Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 5 (1956)

Artikel: Untersuchungen über die Frostempfindlichkeit der Einpressmörtel bei vorgespanntem Beton

Autor: Röhnisch, Arthur

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-6018

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Vb3

Untersuchungen über die Frostempfindlichkeit der Einpressmörtel bei vorgespanntem Beton

Sensibilidade ao gelo da argamassa comprimida no betão preesforçado

Sensibilité au gel du mortier comprimé dans le béton précontraint

Frost sensitivity of compressed mortar in prestressed concrete

ARTHUR RÖHNISCH
Oberregierungsbaurat Dr.-Ing.
Wasser- u. Schiffahrtsdirektion
Münster

1. *Veranlassung für die Untersuchungen.*

Im Jahre 1951 wurden an einer Spannbeton-Bogenbrücke in den vorgespannten Hängestangen Längsrisse festgestellt, deren Ursachen zunächst nicht eindeutig zu klären waren. Belastungsgrossversuche führten zu dem Ergebnis, dass weder statische noch dynamische Beanspruchungen als Ursache für die Risse infrage kamen. Weiterhin waren bei 15 Einfeld-Spannbetonstrassenbrücken im Jahre 1953 längs der Spannbewehrung der an Ort und Stelle hergestellten Spannbetonträger Längsrisse aufgetreten, über deren Ursache die Auffassungen ebenfalls geteilt waren. Einheitlich war jedoch in den vorstehenden und in den späteren Schadensfällen die Tatsache, dass die Risse erstmals nach Ablauf der Wintermonate beobachtet wurden, so dass die Vermutung für die Einwirkung von Frost nahelag.

Die aufgetretenen Schäden führten in der Baustoffprüfanstalt der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Münster zu systematischen Untersuchungen über die Frosteinwirkung auf den Einpressmörtel von Spanngliedern. Über die Ergebnisse der beiden ersten Versuchsprogramme hat der Verfasser bereits berichtet [1]. Der nachfolgende Bericht soll die bisher vorliegenden Ergebnisse ergänzen und die aufgestellten Hypothesen durch weitere Tatsachen belegen. Ausserdem soll versucht werden, durch Vergleich mit den entsprechenden Arbeiten und Untersuchungen von T. C. Powers und R. A. Helmuth, Chicago, die dem Verfasser leider

erst nach Abschluss seiner Untersuchungen bekannt wurden, festzustellen, in wieweit die Ergebnisse übereinstimmen [2].

2. *Aufbau und Ergebnisse des 1. Versuchsprogramms.*

Grundlage des 1. Versuchsprogramms bildeten die z. Zt. der Ausführung der Einfeld-Spannbetonbrücken massgebenden örtlichen Bedingungen und Temperaturverhältnisse, da die Versuche die Ursache der Risse an diesen Bauwerken feststellen sollten. Die Einpressmörtel wurden daher für die Versuche einheitlich von Hand aufbereitet, wie es im übrigen auch in der Praxis allgemein noch bis Mitte 1954 üblich war. Die gewählten Wasserzementwerte (0,50 – 1,0) entsprachen den tatsächlichen Feststellungen auf den Baustellen.

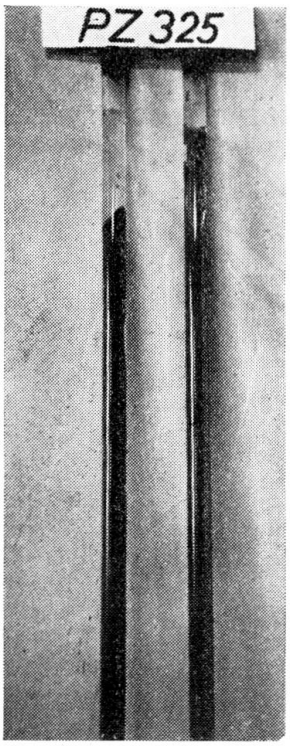

BILD 1. Frostversuch, die Rohre sind im Bereich der Mörtelmasse (W/Z = 1,0 und 0,75) gesprengt, nicht aber im Bereich des abgesetzten Wassers. Oberhalb des Wassers befindet sich ein Luftpolster

Im Rahmen des 1. Versuchsprogramms wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

Entmischung (Absetzen des Einpressmörtels),
Einfluss der Temperatur auf die Erstarrungszeit,
Einwirkung von Frost.

Zur Untersuchung gelangten die z. Zt. der Bauausführung in der Regel verwendeten PZ 325 und 425, letzterer auch mit 0,2 % LP-Stoff A, und 2 Tonerdeschmelzzemente, da diese bekanntlich die grösste Frostbeständigkeit aufweisen. Die Entmischung und die Frosteinwirkung wurden mit Hilfe von Glasrohren, 10 mm i. L. und 60 cm lang festgestellt. Zur genauen Bestimmung der Absetzmasse, Porenvolumen und wasserfreien Poren dienten Normen-Hartgummiringe, die nach dem Einbringen des Frischmörtels beidseitig, zur Vermeidung von Wasserverlusten, mit Glasplatten abgedeckt und abgedichtet wurden.

Die Ergebnisse des 1. Versuchsprogramms waren auf Grund der festgestellten Schäden zu erwarten. In fast allen Fällen war ein Absetzen der festen Stoffe zu beobachten, wobei sich im oberen Teil der Rohre Wasser und darüber Luft ansammelte (Abb. 1). Hieraus muss gefolgert werden, dass die bis Mitte 1954 verwendeten Einpressmörtel den nach DIN 4227 vorgeschriebenen Verbund nicht immer mit Sicherheit gewährleisten. Für die Einwirkung von Frost war das abgesetzte Wasser überraschend nicht von entscheidender Bedeutung, da sich über dem Wasser stets auch ein Luftpolster einstellte, so dass der Wasserdruck infolge der Eiskristallisation und Volumenvergrösserung ausgeglichen werden konnte. Dagegen traten bei der Mehrzahl der Proben, die starke Absetzerscheinungen gezeigt hatten, im Zementmörtel Frostschäden auf. Im Rahmen des 1. Versuchsprogramms haben mit Ausnahme der 7 Tage

alten Proben PZ 425 mit Quarzmehl i. Mischungsverhältnis 2:1, W/Z = 0,525 (0,55) und 0,75, lediglich die Mörtelmischungen mit Tonerdeschmalzzement und Quarzmehl, i. M. 2:1, W/Z = 0,50 und 0,75 — und zwar unabhängig vom Alter — bestanden, da diese einen wesentlich höheren Wasserbedarf haben und infolgedessen bei etwa gleichem Wasser-Zementwert auch einen grösseren Gehalt an wasserfreien Poren aufweisen.

3. *Voraussetzungen und Hypothese für die Frostbeständigkeit.*

Bereits bei Durchführung des 1. Versuchsprogramms wurde festgestellt, dass die Frostbeständigkeit von dem Gehalt an wasserfreien Poren abhängigt. Der Porenraum der Proben wurde ermittelt aus:

$$V_p = V_{erst} - V_t, \text{ wobei } V_t = \frac{G_t}{S}$$

V_{erst} = Volumen der erstarrten Probe,
G_t = Gewicht der trockenen Probe,
V_t = Volumen der trockenen Probe und
S = Reingewichte.

Der Porenraum der wasserfreien Poren folgt aus:

$$V_L = V_{erst} - V_t - V_{Wu}$$

V_{Wu} = Volumen des chemisch nicht gebundenen Wassers wird aus der Wägung der Frisch- und der Trockenproben gefunden.
$G_{Wu} = G_n - G_t = V_{Wu}$.

Frostbeständigkeit der Zementmörtel wurde in der Regel dann angetroffen, wenn dem chemisch nicht gebundenen Wasser im Augenblick der Eiskristallisation und für die damit verbundene Vergrösserung des Volumens zusätzlich mindestens 9 v. H. wasserfreier (Luft) Porenraum zur Verfügung steht,

$$\text{d.h.} \quad f_B = \frac{V_L}{V_{Wu}} \cdot 100 \geqq 9.$$

Falls sich, wie bei einigen Proben des 1. Versuchsprogramms festgestellt wurde, Wasser auf den in den Hartgummiringen erstarrten Proben absetzen sollte, wird der wasserfreie Porenraum zweckmässig auf das Gesamtvolumen $V_o = V_{erst} + V_{Wa}$ bezogen, wobei V_{Wa} das Volumen des abgesetzten Wassers bedeutet.

Um Missdeutungen zu vermeiden, wird es für notwendig gehalten, den Begriff der Frostbeständigkeit genau festzulegen. Im Rahmen des 1. Versuchsprogramms wurden die Frostprüfungen entsprechend den örtlichen Temperaturverhältnissen auf den Baustellen der Einfeldbrücken einheitlich von + 3° bis — 20° C durchgeführt, sofern die Glasrohre nicht bereits vorher zerstört waren. Die Abkühlung war hierbei recht langsam. Sie betrug 0,5° C/Std.. Benutzt wurde eine Kühltruhe der Firma Brown,

Boveri & Cie mit besonderer automatischer Temperaturregelung. Die Zementmörtelproben wurden beim 1. Versuchsprogramm 12,36 und 168 Std. (7 Tage) nach dem Anmachen dem Frost ausgesetzt, während beim 2. Versuchsprogramm auf die Prüfung 12 und 36 Stunden alter Proben verzichtet und statt dessen 48 Std. = 2 Tage alte Proben untersucht wurden.

4. *Zusammenfassung des 2. Versuchsprogramms, seiner Durchführung und Ergebnisse.*

Bei der Festlegung und Durchführung des 2. Versuchsprogramms (Aug./Sept. 1954) konnten die Erkenntnisse des 1. Versuchsprogramms, darüber hinaus aber auch die Erfahrungen auf einer Reihe von Spannbetonbaustellen berücksichtigt werden. Die auf einzelnen Baustellen durchgeführte Überprüfung der Arbeitsmethoden für die Aufbereitung und Verpressung der Einpressmörtel führte zu dem Ergebnis, dass hierfür nur noch schnellaufende Mischer mit anschliessender Verpressung durch geeignete Pumpen zugelassen wurden.

Zur Aufbereitung des Einpressmörtels für das 2. Versuchsprogramm wurde daher ein schnellaufender Mischer (1500 Umdrehungen/Min.) als Laboratoriumsgerät entwickelt, der sich bisher recht gut bewährt hat. Ein Vergleich der Mörtelproben einzelner Baustellen, die mit dem Colcrete- oder ähnlichen Mischern hergestellt wurden, ergab kaum feststellbare Unterschiede in der Durchmischung und im Fliessvermögen. Die Wasserzementwerte wurden für die einzelnen Einpressmörtel entsprechend dem Wasseranspruch der Zemente, Zuschläge und Zusatzmittel so festgelegt, dass die Gemische aller Proben gleiches Fliessvermögen aufwiesen, so dass gleiche Verarbeitbarkeit erwartet werden konnte. Ausgangstemperatur für die Prüfungen des 2. Versuchsprogramms war + 19° C. Die Endtemperatur wurde nach denselben Grundsätzen des 1. Versuchsprogramms auf — 20° C festgeseltzt.

Tafel I gibt eine Übersicht über die Zusammensetzung der einzelnen Einpressmörtel, die im Rahmen des 2. Versuchsprogramms geprüft wurden. Da die hisher verwendeten Portlandzemente verhältnismässig ungünstig abgeschnitten hatten, wurde auf Vorschlag des Zementlaboratoriums der Westfälischen Zementindustrie in Beckum ein besonderer PZ 325 aus dem Beckumer Raum für die weiteren Prüfungen vorgesehen, der nur 4,5 % Tricalzium-Aluminat enthält, mit dem Tricalzium-Silikat unter 50 % liegt und sich durch besondere Sulfatbeständigkeit auszeichnet. TS-Zement R wurde nochmals verwendet, da er sich hinsichtlich der Frostbeständigkeit bisher am besten bewährt hatte.

Tafel II zeigt die Ergebnisse der Normenprüfungen und der chemischen Untersuchungen für die verwendeten Zemente. Geprüft wurden Einpressmörtel ohne Zuschläge sowie unter Zugabe von Quarzmehl (Mahlung G2) im Mischungsverhältnis Zement: Quarzmehl 2:1 und 4:1.

Obwohl die Anwendung des LP-Stoffes A beim 1. Versuchsprogramm eine nachweisbare Verbesserung des Einpressmörtels nicht gezeigt hat, führte die vorstehend erläuterte, auf Grund der Ergebnisse aufgestellte Hypothese über den erforderlichen Anteil an wasserfreien Poren als Schlussfolgerung der ersten Versuche zu eingehenden Überlegungen über die zweckmässige Anwendung von Zusatzmitteln. Infrage kommen ausser

LP-Stoffen Zusatzmittel mit blähenden Wirkungen auf der Grundlage von Aluminium-Pulver, wie es für diesen Zweck bereits bei der Herstellung von Ytongsteinen Verwendung findet. Allerdings darf beim Einpressmörtel im Gegensatz zu den Ytong-Steinen die blähende Wirkung erst dann einsetzen, wenn der Mörtel eingepresst ist, d. h. etwa 15 – 20 Minuten nach der Aufbereitung. Mit Rücksicht hierauf wurde ein Aluminium-Pulver mit verhältnismässig kleiner Oberfläche gewählt. Da die Zugabe von Aluminium-Pulver in den gewählten Dosierungen von etwa 0,006 % auf Baustellen nicht zuverlässig genug möglich ist, werden wahrscheinlich zweckmässiger Spezial-Zusatzmittel mit einem richtig bemessenen Anteil an blähenden Stoffen Verwendung finden. Eine Erprobung derartiger Mittel konnte erst im Rahmen des 3. Versuchsprogramms erfolgen.

Bei Durchführung des 2. Versuchsprogramms war weiterhin bekannt, dass Bentonit zur Güteverbesserung von Zementmörtel und Beton mit Erfolg zu verwenden ist. Entsprechend seinem grossen Wasseradsorptionsvermögen, das eine Quellung und Volumenausweitung zur Folge hat, durfte hier mindestens mit der Verringerung der Entmischung gerechnet werden. Erfahrungen über die Frostbeständigkeit von Zementmörtel unter Verwendung von Bentonit lagen beim Ablauf des 2. Versuchsprogramms nicht vor.

Ursprünglich war auch Trass als Zusatzmittel in Aussicht genommen. Da aber bereits bei den ersten Versuchsreihen mit Trass festgestellt wurde, dass die Zugabe von Trass den Wasseranspruch erheblich erhöhte (W/Z = 0,72 bis 0,8), wurde auf die Erprobung von Trass als Zusatzmittel verzichtet.

Die Ergebnisse der 2 und 7 Tage alten Proben des 2. Versuchsprogramms sind ebenfalls auf Tafel I, 1 und I, 2 zu ersehen. Wie bereits bei Abschluss des 1. Versuchsprogramms festgestellt werden konnte, sind für die Güte der zur Verwendung kommenden Einpressmörtel neben den vorhandenen Biegezug- und Druckfestigkeiten die Wasser/Zement-Werte, das Absetzmass ($V_n - V_{erst}$), der Porenraum des Festmörtels (V_p), die Menge des chemisch nicht gebundenen Wassers (V_{Wu}) und die sich hieraus ergebenden wasserfreien Poren und die entsprechenden f_B-Werte massgebend. Wenn bei den untersuchten Mörtelgemischen des 2. Versuchsprogramms auch kein Mörtel gefunden werden konnte, der alle Vorzüge eines guten einwandfreien Einpressmörtels gleichermassen vereint, so kann aus den Ergebnissen wenigstens der Weg für die Zusammensetzung und Aufbereitung brauchbarer Einpressmörtel abgeleitet werden.

Die Ergebnisse des 2. Versuchsprogramms haben bestätigt, dass die Mörtelgemische mit Tonerde-Schmelz-Zement infolge ihres geringen Anteils an chemisch nicht gebundenen Wasser und entsprechend dem hohen Gehalt an wasserfreien Poren -durchweg frostbeständig waren. Dagegen zeigten diese Mörtelgemische bei W/Z-Werten von etwa 0,50 stets recht hohe Absetzwerte (V_a). Aus der Tatsache, dass das Absetzmass der 7-Tage alten Proben z. B. der Reihe 5.321 (TSZR + Q 2:1, W/Z = 0,56) etwa den 4-fachen Wert der 2-Tage alten Probe erreicht, muss geschlossen werden, dass es sich hier nicht allein um Absetzerscheinungen, sondern auch um Schrumpfauswirkungen handelt. Für die Praxis dürfte

Ermittlung der wasserfreien Poren u

Bezeichn. der Probe	Mörtelmischung	$\frac{W}{Z}$	Gewicht der frischen Probe G_n gr.	Gewicht der trockenen Probe G_t gr.	Gewicht des ungeb. Wassers $G_{wu} = V_{wu} = (G_n - G_t) =$ gr = cm³	Reinwichte der trockenen Probe s gr/cm³	Vol. de erstarrte Probe Verst cm³
1	2	3	4	5	6	7	8
4.111	PZ 425 — ohne —	0,50	287,63	219,13	68,50	2,72	153,6
4.112	PZ 425 + 0,2 % LP — A —	0,48	289,62	221,94	67,68	2,72	153,6
4.113	PZ 425 + 2,0 % LP — A —	0,455	273,50	209,45	64,05	2,72	153,8
4.114	PZ 425 + 0,006 % Alu. Pulv.	0,50	288,83	218,26	70,57	2,74	154,2
4.115	PZ 425 + 3 % Bentonit	0,525	286,67	214,53	72,14	2,73	152,8
4.116	PZ 425 + Trass iMV 2 : 1	0,80	271,01	191,59	79,42	2,69	150,9
4.121	PZ 425 + Qu. 2:1 — ohne —	0,56	302,23	241,38	60,85	2,70	153,2
4.122	PZ 425 + Qu. 2:1 + 0,2 % LP — A —	0,57	297,56	237,71	59,85	2,66	152,8
4.132a	PZ 425 + Qu. 4:1 + 0,5 % LP — A —	0,525	292,52	231,27	61,25	2,69	153,2
4.211	PZ 325 — ohne —	0,41	296,75	232,00	64,75	2,82	151,1
4.212	PZ 325 + 0,2 % LP — A —	0,41	291,62	228,46	63,16	2,84	150,9
4.213	PZ 325 + 2,0 % LP — A —	0,39	270,24	210,66	59,58	2,80	154,5
4.214	PZ 325 + 0,006 % Alu. Pulv.	0,41	303,59	237,77	65,82	2,84	154,5
4.215	PZ 325 + 3 % Bentonit	0,435	298,47	230,39	68,08	2,82	153,4
4.216	PZ 325 + Trass iMV 2 : 1	0,72	277,02	198,07	78,95	2,74	151,5
4.221	PZ 325 + Qu. 2:1 — ohne —	0,56	303,13	234.96	68,17	2,77	151,9
4.222	PZ 325 + Qu. 2:1 + 0,2 % LP — A —	0,56	295,92	229,75	66,17	2,74	151,7
4.231	PZ 325 + Qu. 4:1 — ohne —	0,48	300,37	237,13	63,24	2,78	152,8
4.232	PZ 325 + Qu. 4:1 + 0,2 % LP — A —	0,48	292,79	230,22	62,57	2,78	153,4
4.232a	PZ 325 + Qu. 4:1 + 0,5 % LP — A —	0,48	283,55	222,70	60,85	2,77	154,0
4.232b	PZ 325 + Qu. 4:1 + 1,0 % LP — A —	0,47	278,53	217,53	61,00	2,78	154,2
4.233	PZ 325 + Qu. 4:1 + 2,0 % LP — A —	0,46	265,93	209,51	56,42	2,80	154,4
4.311	TSZ — R — ohne —	0,50	284,00	237,03	46,97	2,72	151,0
4.312	TSZ — R + 0,2 % LP — A —	0,50	276,30	231,37	44,93	2,73	151,0
4.313	TSZ — R + 2,0 % LP — A —	0,48	254,05	211,92	42,13	2,74	154,2
4.314	TSZ — R + 0,006 % Alu. Pulv.	0,50	281,49	234,42	47,07	2,74	154,5
4.321	TSZ — R + Qu. 2:1 — ohne —	0,56	297,46	254,65	42,81	2,67	153,2

Prüftemperatur 18 — 20° C; (*) $V_n = 145{,}59$ cm³; (**) $V_t = G_t/s$; (***) b. = bestanden, n

I, 1

f_B *–Werte des 2. Versuchsprogramms*

(*) Absetzen $\frac{V_n - V_{erst}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	(**) Porenraum des erstarrten Mörtels $V_{erst} - V_t = V_p$ cm³	Feste Masse $\frac{V_t}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Porenraum $\frac{V_{erst} - V_t}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Chem. nicht gebundenes Wasser $W = \frac{V_{wu}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Wasserfreie Poren $L = \frac{V_L}{V_{erst}} \cdot 100 = \frac{V_{erst} - V_t - V_{wu}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Verhältnis der wasserfreien Poren zum chem. nicht gebundenen Wasser f_B	(***) Ergebnis der Frostprüfung
9	10	11	12	13	14	15	16
0,61	73,08	52,43	47,57	44,58	2,99	6,71	n. b.
0,61	72,04	53,11	46,89	44,05	2,84	6,45	n. b.
0,50	76,81	50,06	49,94	41,64	8,30	19,93	b.
0,25	74,54	51,66	48,34	45,77	2,57	5,62	n. b.
1,11	74,29	51,40	48,60	47,19	1,41	2,99	n. b.
2,34	79,75	47,17	52,83	52,61	0,22	0,42	n. b.
0,86	63,86	58,33	41,67	39,70	1,97	4,96	n. b.
1,11	63,51	58,45	41,55	39,15	2,40	6,13	n. b.
0,86	67,29	56,09	43,91	39,96	3,95	9,88	b.
2,24	68,85	54,44	45,56	42,85	2,71	6,32	n. b.
2,34	70,53	53,28	46,72	41,84	4,88	11,66	b.
–	79,35	48,67	51,33	38,54	12,79	33,19	b.
–	70,87	54,16	45,84	42,58	3,26	7,66	n. b.
0,75	71,73	53,25	46,75	44,37	2,38	5,36	n. b.
1,97	79,25	47,70	52,30	52,19	0,20	0,38	n. b.
1,70	67,14	55,82	44,18	44,86	0	0	n. b.
1,84	67,90	55,26	44,74	43,60	1,14	2,61	n. b.
1,11	67,57	55,80	44,20	41,37	2,83	6,84	n. b.
0,75	70,62	53,97	46,03	40,78	5,25	12,87	b.
0,36	73,63	52,20	47,80	39,51	8,29	21,98	b.
0,25	75,95	50,75	49,25	39,56	9,69	24,49	b.
–	79,76	48,41	51,59	36,50	15,09	41,34	b.
2,28	63,92	57,69	42,31	31,09	11,22	36,09	b.
2,28	66,31	56,10	43,90	29,74	14,16	47,61	b.
0,25	76,86	50,16	49,84	27,32	22,52	82,43	b.
–	69,04	55,34	44,66	30,45	14,21	46,67	b.
0,82	57,95	62,20	37,80	27,92	9,88	35,39	b.

: bestanden.

Ermittlung der wasserfreien Poren u

Bezeichn. der Probe	Mörtelmischung	$\frac{W}{Z}$	Gewicht der frischen Probe G_n gr.	Gewicht der trockenen Probe G_t gr.	Gewicht des ungeb. Wassers $(G_n - G_t) = G_{wu} = V_{wu}$ gr = cm³	Reinwichte der trockenen Probe s gr/cm³	Vol. der erstarrten Probe Verst cm³
1	2	3	4	5	6	7	8
5.111	PZ 425 — ohne —	0,50	288,08	225,26	62,82	2,67	153,43
5.112	PZ 425 + 0,2 % LP — A —	0,48	289,52	228,38	61,14	2,66	153,64
5.113	PZ 425 + 2,0 % LP — A —	0,455	274,88	215,00	59,88	2,66	153,81
5.114	PZ 425 + 0,006 % Alu. Pulv.	0,50	287,08	223,87	63,21	2,665	154,59
5.115	PZ 425 + 3 % Bentonit	0,525	285,11	217,53	67,58	2,66	152,48
5.116	PZ 425 + Trass iMV 2 : 1	0,80	272,46	195,67	76,79	2,66	150,97
5.121	PZ 425 + Qu. 2:1 — ohne —	0,56	301,57	247,52	54,05	2,63	152,66
5.122	PZ 425 + Qu. 2:1 + 0,2 % LP — A —	0,57	298,65	243,24	55,41	2,65	152,27
5.132a	PZ 425 + Qu. 4:1 + 0,5 % LP — A —	0,525	292,60	233,12	59,48	2,65	153,04
5.211	PZ 325 — ohne —	0,41	295,37	234,49	60,88	2,79	151,12
5.212	PZ 325 + 0,2 % LP — A —	0,41	292,54	233,65	58,89	2,78	150,97
5.213	PZ 325 + 2,0 % LP — A —	0,39	267,98	211,17	56,81	2,78	154,59
5.214	PZ 325 + 0,006 % Alu. Pulv.	0,41	302,90	242,44	60,46	2,77	153,81
5.215	PZ 325 + 3 % Bentonit	0,435	299,22	233,98	65,24	2,76	152,66
5.216	PZ 325 + Trass iMV 2 : 1	0,72	276,68	201,45	75,23	2,71	151,54
5.221	PZ 325 + Qu. 2:1 — ohne —	0,56	301,39	236,58	64,81	2,71	150,76
5.222	PZ 325 + Qu. 2:1 + 0,2 % LP — A —	0,56	293,55	233,19	60,36	2,72	151,75
5.231	PZ 325 + Qu. 4:1 — ohne —	0,48	300,70	240,19	60,51	2,75	152,27
5.232	PZ 325 + Qu. 4:1 + 0,2 % LP — A —	0,48	288,79	228,59	60,20	2,75	153,04
5.232a	PZ 325 + Qu. 4:1 + 0,5 % LP — A —	0,48	283,96	224,60	59,36	2,745	153,43
5.232b	PZ 325 + Qu. 4:1 + 1,0 % LP — A —	0,47	277,23	219,89	57,34	2,74	154,20
5.233	PZ 325 + Qu. 4:1 + 2,0 % LP — A —	0,46	265,21	211,92	53,29	2,74	154,20
5.311	TSZ — R — ohne —	0,50	280,63	237,19	43,44	2,69	151,06
5.312	TSZ — R + 0,2 % LP — A —	0,50	273,46	228,66	44,80	2,70	151,06
5.313	TSZ — R + 2,0 % LP — —A	0,48	254,96	213,51	41,45	2,73	153,75
5.314	TSZ — R + 0,006 % Alu. Pulv.	0,50	282,71	238,11	44,60	2,67	154,52
5.321	TSZ — R + Qu. 2:1 — ohne —	0,56	298,06	259,32	38,74	2,66	148,84

Prüftemperatur 18 — 20° C; (*) $V_n = 145{,}59$ cm³; (**) $V_t = G_t/s$; (***) b. = bestanden, n. b

L I, 2

r f_B –Werte des 2. Versuchsprogramms

(*) Absetzen $\frac{V_n - V_{erst}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	(**) Porenraum des erstarrten Mörtels $V_{erst} - V_t = V_p$ cm³	Feste Masse $\frac{V_t}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Porenraum $\frac{V_{erst} - V_t}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Chem. nicht gebundenes Wasser $W = \frac{V_{wu}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Wasserfreie Poren $L = \frac{V_L}{V_{erst}} \cdot 100 = \frac{V_{erst} - V_t - V_{wu}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Verhältnis der wasserfreien Poren zum chem. nicht gebundenen Wasser f_B	(***) Ergebnis der Frostprüfung
9	10	11	12	13	14	15	15
0,75	69,06	54,99	45,01	40,94	4,07	9,94	b.
0,61	67,78	55,88	44,12	39,79	4,33	10,88	b.
0,50	72,98	52,55	47,45	38,93	8,52	21,89	b.
–	70,59	54,34	45,66	40,89	4,77	11,67	b.
1,36	70,70	53,63	46,37	44,32	2,05	4,63	b.
2,34	77,41	48,72	51,28	50,86	0,42	0,83	n. b.
1,25	58,55	61,65	38,35	35,41	2,94	8,30	b.
1,50	60,48	60,28	39,72	36,39	3,33	9,15	b.
1,00	65,07	57,48	42,52	38,87	3,65	9,39	b.
2,24	67,07	55,62	44,38	40,29	4,09	10,15	b.
2,34	66,92	55,67	44,33	39,01	5,32	13,64	b.
–	78,63	49,14	50,86	36,75	14,11	38,39	b.
0,50	66,24	56,90	43,10	39,31	3,79	9,64	b.
1,25	67,88	55,54	44,46	42,74	1,72	4,02	b.
1,97	77,20	49,06	50,94	49,64	1,30	2,62	n. b.
2,48	63,46	57,91	42,09	42,99	0	0	n. b.
1,84	66,02	56,49	43,51	39,78	3,73	9,38	b.
1,50	64,93	57,36	42,64	39,74	2,90	7,30	n. b.
1,00	69,92	54,31	45,69	39,34	6,35	16,14	b.
0,75	71,61	53,33	46,67	38,69	7,98	20,63	b.
0,25	73,95	52,04	47,96	37,19	10,77	28,96	b.
0,25	76,86	50,16	49,84	34,56	15,28	44,21	b.
2,28	62,89	58,37	41,63	28,76	12,87	44,75	b.
2,28	66,37	56,06	43,94	29,66	14,28	48,15	b.
0,54	75,54	50,87	49,13	26,96	22,17	82,23	b.
0,05	65,34	57,71	42,29	28,86	13,43	46,53	b.
3,72	51,35	65,50	34,50	26,03	8,47	32,54	b.

t bestanden.

TAFEL II

Normenprüfung DIN 1164 und chemische Untersuchung der verwendeten Zemente

I Portland — Zement 425
II Portland — Zement 325
III Tonerdeschmelzzement — R —
IV Hochofenzement 325

Normenprüfung	I	II	III	IV
Mahlfeinheit (Sieb 4900 Maschen)	0,84	9,73	3,48	3,68
Wasseranspruch (Normensteife)	28.0 %	24,3 %	26,7 %	26,7 %
Erstarrungszeit Beginn	2 h 00 Min	1 h 50 Min	3 h 10 Min	1 h 35 Min
Ende	2 h 35 Min	2 h 15 Min	5 h 00 Min	2 h 15 Min
Kochversuch	bestand.	bestand.	Haut abgeblätt.	bestand.
Kaltwasserversuch	bestand.	bestand.		bestand.
Festigkeiten				
Biegezug, Alter 24 Std.	44,4	-	18,3	-
» 3 Tage	69,4	46,5	65,8	43,7
» 7 Tage	78,0	55,1	70,1	60,6
» 28 Tage	90,1	69,6	69,1	78,1
Druck, Alter 24 Std.	184	-	107	-
» 7 Tage	377	213	638	192
» 3 Tage	492	280	736	305
» 28 Tage	629	388	865	507
Chemische Untersuchung	**Ergebnisse in Gew. %**			
Kieselsäure, SiO_2	19,6	22,2	9,4	26,7
Tonerde, Al_2O_3	11,4	4,8	44,2	0,0
Eisenoxyd Fe_2O_3	4,2	4,0	6,2	10,5
Kalk, CaO	63,8	64,3	36,5	56,6
Magnesiumoxyd, MgO	2,8	2,1	2,2	3,2
Sulfat, SO_3	1,6	2,0	1,0	2,0
Sulfidschwefel	0,0	0,0	0,0	0,9
Säureunlösliches	0,2	0,2	0,1	0,0
Chlorid, Cl	0,0	0,0	0,0	0,0
Glühverlust	0,6	0,4	0,4	0,2

es jedoch gleichgültig sein, welcher Anteil auf Absetzen oder auf Schrumpfen entfällt. Die nachteiligen Folgen des unzulänglichen Verbunds sind in beiden Fällen gleich. Im übrigen ist eine gewisse Einwirkung des Schrumpfens auch bei den mit Portlandzement und Quarzmehl aufbereiteten Mörtelgemischen zu erkennen.

Es war zu erwarten, dass sich entsprechend den grösseren Absetz- bzw. Schrumpfwerten kleinere Porenräume ergaben. Umgekehrt hatten

kleinere Absetz- (Schrumpf-) -Werte grössere Porenräume zur Folge. Ausnahmen gab es neben den beiden PZ 325 = Gemischen (.211 und .212) allein bei den Versuchsreihen mit Trass (.116 und .216), die bei hohen Absetzmassen auch recht grosse Porenräume — allerdings mit voller Wassersättigung zeigten. Die Zementmörtel aus Tonerde-Schmelz-Zement mit 2 % LP-Stoff A und 0,006 % Aluminium-Pulver waren hinsichtlich der Absetz- oder Schrumpferscheinungen wesentlich günstiger als die übrigen TSZ-Mörtelgemische.

Bei den Mörtelgemischen mit PZ 425 waren mit Ausnahme der Reihen mit Trass (d. h. .111 bis .115) die Absetzmasse recht gering, obwohl die Wasser-Zement-Werte zwischen 0,46 und 0,525 lagen. Der Porengehalt dieser Gemische war ebenso wie beim PZ 325 (.211 und .212) verhältnismässig hoch, gleichfalls auch das Volumen des chemisch nicht gebundenen Wassers. Hierdurch verringerten sich die wasserfreien Poren, so dass in der Regel nur die 7-Tage alten Proben f_B — Werte > 9 erreichten und damit frostbeständig waren. Eine Ausnahme bildet die Versuchsreihe mit 2 % LP-Stoff A, die auch im Alter von 2 Tagen die Frostprüfung bestand. Dass die beiden Versuchsreihen mit Trass infolge des hohen Wasseranspruchs bei der Frostprüfung versagen würden, war zu erwarten.

Von besonderem Interesse sind die systematischen Untersuchungen der mit Portlandzement 325 und Quarzmehl im Mischungsverhältnis 4:1 aufbereiteten Mörtelmischungem, bei denen ausserdem noch verschiedene Dosierungen des LP-Stoffes A erprobt wurden. Hierbei zeigte es sich, dass sich mit steigender Zugabe von LP-Stoff A (0,0,2 0,5,1 und 2 %), bei etwa gleichbleibenden W/Z — Werten (0,46 — 0,48) die Absetzmasse und das chemisch nicht gebundene Wasser verringerten, während entsprechend das Porenvolumen und damit die Anteile der wasserfreien Poren und die f_B — Werte grösser wurden. Es kann erwartet werden, dass bei weiterer konsequenter Verfolgung dieser Lösung bereits bei einer Dosierung von 0,2 bis 0,5 % LP-Stoff A mit Sicherheit ein entmischungsfreier und frostbeständiger Einpressmörtel erreicht wird.

Die bei der Auswertung des 1. Versuchsprogramms aufgestellte Hypothese über die Frostbeständigkeit konnte durch die Ergebnisse des 2. Versuchsprogramms bestätigt werden. Lediglich die Reihe 5.121 (PZ 425 mit Quarzmehl 2:1) und die Reihen 5.115 n. 5.215 (PZ 425 bzw. PZ 325 + 3 % Bentonit) haben die Frostprüfung bestanden, obwohl die f_B — Werte mit 8,3 bzw. 4,63 und 4,02 kleiner als 9 waren. Bei der Reihe 5.121 liegt die Abweichung im Rahmen der möglichen Streuungen. Dagegen ist die Ursache bei den Reihen 5.115 n. 5.215 in der Eingenart des Bentonits zu suchen, bei dem im Bereich der kolloidalen Grössenordnung der Stofteilchen das Adsorptionswasser als hygroskopisches Wasser eine ebenso grosse Bedeutung hat wie das Hydrationswasser. Da etwa 40 v. H. des Adsorptionswassers in den Kristallgitterbau des Bentonits eingegliedert werden müsste dieser Anteil von dem Volumen des chemisch nicht gebundenen Wassers abgesetzt werden, um vergleichbare f_B — Werte zu erhalten.

Die Prismenfestigkeit der Mörtelgemische war mit Ausnahme der Einpressmörtel mit PZ 325 wesentlich geringer als sie auf Grund der Normenprüfung der Zemente erwartet werden konnte. Sowohl beim Portland-Zement 425 wie insbesondere beim Tonerde-Schmelz-Zement

machte sich das Fehlen der bei der Normenprüfung vorgeschriebenen Wassereinlagerung stark bemerkbar. Es wurde jedoch der Standpunkt vertreten, dass die Prüfungen den örtlichen Bedingungen der einzelnen Baustellen angepasst werden müssten, wenn diese Versuche überhaupt Wert haben sollten.

Die im Rahmen des 2. Versuchsprogramms vorgenommenen Schwindmessungen an 16 cm langen Normen-Prismen (4 × 4 cm) liessen einen Zusammenhang von Schwinden, Absetzen und Frostbeständigkeit nicht erkennen. Die Zusatzmittel haben die Schwindmasse in der Regel erhöht. Erwartungsgemäss zeigten die Reihen mit PZ 425 die grössten Schwindmasse, und zwar wurde bei der Reihe .113 (PZ 425 mit 2 % LP-Stoff A) eine Schrumpfung von 0,36 mm gemessen. Demgegenüber wiessen die Einpressmörtel aus PZ 325 mit 0,14 mm (Reihe .221) das kleinste Schwindmass auf. Überraschend lagen die Zementmörtel mit TSZ an der unteren Grenze (0,22 — 0,25 mm).

Auf Grund der Ergebnisse des 2. Versuchsprogramms konnte folgende Schlussfolgerung gezogen werden. Hinsichtlich der Frostbeständigkeit haben die Mörtelgemische mit TSZ wiederum am günstigsten abgeschnitten, sie haben in jeder Zusammensetzung die Frostprüfung bestanden. Da aus den Kreisen der interessierten Spannbetonfirmen Einwendungen gegen die Verwendung von TSZ erhoben wurden, die sich insbesondere gegen seine Empfindlichkeit bei höheren Temperaturen richteten, wurden die Untersuchungen der Baustoffprüfanstalt Münster in dieser Hinsicht ergänzt. Hierbei zeigte es sich, dass bei höheren Temperaturen (> 30° C) die mit TSZ — R angesetzten Mörtelgemische ausserordentlich langsam abbinden. Ausserdem treten bei höheren Temperaturen Festigkeitsverluste auf, die die Verwendung des TSZ für Einpressmörtel zwar nicht völlig ausschliessen, aber auf Sonderfälle beschränken dürften.

Neben dem TSZ — R wurde in dem Portland-Sonder-Zement 325 ein Zement gefunden, der bei weiterer Verbesserung des Gesamtgemisches voraussichtlich alle Bedingungen eines einwandfreien Einpressmörtels erfüllen wird. Er zeigte gegenüber den Normenprüfungen kaum Festigkeitsverluste, in Verbindung mit Quarzmehl (zweckmässig i. M. nicht unter 4:1) und LP Stoff A bei Wasserzementwerten zwischen 0,46 — 0,48 recht geringe Absetzerscheingungen und infolgedessen verhältnismässig hohe Anteile an wasserfreien Poren. Damit sind die Voraussetzungen für eine ausreichende Frostbeständigkeit erfüllt. Es ist zu erwarten, dass unter den Bedingungen des Versuchsprogramms auch in der Praxis bereits die Mörtelzusammensetzung der Reihen .232 (PZ 325 + Quarzmehl 4:1 + 0,2 % LP-A) als frostbeständig anzusehen ist. PZ 425 bringt demgegenüber keine Vorteile. Wahrscheinlich liegt das an dem höheren Wasseranspruch, so dass die Wasserzementwerte bei gleicher Verarbeitbarkeit etwa 10 bis 20 % höher als bei dem verwendeten PZ 325 liegen.

Bentonit und Aluminiumpulver haben sich im Gegensatz zu dem LP-Stoff A als Zusatzmittel nicht restlos bewährt. Das mag an der nicht ausreichenden Dosierung oder an der Art bzw. Zusammensetzung dieser Stoffe liegen. Auf Grund der Versuche wird es jedoch durchaus für möglich gehalten, auch mit Bentonit oder Alu-Pulver einen Einpressmörtel zu entwickeln, der allen Ansprüchen genügt. Es konnte nicht Aufgabe

der durchgeführten Versuche sein, fertige Rezepte für die einzelnen Einpressmörtel herauszugeben. Hierfür müssen noch weitere, systematische Untersuchungen durchgeführt werden, um insbesondere auch festzustellen, ob und in welcher Form Zusätze mit blähender Wirkung in der ausserordentlich geringen Dosierung zuverlässig angewendet werden können.

In der Zwischenzeit sind einige Zusatzmittel für die Herstellung von Einpressmörtel bekannt geworden (Intrusion Aid, Intraplast und nach Abschluss der Versuche Tricosal H 181), bei denen die aufgezeichneten Schwierigkeiten ausgeschaltet werden können. Da sie aus zeitlichen Gründen nicht mehr in das 2. Versuchsprogramm einbezogen werden konnten, wurden sie in einer weiteren Serie von Versuchen berücksichtigt (3. Versuchsprogramm), die im April 1955 in der Baustoffprüfanstalt der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Münster durchgeführt wurden.

Im Rahmen dieser Versuche sollte bei den bewährten Mörtelmischungen des 2. Versuchsprogramms die Frostbeständigkeit mit einem Dilatometer festgestellt werden, um auch hiermit die Richtigkeit der Hypothese über die Frostbeständigkeit von Einpressmörteln zu überprüfen. Leider war bis zum Beginn der Versuche die Neuentwicklung eines Dilatometers nicht betriebsbereit, so dass auf das bereits vorhandene, nach den Angaben von R. C. Valore [3] entwickelte Gerät zurückgegriffen werden musste. Der Bericht über die ersten beiden Versuchsprogramme [1] enthält nähere Einzelheiten über dieses Gerät, das in Abb. 2 dargestellt ist.

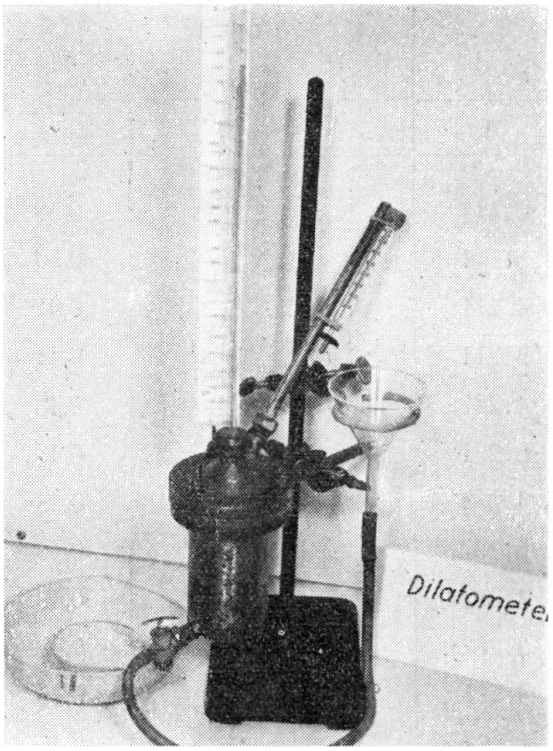

BILD 2. Dilatometer zur Feststellung der Frostbeständigkeit von Einpressmörtel

5. *Aufbau, Durchführung und Ergebnisse des 3. Versuchsprogramms.*

Im einzelnen ist das 3. Versuchsprogramm aus Tafel III zu ersehen. Neben PZ 325 und 425 mit und ohne Quarzmehl und LP-Stoff A in verschiedenen Dosierungen sollte auch die Eignung des HOZ 325 für die Herstellung von Einpressmörtel festgestellt werden. Intrusion Aid und Intraplast wurden nach den Rezeptangaben der Hersteller bzw. der Verbraucher angewendet.

Die Versuchsgrundlagen waren im allgemeinen dieselben wie beim 2. Versuchsprogramm. Lediglich die Frostprüfungen zeigten infolge der Anwendung des Ausdehnungsmessgerätes Abweichungen. Ausserdem wurden die Frostprüfungen mit wesentlich grösseren Kühlgeschwindig-

Ermittlung der wasserfreien Poren u

Bezeichn. der Probe	Mörtelmischung	$\frac{W}{Z}$	Gewicht der frischen Probe G_n gr.	Gewicht der trockenen Probe G_t gr.	Gewicht des ungeb. Wassers $(G_n - G_t) = G_{wu} = V_{wu}$ gr/cm³	Reinwichte der trockenen Probe s gr = cm³	Vol. der erstarrten Probe Verst cm³
1	2	3	4	5	6	7	8
4.111	PZ 425 — ohne —	0,50	282,30	215,11	67,19	2,71	152,02
5.111	PZ 425 — ohne —	0,50	282,32	222,37	59,95	2,64	152,02
4.211	PZ 325 — ohne —	0,41	300,12	235,39	64,73	2,81	153,52
5.211	PZ 325 — ohne —	0,41	300.15	239,40	60,75	2,77	153,04
4.231	PZ 325 + Quarzmehl 4:1	0,48	299,04	236,50	62,54	2,76	152,60
5.231	PZ 325 + Quarzmehl 4:1	0,48	299,03	239,51	59,52	2,71	152,60
4.232	PZ 325 + Qu. 4:1 + 0,2 % LP — A —	0,48	282,82	221,37	61,45	2,78	153,72
5.232	PZ 325 + Qu. 4:1 + 0,2 % LP — A —	0,48	282,79	225,10	57,69	2,71	153,52
4.232a	PZ 325 + Qu. 4:1 + 0,5 % LP — A —	0,48	274,39	214,75	59,64	2,78	153,80
5.232a	PZ 325 + Qu. 4:1 + 0,5 % LP — A —	0,48	274,55	217,85	56,70	2,71	153,72
4.511	HOZ 325 — ohne —	0,45	292,33	227,15	65,18	2,77	152,87
5.511	HOZ 325 — ohne —	0,45	292,37	233,35	59,02	2,68	152,48
4.531	HOZ 325 + Quarzmehl 4:1	0,48	294,82	235,16	59,66	2,72	152,44
5.531	HOZ 325 + Quarzmehl 4:1	0,48	294,81	240,02	54,79	2,69	151,96
4.532	HOZ 325 + Qu. 4:1 + 0,2 % LP — A —	0,48	291,45	229,23	62,22	2,74	152,28
5.532	HOZ 325 + Qu. 4:1 + 0,2 % LP — A —	0,48	291,34	234,55	56,79	2,64	151,96
4.532a	HOZ 325 + Qu. 4:1 + 0,5 % LP — A —	0,48	284,83	224,07	60,76	2,74	151,38
5.532a	HOZ 325 + Qu. 4:1 + 0,5 % LP — A —	0,48	284,93	229,48	55,45	2,64	151,15
4.532b	HOZ 325 + Qu. 4:1 + 1,0 % LP — A —	0,48	276,01	216,31	59,70	2,74	151,50
5.532b	HOZ 325 + Qu. 4:1 + 1,0 % LP — A —	0,48	276,10	223,36	52,74	2,61	151,74
4.600	PZ 325 + Flugasche 3:1 + 0,6 % Instrusion Aid	0,63	281,56	210,59	70,97 (*)	2,72	154,59
5.600	PZ 325 + Flugasche 3:1 + 0,6 % Instrusion Aid	0,63	281,49	215,36	66,13 (*)	2,69	154,59
4.700	PZ 325 + 3 % Intraplast	0,40	298,04	237,19	60,85	2,81	154,59
5.700	PZ 325 + 3 % Intraplast	0,40	298,05	239,82	58,23	2,76	154,59

Prüftemperatur 18 — 20° C; (*) $V_n = 145{,}59$ cm³; (**) $V_t = G_t/s$; (***) b. = bestanden, n. b.

:L III

:r f_B –*Werte des 3. Versuchsprogramms*

(*) Absetzen $\frac{V_n - V_{erst}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	(**) Porenraum des erstarrten Mörtels $V_{erst} - V_t = V_p$ cm³	Feste Masse $\frac{V_t}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Porenraum $\frac{V_{erst} - V_t}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Chem. nicht gebundenes Wasser $W = \frac{V_{wu}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Wasserfreie Poren $L = \frac{V_L}{V_{erst}} \cdot 100 = \frac{V_{erst} - V_t - V_{wu}}{V_{erst}} \cdot 100$ Raum %	Verhältnis der wasserfreien Poren zum chem. nicht gebundenen Wasser f_B	(***) Ergebnis der Frostprüfung
9	10	11	12	13	14	16	16
1,64	72,64	52,22	47,78	44,20	3,58	8,10	n. b.
1,64	67,79	55,41	44,59	39,44	5,15	13,06	b.
0,69	69,75	54,57	45,43	42,16	3,30	7,83	n. b·
1,00	66,61	56,48	43,52	39,70	3,82	9,62	b.
1,29	66,91	56,15	43,85	40,98	2,87	7,00	n. b.
1,29	64,22	57,92	42,08	39,00	3,08	7,90	n. b.
0,56	74,09	51,80	48,20	39,98	8,30	20,76	b.
0,69	70,46	54,10	45,90	37,58	8,32	22,14	b.
0,51	76,55	50,23	49,77	38,78	10,99	28,34	b.
0,56	73,33	52,30	47,70	36,89	10,81	29,30	b.
1,11	70.87	53,64	46,36	42,64	3,72	8,72	n. b.
1,36	65,41	57,10	42,90	38,71	4,19	10,82	b.
1,39	65,98	56,72	43,28	39,14	4,14	10,58	b.
1,70	62,73	58,72	41,28	36,06	5,22	14,48	b.
1,49	68,62	54,94	45,06	40,86	4,20	10,28	b.
1,70	63,12	58,46	41,54	37,37	4,17	11,16	b.
2,08	69,60	54,02	45,98	40,14	5,84	14,55	b.
2,23	64,23	57,51	42,49	36,69	5,80	15,81	b.
2,00	72,55	52,11	47,89	39,41	8,48	21,52	b.
1,84	66,16	56,40	43,60	34,76	8,84	25,43	b.
–	78,07	49,50	50,50	45,91	4,59	10,00	b.
–	74,54	51,78	48,22	42,78	5,44	12,72	b.
–	70,08	54,60	45,40	39,36	6,04	15,35	b.
–	67,70	56,21	43,79	37,67	6,12	16,25	b.

icht bestanden.

keiten durchgeführt (6 bis 28°/Std.) gegenüber 0,5°/std. bei den Frostversuchen der ersten beiden Versuchsprogramme.

Die Untersuchung der Einpressmörtel mit Intrusion Aid ergab ähnliche Schwierigkeiten wie sie auch bei der Anwendung von Aluminiumpulver im Rahmen des 2. Versuchsprogramms bereits festgestellt wurden, da auch Intrusion Aid Stoffe mit blähender Wirkung enthält. Infolge der Erhöhung des Innendrucks bei der Wasserstoffbildung ist es trotz guter Dichtigkeit des Prüfkörper-Formen (Abb 3) und trotz grösster Sorgfalt bei der Versuchsdurchführung nicht einwandfrei möglich, Wasserverluste aus dem Frischmörtel der Versuchskörper zu vermeiden. So konnte der Wasserverlust der Reihe 4.600 mit Hilfe eines Kontrollversuchs zu 2,84 cm³ festgestellt werden.

BILD 3. Formen für die Herstellung der Probekörper zur Feststellung der Frostbeständigkeit im Dilatometer

Das Volumen der im Hartgummiring erstarrten Proben war infolge der Zugabe von 0,6 % Intrusion Aid durchweg um 9,25 cm³, d. h. um rd. 6 % gewachsen. In den Spannkanälen kann jedoch nicht mit einer derartigen Ausweitung des Volumens gerechnet werden. Der Porenraum und infolgedessen auch das chemisch nicht gebundene Wasser und die wasserfreien Poren sind daher bei der Auswertung der Versuche mit Intrusion Aid auf das Volumen der frischen Probe zu beziehen. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen wurden für die Reihen 4.600 bzw. 5.600 (Tafel III) 4.59 bzw. 5,44 % wasserfreie Poren festgestellt. Die f_B — Werte lagen bei 10,00 bzw. 12,72 %.

Die Versuchsdurchführung mit Intraplast, das ebenfalls geringe Anteile blähender Stoffe auf der Grundlage von Aluminiumpulver enthält, war wesentlich einfacher, da kaum ein Verlust von Wasser zu beobachten war. Wahrscheinlich ist diese Tatsache auf den recht niedrigen Wasserzementwert zurückzuführen, der bei Zugabe von Quarzmehl oder anderen Zusätzen auf etwa 0,44 erhöht werden müsste. Bei den mit Intraplast aufbreiteten Versuchsreihen 4.700 bzw. 5.700 ergaben sich 6,04 bzw. 6,12 % wasserfreie Poren, so dass die f_B — Werte 15,35 % bzw. 16,25 % erreichten. Von wesentlicher Bedeutung ist die Tatsache, dass in beiden Fällen, d.h. sowohl bei Verwendung von Intrusion Aid wie Intraplast Absetzerscheinungen des Einpressmörtels in den Hartgummiringen nicht beobachtet wurden.

Die weiteren Ergebnisse des 3. Versuchsprogramms sind im einzelnen der Zusammenstellung der Tafel III zu entnehmen. Besonders günstig haben im Rahmen des 3. Versuchsprogramms die Versuchsreihen mit PZ 325 abgeschnitten. Bei recht niedrigen Absetzwerten (V_a = 0,51

bis 1 %) stieg der Anteil an wasserfreien Poren (V_L) von 3,3 bis 10,99 %, damit ergaben sich für die Mörtelgemische .211, .231 — .232*a* (o,5 % LP-Stoff A) f_B — Werte von 7,83 bis 29,30 %. Demgegenüber wurde für die entsprechenden Mörtelgemische mit HOZ 325 festgestellt

$$V_a = 1{,}11 \text{ bis } 2{,}23\ \%$$
$$V_L = 3{,}72 \text{ bis } 5{,}84\ \%$$
und
$$f_B = 8{,}72 \text{ bis } 15{,}81\ \%\ (0{,}5\ \%\ \text{LP-A})$$

Bei 1 % LP-Stoff A stieg der Anteil an wasserfreien Poren bis 8,84 % und der entsprechende f_B — Wert auf 25,43 %. Hieraus kann eine gewisse Überlegenheit des PZ 325 abgeleitet werden. Man wird jedoch wahrscheinlich bei Anpassung der Dosierung des LP-Stoffes A an die Eigenart des HOZ zu einem höherem Nutzeffekt kommen können. Auch hierfür sind noch weitere Versuche erforderlich.

Die 3 untersuchten Zemente PZ 325, PZ 425 sowie HOZ 325 haben bei den 2 Tage alten Proben ohne Zuschläge und Zusatzmittel den erforderlichen Anteil an wasserfreien Poren und damit $f_B > 9$ % nicht erreicht. Sie sind in dieser Beziehung recht gleichwertig:

	V_L %		f_B %	
Alter der Probe	2 Tage	7 Tage	2 Tage	7 Tage
PZ 425 (Reihen 4.111 u. 5.111)	3,58	5,15	8,10	13,06
PZ 325 (Reihen 4.211 u. 5.211)	3,30	3,82	7,83	9,02
HOZ 325 (Reihen 4.511 u. 5.511)	3,72	4,19	8,72	10,82

Auch die Absetzwerte der 3 Zementmörtel ohne Zuschläge und Zusatzmittel sind nicht allzu verschieden. Sie sind beim PZ 325 am kleinsten (0,69 bzw. 1,00 %), sie betragen beim HOZ 325 1,11 und 1,36 % und beim PZ 425 1,64 %.

6. *Ergebnisse der in Dilatometer durchgeführten Frostprüfungen.*

Die im Dilatometer durchgeführten Frostprüfungen haben die bisherigen Ergebnisse und das Kriterium über die Frostbeständigkeit von Einpressmörtel in vollem Umfange bestätigt. Nach der vorstehenden Zusammenstellung hatten die 2 Tage alten Proben der Reihen 4.111, 4.211 und 4.511, d. h. der Zementmörtel ohne Zuschläge und Zusätze f_B — Werte < 9 ergeben. Tatsächlich haben diese Körper die Frostprüfung nicht bestanden. Abb. 4 zeigt die 3 Probekörper nach Durchführung der Frostprüfungen.

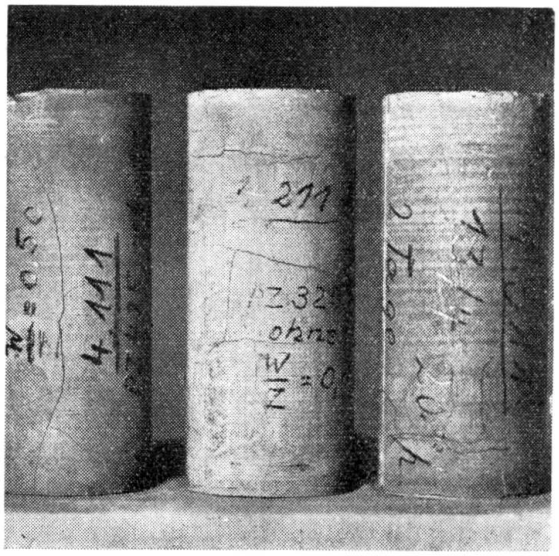

BILD 4: 3 Proben (4.111; 4.211; 4.511), welche die Frostprüfung im Dilamtometer nicht bestanden haben

Die deutlich sichbaren Risse sind infolge der Ausdehnung bei der Eiskristallisation entstanden. Der Riss im HOZ — Körper ist kaum wahrnehmbar, ein Zeichen dafür, dass dieser Körper sehr nahe an der Grenze der Frostbeständigkeit lag (f_B = 8,72 %). Diese Tatsache ist auch aus Abb. 5 zu entnehmen, die den Frostverlauf sowie die Zusammenziehung und Dehnung der Körper bei der Durchführung der Frostversuche darstellt. Wie bereits ausgeführt wurde, ist die Frostbeständigkeit davon abhängig, ob eine Ausdehnung über das ursprüngliche Volumen hinaus stattfindet. Da das benutzte Gerät vor Durchführung der Prüfung geeicht wurde, stellen die aufgezeichneten Dehnungen Absolutwerte dar. Abb. 5 zeigt, dass von den 3 untersuchen Zementen der HOZ 325 die kleinsten Ausdehnungen hat. Bis -20° und 340 Min. wurde hier eine Zunahme des Volumens von 0,05 cm³ festgestellt. Auch die entsprechenden Ergebnisse für die übrigen Zemente stimmen mit den f_B — Werten überein.

	PZ 325	PZ 425
f_B	7,83 %	8,10 %
V_B	0,74 cm³	1,37 cm³

In Abb. 6 und 7 sind demgegenüber die Ergebnisse der Dilatometer-Frostprüfungen für die Prüfkörper aufgezeichnet, die die Frostprüfung

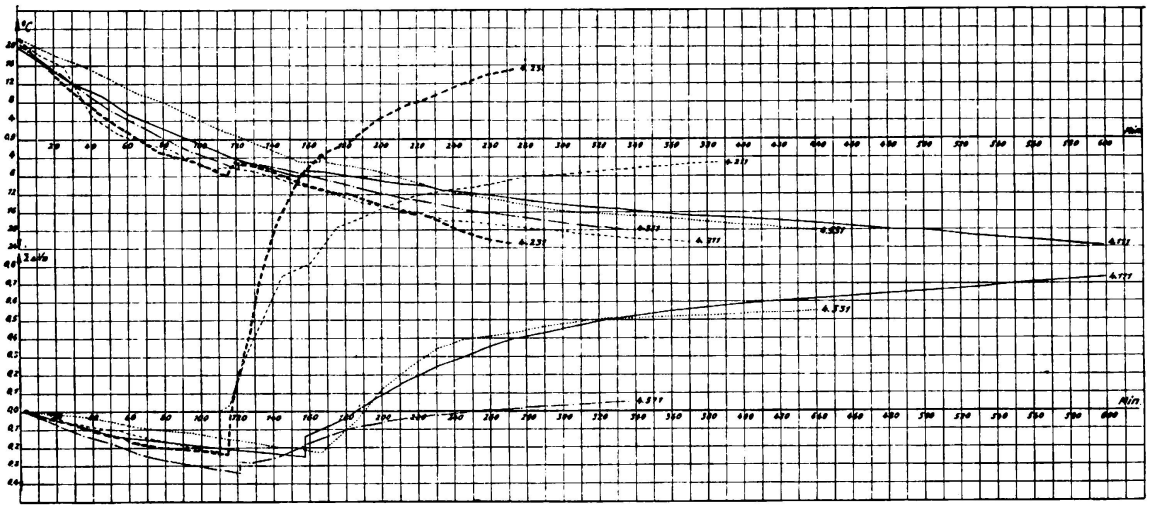

BILD. 5. Darstellung der Volumensänderung der Probekörper ohne Frostbeständigkeit in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur

bestanden haben. Dargestellt wurden die Raumänderungen der Körper in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Temperaturverlauf war bei allen dargestellten Versuchen gleichartig. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Ergebnisse, und zwar bis zum Gefrierpunkt, recht eng zusammen. Vor allem trifft dies für die Versuchsreihen mit PZ 325 zu (V_L = 8,30 bis 10,99; f_B = 20,76 bis 29,30 %), bei denen der Beginn des Gefrierens durchweg beobachtet werden konnte. In den Fällen, wo der Temperaturverlauf einen ausgesprochenen Gefrierpunkt nicht erkennen liess, kann angenommen werden, dass der Gefrierpunkt noch nicht erreicht ist

(5.511, 5.532, 5.532a und 5.532b). Das schliesst jedoch nicht aus, dass der Einpressmörtel noch bei tieferen Temperaturen als — 20° zu gefrieren beginnt und dann bei der Eiskristallisation infolge Ausdehnung bleibende Frostschäden erleidet.

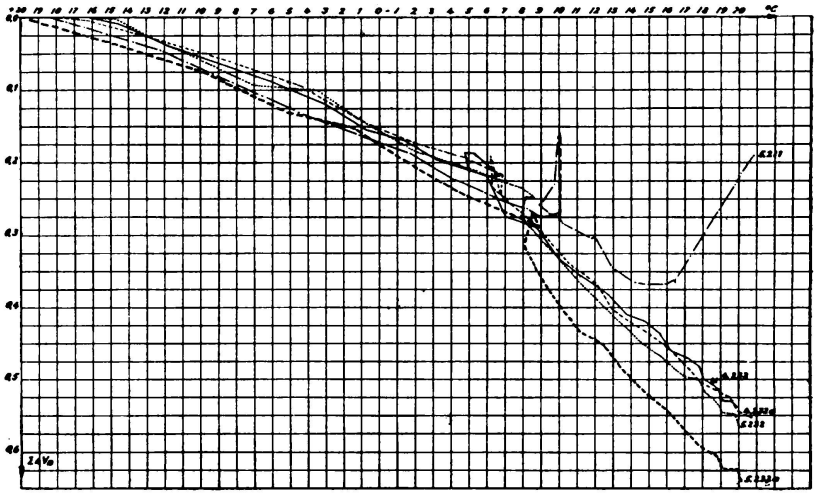

BILD 6. Darstellung der Volumensänderung der Probekörper mit PZ 325, die frostbeständig sind, in Abhängigkeit von der Temperatur

Ähnliche Erscheinungen sind im übrigen bei den Reihen 5.211 (Abb. 6) und 4.532 (Abb. 7) zu beobachten, die unterhalb des Gefrierpunktes (— 10 bzw. — 6° C) zunächst durchweg noch Schrumpferscheinungen

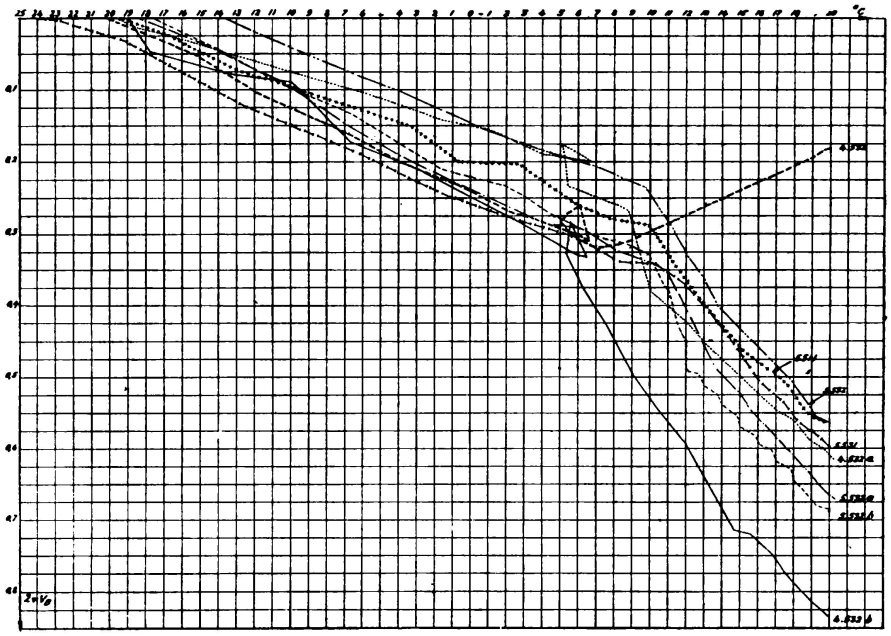

BILD 7. Darstellung der Volumensänderung der Probekörper mit HOZ 325, die frostbeständig sind, in Abhängigkeit von der Temperatur

zeigen, dann aber allmählich an Volumen zunehmen. Bis zu welcher Temperatur diese Einpressmörtel noch als frostbeständig anzusehen sind, kann hinreichend genau aus dem Verlauf der Ausdehnungen abgelesen

werden (— 25 bzw. — 30° C). Die grössten Schrumpfungen sind bei dem Einpressmörtel 5.232a (PZ 325) mit rd. 0,6 cm³ bzw. bei 4.532b (HOZ 325) mit etwa 0,8375 cm³ festgestellt worden.

Hinsichtlich des Alters ist bei den Probekörpern, die die Frostprüfung bestanden haben, ein wesentlicher oder grundsätzlicher Unterschied in dem Verhalten bei Frost nicht festzustellen. Bis zum Gefrierpunkt war aus dem Alter eine bestimmte Tendenz nicht abzuleiten. Dagegen ergaben die 7 Tage alten Probekörper unterhalb des Gefrierpunktes im allgemeinen grössere Schrumpfwerte als die 2 Tage alten Proben. Ausserdem lag der Gefrierpunkt der älteren Probekörper um 2 — 3° C tiefer, sofern ein Gefrierpunkt überhaupt zu erkennen war.

Der Verlauf der Dilatometer-Frostprüfungen der mit Intrusion Aid und Intraplast angesetzten Mörtelgemische wurde in Abb. 8 dargestellt. Der Beginn des Gefrierens konnte in beiden Fällen nur bei den 2 Tage

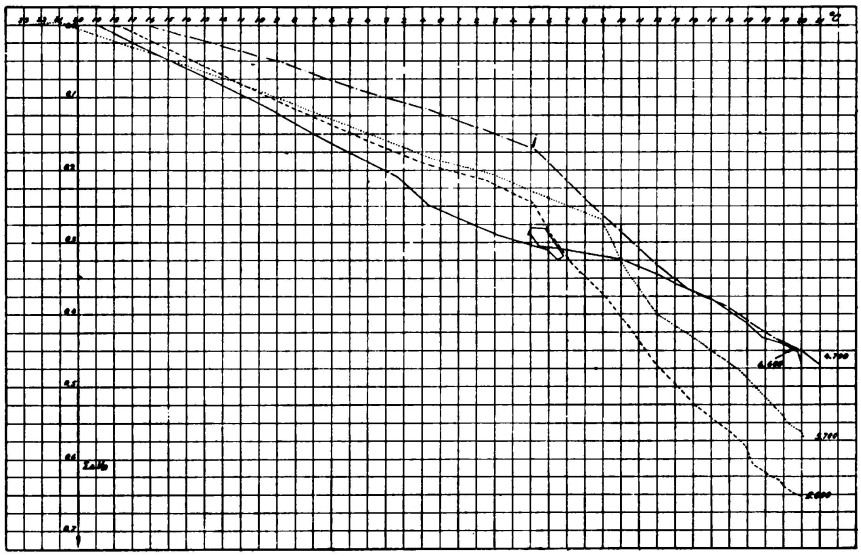

BILD 8. Darstellung der Volumensänderung der Probekörper mit Zusätzen von Intrusion Aid und Intraplast in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur

alten Proben beobachtet werden (5 bis 6° C). Obwohl der Verlauf des Schrumpfens dieser Gemische bei Frosteinwirkung keineswegs gleichartig war, konnte nach Ablauf der Frostperiode ein fast völlig gleiches Schrumpfmass festgestellt werden. (0,47 cm³) Bei den 7 Tage alten Proben zeigt das Mörtelgemisch mit Intrusion Aid mit rd. 0,65 cm³ eine um 0,0575 cm³ grössere Schrumpfung als die Probe mit Intraplast. Beide Mörtelgemische haben die Frostprüfung bis — 20° C bestanden. Da die Tendenz bei allen Probekörpern etwa gleichartig gut war, kann ein wesentlicher Unterschied in der Wirkungsweise der Zusatzmittel hinsichtlich der Frostbeständigkeit nicht festgestellt werden.

Um den Einfluss verschiedenartiger Temperaturänderungen festzustellen, wurde bei einigen Probekörpern nach Erreichen des Gefrierpunktes die Temperatur konstant gehalten. Während bei der Probe 5.211 (PZ 325 ohne Zuschläge und Zusatzmittel bei der Konstanthaltung der Tem-

peratur (— 12° C) ein geringes Schrumpfen auftrat, hatte diese Massnahme bei dem Probekörper 5.532b (HOZ 325 + Quarzmehl 4:1 + 1 % LP-A) mit einem wesentlich höheren Anteil an Luftporen keinerlei Einfluss auf das Volumen. Aus dem Verlauf der Temperaturen, Schrumpfungen bzw. Ausdehnungen ist bei der Probe 5.211 aus der Ausdehnung nach Wiederaufnahme des Kühlfortgangs wiederum zu erkennen, dass die Frostbeständigkeit mit Sicherheit voraussichtlich nicht wesentlich über — 25° bis — 30° gewährleistet ist. Dagegen setzt die Probe 5.532b nach Abschluss der konstanten Temperatur und weiterer Abkühlung die Schrumpfung fort. Beide Ergebnisse waren zu erwarten.

Schliesslich wurde auch die Auswirkung eines plötzlichen Temperaturabfalls auf Zementmörtelgemische (4.111 und 4.532b) untersucht (Abb. 9). Zum Vergleich wurde diese Prüfung mit Mörtelgemischen.

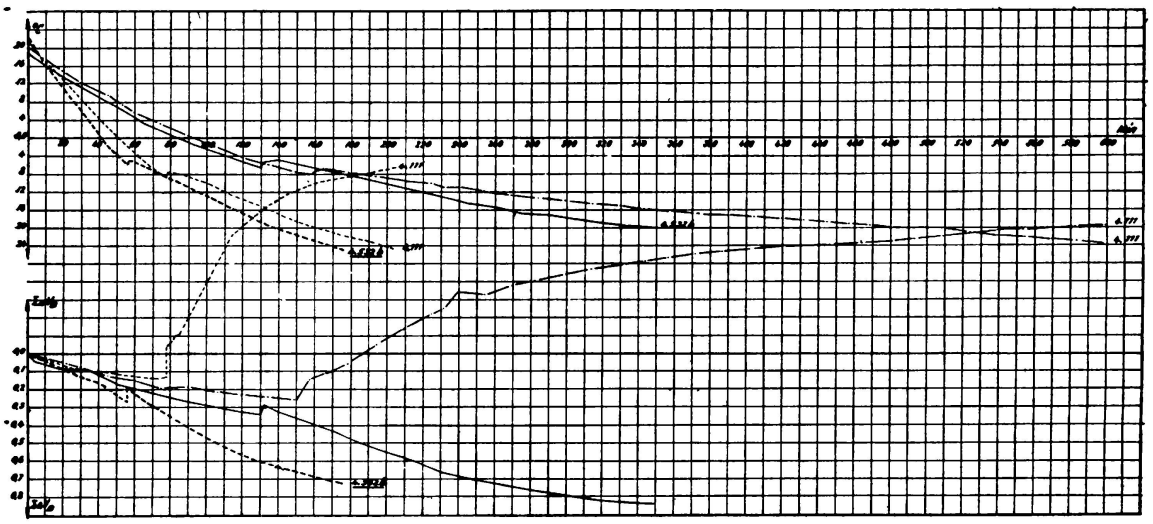

BILD 9. Darstellung der Volumensänderung von Probekörpern in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur, wobei der Probekörper einem plötzlichen Temperaturabfall ausgestzt wurde

durchgeführt, bei denen erwartet werden konnte, dass sie die Frostprüfung bestanden bzw. nicht bestanden. An der Art des Verhaltens der untersuchten Mörtelgemische bestand keinerlei Zweifel; von Bedeutung und Interesse war in erster Linie die Frage, in welchem Umfange Abweichungen in den Volumensänderungen bei dem beschleunigten Kühlvorgang auftreten würden. Der beschleunigte Kühlvorgang wurde in der Weise durchgeführt, dass die Prüfkörper mit einer Eigentemperatur von etwa + 20. C in den bis auf — 20° C abgekühlten Innenraum der Kühltruhe gestellt wurden. Der Beginn des Gefrierens wurde in beiden Fällen etwa zu denselben Temperaturen festgestellt, wie bei dem normalen Kühlvorgang (— 6 bzw. — 8° C). Überraschend ist wiederum die Tatsache, dass die Probe mit dem höheren Luftporengehalt (4.532b mit V_L = = 8,48 %) bereits bei — 6° C zu gefrieren begann, während dies bei der Probe 4.111 erst bei — 8° C der Fall war. Die Änderungen des Volumens waren bis — 24° C ebenfalls nicht allzu verschieden. Die Ausdehnung des Probekörpers 4.111 nahm bei normalem Kühlfortschritt von 0,73 bis

1,03 cm^3 bei beschleunigtem Kühlfortschrift zu, während umgekehrt die Schrumpfung der Probe 4.532b entsprechend von 0,84 auf 0,73 cm^3 abnahm.

7.*a)* Überblick über die von T. C. Powers und R. A. Helmuth durchgeführten Versuche.

Bei den durchgeführten Frostversuchen konnten im übrigen gleichartige oder ähnliche Feststellungen getroffen werden, wie sie T. C. Powers und R. A. Helmuth, Chicago, auf Grund umfangreicher und sehr exakt durchgeführter Versuche dargelegt und begründet haben [2]. T. C. Powers und R. A. Helmuth führen die Volumensänderungen in erhärteten Portlandzementmörteln beim Gefrieren auf die Erzeugung von Wasserdruck zurück, wenn das Wasser in den Kapillar — Hohlräumen gefriert, dann aber auch auf das Anwachsen der Eiskörper in den kapillaren Hohlräumen oder Luftporen infolge des thermodynamischen Energieausgleichs zwischen dem Gelwasser und dem Eis in den Kapillarporen, der ein Abziehen des Wassers vom Gel zur Folge hat. Die Versuche wurden von Powers/Helmuth zum grössten Teil mit 3 Wochen bis 3 Monate alten röhrenförmigen Körpern von 5,08 cm Länge, 2,54 cm Aussen- und 1,27 cm Innendurchmesser durchgeführt. Die Wasserzementwerte schwankten zwischen 0,45 bis 0,70. Die Abkühlung erfolgte zwischen + 25 und — 25° C. Die Kühlgeschwindigkeit war im allgemeinen recht gross (— 15°/Std.). Längen- und Temperaturänderungen sowie die Zeitdauer wurden selbsttätig aufgezeichnet.

Luftporen infolge der Verwendung von Luftporenzusatzmitteln werden von den Verfassern nicht als Teil des Zementmörtels angesehen. Sie betrachten den Zementmörtel als Substanz, die die Luftporen umgibt, die porös sein kann, wobei ihre Poren entweder Luft oder Wasser enthalten können.

Die in der Abhandlung der Verfasser [3] erläuterten Versuche beziehen sich ausschliesslich auf völlig wassergesättigte Zementmörtel, die ausserdem so gelagert wurden, dass der grösstmögliche Sättigungsgrad während der Nachbehandlug aufrecht erhalten blieb.

7.*b)* Zusammenfassung der grundsätzlichen Feststellungen.

Der erste Teil der von Powers/Helmuth gefundenen Ergebnisse kann wie folgt zusammengefasst werden:

1. In allen wassergesättigten Zementmörteln ohne Luftporen beginnt die Ausdehnung in dem Augenblick, wenn das Gefrieren einsetzt.

2. Falls Luftporen in genügend dichter Lagerung vorhanden sind, fällt der Beginn der Anfangsausdehnung, sofern überhaupt eine Ausdehnung auftritt, mit dem Gefrierpunkt zusammen, worauf dann die Zusammenziehung folgt.

3. Wird die Abkühlung etwa in der Mitte des Gefriervorgangs abgebrochen und anschliessend die Temperatur constant gehalten,

dehnen sich die Proben ohne Luftporen weiter aus, während umgekehrt die Proben mit Lufporen sich für begrenzte Zeitspannen zusammenziehen.

4. Wenn die Abkühlung nach einer konstanten Temperaturperiode wieder aufgenommen wird, dehnen sich die Zementmörtel ohne Luftporen wieder plötzlich aus. Die Zementmörtel mit Luftporen ziehen sich dagegen allmählich zusammen.

5. Bei gekühlten wassergesättigten Zementmörtelgemischen von bekannter Porosität ist die Ausdehung um so geringer, je dichter die Luftporen im Zementmörtel vertreten sind.

T. C. Powers und R. A. Helmuth weisen auf Versuchsergebnisse aus dem Jahre 1947 hin, wonach Zementgel, selbst wenn es den ihm zur Verfügung stehenden Raum vollständig ausfüllen würde, noch etwa 25 % Poren enthält. Ausserdem wird hervorgehoben, dass das Volumen des Gels bei der Mehrzahl der Mörtelgemische nicht dem Mörtelvolumen entspricht. Die nicht gefüllten Porenräume im Zementmörtel werden wie üblich als Kapillar-Poren oder -Hohlräume gedeutet. Sie sind um so zahlreicher und grösser, je höher die entsprechenden Wasserzementwerte und je kürzer die Trockenzeiten sind. Nur in kapillaren Hohlräumen kann Eis bestehen. Die Gelporen sind dagegen so klein, dass das Gefrieren erst bei einer Temperatur = — 78° C eintreten kann.

Die von T. C. Powers und R. A. Helmuth durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass nur ein kleiner Wasseranteil in der Nähe des normalen Gefrierpunktes des Wassers erstarrt, da die meisten der Kapillaren — Hohlräume so klein sind, dass die in ihnen befindlichen Eiskristalle infolge der Oberflächenspannung nur dann bestehen können, wenn die Temperatur unter dem normalen Gefrierpunkt liegt. Die Herabsetzung des Gefrierpunktes entsprechend der Grösse der kapillaren Hohlräume darf nicht mit der möglichem Unterkühlung infolge der im Wasser aufgelösten Substanzen, haupsächlich Alkalien, verwechselt werden.

Den in einem kapillaren Hohlraum bei der Eiskristallisation anwachsenden Eiskörper stellen sich Powers/Helmuth als eine Art Pumpe vor, die das den Eiskörper umhüllende Wasser durch den Zementmörtel zu den wasserfreien (Luft) Poren treibt, wobei der hierbei auftretende Druck von der Durchlässigkeit und dem Gefrierpunkt des Zementmörtels, ferner aber auch von der Entfernung der Luftporen abhängt. Da der Druck annähernd mit dem Quadrat der Entfernung wächst, könnte der Anfangsdruck bei grösseren Luftporenabständen so hoch werden, dass das umgebende Gel über die Elastizitätsgrenze hinaus beansprucht wird und damit einen bleibenden Schaden erleidet.

Wie bereits ausgeführt wurde, halten T. C. Powers und R. A. Helmuth mit der Erzeugung des Wasserdrucks jedoch nicht alle Erscheinungen für geklärt, die bei den durchgeführten Frostprüfungen aufgetreten sind. Sie führen diese auf thermodynamische Folgerungen zurück, wie sie bei der Temperaturverminderung von Wasser und Eis auftreten. Da bei Temperaturverminderungen Wasser schneller als Eis freie Energie gewinnt, besteht für das Gelwaser ein Energiepotential, es fliesst entlang den Oberflächen der Gelpartikel in den Film des mit Eis ausgefüllten

Kapillarhohlraums (Oberflächendiffusion). Die Verfasser machen darauf aufmerksam, dass in gleicher Weise auch eine Diffusion des Gelwassers in das Eis der Luftporen stattfindet, durch die jedoch mit Rücksicht auf die dort vorhandenen geringen Eismengen kein wesentlicher Eisdruck auftreten wird.

Bei konstant gehaltener Temperatur nach Beginn des Gefrierens haben T. C. Powers und R. A. Helmuth festgestellt, dass eine gewisse Wechselwirkung der freien Energie des Gelwassers, des Kapillareises und des Eises in den Luftporen auftritt, wie sie in Abb. 10 dargestellt wurde.

Während der Zeit $t_0 - t_1$ wächst infolge Oberflächendiffusion vom Gelwasser das Kapillareis an und erzeugt Wasserdruck auf die Wände

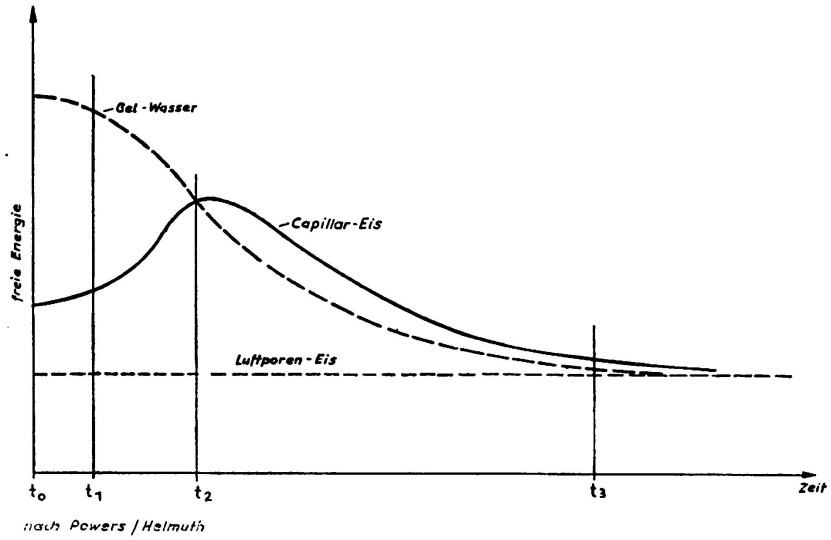

BILD 10. Zusammenhang der freien Energie des Gelwassers, Kapillar- und Luftporeneises in Abhängigkeit von der Zeit bei konstanter Temperatur

des Hohlraumes. Infolgedessen nimmt die freie Energie des Kapillareises während dieses Zeitabschnittes zu. Das Luftporeneis nimmt während dieser Zeit zwar ebenfalls Gelwasser auf, die freie Energie bleibt jedoch bei konstanter Temperatur und bei dem geringen Druck konstant. In dem Zeitabschnitt $t_1 - t_2$ nimmt die freie Energie des Gelwassers infolge fortschreitender Austrocknung des Gels weiter laufend ab, während die freie Energie des kapillaren Eises solange steigt, bis sie die freie Energie des restlichen Gelwassers erreicht hat. Zu diesem Zeitpunkt hört die Diffusion zum kapillaren Eis auf, dagegen kann die Diffusion zum Luftporeneis noch weiter gehen. Während des Zeitabschnitts $t_2 - t_3$ nähert sich das System wieder dadurch dem Gleichgewicht, dass die freie Energie des Kapillareises laufend Wasser an das Gel und die Luftporen abgibt.

Für den Zeitabschnitt $t_0 - t_2$ kommen T. C. Powers und R. A. Helmuth zu der Feststellung, dass das Kapillareis fast 1,09 mal das Volumen des Wassers übersteigt, das es aufnimmt. Die Teile des Gels, aus welchem dieses Wasser kommt, neigen zum Schrumpfen, das jedoch in wesentlich kleinerem Umfange auftritt, als es dem Volumen des abgegebenen Wassers entspricht. Wenn der Zementmörtel keine Luftporen enthält, wird der Anteil des Gelwassers, der von den Kapillarhohlräumen aufzunehmen ist, ein Maximum betragen. In diesem Fall wird das Kapillareis

so lange wachsen, bis Gleichgewicht mit der freien Energie des Gels besteht, oder aber das Gel wird vorher infolge Überschreitung seiner Festigkeiten reissen.

8. *Vergleich mit den Frostversuchen des 3. Versuchsprogramms.*

Der Vergleich der Ergebnisse des 3. Versuchsprogramms mit den Feststellungen von T. C. Powers und R. A. Helmuth, insbesondere hinsichtlich der Frostbeständigkeit zeigt im wesentlichen grundsätzliche Übereinstimmung der Beobachtungen und Feststellungen.

Eine Einschränkung wäre lediglich hinsichtlich des erforderlichen wasserfreien (Luft) Porenraumes zu machen, da eine Vergleichsmöglichkeit nicht besteht. Powers/Helmuth geben in Abb. 4 ihres Berichtes Mindestabstände der erforderlichen Luftporen zur Sicherstellung der Frostbeständigkeit an (i = 0,254 mm).

Demgegenüber ist bei den 3 Versuchsprogrammen der Baustoffprüfanstalt der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Münster recht eindeutig und übereinstimmend festgestellt worden, dass Frostbeständigkeit von Einpressmörtel — jedenfalls bis — 20 bzw. — 24° C — dann zu erwarten ist, wenn wasserfreie (Luft) Poren in einem Umfange von mindestens 9 % des chemisch nicht gebundenen Wassers vorhanden sind. Ob darüber hinaus noch weitere Sicherheiten verlangt werden müssen, wird jeweils von den klimatischen Bedingungen der Baustellen abhängen. Im allgemeinen werden Temperaturen unter — 24° C nicht zu berücksichtigen sein, da derartige Kälteeinbrüche vorauszusehen sind, so dass die Einpressarbeiten zurückgestellt werden können. Ältere Einpressmörtel werden nicht mehr in dem Masse wassergesättigt sein, so dass die Frostempfindlichkeit geringer ist.

9. *Vorschläge für die Zulassungsprüfungen von Einpressmörtel.*

Die Zulassung von Einpressmörtel für die Verpressung von Spannkanälen sollte von einer Prüfung abhängig gemacht werden, um festzustellen, ob die zur Ausführung vorgesehenen Einpressmörtel den Vorschriften in Ziff. 6.2 DIN 4227 entsprechen. Hierbei müsste das Fliessvermögen, das Absetzen und die Frostbeständigkeit untersucht werden.

Es wird zuvor jedoch die grundsätzliche Frage zu prüfen und zu entscheiden sein, ob Einpressmörtel mit Absetzerscheinungen überhaupt zugelassen werden können. Andernfalls führt nur die Verwendung von blähenden Zuschlägen zum Ziel. Die Frostbeständigkeit kann entweder mit Hilfe der festzustellenden f_8 — Werte oder durch Frostprüfungen im im Dilatometer nachgewiesen werden. Beide Verfahren dürften einfacher sein, als die Luftporenabstände zu bestimmen.

Nachsatz

Inzwischen wurden im Juli 1955 von der Arbeitsgruppe Einpressmörtel im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton «Vorläufige Richtlinien für das Auspressen von Spanngliedern mit Zementmörtel» herausgegeben, an denen der Verfasser als Mitglied der Arbeitsgruppe mitgewirkt hat.

Bei der überaus schnellen Entwicklung der Verfahren wäre es ausserordentlich erwünscht, wenn die mit der Zusammensetzung, Aufbereitung und Verarbeitung von Einpressmörtel nach den Richtlinien gewonnenen Erfahrungen diskutiert und möglichst weitgehend ausgetauscht werden könnten.

SCHRIFTTUM

1. RÖHNISCH — *Beton- und Stahlbetonbau 1955* – Heft 2, Seite 64 und Heft 3 Seite 89.
2. T. C. POWERS u. R. A. HELMUTH — *Proceedings of the Highway Research Board*, Vol. 32, p. 285 (1953).
3. VALORE — *Zement, Kalk, Gips 1950* – Heft, 6 Seite 129.

ZUSAMMENFASSUNG

Nach einem Überblick über die ersten beiden, durch die Baustoffprüfanstalt der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Münster durchgeführten Versuchsprogramme, erläutert der Verfasser die Notwendigkeit eines 3. weiteren Versuchsprogramms, das inzwischen zum Abschluss gelangt ist. Die Ergebnisse dieses Programms werden ausführlich erläutert. Die auf Grund des 1. Versuchsprogramms aufgestellte Hypothese über die Frostbeständigkeit von Einpressmörtel konnte durch die Ergebnisse des 3. Versuchsprogramms in ihrer Richtigkeit bestätigt werden.

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des 3. Versuchsprogramms mit den von T. C. Powers und R. A. Helmuth festgelegten Grundsätzen verglichen. Hierbei konnte in den Beobachtungen und Grundsätzen recht gute Übereinstimmung festgestellt werden.

Zum Abschluss werden Vorschläge über die Prüfung und Zulassung von Einpressmörtel besprochen. Da z. Zt. weder geeignete Vorschriften noch Richtlinien vorliegen, sollte möglichst bald eine endgültige Klärung über die Zulassung der Einpressmörtel für Spannbetonglieder herbeigeführt werden.

RESUMO

Depois de expor os dois primeiros programas de ensaios levados a efeito pelo Instituto de Ensaios de Materiais de Construção da Direcção dos Transportes Terrestres e Marítimos de Munster, o autor justifica a necessidade de uma terceira série, entretanto executada, e cujos resultados descreve em pormenor. As hipóteses referentes à resistência ao gelo das argamassas comprimidas, formuladas quando dos primeiros ensaios foram confirmadas pelos referidos resultados.

Estes foram depois comparados com os princípios estabelecidos por T. C. Powers e R. A. Helmuth com os quais concordaram de maneira bastante satisfatória. O autor conclui apresentando algumas sugestões acerca dos ensaios e da segurança das argamassas comprimidas. A obtenção rápida de dados precisos sobre o comportamento e a segurança da

argamassa comprimida nas estruturas de betão preesforçado, tornou-se necessária pelo facto de não existirem na altura, nem Normas, nem Regulamentos a este respeito.

RÉSUMÉ

Après avoir exposé les deux premiers programmes d'essais effectués par l'Institut d'Essais de Matériaux de Construction de la Direction des Transports Terrestres et Maritimes de Munster, l'auteur justifie la necessité d'une troisième série, effectuée entretemps, et dont il décrit en détail les résultats. Les hypothèses concernant la résistance au gel des mortiers comprimés, formulées lors des premiers essais ont été confirmées par ces résultats.

Ceux-ci ont, par après, été comparés avec les principes énoncés par T. C. Powers et R. A. Helmuth, la concordance obtenue étant assez satisfaisante. L'auteur termine en présentant quelques suggestions concernant les essais et la securité des mortiers comprimés. L'obtention rapide d'éléments précis sur le comportement et la sécurité du mortier comprimé dans les ouvrages en béton précontraint a été rendue nécessaire par l'absence, à ce moment là, de Normes et de Règlements à ce sujet.

SUMMARY

After describing both initial series of experimental research carried out by the Institute for Testing of Building Materials of the Land and Sea Transport Authority in Munster, the author justifies the need of a third series of tests which have now been completed and the results of which are fully reported. The hypothesis of the first series of tests, regarding the frost sensitivity of compressed mortar, were confirmed by the results of this third series.

These results were then compared to the principles established by T. C. Powers and R. A. Helmuth and were found to agree fairly well with them. The author finally presents a number of suggestions regarding testing and safety of compressed mortar. The obtaining of practical data on the behaviour and safety of compressed mortar in prestressed concrete structures was rendered necessary owing to the fact that, at the time, neither Standards nor Code of Practice were available on the subject.

Leere Seite
Blank page
Page vide