

# Der Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Festigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen

Von Kurt Walz, Düsseldorf

## Übersicht

*Durch eine Wärmebehandlung bei Temperaturen bis 100 °C erreicht Beton bereits nach 1 Tag oder früher eine ausreichende Transport- und Stapelfestigkeit. Diese Frühfestigkeit hängt u. a. von der Zusammensetzung des Betons und von den Eigenschaften des Zements ab.*

*In die vorliegenden Untersuchungen wurden 6 verschiedene Zemente einbezogen. Die Betone wiesen einen Zementgehalt von rd. 320 kg je m<sup>3</sup> und Wasserzementwerte von 0,40 und 0,50 auf. Betonbalken von 10 cm × 10 cm × 50 cm Kantenlänge erhärteten nach einer 2stündigen Vorlagerung bei 20 °C während 16 h bei Temperaturen bis zu 60 °C oder 80 °C. Die wärmebehandelten Betonbalken lagerten anschließend unter Wasser von 20 °C und wurden nach 1 Tag, 28 und 90 Tagen auf Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft. Zum Vergleich dienten Balken, die dauernd bei 20 °C (Normallagerung) lagerten und im Alter von 3, 28 und 90 Tagen geprüft wurden.*

*In jedem Falle ergaben sich durch die Wärmebehandlung nach 1 Tag Festigkeiten, die etwa so groß waren wie die 3 Tage-Festigkeiten nach Normallagerung und die für den Transport und das Stapeln von Fertigteilen ausreichen. Nach 28 und 90 Tagen erreichten die wärmebehandelten Betone im Mittel nur etwa 90 % der Festigkeiten der normal gelagerten Betone. Mit einer wegen der beschränkten Zahl der Zemente gebotenen Vorsicht kann aus den Ergebnissen gefolgert werden, daß gröber gemahlener Portlandzement mit viel C<sub>2</sub>S und wenig C<sub>3</sub>A und Hochofenzement, also Zemente, die bei 20 °C im allgemeinen etwas langsamer erhärten, unter Bedingungen wie bei den Versuchen auf eine Wärmebehandlung des Betons günstig ansprechen.*

## 1. Einleitung und Versuchsplan

Durch eine Wärmebehandlung sollen Betonwaren, wie Mauersteine, Platten, Träger, Rohre usw., schon nach kurzer Zeit ausreichend stapel- und transportfest werden. Die hierzu erforderliche Frühfestigkeit entsteht, wenn der frische Beton etwa 1/2 Tag lang in Kammern oder unter Hauben bei Temperaturen bis 100 °C in möglichst feuchtigkeitsgesättigter Atmosphäre lagert<sup>1)</sup>. Bei der Wärmebehandlung wird die *Hydratation* des Zements und damit die Festigkeitsentwicklung beschleunigt. (Demgegenüber sind bei der *Dampfdruckhärtung* mit hochgespanntem Dampf, z. B. von 175 °C und 8 atü, in Druckkesseln die aus dem Kalk des Zements und der Kieselsäure

<sup>1)</sup>(Fußnote auf Seite 30)

des Zuschlagstoffs sich bildenden Kalksilikathydrate wesentlich an der Erhärtung beteiligt.)

Nach der Wärmebehandlung weist der Beton erst einen Bruchteil der bei Normallagerung nach längerer Zeit sich einstellenden Endfestigkeit auf. Daher soll auch wärmebehandelter Beton anschließend feucht gehalten werden, damit das für die weitere Erhärtung des Zements erforderliche Wasser zur Verfügung steht.

Zur Wärmebehandlung eines Betons gehören :

das Vorlagern, das Erwärmen auf die Höchsttemperatur, das Einwirken der Höchsttemperatur und das Abkühlen auf Normaltemperatur. Betone, die nach Vorlagern erwärmt werden, erlangen im allgemeinen eine höhere Frühfestigkeit als Betone, die unmittelbar nach Herstellung einer Wärmebehandlung ausgesetzt werden<sup>2)</sup>. Die vorteilhafte Wirkung der Vorlagerung kann vielleicht damit erklärt werden, daß sich hierbei die Hydratationsprodukte günstiger ausbilden als bei Einwirkung höherer Temperatur oder daß das Anmachwasser bei normaler oder gar bei niedriger Temperatur länger und damit tiefergehend auf das Zementkorn einwirken kann als bei höherer Temperatur. Dadurch stehen dann für die rasch verlaufende Erhärtung unter höherer Temperatur (Gelverfestigung) mehr Hydratationsprodukte zur Verfügung<sup>3)</sup>.

Für Portlandzemente ist eine Vorlagerung von 1,5 bis 3 h und für Hochofenzemente eine Vorlagerung bis zu 5 h förderlich<sup>1)</sup>. Die Vorlagerung kann um so kürzer sein, je früher der Zement erstarrt. Als Höchsttemperatur wird für Portlandzemente 75 °C und für Hochofenzemente 90 °C empfohlen<sup>1)</sup> <sup>2)</sup>.

Diese wenigen, der neueren Literatur entnommenen Hinweise sollen zeigen, daß zwischen dem zeitlichen Ablauf der Wärmebehandlung, der Temperaturhöhe und der Zusammensetzung des Zements Beziehungen bestehen.

---

<sup>1)</sup> Über die praktische Ausführung siehe z. B.:

Schäffler, H.: Dampfhärtung von Beton. Betonstein-Zeitung 23 (1957) H. 5, S. 305.

Schäffler, H.: Erfahrungen über die Wärmebehandlung von Beton. Betonstein-Zeitung 24 (1958) H. 9, S. 343.

Schäffler, H.: Allgemeine Empfehlungen für die Anwendung der Wärmebehandlung bis 100° C in Betonwerken. Merkblatt, herausgegeben vom Bundesverband der Betonsteinindustrie, Bonn, 1958.

Reinsdorf, S.: Die Dampfbehandlung des Betons. Silikatechnik 10 (1959) Nr. 11, S. 566.

<sup>2)</sup> Shideler, J. J., and W. H. Chamberlin: Early strength of concrete as affected by steam curing temperatures. Proc. Amer. Concr. Inst. 46 (1950) S. 273. — Czernin, W.: Betonhärtung bei höheren Temperaturen. Zement und Beton H. 2 (August 1955), S. 513.

<sup>3)</sup> Wie in einer noch zu veröfentlichenden Arbeit gezeigt wird, kann entsprechend durch anfängliche Lagerung bei niedrigerer Temperatur und anschließende Normallagerung oft eine höhere Endfestigkeit erreicht werden als durch dauernde Normallagerung.

Der Einfluß der *chemischen und mineralogischen Zusammensetzung des Zements* wurde bei vorausgegangenen Versuchen<sup>4)</sup> an Modellzementen, z. T. mit Zusatz von Hüttensand, mit kleinen Prismen 1 cm × 1 cm × 6 cm aus Normenmörtel untersucht. Die Prismen lagerten 6 h bei 20 °C, 4 h bei 20 °C bis 70 °C (Erwärmen) und dann 8 h bei 70 °C. Aus diesen Versuchen ergab sich u. a., daß für die Wärmebehandlung vornehmlich Zemente aus Klinkern mit hohem Tricalciumsilikat-Gehalt (C<sub>3</sub>S), niedrigen Tricalciumaluminat-Gehalt (C<sub>3</sub>A) und mit möglichst wenig freiem Kalk geeignet sind. Die Festigkeitsentwicklung von Klinker mit hohem C<sub>3</sub>A-Gehalt wurde bei Wärmebehandlung durch einen Zusatz von Hüttensand (granulierter Hochofenschlacke) verbessert. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden mit Mörteln aus Feinsand erhalten.

Die folgenden Versuche sollen einen Beitrag zur Frage des Einflusses der *Zusammensetzung des Zements* auf die Entwicklung der Festigkeit von Beton bei *verschiedener Wärmebehandlung* liefern<sup>5)</sup>.

Von den 6 Zementen waren die Zemente 1 bis 5 Portlandzemente; Zement 6 war ein Hochofenzement. Aus jedem der 6 Zemente wurde ein steifer und ein knapp weicher Beton mit Wasserzementwerten von 0,40 und 0,50 und einem Zementgehalt von rd. 320 kg/m<sup>3</sup> hergestellt. Das Zuschlaggemisch 0/15 mm war immer gleich. Für jeden Beton wurden 42 Probekörper 10 cm x 10 cm x 50 cm (insgesamt 504 Balken) gefertigt. Balken, die der Wärmebehandlung unterworfen wurden, erhärteten nach dem Füllen der Formen und einer 2stündigen Vorlagerung während 16 h bei Temperaturen bis 60 °C oder 80 °C, dann bis zur Prüfung in Wasser von 20 °C. Die Vergleichsbalken lagerten dauernd in Wasser von 20 °C.

Die wärmebehandelten Balken wurden nach 1 Tag, 28 und 90 Tagen auf Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft, die bei 20 °C gelagerten Balken nach 3, 28 und 90 Tagen. Für jede Untersuchung standen 3 Balken zur Verfügung, außerdem ein gleichzeitig hergestellter Balken mit einem Meßelement zur Steuerung des Temperaturverlaufs bei der Wärmebehandlung.

Durch Vergleich der Festigkeiten der Balken nach Erhärten bei höherer und bei normaler Temperatur wurde der Einfluß der Wärmebehandlung, abhängig vom Zement und Wasserzementwert, herausgestellt.

---

<sup>4)</sup> Narjes, A.: Über den Einfluß der Dampfbehandlung auf Zementklinker verschiedener Zusammensetzung. H. 21 der Schriftenreihe der Zementindustrie, Düsseldorf 1958; ferner Zement-Kalk-Gips 12 (1959) H. 4, S. 129.

<sup>5)</sup> Bei der Versuchsdurchführung waren Herr Dipl.-Ing. Wismer und bei der Zusammenstellung der Versuchsergebnisse Herr Dipl.-Ing. Dahms beteiligt.

## 2. Zemente und Zuschlagstoffe

Die Zemente wurden während der sich über längere Zeit hinziehenden Herstellung der Balken in luftdicht verschlossenen Hobbocks aufbewahrt. Jeder Zement wurde auf seine chemische Zusammensetzung untersucht und aus der Analyse der Portlandzemente der Gehalt an Klinkermineralien nach Bogue errechnet (siehe Tafel 1). Der Hochofenzement (Zement Nr. 6) enthielt rd. 70 % Hüttensand.

Die Zemente wurden ferner nach DIN 1164 geprüft und die Biegezug- und Druckfestigkeit außerdem nach dem RILEM-CEM-Prüfverfahren<sup>6)</sup> ermittelt. Die Feststellungen finden sich in Tafel 2. Das Zuschlaggemisch wurde aus den Korngruppen 1... 2 mm, 0 ... 3 mm, 3 ... 7 mm, 7 ... 15 mm (Rheinkiessand von Düsseldorf) sowie Normensand I (gemahlener Quarzsand bis rd. 0,2 mm) zusammengesetzt. Das Gemisch bestand aus folgenden Fraktionen:

bis 0,2	1	3	7	15 mm
4,3	19	39	63	100 %
Sand bis 7 mm				
6,8	30	62	100	— %

Die Sieblinie des Gemisches 0...15 mm ist in Bild 1 eingetragen; sie verläuft im besonders guten Bereich und liegt nahe der unteren Grenzsieblinie A15<sup>7)</sup>.

## 3. Herstellen der Betonbalken

Zement, trockener Zuschlag und Wasser wurden nach Gewicht zugegeben. Die einzelnen Mischungen, je rd. 45 l verdichteter Beton für je 7 Balken 10 cm x 10 cm x 50 cm, wurden in einem 50 l-Zwangsmischer 1,5 min lang gemischt. Die Betone mit dem Wasserzementwert 0,40 waren beim Schütten lose und ihr Feinmörtel war krümelig-feucht. Die Betone mit dem Wasserzementwert 0,50 fielen beim Schütten schollig, ihr Feinmörtel war teigig-weich. Für jede Mischung wurde zweimal das Verformungsmaß nach Powers (Anzahl der zur Verformung eines Betonkegelstumpfes erforderlichen Aufschläge<sup>8)</sup>) und bei den Betonen mit dem Wasserzementwert 0,50 zusätzlich das Ausbreitmaß nach DIN 1048 ermittelt.

<sup>6)</sup> Siehe Dutron, R.: Das RILEM-CEMBUREAU-Verfahren zur Prüfung der Festigkeit von Zement. Zement-Kalk-Gips 13 (1960) H. 2, S. 64. — Keil, F., und H. Mathieu: Prüfung von Zement nach dem RILEM-CEM-Verfahren. Zement-Kalk-Gips 13 (1960) H. 2, S. 70.

<sup>7)</sup> Siehe Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. Berlin 1953, Verlag Wilh. Ernst & Sohn, S. 13.

<sup>8)</sup> Siehe Walz, K. im Handbuch der Werkstoffprüfung, 3. Bd., 2. Aufl., Abschnitt VI, B, 3: Verarbeitungseigenschaften. Berlin 1957, Springer-Verlag, S. 408.

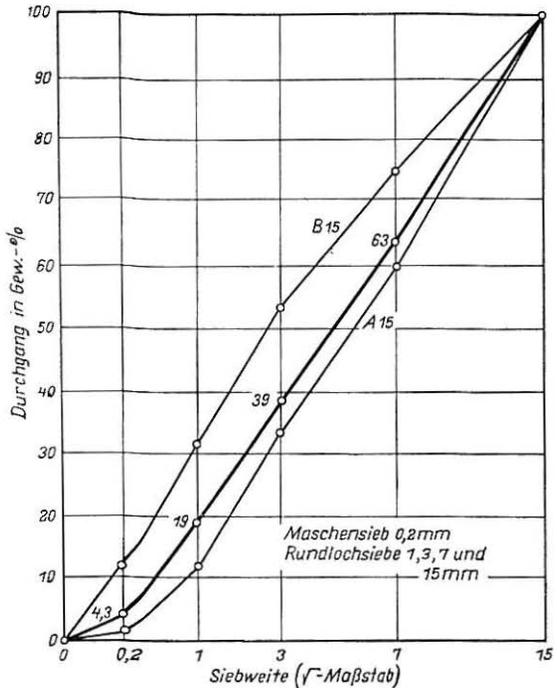


Bild 1 Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches (die Sieblinien A15 und B15 begrenzen den besonders guten Bereich)

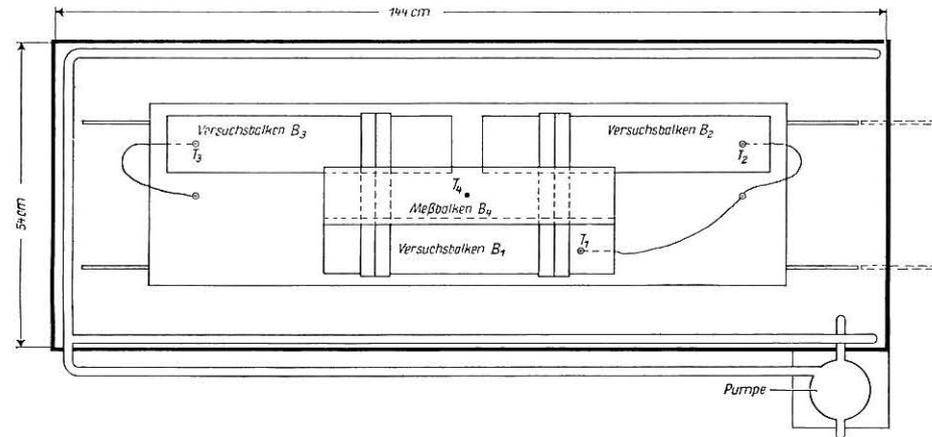
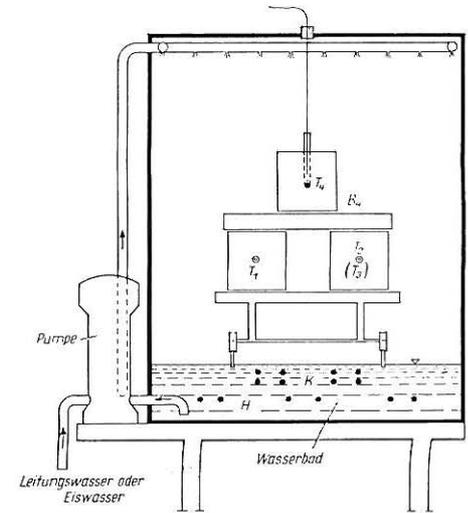
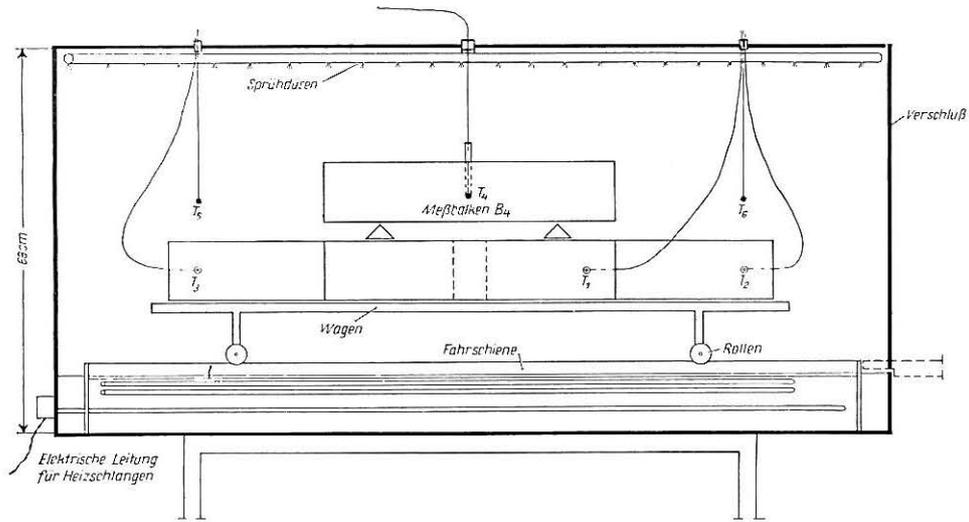
Die Temperatur des Frischbetons lag zwischen 18 und 24 °C. In Tafel 3 a sind die Mittelwerte für die Steifemaße sowie die Zusammensetzung von 1 m<sup>3</sup> frischem, verdichtetem Beton aufgeführt und in Tafel 3 b die Grenzwerte, die sich für die wiederholt hergestellten Mischungen des Betons fanden.

Der Beton wurde in die liegenden Stahlformen 10 cm x 10 cm x 50 cm unter Stochern eingefüllt und dann auf einem Rütteltisch, bei Beton mit dem Wasserzementwert 0,40 rd. 45 sec lang und bei Beton mit dem Wasserzementwert 0,50 rd. 18 sec lang, verdichtet (Schwingungsbreite der mit der Form belasteten Tischplatte 1,2 mm; Schwingungszahl 2800/min).

Der Beton mit Zement 4 wurde rd. 5 sec länger gerüttelt, weil er schwerer verdichtbar war. Unmittelbar nach dem Verdichten wurde der überstehende Beton an der oberen Fläche mit einem Stahllineal abgestrichen und geglättet.

In jeden der für die Wärmebehandlung vorgesehenen Balken wurde in der Mitte des Querschnitts, rd. 8 cm von einem Stirnende entfernt, ein Thermoelement einbetoniert ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  in Bild 2).

Die Flächen der Balken aus Beton mit dem Wasserzementwert 0,40 hatten an den Kanten ab und zu kleinere Hohlräume bis



- $T_1, T_2, T_3$  = Thermoelemente mit Leitung zum Sechsfarben-Schreiber  
 $T_4$  = Widerstandsthermometer im Steuerbalken mit Leitung zum Programmregler für die Steuerung der Temperatur des Wasserbades (Erwärmen oder Abkühlen)  
 $T_5, T_6$  = Thermoelemente zum Messen der Lufttemperatur  
 $H$  = Heizschlangen  
 $K$  = Kuhlischlangen

Bild 2 Schematische Darstellung der Wärmekammer

5 mm Durchmesser; die Balken aus dem Beton mit dem Wasserzementwert 0,50 waren geschlossen und wiesen nur vereinzelt kleine Luftporen auf.

## 4. Behandeln der Betonbalken

### 4.1 Wärmebehandlung

Für die Wärmebehandlung stand eine dichte Kammer aus Asbestzementplatten nach Bild 2 zur Verfügung, die 12 cm hoch mit Wasser angefüllt war. Das Wasser wurde durch elektrische Heizschlangen erwärmt oder durch Kühlschlangen mit kaltem Leitungswasser abgekühlt. Zum Abkühlen der Kammer konnte außerdem das Wasser aus dem Wasserbad oder besonders zugeführtes Eiswasser oben im Kasten versprüht werden.

Die gefüllten Formen für den 2., 4. und 6. Balken aus jeder Mischung wurden mit einer Plastikfolie abgedeckt und unmittelbar nach dem Herstellen in die Wärmekammer eingefahren (Versuchsbalken  $B_1, B_2, B_3$  in Bild 2). Dazu kam eine gleichzeitig gefüllte Balkenform  $B_4$ . In der Mitte des Betons der Form  $B_4$  war ein Reagenzglas mit Paraffinöl und dem Fühler (Widerstandsthermometer  $T_4$  in Bild 2) für einen Programmregler eingebettet<sup>9)</sup>. Durch den Programmregler wurden die Heiz- oder Kühlschlangen so betrieben, daß der im Beton vorgesehene Temperaturverlauf mit möglichst geringen Abweichungen eingehalten wurde. Der Verlauf der Betontemperatur in der Mitte der Balken  $B_1, B_2$  und  $B_3$  und die Lufttemperatur in der Kammer wurden für den Beton über die Thermoelemente  $T_1, T_2, T_3$  und für die Kammertemperatur über zwei Thermoelemente  $T_5$  und  $T_6$  mittels eines 6-Farbenschreibers festgehalten. Folgender Temperaturverlauf im Beton war anzustreben (siehe auch Bilder 3 und 4):

#### Wärmebehandlung bis 60 °C

- |          |                                       |
|----------|---------------------------------------|
| 2 h      | Vorlagern bei 20 °C in feuchter Luft, |
| 3 h 20 m | Temperaturanstieg von 20 auf 60 °C,   |
| 8 h 10 m | gleichbleibende Temperatur von 60 °C, |
| 3 h 30 m | Abkühlen von 60 auf 40 °C,            |
| 1 h      | Abkühlen von 40 auf 20 °C.            |

Die Temperatur der Balken lag also 16 h lang über 20 °C. Das Produkt aus den Temperaturen über 20 °C und der Wirkungsdauer dieser Temperaturen in den Balken ergibt sich zu 508 Grad-Stunden.

#### Wärmebehandlung bis 80 °C

- |     |                                       |
|-----|---------------------------------------|
| 2 h | Vorlagen bei 20 °C,                   |
| 5 h | Temperaturanstieg von 20 auf 80 °C,   |
| 3 h | gleichbleibende Temperatur von 80 °C, |
| 7 h | Abkühlen von 80 auf 40 °C,            |
| 1 h | Abkühlen von 40 auf 20 °C.            |

<sup>9)</sup> Wärmeleitzahl des Paraffinöls  $\lambda = 0,22 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$ .

Tafel 1 Chemische Analyse der Zemente

Bestandteile in %	Zement 1		Zement 2		Zement 3		Zement 4		Zement 5		Zement 6		
		g <sup>1)</sup>											
Unlösliches	0,14	0,14	0,21	0,21	0,78	0,79	0,16	0,16	0,14	0,14	0,57	0,57	
SiO <sub>2</sub>	20,82	21,05	19,05	19,34	21,24	21,45	24,30	24,56	21,39	21,57	27,52	27,76	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	}	6,71	6,78	7,04	7,15	5,47	5,52	4,37	4,42	4,16	4,20	10,62	10,71
TiO <sub>2</sub>													
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>													
FeO	}	2,67	2,70	3,59	3,65	2,35	2,37	1,39	1,40	6,69	6,75	1,20	1,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>													
MnO													
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,07	0,08	0,08	0,02	0,02	0,07	0,07	0,19	0,19			
CaO	64,61		62,89		64,31		65,75		33,39		50,66		
MgO	1,27	1,28	1,70	1,73	1,38	1,39	0,71	0,72	0,65	0,66	4,50	4,54	
SO <sub>3</sub>	2,00		2,68		2,03		1,57		2,51		2,17		
S											0,89		
Glühverlust	1,07		1,52		0,98		1,04		0,85		0,88		
nicht best. Rest	0,64	0,65	1,24	1,26	1,44	1,46	0,64	0,65	0,03	0,03	1,36	1,37	
Summe	100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,44		
CaS											2,00	2,02	
CaSO <sub>4</sub>	3,40	3,44	4,56	4,63	3,45	3,48	2,67	2,70	4,27	4,31	3,68	3,71	
Freier Kalk <sup>2)</sup>	1,27	1,28	1,29	1,31	1,03	1,04	1,65	1,67	0,64	0,65	0,60	0,61	
Kalk (Rest)	61,94	62,61	59,72	60,64	61,86	62,48	63,00	63,05	60,99	61,50	47,00	47,43	
Summe		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00	

Klinkerminerale, errechnet nach Bogue

C <sub>3</sub> A	13	12	10	9	0	—
C <sub>2</sub> S	45	46	50	40	47	—
C <sub>1</sub> S	26	20	23	39	26	—
C <sub>1</sub> AF	8	11	7	4	20	—
C <sub>2</sub> F	—	—	—	—	0,6	—

1) glühverlustfrei 2) CaO + Ca(OH)<sub>2</sub>

Tafel 2 Prüfung der Zemente

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Zement		Erstarren		Rückstand Sieb 0,09 mm %	Spez. Oberfläche (Blaine) cm <sup>2</sup> /g	Biegezugfestigkeit in kg/cm <sup>2</sup>						Druckfestigkeit in kg/cm <sup>2</sup>					
Nr.	Art	Beginn	Ende			DIN 1164			CEM-Verfahren			DIN 1164			CEM-Verfahren		
						3	7	28	3	7	28 Tg.	3	7	28	3	7	28 Tg.
1	PZ	3 h 40 m	5 h 00 m	7,8	2790	43	65	79	54	67	82	225	336	487	263	381	527
2	PZ	3 h 50 m	5 h 50 m	6,0	3188	52	68	85	60	69	78	264	357	477	304	384	488
3	PZ	4 h 10 m	5 h 50 m	3,6	3168	42	56	76	49	63	74	184	269	426	220	340	484
4	PZ	3 h 40 m	5 h 05 m	4,0	3250	39	57	85	46	62	85	187	320	603	227	348	625
5	PZ	3 h 50 m	5 h 50 m	1,6	3300	43	53	86	43	56	88	186	250	467	207	276	526
6	HOZ	4 h 10 m	5 h 45 m	0,3	4410	39	68	82	49	70	97	172	283	488	226	361	590

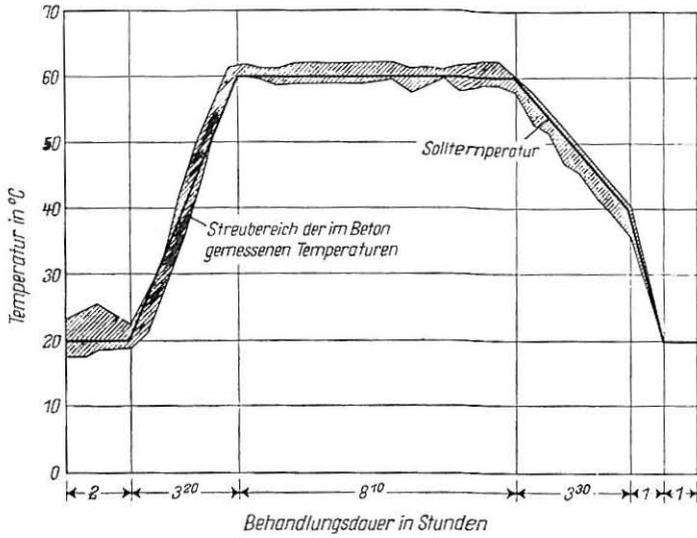


Bild 3 Verlauf der Temperatur im Beton bei der Wärmebehandlung bis  $60^{\circ}\text{C}$  (Messstellen  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  in Bild 2)

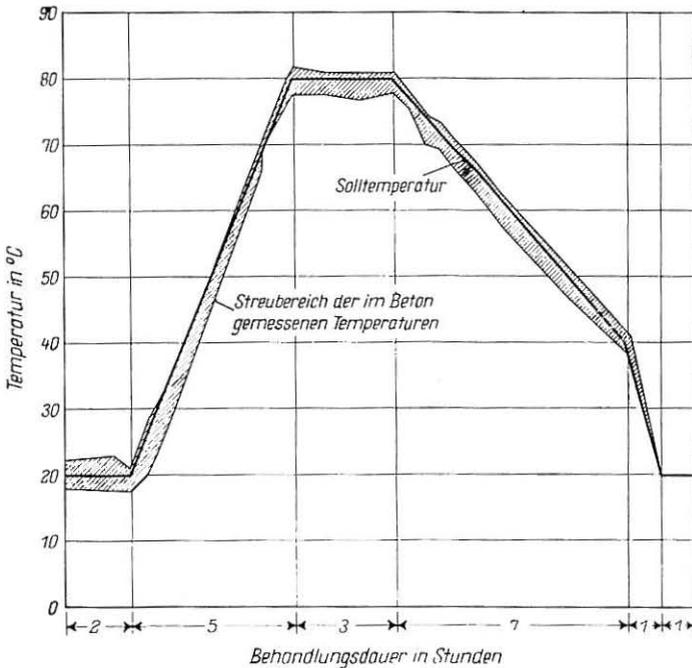


Bild 4 Verlauf der Temperatur im Beton bei der Wärmebehandlung bis  $80^{\circ}\text{C}$  (Messstellen  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  in Bild 2)

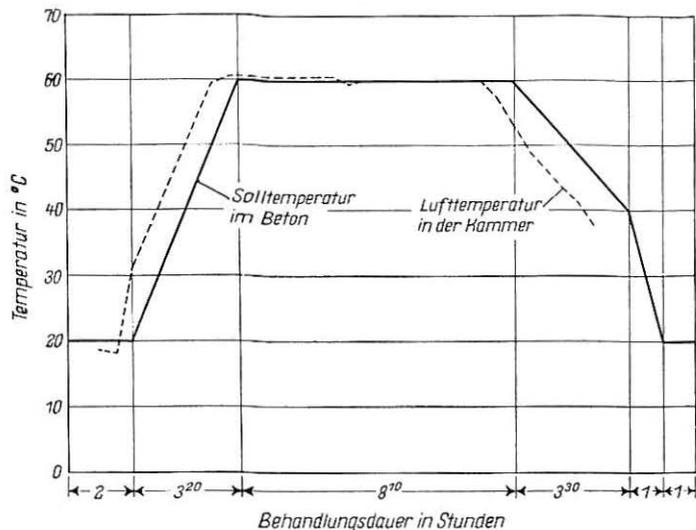


Bild 5 Beispiel für den Verlauf der Lufttemperatur in der Kammer, gemessen mit den Thermoelementen  $T_5$ ,  $T_6$  (siehe Bild 2)

Die Temperatur der Balken lag 16 h lang über 20 °C. Das Produkt aus den Temperaturen über 20 °C und der Wirkungs-dauer dieser Temperaturen in den Balken ergibt sich zu 620 Grad-Stunden.

Der vorgesehene Temperaturverlauf (Solltemperatur) und der Streubereich der Betontemperaturen aller Balken sind in den Bildern 3 und 4 wiedergegeben. Die Betontemperaturen wichen vom verlangten Sollwert mit einzelnen Extremwerten um etwa  $\pm 5$  °C ab. Die Lufttemperatur in der Kammer lag beim Aufheizen naturgemäß etwas höher als die Solltemperatur des Betons und beim Abkühlen etwas darunter. Die Unterschiede im Temperaturverlauf der Luft waren bei den einzelnen Beschikungen der Kammer gering, ein kennzeichnendes Beispiel hierfür ist in Bild 5 wiedergegeben. Der vorgesehene starke Temperaturabfall im Beton am Ende der letzten Stunde des Abkühlens konnte durch Kühlen des Wassers im Wasserbecken und Versprühen von Wasser nicht erreicht werden. Die Formen wurden deshalb bei etwa 35 °C aus der Kammer genommen und in Wasser von 35 °C gelagert, das in der noch verbleibenden Zeit fortschreitend auf 20 °C abgekühlt wurde. Danach wurden die Balken entformt und bis zur Prüfung im Alter von 1 Tag, 28 oder 90 Tagen in Wasser von 20 °C gelagert.

#### 4.2 Lagerung bei 20 °C (Normallagerung)

Die bei 20 °C zu lagernden Balken 1, 3 und 5 jeder Mischung blieben 24 h unter einer Plastikfolie und feuchten Tüchern in der Form; sie wurden dann entformt und bis zur Prüfung nach 3, 28 und 90 Tagen in Wasser von 20 °C gelagert.

Tafel 3a Zusammensetzung des Betons (Mittelwerte)

1	2	3	4	5	1 m <sup>3</sup> frischer, verdichteter Beton enthielt		
					Zement kg	Gestein kg	Wasser kg
Zement	Mischung Nr.	Wasserzementwert	Zahl der Aufschläge <sup>1)</sup>	Ausbreitmaß <sup>2)</sup> cm			
1	1 ... 6	0,40	23	—	320	1950	128
	7 ... 12	0,50	14	39	321	1906	160
2	1 ... 6	0,40	22	—	319	1943	128
	7 ... 12	0,50	13	39	324	1881	162
3	1 ... 6	0,40	24	—	326	1954	130
	7 ... 12	0,50	13	39	327	1901	163
4	1 ... 6	0,40	23	—	319	1915	128
	7 ... 12	0,50	15	39	319	1876	161
5	1 ... 6	0,40	23	—	324	1943	130
	7 ... 12	0,50	13	39	326	1896	163
6	1 ... 6	0,40	22	—	322	1929	129
	7 ... 12	0,50	12	37	326	1894	163

1) Verformungsgerät nach Powers

2) Ausbreittisch nach DIN 1048

## 5. Ermittlung der Biegezug- und der Druckfestigkeit des Betons

Bei der Biegeprüfung wurden die 50 cm langen Balken bei 30 cm Auflagerentfernung durch eine Schneide in der Mitte belastet. Die Last griff auf der an dieser Stelle eben geschliffenen oberen Herstellungsfläche an. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug rd. 22 kg/sec, das entsprach einer Steigerung der Biegebeanspruchung von rd. 1 kg/cm<sup>2</sup> je sec. Jedes der beiden rd. 25 cm langen Bruchstücke wurde dann in der Mitte zwischen zwei geschliffenen, 10 cm breiten Stahlplatten auf Druckfestigkeit geprüft. Dabei wirkte der um 2 ... 3 kg/cm<sup>2</sup> in 1 sec gesteigerte Druck auf die bei der Herstellung seitlich gelegenen Flächen der Balken. (Die ermittelte Druckfestigkeit entspricht etwa der von Würfeln mit 10 cm Kantenlänge.)

Für jeden Beton, jede Lagerung und Altersstufe wurden mit 3 Balken 3 Prüfwerte für die Biegezugfestigkeit und 6 für die Druckfestigkeit erhalten.

In den Tafeln 4 a und 4 b sind die Mittelwerte der Raumgewichte sowie der Festigkeiten eingetragen. Außerdem wurden die Biegezugfestigkeit B und die Druckfestigkeit D nach Wärmebehandlung bei 60 und 80 °C zu den zugehörigen Festigkeiten nach Lagerung bei 20 °C ins Verhältnis gesetzt (Werte B 60/B 20, D 60/D 20, B 80/B 20 und D 80/D 20). Die Festigkeiten im Alter von 1 Tag nach Wärmebehandlung wurden auf die 3 Tage-Festigkeiten nach Lagerung bei 20 °C bezogen.

In den Bildern 6 bis 17 sind für jeden Zement getrennt alle Feststellungen übersichtlich wiedergegeben. Zum Beispiel findet sich

Tafel 3b Zusammensetzung des Betons (Grenzwerte)

Zement	Mischung Nr.	Zahl der Aufschläge	Ausbreitmaß cm	1 m <sup>3</sup> frischer, verdichteter Beton enthält			
				wog kg	Zement kg	Gestein kg	Wasser kg
1	1 bis 6	21 bis 28	—	2390 bis 2410	319 bis 322	1943 bis 1959	128 bis 129
	7 bis 12	13 bis 15	39	2380 bis 2400	313 bis 327	1891 bis 1926	156 bis 163
2	1 bis 6	21 bis 23	—	2390 bis 2400	319 bis 320	1943 bis 1952	128
	7 bis 12	13 bis 14	38 bis 39	2360 bis 2380	323 bis 325	1876 bis 1883	161 bis 162
3	1 bis 6	21 bis 25	—	2400 bis 2410	325 bis 326	1945 bis 1954	130
	7 bis 12	11 bis 14	38 bis 41	2380 bis 2410	326 bis 330	1891 bis 1915	163 bis 165
4	1 bis 6	22 bis 24	—	2350 bis 2380	318 bis 322	1905 bis 1929	127 bis 129
	7 bis 12	14 bis 15	38 bis 40	2360	323	1876	161
5	1 bis 6	22 bis 24	—	2390 bis 2410	323 bis 326	1938 bis 1954	129 bis 130
	7 bis 12	13 bis 14	38 bis 39	2370 bis 2400	325 bis 328	1883 bis 1908	162 bis 164
6	1 bis 6	21 bis 23	—	2370 bis 2390	320 bis 323	1922 bis 1938	128 bis 129
	7 bis 12	11 bis 14	36 bis 39	2380 bis 2390	326 bis 327	1891 bis 1900	163

für den Beton aus Zement 1 die Biegezugfestigkeit in Bild 6 und die Druckfestigkeit in Bild 7 aufgetragen. Das obere Diagramm gilt jeweils für die Festigkeiten des steifen Betons mit dem Wasserzementwert 0,40 und das untere Diagramm für den knapp weich angemachten Beton mit dem Wasserzementwert 0,50.

Da die Festigkeiten nach der Wärmebehandlung bei 60 und 80 °C etwa gleich groß waren und sich höchstens in der Größenordnung von Versuchsstreuungen unterschieden, ist

Tafel 4a Raumgewicht, Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit des Betons (Mittelwerte) Verhältnismerte der Festigkeit nach Wärmebehandlung bei 60 °C und 80 °C zur Festigkeit nach Normallagerung (Lagerung in Wasser von 20 °C)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Ze- ment	W Z	Prüf- alter (Tage)	Mischung Nr.	Raumgewicht kg/dm <sup>3</sup>				Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>			Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>			Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>			Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>				
				Mischung 1, 2, 3, 7, 8, 9		Mischung 4, 5, 6, 10, 11, 12		60°	20°	60°	20°	B 60° <sup>1)</sup> B 20°	60°	20°	D 60° <sup>1)</sup> D 20°	80°	20°	B 80° <sup>1)</sup> B 20°	80°	20°	D 80° <sup>1)</sup> D 20°
				60°	20°	80°	20°														
1	0,40	1/3	1 u. 4	2,40	2,41	2,41	2,42	60	62	0,97	353	384	0,92	53	62	0,85	352	375	0,94		
		28	2 u. 5	2,41	2,42	2,41	2,42	64	75	0,85	508	610	0,83	64	75	0,85	470	589	0,80		
		90	3 u. 6	2,41	2,41	2,40	2,42	64	76	0,84	516	628	0,82	72	77	0,94	545	644	0,85		
	0,50	1/3	7 u. 10	2,38	2,38	2,40	2,40	44	45	0,98	281	241	1,16	45	43	1,05	288	269	1,07		
		28	8 u. 11	2,41	2,42	2,39	2,40	64	70	0,91	418	510	0,82	54	63	0,86	396	474	0,84		
		90	9 u. 12	2,39	2,39	2,39	2,40	65	70	0,93	445	526	0,85	67	70	0,96	456	539	0,85		
2	0,40	1/3	1 u. 4	2,39	2,40	2,40	2,41	53	66	0,80	342	401	0,85	45	60	0,75	346	405	0,85		
		28	2 u. 5	2,39	2,40	2,37	2,39	58	68	0,85	442	538	0,82	53	66	0,80	422	533	0,79		
		90	3 u. 6	2,39	2,39	2,40	2,41	55	63	0,87	509	580	0,88	53	62	0,86	501	583	0,86		
	0,50	1/3	7 u. 10	2,36	2,38	2,37	2,37	42	51	0,82	244	277	0,88	38	53	0,72	246	298	0,83		
		28	8 u. 11	2,36	2,38	2,38	2,38	55	65	0,85	342	460	0,74	51	65	0,78	350	436	0,80		
		90	9 u. 12	2,39	2,40	2,38	2,37	57	62	0,92	379	502	0,76	53	65	0,82	393	494	0,80		
3	0,40	1/3	1 u. 4	2,41	2,40	2,38	2,41	47	56	0,84	314	332	0,95	47	56	0,84	316	321	0,98		
		28	2 u. 5	2,40	2,41	2,39	2,42	64	72	0,89	454	538	0,84	59	72	0,82	462	524	0,88		
		90	3 u. 6	2,42	2,42	2,41	2,40	72	81	0,89	586	648	0,90	69	79	0,87	581	622	0,93		
	0,50	1/3	7 u. 10	2,39	2,41	2,39	2,39	38	43	0,88	214	209	1,02	39	39	1,00	226	210	1,09		
		28	8 u. 11	2,39	2,40	2,40	2,39	54	62	0,87	349	418	0,83	54	66	0,82	362	431	0,84		
		90	9 u. 12	2,42	2,42	2,40	2,40	67	68	0,98	483	532	0,91	63	73	0,86	502	526	0,95		

<sup>1)</sup> In den Bildern 1 bis 11 mit W/20° bezeichnet

Tafel 4b Raumgewicht, Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit des Betons (Mittelwerte) Verhältniswerte der Festigkeit nach Wärmebehandlung bei 60 °C und 80 °C zur Festigkeit nach Normallagerung (Lagerung in Wasser von 20 °C)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Zement	W Z	Prüf- aller (Tage)	Mischung Nr.	Raumgewicht kg/dm <sup>3</sup>				Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>			Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>			Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>			Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>		
				Mischung 1, 2, 3, 7, 8, 9		Mischung 4, 5, 6, 10, 11, 12													
				60°	20°	80°	20°	60°	20°	B 60° <sup>1)</sup>	60°	20°	D 60° <sup>1)</sup>	80°	20°	B 80° <sup>1)</sup>	80°	20°	D 80° <sup>1)</sup>
										B 20°			D 20°						
4	0,40	1/3	1 u. 4	2,36	2,36	2,36	2,35	55	51	1,08	358	330	1,08	51	47	1,09	408	352	1,16
		28	2 u. 5	2,36	2,37	2,34	2,35	66	69	0,96	573	653	0,88	63	66	0,96	572	674	0,85
		90	3 u. 6	2,36	2,36	2,38	2,39	75	85	0,88	631	734	0,86	75	76	0,99	676	773	0,87
	0,50	1/3	7 u. 10	2,37	2,37	2,37	2,38	40	37	1,08	238	211	1,13	42	38	1,10	272	219	1,24
		28	8 u. 11	2,36	2,38	2,38	2,37	68	73	0,93	487	570	0,85	73	72	1,01	506	576	0,88
		90	9 u. 12	2,39	2,39	2,39	2,39	76	74	1,03	575	684	0,84	76	77	0,99	568	662	0,86
5	0,40	1/3	1 u. 4	2,39	2,40	2,39	2,40	55	56	0,98	331	344	0,96	53	57	0,93	350	350	1,00
		28	2 u. 5	2,41	2,41	2,40	2,41	78	81	0,96	639	653	0,98	80	83	0,96	639	647	0,99
		90	3 u. 6	2,39	2,42	2,40	2,41	84	88	0,96	740	735	1,01	82	83	0,99	726	735	0,99
	0,50	1/3	7 u. 10	2,39	2,39	2,39	2,39	40	41	0,98	211	241	0,88	38	38	1,00	222	217	1,02
		28	8 u. 11	2,39	2,41	2,39	2,39	71	70	1,01	494	471	1,05	69	68	1,01	606	463	1,09
		90	9 u. 12	2,41	2,41	2,40	2,40	80	78	1,02	601	614	0,98	77	82	0,94	637	625	1,02
6	0,40	1/3	1 u. 4	2,38	2,40	2,39	2,39	53	51	1,04	355	291	1,22	52	53	0,98	387	305	1,27
		28	2 u. 5	2,39	2,40	2,39	2,40	79	75	1,05	548	603	0,91	73	69	1,06	544	578	0,94
		90	3 u. 6	2,40	2,40	2,39	2,40	89	86	1,03	591	638	0,93	84	86	0,98	599	660	0,91
	0,50	1/3	7 u. 10	2,38	2,36	2,38	2,38	35	38	0,92	223	187	1,19	42	39	1,08	256	196	1,31
		28	8 u. 11	2,38	2,39	2,38	2,39	69	70	0,98	420	482	0,87	66	69	0,96	471	476	0,99
		90	9 u. 12	2,40	2,40	2,39	2,39	76	75	1,01	490	541	0,91	75	74	1,01	504	553	0,91

1) In den Bildern 12 bis 17 mit W/20° bezeichnet.

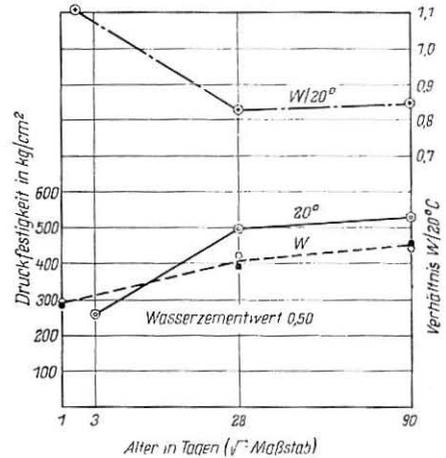
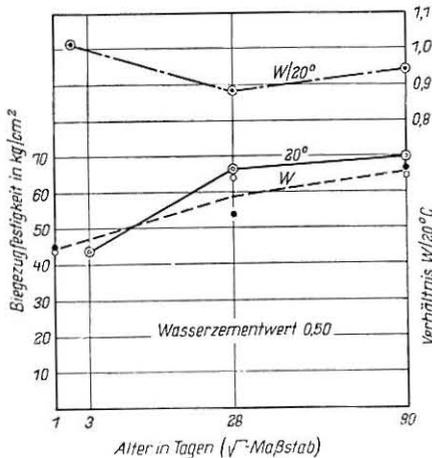
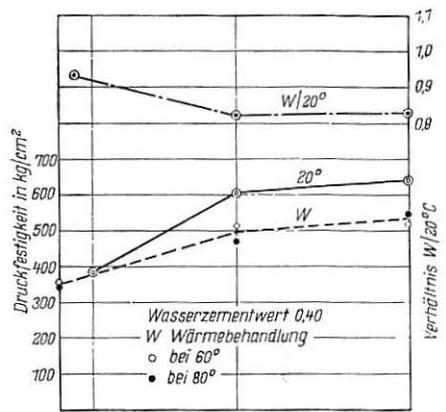
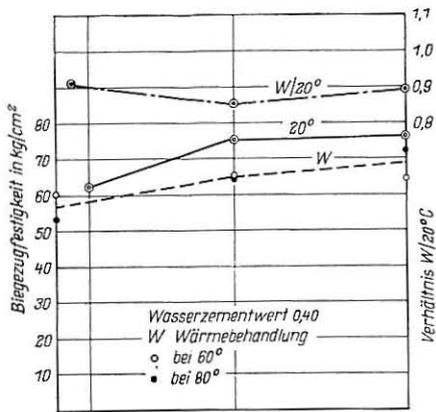


Bild 6 Biegezugfestigkeit des Betons aus Zement 1 in verschiedenem Alter

Bild 7 Druckfestigkeit des Betons aus Zement 1 in verschiedenem Alter

für diese Prüfwerte eine mittlere Bezugslinie „W“ eingezeichnet worden. Die Verbindungslinie der Prüfwerte nach 20 °C ist mit „20°“ und die Verbindungslinie des Verhältniswertes der Festigkeiten „W“ nach Wärmebehandlung zu den Festigkeiten nach der 20 °C-Lagerung durch „W/20°“ gekennzeichnet worden. („W/20°“ entspricht den Werten B 60/B 20 ... D 80/D 20 in den Tafeln 4 a und 4 b.) Die Größe des Verhältniswertes „W/20°“ ist an der rechten Ordinate oben abzulesen. Liegen die Verhältniswerte unter der 1,00-Ordinate, so sind die Festigkeiten nach der Wärmebehandlung kleiner ausgefallen als nach Normlagerung bei 20 °C. Werte „W/20°“ über 1,00 finden sich, wenn die Festigkeit nach der Wärmebehandlung größer war als nach der 20 °C-Lagerung.

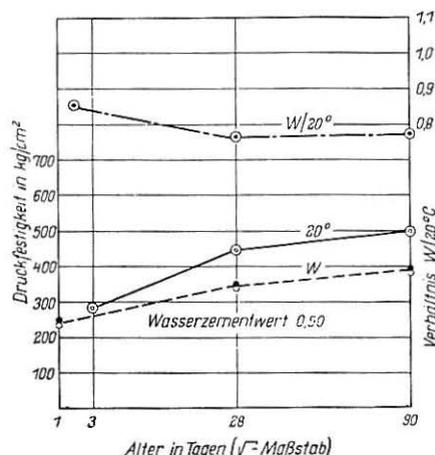
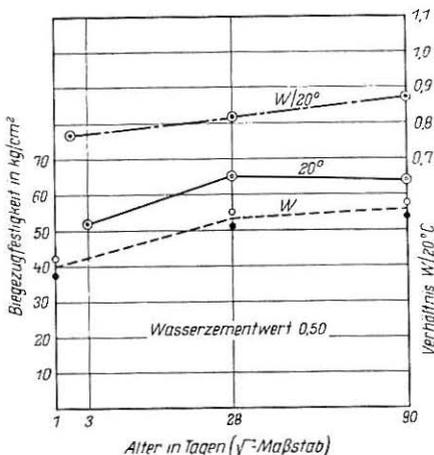
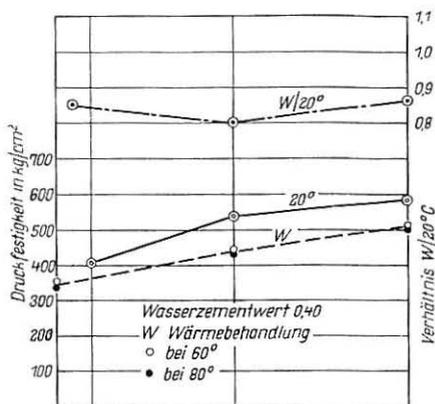
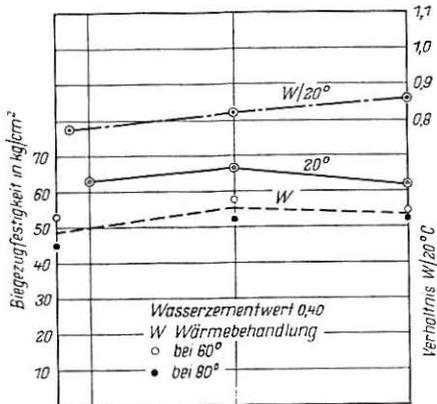


Bild 8 Biegezugfestigkeit des Betons aus Zement 2 in verschiedenem Alter

Bild 9 Druckfestigkeit des Betons aus Zement 2 in verschiedenem Alter

## 6. Erörterung der Feststellungen

### 6.1 Eigenschaften der Zemente

Die unterschiedliche Zusammensetzung der 5 Portlandzemente (Nr. 1 ... 5) drückt sich im Gehalt der errechneten Klinkerminerale aus. Man kann die Zemente hiernach etwa wie folgt kennzeichnen.

#### Zemente 1 und 2:

C<sub>3</sub>A-Gehalt rd. 13 Gew.-%

C<sub>3</sub>S-Gehalt rd. 45 Gew.-%

C<sub>2</sub>S-Gehalt 26 bzw. 20 Gew.-%

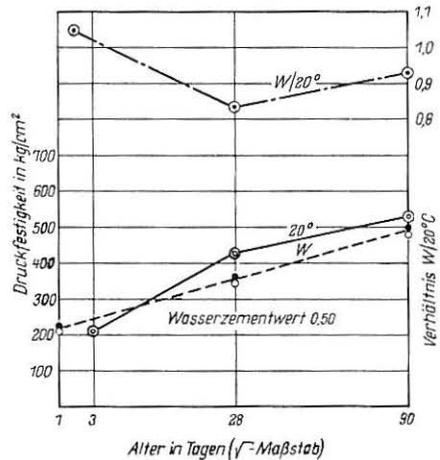
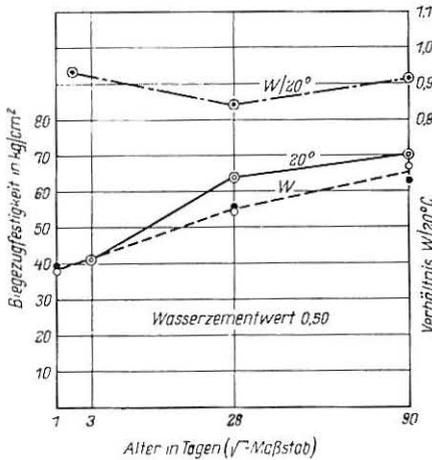
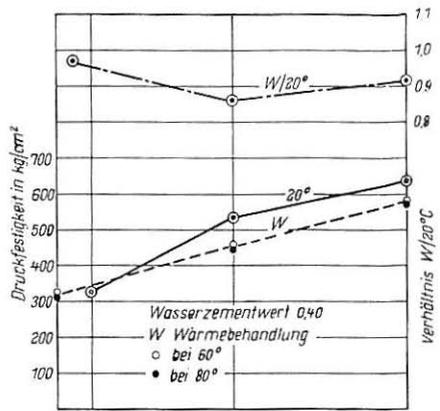
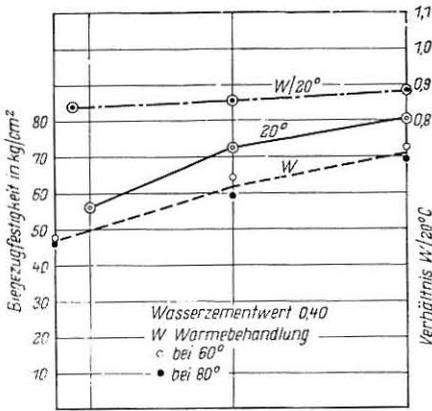


Bild 10 Biegezugfestigkeit des Betons aus Zement 3 in verschiedenem Alter

Bild 11 Druckfestigkeit des Betons aus Zement 3 in verschiedenem Alter

### Zement 3:

Der  $C_3A$ -Gehalt (rd. 9 Gew.-%) und der  $C_3S$ -Gehalt (rd. 40 Gew.-%) mit rd. 50 Gew.-% etwas höher als bei den Zementen 1 und 2.

### Zement 4:

Der  $C_3A$ -Gehalt (rd. 9 Gew.-%) und der  $C_3S$ -Gehalt (rd. 40 Gew.-%) sind deutlich kleiner als bei den Zementen 1 und 2. Der  $C_2S$ -Gehalt ist bei diesem Zement mit rd. 39 Gew.-% am größten und etwa ebenso groß wie der  $C_3S$ -Gehalt.

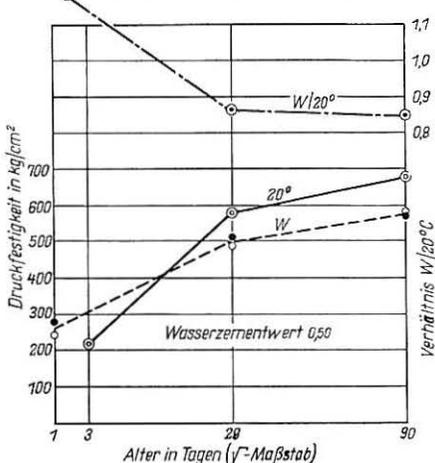
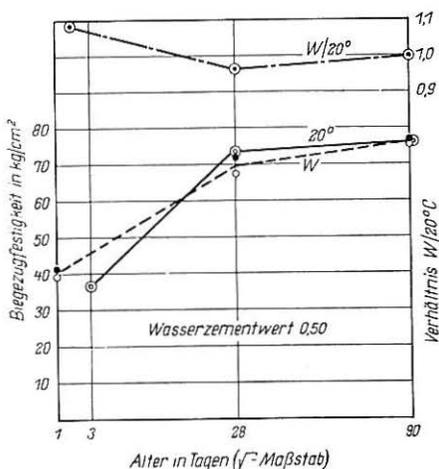
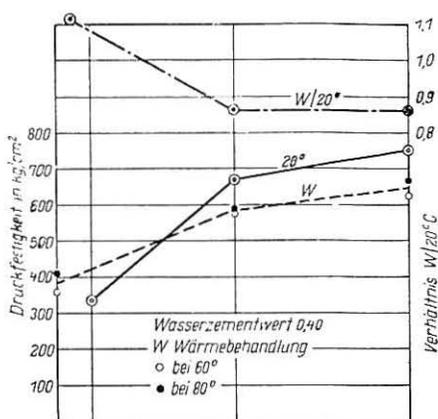
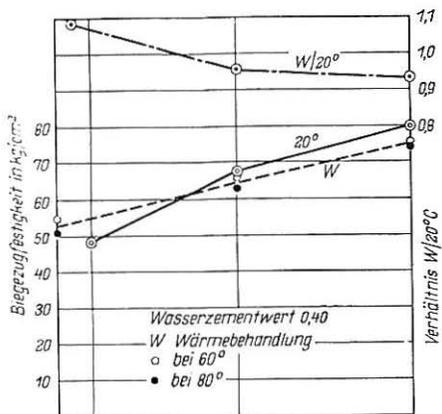


Bild 12 Biegezugfestigkeit des Betons aus Zement 4 in verschiedenem Alter

Bild 13 Druckfestigkeit des Betons aus Zement 4 in verschiedenem Alter

### Zement 5:

Der Zement enthält rechnerisch kein  $C_3A$ ; der  $C_3S$ -Gehalt unterscheidet sich nicht wesentlich von dem der Zemente 1, 2 und 3, und der  $C_2S$ -Gehalt ist mit 26 Gew.-% so groß wie bei Zement 1.

Der Gehalt an freiem Kalk, der die Festigkeiten des Betons bei der Wärmebehandlung beeinflussen kann, fand sich für die Zemente 1, 2 und 3 im Mittel zu rd. 1,2 Gew.-%; er war beim Zement 4 mit rd. 1,7 Gew.-% am größten und bei den Zementen 5 und 6 mit rd. 0,6 Gew.-% am kleinsten.

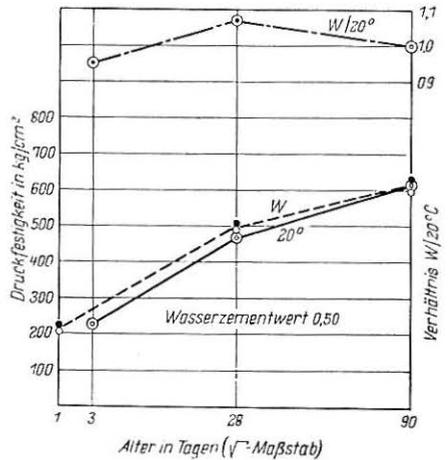
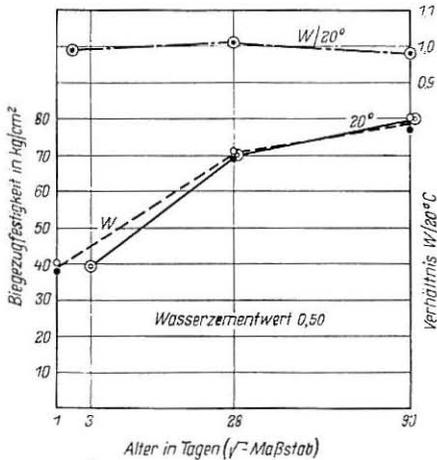
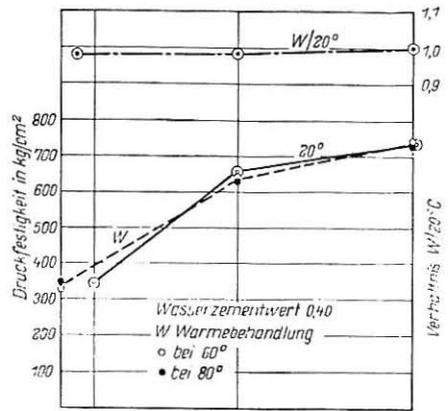
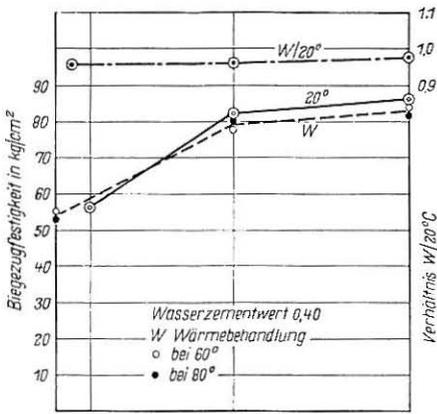


Bild 14 Biegezugfestigkeit des Betons aus Zement 5 in verschiedenem Alter

Bild 15 Druckfestigkeit des Betons aus Zement 5 in verschiedenem Alter

Von den in Tafel 2 aufgeführten Ergebnissen der mechanischen Prüfung seien die Erstarrungsverhältnisse, die Mahlfeinheit und die Festigkeit, insbesondere die Anfangsfestigkeit, angeführt, weil auch festgestellt werden soll, ob diese Eigenschaften sich irgendwie auf die Festigkeit des wärmebehandelten Betons auswirken.

Die Erstarrungszeit der 6 Zemente war nur wenig verschieden, ebenso die Mahlfeinheit (Blaine) der Zemente 2, 3, 4 und 5 einer spezifischen Oberfläche von rd. 3230 cm<sup>2</sup>/g. Etwas gröber gemahlen war Zement 1 (2790 cm<sup>2</sup>/g) und wesentlich feiner der Hochofenzement (4410 cm<sup>2</sup>/g).

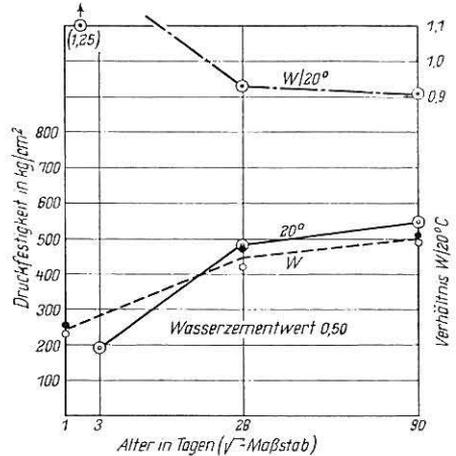
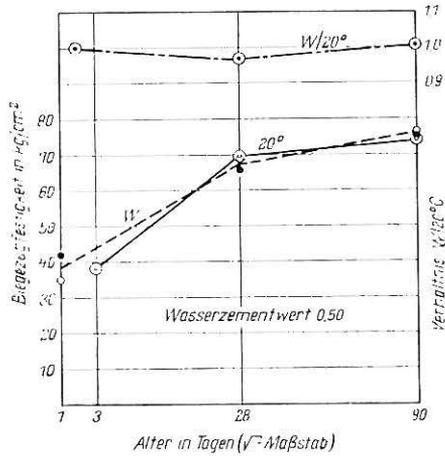
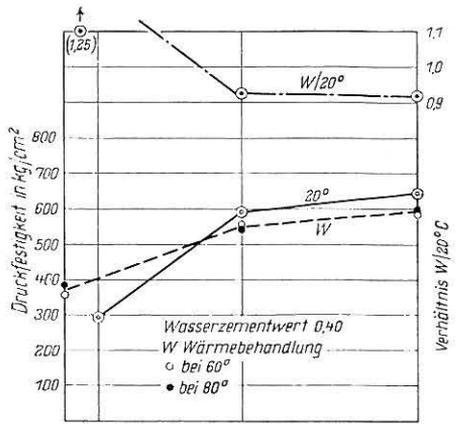
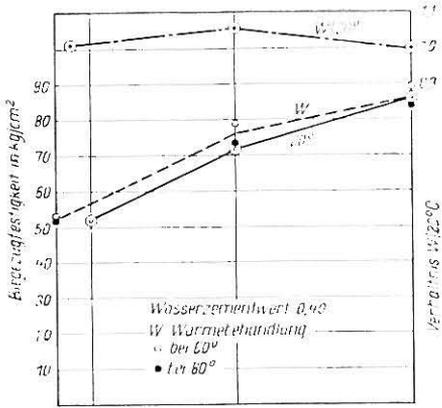


Bild 16 Biegezugfestigkeit des Betons aus Zement 6 in verschiedenem Alter

Bild 17 Druckfestigkeit des Betons aus Zement 6 in verschiedenem Alter

Im Alter von 3 Tagen wurde bei der Prüfung nach DIN 1164 die höchste Festigkeit mit Zement 2 erhalten. Seine Biegezugfestigkeit lag um rd. 27 % und seine Druckfestigkeit um rd. 45 % über dem Mittel der entsprechenden Festigkeiten der Zemente 3, 4, 5 und 6, die sich in der 3 Tage-Festigkeit weniger unterschieden. Von den 3 Tage-Festigkeiten des Zements 1 war die Druckfestigkeit um etwa 24 % höher als die der Zemente 3, 4, 5 und 6, die Biegezugfestigkeit dagegen etwa gleich groß.

Nach 28 Tagen fand sich bei der Prüfung nach DIN 1164 die Biegezugfestigkeit aller 6 Zemente zwischen 76 und 86 kg/cm<sup>2</sup>, im Mittel zu 82 kg/cm<sup>2</sup>, also nur noch mit verhältnismäßig ge-

ringem Unterschied. Dies gilt, wenn Zement 4 ausgenommen wird, auch für die Druckfestigkeit der Zemente, die zwischen 426 und 488 kg/cm<sup>2</sup> lag (Mittel 469 kg/cm<sup>2</sup>). Zement 4, der sich durch seinen hohen C<sub>2</sub>S-Gehalt auszeichnete, erhärtete, wie zu erwarten war, zwischen 3 und 28 Tagen am stärksten nach und erreichte mit 603 kg/cm<sup>2</sup> die höchste 28 Tage-Festigkeit.

In Tafel 5 sind die oben herausgestellten Eigenschaften, nach denen sich die Zemente im wesentlichen unterscheiden und die für eine Wärmebehandlung Bedeutung haben können, zusammengefaßt.

Tafel 5 Zusammenfassung kennzeichnender Eigenschaften der Zemente (gerundete Werte)

Zement	Zusammensetzung					Feinheit (Blaine) cm <sup>2</sup> /g	3 Tage-Festigkeit kg/cm <sup>2</sup>	
	C <sub>1</sub> A %	C <sub>2</sub> S %	C <sub>2</sub> S %	Schlacke %	Freier Kalk %		B <sup>1)</sup>	D <sup>1)</sup>
1	13	45	26			2790	43	225 (+ 24%)
2			20		1,2		52 (+ 27%)	264 (+ 45%)
3	10	50	23				3230	
4	9	40	39		1,7	41 (100%)		182 (100%)
5	0	47	26			4410		
6	—	—	—	70	0,6			

<sup>1)</sup> B = Biegezugfestigkeit, D = Druckfestigkeit nach DIN 1164

## 6.2 Betonzusammensetzung und Wirkung der Wärmebehandlung

Wenn von der Verschiedenheit der Zemente abgesehen wird, unterscheiden sich die Mischungen praktisch nur durch den Wasserzementwert (0,40 und 0,50). Es soll daher zunächst untersucht werden, ob sich für den Beton mit den Wasserzementwerten von 0,40 und 0,50 die Wärmebehandlung bei 60 oder 80 °C verschieden auf die Festigkeit auswirkte. Ein Vergleich ist unter Benutzung der Verhältniszerte 60 °C/20 °C und 80 °C/20 °C aus den Tafeln 4 a und 4 b möglich. Zum Beispiel verhalten sich mit Zement 1 die Biegezugfestigkeiten beim Beton mit dem Wasserzementwert w von 0,40 nach der 60 °C- und 80 °C-Lagerung wie 0,97:0,85 (d. i. 1,00:0,88) und mit w von 0,50 wie 0,98:1,05 (d. i. 1,00 : 1,07). Für Beton mit w = 0,40 wäre demnach die hier gewählte Wärmebehandlung mit 60 °C und für Beton mit w = 0,50 die Wärmebehandlung mit 80 °C günstiger.

Werden so die Feststellungen für die 6 Zemente ausgewertet, so ergibt sich folgende Übersicht für die Wirkung der 60 °C- und der

	Verhältniswerte der Biegezugfestigkeit		Verhältniswerte der Druckfestigkeit	
	$\frac{B_{60}}{B_{20}}$		$\frac{D_{10}}{D_{20}}$	
	$\frac{B_{60}}{B_{20}}$		$\frac{D_{60}}{D_{20}}$	
	w = 0,40	w = 0,50	w = 0,40	w = 0,50
Beton im Alter von 1 Tag				
Zement 1	0,83	1,07	1,02	0,92
Zement 2	0,94	0,88	1,00	0,94
Zement 3	1,00	1,14	1,03	1,06
Zement 4	1,01	1,02	1,07	1,10
Zement 5	0,95	1,02	1,04	1,16
Zement 6	0,94	1,17	1,04	1,10
Mittel	0,95	1,05	1,03	1,05
Gesamtmittel 1,02				
Beton im Alter von 28 Tagen				
Zement 1	1,00	0,94	0,96	1,02
Zement 2	0,94	0,92	0,96	1,08
Zement 3	0,92	0,94	1,05	1,01
Zement 4	1,00	1,09	0,97	1,04
Zement 5	1,00	1,00	1,01	1,04
Zement 6	1,01	0,98	1,03	1,14
Mittel	0,98	0,98	1,00	1,06
Gesamtmittel 1,00				
Beton im Alter von 90 Tagen				
Zement 1	1,12	1,03	1,04	1,00
Zement 2	0,99	0,89	0,98	1,05
Zement 3	0,98	0,88	1,03	1,04
Zement 4	1,12	0,96	1,01	1,02
Zement 5	1,03	0,92	0,98	1,04
Zement 6	0,95	1,00	0,98	1,00
Mittel	1,03	0,95	1,00	1,02
Gesamtmittel 1,00				

80 °C-Lagerung beim Beton mit verschiedenen Wasserzementwerten (Verhältniswert der Festigkeit bei 60 °C gleich 1,00 gesetzt). Werte, die über 1,00 liegen, bedeuten, daß die anfängliche Wärmebehandlung bei 80 °C mit insgesamt 620 Grad-Stunden wirkungsvoller war als die 60 °C-Behandlung mit 508 Grad-Stunden. Die Werte unter 1,00 zeigen an, daß dagegen die 60 °C-Behandlung günstiger wirkte als die 80 °C-Behandlung.

Daraus geht hervor, daß auch das Mittel der Biegezug- oder Druckfestigkeiten aus allen Zementen nicht immer so gleichsinnig ist oder meist keine so großen Unterschiede aufweist, daß einheitlich auf eine unterschiedliche Wirkung der 60 °C- oder 80 °C-Behandlung beim Beton mit dem Wasserzementwert von 0,40 oder 0,50 geschlossen werden kann. So erwies sich für die Entwicklung der Druckfestigkeit die 80 °C-Behandlung beim Beton mit dem Wasserzementwert von 0,50 etwas günstiger (im Mittel aus allen Prüfwerten um 4 %). Dagegen wurde die Biegezugfestigkeit durch die 60 °C-Behandlung meist etwas mehr geför-

dert als durch die 80 °C-Behandlung. Eine klare Abhängigkeit vom Wasserzementwert läßt sich dabei nicht erkennen.

Aus dem Gesamtmittel von 1,02 für die Frühfestigkeit nach 1 Tag könnte man folgern, daß die 80 °C-Behandlung hierfür geringfügig günstiger war, während nach 28 und 90 Tagen (Gesamtmittel je 1,00) sich ein Unterschied durch die Wärmebehandlung bei 60 °C oder 80 °C nicht mehr abzeichnete.

Wird untersucht, wie die Verhältnisse sich bei den einzelnen Zementen einstellten, so heben sich bei der Frühfestigkeit nach 1 Tag vor allem die Zemente 3 und 4 heraus, weil bei ihnen die 80 °C-Behandlung – abgesehen von einer Ausnahme – immer vorteilhafter war. Auch die beiden Zemente 5 (PZ) und 6 (HOZ) verhielten sich mit Ausnahme der Biegezugfestigkeit des Betons mit dem Wasserzementwert von 0,40 ebenso, während Zement 2 auf die 60 °C-Behandlung im ganzen etwas günstiger ansprach und die Werte für Zement 1 eine bestimmte Aussage nicht zulassen.

Mit einigem Vorbehalt kann daraus, unter Bezug auf die in Tafel 5 hervorgehobenen Zementeigenschaften, abgeleitet werden, daß für die Zemente 3, 4 und 5 mit dem kleineren  $C_3A$ -Gehalt (10 Gew.-% und weniger) sowie der kleinsten 3 Tage-Festigkeit nach DIN 1164 – ebenso wie für den Hochofenzement – sich die 80 °C-Behandlung förderlicher auf die Frühfestigkeit auswirkte als die 60 °C-Behandlung. Bei den Festigkeiten in höherem Alter deutet sich diese Verbesserung durch die 80 °C-Behandlung ebenfalls noch etwas an. Demgegenüber wurden für Zement 2 mit dem hohen  $C_3A$ -Gehalt (12 Gew.-%) durch die 60 °C-Behandlung in jedem Alter vorwiegend die günstigeren Festigkeiten erzielt. Bei dem 13 Gew.-%  $C_3A$  aufweisenden Zement 1, der wesentlich gröber gemahlen war, zeichnete sich dieser Einfluß nicht ab.

Allgemein ist bei dieser Unterscheidung nach der Wirkung der Wärmebehandlung zu beachten, daß die Unterschiede oft keine einheitliche Tendenz erkennen ließen und im ganzen nicht sehr groß waren. Wenn mit  $\sigma_M$  das Gesamtmittel aus allen Altersstufen, mit  $n$  die Anzahl der Werte (72) und mit  $\sigma_i$  der einzelne Verhältniswert bezeichnet werden, so ergibt sich die mittlere quadratische Abweichung (Standardabweichung) zu

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\sigma_M - \sigma_i)^2}{n - 1}} = 0,07$$

und der Variationskoeffizient zu

$$V = \frac{\sigma_m}{\sigma_M} = 6,5\%$$

Für das Prüfalter von 1 Tag fand sich  $\sigma_m$  zu 0,08 und  $V$  zu 7,9 % Der Einfluß der verschiedenen Zemente, der unterschiedlichen Wärmebehandlung, Wasserzementwerte und Altersstufen sowie die Versuchsstreuungen der verschiedenen Herstellungen, Behand-

lungen und Prüfungen kommen dabei zur Geltung. Trotzdem ist der Variationskoeffizient mit 6,5 % gering. Die zum Teil sich abzeichnenden, oben herausgestellten Beziehungen erscheinen daher praktisch gesehen ohne größere Bedeutung, insbesondere, wenn der Frühfestigkeit und der Festigkeit in höherem Alter sowie der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit der gleiche Wert beigemessen wird.

### 6.3 Einfluß der Temperaturhöhe bei der Wärmebehandlung

Wie bereits aus den Erörterungen unter 6.2 hervorgeht und wie den Tafeln 4 a und 4 b sowie den Bildern 6 bis 17 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die mit den einzelnen Zementen bei 60 °C oder 80 °C erhaltenen absoluten Biegezug- und Druckfestigkeiten nur wenig. Die Unterschiede sind auch nicht systematisch und so gering, daß sie allein durch Versuchsstreuungen der zu verschiedenen Zeit hergestellten Mischungen erklärt werden könnten. Man kann also auch hiernach folgern, daß bei der hier gleich gehaltenen Vorlagerungsdauer von 2 h die Unterschiede in der Festigkeit, die sich durch Behandlung des Betons bei 60 °C mit 508 Grad-Stunden oder bei 80 °C mit 620 Grad-Stunden ergaben, praktisch ohne größere Bedeutung wären.

### 6.4 Frühfestigkeit

Die wärmebehandelten Balken lagerten 2 h bei 20 °C und 16 h bei höherer Temperatur und anschließend noch 6 h in Wasser von 20 °C. Die Festigkeitszunahme während dieser 6stündigen Wasserlagerung dürfte gering gewesen sein. Die hier ermittelte 1 Tage-Festigkeit kann daher der durch die Wärmebehandlung allein erreichten Frühfestigkeit nach 18 h etwa gleichgesetzt werden.

Nach der Wärmebehandlung waren die Festigkeiten des Betons mit dem Wasserzementwert von 0,40 immer deutlich größer als die des sonst gleichen Betons mit dem Wasserzementwert von 0,50, wie dies bei Normallagerung nach dem Wasserzementwert-Gesetz allgemein der Fall ist.

Die Festigkeit war in jedem Falle so groß, daß nach der Wärmebehandlung Bauteile aus diesen Betonen eine ausreichende *Transport- und Stapelfestigkeit* aufweisen würden. Als Grenzwerte der Festigkeiten, die durch die Wärmebehandlung entstanden, fanden sich im Mittel aus der 60 °C- und 80 °C-Lagerung, die

Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>		Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>	
max	min	max	min
Beton mit w = 0,40			
56	47	383	315
Beton mit w = 0,50			
44	38	284	216

Von praktischer Bedeutung ist auch der *Vergleich der Frühfestigkeiten*, wie sie einmal durch die Wärmebehandlung nach 1 Tag und zum anderen durch die Normallagerung (20 °C) nach 3 Tagen erhalten wurden.

Aus den Bildern 6 bis 17 kann man erkennen, wie groß die Festigkeit durch die Wärmebehandlung (W) nach 1 Tag *im Vergleich* zur 3 Tage-Festigkeit bei Normallagerung (20 °C) entstanden war, siehe auch unter 4. (Diese Verhältniszerte  $W/20^\circ$  finden sich über der Abszisse zwischen 1 Tag und 3 Tagen aufgetragen.)

Wird für jeden Zement das Mittel der Verhältniszerte  $W/20^\circ$  für die Biegezug- und Druckfestigkeit der beiden Betone mit den Wasserzementwerten 0,40 und 0,50 gebildet, so ergibt sich für die *1 Tage-Festigkeit nach Wärmebehandlung, verglichen mit der 3 Tage-Festigkeit nach Normallagerung*, folgendes:

Am günstigsten sprachen der Zement 4 mit dem höchsten  $C_2S$ -Gehalt und der Hochofenzement (Nr. 6) auf die Wärmebehandlung an. Die Festigkeiten des wärmebehandelten Betons im Alter von 1 Tag waren im Mittel um 12 % größer als die 3 Tage-Festigkeit nach Normallagerung. Beim Hochofenzement hatte die Wärmebehandlung allerdings nur auf die Druckfestigkeit einen hervortretenden Einfluß (+ 25 %).

Mit Zement 2, der sich durch hohen  $C_3A$ -Gehalt (12 Gew.-%), niedrigen  $C_2S$ -Gehalt (20 Gew.-%), mittlere Mahlfineinheit sowie größte Normenfestigkeit nach 3 und 7 Tagen auszeichnete, blieb die Festigkeit nach Wärmebehandlung durchweg hinter der 3 Tage-Festigkeit zurück und erreichte im Mittel nur 81 % derselben.

Auffallend ist, daß die Wärmebehandlung bei dem gröberen, sonst etwa gleichen Zement 1 mit 13 Gew.-%  $C_3A$  und 26 Gew.-%  $C_2S$  günstiger wirkte als bei Zement 2; es entstanden bei allerdings größeren Streuungen im Mittel 99 % der 3 Tage-Festigkeit.

Bei Zement 3 lagen die Verhältniszerte nicht gleichgerichtet; im Mittel entstanden durch die Wärmebehandlung 95 % der Festigkeit nach 3tägiger Normallagerung.

Der  $C_3A$ -freie Zement 5 erreichte nach der Wärmebehandlung nahezu die gleiche Festigkeit (97 %) wie nach Normallagerung im Alter von 3 Tagen.

In jedem Falle wurde die *Druckfestigkeit* durch die Wärmebehandlung mehr gefördert als die *Biegezugfestigkeit*.

Ein Einfluß des Gehalts an freiem Kalk machte sich nicht bemerkbar, denn Zement 4 mit dem höchsten Gehalt von 1,7 Gew.-% verhielt sich bei der Wärmebehandlung am günstigsten. Dabei ist allerdings nicht bekannt, wie hoch der Anteil an dem allein störenden  $CaO$  war. Es zeigte sich, daß von einer hohen 3 Tage-Normenfestigkeit (DIN 1164) nicht auf eine hohe Frühfestigkeit nach Wärmebehandlung geschlossen werden kann. Allgemein erkennt man aus dieser Gegenüberstellung, daß die 1 Tage-Festig-

keit durch die Wärmebehandlung unterschiedlich beeinflusst wurde. Verglichen mit der bei der Normallagerung nach 3 Tagen entstandenen Festigkeit wurde beim Zement 4 mit besonders hohem  $C_3S$ -Gehalt und z. T. auch beim Hochofenzement die Festigkeit durch die Wärmebehandlung besonders gefördert, am wenigsten dagegen beim Zement 2 mit hohem  $C_3A$ -Gehalt und geringerem  $C_2S$ -Gehalt.

Doch erscheinen diese sich deutlicher abzeichnenden Feststellungen wegen der verhältnismäßig geringen Zahl von Versuchen noch nicht so gesichert, um auch für andere Zemente ähnlicher Zusammensetzung und Mahlfeinheit gelten zu können. Wegen der Vielzahl der Einflußgrößen ist es angezeigt, den für eine bestimmte Wärmebehandlung am besten geeigneten Zement immer noch durch Versuche auszuwählen.

Abgesehen von der unterschiedlichen Wirkung einer Wärmebehandlung bei den einzelnen Zementen wurden durch die Wärmebehandlung bereits nach 1 Tag für die Praxis immer ausreichende Festigkeiten erzielt. Sie lagen im Bereich der 3 Tage-Festigkeit nach Normallagerung und unterschieden sich von diesen im Mittel um  $-19\%$  bis  $+12\%$ .

### 6.5 Festigkeit in höherem Alter

Die wärmebehandelten Betone lagerten anschließend bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  unter Wasser weiter und wurden im Alter von 28 und 90 Tagen ebenfalls auf Festigkeit geprüft. Wie dem Linienzug W der Bilder 6 bis 17 zu entnehmen ist, erhärtete der Beton auch nach der anfänglichen Wärmebehandlung immer und meist sehr gut nach. Trotzdem wurde von ihm nur selten die Festigkeit des dauernd bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  gelagerten Betons erreicht, wie der Linienzug W/20 $^{\circ}$  erkennen läßt.

Im einzelnen ergab sich, nach den Mittelwerten für die Biegezug- und Druckfestigkeit beider Wärmebehandlungen und beider Betone beurteilt, folgendes (siehe die Tafeln 4 a und 4 b):

Im *Gesamtmittel* erreichte der anfänglich wärmebehandelte Beton im Alter von 28 Tagen nur 90 % und im Alter von 90 Tagen nur 91 % der Festigkeit des dauernd unter Wasser bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  gelagerten Betons.

Am wenigsten holte der Beton aus Zement 2 bei der Nacherhärtung auf. Seine Festigkeit betrug nur 80 % bzw. 84 % des gleichen, dauernd bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  gelagerten Betons. Am günstigsten verhielten sich nach der Wärmebehandlung der Beton aus dem  $C_3A$ -freien Zement 5, der rd. 100 %, und der Beton aus dem Zement 6 (Hochofenzement), der rd. 96 % der Festigkeiten des dauernd bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  gelagerten Betons im Alter von 28 und 90 Tagen erreichte.

Dabei ist zu beachten, daß Zement 5 nach Wärmebehandlung des Betons im Alter von 28 Tagen im Mittel aus den Betonen mit verschiedenen Wasserzementwerten auch die absolut größte Biegezugfestigkeit ( $74\text{ kg/cm}^2$ ) und Druckfestigkeit ( $569\text{ kg/cm}^2$ )

lieferte, obwohl seine Normenfestigkeiten im Alter von 28 Tagen sich nicht wesentlich von denen des Zements 2 unterschieden, der stark zurückblieb (Normenfestigkeiten 85 und 86 kg/cm<sup>2</sup> bzw. 477 und 467 kg/cm<sup>2</sup>). Die kleinsten Festigkeiten nach Wärmebehandlung wurden auch im Alter von 28 Tagen für den C<sub>3</sub>A-reichen und C<sub>2</sub>S-ärmeren Zement 2 festgestellt (54 bzw. 389 kg/cm<sup>2</sup>).

Für die hier vorliegenden Verhältnisse erkennt man daher, daß bei etwa gleicher 28 Tage-Normenfestigkeit der C<sub>3</sub>A-freie Zement nach Wärmebehandlung auch in höherem Alter besonders hohe Festigkeiten und der C<sub>3</sub>A-reiche Zement mit geringerem C<sub>2</sub>S-Gehalt (vgl. auch Zement 1) die geringsten Festigkeiten entwickelte. Daraus kann gefolgert werden, daß keine Beziehung zwischen der 28 Tage-Normenfestigkeit eines Zements und der Betonfestigkeit, die nach anfänglicher Wärmebehandlung im Alter von 28 Tagen entwickelt wurde, zu bestehen braucht.

## 7. Zusammenfassung

Die Untersuchungen erstreckten sich auf Betone aus 6 verschiedenen Zementen mit einem Zementgehalt von rd. 320 kg/m<sup>3</sup> und Wasserzementwerten von 0,40 und 0,50. Hieraus hergestellte Balken wurden nach 2 h Vorlagerung während 16 h in feuchter Atmosphäre bei Temperaturen bis 60 °C oder 80 °C behandelt. Nach der Wärmebehandlung erhärteten die Balken weiter unter Wasser von 20 °C. Die Prüfung auf Biegezugfestigkeit und auf Druckfestigkeit nach 1 Tag, 3, 28 und 90 Tagen zeigte folgende Ergebnisse:

7.1 Die Wärmebehandlung von 60 °C oder 80 °C bewirkte insgesamt keine beachtenswerten Unterschiede in der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit. Es scheint, daß für die Entwicklung der Druckfestigkeit die 80 °C-Behandlung (620 Grad-Stunden) und für die Entwicklung der Biegezugfestigkeit die 60 °C-Behandlung (508 Grad-Stunden) im Mittel geringfügig günstiger war.

7.2 Auch nach einer Wärmebehandlung war die Festigkeit des Betons mit dem Wasserzementwert von 0,40 immer größer als die des Betons mit dem Wasserzementwert von 0,50.

7.3 Werden die einzelnen Zemente betrachtet, so scheint es, daß gröber gemahlener Portlandzement mit viel C<sub>2</sub>S und wenig C<sub>3</sub>A sowie der Hochofenzement bei einer Wärmebehandlung des Betons sich günstig verhalten.

7.4 Die Frühfestigkeit des wärmebehandelten Betons war nach 1 Tag immer so groß, daß Bauelemente aus diesem Beton eine ausreichende Transport- und Stapelfestigkeit aufweisen würden.

Verglichen mit der 3 Tage-Festigkeit nach Normallagerung lieferten der C<sub>2</sub>S-reiche Portlandzement 4 und der Hochofenzement 6 nach der Wärmebehandlung die höchste 1 Tage-Festigkeit (im Mittel je + 12 %).

Die 1 Tage-Festigkeiten der Betone aus den Zementen 1, 3 und 5 blieben im Mittel nur unbedeutend hinter der 3 Tage-Festigkeit der Normallagerung zurück. Mit Zement 2, der den hohen  $C_3A$ -Gehalt von 13 Gew.-% und die höchste Normenfestigkeit nach 3 Tagen aufwies, wurden nach Wärmebehandlung im Alter von 1 Tag nur 81 % der 3 Tage-Festigkeit nach Normallagerung erreicht.

7.5 Der wärmebehandelte Beton erhärtete während der anschließenden Wasserlagerung bei 20 °C bis zum Alter von 28 bzw. 90 Tagen meist sehr gut nach. Jedoch erreichte er im Gesamtmittel im Alter von 28 Tagen nur rd. 90 % und im Alter von 90 Tagen nur 91 % der Festigkeit des dauernd bei 20 °C gelagerten Betons.

Am wenigsten holte der Beton aus dem  $C_3A$ -reichen und  $C_3S$ -ärmeren Zement 2 auf; er blieb um rd. 20 % hinter der Festigkeit nach Normallagerung zurück, während mit dem Beton aus dem  $C_3A$ -freien und feiner gemahlenem Zement 5 etwa die gleiche Endfestigkeit wie nach dauernder Normallagerung erhalten wurde.

7.6 Aus der Normenfestigkeit des Zements kann nicht auf die nach der Wärmebehandlung zu erwartende Betonfestigkeit geschlossen werden.

7.7 Wegen der sich überdeckenden, in ihrer Bedeutung kaum abschätzbaren Einflußgrößen – wie z. B. bei den  $C_3A$ -reichen Zementen 1 und 2 offenbar der Einfluß der Mahlfeinheit – erscheint es angezeigt, den für eine bestimmte Wärmebehandlung geeignetsten Zement durch Versuche auszuwählen. Dabei ist neben der relativen Wirkung der Wärmebehandlung, die hier für die einzelnen Zemente vorwiegend untersucht wurde, praktisch vor allem auch die mit der Wärmebehandlung erreichte absolute Früh- und Endfestigkeit von Bedeutung.