

Der Einfluß des Zements auf die Eigenschaften von Zementsuspensionen zum Auspressen von Hohlräumen

Von Kurt Walz ¹⁾ und Hans Mathieu, Düsseldorf

Übersicht

Immer wieder wird die Frage gestellt, inwieweit die nach den „Vorläufigen Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkanäle“ wichtigen Eigenschaften des Einpreßmörtels von den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Zements abhängen. Dazu wurden 29 nach Herkunft, Herstellung und Zusammensetzung sehr verschiedene Zemente eingehend untersucht.

Eine allgemein gültige Beziehung zwischen Herstellung, Kornaufbau, Erstarren, Normenfestigkeit sowie chemischer und mineralogischer Zusammensetzung der Zemente und den nach den „Vorläufigen Richtlinien“ ermittelten Eigenschaften der mit den Zementen hergestellten Einpreßmörtel konnte nicht gefunden werden.

1. Einleitung

Zementsuspensionen dienen zum Auspressen von Spannkanälen, von Blockfugen in Massenbetonbauten, von Rissen, Spalten und Hohlräumen in Bauwerken, von wasserführenden Gebirgsschichten im Berg-, Stollen- und Tunnelbau oder zur Verfestigung von nicht genügend festem Untergrund und Gebirge.

Risse und Spalten mit mindestens 0,3 mm Weite oder körnige Haufwerke (z. B. sandiger Untergrund) mit einem Kleinstkorn bis 2 mm Durchmesser können mit wasserreichen Zementsuspensionen (Wassercementwert $w = 0,8 \dots 10$) noch verpreßt werden. Diesen Suspensionen kann feiner Sand bis 0,2 mm Korndurchmesser zugesetzt werden.

Der Durchmesser der in einer Sandschüttung aus kugeligen Körnern mit 2 mm Durchmesser (D) vorhandenen Hohlräume ergibt sich zu etwa $0,15 D$, also zu rd. 0,3 mm. Spaltweiten bis herunter zu $0,1 \dots 0,3$ mm und Haufwerke mit einem kleinsten Korndurchmesser von $0,7 \dots 2,0$ mm lassen sich mit feingemahlener, handelsüblichen Zementen verpressen. Noch feiner gemahlene Zemente, sog. „Kolloidzemente“, deren durchschnittliche Korngröße kleiner als 0,01 mm (Größtkorn 0,03 mm) ist, ermöglichen ein Verpressen von Spalten bis herab zu $0,03 \dots 0,1$ mm Weite und von Haufwerken mit einem kleinsten Korndurchmesser von $0,2 \dots 0,7$ mm [1].

¹⁾ Auszugsweise vorgetragen auf dem „FIP-RILEM Symposium on Injection Grout for Prestressed Concrete“ in Trondheim vom 5. bis 7. Januar 1961.

Bei Zementsuspensionen zur Verfestigung oder zum Abdichten von Hohlräumen im Untergrund, im Fels usw. sind im wesentlichen die Eigenschaften der frischen Suspension, vor allem das Fließvermögen und das Sedimentieren von Bedeutung. Der hohe Wasserzementwert solcher Suspensionen, der z. T. weit über 1,0 liegt, ist nötig, weil die Suspension meist eine niedere Viskosität aufweisen muß. Er ist andererseits möglich, weil nach einem Absetzen des Zements im Hohlraum das zum Transport des Zements dienende Überschußwasser durch hohen Druck aus der abgedichteten Zone als Filterwasser weitgehend ausgepreßt wird [2]. Deshalb sollen solche Suspensionen sich zunächst ohne Sedimentieren verpressen lassen, dann aber in einer ausreichenden Entfernung sedimentieren, damit kein größerer Bereich als notwendig von der Suspension durchsetzt wird.

Andere Bedingungen liegen für das im folgenden behandelte Auspressen der Kanäle mit stählernen Spanngliedern im Spannbeton vor. Für diese Kanäle mit verhältnismäßig großen Durchflußquerschnitten muß die Zementsuspension – bei dieser Anwendung Einpreßmörtel genannt – einen möglichst niederen Wasserzementwert aufweisen. Im allgemeinen liegt hier der Wasserzementwert zwischen 0,35 und 0,45.

Durch Einpreßmörtel ausreichender Festigkeit soll der Verbund zwischen dem im Spannkanal liegenden, oft aus vielen Stäben oder Drähten bestehenden Spannglied und den Wänden des Spannkannels geschaffen werden. Alle Hohlräume müssen ausgefüllt werden, damit der Spannstahl auch gegen Korrosion geschützt ist. In den „Vorläufigen Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkäle“ [3] werden daher folgende Anforderungen an den frischen oder erhärteten Einpreßmörtel gestellt:

Möglichst geringes Absetzen des frischen Mörtels durch Sedimentieren und Schrumpfen (Raumverminderung höchstens 2 %).

Gutes Fließvermögen bis zur Beendigung des Einpressens.

Druckfestigkeit von Zylindern mit 10 cm Durchmesser und 8 cm Höhe nach: 7 Tagen mindestens 200 kg/cm^2 , nach 28 Tagen mindestens 300 kg/cm^2 .

Frostbeständigkeit, d. h. keine Volumenvergrößerung beim Gefrieren 3 Tage alter, bei $+5^\circ\text{C}$ erhärteter Proben.

Diese geforderten Eigenschaften hängen unter sonst gleichen Verhältnissen vom Zement und dem Wasserzementwert ab. Es wird daher immer wieder die Frage gestellt, wie Zement für Einpreßmörtel mit optimalen Eigenschaften beschaffen sein soll.

Die erforderliche Festigkeit ist bei den im allgemeinen angewendeten Wasserzementwerten mit Normzementen zu gewährleisten. Ob die verlangte „Frostbeständigkeit“ auch mit den stofflichen oder physikalischen Eigenschaften eines Zements zusammenhängt, ist nicht ausreichend bekannt. Es bleibt vor allem auch festzustellen, inwieweit das Absetzen (d. i. Wasserabsondern und Schrumpfen) sowie das Fließvermögen (Konsistenz) mit bestimmten Zementeigenschaften, wie chemische Zusammensetzung, Erstarren und Mahlfeinheit, in Zusammenhang gebracht werden können.

Tafel 1 Herstellungsverfahren der Zemente

Zement Nr.	Zementart	Güteklasse	Ofensystem	Mahlsystem
1	PZ ¹⁾	475	Schachtofen und Drehofen	Verbundmühle und Becherwerksumlaufmühle
2	PZ	475		
3	PZ	375		
4	PZ	275		
5	PZ	475	Drehofen	Verbundmühle und Becherwerksumlaufmühle
6	PZ	375		
7	PZ	275		
8	PZ	475	Drehofen	Verbundmühle und Becherwerksumlaufmühle
9	PZ	375		
10	PZ	275		
11	PZ	475	Drehofen	Verbundmühle und Becherwerksumlaufmühle
12	PZ	275		
13	PZ	375	Drehofen	Verbundmühle
14	PZ	275		
15	PZ	275	Drehofen	Verbundmühle
16	PZ	275	Drehofen	Verbundmühle und Becherwerksumlaufmühle
17	PZ	375	Schachtofen	Verbundmühle
18	PZ	275		
19	PZ	275	Schachtofen und Drehofen	Verbundmühle
20	PZ	275	Drehofen	Verbundmühle
21	PZ	275	Schachtofen und Drehofen	Verbundmühle
22	EPZ ¹⁾	275	Drehofen	Verbundmühle
23	EPZ	275	Drehofen	Verbundmühle
24	PZ ¹⁾	475	Drehofen	Verbundmühle und Becherwerksumlaufmühle
25	PZ	375		
26	PZ	275		
27	PZ	475	Drehofen	Verbundmühle und Becherwerksumlaufmühle
28	PZ	275		
29	PZ	275	Schachtofen und Drehofen	Verbundmühle

¹⁾ Mit 0,28, 0,36 bzw. 0,67 % CaCl₂

Um zu diesen Fragen einen Beitrag zu liefern, wurden Zement-suspensionen aus 29 Zementen systematisch nach den „Vorläufigen Richtlinien“ untersucht. Von den Zementen selber, die nach unterschiedlicher Rohstoffgrundlage und Herstellung ausgewählt

Tafel 2 Prüfung der Zemente auf Erstarren und Festigkeit nach DIN 1164

Zement Nr.	Zement- art	Güte- klasse	Wasser- anspruch ¹⁾ Gew.-%	Erstarren		Ausbreit- maß ²⁾ cm	Mörtel-Prismen							
				Beginn	Ende		Biegezugfestigkeit in kg/cm ² nach				Druckfestigkeit in kg/cm ² nach			
							1 T	3 T	7 T	28 T	1 T	3 T	7 T	28 T
1	PZ	475 ³⁾	29,0	1 h 25 m	2 h 40 m	19,0	55	64	75	81	227	401	482	577
2	PZ	475	29,0	4 h 00 m	5 h 15 m	20,0	27	57	71	81	110	300	408	495
3	PZ	375	28,5	3 h 05 m	4 h 25 m	19,0		66	72	91		351	430	549
4	PZ	275	26,0	4 h 05 m	5 h 45 m	19,0		41	55	76		226	303	423
5	PZ	475	29,0	3 h 15 m	4 h 55 m	18,0	39	64	76	87	190	393	457	538
6	PZ	375	28,5	3 h 00 m	4 h 50 m	18,5		56	65	86		293	363	449
7	PZ	275	27,5	3 h 40 m	5 h 35 m	17,0		51	62	79		272	323	443
8	PZ	475	27,0	2 h 25 m	3 h 45 m	16,7	57	61	76	88	165	349	487	599
9	PZ	375	27,0	3 h 00 m	4 h 15 m	20,0		54	70	80		276	403	559
10	PZ	275	26,0	3 h 35 m	5 h 35 m	18,4		47	62	79		225	331	465
11	PZ	475	27,5	3 h 35 m	6 h 25 m	18,7	38	67	72	78	147	404	494	541
12	PZ	275	28,0	3 h 25 m	4 h 35 m	18,0		47	62	82		238	357	496
13	PZ	375	27,0	3 h 05 m	4 h 25 m	18,0		49	61	77		244	346	523
14	PZ	275	26,5	2 h 55 m	4 h 25 m	18,0		44	60	78		230	377	533
15	PZ	275	26,0	3 h 45 m	5 h 35 m	17,5		38	59	69		172	293	412
16	PZ	275	27,5	3 h 35 m	5 h 00 m	19,5		48	66	83		246	353	457
17	PZ	375	27,5	3 h 05 m	4 h 15 m	18,5		51	61	83		278	341	445
18	PZ	275	27,0	3 h 10 m	4 h 35 m	19,0		47	60	74		254	329	412
19	PZ	275	27,0	3 h 30 m	5 h 20 m	19,8		44	50	71		189	255	368
20	PZ	275	26,0	3 h 20 m	4 h 35 m	18,5		42	56	77		170	297	486
21	PZ	275	27,0	3 h 55 m	5 h 35 m	19,5		45	61	80		224	318	449
22	PZ	275 ³⁾	27,0	2 h 40 m	4 h 05 m	19,0		36	45	68		169	235	378
23	EPZ	275	27,5	3 h 15 m	5 h 05 m	18,5		38	54	77		163	272	428
24	EPZ	475 ³⁾	28,0	2 h 20 m	3 h 30 m	19,0	46	64	72	85	186	365	459	539

25	PZ	375	26,5	3 h 40 m	5 h 25 m	19,3	44	66	84	210	371	507
26	PZ	275	26,0	3 h 40 m	5 h 30 m	19,0	44	62	76	196	331	466
27	PZ	475	33,0	2 h 45 m	4 h 10 m	19,5	63	73	93	351	491	600
28	PZ	275	27,0	4 h 00 m	5 h 45 m	18,6	47	62	80	229	349	496
29	PZ	275	26,0	2 h 15 m	3 h 40 m	19,7	42	61	73	202	305	419

1) Wasseranspruch der Zementpaste für Normalsteife nach DIN 1164
 2) Ausbreitmaß des Mörtels nach DIN 1164 bei einem Wasserzementwert von 0,60

3) Mit 0,28, 0,36 bzw. 0,67 % CaCl₂

wurden, sind zur Kennzeichnung die chemische und mineralogische Zusammensetzung, die spezifische Oberfläche, der Kornaufbau, das Erstarren, die Raumbeständigkeit und die Normfestigkeit ermittelt worden.

2. Auswahl der Zemente

Die untersuchten 27 Portlandzemente und 2 Eisenportlandzemente sind in Tafel 1 aufgeführt. Sie gehören nach ihrer Lieferbezeichnung den Güteklassen Z 275, Z 375 und Z 475 an. Um die verschiedenen Rohstoffgrundlagen zu berücksichtigen, wurden aus den einzelnen Herstellungsgebieten der Bundesrepublik jeweils 1 bis 3 Portlandzementwerke ausgewählt, so daß Zemente aus Schacht- und Drehofenklinker einbezogen wurden und Zemente, die in Verbundmühlen oder Becherwerksumlaufmühlen (Sichter-mühlen) gemahlen worden waren. Einige Zemente stammen aus Werken, die mit beiden Ofensystemen und zum Teil auch mit verschiedenen Mahlsystemen arbeiten. (In vielen Fällen konnte der Zement nicht dem einen oder anderen Ofen- und Mahlsystem zugeordnet werden, weil es sich bei diesen Zementen auch um Gemische handeln kann.)

3. Untersuchung der Zemente

Die Zemente wurden nach DIN 1164 auf Erstarren, Raumbeständigkeit und Festigkeit sowie Mahlfeinheit geprüft, außerdem wurde die chemische Zusammensetzung durch eine eingehende chemische Analyse ermittelt und der Anteil der Klinkerphasen errechnet.

3.1 Erstarren, Raumbeständigkeit und Festigkeiten nach DIN 1164

Die Prüfergebnisse sind in Tafel 2 zusammengestellt. Die Prüfung auf Raumbeständigkeit wurde von allen Zementen bestanden.

3.2 Mahlfeinheit

Da die Mahlfeinheit nach den bisherigen Feststellungen eine Einflußgröße zu sein scheint, wurde die Mahlfeinheit durch die spezifische Oberfläche der Zemente nach Blaine und durch die Sedimentationsanalyse nach Andreasen bis in den feinsten Bereich untersucht.

Die nach den drei Verfahren (Siebanalyse, spezifische Oberfläche und Sedimentationsanalyse) erhaltenen Kennwerte für die Feinheit finden sich in Tafel 3.

Siebanalyse. Die Zemente wurden auf den Maschensieben mit 0,2 mm, 0,09 mm und 0,06 mm abgesiebt und die Siebdurchgänge in Gew.-% angegeben. Es fanden sich folgende Grenzen:

	für Anteil < 0,09 mm	für Anteil < 0,06 mm
max.	99,8 % (Zemente Nr. 5 und 24)	99,2 % (Zement Nr. 27)
min.	85,9 % (Zement Nr. 15)	66,0 % (Zement Nr. 15)

Die spezifische Oberfläche wurde nach Blaine über die Luftdurchlässigkeit einer Zementschicht bestimmt. Die größte spezifische Oberfläche fand sich mit 5460 cm²/g für Zement Nr. 1 und die kleinste mit 2600 cm²/g für Zement Nr. 28.

Tafel 3 Mahlfeinheit der Zemente

Zement Nr.	Zement- art	Güte- klasse	Siebanalyse Durchgang in Gew.-% durch Sieb DIN 1171				Sedimentationsanalyse Anteile in Gew.-%, bis					Spezifische Oberfläche			Spezifisches Gewicht g/cm ³
			0,2 mm	0,12 mm	0,09 mm	0,06 mm	0,030 mm	0,015 mm	0,008 mm	0,004 mm	0,002 mm	nach Blaine cm ² /g	für Anteil 0,002 . . . 0,128 mm cm ² /g	für Anteil < 0,002 mm (als Differenz) cm ² /g	
1	PZ ¹⁾	475	99,9	99,9	99,7	98,0	85,2	60,5	39,6	21,5	8,3	5460	2100	3360	3,13
2	PZ	475	99,9	99,9	98,7	94,4	81,0	54,0	33,0	15,1	5,0	4800	1940	2860	3,12
3	PZ	375	100,0	100,0	98,9	95,5	80,0	59,3	32,6	14,4	4,4	4340	1970	2370	3,13
4	PZ	275	99,8	96,7	91,2	76,8	52,7	32,5	19,2	9,5	3,6	2980	1420	1560	3,11
5	PZ	475	99,9	99,9	99,8	98,3	78,7	48,8	32,8	18,2	8,2	4530	1830	2700	3,12
6	PZ	375	99,8	98,9	96,0	86,7	59,0	37,2	24,6	11,8	4,3	3350	1460	1890	3,14
7	PZ	275	99,5	97,0	92,0	79,1	53,3	29,1	16,7	7,3	2,5	2730	1210	1520	3,14
8	PZ	475	99,9	99,8	99,5	97,3	86,0	53,7	35,2	17,7	8,8	5160	1830	3330	3,15
9	PZ	375	99,9	99,9	99,4	95,9	77,8	50,3	30,9	17,2	7,6	4290	1810	2480	3,11
10	PZ	275	99,8	97,0	92,5	78,7	56,2	33,2	21,0	10,8	3,9	2950	1300	1650	3,19
11	PZ	475	99,9	99,0	97,6	93,4	82,0	55,6	32,4	16,8	6,3	4490	1900	2590	3,15
12	PZ	275	99,9	98,8	95,0	88,6	63,2	35,5	21,6	11,1	4,0	3000	1440	1560	3,12
13	PZ	375	99,9	99,6	94,4	81,4	60,0	39,0	24,0	12,3	5,8	3360	1380	1980	3,19
14	PZ	275	99,9	98,5	95,7	86,0	70,7	40,0	24,1	12,4	6,5	3640	1390	2250	3,20
15	PZ	275	99,6	96,0	85,9	66,0	48,1	28,0	18,3	8,6	2,7	2750	1240	1510	3,15
16	PZ	275	99,9	99,4	92,2	80,1	53,2	35,1	21,7	9,3	2,9	2720	1410	1310	3,14
17	PZ	375	99,9	99,0	95,0	83,8	60,0	41,0	25,2	14,3	5,8	3800	1340	2460	3,10
18	PZ	275	99,9	98,5	93,7	82,4	59,2	39,4	25,6	14,0	5,5	3700	1560	2140	3,10
19	PZ	275	99,7	97,0	92,6	80,5	55,0	31,0	18,2	8,3	2,5	2740	1320	1420	3,09
20	PZ	275	99,6	97,0	91,1	76,0	53,0	31,8	18,5	8,8	3,4	2640	1270	1370	3,14
21	PZ	275	99,8	99,2	92,0	78,7	55,3	35,6	23,1	11,3	5,0	3220	1350	1870	3,11
22	EPZ ¹⁾	275	99,9	99,2	95,9	87,9	64,1	40,8	24,8	13,5	5,8	3490	1580	1910	3,03
23	EPZ	275	99,9	99,2	96,7	86,0	59,1	39,5	24,3	14,3	5,8	3380	1640	1740	3,02
24	PZ ¹⁾	475	99,9	99,9	99,8	98,0	83,0	56,1	34,7	18,8	10,0	4730	1790	2940	3,12

25	PZ	375	99,9	98,5	97,0	91,4	72,3	43,9	25,4	11,6	3,1	3450	1700	1750	3,13
26	PZ	275	99,4	98,7	92,0	78,0	54,7	32,4	20,2	11,8	3,7	2950	1300	1630	3,14
27	PZ	475	99,9	99,9	99,7	99,2	87,3	72,6	40,9	21,0	5,5	4530	2370	2160	3,12
28	PZ	275	99,2	98,0	93,0	78,0	59,0	32,4	18,1	5,8	0,6	2600	1370	1230	3,15
29	PZ	275	99,9	99,6	96,3	85,2	65,7	42,8	27,4	14,7	5,5	4030	1620	2410	3,13

1) Mit 0,28, 0,36 bzw. 0,67 % CoCl_2

Teilt man die 29 Zemente nach ihrer spezifischen Oberfläche in 3 Gruppen ein (grobe Zemente, Zemente mittlerer Feinheit und feine Zemente), so ergeben sich für diese folgende spezifische Oberflächen:

grobe Zemente (2600 bis 3400 cm^2/g) im Mittel 2950 cm^2/g ,
 Zemente mittlerer Feinheit (3400 bis 4200 cm^2/g), im Mittel 3700 cm^2/g ,
 feine Zemente (4200 bis 5460 cm^2/g) im Mittel 4700 cm^2/g .

Bei der *Sedimentationsanalyse* nach Andreasen wurden mit Chinolin als Schlämmlöslichkeit die Anteile $< 0,030$ mm, $< 0,015$ mm, $< 0,008$ mm, $< 0,004$ mm und $< 0,002$ mm erhalten. Typische Beispiele für die Kornverteilung sind in den Bildern 1 bis 3 wiedergegeben. Bild 1 ist kennzeichnend für feine Zemente (Nr. 1, 8, 24 und 27), Bild 2 für Zemente mit mittlerer Feinheit (Nr. 14, 17 und 29) und Bild 3 für grobe Zemente (Nr. 16, 20 und 28). Die Zemente weisen durchweg eine stetig ansteigende Kornverteilungskurve auf. In Bild 1 gibt die Kurve für Zement Nr. 27 die

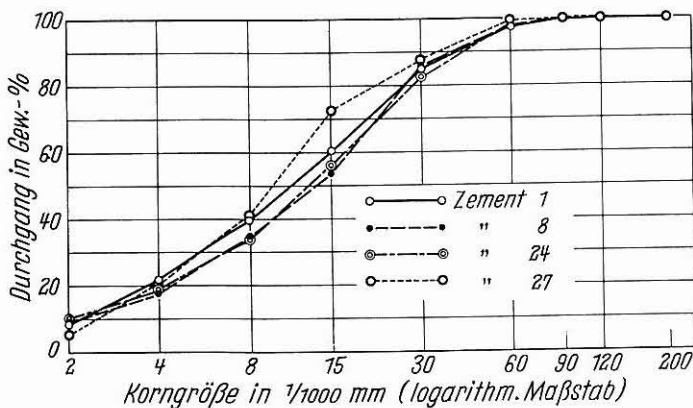


Bild 1 Beispiel für die Kornverteilung feiner Zemente (Nr. 1, 8, 24 und 27)

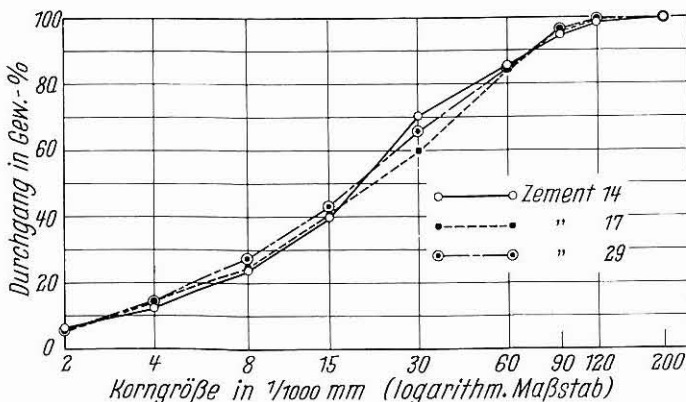


Bild 2 Beispiel für die Kornverteilung von Zementen mittlerer Feinheit (Nr. 14, 17 und 29)

Tafel 4 Berechnung der spezifischen Oberfläche ($O_{\text{spez.}}$) für die Korngruppe 0,002 . . . 0,128 mm nach S. Odén (Beispiel für Zement Nr. 1)

D	G	Δ_D	Δ_G	Δ_G/Δ_D
2	8,5			
4	21,5	2	13,0	6,50
8	39,5	4	18,0	4,50
16	62,5	8	23,0	2,88
32	88,0	16	25,5	1,59
64	98,5	32	10,5	0,33
128	100,0	64	1,5	0,02
$\Sigma \Delta_G/\Delta_D$				= 15,82
$\Sigma \Delta_G/\Delta_D \cdot \Delta \log D$		= 15,82 · 0,301		
		= 4,76		
$O_{\text{spez.}} 0,002 \dots 0,128 \text{ mm}$		= $\frac{600 \cdot 2,303 \cdot 4,76}{3,13}$		
		= 2100		
$O_{\text{spez.}} \text{ nach Blaine}$		= 5460 cm ² /g		
— $O_{\text{spez.}} 0,002 \dots 0,128 \text{ mm}$		= 2100 cm ² /g		
$O_{\text{spez.}} 0 \dots 0,002 \text{ mm}$		= 3360 cm ² /g		

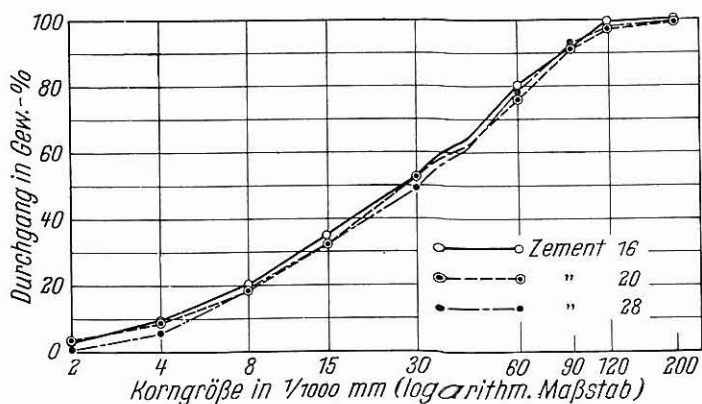


Bild 3 Beispiel für die Kornverteilung grober Zemente (Nr. 16, 20 und 28)

Kornverteilung eines Zementes wieder, der in einer Becherwerks-
umlaufmühle gemahlen wurde.

Um die spezifische Oberfläche für den Anteil bis 0,002 mm als
weiteren Kennwert zu erhalten, wurde die Oberfläche der Korn-
gruppe von 0,002 bis 0,128 mm aus den Kornanteilen der Sedi-
mentationsanalyse nach Odén errechnet (Tafel 4) [4].

Die Differenz aus der spezifischen Oberfläche nach Blaine und
nach Odén gibt einen Anhaltswert für die vielleicht ebenfalls
bedeutungsvolle spezifische Oberfläche des Anteils $< 0,002$ mm;
diese ist in Tafel 3 aufgeführt.

3.3 Chemische und mineralogische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung aller Zemente und die mine-
ralogische Zusammensetzung der Portlandzementklinker sind aus
Tafel 5 zu ersehen. Die Gehalte der Klinker an Tricalciumalumi-
nat (C_3A), Tricalciumsilikat (C_3S), Bicalciumsilikat (C_2S) und Te-
tracalciumaluminatferrit (C_4AF) wurden nach Bogue als „bedingt

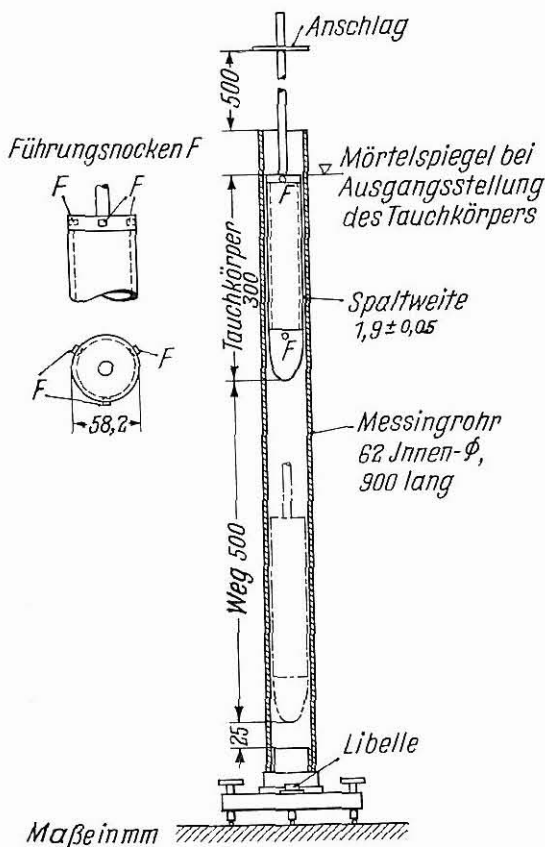


Bild 4 Einlauchgerät zum Messen der Konsistenz des Einpreß-
mörtels (Gewicht des Tauchkörpers 5000 g)

Tafel 5 Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Zemente

Zement Nr.	Zement- art	Güte- klasse	Unlös- l. Rückst.	Chemische Zusammensetzung in Gew.-%											Klinkerminerale errechnet nach R. H. Bogue in Gew.-%				freier Kalk ¹⁾ Gew.-%	
				SiO ₂	Al ₂ O ₃ + TiO ₂ + P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃ ²⁾	S ³⁾	Cl ⁴⁾	Glüh- verlust	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A		C ₄ AF
				1	PZ ²⁾	475	0,17	18,29	5,49	4,73	0,07	63,22	1,39	0,92	0,05	2,49		0,18		2,52
2	PZ	475	0,39	18,75	5,74	4,46	0,11	62,90	1,50	0,83	0,05	2,85			2,54	52,3	14,3	7,5	13,9	1,95
3	PZ	375	0,50	18,51	5,49	4,75	0,09	63,03	1,60	0,83	0,06	2,88		0,03	2,26	56,9	10,2	6,4	14,7	1,71
4	PZ	275	0,64	18,41	5,89	4,83	0,12	62,15	1,58	0,83	0,05	2,53		0,03	2,98	49,8	15,3	7,2	15,1	2,32
5	PZ	475	0,15	19,07	5,73	2,84	0,17	64,23	2,60	0,79	0,27	2,78			1,32	60,5	9,1	10,1	9,2	1,30
6	PZ	375	0,21	19,44	6,29	2,81	0,18	63,68	2,14	0,92	0,32	2,69			1,19	52,0	16,5	11,6	9,1	1,30
7	PZ	275	0,16	19,60	6,47	2,84	0,17	64,48	2,04	0,85	0,13	2,20			0,81	54,3	15,2	12,1	9,2	1,26
8	PZ	475	0,31	19,80	4,91	2,70	0,12	64,84	1,67	0,38	0,08	2,93			1,69	63,3	9,2	7,9	8,2	1,49
9	PZ	375	0,36	20,09	5,52	2,71	0,09	64,10	1,21	0,50	0,11	2,74			2,54	52,5	18,0	9,5	8,3	2,00
10	PZ	275	0,33	19,92	5,81	2,76	0,08	65,25	1,01	0,40	0,07	2,76			1,54	55,7	15,1	10,6	8,6	1,85
11	PZ	475	0,57	18,57	5,02	3,18	0,12	63,40	3,03	0,78	0,29	2,74		0,03	1,68	63,3	5,5	7,7	10,0	1,80
12	PZ	275	0,86	19,04	6,21	2,91	0,18	62,46	3,21	0,75	0,30	2,62			1,28	46,2	19,8	11,2	9,4	2,39
13	PZ	375	0,18	21,33	5,14	2,64	0,13	65,68	0,95	0,26	0,07	2,44			1,25	52,2	21,8	8,9	8,4	1,85
14	PZ	275	0,19	21,26	5,17	2,62	0,11	65,82	0,89	0,24	0,09	2,46			1,23	52,8	21,1	9,1	8,3	1,93
15	PZ	275	0,19	19,58	6,24	2,77	0,09	62,17	4,14	1,68	0,22	2,22			1,11	46,4	21,2	11,4	8,4	1,65
16	PZ	275	0,26	18,73	6,58	3,71	0,08	63,31	2,09	1,64	0,15	2,44			1,16	54,1	12,9	10,7	11,3	1,42
17	PZ	375	0,50	22,48	3,95	1,64	0,09	66,21	0,72	0,39	0,17	1,82		0,01	2,07	56,3	22,0	7,5	5,3	2,00
18	PZ	275	0,71	22,30	3,97	1,60	0,09	65,60	0,72	0,39	0,17	1,62		0,03	2,77	55,0	22,5	7,7	5,1	2,18
19	PZ	275	0,67	20,66	6,33	2,21	0,13	62,74	1,45	0,67	0,12	2,46			2,36	37,3	31,1	12,8	7,1	2,00
20	PZ	275	0,32	20,95	6,40	2,24	0,12	64,93	1,40	0,52	0,11	2,06			0,78	46,0	25,4	13,0	7,2	1,68
21	PZ	275	0,48	21,40	3,93	1,64	0,08	66,09	0,80	0,48	0,22	2,36			1,77	59,4	16,6	7,3	5,0	2,99
22	EPZ ²⁾	275	0,31	22,32	9,56	1,50	1,99	54,41	3,91	0,58	0,34	3,14	0,46	0,23	1,27					1,23
23	EPZ	275	0,45	24,03	9,51	1,78	0,42	57,09	3,48	0,21	0,35	1,28	0,91	0,04	0,62					1,44
24	PZ ²⁾	475	0,00	19,24	5,82	2,88	0,08	65,19	1,26	0,92	0,26	2,39		0,43	1,35	61,8	8,6	10,4	9,0	1,77

25	PZ	375	0,07	20,63	5,65	2,92	0,07	64,38	1,26	0,79	0,22	2,04	0,02	1,77	51,0	20,7	9,9	9,1	1,52
26	PZ	275	0,22	20,52	6,13	2,71	0,06	64,47	1,32	0,70	0,21	1,94	1,55	1,55	49,8	21,3	11,6	8,4	1,47
27	PZ	475	0,13	21,90	5,21	1,92	0,09	65,35	0,86	0,69	0,14	3,07	1,04	1,04	54,9	18,5	10,4	6,1	1,37
28	PZ	275	0,17	21,69	5,86	2,13	0,09	65,07	1,31	0,84	0,18	2,10	0,56	0,56	49,3	25,0	11,6	6,5	0,84
29	PZ	275	0,20	21,07	6,04	2,26	0,09	62,33	2,22	1,86	0,17	2,39	1,82	1,82	38,8	31,1	11,7	6,9	1,28

1) CaO + Ca(OH)₂ 2) Mit 0,28, 0,36 bzw. 0,67 % CaCl₂

mögliche" Zusammensetzung errechnet. Der freie Kalk (CaO und Ca(OH)₂) wurde nach Franke ermittelt. (Die Zemente Nr. 1, 22 und 24 enthielten Calciumchlorid und könnten daher zu Einpreßmörtel nicht verwendet werden.)

4. Prüfung von Zementsuspensionen nach den „Vorläufigen Richtlinien“

4.1 Zementsuspensionen ohne Zusatzmittel

Die Zementsuspension (Einpreßmörtel) wurde in einem Zwangsmischer mit waagerechter Mischtrommel und 4 Rührarmen während rd. 4,5 min gemischt.

Der Wasserzementwert wurde so gewählt, daß die Tauchzeit (Konsistenz) im Gerät nach Bild 4 sich im Mittel aus dem 2. und 3. Versuch zu 35 ± 2 sec ergab. Die Tauchzeit wurde ferner eine halbe Stunde nach Beendigung des Mischens zur Beurteilung des Erstarrens und der Verpreßdauer wiederholt. Die Ergebnisse finden sich in Tafel 6. (Nach den „Vorläufigen Richtlinien“ werden als Richtwerte für die Tauchzeit von Mörtel für lange, enge Spannglieder etwa 30 sec, für weite Spannglieder etwa 40 sec angegeben. Die Tauchzeit soll nach 30 min noch unter 80 sec liegen.)

Ein Teil der Zementsuspension wurde in zylindrische Blechdosen (Konservendosen) von rd. 10 cm Durchmesser und 11,5 cm Höhe zur Ermittlung des Absetzens (Sedimentierens und Schrumpfens) 10 cm hoch eingefüllt. Die Konservendosen wurden durch Auflegen und Beschweren des zugehörigen Deckels mit Gummifalz dicht verschlossen und bei einer Raumtemperatur von 20 ± 1 °C gelagert. Nach 6 h wurden die Schichthöhe des abgesetzten Wassers und das Absetzen der Füllung in Prozent des ursprünglichen Inhalts gemessen, ferner nach 24 h das endgültige Absetzen. (Da das abgesetzte Sediment bei den meisten Zementen nach 6 h noch keine scharf abgegrenzte Oberfläche erkennen ließ und die Oberfläche durch das überstehende Wasser hindurch eingemessen werden mußte, sind die Messungen nach 6 h nicht sehr genau.) Das Mittel der Messungen in 3 Konservendosen ist in Tafel 6 aufgeführt. Nach 24 h war das nach 6 h bei den meisten Proben auf der Oberfläche abgesetzte Wasser wieder aufgesaugt.

Ein bis zwei Tage vor der Prüfung auf Druckfestigkeit wurden die rd. 10 cm hohen Zylinder nach Aufschneiden des Blechmantels durch Absägen einer Scheibe an beiden Flächen auf ungefähr 8 cm gekürzt und die Druckflächen unter ständigem Feuchthalten der Flächen eben geschliffen. Die hergerichteten Zylinder ($d = 10$ cm, $h = 8$ cm) lagerten unter feuchten Tüchern. Vor der Prüfung auf Druckfestigkeit im Alter von 7 und 28 Tagen wurde die Rohwichte durch Wägen und Ausmessen bestimmt (Ergebnisse siehe Tafel 6).

Schließlich wurde die Zementsuspension zur Herstellung von Proben für die Frostprüfung in Stahlzylinder eingefüllt (Durchmesser 5 cm, Höhe 12 cm; Raum 235 cm³) und nach Abdecken mit einer Glasplatte bis zur Prüfung auf „Frostbeständigkeit“ im Alter von 3 Tagen bei 5 ± 2 °C gelagert. Die Raumänderung der entformten Proben beim Gefrieren wurde in einem Dilatometer mit Quecksilberbad beobachtet. Die durch das Abkühlen auf

Tafel 6 Prüfung der Zemente nach den „Vorläufigen Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkäntle,
Fassung Juli 1957“

Zement Nr.	Zement- art	Güte- klasse	Wasser- zement- wert	Tauchzeit in sec		Wasser- absondern nach 6 h %	Absetzen nach		Rohwichte im Aller von 28 Tagen kg/dm ³	Druckfestigkeit nach		Räumänderung beim Gefrieren Raum-%
				sofort nach dem Mischen	30 min		6 h %	24 h %		7 Tagen kg/cm ²	28 Tagen kg/cm ²	
1	PZ 1)	475	0,50	34	56	0,00	1,35	1,30	1,87	549	621	- 0,16
2	PZ	475	0,47	36	77	1,20	2,25	2,05	1,90	505	603	
3	PZ	375	0,45	34	46	2,85	3,60	3,60	1,97	488	602	
4	PZ	275	0,37	35	66	2,30	3,00	3,05	2,08	511	601	+ 0,34
5	PZ	475	0,47	36	42	1,40	2,30	2,25	1,93	465	535	
6	PZ	375	0,40	36	45	0,00	2,45	2,45	2,02	407	484	
7	PZ	275	0,36	35	49	3,20	3,90	4,45	2,11	475	611	}
8	PZ	475	0,49	35	50	0,00	1,60	1,55	1,89	433	600	
9	PZ	375	0,44	36	56	0,55	1,80	1,75	1,92	479	576	
10	PZ	275	0,38	35	48	2,20	3,10	3,00	2,05	549	719	}
11	PZ	475	0,46	35	44	1,90	2,60	2,55	1,90	599	674	
12	PZ	275	0,42	36	51	2,15	2,95	2,90	2,00	450	546	
13	PZ	375	0,44	37	48	2,40	3,70	3,60	1,98	485	673	}
14	PZ	275	0,43	35	— ²⁾	1,10	2,25	2,10	1,96	450	642	
15	PZ	275	0,41	39 ²⁾	— ²⁾	1,35	2,05	1,90	2,01	285	361	
16	PZ	275	0,42	37	60	1,50	2,55	2,50	2,01	356	431	}
17	PZ	375	0,41	35	46	1,55	2,50	2,50	2,00	438	549	
18	PZ	275	0,39	34	45	1,75	2,75	2,75	2,02	452	570	
19	PZ	275	0,40	34	46	2,35	3,00	3,15	2,01	406	509	}
20	PZ	275	0,38	36	61	2,05	2,90	2,75	2,04	566	682	
21	PZ	275	0,39	33	42	2,20	2,95	2,80	2,02	473	583	

22	EPZ ¹⁾	275	0,39	36	58	0,00	1,15	1,30	1,98	396	575	} > 0,65
23	EPZ	275	0,39	36	56	1,45	2,40	2,30	2,01	476	655	
24	PZ ¹⁾	475	0,46	35	40	0,00	1,60	1,60	1,90	502	618	
25	PZ	375	0,40	36	56	1,30	2,75	2,55	1,96	476	578	
26	PZ	275	0,36	35	55	2,90	3,80	3,60	2,07	510	654	
27	PZ	475	0,53	35	48	0,00	1,85	1,85	1,86	381	496	
28	PZ	275	0,37	36	45	3,15	4,30	4,20	2,10	591	732	
29	PZ	275	0,46	36	119	0,00	0,90	0,80	1,90	312	394	

¹⁾ Mit 0,28, 0,36 bzw. 0,67 % CaCl₂; ²⁾ Vereinzelt größere Klinkerkörner verhinderten das freie Absinken des Tauchzylinders

Tafel 7 Wiederholte Prüfung der Zemente Nr. 7, 8, 15 und 28 (gleicher Wasserzementwert, verschiedene Lieferungen, unterschiedliche Ablagerung)

Zement Nr.	Zementart	Güteklasse	Wasserzementwert (Tafel 6)	1. Prüfung; nicht abgelagert (siehe Tafel 3)				Wiederholte Prüfung			
				Tauchzeit in sec sofort nach dem Mischen	Absetzen %	Rohwichte nach 28 Tagen kg/dm ³	Druckfestigkeit nach 28 Tagen kg/cm ²	Tauchzeit sofort nach dem Mischen	Absetzen %	Rohwichte nach 28 Tagen kg/dm ³	Druckfestigkeit nach 28 Tagen kg/cm ²
Lieferung aus dem Jahre 1958 (2 Jahre in luftdicht verschlossenen Behältern gelagert)											
7	PZ	275	0,36	35	4,45	2,11	611	33	4,00	2,12	611
8	PZ	475	0,49	35	1,55	1,89	600	34	2,30	1,90	525
15	PZ	275	0,41	39 ¹⁾	1,90	2,01	361	16	4,20	2,05	473
28	PZ	275	0,37	36	4,20	2,10	732	32	4,20	2,10	758
Lieferung aus dem Jahre 1960 (7 Tage an der Luft gelagert)											
7	PZ	275	0,36	54	2,40	2,07	563	70	2,80	2,08	570
8	PZ	475	0,49	33	2,00	1,88	487	56	2,20	1,89	612
15	PZ	275	0,41	32	2,40	2,00	426	50	2,75	2,00	456
28	PZ	275	0,37	38	4,05	2,07	629	50	3,70	2,08	700

¹⁾ Vereinzelt größere Klinkerkörner verhinderten das freie Absinken des Tauchzylinders

- 20 °C nach 4 h aufgetretene Raumänderung ergab sich aus der Änderung des Standes des Quecksilbers in einer kalibrierten Kapillare [5].

Mit den meisten Zementen waren gemäß Tafel 6 Proben mit einer Frostdehnung (Raumvergrößerung) entstanden, die größer war als der Meßbereich (+ 0,65 Raum-%).

4.2 Abgelagerte Zemente und Zemente anderer Lieferung

Mit den Zementen Nr. 7 und 28, die am stärksten absetzten, und den Zementen Nr. 8 und 15, deren Absetzen knapp unter dem zulässigen Grenzwert von 2 % lag, wurden die Prüfungen auf Tauchzeit (Fließvermögen), Absetzen und Druckfestigkeit wiederholt, nachdem die Zemente 2 Jahre lang in luftdicht verschlossenen Behältern gelagert hatten. Bei dieser Wiederholung (1960) wurde der gleiche Wasserzementwert eingehalten wie bei der ersten Prüfung mit den frischen Zementen (1958). Die Ergebnisse sind zusammen mit denen der ersten Prüfung in Tafel 7 aufgeführt.

Auch mit einer Lieferung der Zemente Nr. 7, 8, 15 und 28 aus dem Jahre 1960 wurden die Prüfungen wiederholt (Tafel 7), und zwar sofort nach der Anlieferung und nachdem die Zemente 7 Tage lang in einer Werkshalle in einer Schichtdicke von 4... 5 cm an der Luft ausgebreitet lagen.

4.3 Zementsuspensionen mit einem Zusatzmittel

Suspensionen der Zemente Nr. 7 und 17 wurden mit einem Zusatzmittel T geprüft²⁾. Die Ergebnisse dieser Untersuchung enthält Tafel 8.

5. Versuchsergebnisse

Die wesentlichsten Ergebnisse, auf die Bezug zu nehmen ist, finden sich in den Tafeln 2, 3, 5, 6 und 7. Ferner sind in Bild 5 alle Zemente mit zunehmender spezifischer Oberfläche nach Blaine aufgeführt, weiter die Oberfläche für die Anteile bis 0,002 mm, die Siebdurchgänge, der Wasserzementwert für eine Tauchzeit von rd. 35 sec, die Schichtdicke des abgesonderten Wassers nach 6 h und das Absetzen der Mörteloberfläche nach 24 h sowie die Druckfestigkeit.

Legt man die Bedingungen zugrunde, die an Einpreßmörtel in den „Vorläufigen Richtlinien“ gestellt werden, so ist folgendes herauszustellen:

5.1 Wasserzementwert

Um ein Fließvermögen entsprechend einer Tauchzeit von rd. 35 sec zu erhalten, waren mit den verschiedenen Zementen Wasserzementwerte zwischen 0,36 und 0,53 nötig. Mit zunehmender spezifischer Oberfläche nach Blaine, ebenso mit zunehmender Oberfläche der Anteile bis 0,002 mm stieg der Wasseranspruch

²⁾ Das Zusatzmittel T wirkt, wie andere für diesen Zweck angebotene Zusatzmittel, verflüssigend und aufblähend (treibend). Die Treibwirkung beruht auf der Entwicklung von Wasserstoffbläschen durch Aluminiumpulver in alkalischer Lösung.

im großen und ganzen an. Doch fanden sich auch Zemente, für die diese Beziehung nicht galt, oder Zemente, die bei gleicher spezifischer Oberfläche unterschiedlichen Wasseranspruch hatten (z. B. Zemente Nr. 16 und 7 sowie Zemente Nr. 27 und 5). Mit den gröberen Zementen lag der Wasserzementwert im Mittel bei rd. 0,39, mit den Zementen mittlerer Mahlfineinheit bei rd. 0,41 und mit den feinen Zementen bei rd. 0,47.

5.2 Druckfestigkeit

Die in den „Vorläufigen Richtlinien“ verlangten Mindestdruckfestigkeiten von 200 kg/cm² nach 7 Tagen und 300 kg/cm² nach 28 Tagen wurden in jedem Falle überschritten. Dies war auch vorauszusetzen, weil der größte Wasserzementwert der untersuchten Einpreßmörtel mit 0,53 unter dem Wasserzementwert des Normenmörtels nach DIN 1164 mit 0,60 lag und andererseits die Normendruckfestigkeit der verwendeten Zemente sich nach 7 Tagen zu mindestens 235 kg/cm² (Zement Nr. 22) und nach 28 Tagen zu mindestens 368 kg/cm² (Zement Nr. 19) ergeben hatte. Mit den für die festgelegte Tauchzeit (35 sec) nötigen Wasserzementwerten konnten also die in den „Vorläufigen Richtlinien“ verlangten Festigkeiten sicher erreicht werden.

5.3 Verhalten beim Gefrieren

Die Bedingung, daß der 3 Tage alte Einpreßmörtel sich beim Gefrieren nicht ausdehnen darf, war mit keinem der Zemente, die frei von Calciumchlorid waren, zu erfüllen. Die kleinste Frostdehnung fand sich zu 0,34 Raum-%. Die Dehnung war aber überwiegend größer als 0,65 Raum-%, selbst bei den rasch erhärtenden Portlandzementen der Güteklasse Z 475. (Die als Beispiel in Tafel 8 angeführten Mörtel, die ein verflüssigendes und porenbildendes Zusatzmittel enthielten, dehnten sich beim Gefrieren der 3 Tage alten Proben nicht aus. Bei hier nicht aufgeführten Untersuchungen mit dem gleichen Zusatzmittel und Zement Nr. 17 war die Wirkung des Zusatzmittels auf die Frostbeständigkeit bei verschiedenen Lieferungen des Zements verschieden ausgefallen.)

5.4 Einflüsse auf das Absetzen und Wasserabsondern

Bei den vorliegenden Untersuchungen galt es vor allem festzustellen, ob das unerwünschte Absetzen und Wasserabsondern von bestimmten Zementeigenschaften abhängen. Als solche sind vor allem die Größe des Wasseranspruchs, die chemische Zusammensetzung und die Mahlfineinheit in Betracht zu ziehen.

5.4.1 Wasserzementwert (Wasseranspruch)

Die in Bild 5 aufgezeichneten Wasserzementwerte sowie die Größe des Absetzens und Wasserabsonderns lassen erkennen, daß bei etwa gleicher spezifischer Oberfläche jene Zemente in der Regel weniger absetzen und Wasser absondern, die einen größeren Wasserzusatz (Wasserzementwert) benötigen. Dies gilt sowohl im Bereich der grob als auch fein gemahlten Zemente. Weiter ergibt sich aus Bild 5 in groben Zügen, daß mit zunehmender spezifischer Oberfläche das Absetzen und Wasserabsondern kleiner wurden, obwohl der Wasserzementwert ebenfalls anstieg. Man kann dies damit erklären, daß Zemente, die unter diesen Verhältnissen für eine gleiche Tauchzeit mehr Wasser

Tafel 8 Wirkung von Zusätzen auf die Frostbeständigkeit von Einpreßmörteln

Zement Nr.	Zementart	Güteklasse	Zusatzstoff	Zusatzmenge Gew.-%	Wasserzementwert	Tauchzeit in sec sofort nach dem Mischen	Rohwichte nach 28 Tagen kg/dm ³	Druckfestigkeit nach		Raumänderung beim Gefrieren Raum-%
								7 Tagen kg/cm ²	28 Tagen kg/cm ²	
7	PZ	275	1) —	—	0,36	35	2,11	475	611	> + 0,65
			Kalkhydrat	2,0	0,36	41	2,10		581	> + 0,65
			Zusatzmittel T	1,0	0,36	22	2,07		586	— 0,13
17 (1958)	PZ	375	1) —	—	0,41	35	2,00	438	549	> + 0,65
17 (1960)			Zusatzmittel T	1,0	0,37	36	1,94	344	410	— 0,14

1) siehe auch Tafel 6

Tafel 9 Einfluß des Erstarrens von Zement auf das Absetzen von Zementsuspensionen

Zement Nr.	Absetzen %	Feinheit cm ² /g	Erstarren nach DIN 1164			Temperatur von 40 °C erreicht nach
			Beginn	Ende	Erstarrungszeit	
wenig absetzende Zemente						
9	1,80	4290	3 h 00 m	4 h 15 m	1 h 15 m	4 h 10 m
15	1,90	2750	3 h 45 m	5 h 35 m	1 h 50 m	5 h 35 m
29	0,80	4030	2 h 15 m	3 h 40 m	1 h 25 m	3 h 05 m
Mittel	1,50	3690	3 h 00 m	4 h 30 m	1 h 30 m	4 h 15 m
stark absetzende Zemente						
7	4,45	2730	3 h 40 m	5 h 35 m	1 h 55 m	4 h 30 m
26	3,60	2930	3 h 40 m	5 h 30 m	1 h 50 m	4 h 15 m
28	4,20	2600	4 h 00 m	5 h 45 m	1 h 45 m	4 h 50 m
Mittel	4,10	2750	3 h 45 m	5 h 35 m	1 h 50 m	4 h 30 m

benötigen, dieses mechanisch oder chemisch auch verhältnismäßig stark festhalten.

Doch finden sich auch erhebliche Abweichungen von dieser Tendenz.

5.4.2 Chemische Zusammensetzung

Sucht man nach dem Einfluß bestimmter Stoffe, wie Alkali ($K_2O + Na_2O$), SO_3 oder einzelne Klinkerminerale, so findet man allgemein (Tafel 5 und Bild 5), daß sowohl Zemente mit hohem Gehalt als auch niederem Gehalt einzelner Bestandteile ein starkes Absetzen zur Folge hatten. Auffallend ist, daß Zement Nr. 29 (Feinheit $4030 \text{ cm}^2/\text{g}$) mit dem geringsten Absetzen ($0,80\%$) und Wasserabsondern (0%) sich durch einen verhältnismäßig hohen C_3A -Gehalt ($11,7\%$) und hohen Alkaligehalt ($2,03\%$) auszeichnete, wogegen Zement Nr. 3 mit nahezu gleicher Feinheit ($4340 \text{ cm}^2/\text{g}$), aber niederem C_3A -Gehalt ($6,4\%$) und niederem Alkaligehalt ($0,89\%$) ein besonders hohes Absetzen ($3,60\%$) und Wasserabsondern ($2,85\%$) lieferte.

Werden die 7 Zemente Nr. 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 mit niederem Alkaligehalt (bis rd. $0,6\%$) mit den 7 Zementen Nr. 5, 6, 11, 15, 16, 24, 29 verglichen, die einen Alkaligehalt über $1,0\%$ aufwiesen, so ergeben sich für diese beiden Gruppen im Mittel folgende Unterschiede:

$K_2O + Na_2O$ %	C_3A %	Feinheit cm^2/g	Wasserabsondern %	Absetzen %
Zemente mit niederem Alkaligehalt				
0,47	8,7	3840	1,4	2,5
Zemente mit hohem Alkaligehalt				
1,47	10,6	3780	0,9	2,0

Obwohl sich beide Gruppen im Mittel durch etwa gleiche Feinheit, jedoch sehr unterschiedlichen Alkali- und C_3A -Gehalt auszeichneten, unterscheiden sie sich im Wasserabsondern und Absetzen nur wenig. Mit dem höheren Alkali- und C_3A -Gehalt ist im Mittel wohl ein etwas geringeres Absetzen und Wasserabsondern verbunden. Praktisch ist dieser Unterschied jedoch ohne besondere Bedeutung, vor allem auch, weil diese Beziehung nicht für jeden der untersuchten Zemente gilt. Man meint bei solchen Vergleichen – z. B. auch mit dem C_3S -Gehalt –, da und dort den Ansatz für eine Beziehung zu haben. Wenn jedoch alle Zemente in die Betrachtung einbezogen wurden, erweist sich eine allgemeine Folgerung als nicht berechtigt, auch nicht, wenn man den ungefähren Einfluß unterschiedlicher Mahlfeinheit auf das Absetzen berücksichtigt.

5.4.3 Erstarren

Da der zeitliche Verlauf der Hydratation, z. B. gekennzeichnet durch das Erstarren eines Zements, unter sonst gleichen Verhältnissen irgendwie von seiner chemischen Zusammensetzung und Mahlfeinheit beeinflußt wird, wurde auch untersucht, ob nicht ein Zusammenhang zwischen den Erstarrungszeiten und dem zu erwartenden Absetzen der Zemente besteht.

In Tafel 9 sind die Erstarrungszeiten nach DIN 1164 und die für einen Temperaturanstieg der Zementsuspension bis auf 40°C ver-

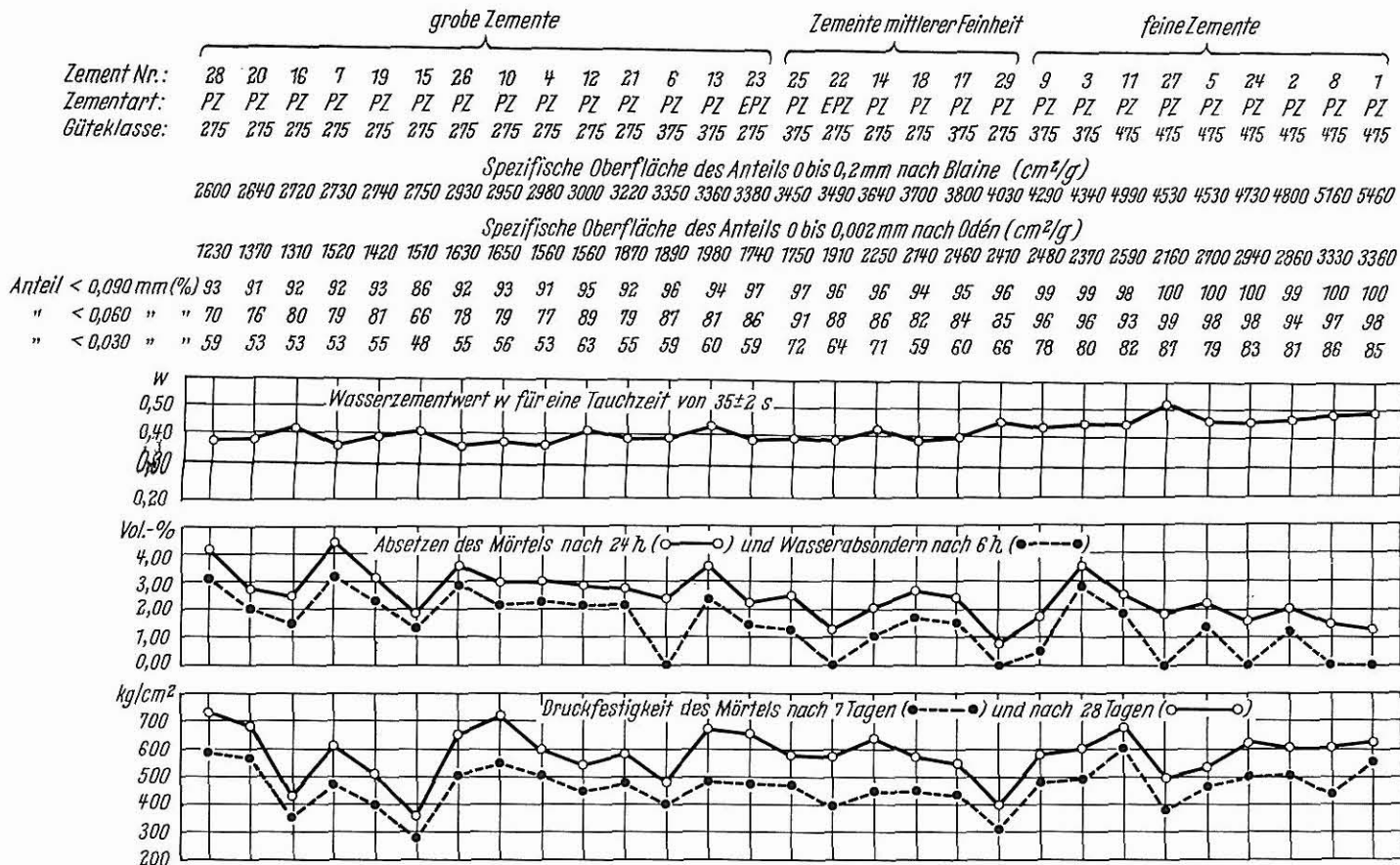


Bild 5 Einpreßmörtel (Zementleime) aus verschiedenen Zementen

strichene Zeit für die wenig absetzenden Zemente Nr. 9, 15 und 29 und die stark absetzenden Zemente Nr. 7, 26 und 28 gegenübergestellt. (Die Temperaturentwicklung wurde in Thermosflaschen mit Thermoelementen ermittelt.) Es zeigte sich, daß die wenig absetzenden, allerdings auch feineren Zemente im Durchschnitt früher und rascher erstarrten. Vergleicht man die durchschnittlichen Erstarrungszeiten der 8 Zemente, deren Absetzen kleiner als 2,0 Raum-% war (Zemente Nr. 1, 8, 9, 15, 22, 24, 27 und 29), mit denen der anderen 21 Zemente, so tritt diese Beziehung noch deutlicher hervor. Der Erstarrungsbeginn der wenig absetzenden Zemente lag im Durchschnitt bei 2 h 35 min und die Erstarrungszeit bei 1 h 25 min gegenüber 3 h 30 min bzw. 1 h 40 min bei den stärker absetzenden Zementen.

Man kann also folgern, daß das Absetzen um so kleiner ausfällt, je früher und rascher ein Zement bei der Prüfung nach DIN 1164 erstarrt. Aber auch das Erstarren eines Zements wird durch eine Reihe immer sehr komplex vorhandener Zementeigenschaften beeinflusst, so daß man hieraus nicht ableiten kann, welche Einflußgrößen im einzelnen auch für das Absetzen von besonderer Bedeutung sind.

5.4.4 Mahlfineinheit

Die groben Zemente, die Zemente mittlerer Feinheit und die feinen Zemente lieferten Zementsuspensionen, die sich im Absetzen wie folgt unterschieden:

	< 2,0 %	2,0 . . . 3,0 %	> 3,0 %
14 grobe Zemente	Nr. 15	Nr. 20, 16, 10, 12, 21, 6, 23	Nr. 28, 7, 19, 26, 4, 13
6 Zemente mittlerer Feinheit	Nr. 22, 29	Nr. 25, 14, 18, 17	—
9 feine Zemente	Nr. 9, 27, 24, 8, 1	Nr. 11, 5, 2	Nr. 3

Im großen und ganzen kann hiernach, wie auch aus der Darstellung in Bild 5, gefolgert werden, daß Zemente mit zunehmender Feinheit im allgemeinen weniger zum Absetzen neigen. Doch finden sich sowohl unter den groben Zementen solche mit mäßigem Absetzen als auch unter den feineren solche, die ein ebenso großes oder größeres Absetzen (Raumverminderung) lieferten wie die groben Zemente.

Vergleicht man die spezifische Oberfläche der Korngruppe bis 0,002 mm, so ist nach Bild 5 zu erkennen, daß mit deren Zunahme (1230 cm²/g bis 3360 cm²/g) im großen und ganzen ebenfalls eine Verminderung des Absetzens einhergeht, wie dies auch für die gesamte Oberfläche des Zements feststellbar ist. Doch gilt diese Beziehung wiederum für eine größere Anzahl von Zementen nicht. Auch eine Beziehung zwischen dem Oberflächenanteil der Korngruppe bis 0,002 mm und dem Absetzen konnte nicht festgestellt werden.

Es erscheint also nicht möglich, in jedem Falle von der spezifischen Oberfläche (Feinheit) von Zementen vergleichsweise auf das zu erwartende Absetzen des Einpreßmörtels zu schließen.

5.5 Einfluß der Ablagerung des Zements

5.5.1 Fließvermögen (Tauchzeit)

Ein Ablagern von 4 Zementen während 2 Jahren in luftdicht verschlossenen Behältern (siehe Tafel 7) verkürzte bei den Zementen Nr. 7, 8 und 28 die Tauchzeit geringfügig (etwas günstigeres Fließvermögen), bei Zement Nr. 15 dagegen erheblich (von 39 sec auf 15 sec).

Mit den 7 Tage lang an der Luft ausgebreiteten frischen Zementen (Nr. 7, 8, 15 und 28) wurde dagegen eine erheblich größere Tauchzeit erhalten. Bemerkenswert ist auch, daß bei den Lieferungen 1958 und 1960 des Zements Nr. 7 die Tauchzeit bei gleichem Wasserzementwert sehr unterschiedlich ausfiel (35 sec bzw. 54 sec).

5.5.2 Absetzen

Das 2jährige Lagern in luftdichten Behältern bewirkte zum Teil eine Vergrößerung des Absetzens. Dagegen blieb eine 7tägige Lagerung der Zemente an der Luft ohne praktisch nennenswerten Einfluß auf das Absetzen.

Diese Vergleiche zeigen vor allem, daß eine mehrtägige Lagerung der Zemente an der Luft die Tauchzeit bzw. den Wasseranspruch für ein bestimmtes Fließvermögen wesentlich erhöhen kann, das Absetzen jedoch nicht wesentlich verändert und daß verschiedene Lieferungen desselben Zements sich hinsichtlich Tauchzeit und Absetzens deutlich unterscheiden können.

5.6 Verflüssigendes und gasbildendes Zusatzmittel

Bei den Versuchen mit den Zementen Nr. 7 und 17, mit denen ohne Zusatzmittel eine Raumvergrößerung von mehr als 0,65 % entstand, erkennt man, daß mit dem Zusatzmittel T beim Gefrieren der 3 Tage alten Zylinder eine Raumvergrößerung unterblieb; es stellte sich sogar eine Raumverminderung von 0,13 % bzw. 0,14 % ein.

Mit allen Zementen ohne Zusatzmittel entstanden dagegen Mörtel, die im Sinne der „Vorläufigen Richtlinien“ „nicht frostbeständig“ waren.

6. Zusammenfassung

Mit der Untersuchung von 29 Zementen wurde der Frage nachgegangen, inwieweit die in den „Vorläufigen Richtlinien“ [3] aufgeführten Gütemerkmale des Einpreßmörtels durch bestimmte Eigenschaften eines Zements beeinflußt werden.

Für die Zemente wurden über die durch die Normenprüfung erfaßten Eigenschaften hinaus die spezifische Oberfläche, der Kornaufbau bis in den feinsten Bereich und die chemische Zusammensetzung bestimmt sowie der Gehalt an Klinkermineralen errechnet.

Als Gütemerkmale der mit gleichem Fließvermögen (Tauchzeit rd. 35 sec) hergestellten reinen Suspensionen wurden nach den „Vorläufigen Richtlinien“ der Wasseranspruch (Wasserzementwert), die Druckfestigkeit, der Widerstand beim Gefrieren und das Absetzen (Wasserabsondern und Schrumpfen) geprüft.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit der Eigenschaften des Einpreßmörtels von denen des Zements wurde folgendes festgestellt:

6.1 Wasserzementwert und Fließvermögen

Für die 29 Zemente lag der Wasserzementwert zwischen 0,36 und 0,53; also in verhältnismäßig weiten Grenzen.

Der Wasseranspruch stieg im großen und ganzen an, wenn die Feinheit der Zemente von 2600 cm²/g bis 5460 cm²/g zunahm. Doch fand sich eine ganze Reihe von Zementen, für die diese Beziehung nicht galt.

6.2 Druckfestigkeit

Mit dem für durchschnittliches Fließvermögen (Tauchzeit 35 sec) benötigten Wasserzementwert konnte die für Einpreßmörtel geforderte Druckfestigkeit sicher erreicht werden. (Die niederste 28 Tage-Normendruckfestigkeit der Zemente betrug 368 kg/cm².)

6.3 Widerstand gegen Gefrieren

Die Bedingung, daß die 3 Tage bei + 5 °C erhärtete Zement-suspension ihren Raum beim Gefrieren nicht vergrößert, wurde mit keinem Zement erfüllt. Eine Zementsuspension, die mit einem porenbildenden Zusatz hergestellt wurde, vergrößerte beim Gefrieren ihren Raum nicht.

6.4 Absetzen

Das größte Absetzen (Raumverminderung) während des Erstarrens wurde nach 24 h zu 4,4 % und das kleinste zu 0,8 % erhalten. Etwa ähnlich unterschieden sich die Zemente nach der Menge des nach 6 h abgesonderten Wassers. Jede der Zementsuspensionen aus den 29 Zementen setzte also mehr oder weniger stark ab.

Feinheit. Die feiner gemahlene Zemente neigten *im allgemeinen* weniger zum Absetzen.

Werden in den drei Feinheitsgruppen (siehe 3.2) die Zemente ausgeschieden, deren Absetzen um mehr als $\pm 50\%$ vom Gruppenmittel abweicht, d. s. der Zement mittlerer Feinheit Nr. 29 (Absetzen 0,8 %) und der feine Zement Nr. 3 (Absetzen 3,6 %), so erhält man das Absetzen für

die groben Zemente (2950 cm ² /g) zu 1,9 bis 4,4 %,	
	im Mittel zu 3,0 %,
die Zemente mittlerer Feinheit (3700 cm ² /g) zu 1,3 bis 2,7 %,	
	im Mittel zu 2,2 %,
und die feinen Zemente (4700 cm ² /g) zu 1,3 bis 2,5 %,	
	im Mittel zu 1,9 %.

Man erkennt aber, daß sowohl grob gemahlene Zemente vorkamen, die wenig absetzten, als auch fein gemahlene Zemente, die stark absetzten. Es erscheint nicht möglich, weder von der spezifischen Oberfläche eines Zements noch von der Kornverteilung oder dem Anteil der Korngruppe bis 0,002 mm allgemein auf das zu erwartende Absetzen eines Einpreßmörtels zu schließen.

Chemische Zusammensetzung. Eine allgemein sich abzeichnende Beziehung zwischen dem Gehalt bestimmter Stoffe (z. B. C₃A,

Alkali, SO_3 usw.) und der Neigung der Zementsuspensionen mehr oder weniger abzusetzen, konnte nicht gefunden werden.

Erstarrungszeiten. Das Absetzen fiel im Durchschnitt um so kleiner aus, je rascher die Zemente nach DIN 1164 erstarrten. (Weil der Erstarrungsverlauf auch von der Temperatur beeinflusst wird und weil der Mörtel bei der Prüfung nach den „Vorläufigen Richtlinien“ mit einer anfänglichen Temperatur von $+ 20^\circ\text{C}$ bis zum Erstarrungsende im allgemeinen wärmer wird als in engen Spannkämlen, dürfte dort der Mörtel im ganzen mehr zum Absetzen neigen als bei der Prüfung.)

6.5 Wiederholte Prüfung eines Zements

Die Suspensionen der Zemente, die 7 Tage lang an der Luft in einem trockenen Raum ausgebreitet waren, benötigten für gleiches Fließvermögen mehr Wasser als die frischen Zemente. Das Absetzen wurde praktisch nicht beeinflusst.

Verschiedene Lieferungen eines Zements können sich unter sonst gleichen Verhältnissen hinsichtlich Fließvermögens unterscheiden.

SCHRIFTTUM:

- [1] Koenig, H. W.: Neuzeitliche Einpreßtechnik. *Die Wasserwirtschaft* 42 (1952) H. 4, S. 120/132.
Maag, E., und A. Brun: Injektionsverfahren als Baumethode. *Schweizerische Bauzeitung* 71 (1953) Nr. 37, S. 1/4.
Koenig, H. W.: Einpreßtechnik. *Technische Mitteilungen*, Haus der Technik, Essen 49 (1956) H. 9, S. 416/424.
- [2] Neumann, H.: Das Sedimentvolumen als Kenngröße für die Untersuchung von Injektionszementen. *Zement-Kalk-Gips* 11 (1958) H. 8, S. 339/345.
- [3] Vorläufige Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkämlen (Fassung Juli 1957). Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Berlin 1960; Verlag Wilh. Ernst & Sohn; ebenso *Beton- und Stahlbetonbau* 52 (1957) H. 12, S. 292/294.
- [4] Harkort, H. J.: Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Pulvern, insbesondere von Portlandzement. *Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen*. 1. Aufl. Volk und Reich Verlag, Berlin 1939, S. 42.
- [5] Röhnisch, A.: Einwirkung von Frost auf den Einpreßmörtel von Spanngliedern. *Beton- und Stahlbetonbau* 50 (1955) H. 3, S. 89/93.