

Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente bei niedriger Temperatur

Von Kurt Walz und Justus Bonzel, Düsseldorf

Übersicht

Die Festigkeitsentwicklung der Betone ist unter sonst gleichen Verhältnissen von der Art und Güte des Zementes und von der Temperatur abhängig. Mörtelprismen 4 cm × 4 cm × 16 cm mit neun verschiedenen Zementen wurden unterschiedlich lange einer Lagerung bei + 3 °C oder -10 °C ausgesetzt und erhärteten anschließend bis zum 270. Tag bei + 20 °C.

Durch die anfängliche Lagerung bei niedriger Temperatur wurde die Festigkeitsentwicklung aller Zemente verzögert. Zemente, die dabei mehr zurückblieben, erhärteten aber bei der anschließenden 20 °C-Lagerung hinsichtlich der Druckfestigkeit wesentlich mehr nach als bei ständiger 20 °C-Lagerung. Auch bei einer Temperatur von -10 °C nahm die Druckfestigkeit noch etwas zu.

Für die meisten Zemente ergab sich keine befriedigende Beziehung zwischen Festigkeit und Reife. Bei ihnen waren die anfängliche Verzögerung infolge niedriger Temperatur und die Nacherhärtung bei der anschließenden 20 °C-Lagerung wesentlich ausgeprägter, als es eine Festigkeit-Reife-Abhängigkeit erwarten ließ.

Tastversuche erlauben den Schluß, daß sich während der Erhärtung bei niedriger Temperatur Hydratationsprodukte mit etwas anderer Struktur und stofflicher Zusammensetzung bilden.

1. Einleitung

Schon frühzeitig erkannte man, daß die Betontemperatur sowohl bei der Herstellung als auch nachher die Festigkeitsentwicklung erheblich beeinflußt. Wie nahezu alle chemischen Vorgänge wird auch die mit der Hydratation des Zementes gleichlaufende Festigkeitsentwicklung durch höhere Temperaturen beschleunigt und durch niedere Temperaturen verzögert [1, 2, 3, 4]. Im allgemeinen vergrößert sich die Reaktionsgeschwindigkeit nicht linear mit der Temperatur, sondern sie verdoppelt sich bereits bei einer Temperaturerhöhung um 10 °C [5].

Auch in den Prüf- und Bauvorschriften hat die Temperaturabhängigkeit der Erhärtung des Betons ihren Niederschlag gefunden. So ist zum Beispiel nach DIN 1045 (§ 9 Ziffer 5, § 10, § 13 Ziffer 2) der Einfluß der niederen Temperatur beim Betonieren zu berücksichtigen. Bei Lufttemperaturen unter + 5 °C sind besondere Maßnahmen für eine genügende Anfangserhärtung und unter Umständen längere Schalungsfristen vorzusehen. Auch

die vom Bundeswohnungsbauministerium herausgegebenen Richtlinien für den Winterbau und Schriften über das Bauen im Winter [6, 7] befassen sich mit der verzögernden Wirkung niedrigerer Temperatur auf die Festigkeitsentwicklung des Betons.

Die Erkenntnis, daß eine bestimmte Festigkeit bei höheren Temperaturen nach kürzerer Zeit und bei niedrigeren Temperaturen nach längerer Zeit erhalten wird, hat seit Aufkommen der Wärmebehandlung dazu geführt, zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung das Produkt aus Lagerungszeit und Betontemperatur, die Reife, einzuführen. Dabei wird angenommen, daß sich bei gleichem Grad-Stunden-Wert die gleiche Festigkeit einstellt. Seit Anfang der vierziger Jahre wurden verschiedene Formeln für die Reifefunktionen aufgestellt bzw. nachgeprüft [5, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Sie unterscheiden sich im wesentlichen durch die Annahmen über die Temperatur, ab welcher mit einer Erhärtung nicht mehr gerechnet wird, und über die sich in den verschiedenen Temperaturbereichen einstellende Erhärtung (Intensität). Die meisten Gleichungen besitzen nachstehende allgemeine Form:

$$\begin{aligned} \text{Reife } N &= \sum k (T + a) \times t \\ \text{Ersatzzeit } t_{20} &= \frac{\sum k (T + a) \times t}{20 + a} \\ \text{Druckfestigkeit } D &= f(N) = b (1 - e^{-cN}) \end{aligned}$$

In diesen Gleichungen bedeuten:

- T = Betontemperatur in °C,
- a = Zahlenwert der Temperatur in °C, ab welcher mit einer Erhärtung nicht mehr gerechnet wird (im folgenden „Nullpunkt der Erhärtung“ genannt),
- t = Erhärtungszeit in Tagen bei der Temperatur T,
- t₂₀ = Erhärtungszeit in Tagen bei einer Temperatur von + 20 °C,
- k = Intensitätsfaktor für die Erhärtung (meist = 1),
- b, c = von der Betonzusammensetzung abhängige Faktoren,
- e = Basis des natürlichen Logarithmus.

Alle Überlegungen für solche Gleichungen gehen davon aus, daß die Festigkeit der Zemente bzw. der Betone mit der Reife parabolisch zunimmt, d. h., daß sich auch für verschiedene Temperaturen eine Abhängigkeit der Festigkeit vom Produkt aus Temperatur und Prüfdauer ergibt, sofern durch Frost oder zu rasche Temperaturänderungen keine Gefügestörungen auftreten und der Beton feucht bleibt. Die Annahmen für den „Nullpunkt der Erhärtung“ schwanken zwischen - 10 °C und - 15 °C. Wenn auch große Unterschiede zwischen den Formeln nicht bestehen, so spricht doch einiges dafür, daß diejenige von Plowman besondere Beachtung verdient (Nullpunkt der Erhär-

Tafel 1 Eigenschaften der Zemente (Mittelwerte)

Zement (geliefert als)	Rückstand auf dem Sieb 0,09 DIN 4188 in %	Reinwichte ? g/cm ³	Spez. Oberfläche (Blaine) cm ² /g	Erstarren (nach DIN 1164)		Biegezugfestigkeit in kg/cm ² (gemäß DIN 1164) nach . . . Tagen				Druckfestigkeit in kg/cm ² (gemäß DIN 1164) nach . . . Tagen				Hydrations- wärme in cal/g nach ASTM C 186-55 nach . . . Tagen	
				Beginn	Ende	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3
Zement A (PZ 275)	4,0	3,148	3230	3 h 45 m	5 h 05 m	—	—	54	82	—	—	292	547	32	62
Zement B (PZ 375)	0,2	3,162	3735	3 h 05 m	4 h 25 m	—	43	59	86	—	206	322	561	35	64
Zement C (PZ 275)	6,4	3,147	2860	3 h 15 m	4 h 50 m	—	—	68	75	—	—	360	434	45	65
Zement D (PZ 475)	0,2	3,120	5050	3 h 30 m	4 h 40 m	46	71	83	84	203	414	498	557	64	81
Zement E (HOZ 275)	2,6	3,045	3870	1 h 40 m	2 h 50 m	—	—	48	67	—	—	255	432	40	62
Zement F (HOZ 275)	2,2	2,940	3470	4 h 25 m	6 h 25 m	—	—	69	84	—	—	275	412	34	47
Zement G (HOZ 275)	1,2	2,931	3490	3 h 20 m	5 h 05 m	—	—	64	77	—	—	260	392	32	49
Zement H (SHZ 375)	1,6	2,889	4060	1 h 00 m	1 h 30 m	—	81	92	99	—	380	454	560	51	57
Zement J (SHZ 375)	1,6	2,901	3200	1 h 50 m	3 h 05 m	—	64	82	96	—	297	428	556	27	42

fung bei $-11,5^{\circ}\text{C}$), weil sie in jüngster Zeit abgeleitet und durch umfangreiche Versuche, auch für die Ermittlung des Nullpunktes, belegt wurde. Versuche, bei denen sich die Abhängigkeit der Festigkeit von der Reife bestätigte, wurden vorwiegend an Betonen aus normalen Portlandzementen durchgeführt. In den meisten Fällen wurde dabei nur die Druckfestigkeit betrachtet.

Hummel und Wesche [14] berichteten über Versuche, bei denen u. a. Mörtelproben $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ aus Zementen verschiedener Art und Güte bei $+20^{\circ}\text{C}$ und bei $+5^{\circ}\text{C}$ vorwiegend bis zu 7 und 28 Tagen erhärteten. Die auf die Festigkeit der 20°C -Lagerung bezogene Festigkeit der 5°C -Lagerung war bei den frühochfesten Zementen größer als bei Zementen geringerer Güteklasse. Brand [15] wertete die Ergebnisse von Hummel und Wesche aus und fand die Richtigkeit der von Saul aufgestellten Funktion für die Mörtelkörper aus Portlandzement Z 225 und Z 325 bestätigt. Die Festigkeit der bei $+5^{\circ}\text{C}$ gelagerten Proben aus Portlandzement Z 425 entsprach dieser Beziehung, jedoch nur bis zum Alter von etwa 6 Tagen. Die entsprechenden Werte der Proben aus Hochofenzement und Sulfatbüttenzement waren bis zum 28. Tage wesentlich kleiner, als nach der Reifeabhängigkeit errechnet wurde.

Bei neueren, umfangreichen Versuchen wurden Art, Feinheit, Klinker- und SO_3 -Gehalt des Zementes, Zusammensetzung und Verdichtung des Betons und die Probengröße verändert [16]. Von den dauernd niederen Temperaturen ($+8^{\circ}\text{C}$, $+6^{\circ}\text{C}$, $+4^{\circ}\text{C}$, $+2^{\circ}\text{C}$) ausgesetzten Betonproben erreichten diejenigen mit Hüttenzement (Hochofenzement, Sulfatbüttenzement) einen geringeren prozentualen Anteil der Druckfestigkeit der 17°C -Lagerung als Proben aus Portlandzement. Allgemein

Tafel 2 Zusammensetzung der Zemente (Bestandteile in Gew.-%)

a		b	c	d	e	f	g	h	i	k
Bestandteile		Zement A	Zement B	Zement C	Zement D	Zement E	Zement F	Zement G	Zement H	Zement J
Unlöslicher Rückstand		0,19	0,19	0,18	0,25	0,25	0,45	0,43	0,18	0,39
Kieselsäure	SiO ₂	24,27	24,27	18,70	18,70	22,08	28,04	27,14	23,81	25,57
Tonerde	Al ₂ O ₃	3,67	3,67	6,21	5,99	7,22	11,42	13,32	14,02	13,43
Titan-IV-oxyd	TiO ₂	0,13	0,13	0,18	0,20	0,32	0,35	0,27	0,14	0,41
Eisen-II-oxyd	FeO	—	—	—	—	—	1,17	0,63	0,52	0,25
Eisen-III-oxyd	Fe ₂ O ₃	1,42	1,42	3,60	3,49	1,67	—	—	—	—
Mangan-II-oxyd	MnO	—	—	—	—	—	0,28	0,56	0,23	0,64
Mangan-III-oxyd	Mn ₂ O ₃	0,06	0,06	0,08	0,23	1,34	—	—	—	—
Gesamtkalk	CaO	65,96	65,96	63,39	64,60	55,70	50,45	48,31	45,91	43,30
Magnesia	MgO	0,67	0,67	1,65	0,93	4,52	3,87	4,15	3,80	4,91
Sulfatschwefel	SO ₂	1,65	1,65	2,93	3,08	3,86	1,52	2,67	8,97	8,91
Sulfidschwefel	S	—	—	—	—	0,33	1,56	1,12	1,14	1,25
Glühverlust		0,88	0,88	1,05	1,14	0,97	0,20	0,26	0,97	0,02
nicht bestimmter Rest		1,10	1,10	2,03	1,39	1,90	1,47	1,70	0,88	1,54
Chlor	Cl	Spuren	Spuren	Spuren	Spuren	0,36	Spuren	0,15	—	—
C ₂ S	} Berechnet nach ASTM C 150—55	53	53	61	67	—	—	—	—	—
C ₃ A		30	30	8	4	—	—	—	—	—
C ₄ AF		7	7	10	10	—	—	—	—	—
C ₃ S		5	5	11	11	—	—	—	—	—
Hochofenschlacke		—	—	—	—	33	69	68	83	83
CaCl ₂		—	—	—	—	0,56	—	0,24	—	—

erlangten bis zum Alter von 2 Jahren die ständig bei niederen Temperaturen feucht gelagerten Proben aus PZ, HOZ und SHZ geringere Festigkeiten als die ständig höherer Temperatur (bis + 17 °C) ausgesetzten Proben. Wertet man diese Versuche über insgesamt 2 Jahre nach der Reifefunktion von Plowman aus, so erkennt man, daß die Abhängigkeit der Festigkeit von der Reife beim untersuchten Portlandzement bedingt, bei den verwendeten Hüttenzementen jedoch nicht gilt.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf wurden im Frühjahr 1958 weitere Versuche mit neun Zementen verschiedener Art und Güte angesetzt. Anlaß für die im folgenden beschriebenen Untersuchungen waren Fragen, die sich im Zusammenhang mit praktischen Ausführungen ergaben. So war immer wieder zu beurteilen, welche Festigkeit ein anfänglich niederer Temperatur ausgesetzter Beton noch erreichen kann, wenn er später bei normaler Temperatur weiter erhärtet.

Für die Beurteilung der Betonfestigkeit in Schächten des Bergbaues, die nach dem Gefrierverfahren abgeteuft werden und einen Betonausbau erhalten, ist es wichtig zu wissen, ob die Festigkeit des oft über Monate eingefrorenen jungen Betons bis zum Auftauen des Gebirges und damit bis zum Beginn der Beanspruchung noch zunimmt. Schließlich soll die Arbeit auch zur Klärung der Frage beitragen, ob die Festigkeit-Reife-Beziehung auch in diesen Temperaturbereichen für Zemente verschiedener Art gilt.

2. Versuche

2.1 Zemente

Die Zemente (4 Portlandzemente, 3 Hochofenzemente und 2 Sulfathüttenzemente) unterschieden sich im wesentlichen durch die Anteile der nach Bogue errechneten Klinkerminerale (ASTM C 150-55), die Feinheit, die Anfangs- und Endfestigkeiten und bei den Hüttenzementen durch die Art der Anregung und den Anteil des Hüttenandes [17]. Alle Zemente wurden gemäß DIN 1164 geprüft. Ihre Hydratationswärme (Lösungswärme) wurde gemäß ASTM C 186-55 nach 1 und 3 Tagen festgestellt. Weiter wurden ermittelt: die Reinwichte im Pyknometer mit Isobutylalkohol, die spezifische Oberfläche nach Blaine, die chemische Zusammensetzung nach dem Analysengang für Normzemente und der Schlackenanteil der Hüttenzemente durch eine Trennung von Klinker und Schlacke mit Hilfe verschieden schwerer Flüssigkeiten sowie Bestimmung des Sulfidgehaltes. Für die Sulfathüttenzemente wurde der Schlackengehalt unter den Annahmen errechnet, daß die Zemente 2% Klinker enthielten und daß der SO_3 -Anteil als Anhydrit vorlag.

Alle Zemente waren raumbeständig. Die übrigen Ergebnisse der Zementuntersuchung sind in den Tafeln 1 und 2 zusammengestellt.

2.2 Herstellen der Versuchskörper

Die Erhärtung der verschiedenen Zemente wurde an Mörtelprismen $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ verfolgt. Der Mörtel bestand entsprechend DIN 1164 aus 1 Gewichtsteil Zement, 1 Gewichtsteil Normensand I, 2 Gewichtsteilen Normensand II und 0,60 Gewichtsteilen Wasser. Er wurde in einer Menge von rd. 10 l in einem 10 l-Zwangsmischer insgesamt 6 Minuten lang gemischt. Entsprechend der vorgesehenen Lagerung wiesen neben der fertigen Mischung auch die Formen und der Herstellungsraum eine Temperatur von $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Die Konsistenz des Mörtels (Ausbreitmaß nach DIN 1164) nach dem Mischen ist in Tafel 3 angegeben. Aus jeder Mischung wurden 10×3 Prismen nach DIN 1164 hergestellt.

2.3 Lagerung und Prüfung

Alle Prismen der Herstellung bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurden im Alter von 1 Tag, die Prismen für die $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Lagerung im Alter von 2 Tagen entformt. Sie wurden anschließend 10 Minuten in Wasser gelegt, dann einzeln in kleine Beutel aus Polyäthylenfolie verpackt und zusätzlich mit feuchten Tüchern abgedeckt, so daß eine Feuchtluftlagerung bis zur Prüfung sichergestellt war. Bis zur Prüfung wurden die Prismen folgenden Temperaturen ausgesetzt:

Lagerung a:	dauernd bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
Lagerung b:	7 Tage bei $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
Lagerung c:	28 Tage bei $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
Lagerung d:	3 Tage bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 25 Tage bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. ¹⁾

Je Zementart wurden drei Prismen der $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Lagerung im Alter von 3, 7, 28, 56, 84 und 270 Tagen auf Rohwichte und gemäß DIN 1164 auf Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfalter der anders gelagerten Prismen wurden so gewählt, daß der Einfluß der Temperatur auf den Erhärtungsverlauf beurteilt werden konnte. Bild 1 gibt eine Übersicht über die Lagerungen und die Prüfalter. Geprüft wurde stets bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Prismen, die nach Lagerung bei niedriger Temperatur geprüft wurden oder bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ weiter erhärteten, wurden stufenweise während 1 Stunde (Lagerungen b und c) oder während 3 Stunden (Lagerung d) in Wasser auf $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gebracht.

In der Praxis wird die Temperatur eines Bauteils wegen seines größeren Wärmehalts und seines kleineren Verhältnisses von Oberfläche zum Raum einer Änderung der Außentemperatur mehr oder weniger nachteilen. Auch wird sich eine Erhöhung der

¹⁾ Etwa 3 Stunden nach der Umlagerung erreichte der Prismenkern die Temperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bzw. $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Messung mit Thermoelementen).

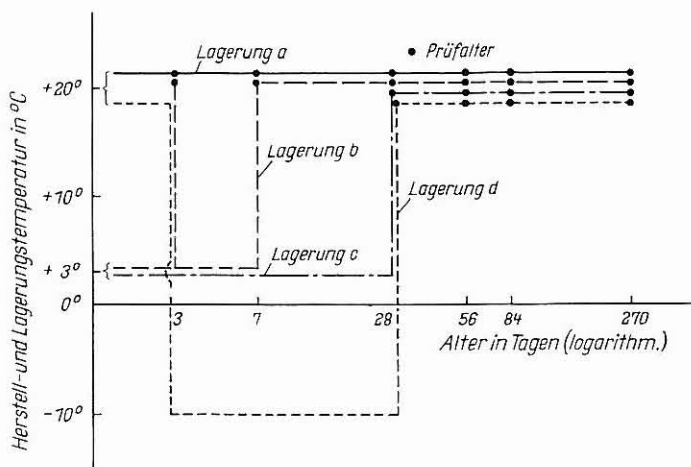


Bild 1 Schema der Lagerungen a, b, c und d

Tafel 3 Mörtelausbreitmaß a nach DIN 1164 bei einem W/Z-Wert von 0,6

Zement	Ausbreitmaß a in cm	
	Herstellung bei + 20 °C	Herstellung bei + 3 °C
A	22	23
B	22	22
C	21	19
D	21	19
E	20	20
F	22	23
G	23	23
H	22	23
J	23	24

Betontemperatur durch die Hydrationswärme bemerkbar machen. Bei den kleinen Proben (4 cm × 4 cm × 16 cm) glich sich die Prismtemperatur rasch der Lagerungstemperatur an, so daß der Zement tatsächlich auch bei definierten Temperaturen erhärtete und der Einfluß dieser bestimmten Erhärtingstemperaturen erkennbar wurde.

Die Größt-, Kleinst- und Mittelwerte der Rohwichten (3 Prüfwerte), der Biegezugfestigkeiten (3 Prüfwerte) und der Druckfestigkeiten (6 Prüfwerte) sind in Tafel 4 zusammengestellt.

Im Anschluß an die Festigkeitsprüfungen wurden Bruchstücke der Prismen bei + 105 °C getrocknet. Die mittlere Trockenrohichte des Mörtels ist in Tafel 5 eingetragen.

16 Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- alter Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
A	3	2,278	2,251	—	—	41	13	—	—	164	52	—	—
		2,283	2,259	—	—	42	13	—	—	174	52	—	—
		2,292	2,263			43	14			185	53		
	7	2,289	2,253	—	—	53	39	—	—	268	171	—	—
		2,290	2,257	—	—	55	42	—	—	273	177	—	—
		2,291	2,264			58	44			283	183		
	28	2,250	2,249	2,258	2,258	84	81	74	46	528	579	386	220
		2,254	2,259	2,258	2,263	86	84	75	49	543	591	397	227
		2,256	2,265	2,259	2,268	89	88	76	51	550	604	408	235
	56	2,259	2,260	2,275	2,267	83	88	90	87	598	633	645	554
		2,262	2,265	2,277	2,273	87	90	91	89	622	677	668	561
		2,265	2,268	2,280	2,276	91	92	92	91	637	701	682	571
	84	2,260	2,266	2,277	2,270	83	88	87	86	646	684	726	624
		2,268	2,268	2,278	2,274	84	90	89	87	659	728	749	640
		2,275	2,272	2,279	2,281	86	92	90	89	680	742	774	648
	270	2,277	2,286	2,279	2,271	78	85	81	86	681	697	711	682
		2,278	2,286	2,280	2,278	80	88	83	88	712	724	759	696
		2,280	2,287	2,283	2,285	81	91	86	91	754	767	815	718

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Fortsetzung von Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- aller Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
B	3	2,261	2,265	—	—	50	15	—	—	211	57	—	—
		2,265	2,274	—	—	51	16	—	—	216	60	—	—
		2,268	2,284			54	17			220	64		
	7	2,258	2,266	—	—	58	48	—	—	333	211	—	—
		2,261	2,267	—	—	61	50	—	—	343	215	—	—
		2,266	2,267			63	53			356	221		
	28	2,258	2,269	2,267	2,256	77	83	71	49	600	605	434	260
		2,260	2,270	2,269	2,261	85	87	74	51	610	634	443	262
		2,261	2,271	2,272	2,264	93	93	79	52	625	680	458	266
	56	2,256	2,273	2,274	2,270	87	82	87	86	654	714	675	621
		2,265	2,279	2,274	2,272	91	89	90	90	672	735	700	636
		2,270	2,285	2,275	2,274	94	95	94	93	701	757	720	657
	84	2,274	2,270	2,281	2,277	84	91	94	82	676	744	701	664
		2,276	2,273	2,282	2,280	85	94	96	90	701	760	734	686
		2,279	2,277	2,284	2,283	86	96	98	94	722	778	763	707
	270	2,261	2,284	2,288	2,275	78	83	87	91	704	747	766	742
		2,270	2,285	2,290	2,278	82	85	92	94	728	764	780	760
		2,275	2,286	2,292	2,281	87	88	97	99	749	790	796	770

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Fortsetzung von Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- alter Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
C	3	2,220	2,228			51	24			252	89		
		2,228	2,230	—	—	55	25	—	—	254	90	—	—
		2,234	2,232			58	25			256	92		
	7	2,238	2,222			68	52			340	244		
		2,242	2,225	—	—	69	55	—	—	347	247	—	—
		2,244	2,227			72	58			352	250		
	28	2,235	2,221	2,225	2,226	72	73	71	54	402	418	406	301
		2,237	2,229	2,232	2,228	76	75	73	57	408	426	410	305
		2,238	2,235	2,242	2,229	80	76	74	61	409	431	413	313
	56	2,235	2,216	2,225	2,227	69	69	68	66	401	407	418	422
		2,240	2,217	2,228	2,229	72	71	70	71	421	424	440	426
		2,242	2,218	2,233	2,231	74	72	71	74	433	439	458	434
	84	2,237	2,230	2,234	2,237	61	64	60	66	397	422	415	389
		2,245	2,237	2,239	2,240	64	66	62	67	408	427	422	404
		2,255	2,245	2,241	2,242	66	67	65	68	416	433	432	415
	270	2,247	2,241	2,239	2,249	61	60	61	68	442	468	459	411
		2,249	2,247	2,244	2,253	65	62	62	70	482	478	465	438
		2,252	2,253	2,248	2,259	67	63	64	71	511	489	477	452

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Fortsetzung von Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- alter Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
D	3	2,256	2,267	—	—	82	49	—	—	427	232	—	—
		2,259	2,278	—	—	85	53	—	—	439	250	—	—
		2,265	2,290			87	59			455	270		
	7	2,249	2,256	—	—	85	73	—	—	522	465	—	—
		2,258	2,260	—	—	88	77	—	—	536	470	—	—
		2,263	2,263			91	81			547	482		
	28	2,265	2,255	2,260	2,255	88	79	97	76	569	570	619	502
		2,269	2,259	2,264	2,259	90	82	103	80	597	575	630	521
		2,272	2,264	2,270	2,265	92	84	109	85	609	580	640	538
	56	2,261	2,254	2,257	2,263	76	74	69	69	585	581	562	567
		2,266	2,260	2,259	2,265	80	77	74	74	599	593	572	579
		2,270	2,265	2,261	2,269	86	82	77	82	609	610	578	592
	84	2,272	2,258	2,263	2,276	79	72	62	73	573	543	540	579
		2,275	2,264	2,269	2,277	80	75	66	76	591	560	561	585
		2,279	2,269	2,276	2,279	81	77	71	80	611	582	583	595
	270	2,278	2,270	2,273	2,273	71	72	70	75	562	547	535	577
		2,283	2,274	2,277	2,276	75	72	71	76	586	564	548	586
		2,286	2,279	2,282	2,280	79	73	74	78	597	581	559	596

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Fortsetzung von Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- alter Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
E	3	2,221	2,236	—	—	41	19	—	—	193	71	—	—
		2,222	2,240	—	—	43	19	—	—	194	73	—	—
		2,224	2,247			46	20			196	75		
	7	2,229	2,235	—	—	61	46	—	—	290	167	—	—
		2,235	2,238	—	—	64	46	—	—	297	170	—	—
		2,240	2,243			66	46			302	173		
	28	2,209	2,232	2,242	2,239	62	72	77	49	443	460	333	247
		2,216	2,239	2,243	2,242	66	75	77	50	451	472	342	252
		2,225	2,243	2,244	2,244	68	77	78	51	457	487	350	256
	56	2,216	2,251	2,246	2,264	82	89	84	70	509	543	494	466
		2,226	2,252	2,250	2,266	84	92	87	74	527	557	501	470
		2,237	2,253	2,253	2,267	85	96	91	78	538	564	509	476
	84	2,239	2,242	2,245	2,259	81	82	87	80	528	562	539	523
		2,243	2,247	2,247	2,262	85	89	88	84	547	578	555	532
		2,246	2,251	2,249	2,264	91	98	90	88	556	593	569	542
	270	2,257	2,252	2,257	2,251	73	78	81	78	583	614	608	579
		2,260	2,260	2,260	2,253	76	85	83	78	602	654	626	609
		2,262	2,269	2,264	2,250	80	89	85	79	615	682	639	639

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Fortsetzung von Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- alter Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
F	3	2,245	2,242			43	8			129	27		
		2,247	2,243	—	—	43	9	—	—	136	27	—	—
		2,248	2,244			44	9			141	28		
	7	2,251	2,257			83	29			255	81		
		2,256	2,260	—	—	86	31	—	—	260	84	—	—
		2,258	2,266			89	32			263	87		
	28	2,259	2,268	2,256	2,244	104	100	87	26	421	478	284	162
		2,265	2,276	2,270	2,246	107	108	91	27	437	508	307	168
		2,268	2,283	2,286	2,250	110	117	94	28	450	556	334	171
	56	2,254	2,270	2,255	2,262	89	105	97	69	447	533	449	371
		2,259	2,272	2,256	2,265	92	110	100	72	456	546	465	384
		2,265	2,275	2,258	2,267	96	119	103	76	465	554	482	396
	84	2,264	2,272	2,252	2,259	104	103	103	73	461	566	512	422
		2,264	2,275	2,254	2,264	108	105	107	81	483	590	521	436
		2,265	2,277	2,255	2,270	111	106	112	87	504	606	531	449
	270	2,254	2,266	2,264	2,260	87	96	94	81	506	606	596	508
		2,257	2,270	2,269	2,262	90	102	95	89	531	619	620	516
		2,260	2,272	2,272	2,264	94	107	97	94	552	639	648	525

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Fortsetzung von Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- alter Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
G	3	2,248	2,248	—	—	53	11	—	—	180	38	—	—
		2,249	2,252	—	—	55	11	—	—	182	40	—	—
		2,251	2,255			57	12			184	42		
	7	2,238	2,245	—	—	85	36	—	—	272	121	—	—
		2,239	2,246	—	—	86	38	—	—	274	124	—	—
		2,240	2,246			86	40			277	127		
	28	2,249	2,256	2,253	2,242	113	110	83	48	401	424	297	219
		2,253	2,258	2,254	2,243	116	111	90	49	410	430	300	225
		2,258	2,260	2,255	2,244	118	112	94	50	416	435	302	235
	56	2,270	2,257	2,268	2,248	113	109	107	96	464	488	451	406
		2,271	2,257	2,269	2,251	114	113	112	100	482	502	457	415
		2,272	2,258	2,271	2,255	116	117	115	106	505	523	459	426
	84	2,261	2,259	2,260	2,247	110	103	107	91	492	515	488	458
		2,265	2,262	2,262	2,256	117	108	110	98	504	526	501	461
		2,270	2,264	2,263	2,263	121	113	113	107	513	538	508	465
	270	2,264	2,274	2,272	2,265	100	99	96	93	566	569	591	548
		2,264	2,277	2,274	2,271	106	105	97	94	574	609	616	560
		2,265	2,279	2,275	2,276	109	111	97	96	588	626	639	577

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Fortsetzung von Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- alter Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
H	3	2,198	2,208	—	—	87	36	—	—	366	99	—	—
		2,199	2,217	—	—	87	37	—	—	368	100	—	—
		2,203	2,226			88	39			372	101		
	7	2,191	2,221	—	—	114	50	—	—	423	178	—	—
		2,197	2,223	—	—	120	53	—	—	430	185	—	—
		2,201	2,226			125	56			438	191		
	28	2,207	2,229	2,230	2,209	133	106	89	106	509	601	411	397
		2,208	2,231	2,230	2,210	136	123	92	116	521	620	418	404
		2,209	2,234	2,230	2,212	139	146	94	122	534	634	427	408
	56	2,213	2,243	2,232	2,220	116	125	116	96	549	702	671	544
		2,214	2,245	2,238	2,221	120	129	126	102	564	717	684	551
		2,215	2,248	2,245	2,223	125	134	131	106	580	730	693	559
	84	2,208	2,245	2,238	2,234	103	116	113	105	559	718	675	593
		2,210	2,246	2,241	2,236	108	118	121	106	571	744	721	600
		2,214	2,248	2,242	2,237	112	119	129	108	598	768	746	607
	270	2,223	2,250	2,250	2,235	98	103	103	95	640	810	798	675
		2,227	2,255	2,251	2,238	102	106	105	97	658	839	823	691
		2,230	2,261	2,253	2,241	104	109	108	99	673	875	846	704

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Fortsetzung von Tafel 4 Rohwichte und Festigkeit des Mörtels in Abhängigkeit von der Lagerung

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o
Zement	Prüf- alter Tage	Rohwichte in kg/dm ³ bei Lagerung				Biegezugfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung				Druckfestigkeit in kg/cm ² bei Lagerung			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
J	3	2,241	2,233			77	10			284	38		
		2,245	2,237	—	—	77	10	—	—	298	38	—	—
		2,249	2,239			77	11			310	38		
	7	2,251	2,238			103	28			468	117		
		2,255	2,238	—	—	106	31	—	—	475	119	—	—
		2,264	2,239			108	33			488	122		
	28	2,254	2,247	2,248	2,258	113	119	85	88	599	664	492	428
		2,259	2,249	2,251	2,260	119	131	89	91	610	676	502	433
		2,264	2,253	2,253	2,261	125	137	93	93	628	695	522	436
	56	2,263	2,261	2,259	2,263	111	121	124	105	661	759	724	625
		2,268	2,266	2,262	2,266	115	126	130	108	677	774	759	645
		2,273	2,272	2,267	2,269	119	129	140	111	689	793	780	661
	84	2,261	2,250	2,247	2,262	97	130	111	109	646	774	763	659
		2,264	2,257	2,252	2,264	102	137	112	111	663	791	780	668
		2,267	2,262	2,257	2,267	110	142	113	113	669	812	812	677
	270	2,251	2,240	2,247	2,261	96	106	101	102	751	816	880	759
		2,255	2,245	2,264	2,263	103	107	105	104	768	882	930	777
		2,260	2,250	2,274	2,264	111	108	109	105	782	910	961	804

Angegeben sind die Kleinstwerte, die Mittelwerte (fett gedruckt) und die Größtwerte.

Tafel 5 Trockenrohichte der Mörtelprismen (Mittelwerte)

Lagerung	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	Trockenrohichte (kg/dm ³) der Mörtelprismen aus Zement									
												A	B	C	D	E	F	G	H	J	
a	Prüfalter Tage	3	2,062	2,048	2,021	2,062	2,004	2,027	2,029	1,959	2,013	2,013									
		7	2,083	2,055	2,040	2,065	2,025	2,042	2,022	1,958	2,025	2,025									
		28	2,058	2,067	2,044	2,084	2,012	2,059	2,032	1,963	2,026	2,026									
		56	2,070	2,071	2,040	2,085	2,027	2,048	2,066	1,971	2,040	2,040									
		84	2,081	2,087	2,047	2,088	2,042	2,052	2,056	1,965	2,025	2,025									
		270	2,083	2,077	2,047	2,084	2,040	2,042	2,044	1,969	2,017										
b	Prüfalter Tage	3	2,022	2,051	2,013	2,062	2,003	2,012	2,019	1,970	2,013	2,013									
		7	2,041	2,042	2,011	2,053	2,006	2,033	2,011	1,982	2,013	2,013									
		28	2,065	2,080	2,039	2,064	2,036	2,075	2,043	1,989	2,013	2,013									
		56	2,074	2,087	2,023	2,070	2,056	2,070	2,049	2,010	2,037	2,037									
		84	2,076	2,079	2,043	2,065	2,041	2,076	2,051	2,012	2,019	2,019									
		270	2,090	2,084	2,047	2,068	2,052	2,059	2,061	2,011	2,013										
c	Prüfalter Tage	28	2,049	2,062	2,040	2,067	2,029	2,053	2,024	1,982	2,013	2,013									
		56	2,086	2,080	2,041	2,069	2,044	2,047	2,056	1,999	2,005	2,005									
		84	2,086	2,090	2,046	2,076	2,039	2,046	2,051	1,997	2,012	2,012									
		270	2,079	2,090	2,046	2,076	2,049	2,061	2,061	1,997	2,028	2,028									
				28	2,040	2,033	2,027	2,065	2,025	2,022	2,017	1,962	2,021								
d	Prüfalter Tage	56	2,062	2,059	2,033	2,079	2,045	2,051	2,037	1,973	2,037	2,037									
		84	2,073	2,076	2,041	2,087	2,044	2,050	2,041	1,990	2,028	2,028									
		270	2,074	2,066	2,050	2,076	2,035	2,047	2,052	1,986	2,025	2,025									
				28	2,040	2,033	2,027	2,065	2,025	2,022	2,017	1,962	2,021								
				56	2,062	2,059	2,033	2,079	2,045	2,051	2,037	1,973	2,037								
		84	2,073	2,076	2,041	2,087	2,044	2,050	2,041	1,990	2,028										
		270	2,074	2,066	2,050	2,076	2,035	2,047	2,052	1,986	2,025										

3. Erörterung der Ergebnisse

3.1 Zemente

In Tafel 6 sind die kennzeichnenden Eigenschaften der Zemente zusammengestellt, die vermutlich auch zur Festigkeitsentwicklung bei niedriger Temperatur und zur Nacherhärtung in Beziehung stehen. Es sind dies die Feinheit (spez. Oberfläche O), der Ge-

Tafel 6 Kennzeichnende Eigenschaften der Zemente

Zement	O cm ² /g	C ₃ S %	C ₂ S %	C ₃ A %	H %	W ₁ W ₃ cal/g	W ₁ /W ₃	N ₇ kg/cm ²	N ₇ /N ₂₈
A; PZ 275	3230	53	30	7	—	32 62	0,52	292	0,53
B; PZ 375	3735	53	30	7	—	35 64	0,55	322	0,57
C; PZ 275	2860	61	8	10	—	45 65	0,69	360	0,83
D; PZ 475	5050	67	4	10	—	64 81	0,79	498	0,90
E; HOZ 275	3870	—	—	—	33	40 62	0,64	255	0,59
F; HOZ 275	3470	—	—	—	69	34 47	0,71	275	0,67
G; HOZ 275	3490	—	—	—	68	32 49	0,64	260	0,66
H; SHZ 375	4060	—	—	—	83	51 57	0,89	454	0,81
J; SHZ 375	3200	—	—	—	83	27 42	0,64	428	0,77

halt an C₃S, C₂S und C₃A, der Gehalt an Hüttensand H, die Hydratationswärme W nach 1 und 3 Tagen bzw. deren Verhältniswert W₁ : W₃ als Maß für die Hydratationsgeschwindigkeit, die Druckfestigkeit im Alter von 7 Tagen (N₇) und ihr Verhältnis zur Druckfestigkeit nach 28 Tagen (N₇/N₂₈).

Die beiden *Portlandzemente A und B* zeichneten sich durch eine hohe 28 Tage-Festigkeit aus. Zement B war feiner gemahlen als Zement A. Die chemische Zusammensetzung, die Wärmeentwicklung und die Festigkeit waren bei beiden Zementen etwa gleich. Der gröber gemahlene *Portlandzement C* hatte einen C₃S-Gehalt von 61 %, einen Gehalt an C₂S von 8 % und an C₃A von 10 %. Entsprechend hoch waren, trotz der groben Mahlung, die Hydratationswärme nach 1 Tag und die Druckfestigkeit nach 7 Tagen.

Der sehr fein gemahlene *Portlandzement D* mit noch höherem C₃S-Gehalt (67 %) lieferte bei hoher Hydratationswärme auch eine besonders hohe Frühfestigkeit.

Von den in ihrer Mahlfeinheit nur wenig verschiedenen *Hochofenzementen* wiesen der HOZ E einen mäßigen Gehalt (33 %), der HOZ F und der HOZ G einen hohen Gehalt an Hüttensand (69 % und 68 %) auf. Ihre Hydratationswärme lag nach 1 Tag im Bereich der Hydratationswärme der *Portlandzemente A und B*; sie war nach 3 Tagen bei den schlackenreichen Zementen deutlich kleiner. Die 7 Tage-Druckfestigkeit aller 3 Zemente war absolut kleiner, bezogen auf die 28 Tage-Festigkeit jedoch größer als bei den *Portlandzementen A und B*. (HOZ E und HOZ G enthielten etwas Calciumchlorid.)

Der sehr feine *Sulfathüttenzement H* zeichnete sich durch hohe Festigkeiten aus und gab bereits bis zu 1 Tag viel Wärme frei (51 cal/g); die Zunahme der Hydratationswärme bis zu 3 Tagen war nur noch gering. Die geringste Wärmeentwicklung von allen Zementen fand sich für den *Sulfathüttenzement J* mit mittlerer Mahlfeinheit (3200 cm²/g). Trotzdem erreichte er die hohe 7 Tage-Druckfestigkeit von 428 kg/cm².

3.2 Mörtelfestigkeiten in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur

In den Bildern 2 bis 10 ist die prozentuale Druckfestigkeit der Mörtelprismen und in den Bildern 11 bis 19 die prozentuale Biegezugfestigkeit, bezogen auf die 28 Tage-Festigkeit der 20 °C-Lagerung, aufgetragen.

Die Bilder 20 bis 25 zeigen dazu ergänzend die Beziehung zwischen Festigkeit und Reife. Um die Anzahl der Bilder zu beschränken und um eine Wiederholung sich entsprechender Aufzeichnungen zu vermeiden, wurden hier nur die Ergebnisse der drei Zemente A, C und F wiedergegeben. Diese Beziehungen sind auch für die übrigen Zemente charakteristisch. Zur Beurteilung erschien es ausreichend, die Abhängigkeit der Festigkeit von der Reife nur bis zum Alter von 84 Tagen zu verfolgen. Als Reife wurde auf der Abszisse der Wert nach Plowman $[N = \frac{1}{2}(T + 11,5) \times t]$ aufgetragen (siehe auch unter 1.).

In den Bildern wurden die Festigkeiten einer Lagerung durch Linienzüge verbunden, die in der Regel durch die Prüfwerte gingen. (Unstetigkeiten der Linienzüge ergaben sich z. T. dort, wo ein Lagerungswechsel vorlag oder der Abszissenmaßstab geändert wurde.) Zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung der Zemente bei den verschiedenen Lagerungen wird der Gesamtverlauf der Kurven herangezogen, da geringfügige oder einzelne Abweichungen davon durch Versuchsstreuungen verursacht sein können, wie z. B. in Bild 5 (Lagerung c) oder Bild 16 (Lagerung a).

3.2.1 Druckfestigkeit

Lagerung bei + 20 °C (a)

Die Druckfestigkeit aller Zemente nahm mit wachsendem Alter zu. Während der Mörtel mit Zement D bereits im Alter von 28 Tagen seine höchste Druckfestigkeit erreicht hatte (Bild 5), wiesen die anderen Zemente bis zum Alter von 270 Tagen eine unterschiedlich starke Nacherhärtung auf. Der Verlauf der Linienzüge in den Bildern 2 bis 10 läßt erwarten, daß die Druckfestigkeit auch nach 270 Tagen noch zunimmt. Im allgemeinen erhärteten jene Zemente besonders stark nach, deren Festigkeit bis zum Alter von 28 Tagen langsam anstieg oder bis dahin sich nicht besonders hoch ergab (Zemente A, E, G).

Lagerung bei + 3 °C (b und c)

Eine Verzögerung der Festigkeitsentwicklung durch die Lagerung bei + 3 °C stellte sich mehr oder weniger ausgeprägt bei allen Zementen ein. In Tafel 7 wird die nach 3, 7 und 28 Tagen bei + 3 °C erhaltene Druckfestigkeit (D_3) mit der nach Lagerung bei + 20 °C entstandenen Druckfestigkeit (D_{20}) verglichen:

Tafel 7 Mörteldruckfestigkeiten bei 3 °C- und 20 °C-Lagerung

		Druckfestigkeit des Mörtels aus								
		PZ A	PZ B	PZ C	PZ D	HOZ E	HOZ F	HOZ G	SHZ H	SHZ J
		nach 3 Tagen								
D ₃	kg/cm ²	52	60	90	250	73	27	40	100	38
D ₂₀	kg/cm ²	174	216	254	439	194	136	182	368	298
D ₃ /D ₂₀	%	30	28	35	57	38	20	22	27	13
		nach 7 Tagen								
D ₃	kg/cm ²	177	215	247	470	170	84	124	185	119
D ₂₀	kg/cm ²	273	343	347	536	297	260	274	430	475
D ₃ /D ₂₀	%	65	63	71	88	57	32	45	43	25
		nach 28 Tagen								
D ₃	kg/cm ²	397	443	410	630	342	307	300	418	502
D ₂₀	kg/cm ²	543	610	408	597	451	437	410	521	610
D ₃ /D ₂₀	%	73	73	101	106	76	70	73	80	82

Damit liegt D_3/D_{20} für die

	Portlandzemente	Hüttenzemente
nach 3 Tagen zwischen	28 % und 57 %	13 % und 38 %
nach 7 Tagen zwischen	63 % und 88 %	25 % und 57 %
nach 28 Tagen zwischen	73 % und 106 %	70 % und 82 %

Die Festigkeitsentwicklung der Hüttenzemente wurde im großen und ganzen durch die Lagerung bei + 3 °C bis zum Alter von 7 Tagen etwas stärker verzögert als bei den Portlandzementen. (Dabei ist zu beachten, daß der HOZ E und der HOZ G einen geringen CaCl₂-Zusatz aufwiesen.) Die Nacherhärtung der Hüttenzemente war jedoch während der 28tägigen Lagerung bei + 3 °C so groß, daß die verzögernde Wirkung in diesem Alter bei ihnen etwa gleich oder sogar etwas geringer war als bei den C₂S-reichen Portlandzementen A und B. Von praktischer Bedeutung ist auch, daß nach 3-, 7- und 28tägiger Lagerung bei + 3 °C — gegebenenfalls auch trotz der stärkeren Verzögerung — sich jeweils ein oder zwei Hüttenzemente fanden, die etwa gleiche oder höhere Druckfestigkeit erlangten als einige der Portlandzemente.

Wird nunmehr die eingangs herausgestellte Frage untersucht, wie die Nacherhärtung verläuft, wenn der 3 °C-Lagerung eine Lagerung bei + 20 °C folgt, so kann man aus den Bildern 2 bis 10 folgendes ableiten:

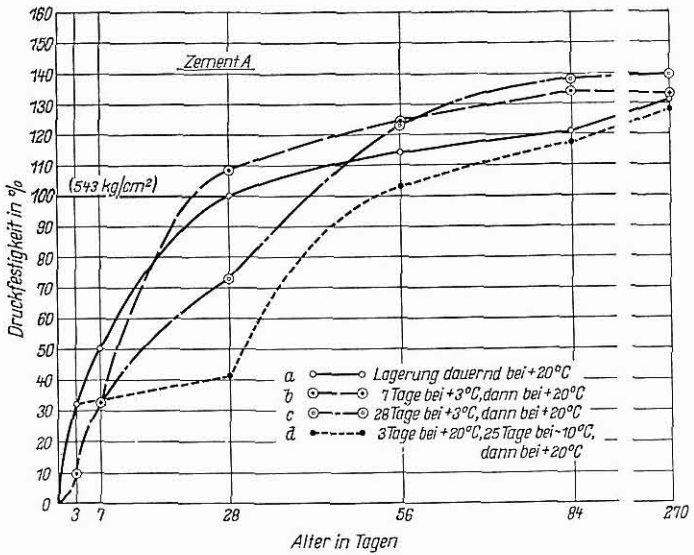


Bild 2 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement A in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfalter

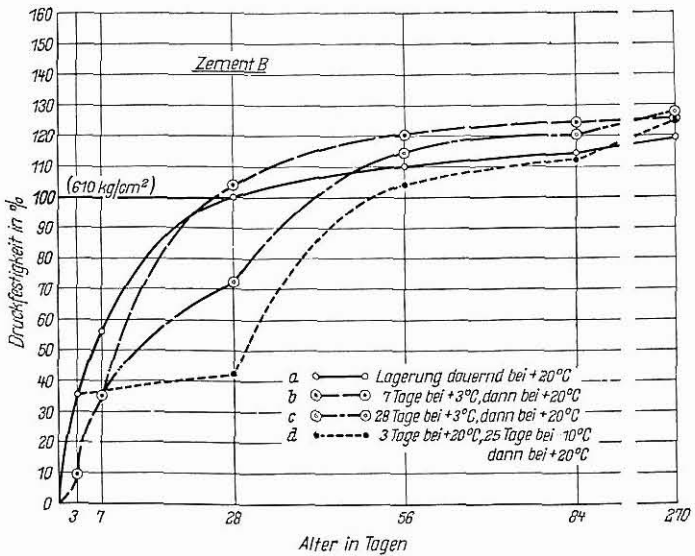


Bild 3 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement B in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfalter

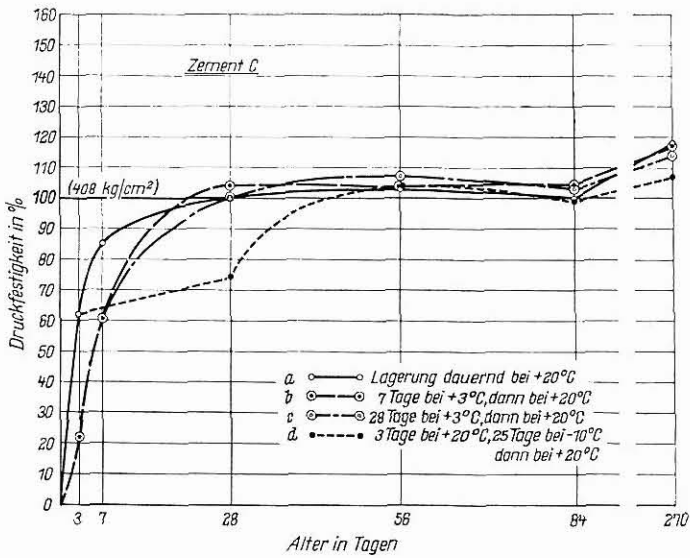


Bild 4 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement C in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

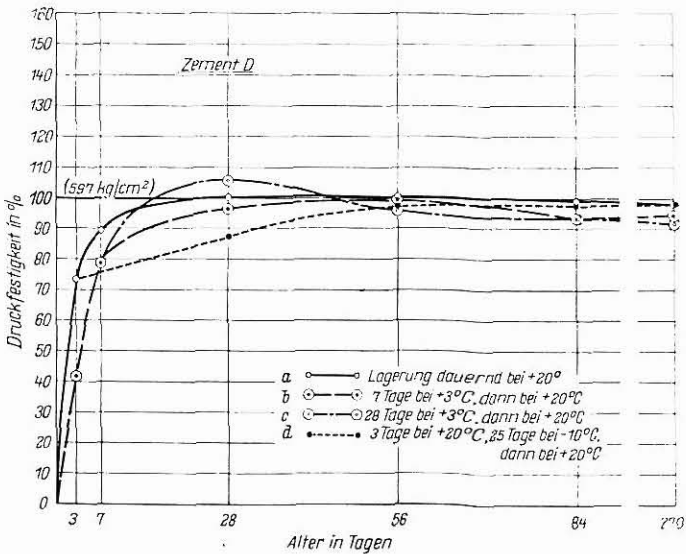


Bild 5 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement D in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

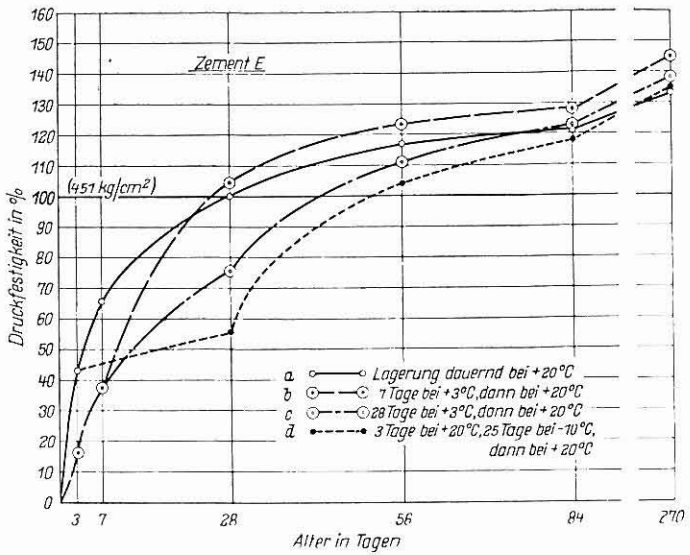


Bild 6 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement E in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfalter

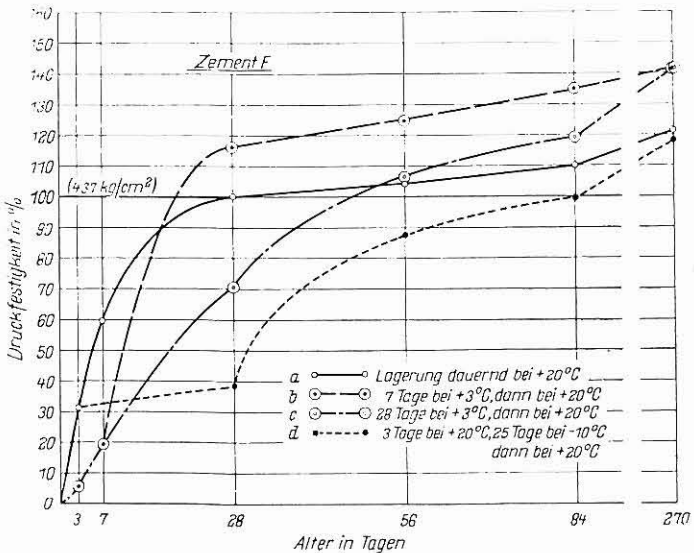


Bild 7 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement F in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfalter

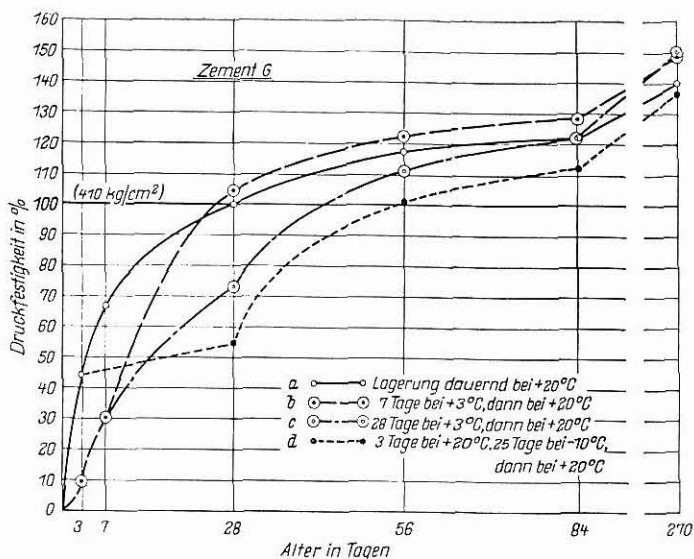


Bild 8 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement G in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

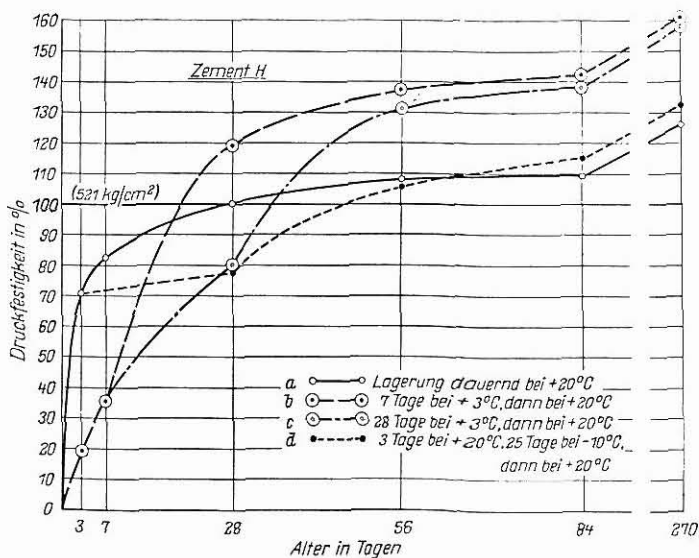


Bild 9 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement H in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

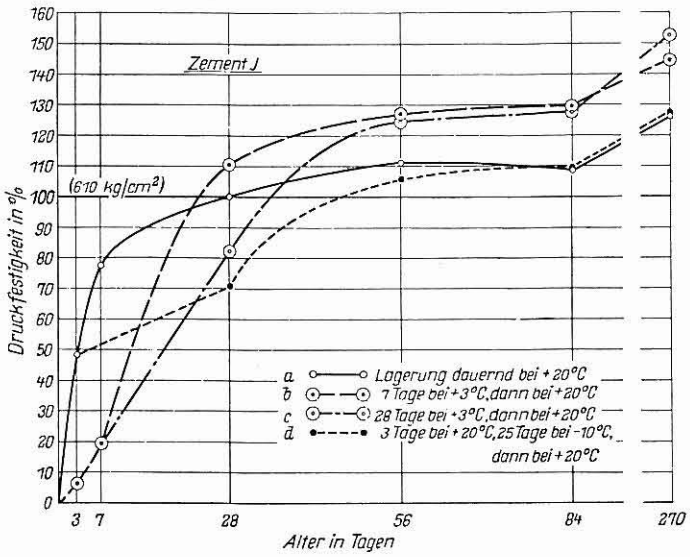


Bild 10 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement J in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

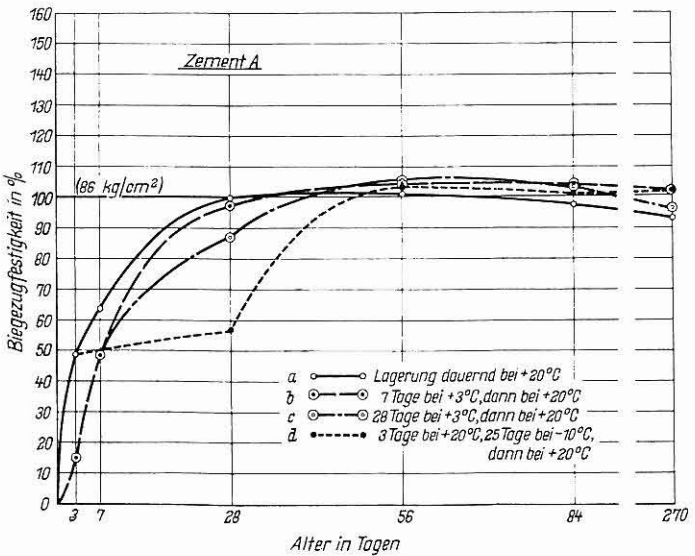


Bild 11 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement A in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

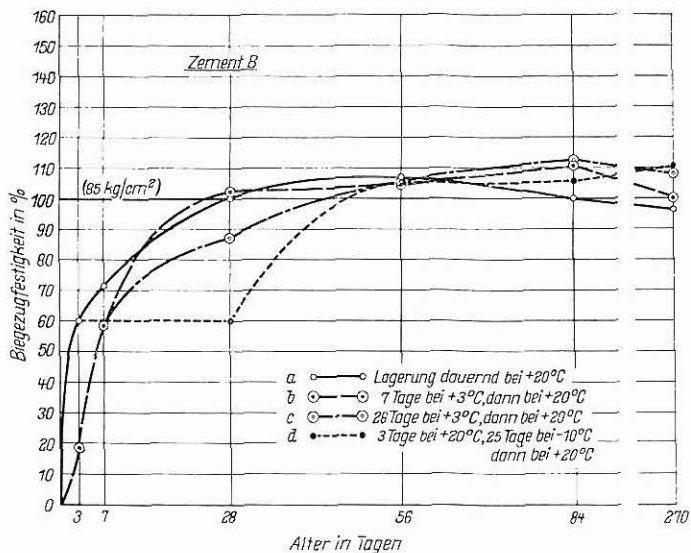


Bild 12 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement B in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

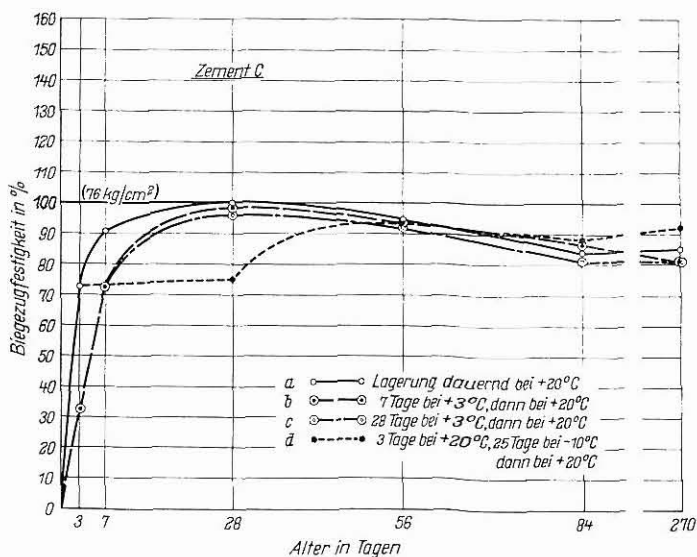


Bild 13 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement C in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

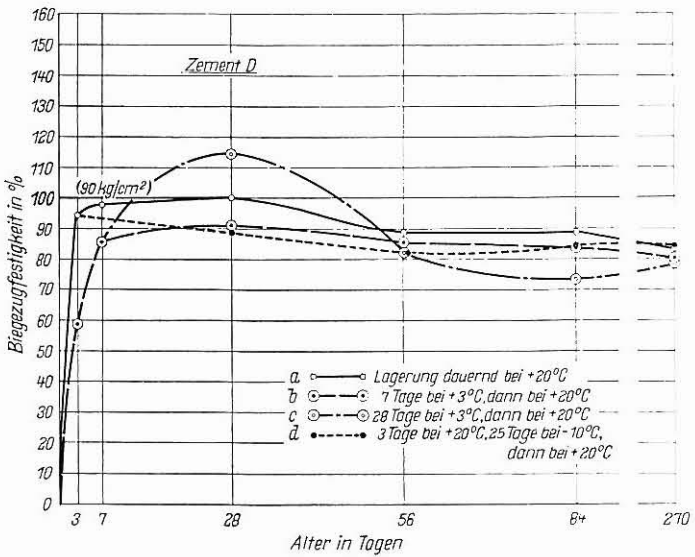


Bild 14 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement D in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfalter

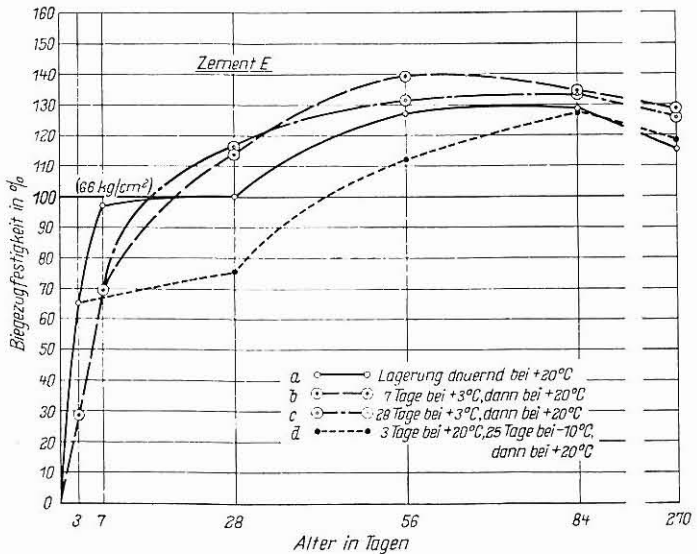


Bild 15 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement E in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfalter

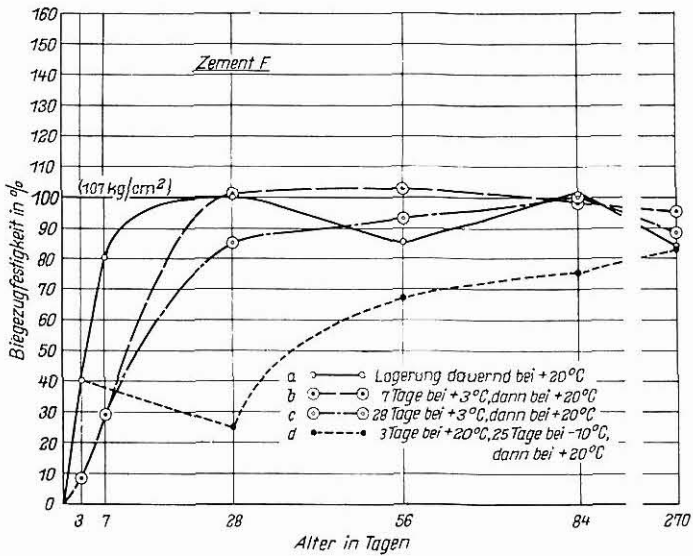


Bild 16 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement F in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

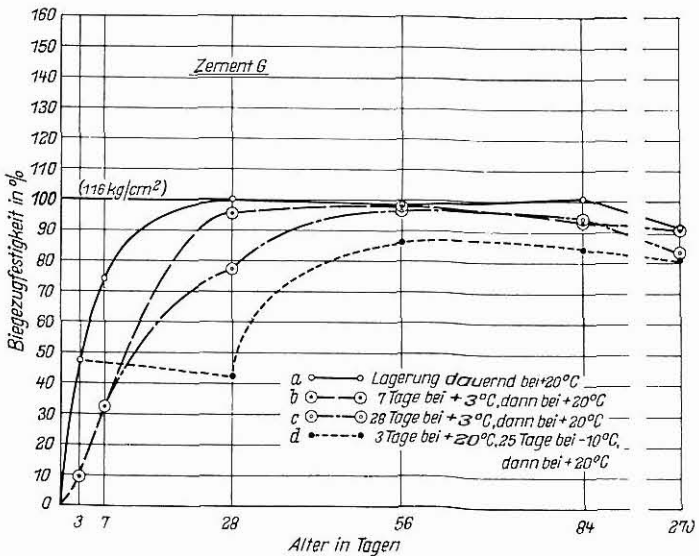


Bild 17 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement G in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfaller

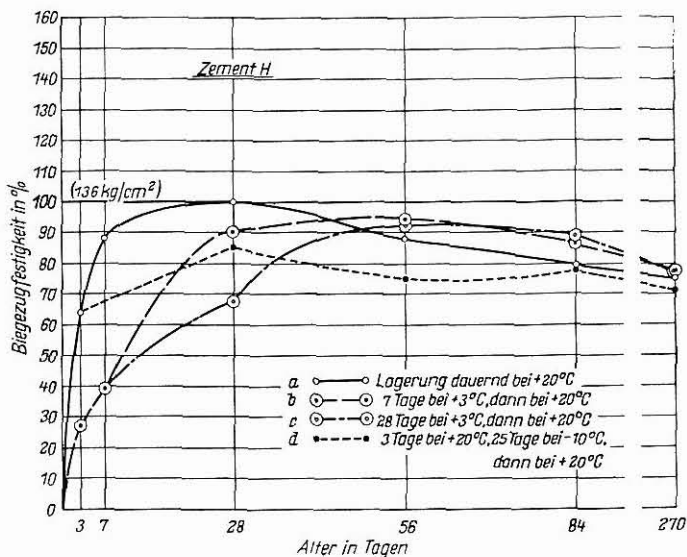


Bild 18 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement H in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfalter

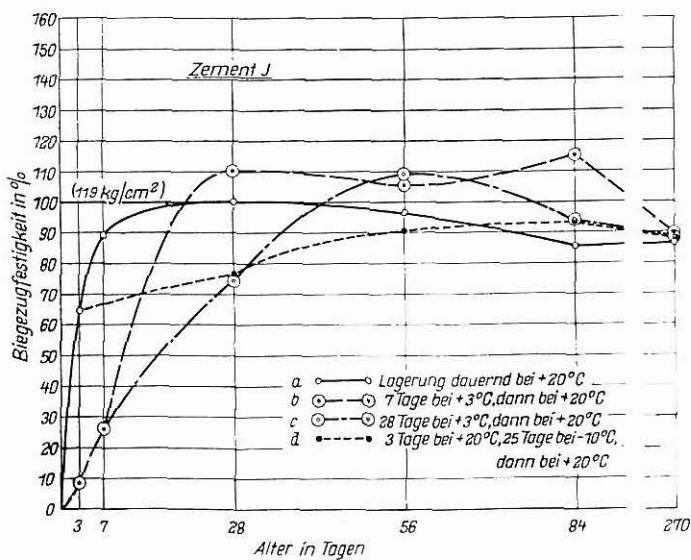


Bild 19 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement J in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfalter

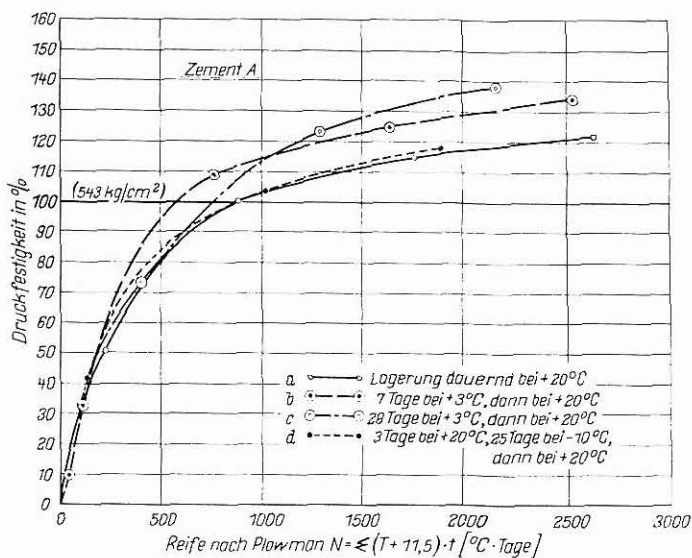


Bild 20 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement A in Abhängigkeit von der Reife nach Plowman

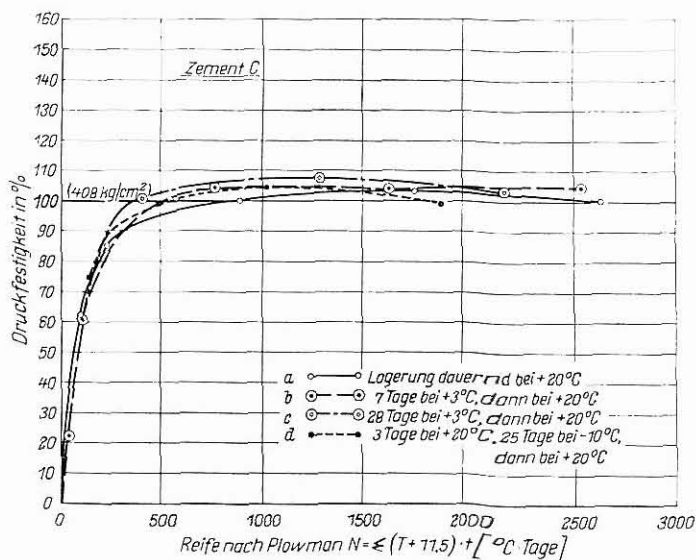


Bild 21 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement C in Abhängigkeit von der Reife nach Plowman

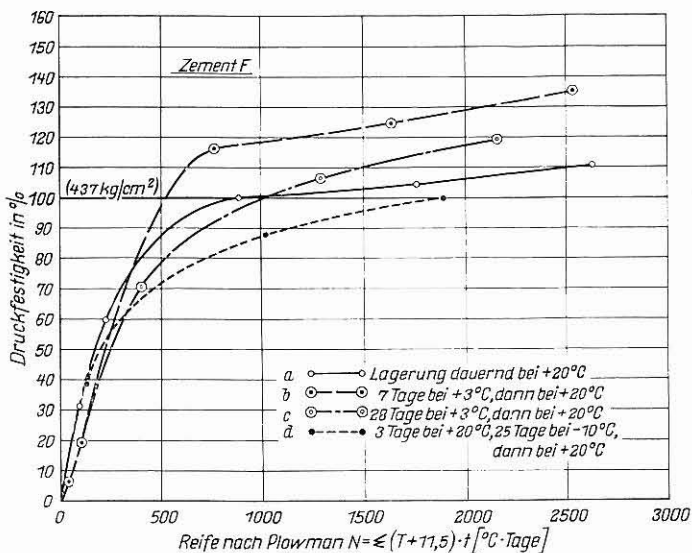


Bild 22 Druckfestigkeit des Mörtels mit Zement F in Abhängigkeit von der Reife nach Plowman

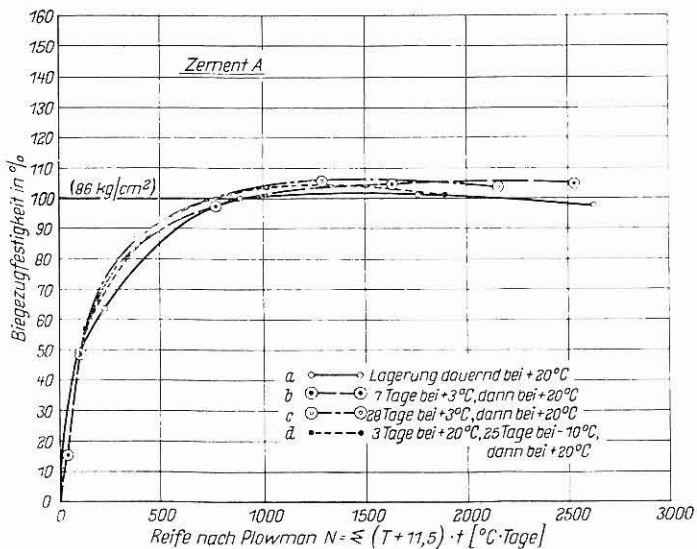


Bild 23 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement A in Abhängigkeit von der Reife nach Plowman

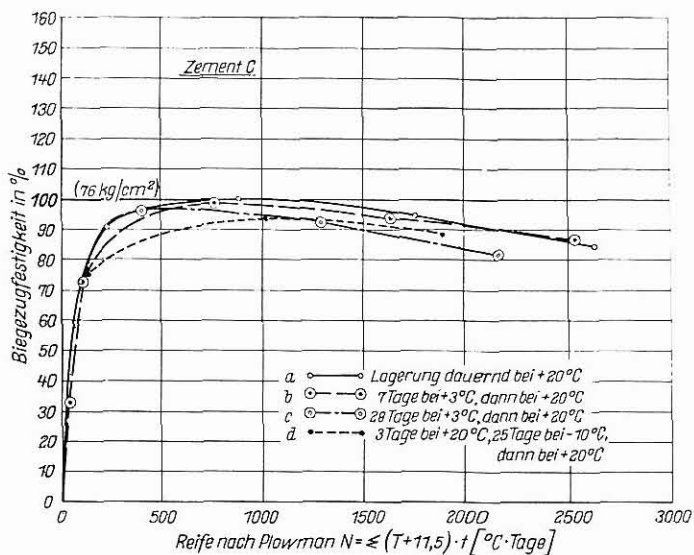


Bild 24 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement C in Abhängigkeit von der Reife nach Plowman

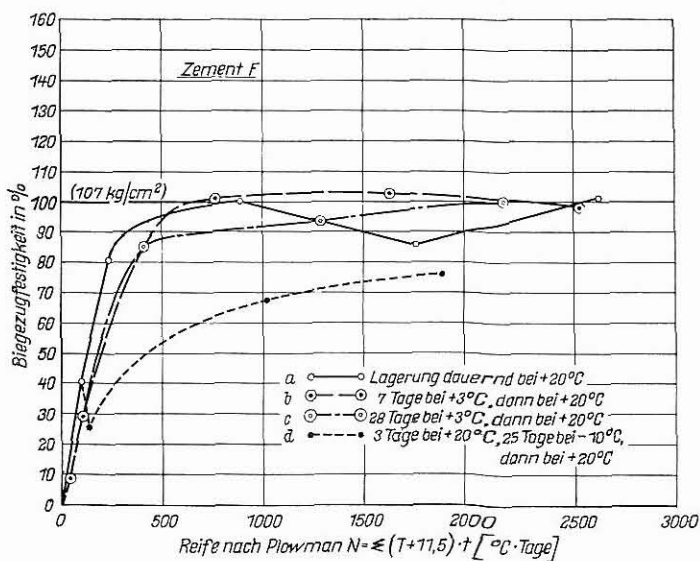


Bild 25 Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement F in Abhängigkeit von der Reife nach Plowman

Erstreckt sich die 3 °C-Lagerung nur auf die ersten 7 Tage (Lagerung b), so liegt die Druckfestigkeit nach 28 Tagen – abgesehen von einer Ausnahme (Zement D) – um 4 bis 19 % über der Druckfestigkeit der ständigen 20 °C-Lagerung. Die Erhöhung der Druckfestigkeit, die sich nach anfänglicher Lagerung bei niedrigerer Temperatur einstellte, trat nach 270 Tagen z. T. noch deutlicher hervor. Bezogen auf die 28 Tage-Druckfestigkeit der ständigen 20 °C-Lagerung fand sich mit

Zement	A	B	C	D	E	F	G	H	J
der Unterschied zu	+2%	+6%	-1%	-4%	+12%	+20%	+9%	+35%	+19%

Die günstige Wirkung einer anfänglichen Lagerung bei niedrigerer Temperatur auf die Nacherhärtung ist ebenfalls bei Lagerung c erkennbar. Auch nach einer 28tägigen Lagerung bei + 3 °C stieg während der anschließenden Nacherhärtung bei + 20 °C die Druckfestigkeit über die Druckfestigkeit der dauernd bei + 20 °C gelagerten Mörtel an. Nach 270 Tagen unterschieden sich die Festigkeiten der anfänglichen 3 °C-Lagerung von jenen der Normallagerung (+ 20 °C), bezogen auf die 28 Tage-Druckfestigkeit der ständigen 20 °C-Lagerung bei

Zement	A	B	C	D	E	F	G	H	J
um	+9%	+9%	-4%	-6%	+5%	+21%	+10%	+32%	+27%

Verglichen mit der Druckfestigkeit nach Lagerung bei + 20 °C entstand nach anfänglicher Erhärtung bei + 3 °C im Alter von 270 Tagen mit den beiden C₂S-reichen Portlandzementen und den beiden Hochofenzementen E und G eine etwas höhere, dagegen bei dem Hochofenzement F und den beiden Sulfathüttenzementen H und J eine wesentlich höhere Druckfestigkeit. Die rasch erhärtenden Portlandzemente C und D, die 3 Tage-Festigkeiten von 256 kg/cm² und 455 kg/cm² aufwiesen, erreichten durch die anfängliche Lagerung bei + 3 °C keine höhere Endfestigkeit²⁾ als nach einer ständigen 20 °C-Lagerung.

Die Druckfestigkeit der ständigen 20 °C-Lagerung wurde von den bei + 3 °C gelagerten Mörteln erreicht:

²⁾ Im Gegensatz zu unseren Feststellungen an den Mörtelproben erreichten Betonproben aus rasch erhärtendem Zement der Type III (etwa Z 475 entsprechend) bei Versuchen von Klieger [18] nach 28tägiger Lagerung bei + 4,5 °C und anschließend bei + 23 °C im Alter von 1 Jahr ausgeprägt höhere Druckfestigkeiten und etwas höhere Biegezugfestigkeiten als die Proben nach ständiger 23 °C-Lagerung. Zur Erlangung erhöhter 1 Jahres-Festigkeiten ergaben sich für alle Zemente optimale Lagerungstemperaturen. Für die Zemente der Typen I und II betrug diese Temperatur + 13 °C, für die Zemente der Type III etwa + 4,5 °C. Auch diese Versuche ergaben keine befriedigende Beziehung zwischen Festigkeit und Reife.

mit Zement	A	B	C	D	E	F	G	H	J
nach etwa	im Anschluß an die 71ägige 3 °C-Lagerung								
	16	22	19	40	22	17	23	18	22 Tagen
nach etwa	im Anschluß in die 28tägige 3 °C-Lagerung								
	48	48	28	14	77	52	84	36	37 Tagen

Für die Praxis kann man daraus folgern, daß die Druckfestigkeit nach einer anfänglichen Lagerung bei niedriger Temperatur auch während der anschließenden Erhärtung unter normaler Temperatur (+ 20 °C) im allgemeinen zunächst etwas zurückbleibt. Wird ein Austrocknen verhindert, so entsteht aber — abhängig von der Zementart — schon bald die Druckfestigkeit, die auch bei normaler Temperatur (+ 20 °C) erreicht wird. Nach einer Lagerung bei niedriger Temperatur kann mit fortschreitendem Alter eine höhere Druckfestigkeit als nach dauernder Lagerung bei normaler Temperatur entstehen.

Lagerung bei — 10 °C (d)

Die Lagerung bei — 10 °C verzögerte die Entwicklung der Druckfestigkeit erheblich mehr als die Lagerung bei + 3 °C. Die nach dreitägiger 20 °C-Lagerung vor dem Einfrieren erreichte Festigkeit war bei den verschiedenen Zementen naturgemäß sehr unterschiedlich. Auch nach dem Einfrieren der Mörtel auf — 10 °C stieg die Druckfestigkeit bei jedem Zement noch an, wie dies aus den Bildern 2 bis 10 ersichtlich ist. Die Druckfestigkeit nahm während der Lagerung bei — 10 °C unabhängig von der Zementart zwischen 10 und 45 %, im Mittel um 25 %, zu. Beim Abkühlen von + 20 °C auf — 10 °C (3 Stunden) und beim Erwärmen von — 10 °C auf + 20 °C (3 Stunden) kann diese zusätzliche Erhärtung kaum eingetreten sein. Es darf daher angenommen werden, daß z. B. auch im Gefrierschacht die Druckfestigkeit des Betons bei einer Temperatur von — 10 °C noch zunimmt [19]. Durch die anschließende Lagerung bei + 20 °C erhärtete der Mörtel in der Regel sehr stark nach. Diese Nacherhärtung war nicht so ausgeprägt bei den Zementen C und D, die bei einer hohen 3 Tage-Festigkeit eingefroren wurden. Bis zum Alter von 270 Tagen wurde die Druckfestigkeit der ständigen 20 °C-Lagerung durchweg erreicht.

3.2.2 Biegezugfestigkeit

Lagerung bei + 20 °C (a)

Die Prismen fast aller Zemente erreichten bei der 20 °C-Lagerung schon etwa im Alter von 28 Tagen die größte Biegezugfestigkeit. Nur die Biegezugfestigkeit des Mörtels mit Zement E nahm nach dem 28. Tag noch deutlich zu. Im Alter von 270 Tagen war die Biegezugfestigkeit bei allen Zementen etwas geringer als in jüngerem Alter. Die Ursache konnte nicht ergründet werden.

Lagerung bei + 3 °C (b und c)

Die Lagerung bei + 3 °C verzögerte auch die Entwicklung der Biegezugfestigkeit, jedoch nicht so stark wie die der Druckfestigkeit. Die Biegezugfestigkeiten nach 270 Tagen waren sowohl nach der anfänglichen 7tägigen als auch nach der 28tägigen 3 °C-Lagerung im großen ganzen etwa ebenso groß wie die Biegezugfestigkeiten nach ständiger 20 °C-Lagerung. Eine günstigere Nacherhärtung durch die anfänglich niedrigere Temperatur machte sich bei der Biegezugfestigkeit nicht so bemerkbar wie bei der Druckfestigkeit. Die anfänglich bei + 3 °C gelagerten Prismen erreichten vorwiegend zwischen dem 14. und 56. Tag die Biegezugfestigkeit der ständigen 20 °C-Lagerung.

Lagerung bei — 10 °C (d)

Die bis zum Einfrieren im Alter von 3 Tagen erreichte Biegezugfestigkeit war bei den verschiedenen Zementen unterschiedlich. Während der folgenden 25tägigen Lagerung bei — 10 °C nahm die Biegezugfestigkeit — entgegen den Feststellungen bei der Druckfestigkeit — nicht nennenswert zu. In einigen Fällen stellten sich Rückgänge ein. Es muß vermutet werden, daß die nach vorsichtigem Auftauen (3 Stunden) ermittelte Biegezugfestigkeit doch von Eigenspannungen überlagert war, die sich durch Änderungen von Temperatur und Feuchtigkeit im Querschnitt ergaben. (Solche Einflüsse sind bekannt und wirken sich auf die Biegezugfestigkeit mehr aus als auf die Druckfestigkeit. Die Spannungen gehen bei längerem Ablagern vor der Prüfung zurück; doch hätte sich dann hier der Einfluß einer weiteren Nacherhärtung bemerkbar gemacht.)

Soweit nicht schon beim Einfrieren im Alter von 3 Tagen eine hohe Biegezugfestigkeit vorhanden war, nahm die Biegezugfestigkeit nach dem Auftauen im Alter von 28 Tagen bei der anschließenden 20 °C-Lagerung rasch zu. Mit den Portlandzementen wurde bereits nach weiteren 28 Tagen (Alter 56 Tage) die Biegezugfestigkeit der 20 °C-Lagerung erreicht. Bei den Hüttenzementen war dies durchweg später der Fall.

Allgemein ist zu bemerken, daß weitgehendere Folgerungen für die Biegezugfestigkeit in Anbetracht der geringen Unterschiede und des stärkeren Hervortretens von Versuchsstreuungen (siehe unstabiler Verlauf der Linienzüge in den Bildern 11 bis 19) nicht angebracht erscheinen.

3.3 Abhängigkeit der Festigkeit von der Reife bei Erhärtung unter niederen Temperaturen

In den Bildern 20 bis 25 sind als Beispiel die Festigkeiten der 3 Zemente A, C und F in Abhängigkeit von der Reife nach Plowman aufgetragen. Es ist festzustellen, daß sich bei niederen Temperaturen z. T. größere Abweichungen von der Festigkeit-Reife-Kurve der 20 °C-Lagerung ergaben. Die Formel erwies sich als weitgehend zutreffend für die Biegezugfestigkeiten der Ze-

mente A (Bild 23) und C (Bild 24) und für die Druckfestigkeit des Zementes C (Bild 21). Größere Abweichungen fanden sich für die Druckfestigkeiten der Zemente A und F und für die Biegezugfestigkeit des Zementes F. Daraus geht hervor, daß bei gleicher Reife die Festigkeit der anfangs bei niedrigerer Temperatur gelagerten Prismen z. T. kleiner, z. T. auch größer als nach der ständigen 20 °C-Lagerung ist. Dies rührt daher, daß einmal die Festigkeitsentwicklung der verschiedenen Zemente durch eine niedrigere Temperatur sehr unterschiedlich verzögert wird und daß zum anderen die Zemente nach einer anfänglichen Lagerung bei niedrigerer Temperatur sehr unterschiedlich nacherhärten. Wie gezeigt wurde, erlangte ein Teil der Zemente durch die Vorbehandlung in gleichem Prüfalalter eine höhere Festigkeit, trotz der vorhandenen kleineren Reife. Es entstanden also größere Festigkeiten, als sie nach der Reifefunktion zu erwarten waren. Nach den vorliegenden Erfahrungen kann eine hinreichende Übereinstimmung der Druckfestigkeit-Reife-Kurven nur für Zemente angenommen werden, deren Festigkeitsentwicklung durch niedrigere Temperaturen nur wenig verzögert wird, z. B. bei den Zementen C und D.

3.4 Orientierende Feststellungen über die bei niedriger Temperatur entstehenden Hydratationsprodukte

Die Tatsache, daß ein Teil der Zemente bei niedrigeren Lagerungstemperaturen geringere Anfangsfestigkeiten, bei anschließender 20 °C-Lagerung aber höhere Endfestigkeiten als bei ständiger 20 °C-Lagerung erreicht, führte zur Frage, ob die Hydratationsprodukte, die sich bei niedrigerer Temperatur bilden, sich von jenen unterscheiden, die bei + 20 °C entstehen. Czernin [20] hat den Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Volumenänderung bei der Hydratation für elf verschiedene Portlandzemente untersucht. Die Zementleime erhärteten teils bei + 20 °C und teils bei + 2 °C. Die Prismen der 2 °C-Lagerung wiesen bei gleicher Festigkeit, die naturgemäß in verschiedenem Alter erhalten wurde, größere Schrumpfwerte auf als die Prismen der 20 °C-Lagerung. Nach Funk [21], der Silikate im Temperaturbereich bis + 120 °C untersuchte, bilden sich bei niedrigeren Temperaturen kalkärmere Calciumsilikathydrate als bei höheren Temperaturen. Zur Klärung dieser Frage wurden einige röntgenographische und chemische Tastversuche an Zementsuspensionen angestellt, die 3 bzw. 7 Tage in feuchter Luft bei + 5 °C oder + 20 °C erhärteten.³⁾

Es zeigte sich, daß die Klinkerminerale (C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF) bei niedrigerer Temperatur langsamer abgebaut werden als unter der höheren Lagerungstemperatur. Der Anteil des freien Kalkes $Ca(OH)_2$ war daher auch in den bei + 20 °C gelagerten Proben

³⁾ Diese Versuche wurden in der Chemisch-Mineralogischen Abteilung des Instituts von Herrn Dr. Locher durchgeführt.

in gleichem Alter durchweg etwas größer als in den bei + 5 °C erhärteten Zementen. Die Kalkkonzentration in der Lösung war jedoch in gleichem Alter bei den Proben der 5 °C-Lagerung wesentlich größer als bei den Proben der 20 °C-Lagerung. Die bedeutend höhere Kalkkonzentration der Lösung läßt vermuten, daß die chemische Zusammensetzung und wahrscheinlich auch die Korngröße und der Ordnungszustand der neugebildeten Kalksilikathydrate anders sind als bei der Erhärtung bei + 20 °C. Eine Änderung des Kalkgehaltes der Kalksilikathydrate wurde ja bereits von Funk [21] nachgewiesen.

Zusammenfassend kann nur angenommen werden, daß die Lagerung bei niederer Temperatur Strukturänderungen, vermutlich aber auch Änderungen der stofflichen Zusammensetzung der Neubildungen zur Folge hat und daß dieser Umstand vielleicht mit ein Grund für die beobachtete höhere Festigkeit nach anfänglicher Lagerung bei niederer Temperatur ist. Eine weitergehende Klärung muß einer eingehenden Untersuchung vorbehalten bleiben.

4. Zusammenfassung

Die Festigkeitsentwicklung neun verschiedener Zemente wurde an Mörtelprismen 4 cm × 4 cm × 16 cm bis zum Alter von 270 Tagen nach anfänglicher Lagerung bei niederer Temperatur untersucht. Zum Vergleich dienten Prismen, die dauernd bei + 20 °C erhärteten.

4.1 Durch eine Lagerung bei anfänglich niederer Temperatur (+ 3 °C) wurde die Festigkeitsentwicklung aller Zemente mehr oder weniger verzögert.

4.2 Auch Zemente, die durch die anfängliche Lagerung bei + 3 °C in ihrer Festigkeitsentwicklung stärker zurückblieben, erreichten bei einer anschließenden 20 °C-Lagerung schon bald die Druckfestigkeit der ständigen 20 °C-Lagerung. Die auch bei 20 °C-Lagerung schon starke Zunahme der Druckfestigkeit dieser Zemente über den 28. Tag hinaus wurde durch eine anfängliche Lagerung bei niederer Temperatur noch wesentlich gesteigert.

4.3 Eine anfängliche Lagerung bei —10 °C verzögerte die Festigkeitsentwicklung erheblich; doch nahm auch bei einer Mörteltemperatur von —10 °C die Druckfestigkeit noch etwas zu. Die Biegezugfestigkeit wurde unmittelbar nach dem Auftauen teils wenig größer, teils kleiner erhalten als vor dem Einfrieren. (Vermutlich war sie von Spannungen aus Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen überlagert.) Auf die Nacherhärtung der verschiedenen Zemente wirkte eine anfängliche Lagerung bei —10 °C ähnlich festigkeitssteigernd wie eine anfängliche Lagerung bei + 3 °C.

4.4 Da eine anfänglich niedere Temperatur bei den meisten Zementen eine geringere Anfangsfestigkeit, jedoch nach anschließender 20 °C-Lagerung eine größere Druckfestigkeit zur Folge

hatte, ergab sich im allgemeinen keine befriedigende Beziehung zwischen Festigkeit und Reife.

4.5 Orientierende röntgenographische und chemische Untersuchungen erlauben die Folgerung, daß die Lagerung bei niedriger Temperatur Strukturänderungen und geringfügige Änderungen der stofflichen Zusammensetzung bei den Hydratationsprodukten zur Folge hat. Zur Klärung dieser Zusammenhänge sind jedoch weitere Versuche nötig.

SCHRIFTTUM :

- [1] Mc. Daniel, A. B.: Influence of temperature on the strength of concrete. Univ. Illinois Eng. Stat., Bulletin Nr. 81, 1915.
- [2] Timms, A. G., und N. H. Withey: Temperature effects on compressive strength of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 30 (1930/31) S. 159/180.
- [3] Graf, O.: Die Eigenschaften des Betons. Berlin 1950. S. 119.
- [4] Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Aufl. Berlin 1959. S. 110.
- [5] Rastrup, E.: Heat of hydration in concrete. Magaz. of Concr. Res. 6 (1954) S. 79/92.
- [6] Böhm, F., und W. Drechsel: Das Betonieren bei Frost. 5. Aufl. Berlin 1951. S. 2.
- [7] Schleicher, E.: Ratgeber für das Bauen im Winter. Wiesbaden 1956. S. 86.
- [8] Nurse, R. W.: Steam curing of concrete. Magaz. of Concr. Res. 1 (1949) S. 79/88.
- [9] Saul, A. G. A.: Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Magaz. of Concr. Res. 2 (1950/51) S. 127/140.
- [10] Bergström, S. G.: Curing temperature, age and strength of concrete. Magaz. of Concr. Res. 5 (1953) S. 61/66.
- [11] Nykänen, A.: Hardening of concrete at different temperatures especially below the freezing point. RILEM-Symposium, Session B II. Kopenhagen 1956.
- [12] Marosszéki, N.: Bestimmung der optimalen Bedingungen der thermischen Erhärtung des Betons. Zement-Kalk-Gips 10 (1957) H. 9, S. 365/368.
- [13] Plowman, I. M.: Maturity and strength of concrete. Magaz. of Concr. Res. 8 (1956) S. 13/22 und S. 69/84, 9 (1957) S. 83/88.
- [14] Hummel, A., und K. Wesche: Von der Erhärtung verschiedener Bindemittel bei niederen Wärmegraden. Zement-Kalk-Gips 8 (1955) H. 9, S. 322/325.
- [15] Brand, W.: Über die Zeit-Temperatur-Abhängigkeit der Erhärtung verschiedener Zementarten. Zement-Kalk-Gips 9 (1956) H. 7, S. 328/332.
- [16] Blondiau, L.: Influence de l'abaissement de la température sur le durcissement des ciments et tout spécialement des ciments à base de laitiers. Silicates Industriels 22 (1957) H. 8 bis 23 (1958) H. 4.
- [17] Kramer, W., und F. Schröder: Über den Aufbau und die Eigenschaften klinkerarmer Hochofenzemente. Techn. Mitt. d. Hauses d. Technik. 52 (1959) H. 10, S. 380/384.
- [18] Klieger, P.: Effect of mixing and curing temperature on concrete strength. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1958) S. 1063/1081.
- [19] Grün, W.: Das Gefrierverfahren zur Stabilisierung von Baugruben. beton 10 (1960) H. 5, S. 204/208.
- [20] Czernin, W.: Über die Schrumpfung des erhärtenden Zementes. Zement-Kalk-Gips 9 (1956) H. 12, S. 525/530.
- [21] Funk, H.: Die Produkte der Wassereinwirkung auf β -Ca₂SiO₄ bis 120°. Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 291 (1957) H. 5/6, S. 276/293.