0,01122} = \\ | &= 0,000949 \end{aligned}$$

$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = \text{Max:}$ |

$$\begin{aligned} | 0,6 * \frac{\sigma_s}{E_s} &= 0,6 * \frac{261}{200 * 10^3} = \\ | &= 0,000783 \end{aligned}$$

Der größere Wert ist maßgebend (abgeschlossenes Rissbild)

Die Rissbreite folgt damit zu: $w_k = 297 * 0,000949 = 0,282 \text{ mm}$

3. Stand der Forschung

3.1 Unterschiedliche Bedingungen der Wärmeentwicklung

Bei entsprechenden Wärmeabflussbedingungen, zum Beispiel in dünnen Bauteilen, kann die Hydratationswärme unmittelbar aus dem Beton abfließen, ohne einen spürbaren Temperaturanstieg im Beton zu verursachen. Je kleiner der Wärmeabfluss ist, umso größer ist der Temperaturanstieg. So entwickeln sich zum Beispiel in dickeren Betonbauteilen oder bei wärmedämmender Schalung bzw. wärmedämmenden Abdeckungen vergleichbar höhere Bauteiltemperaturen im gleichen Beton.

Die unterschiedlichen Temperaturbedingungen, unter denen die Hydratation erfolgen kann, werden als adiabatische, isotherme oder teiladiabatische Bedingungen bezeichnet.

Adiabatische Bedingungen

Eine adiabatische Zustandsänderung ist ein Vorgang, bei dem ein System von einem Zustand in einen anderen überführt wird, ohne thermische Energie mit seiner Umgebung auszutauschen (Bild 3.1). Die adiabatische Bedienung setzt voraus, dass das System, in dem Zustandsänderung stattfindet, perfekt gegen Wärmeströme jeglicher Form isoliert ist, also Wärmeleitung, konvektive Wärmeübertragung und Strahlungsaustausch sind vollständig zu unterbinden.

In der Realität ist eine vollständige Wärmeisolation nicht erreichbar, aber reale Vorgänge können in guter Näherung adiabatisch verlaufen wenn [7]:

- sie in einem gut isolierten Behälter finden (z.B. Kalorimeter),
- die Zustandsänderung so schnell verläuft, dass in der kurzen Zeit wenig Wärme zu- oder abfließen kann,
- das Volumen des Systems sehr groß ist, so dass Wärmeströme an seinem Rand praktisch keine Rolle spielen.

Isotherme Bedienungen

Mit isothermisch werden die Vorgängen bezeichnet, bei denen chemische und physikalische Änderungen des Zustandes bei konstanten Temperaturen stattfinden. Wenn durch die Reaktionen Wärme entsteht, sind isothermische Bedienungen nur dann gegeben, wenn die entstehende Wärme während der Reaktion vollständig abgeführt wird (Bild 3.1).

Teiladiabatische Bedienungen

Teiladiabatische Bedienungen liegen zwischen den beiden Grenzfällen und sind dadurch gekennzeichnet, dass aufgrund einer verzögerten Wärmeübertragung an die Umgebung ein Temperaturanstieg stattfindet und ein Temperaturmaximum erreicht wird (Bild 3.1). Dieses ist in der Praxis der Regel.

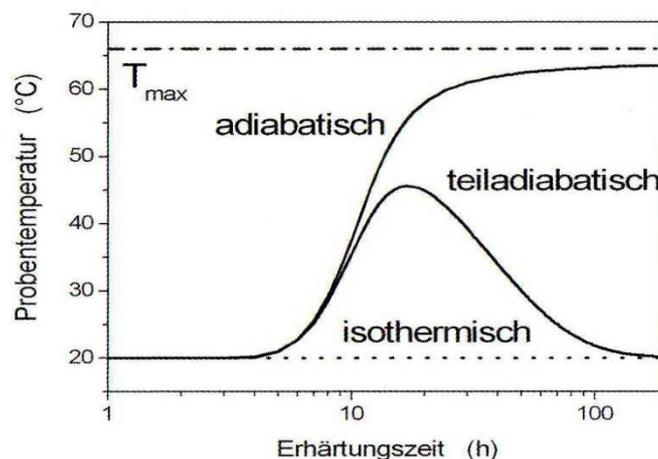


Bild 3.1: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von den Messbedingungen [6]

3.2 Laboratorische Bestimmung der Wärmeentwicklung

Zuverlässige Angaben zur Wärmefreisetzung im Beton können nur experimentell durch Kalorimetrie erhalten werden, um den Einfluss der Zementzusammensetzung, Zusatzstoffe und Zusatzmittel sowie deren Wechselwirkung zu erfassen. Die verschiedenen kalorimetrischen Methoden unterscheiden sich im Messprinzip, der Betriebsart und Bauart sowie im Anwendungsbereich und in den Prüfbedingungen (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Vergleich der Prüfverfahren zur Bestimmung der Hydratationswärme aus [8]

Nr.	Verfahren	Probe	Lagerungsbedingungen	Messergebnis
1	Lösungswärme (DIN EN 196-8)	Zementleim w/z = 0,40	isothermisch 20 °C (nach ASTM 70 F)	Wärmemenge [J/g] zum Zeitpunkt der Prüfung (normgemäß 7 Tage)
2	Wärmeflusskalorimetrie (Differentialkalorimetrie)	Zementleim w/z = 0,50 (Regel)	isothermisch 25 °C (20 °C)	Wärmemenge [J/g] und Wärmerate [J/g h], kontinuierlich bis zu 3 Tagen
3	adiabatische Kalorimetrie	Beton beliebige Zusammensetzung	adiabatisch, beliebige Frischbeton- und Umgebungstemperatur	Temperaturanstieg, kontinuierlich
4	teiladiabatische Kalorimetrie (DIN EN 196-9)	Mörtel w/z = 0,50	konstante Umgebungstemperatur	Temperaturanstieg bzw. Wärmemenge, kontinuierlich bis zu 7 Tagen
5	teiladiabatische Kalorimetrie	Beton beliebige Zusammensetzung	konstante Umgebungstemperatur, beliebige Frischbeton-temperatur	Temperaturanstieg, kontinuierlich bis zu 5 Tagen

Im Folgenden werden die Verfahren näher vorgestellt.

3.2.1 Lösungskalorimeter

Gemäß ÖNORM EN 196-8 wird die Wärmemenge gemessen, die beim Lösen einer zerkleinerten Probe in einer Mischung aus Salpeter- und Flusssäure entwickelt wird. Die Differenz zwischen den Lösungswärmen der nicht hydratisierten und einer bei 20°C isotherm hydratisierten Zementprobe, die aus 150 g Zement und 60 g destilliertem Wasser (w/z-Wert = 0,40) hergestellt worden ist, ergibt die bis zum Zeitpunkt freigesetzte Hydratationswärme. Die Probe erhärtet unter konservierenden Lagerungsbedingungen (luftdicht verschlossen), bis zum Tag der Prüfung. Zahlreiche Fehlerbetrachtungen und Hinweise zur Handhabung sind beispielsweise in [9] zu finden.

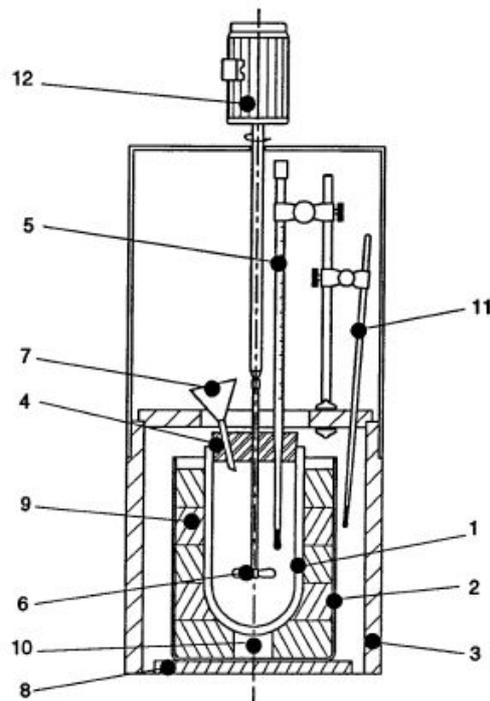
Im Ergebnis der Messung liegt für eine Probe ein Einzelwert vor. Bei der normgemäßen Überprüfung der Wärmefreisetzung, z.B. bei Zementen mit niedriger Hydratationswärme, werden deshalb im Allgemeinen Proben gleichzeitig mehrfach gemessen und aus den einzelnen Ergebnissen der Mittelwert gebildet. Die

Prüfeinrichtungen sind in der Regel in der Lage, 4 - 6 Proben gleichzeitig zu messen, die Messdauer beträgt pro Serie etwa 24 Stunden [6].

Die Prüfung von Zementen mit Zumahlstoffen ist mit Unsicherheit verbunden, da sich Hochofenschlacke und andere latent-hydraulische Bestandteile nur langsam in der Säuremischung lösen und teilweise ungelöst im Kalorimeter zurückbleiben [10].

Die Ermittlungen der Lösungswärme erfolgt vorzugsweise ab dem 3. Tag, da zu früheren Terminen die Fehler aufgrund zu geringer Erhärtung zu groß werden. Da dann der Zeitpunkt der Untersuchung keine Rolle spielt, können auch Werte für längere Hydratationszeiten bestimmt werden. Für die Erfassung der Wärmeentwicklung in der Endphase der Hydratation steht kein anderes Verfahren zur Verfügung.

Die Anwendung der Lösungskalorimetrie ist auf Zementleimproben beschränkt und aufwendig, aber zu Bestimmung der Hydratationswärme ausdrücklich vorgeschrieben.



- Legende
- | | |
|---------------|--|
| 1 Gefäß | 7 Trichter |
| 2 Behälter | 8 Halterung |
| 3 Kasten | 9 Dämmstoff |
| 4 Stopfen | 10 Gefäßhalter |
| 5 Thermometer | 11 Thermometer zur Messung der Umgebungstemperatur |
| 6 Rührstab | 12 Rührstabmotor |

Bild 3.2: Lösungskalorimeter

3.2.2 Wärmeflusskalorimeter

Die Kalorimeter gestatten kontinuierliche Erfassung des Hydratationsverhaltens des Bindemittels unter nahezu isothermischen Bedingungen unmittelbar nach dem Kontakt mit Wasser bis zu mehreren Tagen. Heute hat sich die sogenannte Differentialkalorimetrie durchgesetzt, bei der laufend die Temperaturdifferenz zwischen der aktiven und einer passiven Probe gemessen wird.

Zunächst wird der Feststoff (1 bis 10 g, im Allgemeinen etwa 5 g) in das Reagenzglas eingegeben und verdichtet. Das Wasser (etwa 2,5 g, w/z = 0,50) wird in eine Spritze mit aufgesetzter Kanüle gegeben und in das Kalorimeter eingesetzt. Beide Mischungsbestandteile werden im Kalorimeter thermostatisiert. Nach dem Temperatenausgleich wird das Wasser in die Messzelle eingespritzt und die Datenaufnahme begonnen. Die Hydratation der Proben erfolgt unter quasi isothermischen Bedingungen in der Regel bei 25 °C; andere Temperaturen im Bereich von etwa 5 – 50 °C können ebenfalls realisiert werden, wenn eine konstante Umgebungstemperatur aufrechterhalten werden kann [6].

Die abfließende Hydratationswärme wird kontinuierlich über die Temperaturdifferenzen zwischen Probe und dem wärmeleitenden Medium erfasst. Da die Messung der Temperaturerhöhung direkt im Leitungsmedium erfolgt, muss im Gegensatz zu den adiabatischen Kalorimetern die Wärmespeicherkapazität der Probe nicht bekannt sein.

Nachteilig bei diesem Messverfahren ist, dass nach dem Messprinzip sehr geringe Temperaturdifferenzen erfasst werden müssen und selbst bei sehr großer Messempfindlichkeit die Genauigkeit nicht mehr gegeben ist, wenn die Wärmeleistung niedrig ist. Damit sind Wärmeflusskalorimeter nur für die Frühphase der Erhärtung geeignet. Nach Merkblatt des „CEMBUREAU“ sollte die Messdauer höchstens 3 Tage betragen.

Die umfassende Anwendung ist gegenwärtig auf Zementleim beschränkt, isothermische Beton- und Mörtelkalorimeter sind in Entwicklung bzw. in der Erprobungsphase.

3.2.3 Adiabatische Kalorimeter

Adiabatische Kalorimeter registrieren den Temperaturanstieg in der Messeinrichtung infolge der freigesetzten Hydratationswärme und mit denen wird die Hydratationswärme des Zements im Mörtel und beton seit Jahrzehnten erfasst.

Es besteht zahlreiche Literatur, die sich mit diesem Thema beschäftigt hat. Um die detaillierte und umfangreiche Beschreibung zu vermeiden wir an dieser Stelle nur an die entsprechende Literatur hingewiesen: Aufbau und Steuerung sind z.B. in [11], [12], beschrieben. Die Anforderungen an ein adiabatisches Kalorimeter sind in [13] festgelegt. Erfahrungen aus dem Einsatz sind z.B. in [14], [15] mitgeteilt worden.

Bei einer vollständigen Isolierung des Probengefäßes unter den dann vollkommen adiabatischen Bedingungen würde die gesamte Hydratationswärme als Temperaturerhöhung festgestellt (Bild 3.1). Da aber selbst bei sorgfältiger Isolierung des Gerätes Wärmeverluste auftreten, wird das die Probe umgebende Medium (Wasser, Luft) oder die Hülle des Probenbehälters über ein Mess- und Regelsystem auf die in der Probe herrschende Temperatur aufgeheizt und dadurch der Wärmeübergang verhindert. Mit Hilfe der spezifischen Wärme der Probe und des bekannten Zementgehaltes kann dann die Hydratationswärme errechnet werden.

Die hauptsächlich als Großkalorimeter gebauten Geräte können Probengrößen von 5 – 10 l, in Ausnahmefällen bis 30 l Probenvolumen aufnehmen und sind damit für die Untersuchung der Wärmeentwicklung im Beton geeignet.

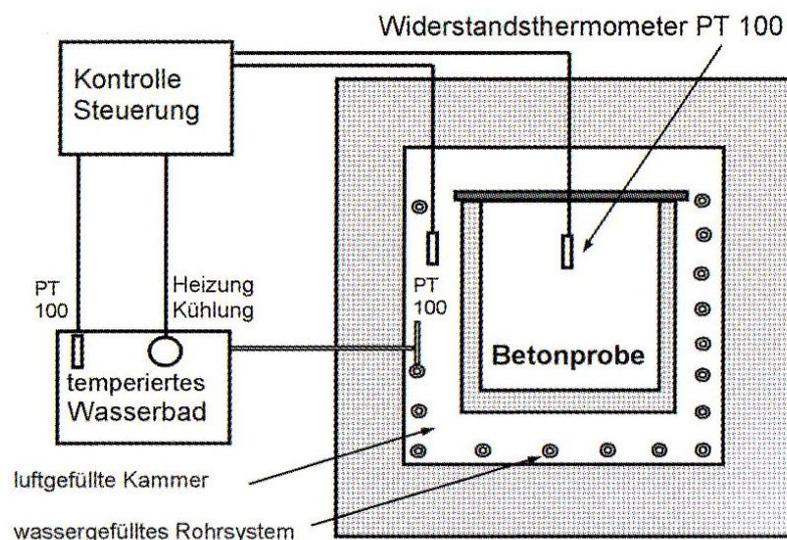


Bild 3.3: Adiabatisches Kalorimeter

3.2.4 Teiladiabatische Kalorimeter – Verfahren LANGAVANT

So wie die adiabatischen Kalorimeter registrieren die teiladiabatischen Kalorimeter auch den Temperaturanstieg in der Messeinrichtung infolge der freigesetzten Hydratationswärme und unterscheiden sich in der Isolierung des Probenbehälters und damit in der Höhe der Wärmeverluste während des Messvorganges. Nach einem Vorschlag des RILEM-Ausschusses² wird die Grenze zwischen beiden Kalorimetertypen bei einem Wärmeverlust gezogen, der einen Temperaturabfall von 0,02 K/h bewirkt.

Mit teiladiabatischen Kalorimetern wird das Ziel verfolgt, die Verhältnisse in Bauteilen mittlerer Dicke, zumindest in Anfangsphase, zu simulieren und dabei die freigesetzte Hydratationswärme zu erfassen. Tatsächlich ähneln die Temperaturverläufe in vielen Bauteilen unterschiedlichen Abmessungen und bei verschiedenen Umgebungsbedingungen den durch teiladiabatischen Untersuchungen erhaltenen Messkurven.

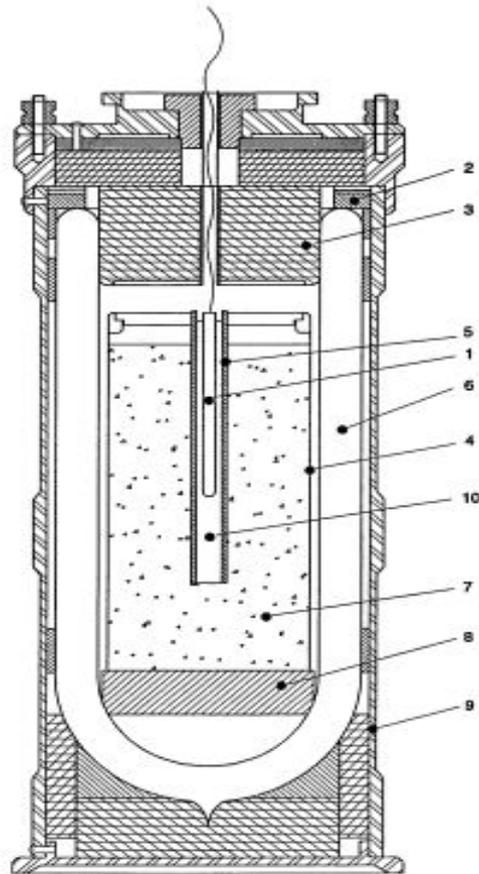
Die Geräte besitzen eine relativ geringe Dämmung gegen Wärmeverluste und verfügen in der Regel über keine Mess- und Regeleinrichtung zum Nachführen der Temperatur in der umgebenden Wandung. Der beträchtliche Wärmeverlust führt zu einem raschen Temperaturabfall. Die Geräte stellen aber eine wirtschaftliche Lösung zur Bestimmung der Hydratationswärme dar und sind einfach handhabbar.

Die Genauigkeit der Messung ist an die Eichung der Kalorimeter und Korrekturprozedur zum Ausgleich der Wärmeverluste gebunden [8].

Im ÖNORM EN 196-9 wird ein Kalorimeterversuch an dem Mörtel der Zusammensetzung z:g:w = 1:3:0,5 mit einer Probemasse von 1575 g beschrieben. Eine Weiterentwicklung für die Durchführung von Prüfungen an Betonproben mit einem Volumen von rd. 1,8 l ist in [8] vorgenommen worden.

In der Praxis besteht oft die Notwendigkeit, isothermisch ermittelte Wärmeentwicklungskurven in adiabatische Verläufe zu transformieren und umgekehrt. Geeignet dazu sind die mathematischen Beschreibungen der Temperatur-Zeit-Beziehungen, bei denen eine Korrektur der Erhärtungszeit z.B. durch Arrhenius-Gleichung vorgenommen werden kann. Detaillierte Beschreibungen können in [6] und [16] gefunden werden.

² RILEM – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, System and Structures, TC 119 TCE



Legende

- 1 Platin-Widerstandsthermometer
- 2 Gummidichtung
- 3 Dämmstopfen
- 4 Mörteldose
- 5 Thermometerstützen

- 6 Thermosgefäß
- 7 Mörtelprobe
- 8 Gummischeibe
- 9 stabiles Gehäuse
- 10 Öl

Bild 3.4: Teiladiabatisches Kalorimeter

3.3 Rechnerische Bestimmung der Wärmeentwicklung

Ein zentrales Problem bei der rechnerischen Bestimmung thermo-hydro-chemischer Kopplungen in jungem Beton liegt in der starken Veränderlichkeit nahezu aller Materialeigenschaften. Daraus resultieren zwangsläufig entsprechende Anforderungen an die Berechnungsmethoden und die dafür benötigten Eingangsgrößen, wie die thermischen Kennwerte des Betons, den Wärmeübergang an der Oberfläche der Bauteile usw. Der Anspruch an die Genauigkeit der Vorhersage hat aber in den vergangenen Jahren ständig zugenommen.

3.3.1 Thermische Kennwerte des Betons

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit des Betons λ_b (kJ/m h K) ist abhängig von den thermischen Eigenschaften und dem Anteil des Gesteinskörnung sowie dem Wasser- und Luftporengehalt und wird durch die Temperatur im Bauteil beeinflusst. Vereinfacht kann die Wärmeleitfähigkeit des Betons nach [17] aus den jeweiligen Anteilen der Komponenten ermittelt werden:

$$\lambda_b = (m_z \cdot \lambda_z + m_g \cdot \lambda_g + m_w \cdot \lambda_w) / (m_z + m_g + m_w) \quad (\text{kJ/m h K}) \quad (3.1)$$

m_z, m_g, m_w - Masseanteile des Zementes, der Gesteinskörnung und des Wassers

λ_z - Wärmeleitfähigkeit des Zementes (= 4,60 kJ/m h K)

λ_w - Wärmeleitfähigkeit des Wassers (= 2,16 kJ/m h K)

λ_g - Wärmeleitfähigkeit der Gesteinskörnung (Tabelle 3.1)

Tabelle 3.1: Wärmeleitfähigkeit der unterschiedlichen Gesteinskörnung

Gesteinsart	Wärmeleitfähigkeit λ_b [kJ/m h K]	
	Sand und grobe Gesteinskörnung aus der gleichen Gesteinsart	grobe Gesteinskörnung entspr. der angegeben Gesteinsart, Sand aus Quarzit
Quarzite und Gesteine mit hohem Quarzanteil	10,5	10,5
Granit, Gabbros	5,1	7,2
Dolerite, Basalt	7,7	6,8
Kalkstein, Sandstein	3,6	6,5

Sind weitere Bestandteile vorhanden, wie beispielsweise Flugasche, ist die Gleichung (3.1) entsprechend zu erweitern (Flugasche: $\lambda_{fa} = 4,7 \text{ kJ/m h K}$). Detaillierte Angaben zum Thema Wärmeleitfähigkeit können in [18] gefunden werden.

Wärmespeicherkapazität

Die Wärmekapazität des Betons S_b ($\text{kJ/m}^3 \text{ K}$) ergibt sich aus der spezifischen Wärme c_b (kJ/kg K) und der Rohdichte des Betons ρ_b (kg/m^3) zu:

$$S_b = c_b \cdot \rho_b \quad (\text{kJ/m}^3 \text{ K}) \quad (3.2)$$

Die Rohdichte ρ_b wird durch direkte Bestimmung im Labor oder über die Stoffraumrechnung erhalten, die für 1 m^3 Beton aufgestellt wird.

Die spezifische Wärme c_b bewegt sich nach den Untersuchungen von [19] zwischen 0,85 und 1,15 kJ/kg K ; für Frischbeton gilt 1,0 – 1,25 kJ/kg K . Eine rechnerische Ermittlung der Wärmekapazität kann auch mit den Masse-Anteilen der Komponenten der Betonzusammensetzung und deren thermischen Kennwerten vorgenommen werden. Für numerische Berechnungen wird gelegentlich eine Zeit- bzw. Feuchte- und Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität berücksichtigt. Nähere Erklärungen dazu sind bei [20] zu finden.

In der Praxis ergeben sich unter Beachtung üblicher Mischungszusammensetzungen die Wärmekapazitäten des Betons zwischen 2400 und 2600 $\text{kJ/m}^3\text{K}$, im Mittel wird deshalb häufig $S_b = 2500 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$ angesetzt.

Temperaturleitzahl

Die Temperaturleitzahl a (m^2/h) verknüpft die Wärmeleitfähigkeit λ_b und die Wärmekapazität S_b des Betons über die Beziehung:

$$a = \frac{\lambda_b}{c_b \cdot \rho_b} \quad (\text{m}^2/\text{h}) \quad (3.3)$$

und ist unmittelbare Eingangsgröße für die Wärmeleitungsgleichung (siehe Kapitel 3.3.3). Die in der Literatur mitgeteilten Stoffkennwerte streuen erheblich. In [21] sind verschiedene Quellen zitiert und eigene Untersuchungen angegeben.

3.3.2 Rechnerische Bestimmung der Wärmeentwicklung der Normzemente

Die Wärmefreisetzung der Zemente wird bevorzugt durch in ÖNORM EN 196 und durch im Kapitel 3.2 beschriebene experimentelle Methode bestimmt. Jedoch es besteht die Möglichkeit die Hydrationswärme auch rechnerisch aus der Zusammensetzung des Zementes zu ermitteln.

Die Gesamtwärmeentwicklung eines Zementes Q_{pot} wird im Allgemeinen durch die Summation der Beträge der Teilwärme der einzelnen Klinkerphasen Q_i und deren Massenanteile m_i ermittelt [6]:

$$Q_{\text{pot}} = Q_{\text{C}_3\text{S}} * m_{\text{C}_3\text{S}} + Q_{\text{C}_2\text{S}} * m_{\text{C}_2\text{S}} + Q_{\text{C}_3\text{A}+\text{Gips}} * m_{\text{C}_3\text{A}} + Q_{\text{C}_3\text{A}} * (m_{\text{Rest-C}_3\text{A}}) + Q_{\text{C}_4\text{AF}} * m_{\text{C}_4\text{AF}} + Q_{\text{MgO}} + m_{\text{MgO}} \text{ usw.} \quad (3.4)$$

Die einzelnen Klinkermineralien tragen sehr unterschiedlich zur insgesamt entwickelten Hydrationswärme, der sogenannten Wärmetönung des Zementes, bei (Tabelle 3.2). Die Reaktionswärme der Nebenbestandteile MgO, Na₂O und K₂O ist zwar sehr hoch, aber aufgrund des geringen Anteiles nur relativ geringfügige Auswirkungen.

Tabelle 3.2: Hydrationswärme nach der vollständigen Umsetzung der Klinkermineralien und der Zusatzstoffe

Ausgangssubstanz	Hydrationswärme [J/g] Ausgangssubstanz	
	Literaturangaben	Vorschlag bei gemeinsamer Reaktion (Klinker)
C ₃ S	490 ... 570	550
β - C ₂ S	225 ... 270	250
C ₃ A	860 ... 1 340	1 150
C ₃ A + Gips (Trisulfatbildung)		1 150 ¹⁾
C ₃ A + Gips (Momosulfatbildung)	1 040 ... 1 340	1 150 ¹⁾
C ₄ AF	165 ... 725	350
MgO		1 000
Na ₂ O		2 170
K ₂ O		2 450
CaO (frei)		1 170
Flugasche		35
Hüttensand		300 ³⁾
Silika		810 ²⁾

¹⁾ bezogen auf C₃A

²⁾ bezogen auf 1 g Silika

³⁾ 250 – 380 J/g

Eine solche Abschätzung kann selbstverständlich die messtechnische Erfassung der Wärmeentwicklung nur ergänzen, aber nicht ersetzen.

Beispiel

Ein Zement mit 64 % C₃S, 10 % C₂S, 8 % C₃A, 10 % C₄AF, 3 % MgO, 1 % Cao (frei) und 4 % Gips würde bis zur vollständigen Hydratation freisetzen:

Nach Gleichung 3.4 und mit den Angaben in Tabelle 3.2 ergibt sich:

$$Q_{pot} = 0,64 * 550 + 0,10 * 250 + (0,04 * 2,0) * 1150 + (0,08 - 0,04 * 2,0) * 1150 + 0,10 * 350 + 0,03 * 1000 + 0,01 * 1170 = \mathbf{545,7 \text{ J/g}}$$

*Für einen w/z-Wert = 0,5 würde eine maximale Wärmemenge von etwa $k(w/z) = 0,89$ (Bild 3.5) freigesetzt, d.h. $Q_{max} = 0,89 * 545,7 = \mathbf{485,7 \text{ J/g}}$*

3.3.3 Zeitpunkt der maximalen Temperatur

Der Zeitpunkt, zu dem die Temperatur im Inneren des Bauteils ihren Höchstwert erreicht, ist im Wesentlichen abhängig von der Bauteildicke, von der Wärmeabgabe an den Außenflächen und von der Zementart. Auch Verzögerer spielen eine Rolle. Da einige Parameter, wie z.B. der Einfluss der Luft- und Bauteiltemperatur auf die Erhärtung nicht berücksichtigt werden können, sind diese Berechnungen nur eine grobe Abschätzung.

Setzt man normale Abkühlbedingungen voraus (Holzschallung 24mm und ruhige Umgebungsluft) kann eine Abschätzung nach [27] erfolgen:

für $d \leq 3,5 \text{ m}$	$t_{max} = 1,00 \text{ h} + 0,5 \text{ (Tage)}$
für $d > 3,5 \text{ m}$	$t_{max} = 0,85 \text{ h} + 1,0 \text{ (Tage)}$

Für dickwandigere Bauteilen wird auch empfohlen:

$$t_{max} = 0,80 \text{ h} + 1,0 \text{ (Tage)}$$

h – Bauteildicke im (m)

Daraus ergibt sich, dass die maximale Temperatur bei üblichen Bauteildicken etwa einen Tag bis 1,5 Tage nach dem Einbringen des Betons erreicht wird. Dieser Zeitraum ist für das Ausschalen der ungünstigste Bereich, wenn außerdem die Lufttemperaturen während des Ausschalens niedrig sind. Hierbei entstehen größtmögliche Temperaturunterschiede zwischen Betonkern und Außenfläche.

Es kann angenommen werden, dass die Temperatur nach dem Temperaturmaximum in den nächsten Tagen um etwa 10 K bis 5 K je Tag abnimmt [28].

3.3.4 Temperaturentwicklung im Bauteil unter adiabatischen Bedingungen

Eine vollständige Konservierung des Bauteiles führt dazu, dass aufgrund der frühzeitig hohen Temperaturen die Wärmefreisetzung sehr stark beschleunigt wird und schon in der Anfangsphase der Erhärtung nahezu die gesamte Hydratationswärme auftritt. Diese Temperaturverhältnisse können annähernd im Massenbeton bei größeren Bauteildicken auftreten. Bei den üblichen Bauteildicken folgt der Temperaturverlauf zwar anfänglich ebenfalls einer adiabatischen Kurve, weicht dann entsprechend der vorhandenen Wärmeübergangsbedingungen an der Oberfläche davon ab.

Bei adiabatischen Bedingungen verbleibt die gesamte Hydratationswärme im Bauteil und führt zum Zeitpunkt t zu einer Temperaturerhöhung gegenüber der Anfangs- (Einbau-) Temperatur [22]:

$$\Delta T_{ad}(t) = \frac{Q(t) \cdot z}{c_b \cdot \rho_b} \quad (\text{K}) \quad (3.5)$$

c_b - spezifische Wärmekapazität des Betons (kJ/kg K), siehe 3.3.1

ρ_b - Rohdichte des Betons (kg/m³)

$Q(t)$ - Hydratationswärme zum Zeitpunkt t (kJ/kg)

z - Zementmenge im Beton (kg/m³)

Inwieweit der Zement umgesetzt werden kann, hängt von dem im Kapillarporensystem verfügbaren Wasser bzw. dem w/z -Wert ab. Eine Steigerung des w/z -Wertes führt zur Zunahme Hydratationsgeschwindigkeit und einem höheren Hydratationsgrad bzw. einer größeren insgesamt entwickelten Wärmemenge.

Bei der mathematischen Formulierung der Hydratations- oder Wärmeentwicklung können abweichende w/z -Werte durch Korrektur der Endwerte nach Bild 3.5

berücksichtigt werden. Beispielsweise kann bei $w/z = 0,50$ nur ein maximaler Hydratationsgrad von etwa $\alpha_{\max} = 0,90$, bei $w/z = 0,40$ etwa $\alpha_{\max} = 0,85$, erreicht werden. Der Sachverhalt ist durch mehrere Untersuchungen mit adiabatischen und isothermischen Kalorimetern nachgewiesen worden [23].

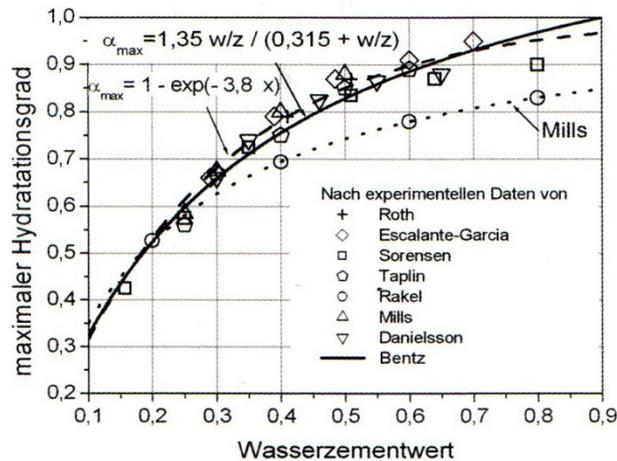


Bild 3.5: Maximaler Hydratationsgrad in Abhängigkeit vom Wasserzementwert [6]

Die Entwicklung des Hydratationsgrades ist auch von der Erhärtungstemperatur abhängig. Ab einem Hydratationsgrad von etwa $\alpha = 0,40$ nimmt der Einfluss der Temperatur auf die Reaktionskinetik laufend ab und kann ab $\alpha = 0,80$ überhaupt nicht mehr zuverlässig bestimmt werden. Im Bild 3.6 ist der Einfluss der Erhärtungstemperatur auf die Entwicklung des Hydratationsgrades dargestellt.

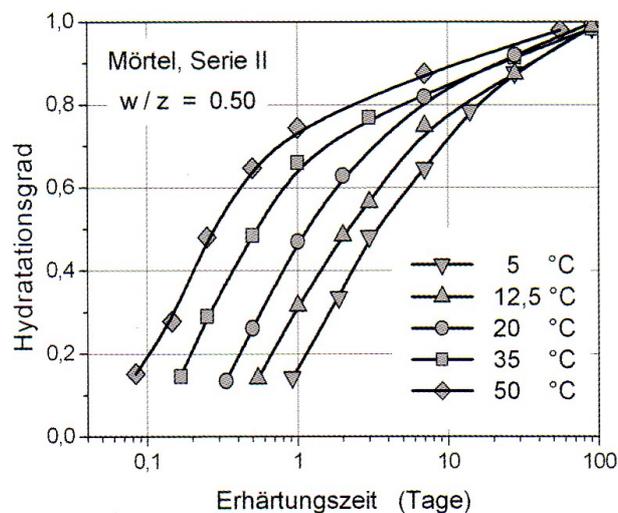


Bild 3.6: Entwicklung des Hydratationsgrades in Abhängigkeit von der Erhärtungstemperatur [6]

Beispiel [6]

Bei der Erhärtung eines Betons aus CEM I 42,5 R mit einer Hydratationswärme $Q_{max}=545,7$ J/g und einem Zementgehalt $z=300$ kg/m³ würde nach Erreichen des maximalen Hydratationsgrades ($\alpha=0,89$) die Temperaturerhöhung betragen:

$$\Delta T_{ad} = \frac{Q_{max} z}{S_b} = \frac{545,7 \cdot 0,89 \cdot 300}{2500} = 58,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Mit einer Einbautemperatur des Frischbetons $T_{b,0} = 15$ °C ergäbe sich daraus die Bauteiltemperatur:

$$T_b = T_{b,0} + \Delta T_{ad} = 15,0 + 58,3 = 73,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Der Verlauf der Wärmeentwicklung entspricht dem des Hydratationsgrades. Unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Hydratationsgeschwindigkeit würde nach dem 1.Tag der Hydratationsgrad etwa $\alpha=0,55$ (Bild 3.6) betragen und daraus die Bauteiltemperatur folgen zu:

$$T_b = 15,0 + \frac{545,7 \cdot 0,55 \cdot 300}{2500} = 15,0 + 36,0 = 51,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.3.5 Temperaturentwicklung im Bauteil unter teiladiabatischen Bedingungen

In Wirklichkeit ist die Temperaturerhöhung im Inneren der Betonbauteile niedriger als die errechnete unter Annahme der adiabatischen Bedingungen, da in jedem Betonbauteil, in dem kein Temperaturgleichgewicht vorhanden ist, finden Wärmeströmungen und Temperatúraustausch mit Umgebung statt. In mathematischen Sinne, Betrachtung dieser Wärmeübergangsprozesse führt zur Differenzialgleichungen und Berechnung ist wesentlich kompliziert.

Die einfache Form der Fourier'sche Differenzialgleichung für eindimensionale Betrachtung besitzt den folgenden Ausdruck:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q(x,t)}{c \cdot \rho} \right) \quad [6] \quad (3.6)$$

T - orts- und zeitabhängige Temperatur (°C)

t - Zeit (h)

c - spezifische Wärmekapazität (kJ/kg K)

ρ - Rohdichte (kg/m³)

q - innere Wärmeentwicklung als Funktion des Ortes und der Zeit,

d.h. die Wärmerate (kJ/m³ h)

Entscheidend für die Lösung der DGL und realitätsnahe Temperaturberechnung ist die Bereitstellung zutreffender Eingabewerte, d.h. neben thermischen Kenngrößen des Betons auch den wirklichkeitsnahen Randbedingungen (Frischbetontemperatur und Wärmeübergangsbedingungen an der Oberfläche).

Rechnerische Lösung der DGL ist nur für einfache Randbedingungen möglich und mit großem Rechenaufwand verbunden. Beispiele sind bei [24] und [25] zu finden.

Durch die Entwicklung leistungsfähiger Computer sind Berechnungsprogramme möglich geworden, die die Lösung der Fourier'schen DGL bei räumlichen Temperaturverteilung und komplizierten Randbedingungen auf numerischem Wege erlauben. Die Konstruktion wird dabei in sogenannte Finite Elemente aufgeteilt, für die beliebige thermische und stoffliche Eigenschaften postuliert werden können. Trotz dieser Möglichkeiten ist in vielen Fällen eine Vereinfachung des Modells der Temperaturverhältnisse zweckmäßig und kann auch vorgenommen werden, ohne dass

die Genauigkeit wesentlich verringert und die Verwendbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt sind.

3.3.6 Abschätzung der Temperatur im Bauteil

Obwohl es heutzutage die Möglichkeit zur genauen Berechnung der Temperaturverteilung besteht, bleibt trotzdem die Notwendigkeit einer schnellen Näherungsermittlung und Abschätzung der Temperaturverhältnisse im Bauteil.

Die theoretische Temperaturerhöhung ist abhängig von der Zementmenge und von der Hydrationswärme bezogen auf Wärmekapazität des Betons [29]:

$$\Delta T_{th} = \frac{z \cdot Q_H}{C_{co}} \quad (\text{K}) \quad (3.7)$$

ΔT_{th} – theoretische Temperaturerhöhung (K)

z - Zementmenge (kg/m³)

Q_H - Hydrationswärme (kJ/kg)

C_{co} - Wärmekapazität des Betons (≈ 2500 kJ/(m³ K))

Diese theoretische Temperaturerhöhung wird praktisch nicht eintreten, da während der Erwärmung schon wieder Wärme abfließt und die tatsächliche Temperaturerhöhung im Inneren der Bauteile niedriger ist. Sie ist abhängig von der Bauteildicke, von der Art der Schalung und vom Wärmeübergangswiderstand an den Bauteilaußenseiten. Aufgrund von Untersuchungen nach [30] und anderer Messungen kann angenommen werden, dass die tatsächliche Temperaturerhöhung im Kern von Bauteilen je nach Bauteildicke die Werte der Tabelle 3.3 erreicht. Hier wird davon ausgegangen, dass Wände beidseitig in 24 mm dicker Holzschalung stehen und kein Wind herrscht.

Tabelle 3.3: Beispiele für den Verhältniswert α_b zwischen der Temperaturerhöhung im Bauteil $\Delta T_{b,H}$ und der theoretischen Temperaturerhöhung ΔT_{th} , abhängig von der wirksamen Bauteildicke h_b bei Verwendung üblicher Schalung [30]

wirksame Bauteildicke h [m]	$\alpha_b = \Delta T_{b,H} / \Delta T_{th}$
0,3	0,73
0,4	0,75
0,6	0,80
0,8	0,85
1,0	0,95
2,0	1,00

Mit der theoretischen Temperaturerhöhung nach Gleichung 3.7 und den Verhältniswerten der Tabelle 3.3 kann die im Inneren der Bauteile tatsächlich entstehende Temperaturerhöhung abgeschätzt werden.

Beispiel [28]

Eine Betonwand ist 0,60 m dick. Der Beton wird mit 350 kg Zement CEM I 32,5 R je m³ hergestellt. Er hat eine Frischbetontemperatur von $T_{c0} = 17 \text{ °C}$. Die maximal entwickelte Hydratationswärme beträgt $Q_H = 220 \text{ kJ/kg}$. Nach grober Schätzung ist folgende Temperaturerhöhung im Bauteil zu erwarten, wobei ΔT_{th} entsprechend Gleichung 3.7 und α_b nach Tabelle 3.3 sowie $C_{c0} = 2500 \text{ J/(m}^3 \text{ K)}$ nach Gleichung 3.7 zu verwenden ist:

$$\Delta T_{b,H} = \alpha_b * \Delta T_{th} = \alpha_b * \frac{z * Q_H}{C_{c0}}$$

$$\Delta T_{b,H} = 0,80 * \frac{350 * 220}{2500} \approx 25 \text{ K}$$

Im inneren des Bauteils wird folgende maximale Betontemperatur erreicht:

$$\max T_{b,i} = T_{c0} + \Delta T_{b,H} = 17 + 25 = 42 \text{ °C}$$

Aus zahlreichen Untersuchungen sind für die Abschätzung der Betontemperatur neben den Rechenmethoden auch tabellierte Messwerte entstanden. In der Tabelle 3.4 sind Anhaltswerte für die Abschätzung des Temperaturanstiegs unter Berücksichtigung der Bauteildicke, des Zementgehaltes und der Schalungsart dargestellt.

Dabei wurde vorausgesetzt, dass es sich um eine Einbautemperatur von 20 °C und eine Lufttemperatur von 15°C handelt. Die Werte in den Zeilen 1 bis 3 sind für unterschiedliche Hüttensandanteile (30 %, 50 % und 70 %) im Zement vorgesehen.

Tabelle 3.4: Anhaltswerte für die Abschätzung des Temperaturanstiegs in Betonbauteilen

Bauteil- Dicke [cm]	Stahlschalung				Holzschalung			
	Zementgehalt z = [kg/m³]				Zementgehalt z = [kg/m³]			
	220	290	360	400	220	290	360	400
30	12	14	16	17	16	20	24	26
	10	12	14	15	14	17	20	22
	9	10	12	13	12	14	16	17
50	16	20	24	26	22	27	33	35
	14	18	20	22	19	24	28	31
	12	14	16	17	16	19	22	24
70	21	26	31	35	26	33	39	43
	18	23	27	30	23	29	35	38
	15	19	22	23	19	23	28	30
100	27	34	41	45	30	38	46	50
	24	30	36	40	28	35	42	46
	20	25	29	32	23	28	34	37

Beispiel

Ein Bauteil ist 0,50 m dick (Holzschalung). Der Beton wird mit 360 kg Zement (50 % Hüttensandanteil) hergestellt und hat eine Frischbetontemperatur von $T_{c0} = 17$ °C. Die maximale Betontemperatur soll abgeschätzt werden.

$$\max T_b = T_{c0} + \Delta T_b = 17 + 28 = 45 \text{ °C}$$

3.4 Erfassung und Kontrolle der Temperaturentwicklung vor Ort

3.4.1 Vorgangsweise

Oft kommt es in der Praxis vor, dass die tatsächliche Temperaturentwicklung im Bauteil und die rechnerischen Ergebnisse oder die experimentellen Ergebnisse aus Laborversuchen nicht übereinstimmen. Die Ursache kann z.B. in der unterschiedlichen Kinetik aufgrund der Wirkung der Zuschläge, den nicht konstanten Temperaturverhältnissen und der veränderten Wirksamkeit des Wasserzementwertes auf die Hydratation des Zementes im Beton gesehen werden. Deswegen neben der erwarteten Temperaturentwicklung und der Temperaturdifferenzen ist die Kontrolle wesentliche Vorbedingung. Die Erfassung der Temperaturen im Bauteil dient auch dem Nachweis der Einhaltung vorgegebener Höchsttemperaturen oder Temperaturdifferenzen [6].

Zur Abschätzung der tatsächlich zu erwartenden Wärmeentwicklung in massigen Bauteilen werden deshalb häufig Probeflächen betoniert und Temperaturmessungen durchgeführt. Dabei wird besonders auf Mindestabmessungen geschaut, die erforderlich sind um adiabatische Erhärtingsbedingungen zu erhalten. Beispielsweise im Wasserbau sind Betonblöcke mit 2,0 m Kantenlänge vorgeschrieben, die allseitig mit einer Wärmedämmung von 360 mm Dicke zu versehen sind. Die Temperatur des Frischbetons darf beim Einbau 15 °C und die der umgebenden Luft 5°C nicht unterschreiten. Die Messung der Temperatur erfolgt im Zentrum des Blocks sowie in Mitte der Seitenflächen und der Oberseite im Abstand von 5 cm und 50 cm von der Oberfläche [26].

3.4.2 Messtechnik

Thermoelemente

Die klassische Temperaturmessung im Beton basiert auf dem Zusammenhang zwischen einwirkender Temperatur und elektrischer Spannung. Verwendet werden Thermoelemente, die aus zwei Drähten unterschiedlicher Metalle oder Metalllegierungen bestehen und an einem Ende, der Messstelle, miteinander

punktförmig verlötet oder verschweißt sind. Durch Feuchtigkeit in der Grenzschicht kann es dabei zu Verfälschung des Messwertes kommen. Auch bei der Befestigung des Messfühlers am Bewehrungsstahl ist durch ausreichende Dämmung dessen Temperatureinfluss zu verhindern. Die Länge der Leitung ist wegen des geringen Innenwiderstandes bei Thermoelementen von untergeordneter Bedeutung. Im allgemein kann angenommen werden, dass bis zu etwa 50 m Leitung keine Verfälschung des Messwertes auftritt [6].

Widerstandsthermoelemente

Ihre Verwendung in der Betontemperaturmessung finden auch industriell gefertigte Widerstandsthermoelemente, z.B. PT100, die auf der Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur beruhen. Zum Schutz gegen messwertverfälschende Feuchtigkeitseinwirkung sowie gegen mechanische Beschädigungen sind die Messfühler in Messinghülsen eingegossen. Durch Kalibrierung der Aufnehmer im Wärmeschrank bei Temperaturen zwischen 20 und 60 °C können bauartbedingte Einflüsse, die sich auf den elektrischen Widerstand auswirken (Lötstellen, Nichtlinearität des Temperaturganges usw.) weitestgehend kompensiert werden. Die Auflösungsgenauigkeit liegt bei 0,10 °C [6].

Schwingsaiten-Sensoren

Schwingsaiten-Sensoren liegt das Prinzip zugrunde, dass eine Veränderung der Temperatur auch eine der Frequenz des Ausgangssignals hervorruft. Verfahrens- und konstruktionsbedingt ist eine außerordentliche Langzeitstabilität des Messsignals gegeben. Die Auflösung liegt bei 0,05 °C.

Datenlogger

Die Messwerterfassung und –speicherung erfolgt mittels Datenlogger, die über eine Pufferbatterie bzw. einen –akku verfügen und deren Speicher in zeitlichen Abständen ausgelesen wird. Diese Datenlogger sind i.d.R. kombinierbar mit einer aufsteckbaren Sofortanzeige, einem Infrarotdrucker und gleichzeitig sind die Messwerte mit dem Interface (Schnittstelle) und einer Auswertsoftware auf dem PC tabellarisch oder grafisch darstellbar. Auch netzunabhängige Alarmanzeigen bei Über- und

Unterschreiten von Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen sowie eine Datenfernübertragung mittels Modem usw. sind möglich bzw. nachrüstbar [6].

Faseroptische Messsysteme

Faseroptische Messsysteme basieren auf der Temperaturempfindlichkeit von Glasfasern und der Rücksteuerung eines kurzen Laser-Impulses (< 10 ns), der in die Fasern emittiert wird. Mittels Frequenzanalyse am rückgesteuerten Licht wird die Temperaturhöhe berechnet. Die lokale Zuordnung des Messwertes erfolgt anhand einer sehr genauen Zeitmessung, unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in der Glasfaser. In einer nur wenige Minuten dauernden Messung erhält man das Temperaturprofil entlang des gesamten Glasfaserleitung, die eine Länge von mehreren Hundert Metern besitzen kann, was ein wesentlichen Vorteil gegenüber den anderen Messsystemen darstellt. Die Feststellung des Ortespunktes erfolgt mit einer Genauigkeit von 0,25 m.

4. Bausoftware und Messgeräte

In der Einleitung dieser Arbeit wurde als eines der Ziele die Verwendung der neuen „Cobet“ Bausoftware und Messgeräte genannt. In diesem Kapitel werden sie näher beschrieben und der praktische Einsatz dann genau im nächsten Kapitel anhand einiger Versuche vorgestellt.

4.1 Bausoftware „Cobet“

4.1.1 Allgemein

Das Cobet-System Version 3.0 ist eine komplexe betontechnologische Software, die von der Firma CSB Hanse GmbH für Anwender aus folgenden Bereichen entwickelt wurde:

- Betonwerke (Transportbeton, Fertigteile, Betonwaren)
- Baustoffwerke (verschiedene Branchen)
- Bauunternehmen, Bauberater, Prüfstellen

Die Software bietet neben den vorkonfigurierten Standardeinstellungen wie zum Beispiel einem Programm zur Abschätzung der Temperaturentwicklung, einem Programm zur Prognose der Festigkeitsentwicklung, Programmen zur Optimierung von Betonrezepturen und Flugaschemengen im Beton usw., auch umfangreiche individuelle Einstellungen und steht zum Beispiel zur Anbindung an beliebige Betonmischanlagensteuerungen zur Verfügung. Rezepturdaten können an die Anlage übergeben und Produktionsdaten aus der Anlage übernommen und im Rahmen einer Konformitätskontrolle weiterverarbeitet werden.

4.1.2 Aufbau und Leistungsbeschreibung

Die während dieser Arbeit verwendete Softwareversion besteht aus fünf Modulen (Bild 4.1) und ist so konzipiert, dass weitere Module bzw. spezielle Prüfungen integriert werden können. Zu den Modulen gehören:

- 1) Stammdaten
- 2) Programm
- 3) Labor
- 4) Überwachung
- 5) Dokumente

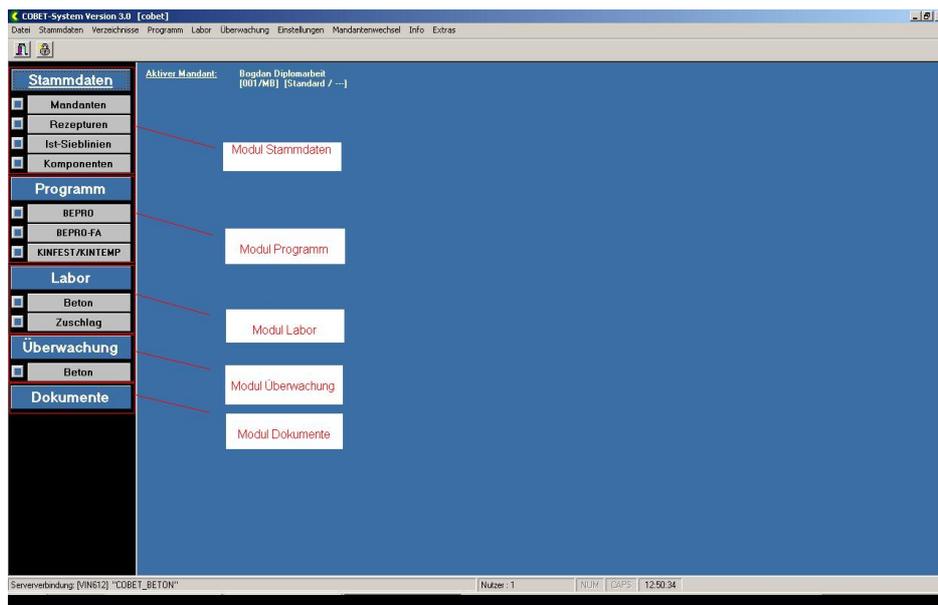


Bild 4.1: Aufbau der Software

Die Module PROGRAMM, LABOR und ÜBERWACHUNG sind eigenständige Programmkomplexe und beim Start dieser Module werden separate Programme geöffnet. Ein direkter Zugriff auf Stammdaten aus diesen Modulen ist möglich.

4.1.2.1 Modul STAMMDATEN

Für die Arbeit mit der Software sind zahlreiche Eingangsdaten erforderlich. Das Modul Stammdaten stellt eine Art Datenbank dar, wo Eingangsparameter festgelegt und gespeichert werden. Es besteht aus vier Untergruppen: Mandanten, Rezepturen, Ist-Sieblinie und Komponenten.

Mandanten

Die Software orientiert sich bei der Verwaltung der Daten an einer Mandantenstruktur. Alle Daten (Sieblinien, Betonrezepturen, Rezepturkomponenten usw.) werden jeweils einem Mandant zugeordnet, der praktisch als „Eigentümer“ dieser Daten fungiert. Das

System bietet dabei flexible Strukturen zur mandantenfähigen Datenverwaltung. Mandant kann z.B. das Betonwerk, die Prüfstelle, der Kunde oder die Baustelle sein (Bild 4.2). Den Mandanten können beliebigen Mandantengruppen zugeordnet werden (z.B. Regionen). Der Administrator wiederum ordnet dem Benutzer den Zugriff auf eine Mandantengruppe zu, so dass der Benutzer nach der Anmeldung im COBET-System automatisch nur die der Gruppe zugeordneten Mandanten (und ggf. den Pool) zur Verfügung hat.

Es gibt drei Typen von Mandanten:

- Standard - Erstellung und Bearbeitung von Daten nur für diesen Mandanten, kein Zugriff für andere Mandanten

- Labor - ohne ausgewählten Untermantanten wie Standardmandant zu Betrachten
 - mit Auswahl eines Untermantanten werden nur die Daten des Untermantanten (mit geänderten Zugriffsrechten) sichtbar, die Bearbeitung von Labordaten des Untermantanten ist möglich, seine Stammdaten sind lesbar, jedoch nicht veränderbar

- Pool - Daten können von allen Mandanten verwendet, jedoch nicht verändert Werden

Innerhalb des Mandantentyps "Standard" kann eine erweiterte Spezifizierung nach Mandantenuntertypen erfolgen. Die Typen "Werk", "Bauunternehmen", "Baustelle", "Kunde", "Lieferant" und "Hersteller" stehen momentan zur Verfügung.

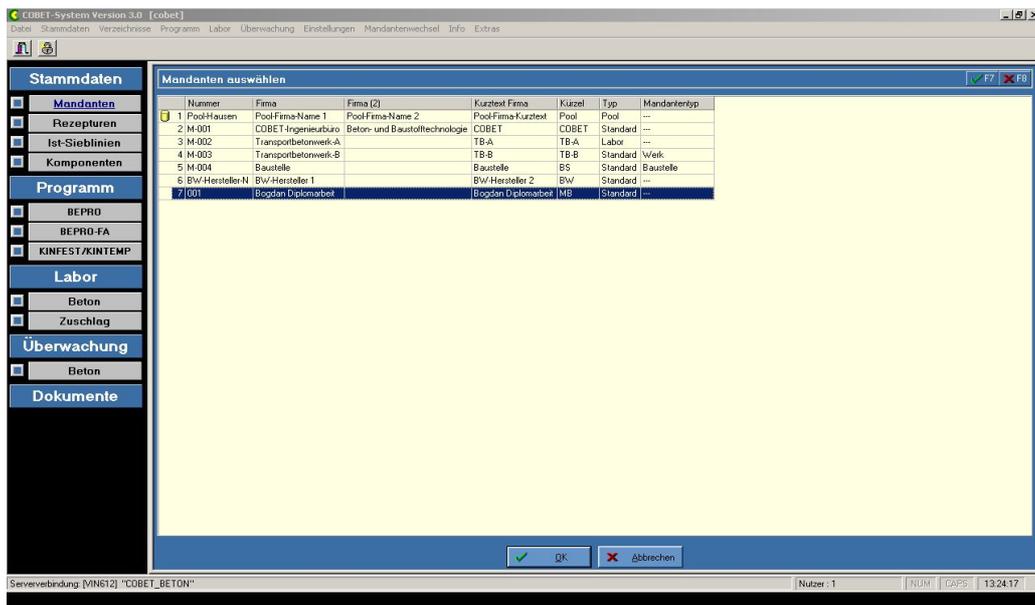


Bild 4.2: Beispiel Mandanten

Rezepturen

Der Begriff der „Rezeptur“ dürfte formell allen Anwendern bekannt sein. Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge im COBET-System erfolgen an dieser Stelle dennoch einige Erläuterungen.

Eine Rezeptur besteht im Wesentlichen aus zwei Bereichen. Dazu gehört einmal die Beschreibung der Eigenschaften der Rezeptur (Bezeichnungen, Expositions-, Druckfestigkeits-, Chlorid-, Überwachungs-, ...-klassen, Konsistenzangaben, ...). Der zweite Bereich ist die konkrete Zusammensetzung (verwendete Gesteinskörnungen, Zement, Wasser, ...) mit den entsprechenden Mengenangaben. Im COBET-System gehören zu einer Rezeptur immer beide Bereiche im Gegensatz zur „Sorte“, die im Wesentlichen nur Eigenschaften enthält.

Abstr.Nr.	Festigkeitsklasse	K (H)	K (B)	Größtkom.	Rohdichteklasse	Expositionsclassen	Anwendung	Zement	Betonrtp
C12/15	C1		16	0				CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 16/20	F3		16	0				CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 20/25	F3		16	0				CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 20/25	F3		16	0				CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 25/30	F3		16	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 30/37	F3		32	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 25/30	F3		16	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 30/37	F3		16	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 42,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 30/37	F3		16	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 30/37	F2	F3	16	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 35/45	F3		16	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 42,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 35/45	F3		32	0		XC4, XD2, XF4(LP), XM1	Offenes Park-deck, Fahrbereich, Frost, Taunetz	CEM I 42,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 40/50	F3		16	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 42,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 70/85	F3		32	0		XC4, XF1, XA1	Außenbauteile	CEM I 52,5 R	Beton nach Eigenschaften
C 35/45	F3		32	0		XC4, XF1, XA1	Massige Bauteile	CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA	Beton nach Eigenschaften
C 16/20	F3		8	0		XC1		CEM I 32,5 R	Beton nach Eigenschaften

Bild 4.3: Beispiel Rezepturen

Im COBET-System werden verschiedene Rezepturarten oder auch Betonarten unterschieden. Es werden folgende Betonarten in folgenden Gruppen unterschieden:

- 1) Beton (Normalbeton, Schwebeton, Hochfester Beton)
- 2) Leichtbeton (Gefügedichter Leichtbeton, Hochfester Leichtbeton)
- 3) Mörtel (Mauermörtel, Putzmörtel, Spezialmörtel)
- 4) Estrich (Zementestrich, Calciumsulfatestrich, Spezialestrich)
- 5) Sondermischungen
- 6) Kalksandstein
- 7) Betonrezepturen (Rezepturen für Betonwaren --> Vorsatz-/Kernrezepturen)

Ist-Sieblinien

Beim Anlegen einer neuen Betonrezeptur wird die Fertigung einer Siebanalyse gefordert (Bild 4.4). Es sollten zunächst Nummer und Bezeichnung vergeben und anschließend das Größtsieb der Sieblinie festgelegt werden. Als Grundlage für die Siebanalyse können vorhandene Siebsätze oder Sollsieblinien verwendet werden. Bei Siebsätzen werden in die Siebanalyse lediglich die Siebe (Siebgröße) als Muster übernommen, die Siebdurchgänge werden als lineare Kennlinie automatisch erzeugt.

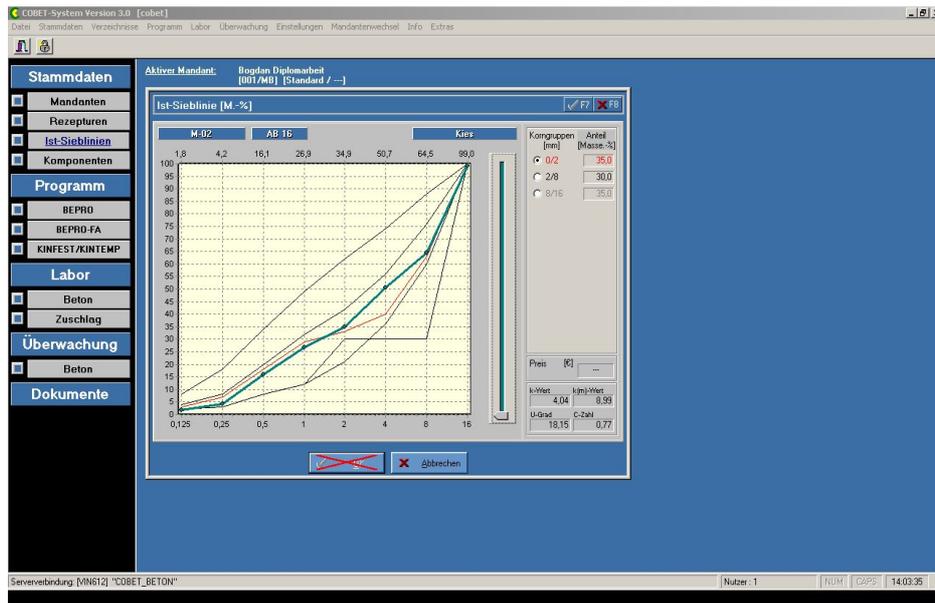


Bild 4.4: Beispiel Sieblinie

Komponenten

Die Komponenten charakterisieren die Rezepturen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung. Die Genauigkeit der Angaben ist entscheidend für die Richtigkeit der Ergebnisse. Bei der Software werden folgende Komponenten unterschieden (Bild 4.5):

1. Gesteinskörnung
2. Zement
3. Wasser
4. Zusatzmittel
5. Zusatzstoffe
6. Bindemittel (Calciumsulfat/Gips, Kalk/PM-Binder, Spezialbinder)

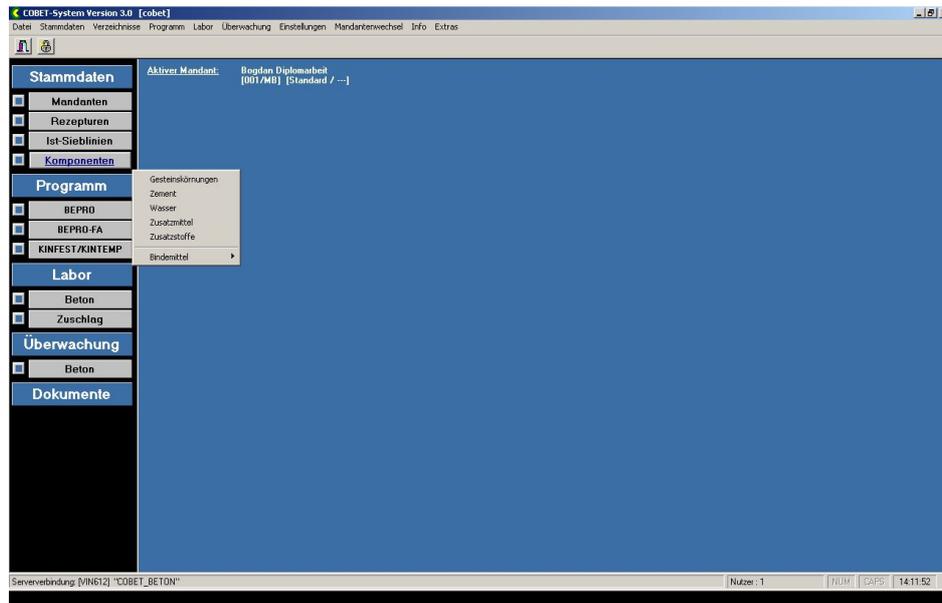


Bild 4.5: Komponenten

Gesteinskörnung

Beim Anlegen einer neuen Gesteinskörnung (GK) sind die Siebanalysedaten erforderlich und die Software definiert die Gesteinskörnungen nach:

Bezeichnung : Grobe und feine GK, natürliche GK 0/8, Korngemisch, Füller und Sonderkörnung,

Art: Natürliche normale, schwere, leichte GK und Industrielle normale, schwere, leichte GK,

Korngruppe: entsprechend Kleinstkorn (d) und Größtkorn (D) zwischen 0 mm und 63 mm

Kornart: ungebrochen - gebrochen (mit Auswirkung auf den Wasseranspruch)

Die Angabe der Rohdichte ist auch erforderlich und falls GK relevante Porositäten aufweisen, muss die Wasseraufnahme angegeben werden. Ohne die Angabe der Wasseraufnahme ist die Auswertung einer Kernfeuchte nicht möglich.

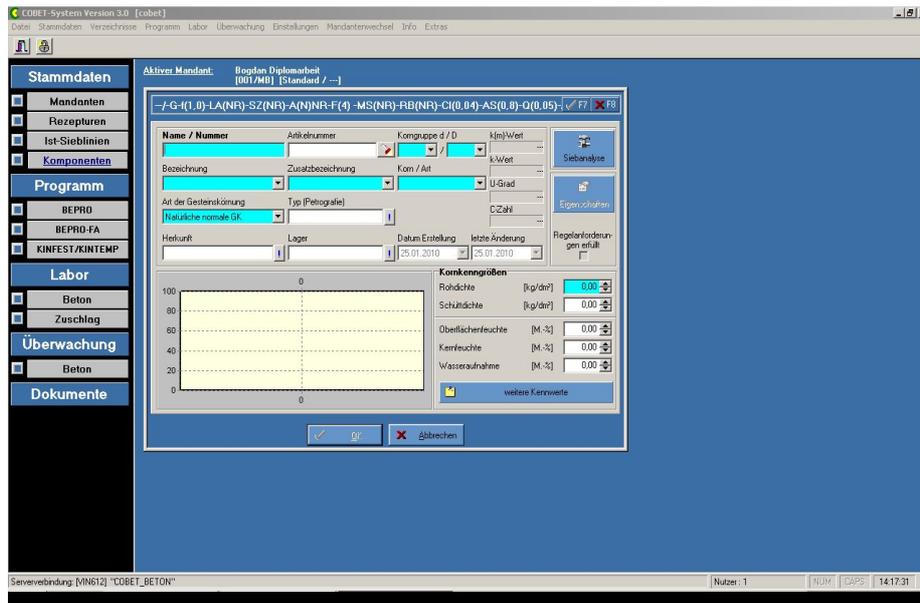


Bild 4.6: Anlegen einer neuen Gesteinskörnung (Angebe in den grünen Bereichen ist Pflicht)

Zement

Zemente werden normgemäß hinsichtlich ihrer Art (z.B. CEM II/A), ihrer Festigkeitsklasse (z.B. 32,5R) und gegebenenfalls ihrer Eigenschaften (z.B. NW) charakterisiert. Die Angabe von Sonderzeichen (z.B. ft) ist möglich, diese werden jedoch nicht weiter ausgewertet. Die korrekte normgemäße Eingabe wird über eine spezielle Eingabemaske für die Zementbezeichnung durchgeführt

Weitere Pflichtangaben sind die Zementdichte und die Normfestigkeit (28 d) als Mindestvoraussetzungen für die Berechnung von Betonrezepturen. Neben der Normfestigkeit (28d) können Festigkeitswerte für Zeiten von 2 bis 182 Tagen hinterlegt werden, um Betondruckfestigkeiten für die entsprechenden Termine berechnen zu können. Die Angabe der 2-Tagesfestigkeit ist Voraussetzung für die Berechnung der Mindestdauer der Betonnachbehandlung. Weitere Angaben ermöglichen technologische Entscheidungen im Zeitraum der frühen Erhärtung (Ausschalen, Vorspannen, Abheben ...) und die Beurteilung der Nacherhärtung.

Die festigkeitsbezogene Planung von Betonrezepturen (Berechnung nach Zieldruckfestigkeit) kann für alle Zeiträume erfolgen, für die Zementfestigkeiten vorliegen (z.B. Zielfestigkeit $f_{cm} = 35 \text{ N/mm}^2$ nicht nur nach 28, sondern auch nach 2 oder 182 Tagen).

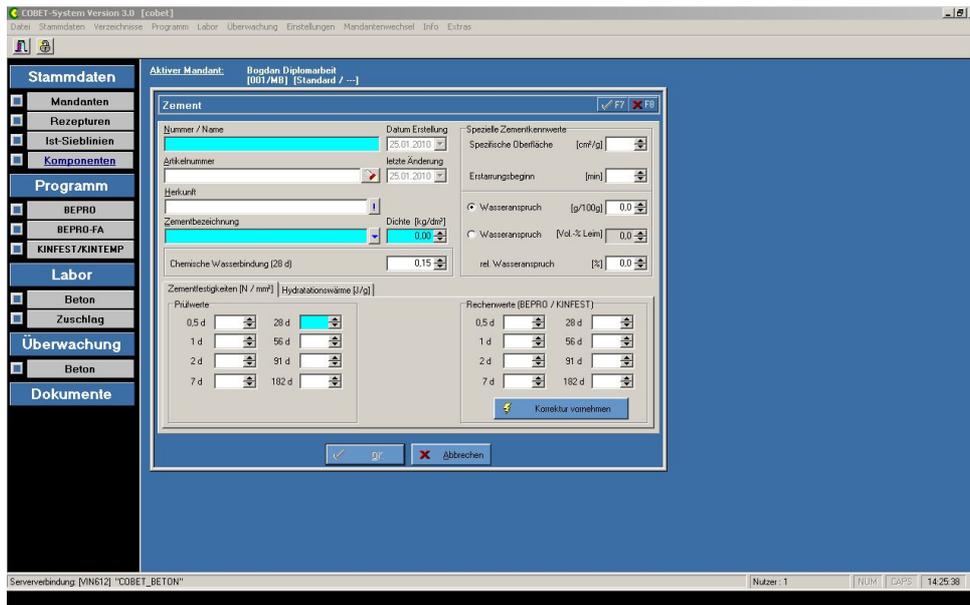


Bild 4.7: Anlegen einer neuen Zementart

Eingaben zum Wasseranspruch der Zemente sind nicht zwingend erforderlich. Liegt keine Angabe vor, wird für den Mischungsentwurf des Betons automatisch ein durchschnittlicher Wasseranspruch angenommen (Angabe als relativer Wasseranspruch = 100 %). Diese Angaben zum Wasseranspruch der Zemente werden im Mischungsentwurf bei der Berechnung des Wasserbedarfs eines Betons berücksichtigt.

Für die Berechnung der Temperaturentwicklung sind mindestens Angaben zur Hydratationswärme des Zements nach 12h und 72h erforderlich.

4.1.2.2 Modul PROGRAMM

Das Modul Programm stellt das operative Teil der Software dar. Hier sind vier Berechnungsprogramme, die die Software bietet, enthalten:

- 1) BEPRO
- 2) BEPRO-FA
- 3) KINFEST
- 4) KINTEMP

Programm BEPRO

BEPRO ist ein Programm für die Berechnung optimaler Rezepturen von Normalbeton, hochfestem Beton und Schwerbeton. Alle wichtigen betontechnologischen Einflussgrößen und normativen Grenzwerte werden im Berechnungs-Algorithmus berücksichtigt (Wassermenge, Frischbetonporosität, Wasser und Wasserbedarf, Zusatzmittel, Zusatzstoffe, Zielwerte und Normen).

In der Eingangsmaske werden die wesentlichen Anforderungen an den Beton festgelegt (Bild 4.8).

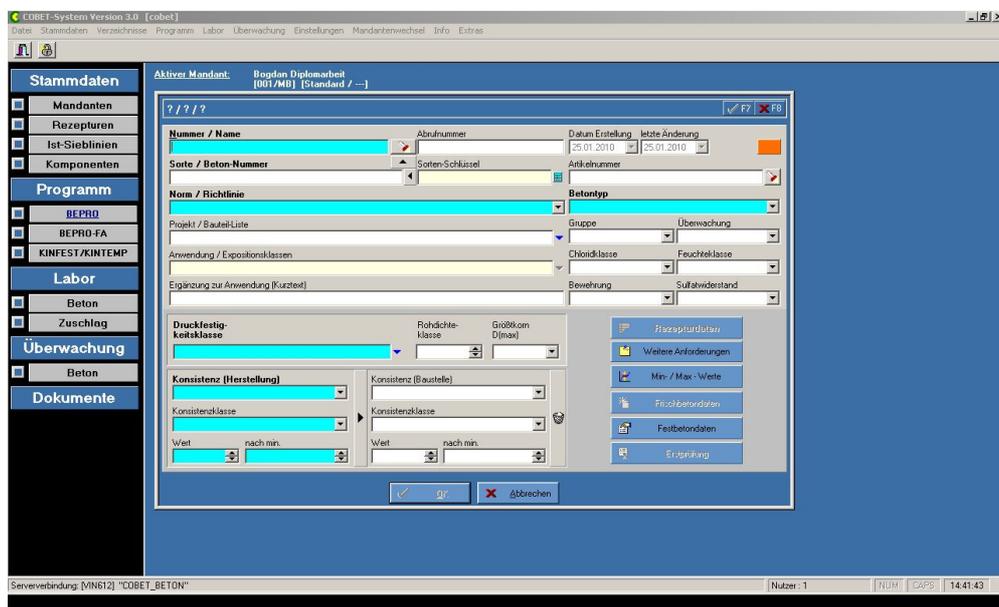


Bild 4.8: Festlegung des Betons mit Bepro

Pflichteingaben sind Nummer (bzw. Name) der Rezeptur, der Normbezug, Druckfestigkeitsklasse und Angaben zur Konsistenz.

Nach Bestätigung der Festlegungen des Betons (OK) können die Rezepturdaten bearbeitet werden (Bild 4.9).

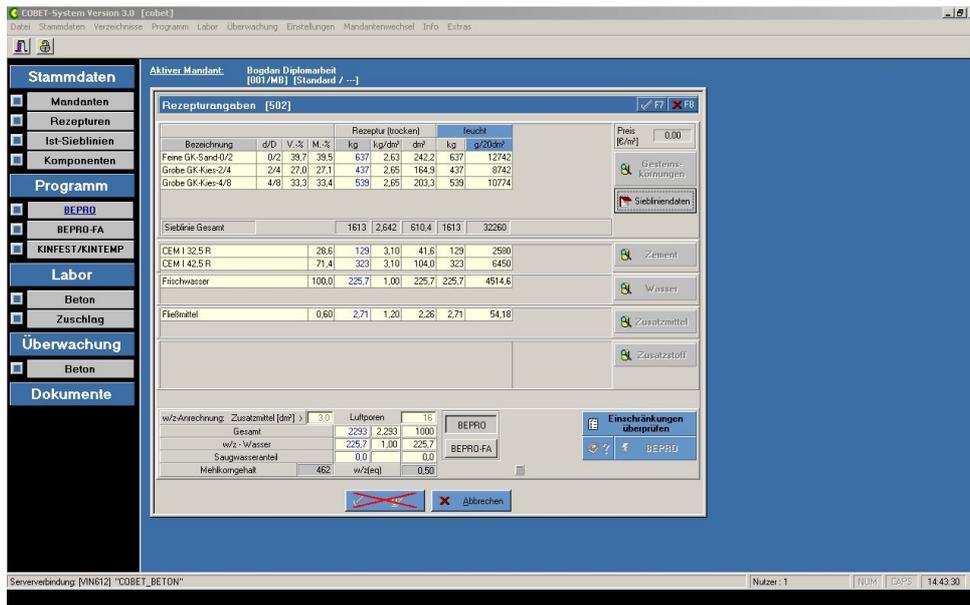


Bild 4.9: Bearbeitung der Rezepturdaten

Programm BEPRO-FA

Mit BEPRO-FA wird mit einer Ausnahme genau wie mit BEPRO gearbeitet. Die Ausnahme besteht darin, dass bei Zusatz von Flugasche (oder Trass) die Menge des Zusatzstoffes je 1 m³ Beton nicht vorgegeben werden muss.

In der Maske Rezepturangaben wird anstelle von BEPRO der Button BEPRO-FA benutzt. Damit wird das Flugasche-Optimierungsprogramm erreicht, dass für den gewählten Beton unter Einhaltung aller normativen Restriktionen die Rezeptur mit dem optimalen Zusatzstoff-Gehalt berechnet (Bild 4.10).



Bild 4.10: Unterschied zwischen BEPRO und BEPRO-FA

Die Flugaschenoptimierung hat die Erreichung der Zielfestigkeit unter optimaler Ausnutzung der Zusatzstoffmengen bei gleichzeitiger Reduzierung des Zementgehaltes also ein optimiertes Zement- / Flugascheverhältnis zum Ziel. Bei bestimmten Expositionsclassen (z.B. XF2 in der ZTV-Ing.) gelten jedoch vordefinierte Restriktionen für dieses Verhältnis, so dass eine Optimierungsrechnung in solchen Fällen nicht mehr durchgeführt werden kann. Das Programm lehnt die Berechnung dieser Rezeptur ab.

In diesen Fällen kann mit folgendem Vorgehen dennoch meist eine Rezepturoptimierung vorgenommen werden. Zuerst wird die Rezeptur ohne Nutzung von BEPOR-FA mit üblichen Komponentenmengen (Zement, Flugasche, ...) unter Verwendung der Expositionsclassen erstellt. Danach in den Min-Max-Werten werden alle aktiven Restriktionen, die COBET aus den Expositionsclassen ermittelt hat, auf Handeingabe umgestellt und anschließend die Expositionsclassen aus der Rezeptur gelöscht. Nach der Optimierung mit BEPRO-FA können die Expositionsclassen reaktiviert und die Min-Max-Werte wieder auf Automatik (keine Handeingabe) umgestellt werden. Mittels "Einschränkungen überprüfen" kann nun die Rezeptur noch einmal auf gesonderte Randbedingungen überprüft werden.

Programm KINTEMP

KINTEMP (Bild 4.11) ist ein Programm zur Abschätzung der Temperaturentwicklung in Betonbauteilen. Als Voraussetzung für KINTEMP-Berechnungen muss ein Mandant mit Rezepturen existieren.

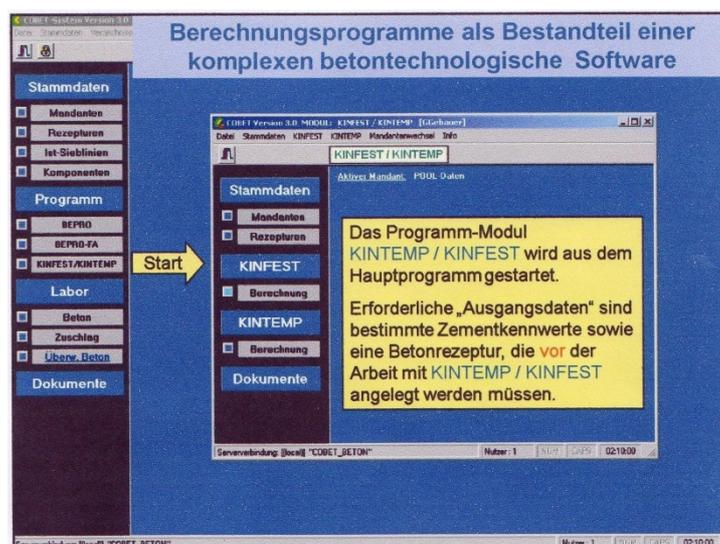


Bild 4.11: Programm KINTEMP

Als Wärmequelle wird die Hydratationswärme des Zementes verwendet (Stammdaten). Bei der Berechnung werden die Rezeptur, die Frischbetontemperatur, die Bauteilgeometrie, der konkrete Bauteilpunkt sowie die Umgebungsbedingungen (Schalung, Lufttemperatur) berücksichtigt. Die Betontemperatur wird kontinuierlich über den gesamten Erhärungszeitraum ausgewiesen.

Grundlagen für die Berechnung sind Angaben zum Hydratationsbeginn sowie zu den 12 h- und 72 h-Werten der **isotherm** gemessenen Hydratationswärme des Zements. Es ist zu beachten, dass die Daten aufgrund der in Österreich meistverwendeten teiladiabatischen Verfahren nicht geeignet sind. Die Messwerte müssen in dem im Bild 4.12 dargestellten Bereich liegen, ansonsten erscheint eine Fehlermeldung.

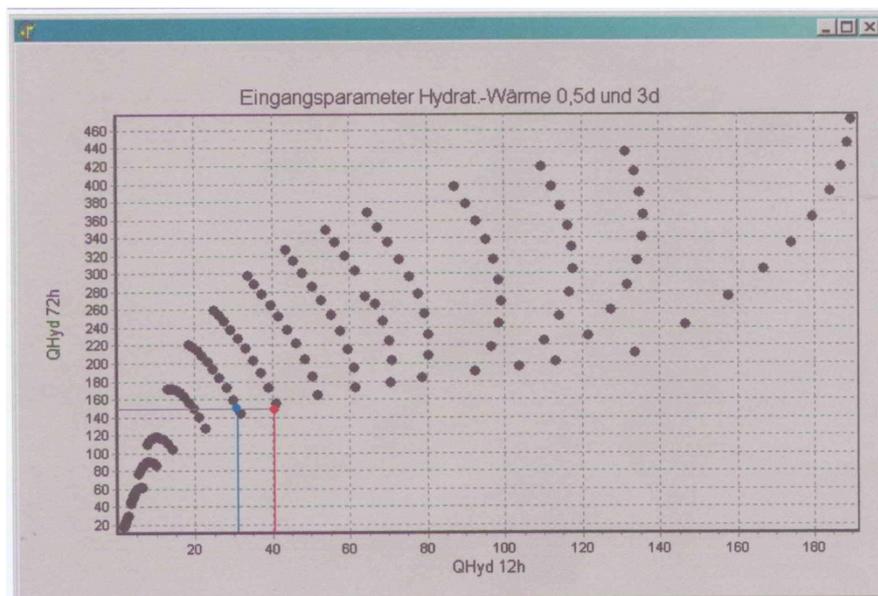


Bild 4.12: Bereich der möglichen Wertepaare für die Hydratationswärme nach 12 h und 72 h

Bilderklärung: Roter Punkt mit $Q_{12h} = 40 \text{ J/g}$ und $Q_{72h} = 150 \text{ J/g}$ liegt knapp außerhalb des möglichen Bereichs. In diesem Fall erscheint eine Fehlermeldung und Berechnung wird abgebrochen.

Von dem Softwarehersteller in den Beschreibungsunterlagen wurden die Orientierungswerte für die isotherme Hydratationswärme von Zementen angegeben.

Tabelle 4.1: Orientierungswerte für die isotherme Hydratationswärme vom Zementen

Orientierungswerte für die (isotherme) Hydratationswärme von Zementen			
Zementart	Erstarrungsbeginn [min]	Hydratationswärme 0,5 d [J/g]	Hydratationswärme 3 d [J/g]
CEM I/II 32,5 R	120	70	250
CEM I/II 42,5 R	100	100	300
CEM I/II 52,5 R	80	130	350
CEM I/II 32,5 N	150	50	220
CEM I/II 42,5 N	120	70	260
CEM I/II 52,5 N	100	90	320
CEM III 32,5 N-LH	240	40	180
CEM III 42,5 N-LH	180	60	200

Entscheidend für die Genauigkeit von Berechnungen der Temperaturentwicklung ist auch das Festlegen von Bauteilparametern. Dies betrifft einerseits die Festlegung des betrachteten Bauteilpunktes, andererseits des Wärmedurchgangskoeffizienten (Bild 4.13).

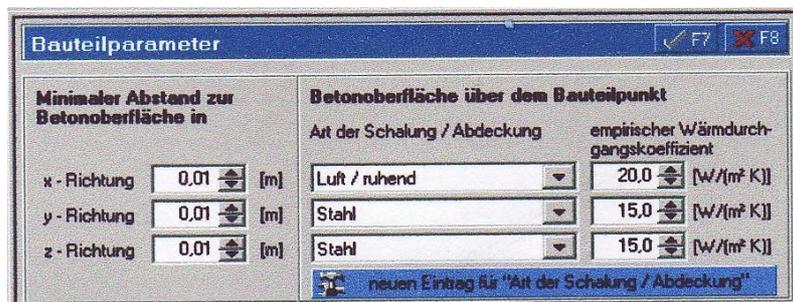


Bild 4.13: Festlegen von Bauteilparametern

Die mit x-, y-, z-Richtung bezifferten Koordinaten bedeuten nicht zwangsläufig, dass man drei im rechten Winkel zueinander betrachtete Richtungen festlegen muss. Zum besseren Verständnis wird dies am Beispiel einer Betonplatte nachfolgend erklärt (Bild 4.14).

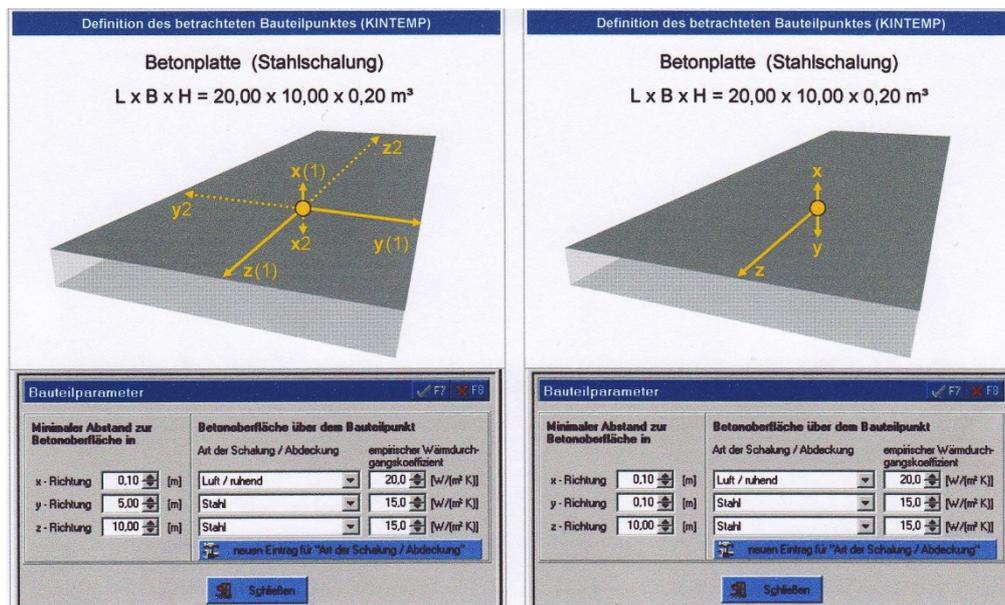


Bild 4.14: Festlegen den Punktkoordinaten

In diesem Fall, geringe Bauteilhöhe im Vergleich zu den Quer- und Längsabmessungen, wäre die Variante 2 zu bevorzugen, da man davon ausgehen kann, dass der größte Wärmeabfluss nach oben (x-Richtung) und unten (y-Richtung) erfolgen wird. In z-Richtung ist ausgehend vom betrachteten Bauteilpunkt ein wesentlich geringerer Wärmeabfluss zu erwarten.

Des Weiteren hat natürlich der Wärmedurchgangskoeffizient einen entscheidenden Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Bauteil. Im Programm KINTEMP sind mittlere Richtwerte (Tabelle 4.2) vorgegeben, die jedoch im konkreten Fall deutlich von den praktischen Verhältnissen abweichen können und angepasst werden müssen.

Tabelle 4.2: Richtwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten

Tabelle 1: Empirische Wärmedurchgangskoeffizienten („Mittlere Richtwerte“ in KINTEMP)									
Schalung Umgebung	Stahl	Holzwerkstoff Kunststoff	Dämmstoff	Erdreich	Plane mit Luftschicht	Plane ohne Luftschicht	Luft ruhend	Luft Wind	adiabatisch
Empirischer Wärmedurchgangskoeff.	15,0 [W/[m²K)]	5,0 [W/[m²K)]	3,0 [W/[m²K)]	5,0 [W/[m²K)]	4,0 [W/[m²K)]	15,0 [W/[m²K)]	20,0 [W/[m²K)]	25,0 [W/[m²K)]	0,0 [W/[m²K)]

Noch ein wesentlicher Punkt, der festgelegt werden muss ist der Verlauf der Umgebungs- bzw. Lufttemperatur (Bild. 4.15). Dafür bietet die Software zwei Möglichkeiten. Übernahme der vordefinierten Zeitreihen oder manuelle Temperatureingabe mit Möglichkeit der Interpolation der Zwischenwerte.

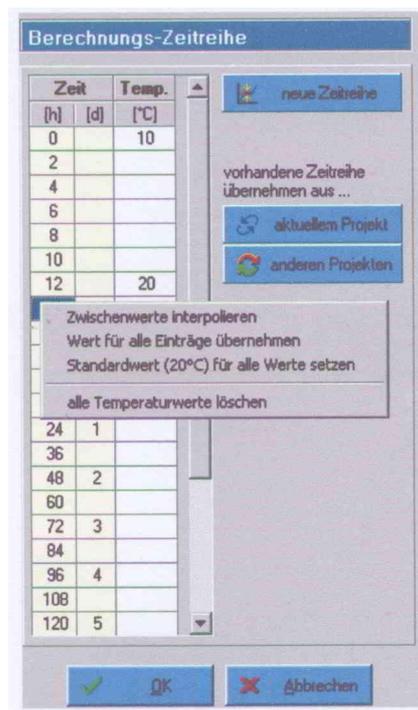


Bild 4.15: Angabe des Verlaufs der Außentemperatur

Die Berechnung der Ergebnisse erfolgt über den Button „Berechnung starten“ und die Anzeige bereits berechneter Ergebnisse mittels Button „Ergebnisse anzeigen“. Es besteht die Möglichkeit bis zu fünf Berechnungen beliebiger Projekte in einer gemeinsamen tabellarischen oder graphischen Darstellung zu vergleichen.

Programm KINFEST

KINFEST ist ein Programm zur Berechnung der Druckfestigkeitsentwicklung in Betonbauteilen in Abhängigkeit von:

- 1) der Rezeptur, speziell der Zementart, des w/z-Wertes und der Zusatzstoffe
- 2) der Temperatur (für bestimmte Bauteilpunkte gemessen, geschätzt oder mittels KINTEMP berechnet)

Darüberhinaus werden die Entwicklung von Zug-, Spaltzug-, und Biegezugfestigkeit sowie des E-Moduls berechnet.

Mit wenigen Ausnahmen (insbesondere natürlich hinsichtlich der berechneten Werte) erfolgt die Parametervorgabe, Berechnung und Auswertung in vergleichbarer Form wie beim Programm KINTEMP. Die Rechenparameter umfassen, im Gegensatz zu KINTEMP, neben den erhärtungsrelevanten Temperatureinflüssen auch eine Charakterisierung der Bindemittelfestigkeiten (Zeitverlauf).

Als Bindemittel-Festigkeit wird die Zementfestigkeit aus den Stammdaten des Zementes für den 2- und 28-Tagewert übernommen. Diese beiden Festigkeitswerte können modifiziert werden, wenn die bearbeitete Betonrezeptur Zusatzstoffe des Typs 2 mit unterschiedlichen wirksamen k-Werten für beide Zeiträume (2 und 28 Tage) enthält. Das ist die äußere Kennzeichnung dafür, dass die zeitabhängige Wirksamkeit dieser Zusatzstoffe bei der internen Rechnung kontinuierlich berücksichtigt wird.

Für die Festigkeitsentwicklung von 0,5 bis zu 28 Tagen werden 6 Varianten angeboten (Bild 4.16). Damit wird den unterschiedlichen Erhärtungsgeschwindigkeiten von Zementen mit gleicher (bzw. ähnlicher) Normfestigkeit nach 2 und 28 Tagen in der Anfangsphase der Erhärtung (< 2 Tage) Rechnung getragen. Neben der mittleren (Vorzugs-) Variante können noch 3 Varianten bei entsprechender Kenntnis über die Frühfestigkeiten der Zemente die anderen Varianten als Grundlage der zu berechnenden Betonfestigkeiten gewählt werden.

Bindemittel-Festigkeiten		Auswahl: <input type="text" value="3"/>					
bei 20°C [N/mm²]		1	2	3	4	5	6
▶ 0,5 d		12,9	11,7	9,2	5,0	1,5	0,5
1 d		24,9	24,7	24,2	23,0	20,1	13,7
2 d		35,5	35,3	35,3	35,4	35,4	35,5
7 d		49,0	48,4	48,3	48,5	48,7	49,0
28 d		58,2	58,1	58,1	58,2	58,1	58,1

Temperatureinfluss auf Erhärtung (Faktor)		
10 °C	<input type="text" value="0,50"/>	<input type="text" value="1,00"/>
20 °C	<input type="text" value="1,00"/>	<input type="text" value="3,50"/>
50 °C	<input type="text" value="3,50"/>	

Bild 4.16: Varianten der Bindemittel-Festigkeiten

Das Bild 4.17 [32] zeigt die Auswirkung der Wahl der Variante 1 (obere Kurve) und Variante 5 (untere Kurve) für die Entwicklung der Festigkeiten eines Zementes der Festigkeitsklasse 42,5 am Beispiel eines Betons C30/37 (Erhärtungstemperatur = 20 °C).

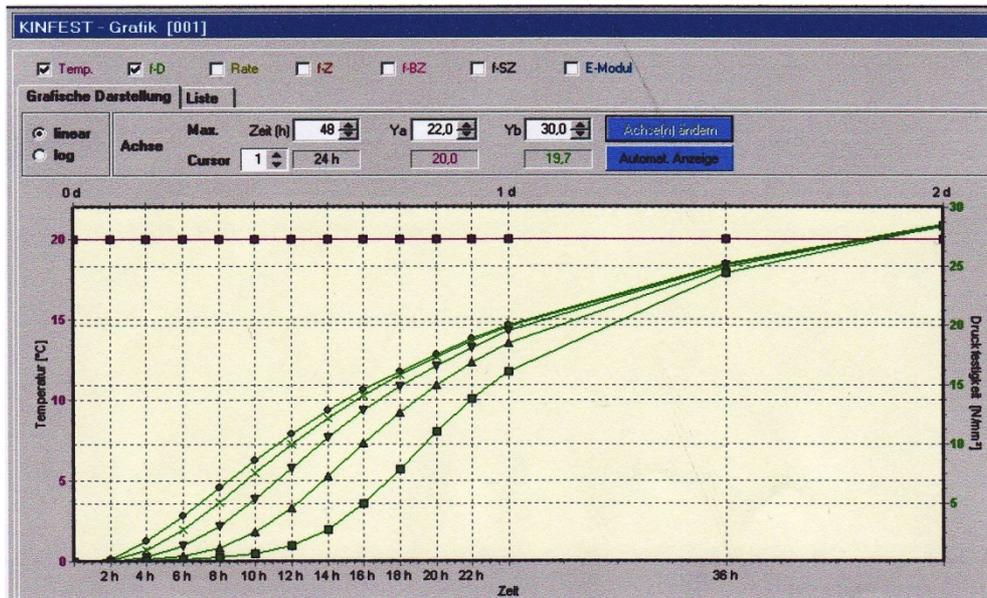


Bild 4.17: Auswirkung der Wahl der Varianten

Der Temperatureinfluss auf die Erhärtung kann bei unterschiedlichen Zementen variieren, das betrifft vor allem Zemente mit Zumahlstoffen. Hohe Zumahlstoffgehalte können z.B. die Erhärtungsgeschwindigkeit bei tiefen Temperaturen verlangsamen. Dieser Einfluss kann beim KINFEST über eine Veränderung der Faktoren berücksichtigt werden, die die Relationen der Erhärtungsgeschwindigkeiten für Temperaturen von 10 °C und 50 °C zur Erhärtungsgeschwindigkeit bei 20 °C angeben. Die Erhärtungsgeschwindigkeit für 20 °C wird durch die Normfestigkeiten des Zementes für 2 und 28 Tage fixiert, infolgedessen ist für 20 °C der Faktor = 1 unveränderlich. Den Einfluss einer Veränderung des Temperaturfaktors zeigt Bild 4.18 [32]. Die Kurven Nr. 2 (Betontemperatur = 10 °C) und Nr. 3 (Betontemperatur anfänglich = 50 °C und nach 12 Stunden absinkend) wurden mit den Standardfaktoren (0,50 für 10 °C und 3,50 für 50 °C) berechnet. Die Kurven Nr. 1 (Betontemperatur = 10 °C) und Nr. 4 (Betontemperatur anfänglich 50 °C, nach 12 Stunden absinkend) wurden mit veränderten Faktoren (0,35 für 10 °C und 4,00 für 50 °C) berechnet. Es wird ersichtlich, dass es für eine genaue Berechnung (z.B. Optimierung einer Wärmebehandlung) durchaus sinnvoll sein kann, die Temperaturabhängigkeit der

Erhärtungsgeschwindigkeit eines bestimmten Zementes genau zu erfassen. KINFEST bietet dazu die Möglichkeit, Simulationsrechnungen auf der Basis schon vorhandener Prüfergebnisse durchzuführen.

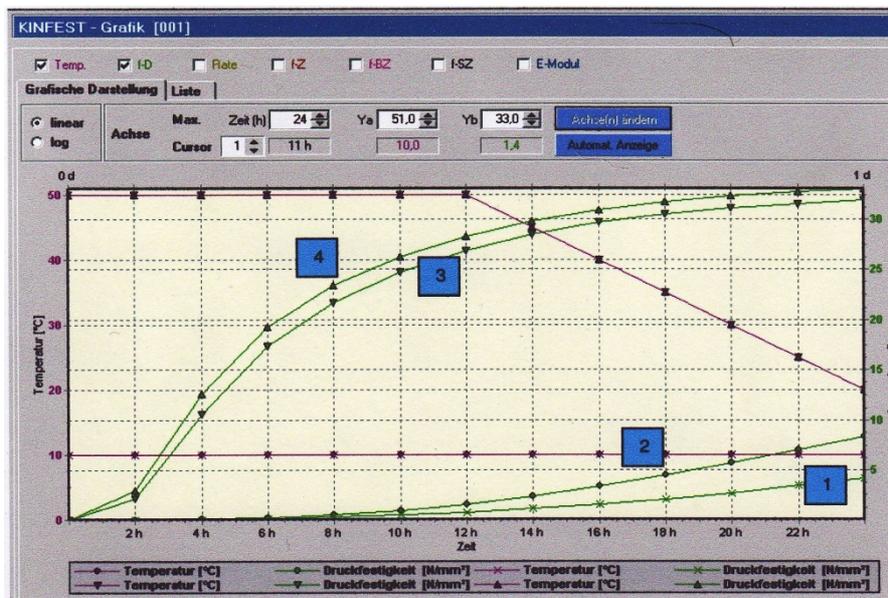


Bild 4.18: Einfluss einer Veränderung des Temperaturfaktors

Wie groß die Temperatúrauswirkung innerhalb der ersten 2 Tage auf Betondruckfestigkeitsverlauf in Anfangsphase ist, zeigt ein Versuch, der von der Firma CSB-Hanse im Jahr 2004 durchgeführt wurde [32]. Für den Versuch wurde C30/37 Beton gleicher Rezeptur verwendet.

- 1) Temperatur durchgehend 5 °C, Druckfestigkeit nach 2d: 12,6 N/mm²
- 2) Temperatur durchgehend 10 °C, Druckfestigkeit nach 2d: 18,1 N/mm²
- 3) Temperatur durchgehend 20 °C, Druckfestigkeit nach 2d: 25,0 N/mm²
- 4) Temperatur bis 12h 40 °C, dann abfallend auf 20 °C, Druckfest. nach 2d: 28,5 N/mm²
- 5) Temperatur bis 12h 60 °C, dann abfallend auf 20 °C, Druckfest. nach 2d: 31,1 N/mm²

Genau wie bei KINTEMP erfolgt die Ergebnisberechnung bei KINFEST nach Eingabe der Eingangsparameter auch über den Button „Berechnung starten“ und es besteht die Möglichkeit einer Einzeldarstellung oder gleichzeitig bis zu fünf Berechnungsdarstellungen.

4.1.2.3 Modul LABOR

Die folgenden Informationen beziehen sich dementsprechend auf alle Labormodule. Abweichungen in Detailfragen werden in den einzelnen Laborbereichen separat beschrieben

COBET kennt drei Hierarchie-Ebenen für die Erfassung der Messdaten.

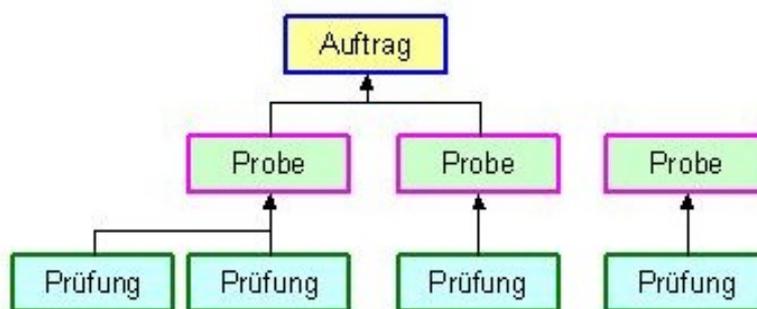


Bild 4.19: Aufbauschema des Moduls LABOR

An unterster Position befindet sich die als Prüfung bezeichnete Ebene. Jede Prüfung ermöglicht die Erfassung spezialisierter Messergebnisse unter einem definierten Gesichtspunkt und unter Berücksichtigung einer weiteren Auswertung und liefert jeweils ein Prüfergebnis (als einzelnen Wert oder auch Werteblock). Weitere Informationen finden sich in der Beschreibung der Frischbetondaten der Frisch-/Festbeton-Prüfung. Die der Prüfung übergeordnete Ebene wird im COBET-System als Probe bezeichnet. Hinsichtlich der inhaltlichen Bedeutung könnte man auch die Bezeichnung „Probenahme“ verwenden. In der Probe werden die bei der Probenahme relevanten Grundinformationen (Lieferschein-Nr., Datumsangaben zu Herstellung, Probenahme, ..., Witterungsbedingungen, etc.) erfasst, die für alle Prüfungen gelten, die mit dem dabei entnommenen Prüfmaterial ausgeführt werden. Jeder Probe können beliebig Prüfungen (sowohl verschiedener Art als auch Anzahl) zugeordnet werden.

Beispiel: Mit einer aus einem Lieferfahrzeug entnommenen Betonmenge (Probe) können verschiedene Probekörper für die Erfassung der Biegezug-, Spaltzug- und Druckfestigkeit gewonnen, sowie Daten für die Konsistenz ermittelt werden.

Einzelne Proben können bereits als Grundgerüst für die Datenerfassung verwendet werden, sind jedoch für weitergehende Auswertungen (z.B. Konformität) nicht nutzbar. Die Zusammenfassung von Proben für eine gemeinsame Auswertung erfolgt durch die oberste Hierarchie-Ebene, die als Auftrag bezeichnet wird. Mit dem Verwaltungsinstrument Auftrag werden die Proben organisiert und für die Auswertung zusammengefasst oder auch getrennt.

Der Softwarehersteller bietet insgesamt fünf Labormodule (Gesteinskörnung, Beton, Erdbau, Mörtel und Estrich). Die verwendete Version war jedoch nur mit zwei ausgestattet (Gesteinskörnung und Beton).

Labormodul Beton

Das Labormodul "Beton" dient der Erfassung und Verwaltung von Prüfergebnissen für Beton (Rezepturen bzw. Sorten). Derzeit stehen die Prüfungen "Frisch-/Festbeton" (Konsistenz, Luftgehalt, Druckfestigkeit) sowie "Biegezugfestigkeit" und "Spaltzugfestigkeit" sowie "Wasserundurchlässigkeit" zur Verfügung.

Ergänzend kommt die Erfassung / Prüfung des Wasserbindemittelwertes als eigenständige bzw. untergeordnete Prüfung des Frisch-/Festbetons hinzu.



Bild 4.20: Prüfungen im Labormodul BETON

Für die korrekte Funktion der Prüfmodule sind einige zusätzliche Informationen zu den Prüfkörpern erforderlich, die unter den Einstellungen bei den Prüfkörperdaten eingegeben werden müssen.

Labormodul Gesteinskörnung

Die verwendete Softwareversion nutzt für Gesteinskörnung noch immer den Begriff Zuschlagstoff, jedoch in den Beschreibungsunterlagen wurde dies schon umgestellt.



Bild 4.21: Labormodul Gesteinskörnung

Das Labormodul "Zuschlag" dient der Erfassung und Verwaltung von Prüfergebnissen für Gesteinskörnungen (Zuschläge). Derzeit stehen die Prüfungen "Eigenschaften" (Frost-Tausalz-Beständigkeit, etc.), "Kornkennwerte" (Dichten, Wasseraufnahme, Feuchten, ...) und "Siebanalyse" (Kornverteilung, Körnungsziffer, ...) bzw. als modifizierte Version "Siebanalyse II" zur Verfügung. Optional ist das Prüfmodul "Alkaliprüfung" verfügbar.

Unter Labor Zuschlagstoffe sind in der oberen Taskleiste und der linken Buttonleiste im Wesentlichen die gleichen Funktionen erreichbar. Lediglich die Menüpunkte Einstellungen, Mandantenwechsel und Info sind nur über das Hauptmenü erreichbar.

4.1.2.4 Modul ÜBERWACHUNG

Das Modul wird aus dem Hauptprogramm über den Button *Überwachung Beton* geladen.

Der Modul beinhaltet den Konformitäts-Nachweis und die Annahme-Prüfung (auch Identitätsnachweis) von Beton nach Eigenschaften gemäß DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 sowie DIN 1045-3. Prinzipiell ist damit auch der vom Verwender des Betons zu erbringende Nachweis der Konformität der Eigenschaften für Beton nach Zusammensetzung möglich, der identisch mit dem Konformitätsnachweis für Beton nach Eigenschaften geführt wird. Der Komplexität der Nachweisführungen wird im Programm bis ins Detail Rechnung getragen, ohne dass wegen des großen Umfangs der verzweigten normativen Festlegungen die dementsprechenden Einzelheiten und Möglichkeiten des Programms hier ausführlich diskutiert werden. Die Details erschließen sich zwanglos beim Umgang mit dem Programm. Die für die Auswertung erforderlichen Prüfergebnisse werden aufgenommen im Modul *Labor Beton*. Dort werden über die Buttons Auftrag und Probe die Programmteile zur Organisation und Aufnahme der Prüfdaten erreicht.

Die Auswertung von Annahme oder Konformität erfolgt für eine bestimmte Rezeptur (bestimmte Betonzusammensetzung). Proben bzw. deren Ergebnisse können ausgewertet werden, wenn zugehörige Rezepturen in den Stammdaten angelegt sind (und bei den Proben zugeordnet werden). Die Auswertung kann auch für eine in den Stammdaten angelegte Betonsorte erfolgen. Eine Sorte enthält nur Angaben zu den Betoneigenschaften, nicht aber zur Zusammensetzung des Betons. Einer Sorte können eine oder mehrere Rezepturen zugeordnet werden. Im letzteren Fall ist die jeweilige Gültigkeitsdauer anzugeben. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass begrenzte Veränderungen bei der Zusammensetzung von Rezepturen zulässig sind, die nicht eine neue Nachweisführung erfordern.

Die Produktionsmengen bzw. Liefermengen des Betons bestimmen beim Konformitätsnachweis bzw. der Annahmeprüfung die Probenahme (Probezahl-Soll). Erforderlich ist der Mengeneintrag mit Datum für den entsprechenden Auftrag und die entsprechende Rezeptur. Zur besseren Übersichtlichkeit kann die Anzeige auf einen definierten Zeitraum beschränkt werden. Verfügbare Zeiten sind 1, 3 und 6 Monate bzw. 1 Jahr (Bild 4.22)

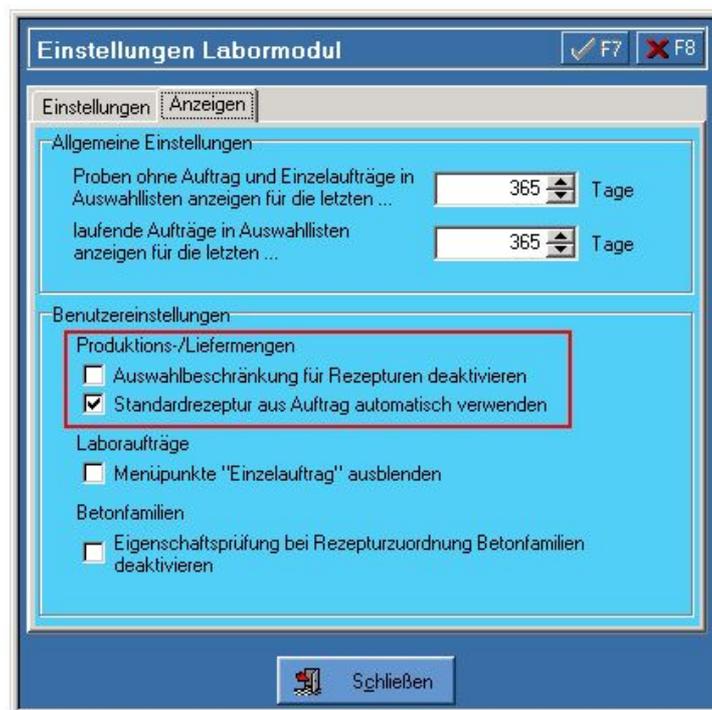


Bild 4.22: Auswahl der Aufträge nach Zeitraum

Um dem Anwender ein Hilfsmittel für das Verständnis der verwendeten Begriffe und Strukturen zu geben, werden an dieser Stelle einige Begriffe näher erläutert.

Nachweiszeitraum

Gemäß EN 206 festgelegter Zeitraum für eine Serie von Prüfergebnissen (3er-Serie bei Erstherstellung bzw. 15er-Serie bei stetiger Herstellung)

Auswertezeitraum

Die getrennte Betrachtung einzelner Serien ist in den meisten Fällen (insbesondere bei der Erstherstellung) ineffektiv. COBET bietet deshalb die Möglichkeit, mehrere Serien (Nachweiszeiträume) als geschlossene Einheit darzustellen. Der Zeitraum kann dabei frei gewählt werden, sollte jedoch jeweils einen oder mehrere vollständige Nachweiszeiträume umfassen, da Teile von Serien nicht normgemäß behandelt (ein solches Vorgehen ist in der Norm nicht spezifiziert) und so diese Daten nicht vollständig berücksichtigt werden können.

4.2 Messgeräte

In der Einleitung dieser Arbeit wurde auch das moderne Messgerät GSV-4GPRS erwähnt. An dieser Stelle werden dieses sowie die anderen bei den Versuchen verwendeten Messgeräte, beschrieben. Dabei geht es vor allem um die Aufnahme und Übertragung von Messdaten auf der Baustelle ins Labor oder zur Bauleitung.

4.2.1 Messgerät GSV-4GPRS



Bild 4.23: Messgerät GSV-4GPRS

Das Messgerät stellt im Prinzip eine erweiterte Version des einfachen Datenloggers dar. Es besitzt die Möglichkeit der Datenfernübertragung und besteht aus zwei Hauptkomponenten (Modem und Messverstärker). Der Messverstärker wird für die Umformung der analogen Messsignale in digitale Signale verwendet. Das Modem ist verantwortlich für das Speichern (Datalogging) und für die Übertragung der digitalen Messdaten an einen Server über eine GPRS Verbindung.

Das Gerät verfügt über 8 Messkanäle zur Auswertung von Sensoren (Bild 4.24) und über besondere Eigenschaften der Konfigurierbarkeit für verschiedene Sensortypen, wie z.B.:

- 1) Thermoelemente Typ-K
- 2) Dehnungsmessstreifen
- 3) PT 1000 Sensoren
- 4) Kraftsensoren, Wägezellen, Drehmomentsensoren
- 5) Beschleunigungssensoren

Zusätzlich verfügt es über einen Datenspeicher für ca. 50000 Messwerte. Die Datenerfassung ist konfigurierbar für die Erfassung mit wenigen Messwerten pro Tag bis zur Messung mit 125 Messwerten pro Sekunde gleichzeitig für alle 8 Kanäle [33].



Bild 4.24: Innenbild des Geräts

In dem Gehäuse ist ein Akku mit einer Kapazität von 2,6 Ah bis 12 Ah integriert und ermöglicht eine Laufzeit von ca. 3 bis 12 Wochen je nach der Messintensivität. Ein Laderegler ist auch vorhanden, so dass die Laufzeit mit Hilfe eines kleinen Solarpanels auf mehrere Jahre erweitert werden kann.

Die Übertragung der Messdaten erfolgt über eine GPRS Schnittstelle. Dies ermöglicht einen Tarif mit Abrechnung nach Datenvolumen und erlaubt die Übertragung von Messdaten mit einer hohen Bandbreite. Zum Empfang der Messdaten wird ein Server mit einer festen IP Adresse benötigt. Die Server-Software kommuniziert mit dem Modem und speichert die Daten in einer Datei, oder leitet sie an einen entfernten

Server weiter. Außerdem ist es sowohl möglich, die Messwerte jederzeit im Internet abzurufen und das Senden von SMS Nachrichten.

Die Steuerung des Gerätes ist sehr einfach auch fern über Internet und 6 verschiedene Kommandos möglich. Für eine genauere Beschreibung wird an dieser Stelle an die mit dem Gerät mitgelieferte Anweisung hingewiesen.

4.2.2 Datenlogger TESTO 177-T4

In der Vorbereitungsphase dieser Diplomarbeit war geplant neben der COBET-Software auch das oben beschriebenes Messgerät GSV-4GPRS bei der Betontemperaturbestimmung zu testen. Leider war der Versuchsort nicht ausreichend mit dem GSM-Signal abgedeckt und der Einsatz des GSV-4GPRS Messgeräts und eine Datenfernübertragung waren nicht möglich. Alle Messungen wurden dann mit mehreren Datenloggern TESTO 177-T4 durchgeführt (Bild 4.25).



Bild 4.25: Datenlogger TESTO 177-T4

Der TESTO 177-T4 ist ein 4-Kanal Temperatur Datenlogger mit einer Auflösung von 0,1 °C. Er liefert vor Ort einen schnellen Überblick über den aktuellen Messwert, den zuletzt gespeicherten Wert, die Max- und Min-Werte und die Anzahl der Grenzüberschreitungen. Ausschalten, Einstellungen sowie das Ablesen von Messdaten

sind aber nur durch Anschluss an einen Computer möglich. Er besitzt eine Speicherkapazität für 48000 Messwerte und hat einen Messbereich je nach Messwertaufnehmertyp von -200°C bis 1000°C . Die Datenerfassung ist konfigurierbar für die Erfassung mit einer Messung pro Tag bis zu einer Messintensität alle drei Sekunden.

5. Versuchsdurchführung und Interpretation

Wie zuvor im zweiten Kapitel beschrieben, hat der Betontemperaturverlauf bedeutende Auswirkungen auf die Betonqualität. Um einen Beitrag zur Abschätzung der Temperaturentwicklung zu erbringen und den Einfluss unterschiedlicher Faktoren näher darzustellen, waren mehrere Versuche erforderlich. Ziel der Versuche ist es, an einem Bauteil die gemessene Betontemperatur mit den Abschätzungen der Temperaturentwicklungen nach ON-Regel 23333 und mit Hilfe der COBET Software sowie der Faustformeln aus Kapitel 3.3 zu vergleichen.

5.1 Messung der Temperaturentwicklung

5.1.1 Versuchsstandort

Der Versuchsstandort liegt in Serbien ca. 40km nördlich von Belgrad (Bild 5.1) bei der Ortschaft „Beska“.

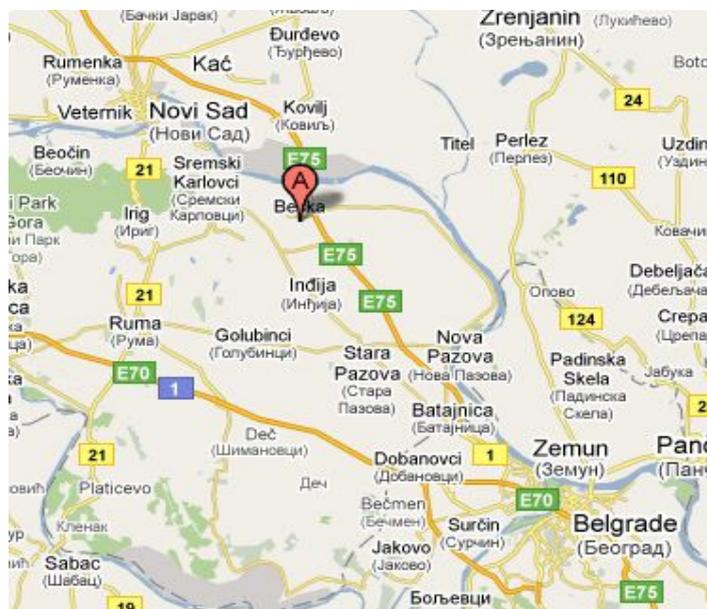


Bild 5.1: Versuchsstandort

Innerhalb des Ausbaus der Autobahnnetze in Serbien wird bei der Ortschaft Beska neben der bestehenden die sogenannte „Neue Beska Brücke“ gebaut (Bild 5.2). Die Brücke über die Donau ist 2250 m lang, hat eine Spannweite von 210 m und gehört mit diesen Maßen zu den größten Betonbrücken über der Donau.



Bild 5.2: Baustelle

5.1.2 Betonherstellung und Betonrezeptur

Auf der Baustelle ist für die Betonherstellung eine mobile vollautomatische Betonmischanlage installiert (Bild 5.3).



Bild 5.3: Mobile Betonmischanlage EUROMIX 2000

Die Anlage EUROMIX 2000 hat einen Doppelwellen-Chargenmischer mit 2,25 m³ Volumen und eine theoretische Frischbetonleistung von 104 m³/h. Die Steuerung sowie Kontrolle der Anlage und der Betonrezepturen findet vollautomatisch über Computer statt.

Innerhalb des Projekts werden für unterschiedliche Bauteile verschiedene Betonrezepturen verwendet. Der Versuch wurde am Beton MB 45 (Bezeichnung nach serbischer Norm) durchgeführt, mit folgender Zusammensetzung (Tabelle 5.1):

Tabelle 5.1: Zusammensetzung für 1m³ Beton MB 45

Zement	Lafarge Beocin, CEM II A-M (S-L) 42,5 R	420 kg
Gesteinskörnung	Natürliche Gesteinskörnung - 3 Fraktionen	1767 kg
Zusatzmittel	SIKA - Viscocrete 3077 ca. 0,35%	1,7 kg
Wasser	w/z = 0,45	190 kg

Wie aus der Tabelle 5.1 sichtbar ist, ist MB 45 ein Beton mit drei Fraktionen. Die nächste Tabelle (5.2) zeigt das Verhältnis zwischen den einzelnen Fraktionen. Siebanalyse der Fraktionen wurde auch durchgeführt und ist im Kapitel 5.2 Temperaturbestimmung mittels COBET-Software dargestellt.

Tabelle 5.2 Verhältnis der einzelnen Fraktionen im Beton MB 45

Nr.	Bezeichnung	Masse	
		%	kg
1	0/4	40	707
2	4/8	23	406
3	8/16	37	654
Gesamt:		100	1767

5.1.3 Messvorbereitungen

Die Brückentragkonstruktion (Bild 5.4) wird in zwei Phasen hergestellt. Zuerst wird die untere u-förmige Platte betoniert und dann nach der Betonerhärtung die obere Platte geschalt und betoniert (Bild 5.5).

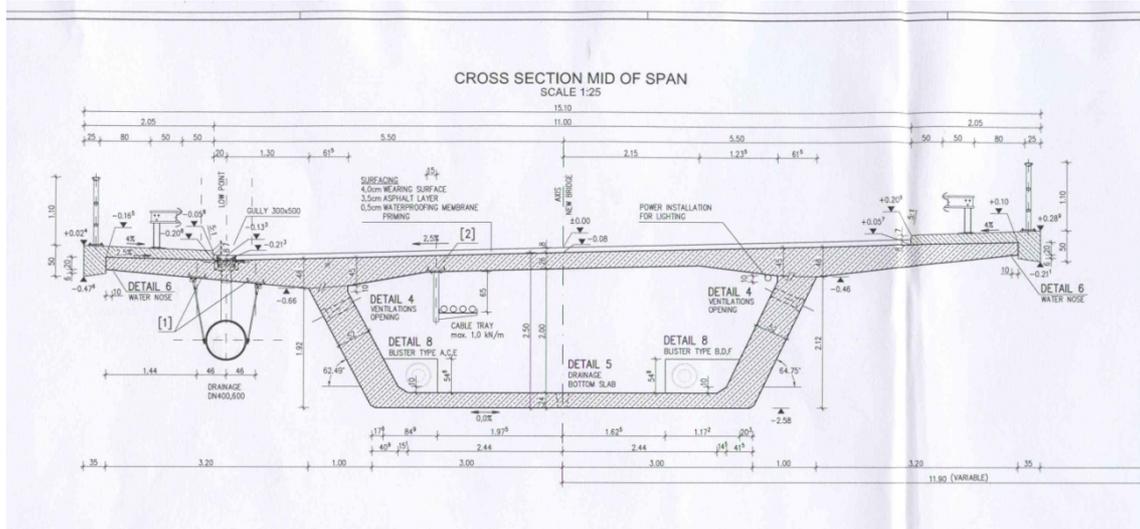


Bild 5.4: Querschnitt der Brückentragkonstruktion



Bild 5.5: Schalung der obere Platte nach Fertigstellung der untere Platte

Die Temperaturmessung wurde in der oberen Platte durchgeführt. Vor Beginn der Betonierarbeiten wurden in die Schalung Temperaturfühler eingebaut, um während der

Versuchsdauer die Temperaturverteilung zu messen. Insgesamt wurden sieben Temperaturfühler in unterschiedlicher Position angeordnet (Bild 5.6). Um die genau vorgesehene Position während des Betoneinbaus zu behalten, wurden die Temperaturfühler mit Kabelbindern an der Bewehrung befestigt, jedoch mit den Sensoren frei an der Oberfläche liegend. Die genaue Entfernung der einzelnen Temperaturfühler von den Betonkanten ist später in der Tabelle 5.3 dargestellt.

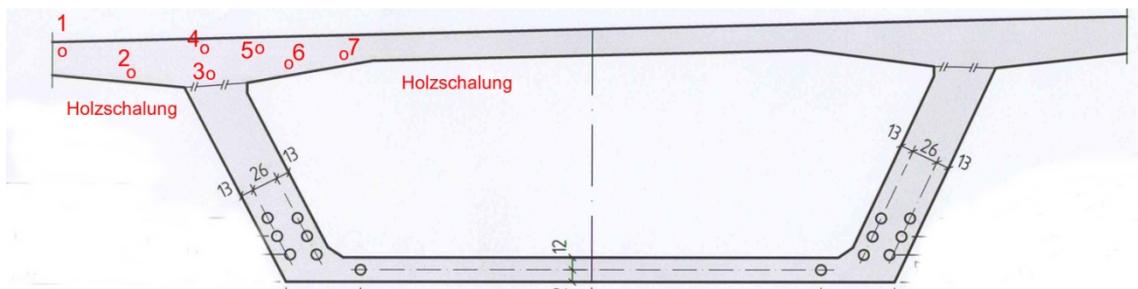


Bild 5,6: Positionierung der Temperaturfühler



Bild 5.7: Einbau der Temperaturfühler

Ein weiterer Temperaturfühler (Nr. 8) am Bauplatz maß die Außentemperatur. Dieser war im Schatten angebracht und vor Regen geschützt.

5.1.4 Ergebnis

Die Entfernung zwischen Betonmischanlage und Einbauort betrug ca. 500 m. Der Betontransport erfolgte mit den Betonmischer und der Einbau mit zwei Betonpumpen (Bild 5.8).



Bild 5.8: Betontransport und Einbau

Die Messung der Temperatur erfolgte mit zwei Datenloggern (Kapitel 4.2.2) in einem Intervall von 15 Minuten (Bild 5.9).



Bild 5.9: Betontemperaturmessung mit Datenlogger TESTO 177-T4

Bild 5.10 zeigt den Temperaturverlauf in der Betonplatte. Der Zeitpunkt 0 entspricht dem Betoniertermin um 16:45 Uhr.

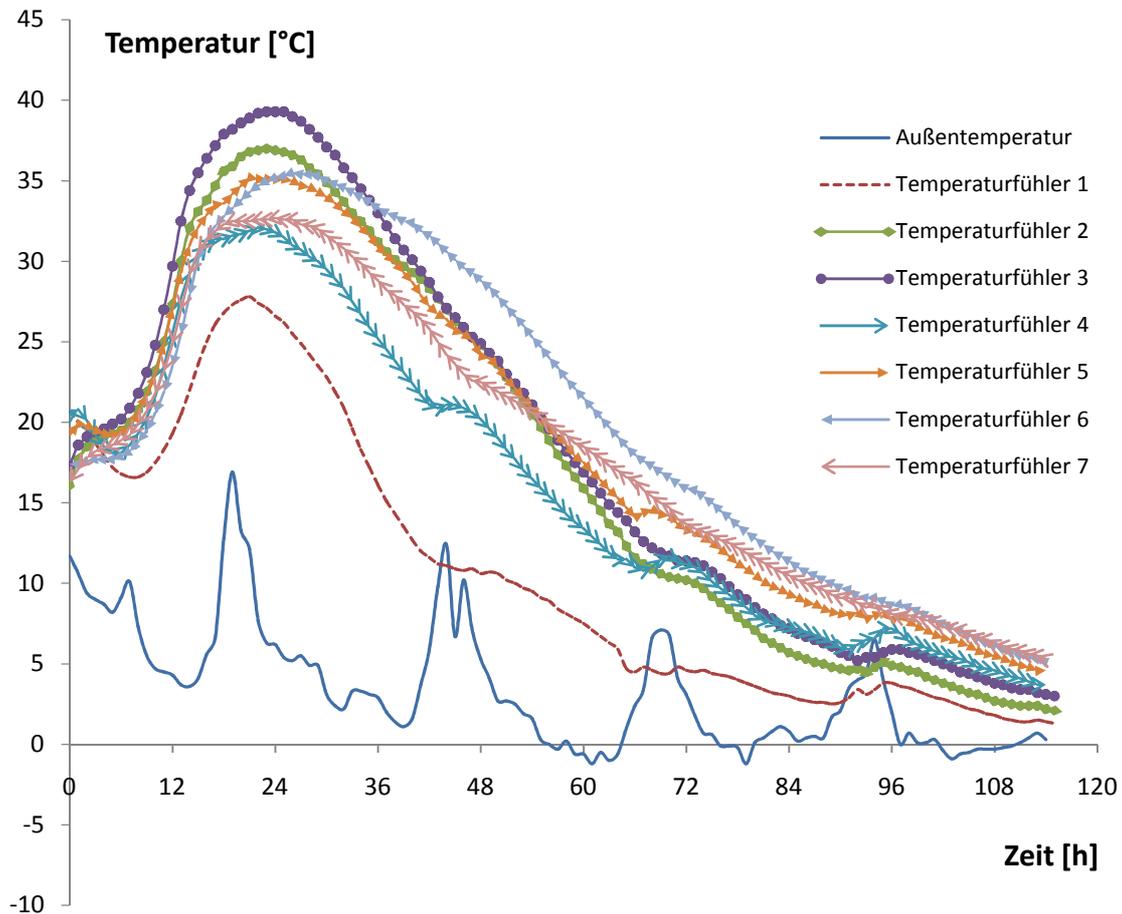


Bild 5.10: Temperaturverlauf der Betonplatte

Nach dem Einbringen des Frischbetons in die Schalung ist bei den Temperaturfühlern Nummer 1, 4 und 5 ein leichter Abfall der Betontemperatur zu erkennen. Dies lässt sich auf eine etwas höhere Frischbetontemperatur (siehe Tabelle 5.3) und auf die relativ niedrige Außentemperatur zurückführen. Die Außentemperatur bewegte sich während der ersten 110 Stunden zwischen min. -1,2 °C und max. 16,9 °C.

Vergleicht man die Position der Temperaturfühler mit der maximal erreichten Temperatur, ist deutlich der Einfluss der Bauteildicke und der Lage der Temperaturfühler auf die maximale Temperatur zu erkennen. Nach Erreichen der maximalen Bauteiltemperatur zeigte sich bei allen Temperaturfühlern ein konstanter

Temperaturabfall, welcher durch die abfließende Hydratationswärme entsteht. Nach knapp 4 Tagen (94 Stunden) zeigte sich noch bei einigen Temperaturfühlern ein kleiner kurzer Anstieg der Temperatur, welcher auf die äußeren Witterungsbedingungen zurückzuführen war. Durch den Außentemperaturanstieg und die Sonneneinstrahlung erwärmte sich die Betonplatte in der Nähe der Oberfläche stärker als in der Bauteilmitte und an der Unterseite. Ab dem fünften Tag (120 Stunden) stellte sich in der Betonplatte annähernd die Außentemperatur ein. Zu diesem Zeitpunkt kann man davon ausgehen, dass der Hydratationsvorgang fast zu Gänze abgeschlossen ist.

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Messergebnisse

Nummer der Temperaturfühler	Entfernung von der Betonoberkante (Luftseite) [cm]	Entfernung von der Betonunterkante (Holzschalung) [cm]	Bauteildicke an der Meßstelle [cm]	Frischbeton-temperatur [°C]	Max. gemessene Betontemperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]
TF 1	8	18	26	20,7	27,8	21
TF 2	30	8	38	16,1	37,0	21,5
TF 3	38	8	46	17,3	39,4	23
TF 4	10	36	46	20,5	32,1	22
TF 5	13	25	38	19,2	35,2	21
TF 6	24	8	32	17,4	35,5	26
TF 7	21	7	28	16,3	32,7	23,5

Anmerkung: Zeitpunkt der max. Temperatur wurde auf halbe Stunde gerundet

Im Folgenden wird die Vorgangsweise mit den unterschiedlichen Temperaturabschätzungsmethoden beschrieben und dann am Ende des fünften Kapitels eine Gegenüberstellung der abgeschätzten mit den gemessenen Werten dargestellt.

5.2 Temperaturbestimmung mit COBET-Software

5.2.1 Eingangsparmeter

Für die Berechnung der Temperaturentwicklung mit der Software sind zuerst einige Vorversuche erforderlich, um die Eigenschaften der Betonkomponenten festzustellen und aufgrund derer die Betonrezeptur festzulegen.

Gesteinskörnung

Neben allgemeinen Angaben, wie Bezeichnung, Art der Gesteinskörnung, minimale und maximale Korngröße usw. braucht die Software noch eine Siebanalyse und die Dichte der Gesteinskörnung. Auf der Baustelle wurde ein kleines Labor installiert, um die Betonqualität ständig zu kontrollieren. In diesem Labor wurde die Siebanalyse durchgeführt.

Die Gesteinskörnungen auf der Baustelle sind nach den Korngruppen getrennt und in den Boxen gelagert (Bild 5.11). Hier wurden auch Siebproben nach ÖNORM EN 933-1 entnommen.



Bild 5.11: Lagerung der Gesteinskörnung

Nach der Probentrocknung wurde die Siebung durchgeführt (Bild 5.12). Von jeder Korngruppe (0/4, 4/8, 8/16) wurden vier Siebungen gemacht und daraus die Summe gebildet. Siebergebnisse sind im Bild 5.13. dargestellt.



Bild 5.13: Siebung

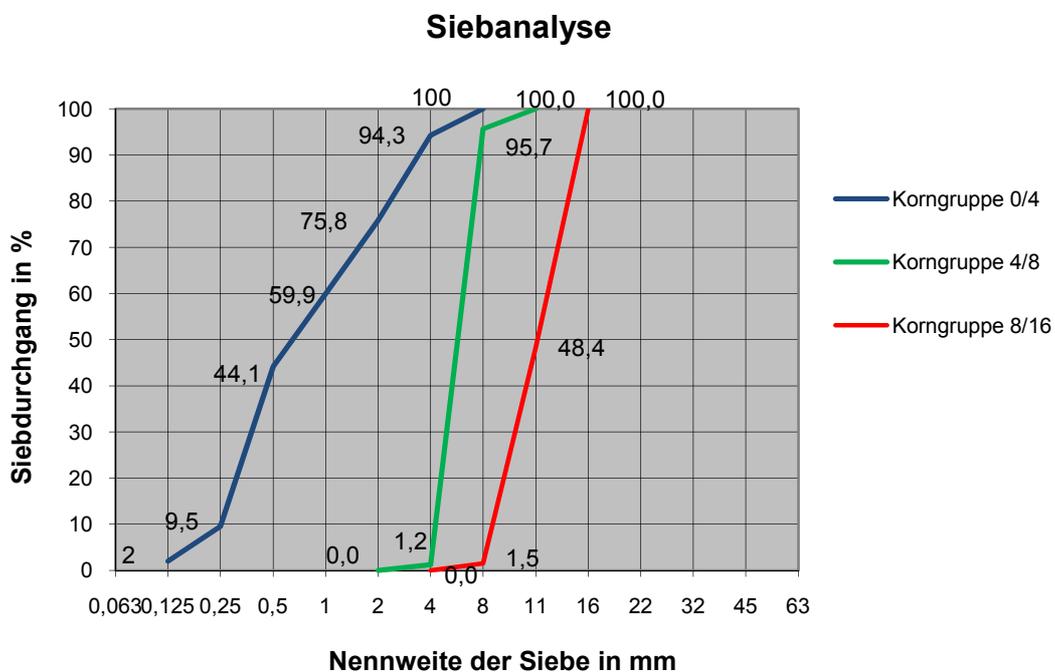


Bild 5.13: Sieblinien einzelner Korngruppen

Die Dichte der Gesteinskörnung ($2,65 \text{ kg/dm}^3$) wurde nicht im Labor bestimmt, sondern die Ergebnisse wurden vom Kieswerk übernommen.

Zement

Um die Hydratationswärmeentwicklung berechnen zu können, verlangt die Software beim Anlegen eines neuen Zementes zumindest die Angabe folgender Daten: Name/Nummer, Zementbezeichnung, Dichte, Zementfestigkeit nach 2 Tagen und 28 Tagen, Erstarrungsbeginn und Hydratationswärmeentwicklung nach 0,5 Tagen und 3 Tagen.

Die Zementanalyse wird nicht im Labor auf der Baustelle gemacht, sondern Zementproben werden regelmäßig zur akkreditierten Prüf- und Überwachungsstelle für Baustoffe CPL in Novi Sad geschickt. Die Daten wie Zementdichte, Zementfestigkeit nach 2 Tagen und 28 Tagen und der Erstarrungsbeginn wurden aus dem CPL-Prüfbericht genommen.

Da für die Software ausschließlich die Daten über Zementhydratationswärmeentwicklung nach isothermen Verfahren erforderlich sind, wurden bei der Berechnung Orientierungswerte aus Tabelle 4.1 (Kapitel 4.1.2.2), die der Softwarehersteller anbot, verwendet.

Wasser

Die Software verlangt eine Entscheidung, ob sich um Frisch- oder Restwasser handelt. Je nachdem ist erforderlich die Wasserdichte anzugeben und im Fall des Restwassers auch den Anteil der Feststoffe. In der Berechnung wurde angenommen, dass es sich um Frischwasser mit einer Dichte von 1 kg/dm^3 handelt.

Zusatzmittel

Bei den Zusatzmitteln verlangt die Software mindestens die Angabe der Art des Zusatzmittels (Verflüssiger, Fließmittel, Luftporenbilder, Verzögerer, Beschleuniger, Einpresshilfen, Stabilisierer) und der Dichte des Zusatzmittels. Die Daten wurden dem Sika-Katalog entnommen.

5.2.2 Bestimmung der Betonrezeptur

Bevor man mit der Bestimmung der Betonrezeptur beginnen kann, ist noch die Festlegung der IST-Sieblinie erforderlich. Die IST-Sieblinie stellt im Prinzip die gemeinsame Sieblinie aller verwendeten Korngruppen bei der Betonrezeptur dar. Die IST-Sieblinie (Bild 5.14) wurde aufgrund der Daten aus Tabelle 5.2, Kapitel 5.2.1 hergestellt.

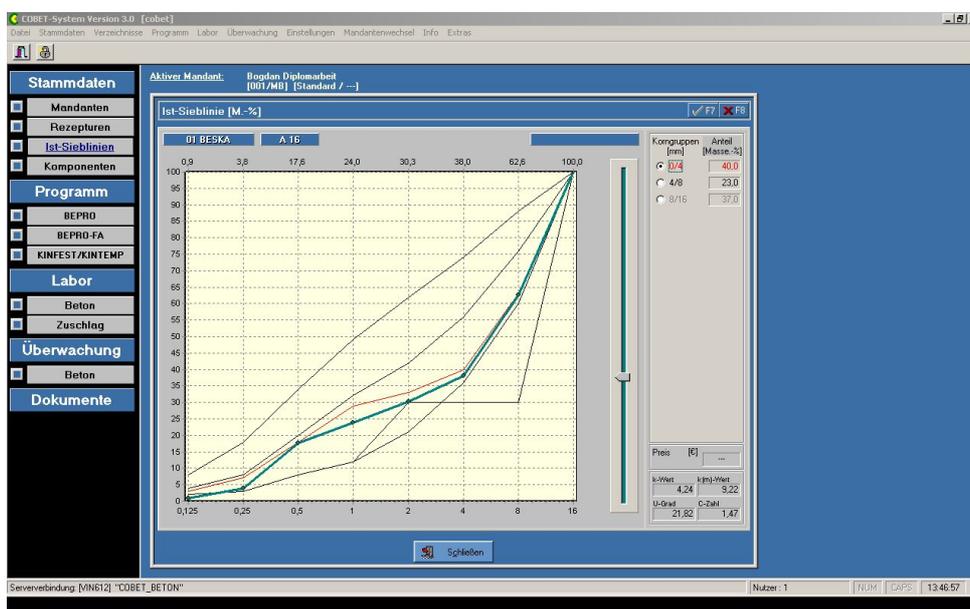


Bild 5.14: IST-Sieblinie der Betonrezeptur MB 45

Um eine neue Betonrezeptur anzugeben, bietet die Software zwei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit ist die Berechnung mit dem BEPRO Programm. Durch die Auswahl der Betonkomponenten und der gewünschten Betondruckfestigkeit (Zielfestigkeit) rechnet das Programm selbst die Betonrezeptur bzw. die Menge der einzelnen Komponenten aus. Die zweite Möglichkeit ist die manuelle Eingabe den der Mengen einzelner Betonkomponenten. Da bei diesem Versuch die Betonrezeptur schon vorhanden war, wurde die zweite Variante genommen und die Betonrezeptur aufgrund der Daten aus der Tabelle 5.1 hergestellt.

5.2.3 Ergebnisse

Für die Berechnung sind noch drei Parameter erforderlich, der Verlauf der Außentemperatur, der Abstand der Temperaturfühler zur Betonoberfläche und die Wärmeleitfähigkeit der angrenzenden Schichten. Der Außentemperaturverlauf wurde der Messung (Bild 5.10) entnommen und die Lage der Temperaturfühler aus Tabelle 5.3. Für die Wärmeleitfähigkeit der angrenzenden Schichten wurden die in der Software vorprogrammierten Werte genommen, z.B. Luft/ruhend = $20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, Luft/Wind = $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Holzwerkstoff/Kunststoff = $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$, usw.

Die Software bietet nur die Möglichkeit bis zu fünf Berechnungen zu vergleichen, deswegen wurde zuerst die Temperaturentwicklung an den ersten vier Stellen (Temperaturfühler 1 bis 4) gerechnet (Bild 5.15) und dann an den nächsten drei Stellen. Eine Gegenüberstellung der Temperaturentwicklung an allen sieben Meßstellen wurde dann aufgrund der Cobet-Rechenergebnisse mit Hilfe des EXCEL-Programms dargestellt (Bild 5.16).

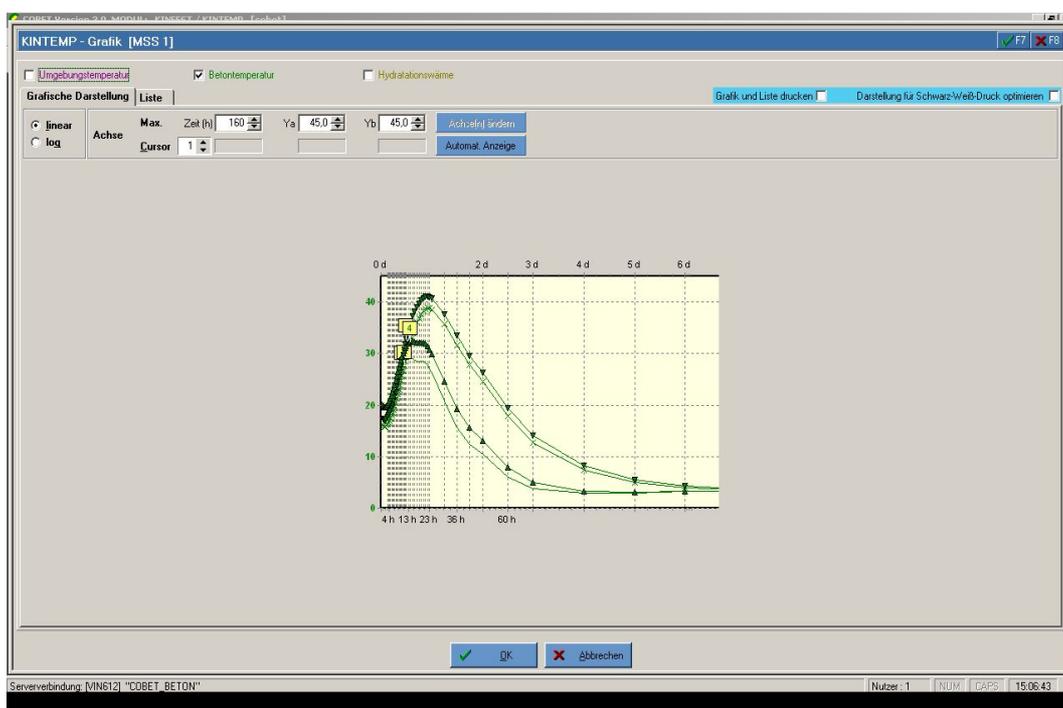


Bild 5.15: Temperaturentwicklung an Stellen 1 bis 4

Ein direkter Ausdruck des Rechenberichtes mit tabellarischer Darstellung der Temperaturentwicklung ist auch möglich.

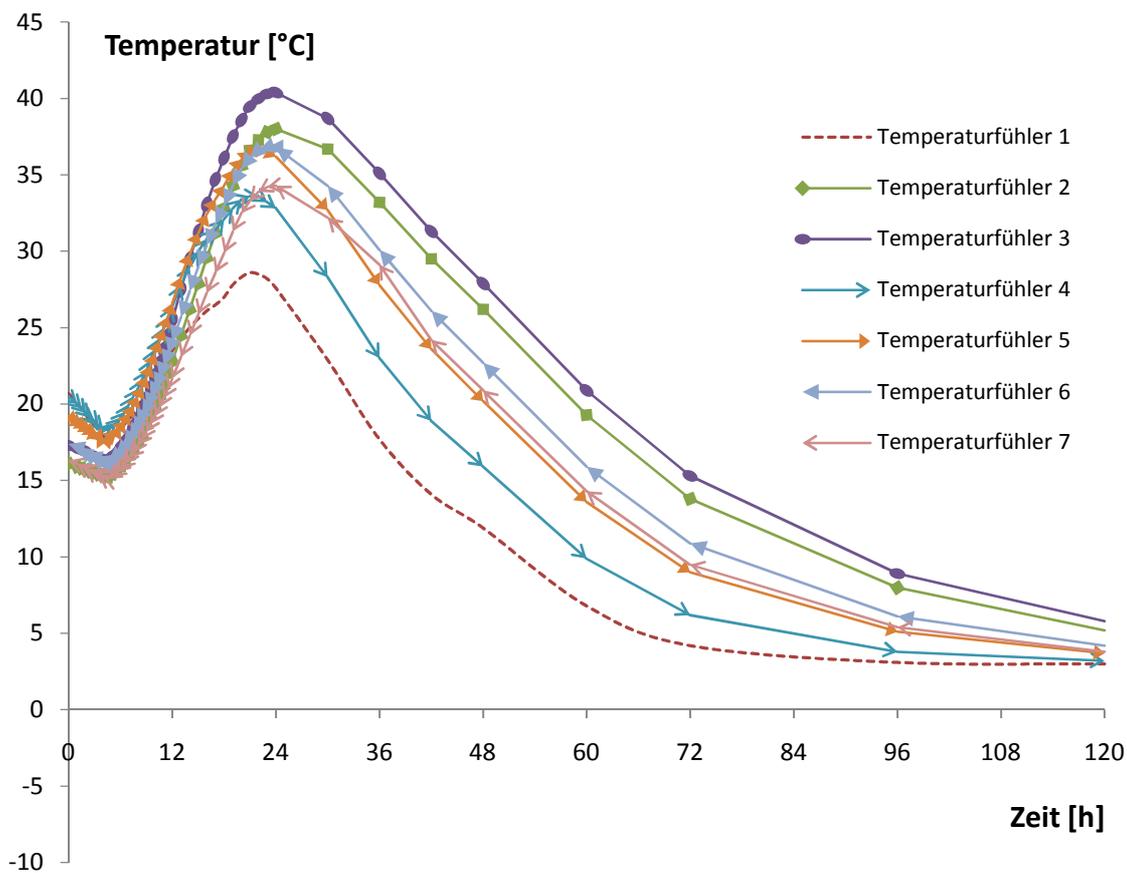


Bild 5.16: Temperaturverlauf der Betonplatte gerechnet mit COBET

Tabelle 5.4: Maximale Betontemperatur in der Brückenplatte gerechnet mit COBET

Nummer der Temperaturfühler	Frischbetontemperatur [°C]	Max. Betontemperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]
TF 1	20,7	29,6	21
TF 2	16,1	39,0	24
TF 3	17,3	41,4	24
TF 4	20,5	34,6	22
TF 5	19,2	37,6	22,5
TF 6	17,4	37,8	23
TF 7	16,3	35,3	23

5.3 Prüfung des Temperaturanstieges des Betons durch Hydratationswärme nach ONR 23303

Dieses Prüfverfahren liefert als Konvention einen unter den definierten Randbedingungen gemessenen Temperaturanstieg. Die Temperatur bei der Erhärtung in einem wärmegeprägten Probekörper und die Frischbetontemperatur unmittelbar nach dem Einbau werden gemessen und der Temperaturanstieg aus der Differenz zwischen der höchsten Betontemperatur und der Frischbetontemperatur unmittelbar nach Einbau errechnet.

Die Behälter für die Herstellung von Betonprobekörpern (Bild 5.17) wurden aus Extrudiertem-Polystyrol-Hartschaum XPS-G nach ÖNORM B 6000 hergestellt. Der Innenraum hat ein Volumen von $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ und die Behälterwände sind 100 mm dick.



Bild 5.17: Behälter aus XPS-G Schaumplatten

Die Frischbetontemperatur des zu untersuchenden Betons wurde mit dem Temperaturmesser nachgeprüft und der Beton wurde in 2 Behälter eingefüllt (Bild 5.18).



Bild 5.18: Herstellung der Betonprobekörper

Unmittelbar nach dem Herstellen des Probekörpers wurde die Probenoberfläche mit der Extrudiertem-Polystyrol-Hartschaum-Platte satt aufliegend abgedeckt und in die Probekörpermitte wurde jeweils ein Messfühler eingebaut. Um die Lagerungstemperatur von $20 \pm 2 \text{ °C}$ zu halten, wurde ein Probekörper im Trockenschrank und einer im Laborraum gelagert (Bild 5.19). Zwei Messfühler maßen ständig in unmittelbarer Probekörpernähe die Raumtemperatur. Sowohl die Betontemperatur, als auch die Raumtemperatur wurden alle 15 Minuten gemessen.



Bild 5.19: Lagerung der Probekörper

Das Bild 5.20 zeigt den Temperaturverlauf in beiden Probekörpern. Als Temperaturanstieg gilt der Mittelwert der an beiden Probekörpern gemessenen Differenz zwischen der Frischbetontemperatur und der Höchsttemperatur im Beton.

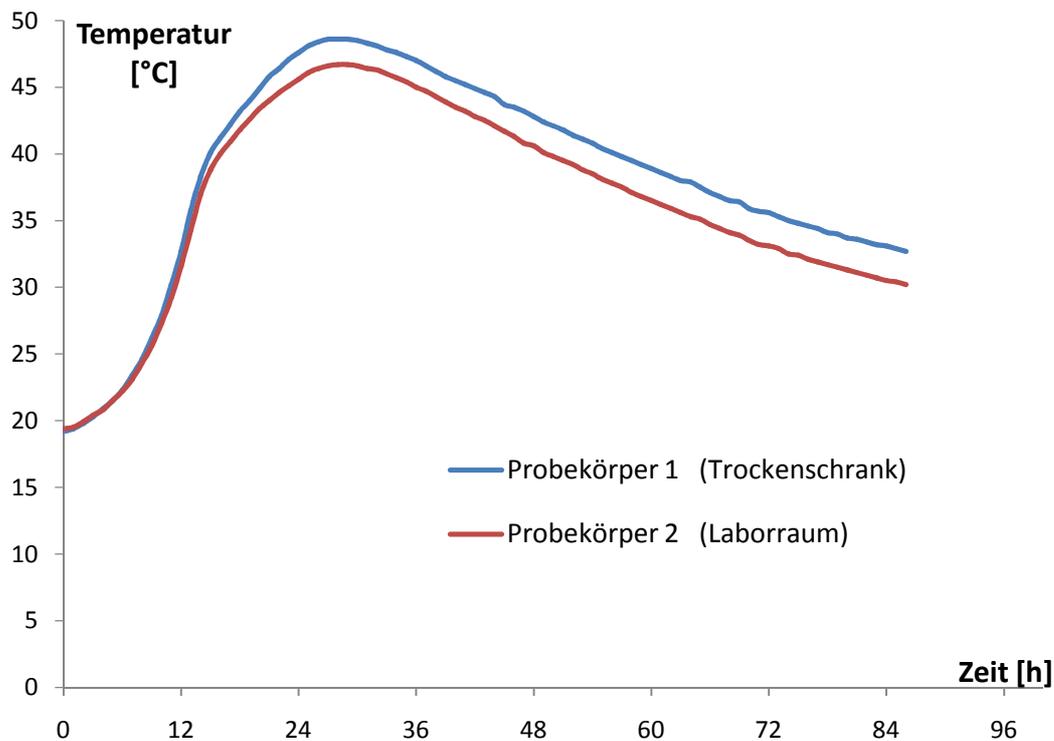


Bild 5.20: Temperaturentwicklung der Probekörper

Die Frischbetontemperatur betrug: Probekörper 1 = 19,2 °C

Probekörper 2 = 19,4 °C

Mittelwert = 19,3 °C

Beim Versuch max. gemessene Temperatur:

Probekörper 1 = 48,7 °C

Probekörper 2 = 46,7 °C

Mittelwert = 47,7 °C

Der Temperaturanstieg laut ONR 23303 stellt die Differenz zwischen diesen zwei Mittelwerten dar und beträgt:

$$\Delta T = 47,7 - 19,3 = 28,4 \text{ °C}$$

Die max. Betontemperatur in einem Bauteil ist dann gleich der Summe des Temperaturanstiegs und der Frischbetontemperatur. Daraus ergeben sich die Temperaturwerte für die Brückenplatte (Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5: Maximale Betontemperatur in der Brückenplatte nach ONR 23303

Nummer der Temperaturfühler	Frischbetontemperatur [°C]	Temperaturanstieg nach ONR 23303 [°C]	Max. Betontemperatur nach ONR 23303 [°C]
TF 1	20,7	28,4	49,1
TF 2	16,1	28,4	44,5
TF 3	17,3	28,4	45,7
TF 4	20,5	28,4	48,9
TF 5	19,2	28,4	47,6
TF 6	17,4	28,4	45,8
TF 7	16,3	28,4	44,7

5.4 Abschätzung der Temperaturentwicklung mit Hilfe der Faustformeln und der Tabellenwerte

Im Kapitel 3.3 wurden drei Möglichkeiten zur Abschätzung der Temperaturentwicklung mit Hilfe der Faustformeln bzw. mit Hilfe der Tabellenwerte beschrieben. An dieser Stelle werden sie konkret am Beispiel der Brückenplatte verwendet, um deren Genauigkeit darzustellen.

5.4.1 Abschätzung der max. zu erwartenden Betontemperatur unter Berücksichtigung des Hydratationsgrades

Im Kapitel 3.3.4 wurde an einem Beispiel die Berechnung der max. Betontemperatur unter Berücksichtigung des Hydratationsgrades erklärt. Mit den Eingangsparametern aus Kapitel 5.1 wurde die Berechnung für die Brückenplatte nach demselben Prinzip durchgeführt, und die Ergebnisse sind in der Tabelle 5.6. dargestellt. Bei der Berechnung wurden die Richtwerte für die Hydratationswärme von Zement verwendet: $Q_{(1 \text{ Tag})} = 250 \text{ J/g}$ und $Q_{(28 \text{ Tage})} = 400 \text{ J/g}$

Tabelle 5.6: Abschätzung der max. Betontemperatur der Brückenplatte nach den Faustformeln aus dem Kapitel 3.3.4

Nummer der Temperaturfühler	Frischbetontemperatur [°C]	Nach dem 1. Tag			Nach vollständiger Zementhydratation (adiabatische Bedingungen)		
		Hydratationsgrad ⁽¹⁾	Temperaturanstieg [°C]	Max. Betontemperatur [°C]	Hydratationsgrad ⁽²⁾	Temperaturanstieg [°C]	Max. Betontemperatur [°C]
TF 1	20,7	0,5	21,0	41,7	0,8	53,6	74,3
TF 2	16,1	0,5	21,0	37,1	0,8	53,6	69,7
TF 3	17,3	0,5	21,0	38,3	0,8	53,6	70,9
TF 4	20,5	0,5	21,0	41,5	0,8	53,6	74,1
TF 5	19,2	0,5	21,0	40,2	0,8	53,6	72,8
TF 6	17,4	0,5	21,0	38,4	0,8	53,6	71,0
TF 7	16,3	0,5	21,0	37,3	0,8	53,6	69,9

⁽¹⁾ – Werte aus Bild 3.6

⁽²⁾ – Werte aus Bild 3.5

5.4.2 Abschätzung der max. zu erwartenden Betontemperatur unter Berücksichtigung der Bauteildicke

Die Abschätzung der max. Betontemperatur unter Berücksichtigung der Bauteildicke unterscheidet sich nur gering von der Abschätzung unter Berücksichtigung des Hydratationsgrades. Es wird nun ein Verhältniswert (Tabelle 3.3) zur Berücksichtigung der wirksamen Bauteildicke statt Hydratationsgrades eingesetzt. Ein Beispiel ist im Kapitel 3.3.6 angegeben. Die berechneten Ergebnisse für die Brückenplatte sind in der Tabelle 5.7 dargestellt.

Tabelle 5.7: Abschätzung der max. Betontemperatur der Brückenplatte nach der Faustformel aus dem Kapitel 3.3.6

Nummer der Temperaturfühler	Frischbetontemperatur [°C]	Bauteildicke an der Meßstelle [cm]	Verhältniswert $\alpha^{(1)}$	Nach dem 1. Tag		Nach vollständiger Zementhydratation (adiabatische Bedingungen)	
				Temperaturanstieg [°C]	Max. Betontemperatur [°C]	Temperaturanstieg [°C]	Max. Betontemperatur [°C]
TF 1	20,7	26	0,73	30,6	51,3	49,0	69,7
TF 2	16,1	36	0,74	31,1	47,2	49,7	65,8
TF 3	17,3	45	0,76	31,9	49,1	51,1	68,4
TF 4	20,5	46	0,76	31,9	52,4	51,1	71,6
TF 5	19,2	38	0,75	31,5	50,7	50,4	69,6
TF 6	17,4	32	0,73	30,6	48,0	49,0	66,4
TF 7	16,3	28	0,73	30,6	46,9	49,0	65,3

⁽¹⁾ – Werte aus Tabelle 3.3

5.4.3 Abschätzung der max. zu erwartenden Betontemperatur mit Hilfe von Tabellenwerten

In der Tabelle 3.4 (Kapitel 3.3.6) sind die Anhaltswerte für die Abschätzung des Temperaturanstiegs in Betonbauteilen angegeben. Mit Hilfe dieser Werte wurde auch die max. Temperatur der Brückenplatte abgeschätzt (Tabelle 5.8).

Tabelle 5.8: Abschätzung der max. Betontemperatur der Brückenplatte mit Hilfe den Anhaltswerte aus Tabelle 3.4

Nummer der Temperaturfühler	Frischbetontemperatur [°C]	Bauteildicke an der Meßstelle [cm]	Temperaturanstieg (Tabellenwert) [°C]	Max. Betontemperatur [°C]
TF 1	20,7	26	17	37,7
TF 2	16,1	36	20	36,1
TF 3	17,3	45	24	41,3
TF 4	20,5	46	24	44,5
TF 5	19,2	38	20	39,2
TF 6	17,4	32	17	34,4
TF 7	16,3	28	17	33,3

Im Kapitel 3.3.3 wurden auch die Faustformeln zur Abschätzung des Zeitpunktes der maximalen Temperatur angegeben. Laut diesen Formeln wird die Höchsttemperatur in einem Bauteil unter 3,5 m Dicke nach $t_{\max} = 1,00 \text{ h} + 0,5 \text{ Tage}$ erreicht. Somit ergeben sich für die Brückenplatte folgende Zeitpunkte der maximalen Temperatur (Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Zeitpunkt der maximalen Temperatur nach Faustformel (Kapitel 3.3.3)

Nummer der Temperaturfühler	Bauteildicke an der Meßstelle [cm]	Zeitpunkt der max. Temperatur [Tage]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]
TF 1	26	0,76	18,2
TF 2	36	0,86	20,6
TF 3	45	0,95	22,8
TF 4	46	0,96	23,0
TF 5	38	0,88	21,1
TF 6	32	0,82	19,7
TF 7	28	0,78	18,7

5.5 Conclusio

Praktisch keine der verwendeten Methoden lieferte eine 100% Übereinstimmung mit den tatsächlich entstandenen Temperaturen im Bauteil. Das Hauptproblem liegt in der genauen Erfassung der Eingangsparameter. Schon kleine Änderungen führten zu deutlichen Unterschieden im Endergebnis. Zusätzlich werden durch die Vereinfachung der Bestimmungsmethoden einige Einflussparameter vernachlässigt.

Die besten Ergebnisse mit einer Abweichung von $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ wurden mit der Cobet Software erzielt. Es ist auch die Methode, die die meisten Einflussparameter berücksichtigt.

Vernachlässigt man die niedrigeren gemessenen Werte, die durch Einbau der Temperaturfühler in der Nähe der Betonoberfläche entstanden sind, wurden bei der Bestimmung der max. Temperatur mit Hilfe der Tabellenwerte (siehe Tabelle 3.4) und Rechenmethode unter Berücksichtigung des Zementhydratationsgrades (siehe Kapitel 3.3.4) die Ergebnisse mit einer Abweichung von $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ festgestellt.

Die anderen Methoden (Bestimmung des Temperaturanstiegs nach ONR 23303 und Rechenmethode unter Berücksichtigung der Bauteildicke) lieferten die Abweichungen über $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ein Überblick aller erzielten Werte ist in der Tabelle 5.10 dargestellt.

Tabelle 5.10: Vergleich der gemessenen und berechneten Werte

Nummer der Temperaturfühler	GEMESSENE WERTE		MIT COBET GERECHNETE WERTE		NACH ONR 23303 BESTIMMTE WERTE	MIT FAUSTFORMELN BESTIMMTE WERTE					
	Max. gemessene Betontemperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]	Max. gerechnete Betontemperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]		Mit Hilfe des Hydrationsgrades		Mit Hilfe der Bauteildicke		Mit Hilfe der Tabellenwerte	
						Betontemperatur nach dem 1. Tag [°C]	Betontemperatur nach vollständiger Zementhydratation (adiabatisch) [°C]	Betontemperatur nach dem 1. Tag [°C]	Betontemperatur nach vollständiger Zementhydratation (adiabatisch) [°C]	Max. Betontemperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]
TF 1	27,8	21	29,6	21	49,1	41,7	74,3	51,3	69,7	37,7	18,2
TF 2	37,0	21,5	39,0	24	44,5	37,1	69,7	47,2	65,8	36,1	20,6
TF 3	39,4	22,5	41,4	24	45,7	38,3	70,9	49,1	68,4	41,3	22,8
TF 4	32,1	22	34,6	22	48,9	41,5	74,1	52,4	71,6	44,5	23,0
TF 5	35,2	21	37,6	22,5	47,6	40,2	72,8	50,7	69,6	39,2	21,1
TF 6	35,5	26	37,8	23	45,8	38,4	71,0	48,0	66,4	34,4	19,7
TF 7	32,7	23,5	35,3	23	44,7	37,3	69,9	46,9	65,3	33,3	18,7

6. Beispiele

Aus dem Versuch im Kapitel 5 wurde der Einfluss der Bauteildicke und der Lage der Temperaturfühler im Bauteil auf die Temperaturentwicklung etwas näher dargestellt. In diesem Kapitel wird auch der Einfluss der zusätzlichen Parameter betrachtet. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Zementen, unterschiedlichen Zementmengen und unterschiedlichen Außentemperaturen durchgeführt.

6.1 Unterschiedliche Zemente

Bei dem Versuch wurde wieder die Betonrezeptur MB 45 (Tabelle 5.1) verwendet. Es wurde einmal Beton mit 420 kg CEM II A-M (S-L) 42,5R hergestellt und danach dieselbe Betonrezeptur nur einmal mit CEM II A-M (V-L) 42,5R und einmal mit CEM II B-M (V-L) 32,5R. Die Betonherstellung erfolgte wieder in der Betonmischanlage EUROMIX 2000.

Zuerst wurden drei Schalungskörper (Bild 6.1) jeweils mit 1m x 1m x 1m Innenabmessungen hergestellt.



Bild 6.1: Schalungskörper

In die Schalungen wurde jeweils in der Mitte ein Temperaturfühler eingebaut (Bild 6.2).



Bild 6.2 Einbau der Temperaturfühler

Es wurden für jeden Betonblock 1,2 m³ in der Mischanlage gemischt und der Betontransport erfolgte mit einem Betonmischer (Bild 6.3).



Bild 6.3: Betontransport mit Betonmischer

Der Beton wurde mit Hilfe der Betonrutsche in die Schalung eingebaut und während des Einbauens ständig mit einem Rüttler verdichtet (Bild 6.4).



Bild 6.4: Einbau und Verdichtung des Betons

Die Temperaturmessung erfolgte mit Datenlogger (Kapitel 4.2.2) wobei ein Temperaturfühler ständig die Außentemperatur maß (Bild 6.5). Während des ganzen Messzeitraumes waren die Betonblöcke in der Schalung und es wurde keine Betonnachbehandlung gemacht.



Bild 6.5: Anschluss der Datenlogger

Die Datenlogger maßen die Temperaturentwicklung in einem Messintervall von 15 Minuten und das Bild 6.6 zeigt den Temperaturverlauf in der Mitte der Betonblöcke.

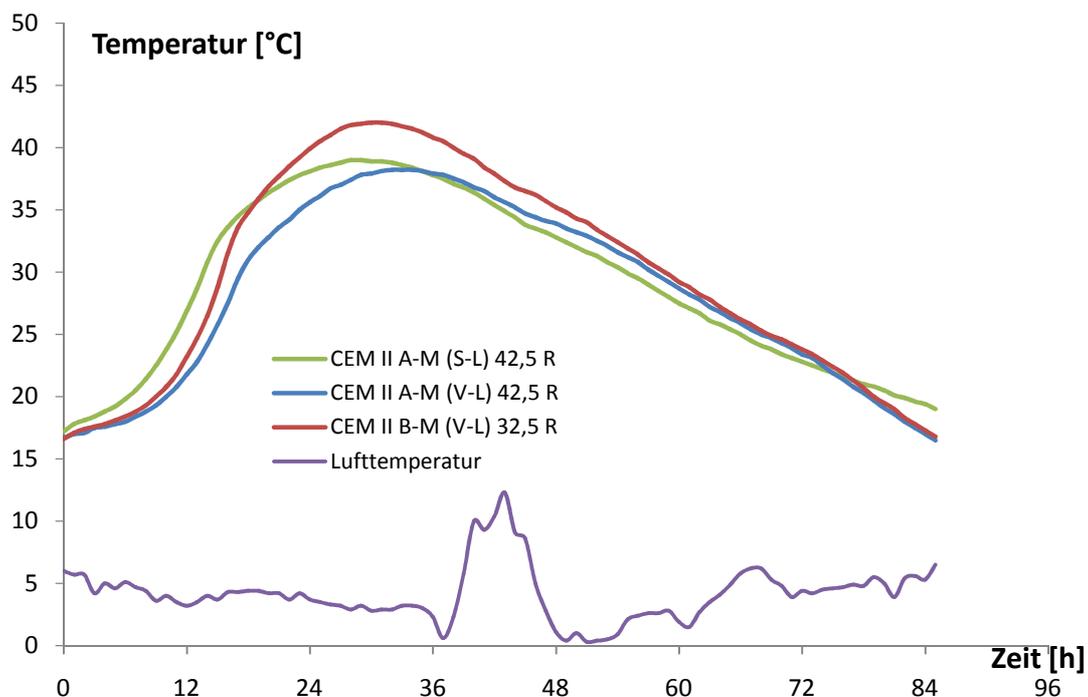


Bild 6.6: Temperaturverlauf in der Mitte der Betonblöcke mit unterschiedlichen Zementen

Laut Literatur und zahlreichen Angaben der Zementhersteller kann der Zement CEM II B-M 32,5 R keine höhere Hydratationswärme als der Zement CEM II A-M 42,5 R entwickeln. Der Temperaturverlauf im Betonblock mit CEM II B-M (V-L) 32,5 R könnte durch mangelhafte Qualität des Zements, falsche Sackbeschriftung oder durch einen übersehenen Fehler beim Versuch verursacht worden sein.

6.2 Unterschiedliche Zementmengen

Für den Versuch wurden wieder drei Schalungskörper mit 1m x 1m x 1m Innenabmessungen verwendet (Bild 6.7). Die Betonherstellung erfolgte an der Mischanlage EUROMIX 2000 und als Basis wurde die Betonrezeptur MB 45 genommen. Die Mengen der restlichen Betonkomponenten blieben unverändert nur die Zementmenge variierte.

In den ersten Schalungskörper wurde Beton mit 420 kg Zement eingebaut, in den zweiten Beton mit 360 kg Zement und in den dritten Beton mit 300 kg Zement.



Bild 6.7: Schalungskörper

In die Schalungen wurde wie im Kapitel 6.1.1 in der Mitte jeweils ein Temperaturfühler eingebaut (Bild 6.8).



Bild 6.8: Einbau der Temperaturfühler

Der Betontransport erfolgte mit einem Betonmischer und der Einbau mit Hilfe der Betonrutsche. Während des Einbaus wurde der Beton ständig mit einem Rüttler verdichtet (Bild 6.9).



Bild 6.9: Herstellung den Versuchskörpern

Die Temperaturmessung erfolgte wieder mit einem Datenlogger in einem Messintervall von 15 Minuten (Bild 6.10). Ein Temperaturfühler maß ständig die Außentemperatur. Während des ganzen Messzeitraumes waren die Betonblöcke in der Schalung und es wurde keine Betonnachbehandlung eingesetzt.



Bild 6.10: Temperaturmessung

Im folgenden Diagramm sind die gemessenen Temperaturverläufe der einzelnen Betonblöcke dargestellt.

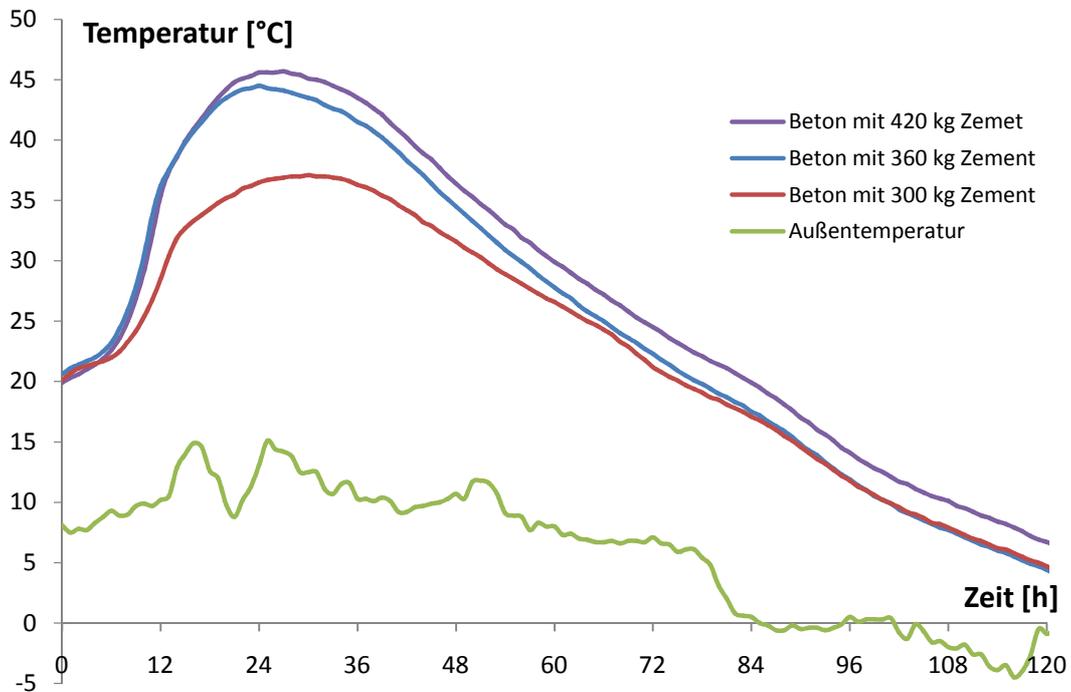


Bild 6.11: Temperaturverläufe in der Mitte der Betonblöcke mit unterschiedlichen Zementmengen, CEM II A-M (S-L) 42,5 R

Tabelle 6.1: Überblick der charakteristischen Werte

Betonblock mit 420kg Zement			Betonblock mit 360kg Zement			Betonblock mit 300kg Zement		
Frisch- beton- temperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]	Max. Beton- temperatur [°C]	Frisch- beton- temperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]	Max. Beton- temperatur [°C]	Frisch- beton- temperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]	Max. Beton- temperatur [°C]
19,5	25	45,7	21,6	25	44,4	20,1	28	37,1

Da die Abschätzung der Betontemperatur im Kapitel 5 nur bei der Brückenplatte mit maximaler Dicke von 46 cm gemacht wurde, wäre es auch interessant, die verwendeten Temperaturbestimmungsmethoden auch an einem massigen Bauteil einzusetzen. Deswegen wurden gleichzeitig mit der Herstellung der Betonblöcke bei diesem Versuch auch Probekörper für die Bestimmung der Temperaturentwicklung nach ONR 23303 angefertigt. Es wurden sechs gleiche Behälter wie im Kapitel 5.3 vorbereitet und von jeder Versuchsrezeptur zwei Probekörper hergestellt (Bild 6.12).



Bild 6.12: Herstellung der Probekörpern

Die Probekörper wurden im Laborraum gelagert und die Temperaturmessung erfolgte mit zwei Datenloggern in einem Messintervall von 15 Minuten (Bild 6.13). Ein Temperaturfühler kontrollierte ständig die Raumtemperatur.



Bild 6.13: Lagerung der Probekörpern und Messung der Temperaturentwicklung

Die Messergebnisse der einzelnen Probekörper werden in folgenden Bildern dargestellt.

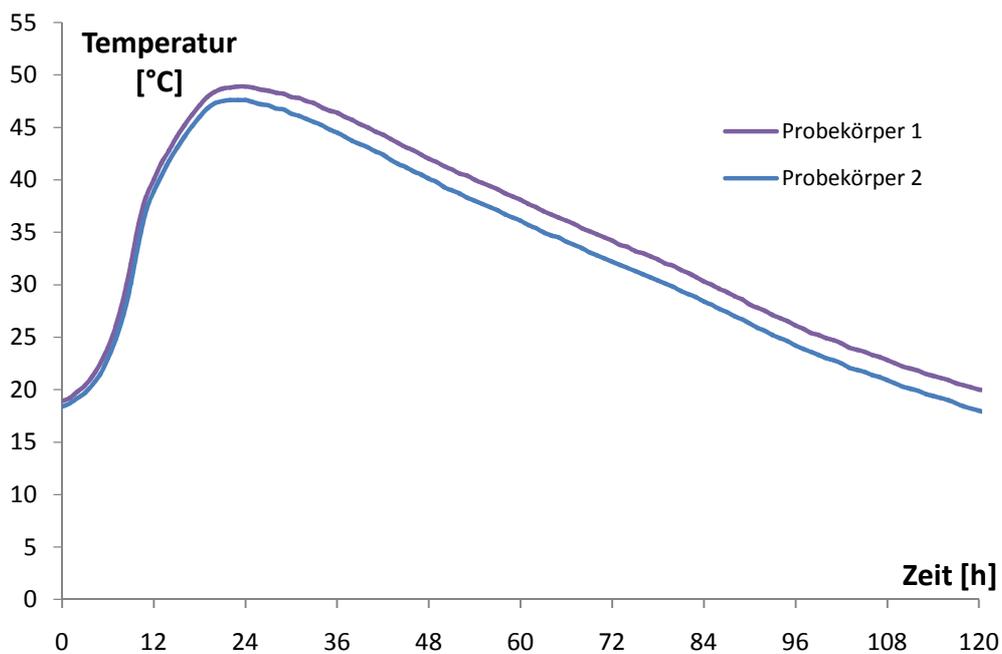


Bild 6.14: Temperaturverlauf in Probekörpern mit 420 kg Zement, CEM II A-M (S-L) 42,5 R

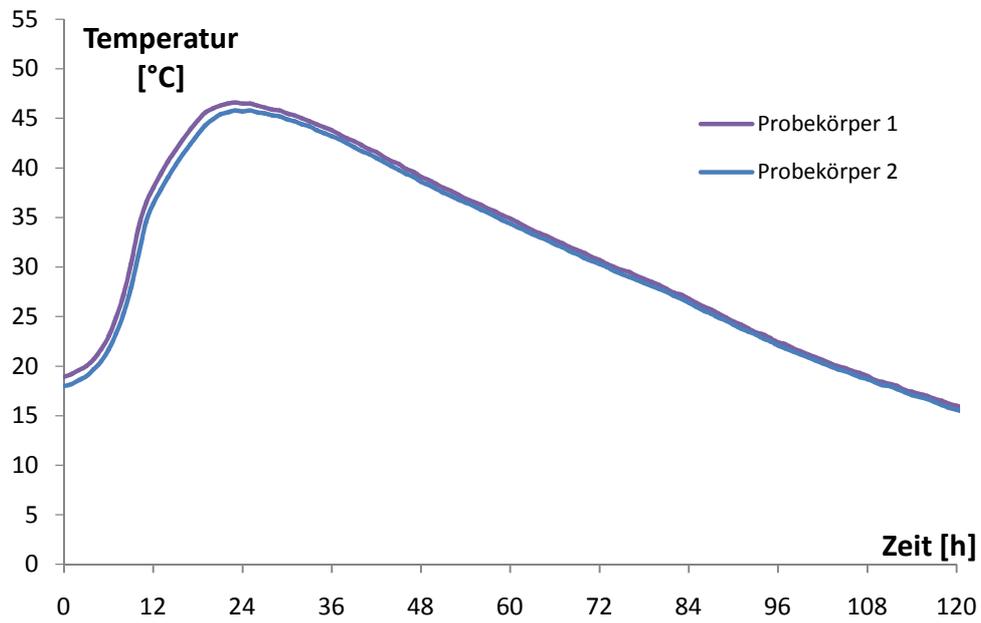


Bild 6.15: Temperaturverlauf in Probekörpern mit 360 kg Zement, CEM II A-M (S-L) 42,5 R

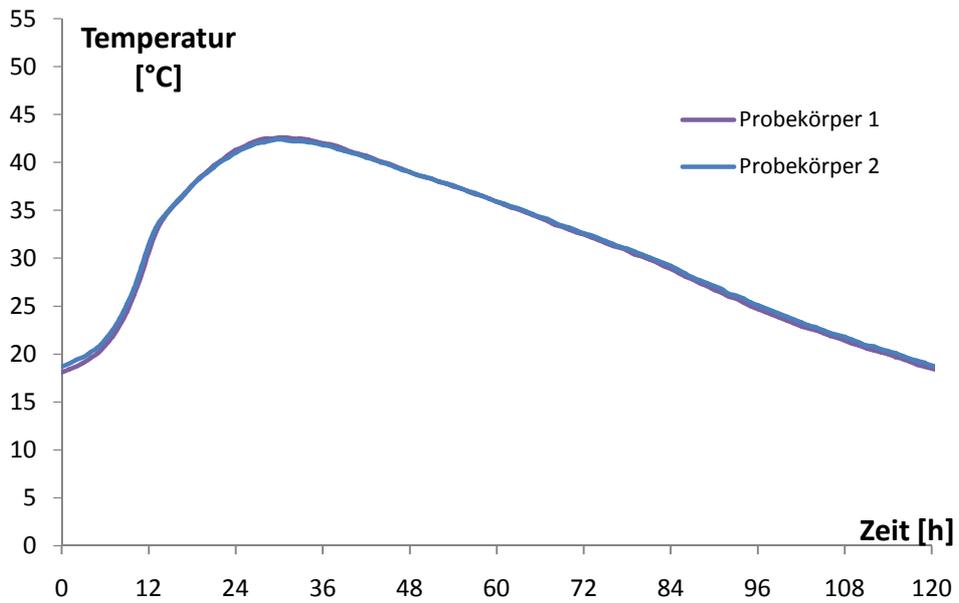


Bild 6.16: Temperaturverlauf in Probekörpern mit 300 kg Zement, CEM II A-M (S-L) 42,5 R

Tabelle 6.2: Max. gemessene Temperatur in den Probekörpern beim Versuch nach ONR 23303

Beton mit 420kg Zement		Beton mit 360kg Zement		Beton mit 300kg Zement	
Probekörper 1	Probekörper 2	Probekörper 1	Probekörper 2	Probekörper 1	Probekörper 2
48,9 °C	47,6 °C	46,6 °C	45,8 °C	42,7 °C	42,4 °C
Mittelwert: 48,2 °C		Mittelwert: 46,2 °C		Mittelwert: 42,5 °C	

Nach ONR 23303 ergeben sich somit in Betonblöcken die folgenden Temperaturanstiege:

- Betonblock mit 420 kg Zement: $\Delta T = 28,7 \text{ °C}$
- Betonblock mit 360 kg Zement: $\Delta T = 24,6 \text{ °C}$
- Betonblock mit 300 kg Zement: $\Delta T = 22,4 \text{ °C}$

Die restlichen Temperaturabschätzungsmethoden aus dem Kapitel 5, wurden auch bei diesem Versuch angewendet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6.3 dargestellt.

Tabelle 6.3: Vergleich der gemessenen und berechneten Werte

	GEMESSENE WERTE				MIT COBET GERECHNETE WERTE			NACH ONR 23303 BESTIMMTE WERTE				MIT FAUSTFORMELN BESTIMMTE WERTE					
	Frischbetontemperatur [°C]	Max. gemessene Betontemperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]	Max. gerechnete Betontemperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]	Max. Betontemperatur [°C]	Mit Hilfe des Hydratationsgrades		Mit Hilfe der Bauteildicke		Mit Hilfe der Tabellenwerte		Max. Betontemperatur [°C]	Zeitpunkt der max. Temperatur [h]		
								Betontemperatur nach dem 1. Tag Zementhydratation (adiabatisch) [°C]	Betontemperatur nach vollständiger Zementhydratation (adiabatisch) [°C]	Betontemperatur nach dem 1. Tag Zementhydratation (adiabatisch) [°C]	Betontemperatur nach vollständiger Zementhydratation (adiabatisch) [°C]	Betontemperatur nach dem 1. Tag Zementhydratation (adiabatisch) [°C]	Betontemperatur nach vollständiger Zementhydratation (adiabatisch) [°C]				
Betonblock	19,5	45,7	25	25	51,3	24	48,2	40,5	73,2	59,4	83,3	56,5	36				
mit 420 kg Zement	21,6	44,4	25	25	47,9	24	46,2	39,6	67,6	55,8	76,3	55,6	36				
mit 300 kg Zement	20,1	37,1	28	28	39,4	24	42,5	35,1	58,5	48,6	65,7	48,1	36				

Wie es aus der Tabelle 6.3 sichtbar ist, lieferte keine der verwendeten Methoden eine 100 % Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Eine relativ gute Abschätzung kann aber mit der Cobet Software, nach ONR 23303 und mit Hilfe des Hydratationsgrades erzielt werden.

6.3 Unterschiedliche Frischbeton- und Außentemperatur

In den oben beschriebenen Versuchen wurden zwei Betonblöcke mit derselben Betonrezeptur hergestellt. Beim ersten Versuch mit unterschiedlichen Zementen wurde einmal Beton mit CEM II A-M (S-L) 42,5R und der Betonrezeptur aus Tabelle 5.1 gemischt. Beim zweiten Versuch mit unterschiedlichen Zementmengen wurde derselbe Zement verwendet und die Mischung mit 420 kg Zement entspricht der Betonrezeptur aus Tabelle 5.1. Während dieser zwei Versuche herrschten unterschiedliche Außentemperaturen und Temperaturentwicklung in diesen Betonblöcken wird im folgenden Bild gegenübergestellt. Der Außentemperaturverlauf während der Versuche ist auch im Bild dargestellt.

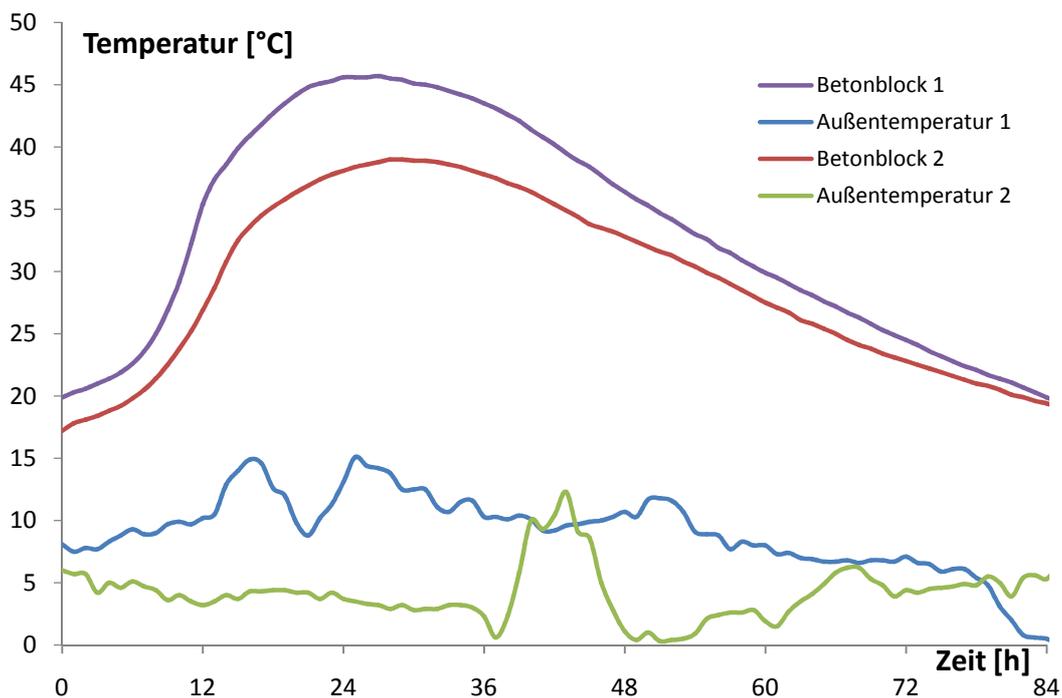


Bild 6.17: Temperaturentwicklung in Betonblöcken mit derselben Betonrezeptur und unterschiedlicher Außen- und Frischbetontemperatur

Fazit

Die Temperaturentwicklung in Betonbauteilen ist ein äußerst komplexer Prozess, der durch zahlreiche Faktoren und unterschiedliche Einflüsse, die sie aufeinander haben, unterschiedlich beeinflusst wird. Das Hauptproblem bei der Temperaturbestimmung äußert sich in der genauen Erfassung der Eingangsparameter. Schon kleine Änderungen führen zu deutlichen Unterschieden im Endergebnis. Durch die Vereinfachung der Abschätzungsmethoden werden darüberhinaus zusätzlich einige wesentliche Einflussparameter vernachlässigt.

Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, zeigen, dass keine der verwendeten Methoden eine 100 % Übereinstimmung mit den Messwerten ergab. Jedoch können mit deren Hilfe die Temperaturen in Betonbauteilen relativ gut abgeschätzt werden. Je nach den Bauteilparametern und Einflussbedingungen liefert die eine oder die andere Methode relativ genaue Endergebnisse. Deswegen kann an dieser Stelle empfohlen werden, sich bei der Temperaturbestimmung nicht nur auf eine Methode zu konzentrieren, sondern bei der Abschätzung immer mehrere betontechnologische Einflussgrößen in Betracht zu ziehen.

Zusammenfassung

Im Rahmen meiner Diplomarbeit habe ich mich mit der Temperaturentwicklung und Möglichkeiten der Temperaturbestimmung im jungen Beton beschäftigt.

Im ersten Teil der Arbeit sind die Prozesse der Wärmeentstehung und wichtige Einflussparameter auf die Temperaturentwicklung beschrieben. Kurz werden auch die Auswirkungen der hohen Temperaturen und Temperaturdifferenzen auf die Betonqualität erläutert.

Die Kapitel 3 und 4 bilden den zweiten Teil der Arbeit, in dem die unterschiedlichen analytischen und experimentellen Temperaturbestimmungsmethoden dargestellt sind. Im 4. Kapitel ist die Bausoftware Cobet beschrieben, welche auch später im experimentellen Teil praktisch eingesetzt wird.

Im dritten Teil der Arbeit bzw. in den Kapiteln 5 und 6 werden Baustellenversuche, die im Rahmen der Temperaturbestimmung durchgeführt wurden, beschrieben. Im 5. Kapitel („Versuchsdurchführung und Interpretation“), der auch den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt, werden die Temperaturmessungen an einer Betonbrücke geschildert. Dabei würden gleichzeitig einige Temperaturbestimmungsmethoden aus dem 3. Kapitel in die Praxis umgesetzt. Im 6. Kapitel werden zusätzlich die Auswirkungen betontechnologischer Einflussparameter durch Versuche mit unterschiedlichen Frischbeton- und Lufttemperaturen und unterschiedlichen Zementmengen und Zementarten betrachtet.

Die Rückschlüsse, die aus den Versuchen erfolgen, sind am Ende der Arbeit im Fazit angegeben.

Abstract

In my thesis the temperature development and possibilities of the temperature determination of the young concrete were examined.

The first part of the thesis is focused on the heat generation processes due to concrete hydration and relevant parameters that influence the temperature development. Within this part also the effects of high temperatures and temperature differences on the concrete quality were presented.

The second part consists of the Chapters 3 and 4, which provide a preview of various analytical and experimental temperature determination methods during concrete hydration. In the 4th Chapter is the construction software Cobet presented, which is going to be applied in the experimental part.

The third part, the Chapters 5 and 6, provide a description of experiments, that have been related to the temperature determination on site at a large concrete bridge. The 5th Chapter („Procedure and Interpretation of the Experiment"), which is the main part of the thesis, is focused on the temperature measurements in the concrete bridge. The temperature determination methods presented in the 3rd Chapter were practically applied and compared to the measurements. The effects of influencing technological parameters are considered in the 6th Chapter. Their influence was observed by experiments with different temperatures of the fresh concrete and air and different amounts and types of cement.

Conclusions and a resumé from the experiments are given at the end of the thesis.

Literaturzusammenstellung

Normen

- ÖNORM EN 197-1** Zement; Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.
Ausgabe 2008-10-01
- ÖNORM EN 196-1** Prüfverfahren für Zement
Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
Ausgabe 2005-04-01
- ÖNORM EN 196-3** Prüfverfahren für Zement
Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raum-
beständigkeit
Ausgabe 2009-02-01
- ÖNORM EN 196-8** Prüfverfahren für Zement
Teil 8: Hydratationswärme – Lösungsverfahren
Ausgabe 2004-01-01
- ÖNORM EN 196-9** Prüfverfahren für Zement
Teil 9: Hydratationswärme – Teiladiabatisches Verfahren
Ausgabe 2004-01-01
- ÖNORM EN 206-1** Beton
Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
Ausgabe 2005-11-01
- ÖNORM EN 933-1** Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von
Gesteinskörnungen
Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren
Ausgabe 2006-07-01

Literatur

[1] Hundt, J.

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung im Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 256

[2] Van Breugel, K.

Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials. Dissertation, TU Delft, 1991.

[3] Tacke, R.

Feuchte- und Festigkeitsentwicklung hydratisierenden Betons – Modellierung und numerische Analyse. Dissertation, TU Braunschweig, 2002.

[4] Locher, F. W.

Chemie des Zements und der Hydratationsprodukte. Zement Taschenbuch, Bauverlag GmbH Wiesbaden-Berlin, 1984.

[5] Lohmeyer, G.

Beton-Technik: Handbuch für betongerechte Planung und Ausführung. Beton-Verlag GmbH Düsseldorf, 1997.

[6] Röhling, S.

Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme. Verlag Bau+Technik GmbH Düsseldorf, 2009.

[7] <http://de.wikipedia.org/wiki/Adiabatisch>

[8] Hintzen, W.

Zum Verhalten des jungen Betons unter zentrischem Zwang beim Abfließen der Hydratationswärme.

Schriftreihe der Zementindustrie, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 1998.

[9] Rake, K.

Beitrag zur Bestimmung der Hydratationswärme von Zementen
Dissertation, RWTH Aachen 1965

[10] Catharin, P.

Hydratationswärme und ihre Bestimmung
Tonindustrie-Zeitung Nr.90, 1966.

[11] Pucher, S.

Die adiabatische Kalorimetrie des Zements
Zement und Beton, Heft 3, 1980

[12] Karsch, K.H.; Schwiete, H.E.

Adiabatische Kalorimetrie zur Bestimmung der Hydratationswärme eines Zements
Zemet-Kalk-Gips, Heft 5, 1963

[13] Forschungsinstitut der Zementindustrie

Vorläufiges Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit
dem adiabatischen Kalorimeter.
Beton Heft 12, 1970

[14] Plannerer, M.

Temperaturspannungen in Betonbauteilen während der Erhärtung
Dissertation, TU München 1998.

[15] Staffa, M.

Vermeidung von Hydratationsrissen in Stahlbetonwänden
Beton- und Stahlbetonbau 89, 1994.

[16] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton

Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton
Beuth Verlag, Berlin 2006.

[17] Mandry, W.

Über das Kühlen von Beton
Springer Verlag, Berlin 1961

[18] Kim, K.-H. ; Jeon, S.-E. ; Kim, J.-K. ; Yang, S.

An experimental study on thermal conductivity of concrete
Cement and Concrete Research 33, 2003.

[19] Neville, A.M.

Properties of Concrete. 3rd Edition
Pitman Publishing, London 1981.

[20] Hamfler, H.

Berechnung von Temperatur-, Feuchte-, und Verschiebungsfeldern in erhärtenden
Betonbauteilen nach der Methode der finiten Elemente.
Beuth Verlag, Berlin 1988

[21] De Schutter, G.; Taerwe, L.

Specific heat and thermal diffusivity of hardening concrete
Magazine of Concrete Research 47, 1995.

[22] Verein Deutscher Zementwerke

Zement-Merkblatt Betontechnik B11
Düsseldorf, 2006

[23] Bentz, D.P. ; Waller, V. ; de Larrard, F.

Prediction of Adiabatic Temperature Rise in Conventional and High-Performance
Concretes Using a 3-D Microstructural Model
Cement and Concrete Research, No. 2, 1998.

[24] Madaleno, A.C.L.

Erfassung von Verformungs- und Spannungszuständen im jungen Beton infolge
Temperatur.
Dissertation, Universität Weimar, 2002.

[25] Giesecke, J.

Temperatur- und Spannungsverteilung in abkühlenden Betonplatten bei beliebigen
Wärmeübergangszahlen.
Otto-Graf-Institut, Schriftenreihe, H.37

**[26] Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton- und Stahlbeton
Bundesminister für Verkehr**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen
Ausgabe 2004

[27] Winkeloe, N.; Weber, R.

Ermittlung der Temperatur des frischen und des erhärtenden Betons
Beton-Informationen 5-86, 1986

[28] Lohmeyer, G.; Ebeling, K.

Weiße Wannen - einfach und sicher
Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, 2007.

[29] Verein Deutscher Zementwerke

Zement-Taschenbuch
Bauverlag Wiesbaden, 2002

[30] Weigler, H.; Nicolay, J.

Konstruktionsleichtbeton. Temperatur und Rissneigung während der Erhärtung.
Betonwerk + Fertigteil-Technik Heft 5 und 6, 1975

[31] www.csb-hanse.de

[32] CSB Hanse GmbH

Cobet Version 3.0, KINFEST und KINTEMP Info
Stand 01.01.2009.

[33] ME-Meßsysteme GmbH

Gerätbeschreibung
Stand 01.01.2009.

[34] Alegre, R.

La Calorimetrie des Cimentes au CERILICH
Paris 1961

[35] Wu, X.; Roy, D.N.; Langton, C.A.:

Cement and Concrete Research 13
No.2, pp. 277-286, 1988

[36] Bentz, D.P.; Waller, V.; de Larrard, F.:

Prediction of Adiabatic Temperature Rise in Conventional and High-Performance
Concretes using a 3-D Microstructural Model
Cement and Concrete Research 28
No. 2, pp 285-297, 1998

[37] Lang, E.:

Die Bestimmung des „C-Wertes“
Beton-Informationen 1997, H. 3.

[38] König, G.; Tue, N. V.:

Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton
und Spannbeton.
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
Beuth Verlag, Berlin 1996

[39] Wolff, U.

Röntgendiffraktometrie mit einem Halbleiterdetektor zur Bestimmung der Kristallphasenveränderung von Zementen nach unterschiedlichen Temperatureinwirkungen während der Hydratation.

Dissertation, TU Wien, Mai 1994

[40] König G.; Viet Tue N.; Zink M.

Hochleistungsbeton

Verlag Ernst & Sohn, 2001

[41] Verein Deutscher Zementwerke

Massige Bauteile aus Beton

Nr. B11, 7/2006