

# Einpreßmörtel für Spannbeton – Vergleich der Vorschriften und Empfehlungen verschiedener Länder

Von Karsten Rendchen, Düsseldorf

## Übersicht

*Das Einpressen von Zementmörtel in Spannkänäle wird in der Bundesrepublik Deutschland bereits seit 1955 nach Richtlinien ausgeführt. Der angestellte Vergleich dieser Richtlinien mit den entsprechenden Vorschriften und Empfehlungen verschiedener europäischer und außereuropäischer Länder macht deutlich, daß bereits bei der Wahl der Ausgangsstoffe, aber auch bei der Herstellung, bei den Anforderungen und bei den Prüfverfahren für Einpreßmörtel in den einzelnen Ländern z. T. beträchtliche Unterschiede bestehen. Als wichtige Eigenschaften des Mörtels werden in allen Vorschriften stets seine Druckfestigkeit, sein Fließvermögen (außer in Großbritannien) und seine Raumänderung im frischen Zustand (außer in Frankreich und den Niederlanden) herausgestellt und geprüft.*

*Einige zur Bestimmung der Raumänderung für deutsche Verhältnisse durchgeführte Untersuchungen befassen sich mit dem Einfluß von Varianten der Prüfung der Volumenänderung.*

## 1. Allgemeines

Im Spannbetonbau unterscheidet man heute zwischen Spannbeton ohne Verbund, Spannbeton mit sofortigem Verbund und Spannbeton mit nachträglichem Verbund. Im Ausland wird häufig die Vorspannung ohne Verbund ausgeführt. Beispiele hierfür finden sich in den USA, in Japan, in Großbritannien und in Frankreich [1, 2, 3]. In der Bundesrepublik Deutschland kommen in der Regel nur Spannglieder mit sofortigem Verbund (vorwiegend Spannbetonfertigteile) und Spannglieder mit nachträglichem Verbund (vorwiegend auf der Baustelle, aber auch werksgefertigte große Fertigteilträger) vor. (Ausnahmen hiervon sind demontierbare Bauwerke, z. B. Fertigteilbrücken für zeitweise Verkehrsführungen.) Spannglieder mit nachträglichem Verbund liegen meist in Hüllrohren, die mit Einpreßmörtel ausgefüllt werden.

Auf dem 5. Kongreß der Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) 1966 in Paris wurde die Frage der Vorspannung mit oder ohne Verbund eindeutig zugunsten des Auspressens der Spannkänäle mit Einpreßmörtel beantwortet [4]. Die Diskussionen

haben ergeben, daß z. B. bei Spannbetonbauwerken in erdbebengefährdeten Gebieten Spannglieder mit Verbund einen zusätzlichen Widerstand gegen Einsturz bieten. Daher war vorgeschlagen worden, für die Erstellung erdbebensicherer Spannbetonbauwerke generell nur ausgepreßte Spannglieder zuzulassen, wie es entsprechende Normen und Bemessungsgrundlagen z. B. in der UdSSR und Neuseeland bereits jetzt schon fordern.

Die bisherigen Erfahrungen auf dem Gebiet des Spannbetonbaus haben gezeigt, daß Einpreßmörtel bislang den wirksamsten Schutz des Spannstahls gegen Korrosion bietet. Die Zerstörung der Passivschicht des Stahls durch Halogenide (außer Fluor) im Mörtel verhindert man heute durch deren Begrenzung (z. B. des Chloridgehalts). Die Grenzwerte hierfür sind auf Langzeiterfahrungen bei Verwendung von Stahl- und Spannbeton begründet. Gleichzeitig erreicht man durch das Ausfüllen des im Spannkanal verbleibenden Hohlraums (von 15 % bis 75 % je nach Spannverfahren und zulässiger Vorspannkraft) einen dauerhaften Verbund zwischen den Spanndrähten und dem Hüllrohr und damit eine gleichmäßige Kraftübertragung auf den Konstruktionsbeton, wodurch die bei Überbeanspruchung in der Zugzone auftretenden Risse sich über einen größeren Bereich verteilen, dabei wohl zahlreicher sind, jedoch weniger breit klaffen.

Größe und Dauerhaftigkeit des nachträglichen Verbunds sind in starkem Maße von den Eigenschaften des Einpreßmörtels und der Sorgfalt des Auspressens abhängig. Die Einhaltung der geforderten Eigenschaften muß daher in regelmäßigen Abständen nachgeprüft werden.

## **2. Anforderungen an den Einpreßmörtel**

Die schon vor über 20 Jahren herausgestellten wesentlichsten Aufgaben, die ein zweckentsprechender Einpreßmörtel zu erfüllen hat [5], führten zu differenzierten Anforderungen

an den Aufbau des Mörtels (Zusammensetzung und Beschaffenheit der Ausgangsstoffe),

an das Verhalten des Frischmörtels (Fließvermögen, Versteifen, Raumänderung und Wasserabsondern),

an den erhärteten Mörtel (Festigkeit, Frostbeständigkeit).

Ein Vergleich der verschiedenen Vorschriften zeigt, daß bei der Wahl der Ausgangsstoffe, bei der Herstellung, bei den Anforderungen und bei den Prüfverfahren für Einpreßmörtel in den einzelnen Ländern zum Teil große Unterschiede bestehen. Größere Unterschiede gibt es z. B. bei den zu verwendenden Zementen, bei den Anforderungen bezüglich der zulässigen Raumänderung und insbesondere hinsichtlich der Notwendigkeit eines Nachweises der Frostbeständigkeit von Einpreßmörtel und (falls gefordert) bezüglich der Durchführung dieses Nachweises.

Die Auswertung des vorliegenden Schrifttums hat außerdem ergeben, daß in einigen Ländern neben den Vorschriften zusätzliche Empfehlungen bzw. Festlegungen von staatlichen Institutionen oder technischen Fachverbänden erschienen sind, die z. T. in ihren Anforderungen über die geltenden Vorschriften hinausgehen.

Die Vorschriften folgender Länder wurden verglichen: Bundesrepublik Deutschland [6], Deutsche Demokratische Republik [7], Frankreich [9], Großbritannien [10], Japan [11], Niederlande [12], Österreich [13], Schweden [14, 15], Schweiz [16] und USA [17<sup>1)</sup>], 18]. Außerdem wurden die auf internationaler Ebene vom Comité Européen du Béton (CEB) und von der Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) erarbeiteten Richtlinien [19, 20] zum Vergleich herangezogen. Die in Italien geltende Einpreßmörtelvorschrift [21] lag nicht vor und konnte daher nicht mit einbezogen werden.

## 2.1 Ausgangsstoffe

### 2.1.1 Zement

Die für die Herstellung von Einpreßmörtel *zugelassenen Zemente* müssen mit Ausnahme der Schweiz und Großbritanniens den jeweiligen nationalen Zementnormen entsprechen. In der Regel sind nur normgemäße Portlandzemente zugelassen. Die Verwendung von normgemäßen Portlandzementen jedoch bedeutet, daß dieser mit sehr unterschiedlichen Gehalten von Zumahlungen in Form von feinaufgeteilten, anorganischen mineralischen Stoffen zulässig ist. Die zulässigen Mengen liegen zwischen 5 Gew.-% in der Bundesrepublik Deutschland (Neufassung DIN 1164) und 20 Gew.-% in Luxemburg. Nur Frankreich verlangt für die Herstellung von Einpreßmörtel einen von Zumahlungen freien Portlandzement (ciment portland artificiel).

In den Niederlanden darf auch Hochofenzement verwendet werden. In Großbritannien sind neben Portlandzementen auch noch Hüttenzement mit Schlackengehalten bis maximal 65 %, Tonerdezement und Varianten von Zementen mit hohem Tonerdegehalt („sulphated high alumina cement“) [22] zulässig. Dabei sei nach [22] jedoch letzterem gegenüber dem Tonerdezement der Vorzug zu geben, da im Tonerdezement durch Phasenumwandlung eine Volumenverminderung entsteht, die u. a. die Dichte, die Festigkeit des Mörtels und den Korrosionsschutz verringert. In Japan wird in der Regel Portlandzement verwendet, es dürfen mit besonderer Genehmigung jedoch auch andere Zemente verwendet werden.

Nach [7] ist in der Deutschen Demokratischen Republik für Einpreßmörtel nur der Portlandzement PZ 1 mit den Festigkeitsklassen 375, 425, 475 nach TGL 28101/01 „Portlandzemente“ zulässig. Die Portlandzemente PZ 2 „sulfatbeständiger Portlandzement“ und PZ 3 „Portlandzement mit mittlerer Sulfatbeständigkeit“ sind für Einpreßmörtel ausgeschlossen. Weiterhin werden Portlandzemente, die aufgrund ihres Herstellverfahrens (Gips-Schwefelsäure-Verfahren) einen höheren CaS-Anteil aufweisen, wegen einer nicht auszuschließenden Sulfidkorrosion des Spannstahls für Einpreßmörtel als ungeeignet angesehen. Portlandzemente mit Zumahlstoffen (PZ 7, PZ 8) dürfen ebenfalls nicht verwendet werden [8]. Alle Importzemente sind von der Anwendung ausgeschlossen.

<sup>1)</sup> Während in der Neufassung von CRD-C 588, Fassung Dezember 1976, „Specification for nonshrink grout“ ausdrücklich darauf hingewiesen wird, daß diese Vorschrift u. a. nicht mehr für Einpreßmörtel gilt, ist die Anwendung von solchem Mörtel gemäß [17] für Einpreßmörtel nicht untersagt.

den verschiedentlich auch Einpreßhilfen verwendet, bei denen Stickstoff als treibendes Gas freigesetzt wird [31].

Zusatzmittel für Einpreßmörtel müssen in der Bundesrepublik Deutschland, in der Deutschen Demokratischen Republik und in Frankreich von entsprechenden amtlichen Stellen (Institut für Bautechnik, Berlin, bzw. Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung der DDR bzw. Commission Permanente des Liants Hydrauliques et des Adjuvants du Béton) zugelassen sein bzw. ein Prüfzeichen erhalten. In den USA sind u. a. in den „Specifications for grout fluidifier“ [32] Anforderungen an die Wirksamkeit verschiedener Einpreßhilfen festgelegt. Geprüft werden müssen dabei an Einpreßmörtel mit und ohne Zusatzmittel die Verminderung des Wasseranspruchs nach [32], die Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens nach [34], die Raumvermehrung des frischen Einpreßmörtels nach [35], der Erstarrungsbeginn nach [36] und die Druckfestigkeiten nach [37].

#### *2.1.4 Zusatzstoffe und Zuschläge*

Eine Unterscheidung zwischen Zusatzstoffen und Zuschlägen, wie sie die DIN 1045 trifft, ist im Ausland nicht immer üblich. Hier wird im allgemeinen nur in grobe und feine Zuschläge unterteilt. Die Zugabe feiner Zuschläge und Zusatzstoffe wie Feinsand, Quarzsand oder Kalksteinmehl, Puzzolane oder auch Flugasche zum Einpreßmörtel wird in den meisten Ländern zugelassen. Lediglich die Deutsche Demokratische Republik läßt keinerlei Zuschläge bzw. Zusatzstoffe zu. In Großbritannien ist nur Sand mit einem maximalen Größtkorndurchmesser von 1,18 mm für große Spannkäme und in Frankreich nur ein Größtkorn von 0,3 mm zulässig. Hier darf der Feinsandanteil 25 % (bezogen auf das Zementgewicht) nicht übersteigen. Für Hüllrohrdurchmesser über 150 mm sind in den Niederlanden und auch nach dem CEB-Richtlinien-Entwurf [20] maximal 25 Gew.-% Feinsand zulässig. In den USA dürfen bis zu 30 % Flugasche oder Puzzolane zugegeben werden [38]. In der Schweiz ist die Zugabe von Zuschlägen ohne weitere Detaillierung möglich. In den schwedischen und japanischen Vorschriften werden hierüber keine Angaben gemacht.

In der Bundesrepublik Deutschland und in Österreich ist die Verwendung von Zuschlägen über 8 mm zum Ausfüllen von großen Hohlräumen vor dem Verpressen gestattet. Zusatzstoffe im Sinne der DIN 1045 werden in Österreich nicht verwendet, auch nicht in der Bundesrepublik Deutschland, obwohl es nach den „Richtlinien“ zulässig wäre. Allgemein gesehen ist es jedoch nicht konsequent und auch nicht einzusehen, daß zur Sicherung des Korrosionsschutzes nur Portlandzement zugelassen, gleichzeitig jedoch die Zugabe von Zusatzstoffen ermöglicht wird.

## **2.2 Zusammensetzung und Herstellung**

### *2.2.1 Zusammensetzung*

Der angemessene Wasserzementwert des Einpreßmörtels ergibt sich aus den Anforderungen an das Fließvermögen und an die Stabilität des Frischmörtels sowie an die Festigkeit (siehe Abschnitte 2.3.1, 2.3.3 und 2.3.5).

Festlegungen über einen maximal zulässigen Wasserzementwert enthalten nur die Vorschriften der Bundesrepublik Deutschland und der Deutschen Demokratischen Republik mit  $\leq 0,44$ , ferner die Frankreichs mit  $\leq 0,40$  für Einpreßmörtel ohne Einpreßhilfe und mit  $\leq 0,38$  für Einpreßmörtel mit Einpreßhilfe sowie die Großbritannien mit  $\leq 0,45$ . In den übrigen Vorschriften wird nur gefordert, daß der Wasserzementwert so niedrig wie möglich zu halten ist. Dazu werden in einigen Vorschriften jedoch Grenzwasserzementwerte empfohlen, die möglichst nicht überschritten werden sollen, so z. B. in der Schweiz 0,43, in Schweden 0,40 und in den Niederlanden 0,45. In der Bundesrepublik Deutschland ist vor kurzem eine von den Richtlinien abweichende Festlegung der oberen Grenze des Wasserzementwerts aufgekommen [26]. Danach bedürfen Überschreitungen des Wasserzementwerts 0,40 stets der Zustimmung des Auftraggebers.

Die erforderliche Zugabemenge an Einpreßhilfe bzw. Zusatzmittel ist allgemein stets aufgrund einer Eignungsprüfung so festzulegen, daß die geforderten Einpreßmörteleigenschaften erreicht werden. Wenn für das Zusatzmittel eine Zulassung besteht, ist die darin festgelegte Höchstzugabemenge zu beachten.

### 2.2.2 Herstellen

In den Vorschriften ist allgemein nur vom Herstellen des Mörtels auf der Baustelle die Rede. Der Einpreßmörtel wird in der Regel durch *Zugabe der Ausgangsstoffe* in der Reihenfolge Wasser – Zement – Zusatzmittel – Zusatzstoff (oder Zuschlag) in den Mischer hergestellt, wobei die Zugabe des Zusatzmittels nach einem erstmaligen kurzzeitigen Durchmischen von Wasser und Zement erfolgt (z. B. Bundesrepublik Deutschland, Österreich, Großbritannien). In den Niederlanden werden zuerst das Wasser und etwa zwei Drittel des Zements gemischt und anschließend das Zusatzmittel und der restliche Zement zugemischt. In Großbritannien wird nach [39] empfohlen, zuerst einen Teil des Anmachwassers mit dem Zement zu mischen und dann ggf. den Zuschlag (max. 1,18 mm Größtkorn) und das Restwasser zuzugeben.

Das zu verwendende *Mischgerät* für den Baustellenbetrieb wird nur in der TGL 32 321/01 [7] vorgeschrieben (Misch- und Auspreßgerät mit schnell und langsam laufendem Rührwerk – Umdrehungszahlen etwa 90 bis 120  $\text{min}^{-1}$  bzw. 30 bis 60  $\text{min}^{-1}$ ). In Schweden soll ein „Schnellmischer“ verwendet werden, worunter wohl ein hochtouriges Mischgerät zu verstehen sein dürfte. In Frankreich dürfen Propeller- und Walzenmischer mit etwa 1500 U/min oder hochtourige Quirmischer mit rd. 4000 U/min verwendet werden. Alle anderen Vorschriften fordern nur ein „geeignetes Mischgerät“ oder einen „Spezialmischer“, ohne Einzelheiten genauer festzulegen. In Deutschland wurden bereits im Jahre 1955 Untersuchungen über die Auswahl besonders geeigneter Mischer eingeleitet [23], deren Ergebnisse in [40] veröffentlicht worden sind, da man auch damals schon um den Einfluß des Mischgeräts auf die Eigenschaften des Einpreßmörtels wußte. Leider hat man sich danach bis heute nicht auf einen zumindest für alle Prüfinstitute einheitlichen Mischer bzw. wenigstens auf ein einheitliches Mischprinzip einigen können. So ist auch in den z. Z. gültigen Richtlinien die Frage des Misch-

geräts leider nur unzureichend behandelt und keine Festlegung getroffen worden. Ein Labormischer für Eignungsprüfungen ist nur in den USA vorgesehen. Hier schreibt CRD-C 589-70 [18] einen Mischer nach CRD-C 210-71<sup>2)</sup> vor.

Die *Mischzeit* ist abhängig vom Mischgerät. Sie darf im allgemeinen 4 Minuten nicht überschreiten (Bundesrepublik Deutschland, Niederlande und USA). Eine obere Grenze von 5 Minuten wird in Japan und in dem CEB-Richtlinien-Entwurf angegeben. In der Deutschen Demokratischen Republik und in Großbritannien wird nur eine Mindestmischzeit von 2 Minuten gefordert, in Großbritannien nach [39] aber eine Mischzeit zwischen 2 und 4 Minuten empfohlen. In Frankreich muß die Mischzeit, je nachdem ob Walzen- oder Propellermischer verwendet werden, entweder 2 Minuten oder 8 Minuten betragen. Bei anderen Mischertypen soll die Mischzeit zwischen 2 und 8 Minuten liegen. In den USA wird nach [38] eine Mischzeit von 1½ bis 3 Minuten für ausreichend gehalten. Die Temperatur des Einpreßmörtels wird in der Bundesrepublik Deutschland mit 35 °C, in Großbritannien mit 30 °C und in den USA mit 32 °C (empfohlen nach [38]) begrenzt, da sonst Schwierigkeiten beim Pumpen des Einpreßmörtels auftreten können.

## 2.3 Eigenschaften und Prüfverfahren

### 2.3.1 Fließvermögen

Das Fließvermögen des Mörtels, das für das Verpressen der Spannkanele eine wichtige Eigenschaft ist, wird durch rheologische Prüfungen ermittelt. Mit den dabei erhaltenen Kennwerten kann beurteilt werden, ob der Mörtel zuverlässig verpreßt werden kann. In den hier betrachteten Vorschriften sind, mit Ausnahme der in Großbritannien geltenden, ein oder mehrere Verfahren zur Beurteilung des Fließvermögens angegeben (Tafel 1).

In Österreich, in Japan und in der Bundesrepublik Deutschland wird das Fließvermögen mit dem Eintauchversuch gemessen (Bild 1a). Der in den Einpreßmörtel einsinkende Tauchkörper darf frühestens 30 Sekunden nach Tauchbeginn die Endstellung erreichen, es wird jedoch empfohlen, die Zusammensetzung des Einpreßmörtels so einzustellen, daß sich eine Tauchzeit von etwa 45 Sekunden ergibt.

In Schweden, der Schweiz und den USA sind sogenannte Auslauftrichter üblich, die in Form und Abmessung dem in [33] festgelegten „flow cone“ entsprechen (Bild 1g). Nach den Schweizer Vorschriften dürfen jedoch auch andere Prüfverfahren verwendet werden, „wenn deren Zuverlässigkeit durch Versuche erwiesen ist“. Exakte Anforderungen an die mit diesem Auslauftrichter ermittelte Auslaufzeit bestehen nur in Schweden. Hier ist eine Auslaufzeit von 6 Sekunden bis 7 Sekunden für 1 l Einpreßmörtel (12 Sekunden bis 14 Sekunden für 2 l) festgelegt. Diese Anforderung ent-

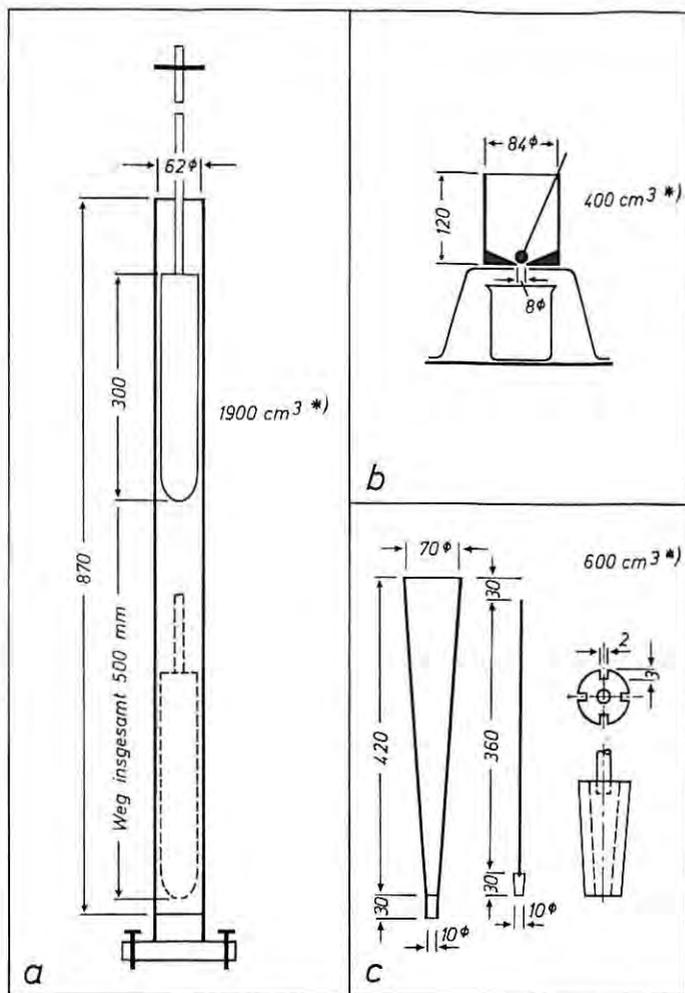
<sup>2)</sup> Der in CRD-C 210-71 „Physical test methods, general“ festgelegte Labormischer entspricht hinsichtlich Form, Abmessungen und Drehzahlen der Mischschaufeln dem in DIN 1164 Blatt 7 genormten Mischer. (CRD-C 210 liegt mit SI-Einheiten in neuer Fassung als CRD-C 210-76 „Mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortar of plastic consistency“ vor.)

Tafel 1 Anforderungen an das Fließvermögen von Einpreßmörtel

	Bundesrepublik Deutschland	Deutsche Demokratische Republik	Frankreich	Großbritannien	Japan	Niederlande	Österreich	Schweden	Schweiz	USA
Gerät	Tauchgerät	Auslaufgerät	Marsh-trichter	—	1) Tauchgerät 2) Durchflußgerät	1) Ibis-Visk. bzw. 2) Draht-Visk.	Tauchgerät	Auslauf-trichter	Auslauf-trichter	Auslauf-trichter
nach Bild 1	a	b	f	—	1) a 2) c	1) d 2) e	a	g	g	g
Geforderte Fließwerte	Tauchzeit $t \geq 30$ s, anzustreben etwa 45 s	Auslaufzeit $t \leq 18$ s	Auslaufzeit $13 \text{ s} \leq t \leq 25 \text{ s}$	—	1) Tauchzeit $t = 30-40$ s 2) Auslaufzeit $t = 10-30$ s	a) 5-25 P <sup>1)</sup> b) 4-15 P	Tauchzeit $t \geq 30$ s, anzustreben etwa 45 s	Auslaufzeit a) 6-7 s (bei 1 l) b) 12-14 s (bei 2 l)	—	$\geq 11 \text{ s}^2)$
Untersuchtes Mörtel-Vol. (rd. . . cm <sup>3</sup> )	1900	400	1500	—	1) 1900 2) 600	1) beliebig 2) 400	1900	a) 1000 b) 2000	1700	1700

<sup>1)</sup> a) bei horizontalen Spanngliedern, b) bei vertikalen Spanngliedern

<sup>2)</sup> nach [38]



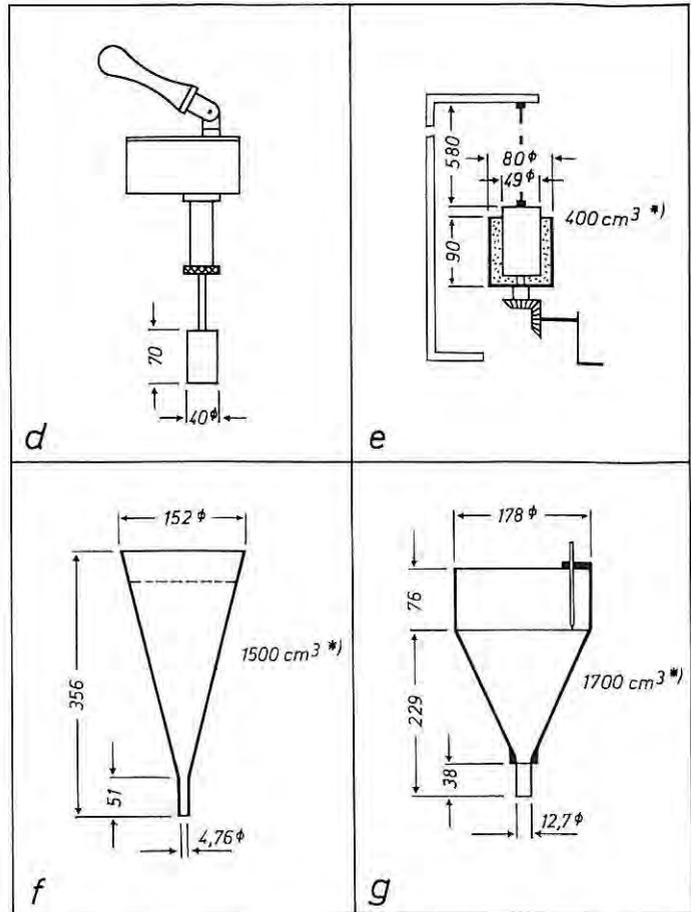
alle Maße in mm

\*) für die Prüfung erforderliche Mörtelmenge

Bild 1 Meßgeräte zur Bestimmung des Fließvermögens von Einpreßmörtel

spricht in etwa auch den Angaben in den vom Prestressed Concrete Institute (PCI) in den USA herausgegebenen Empfehlungen für das Verpressen von Spanngliedern [38]. Danach sollen 1,7 l Einpreßmörtel frühestens nach 11 Sekunden ausgelaufen sein.

Die Auslaufzeit als Kenngröße für das Fließvermögen wird auch in Frankreich und in der Deutschen Demokratischen Republik vorgeschrieben: In der Deutschen Demokratischen Republik wird das in Bild 1b dargestellte Auslaufgerät verwendet; die Auslaufzeit darf 18 Sekunden nicht überschreiten. In Frankreich wird die Auslaufzeit mit dem Marsh-Trichter (Bild 1f) bestimmt. Dabei sind



alle Maße in mm

\*) für die Prüfung erforderliche Mörtelmenge

Bild 1 Meßgeräte zur Bestimmung des Fließvermögens von Einpreßmörtel

13 Sekunden als unterste und 25 Sekunden als oberste Grenze vorgeschrieben. Bei Hüllrohrlängen bis zu 60 m wird eine Auslaufzeit von 20 Sekunden empfohlen, bei solchen über 60 m soll die Auslaufzeit 16 Sekunden betragen.

In Japan wird neben dem Tauchgerät auch der in Bild 1c dargestellte Durchflußtrichter verwendet. Hiermit wird die Zeit ermittelt, die der Mörtel benötigt, um von der Trichteroberkante 30 mm tief abzusinken. Den Trichterauslauf bildet ein Kegelstumpf mit 4 Nuten (2 mm x 3 mm), durch die der Einpreßmörtel abfließt. Die Konsistenz des Mörtels wird als geeignet erachtet, wenn die Aus-

flußzeit, die erforderlich ist, um die Mörteloberfläche 30 mm absinken zu lassen, zwischen 10 Sekunden und 30 Sekunden beträgt.

In den Niederlanden wird das Fließvermögen von Einpreßmörtel durch Messen der Viskosität beurteilt. Für horizontale Spannglieder soll sie zwischen 500 cP (Centipoise) und 2500 cP, bei Einpreßmörtel für vertikale Spannglieder zwischen 400 cP und 1500 cP betragen. Jedoch werden weder in der Norm noch in den dazugehörigen Erläuterungen Angaben über ein zu verwendendes Verfahren gemacht. Aus der Literatur sind zwei Verfahren bekannt, die in den Niederlanden verwendet werden [41, 42], das sogenannte Ibis-Viskosimeter (Bild 1d), mit dem die elektrische Energie gemessen wird, die erforderlich ist, um einen Zylinder (Durchmesser 40 mm) im Einpreßmörtel mit 50 U/min zu drehen. Die abgelesenen Werte in  $\mu\text{A}$  können über eine Tabelle in cP umgerechnet werden. Danach entsprechen z. B. 13  $\mu\text{A}$  einer Viskosität von 20 P [41]. Als zweites Gerät wird das Draht-Viskosimeter (Bild 1e) genannt. Hier wird ein an einem Draht im Mörtel hängender Zylinder durch Scherkräfte von dem in Rotation versetzten Mörtel verdreht. Der so tordierte Draht zeigt an einer Skala die Verdrehung in Bogengrad als Maß für die Viskosität, z. B. 30° entsprechend 20 P [41].

Eine Prüfvorschrift zur Ermittlung der Viskosität von Einpreßmörtel mit einem Torsionsfeder-Viskosimeter wird z. Z. in den USA aufgestellt (CRD-C 78: Method of test for resistance of grout mixtures to shear torque meter method).

Zahlreiche Veröffentlichungen bestätigen die Erfahrung, daß das Fließvermögen des Einpreßmörtels, insbesondere wenn Zusatzmittel zugegeben sind, auch von der Mörteltemperatur abhängt. Ein Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Fließvermögens ist daher nur bei ungefähr gleichen Mörteltemperaturen möglich. In allen Richtlinien mit Ausnahme der der Bundesrepublik Deutschland fehlen Angaben darüber, für welche Temperaturbereiche des Mörtels die einzuhaltende Tauch- bzw. Auslaufzeit bzw. Viskosität gilt.

Eine gewisse Fehleranfälligkeit haftet solchen Auslaufgeräten an, bei denen nur geringe Mörtelmengen durch sehr enge Auslauföffnungen fließen (z. B. die Geräte gemäß Bild 1b, 1c und 1f). Bereits kleine Mörtelklümpchen können die Auslauföffnung verstopfen, weil der Mörtel unter nur geringem Druck ausfließt. Diese Möglichkeit besteht bei dem Tauchgerät (Bild 1a) weniger, da hier der Mörtel durch einen 4500 bis 5000 g schweren Tauchkörper verdrängt wird. Trotzdem soll die Bildung kleiner Zementklümpchen, die durch unzureichende Verteilung des Zements im Anmachwasser (Zusammenballung einzelner Zementpartikel) entstehen, vermieden werden, weil in extremen Fällen auch die Tauchzeit dadurch etwas verlängert werden kann. Das langsame Einstreuen des Zements in das Anmachwasser im laufenden Mischer ist neben einer kräftigen Mischwirkung eine Möglichkeit, die Klümpchenbildung gering zu halten.

Eine einheitliche Kennzeichnung des Fließvermögens wäre durch die Ermittlung der Viskosität des Mörtels möglich, z. B. mit einem Rotationsviskosimeter. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die bislang verfügbaren Rotationsviskosimeter in der Regel vorwiegend

Laborgeräte sind und sich kaum für eine Verwendung auf der Baustelle eignen. Außerdem wäre festzulegen, welche der physikalisch unterschiedlich definierten und nicht einheitlich bezeichneten Viskositäten bestimmt werden soll. Zwar korrelieren die verschiedenen Viskositäten stark miteinander [43], jedoch können die Absolutwerte sehr unterschiedlich sein. Vergleicht man z. B. die in der niederländischen Vorschrift geforderten Viskositäten, die nicht näher definiert sind, mit der scheinbaren Viskosität, die mit einem Rotationsviskosimeter an Einpreßmörtel mit Einpreßhilfen bestimmt wurde (wobei die Einpreßmörtel nach den deutschen Richtlinien eine Tauchzeit zwischen 40 Sekunden und 45 Sekunden haben), so sind die damit ermittelten Werte etwa eine Zehnerpotenz geringer als die in der niederländischen Vorschrift geforderten Werte.

Schließlich ist auch zu beachten, daß die derzeit verfügbaren Geräte vorwiegend zur Bestimmung der Viskosität von Flüssigkeiten vorgesehen sind. Ein einheitlich anwendbares Viskosimeter für Einpreßmörtel sollte aber auch die Prüfung mit feinkörnigem Zuschlag (z. B. mit Feinsand) zulassen.

### *2.3.2 Sicherung gegen zu frühes Versteifen*

Da zwischen der Beendigung des Mischens und dem Abschluß des Verpressens einer Mischerfüllung mehr oder weniger Zeit vergeht, muß sichergestellt werden, daß der Mörtel auch gegen Ende des Verpressens noch ein ausreichendes Fließvermögen aufweist.

In Österreich und in der Bundesrepublik Deutschland darf daher nur Einpreßmörtel verwendet werden, dessen Tauchzeit 30 Minuten nach Abschluß des eigentlichen Mischvorgangs 80 Sekunden nicht überschreitet. In den Niederlanden darf Einpreßmörtel, der älter als 30 Minuten ist, generell nicht mehr verwendet werden, außer es ist ihm ein Verzögerer zugegeben. Für diesen Fall ist keine zeitliche Begrenzung festgelegt. Nach [42] soll für vertikale Spannglieder die Viskosität nach 20 Minuten 15 P nicht überschreiten. In der Deutschen Demokratischen Republik darf Einpreßmörtel, der älter ist als 45 Minuten, und in Schweden solcher, der älter ist als 30 Minuten, nicht mehr verarbeitet werden. In Großbritannien, in Japan und der Schweiz gibt es keine entsprechenden Festlegungen. Nach den französischen Vorschriften darf das Erstarren des Einpreßmörtels bei 30 °C frühestens 3 Stunden nach dem Herstellen beginnen, während das Erstarrungsende, gemessen bei 5 °C, innerhalb von 24 Stunden eingetreten sein muß. Geprüft wird nach einem vom „Laboratoire Central des Ponts et Chaussées“ (L.C.P.C.) festgelegten Verfahren, über das jedoch in [9] keine weiteren Angaben gemacht werden.

In den Vereinigten Staaten wird der Erstarrungsbeginn nach [36] mit der Vicat-Nadel ermittelt. Hierzu wird eine Einpreßmörtelmischung mit treibendem Zusatz und eine entsprechende Kontrollmischung ohne Treibhilfe hergestellt. Der Unterschied zwischen der Einpreßmörtelmischung und der Kontrollmischung darf beim Erstarrungsbeginn maximal 1 Stunde, beim Erstarrungsende nicht mehr als 2 Stunden betragen. Aus diesen Forderungen geht jedoch nicht hervor, wie lange Einpreßmörtel nach dem Herstellen noch verpreßt werden darf.

### 2.3.3 Raumänderung

**Allgemeines:** Reine Wasser-Zement-Suspensionen neigen mehr oder weniger stark zum Sedimentieren. Durch Sedimentieren kann sich über dem abgesetzten Zement eine abgesonderte Wasserschicht bilden (siehe Abschnitt 2.3.4). Das Zementsediment hätte dann auch nach dem Erhärten ein kleineres Volumen als die ursprüngliche Suspension. (Dazu trägt mit einer geringen Volumenverminderung auch das durch die Hydratation des Zements bedingte sogenannte chemische Schrumpfen bei.) Das „Absetzen“ des Zements, das sowohl vom Wasserzementwert als auch vom Wasserrückhaltevermögen des Zements abhängt, kann bei Wasserzementwerten bis 0,45 zu einem Volumenverlust zwischen 1 % und 10 % führen [44]. Das hätte bei einer großen Volumenverminderung zur Folge, daß die Spannglieder in den Spannkanälen an einigen Stellen, an denen sich das abgesonderte Wasser sammeln kann, nicht vollständig umhüllt wären, wenn keine Gegenmaßnahmen (z. B. durch Zusatzmittel) vorgesehen werden.

**Zusatzmittel:** Durch die Zugabe von Zusatzmitteln, vorwiegend von „Einpreßhilfen“, soll beim Einpreßmörtel eine Volumenverminderung durch Sedimentieren und Schrumpfen verhindert werden. Im Grunde ist sogar ein geringfügiges Quellen anzustreben, so daß durch eine Volumenvergrößerung des Mörtels nach dem Einpressen und vor dem Erstarren abgesondertes Wasser aus den Spannkanalöffnungen ggf. herausgedrückt wird und Hohlräume satt ausgefüllt werden. Die in den meisten Ländern als Einpreßhilfen verwendeten Zusatzmittel weisen daher eine treibende (gasbildende) Komponente auf (siehe Abschnitt 2.1.3), die mit Netz- und Dispergiermitteln kombiniert ist. Mit solchen Zusatzmitteln sollte eigentlich erreicht werden, daß, wie in den österreichischen Vorschriften [13] festgelegt, wenigstens bei der Eignungsprüfung keine Volumenverminderung entsteht, sondern eine Volumenvergrößerung [45]. Dadurch wäre ein gewisses Vorhaltemaß gegenüber der Ausführung auf der Baustelle gegeben.

Als treibende Zusätze werden in CRD-C 588-70 [17] und CRD-C 589-70 [18] neben Wasserstoff und Stickstoff freisetzenden Zusatzmitteln („Type A Grouts“) auch metallische Zusatzstoffe, z. B. Eisenpulver mit oxidationsfördernden Bestandteilen („Type M Grouts“), aufgeführt. Bei dieser Mörtelart wird die Volumenvergrößerung bei der Oxidation der metallischen Zuschläge bewirkt. Obwohl beide Mörtelarten in den gleichen Richtlinien aufgeführt werden, ist aus naheliegenden Gründen nicht anzunehmen, daß die Mörtelgruppe M für das Auspressen von Spannkanälen verwendet wird. Dies drückt sich auch in den entsprechenden Beschränkungen der Anwendungsgebiete in der Neufassung CRD-C 588-76, Abschnitt 1.4, aus (siehe Fußnote <sup>1</sup>) in Abschnitt 2).

**Meßverfahren:** (Siehe Tafel 2, Zeile 1). Die Raumänderung eines Einpreßmörtels wird unmittelbar nach dem Mischen des Mörtels an einer in ein Gefäß mit vorgegebenen Abmessungen eingefüllten Probe beurteilt. Dabei wird die Raumänderung der Füllung als Volumenverminderung (Absetzen) oder als Volumenvergrößerung (Quellen) gemessen. Beide Größen ergeben sich als Differenz zwischen dem ursprünglichen Volumen des Mörtels und seinem Volumen nach einer bestimmten Zeit.

Tafel 2 Grenzwerte für die Raumänderung und das Wasserabsondern von Einpreßmörtel in Vol.-%

		Bundesrepublik Deutschland	Deutsche Demokratische Republik	Frankreich	Großbritannien	Japan	Niederlande	Österreich	Schweden	Schweiz	USA
1	Meßverfahren	1) Tiefenmaß + Anschlagplatte 2) Doppelmeßbrücke	Doppelmeßbrücke	Glas-mensur	nicht angegeben	1) Tiefenmaß + Anschlagplatte 2) Glas-mensur	—	nicht angegeben	nicht angegeben	nicht angegeben	1) Mikrometerbrücke + Tiefenmaß 2) Glas-mensur
2	Abmessungen der untersuchten Mörtelsäule [cm]	$\phi = 10$ H = 10	$\phi = 10$ H = 10	—	$\phi = 5-7,5$ H = 25 <sup>1)</sup>	1) $\phi = 10$ H = 10 2) $\phi = 5$ H = 20	—	$\phi = 10$ H = 10	$\phi = 5$ H = 20	$\phi = 10$ H = 10	$\phi = 7,5$ H = 15
3	Verminderung	$\leq 2$	$\leq 3$	—	$\leq 3$ <sup>1)</sup>	0	—	1) Eignungsprüf. = 0 2) Güteprüf. $\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 3$	—
	Volumenvergrößerung	—	—	—	$\leq 10$	$\leq 5$	—	—	$\leq 10$	$\leq 10$	$\geq 0,03$ $\leq 0,4$
4	Abmessungen der untersuchten Mörtelsäule [cm]	$\phi = 10$ H = 10	—	—	$\phi = 10$ <sup>1)</sup> H = 10 <sup>1)</sup>	1) $\phi = 10$ H = 10 2) $\phi = 5$ H = 20	$\phi = 10$ H = 10	—	$\phi = 5$ H = 20	$\phi = 10$ H = 10	$\phi = 4$ H = 50
5	zul. Wasserabsondern nach 3 h	—	—	$\leq 2$ <sup>2)</sup>	$\leq 2$ <sup>4)</sup>	—	$\leq 2$	—	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$
	max.	0 <sup>1)</sup>	—	0 <sup>3)</sup>	$\leq 4$ <sup>4)</sup>	—	$\leq 4$	—	0 <sup>3)</sup>	$\leq 4$	$\leq 4$

1) nach 28 Tagen kein Wasser mehr auf der Mörteloberfläche

2) für hohe vertikale Spanglieder ist ein niedrigerer Wert anzustreben

3) nach 24 h kein Wasser mehr auf der Mörteloberfläche

4) nach [39]

5) nach [48]

In der Bundesrepublik Deutschland wird die Raumänderung im Alter von 24 Stunden mit dem Tiefenmaß und einer Anschlagplatte (6 Meßlöcher) gemessen oder mit dem Verfahren der Doppelmeßbrücke [46]. Dieses Verfahren ist auch in der Deutschen Demokratischen Republik vorgeschrieben. In den USA werden zwei mit Einpreßmörtel gefüllte Zylinder unter eine sogenannte Mikrometerbrücke gestellt und die Raumänderung mit einem Tiefenmikrometer durch eine Lochscheibe mit 4 Meßstellen gemessen. Nach der Nullmessung unmittelbar nach dem Einfüllen wird die Raumänderung 4 Stunden  $\pm$  1 Stunde nach dem Erstarrungsbeginn (ermittelt nach [36]) und im Alter von 3, 7 und 28 Tagen bestimmt.

In Japan wird zur Ermittlung der Raumänderung das Tiefenmaß mit der Anschlagplatte (mit 3 Meßlöchern) angewendet. Außerdem ist in den Vorschriften ein sogenanntes „volumetrisches Verfahren“ angegeben. Hierbei wird der Einpreßmörtel rd. 20 cm hoch in einen weichen Polyäthylenbeutel (Durchmesser rd. 5 cm) eingefüllt, der zur Bestimmung der Raumänderung des Mörtels in eine mit 400 cm<sup>3</sup> Wasser gefüllte Glasmensur eingetaucht wird, bis Wasseroberfläche und Mörteloberfläche in einer Ebene liegen, deren Höhenlage abgelesen wird. Nach 20 Stunden ermittelt man erneut die Höhenlage auf die gleiche Weise und errechnet aus der Differenz der beiden Höhenlagen die Raumänderung.

In den Vorschriften von Österreich, Großbritannien, der Schweiz und Schweden fehlen Angaben über ein Bestimmungsverfahren für die dort jeweils festgelegten Grenzwerte für die Raumänderungen.

Die Mörtelproben, an denen die Raumänderungen bestimmt werden, sind in Volumen und in den Abmessungen sehr unterschiedlich (siehe Tafel 2, Zeile 2). In der Bundesrepublik Deutschland, der Deutschen Demokratischen Republik, Japan, Österreich und der Schweiz füllt der Mörtel zylindrische Formen mit rd. 10 cm Durchmesser und 10 cm Höhe. In den USA haben die Formen einen Durchmesser von 7,5 cm und 15 cm Höhe. In Schweden und in Japan (volumetrisches Verfahren) wird die Raumänderung an Mörtelproben mit 5 cm Durchmesser und 20 cm Höhe und in Großbritannien an Mörtelsäulen mit einem Durchmesser zwischen 5 cm und 7,5 cm und bis zu 30 cm Höhe [39] ermittelt.

Untersuchungen von Albrecht und Schmid [47] haben gezeigt, daß Volumenverminderungen von Durchmesser und Höhe der Mörtelsäule abhängen. Bei zunehmender Füllhöhe wird die Volumenverminderung (Absetzen) in % der Einfüllhöhe zunehmend kleiner erhalten. Daher ist ein Vergleich der verschiedenen Grenzwerte nicht immer ohne weiteres möglich.

**Grenzwerte:** (Siehe Tafel 2, Zeile 3). In der Bundesrepublik Deutschland ist die Volumenverminderung auf 2 % begrenzt. Eine obere Grenze für eine sich ggf. einstellende Volumenvergrößerung ist nicht festgelegt, da durch die Einhaltung der Anforderung an die Druckfestigkeit nur eine begrenzte Volumenvergrößerung möglich ist [45]. In der Deutschen Demokratischen Republik darf die Volumenverminderung nach 24 Stunden 3 % nicht überschreiten. In den USA ist nur eine Volumenvergrößerung zulässig. Sie muß, gemessen nach 28 Tagen, mindestens 0,03 % und darf höchstens 0,4 % betragen. Auch nach den japanischen Vorschriften ist nur

eine Volumenvergrößerung zulässig, die zwischen 0 % und 5 % liegen soll. Großbritannien, die Schweiz und Schweden lassen eine Volumenvergrößerung bis maximal 10 % zu, während die noch zulässige Volumenverminderung in Schweden nach 24 Stunden mit 2 % und in der Schweiz (ohne bestimmte Zeitangabe) mit 3 % begrenzt ist. Für Großbritannien fehlt ein offizieller Grenzwert für die Volumenverminderung. In [48] wird allerdings auch eine untere Grenze hierfür von 3 % angeführt. In Österreich ist eine Begrenzung der Volumenverminderung nach 24 Stunden mit 2 % festgelegt, die jedoch nur für die Güteprüfung gilt. Bei der Eignungsprüfung darf keine Volumenverminderung auftreten.

Die Vorschriften der Niederlande und Frankreichs, aber auch die internationalen Richtlinien (FIP/CEB) enthalten keine derartigen Grenzwerte für Raumänderungen. Dafür wird in Frankreich, ähnlich wie nach den amerikanischen Festlegungen, die Raumverminderung am erhärteten Mörtel nach 28 Tagen gemessen. Die dafür festgelegte Verkürzung darf 2800  $\mu\text{m}/\text{m}$  nicht überschreiten.

Insgesamt gesehen enthalten nicht alle Vorschriften Angaben darüber, nach welchem Verfahren die Raumänderungen zu ermitteln sind, oder Hinweise auf die Möglichkeit von Raumänderungen des Einpreßmörtels überhaupt.

#### 2.3.4 Wasserabsonderung

In fast allen hier betrachteten Vorschriften werden Grenzwerte für das Volumen des abgesonderten Wassers festgelegt (siehe Tafel 2, Zeile 5). Großbritannien, die Niederlande, die Schweiz, die USA und die CEB/FIP-Richtlinien begrenzen das nach 3 Stunden vom frischen Mörtel abgesonderte Wasser auf höchstens 2 Vol.-% und für jeden späteren Zeitpunkt auf höchstens 4 Vol.-%. Für Großbritannien werden die Werte der CEB/FIP-Richtlinien nur nach [39] empfohlen. Noch schärfer sind die Anforderungen der Vorschriften in Frankreich und in Schweden, wo abgesondertes Wasser vom Mörtel nach 24 Stunden wieder aufgesogen sein muß. Diese Forderung wurde auch in die CEB/FIP-Richtlinien aufgenommen. In der Bundesrepublik Deutschland darf auf der Oberfläche spätestens im Alter von 28 Tagen kein abgesondertes Wasser mehr stehen. In den japanischen Vorschriften werden zwar zwei Verfahren zur Bestimmung des abgesonderten Wassers (nach 3 Stunden und nach 20 Stunden) angegeben, zugehörige Grenzwerte jedoch nicht.

In der Regel wird das Wasserabsondern an den Proben ermittelt, die zur Bestimmung der Raumänderung dienen. Abweichend hiervon wird in den USA das Wasserabsondern an Mörtel bestimmt, der in Zylindern von 4 cm Durchmesser und 50 cm Höhe eingefüllt ist, und in Großbritannien an Mörtel in Zylindern von 10 cm Durchmesser und 10 cm Höhe. Dieses Verfahren wird nach [38] nur empfohlen und ist keine Vorschrift. In Frankreich wird ein in [9] nicht näher definierter Meßzylinder verwendet.

#### 2.3.5 Druckfestigkeit

Wie aus Tafel 3 hervorgeht, liegt die geforderte Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen in den hier einbezogenen Vorschriften in einem

Tafel 3 Anforderungen an die Druckfestigkeit von Einpreßmörtel

	Bundesrepublik Deutschland	Deutsche Demokratische Republik	Frankreich	Großbritannien	Japan	Niederlande	Österreich	Schweden	Schweiz	USA
Probekörper	Zylinder	1) Würfel 2) Zylinder	Prismen	Würfel	Zylinder	Würfel	Zylinder	1) Würfel 2) Zylinder	1) Würfel 2) Zylinder	Würfel
Abmessungen (cm)	$\phi = 10$ $H = 8$	1) $a = 10$ 2) $\phi = 10$ $H = 10$	4 x 4 x 16 (Druckfläche 4 x 4)	$a = 10$	1) $\phi = 5^*$ $H = 10^*)$ 2) $\phi = 10$ $H = 10$	$a = 7$	$\phi = 10$ $H = 8$	1) $a = 10$ 2) $\phi = 5$ $H = 10$	1) $a = 7$ $a = 10$ 2) $\phi = H$	$a = 5$
Druckfestigkeit ( $\text{kp/cm}^2$ ) 7 Tage $\geq$ 28 Tage $\geq$	225 <sup>2)</sup>	—	—	170	1) 150 2) 200 <sup>5)</sup>	200 <sup>7)</sup>	225	1) 200 <sup>8)</sup> 2) 160 <sup>8)</sup>	—	siehe Abschnitt 2.3.5
	300 <sup>2)</sup>	300	300 <sup>3)</sup>	—	1) 200 2) 300 <sup>5)</sup>	—	300	1) 300 <sup>8)</sup> 2) 250 <sup>8)</sup>	250	
Entformen vor der Prüfung (Tage)	$\leq 2$	1	—	6	1) $\leq 27^*)$ 2) $\leq 1/2$ h	—	$\leq 3$	—	$\leq 26$	$\leq 1/2$ h
Lagerung vor der Prüfung	Temperatur rd. 19 °C bis 20 °C; in der Regel Feuchtlagerung									

<sup>1)</sup> Da aus älteren Bestimmungen zitiert wird, ist die Druckfestigkeit noch in  $\text{kp/cm}^2$  angegeben

<sup>2)</sup> Einzelwerte  $\beta_7 \geq 200 \text{ kp/cm}^2$ ,  $\beta_{28} \geq 270 \text{ kp/cm}^2$ ; Belastungsgeschwindigkeit =  $5 \text{ kp/cm}^2 \cdot \text{s}$

<sup>3)</sup> Zusätzlich gefordert  $\beta_{BZ28} \geq 40 \text{ kp/cm}^2$

<sup>4)</sup> Auflast je Probe 3,6 kg

<sup>5)</sup> Belastungsgeschwindigkeit 2 bis 3  $\text{kp/cm}^2 \cdot \text{s}$

<sup>6)</sup> Lagerung bis zur Prüfung in Kunststoffolie unter Wasser

<sup>7)</sup> nach [41, 42]  $\beta_7 \geq 250$ ,  $\beta_{28} \geq 300$

<sup>8)</sup> Einzelwert  $\geq 75 \%$

Bereich von etwa 250 kp/cm<sup>2</sup> bis 300 kp/cm<sup>2</sup>, wenn man die für unterschiedliche Prüfkörperabmessungen verlangten Druckfestigkeiten auf Würfel von 7 cm bis 10 cm Kantenlänge oder Zylinder gleichen Durchmessers und gleicher Höhe bezieht. In Frankreich werden Prismen mit den Abmessungen 4 cm x 4 cm x 16 cm benutzt, die ähnlich der Prüfung der Normdruckfestigkeit des Zements an Reststücken der Biegezugfestigkeitsprüfung zwischen zwei Druckplatten (40 mm x 40 mm) abgedrückt werden. Für die Biegezugfestigkeit werden im Alter von 28 Tagen mindestens 40 kp/cm<sup>2</sup> verlangt. Neben der Bestimmung der Druckfestigkeit entsprechend den in der Bundesrepublik Deutschland geltenden Richtlinien ist in Japan auch ein Verfahren zulässig, bei dem Zylinder mit  $\phi = 5$  cm und H = 10 cm geprüft werden. Die Füllung wird dabei mit einer Auflast von 3,6 kg belastet, so daß der Mörtel unter diesem Gewicht erhärtet.

Während in der Bundesrepublik Deutschland, in Japan, Schweden und in den USA sowohl der Nachweis der 7- als auch der 28 Tage-Druckfestigkeit verlangt wird, genügt in der Deutschen Demokratischen Republik, in Frankreich und in der Schweiz der Nachweis der Festigkeit des Einpreßmörtels im Alter von 28 Tagen und in Großbritannien und den Niederlanden der Nachweis nach 7 Tagen. In Österreich kann alternativ die 7- oder die 28 Tage-Festigkeit nachgewiesen werden. In den USA, in denen auch die 3 Tage-Festigkeit zu prüfen ist, sind keine Mindestfestigkeiten vorgeschrieben; vielmehr ist hier nachzuweisen, daß der zum Verpressen verwendete Einpreßmörtel mindestens 80 % der Festigkeiten eines entsprechenden Nullmörtels aufweist, d. h. eines Mörtels, der je nach Typ (A Grout oder M Grout) keine Zusätze (gasbildende Zusatzmittel oder metallische Zusatzstoffe) enthält. Die Druckfestigkeit wird an Würfeln mit 5 cm Kantenlänge ermittelt.

### 2.3.6 Frostwiderstand

Die Notwendigkeit eines Nachweises des Frostwiderstandes von Einpreßmörtel wird in den einzelnen Ländern unterschiedlich bewertet. So wird in den amerikanischen Vorschriften diese Frage nicht berührt. Lediglich in [38] wird empfohlen, den Einfluß niedriger Temperaturen auf Einpreßmörtel durch eine Erhärtungsprüfung an unter Baustellenbedingungen gelagerten Würfeln zu beurteilen. Bei niedrigen Lufttemperaturen ist die Temperatur des Bauteils so lange auf mindestens + 2 °C zu halten, bis entsprechend gelagerte Würfel mit 5 cm Kantenlänge eine Mindestdruckfestigkeit von 50 kp/cm<sup>2</sup> aufweisen. In Österreich wird verlangt, daß für einen Wärmeschutz des Bauteils zu sorgen ist, falls die Lufttemperatur in den ersten 48 Stunden nach dem Auspressen unter + 2 °C fallen könnte. In Großbritannien wird gefordert, daß bei geringeren Lufttemperaturen als + 5 °C nur ausgepreßt werden darf, wenn das entsprechende Bauteil derart vor dem Auskühlen geschützt wird, daß der Einpreßmörtel 48 Stunden lang mindestens eine Temperatur von + 5 °C behält. In Japan muß die Mörteltemperatur vor dem Verpressen zwischen 10 °C und 25 °C liegen und darf nach dem Verpressen mindestens 5 Tage lang nicht unter + 5 °C absinken.

Nach den übrigen hier einbezogenen Vorschriften wird das Verhalten des Einpreßmörtels an besonderen Proben beurteilt. In der

Bundesrepublik Deutschland werden Mörtelzylinder ( $\phi = 5$  cm,  $H = 11$  cm) nach der Herstellung 3 Tage bei  $+ 5$  °C gelagert und danach innerhalb von etwa 4 Stunden auf  $- 20$  °C abgekühlt. Die in ein mit Quecksilber gefülltes Dilatometer eingesetzte Probe darf dabei keine Volumenvergrößerung aufweisen, d. h. das Ausgangsvolumen darf während des Einfriervorgangs nicht überschritten werden. Allgemein ist das Auspressen bei Bauwerkstemperaturen unter  $+ 5$  °C zu unterlassen. In Sonderfällen sind Maßnahmen vorzusehen, um den Einpreßmörtel bis zu 5 Tagen nach dem Auspressen auf mindestens  $+ 5$  °C zu halten. In den Niederlanden wird ein ähnliches Verfahren vorgeschrieben, dessen Forderungen jedoch schärfer sind: Hier werden Proben, die nach dem Herstellen nur 36 Stunden bei  $+ 2$  °C gelagert wurden, in einen auf  $- 20$  °C abgekühlten Frostraum eingelagert und dadurch sehr plötzlich abgekühlt. Dabei darf keine Volumenvergrößerung erfolgen (Meßverfahren nicht erwähnt). Im übrigen darf nur ausgepreßt werden, wenn wenigstens in den folgenden 48 Stunden kein Frost zu erwarten ist bzw. wenn zusätzliche Maßnahmen getroffen sind, daß die Temperatur des Mörtels mindestens 48 Stunden lang nach dem Einpressen nicht unter  $+ 2$  °C absinken kann. In Schweden wird die Erhärtungsdauer festgestellt, nach der keine Volumenvergrößerung mehr auftritt. Stehende Glaszylinder, deren Länge etwa das 30fache des Durchmessers betragen soll, werden mit Einpreßmörtel gefüllt, bei  $+ 5$  °C gelagert und dann auf  $- 10$  °C abgekühlt. Auch hier darf keine Volumenzunahme auftreten.

Bei all diesen Verfahren mit einem einmaligen Durchfrieren in jungem Alter wird im Gegensatz zu den in Frankreich und in der Schweiz angewandten Verfahren (siehe unten) geprüft, ob vom Mörtel keine Volumenvergrößerung zu erwarten ist, wenn er nach mäßigem Erhärten erstmals gefriert. In den französischen vorläufigen Richtlinien wird ein entsprechender Nachweis nicht verlangt und nur darauf hingewiesen, daß bei Betontemperaturen unterhalb von  $+ 5$  °C nur ausgepreßt werden darf, wenn bestimmte Maßnahmen zum Erwärmen des Einpreßmörtels und zum Nachprüfen der Temperatur des Mörtels vorgesehen sind, damit der Einpreßmörtel eine Temperatur über  $0$  °C behält. Doch soll nach [49] für Einpreßmörtel, der bei einer Temperatur unter  $+ 5$  °C verpreßt wird, folgender Frostversuch durchgeführt werden: Prismen mit den Abmessungen 4 cm x 4 cm x 16 cm, die nach der Herstellung 3 Tage bei  $+ 5$  °C gelagert wurden, werden 14 Frosttauwechseln unterworfen, wobei die Prismen 12 Stunden bei  $- 10$  °C eingefroren und anschließend 12 Stunden bei  $+ 5$  °C aufgetaut werden. Danach lagern die Prismen versiegelt in Kunststoffbeuteln bis zum Alter von 28 Tagen bei rd.  $+ 20$  °C. Abschließend wird an den Prismen die Biegezug- und Druckfestigkeit ermittelt.<sup>3)</sup> Aus [49] geht nicht hervor, welche Festigkeiten erreicht werden müssen.

In der Schweizer Baunorm geht man davon aus, daß Einpreßmörtel mit mindestens 3 Vol.-% Luftporen (gemessen am Frischmörtel in

<sup>3)</sup> Dieser Nachweis der Frostbeständigkeit entspricht dem vom Laboratoire Central des Ponts et Chaussées für Einpreßmörtel vorgeschriebenen Prüfverfahren.

einem Luftporenmeßtopf) und einem Wasserzementwert von nicht mehr als 0,40 eine ausreichende „Frostbeständigkeit“ aufweist. Für andere Mörtel ist die Frostbeständigkeit durch „geeignete Prüfung“ nachzuweisen. Diese Prüfung erfolgt nach der z. Z. noch gültigen Richtlinie 5 der SIA-Norm 162 „Frostbeständigkeitsversuche an Betonprobekörpern“ (siehe [16]). Danach werden Prismen oder Zylinder nach einer bestimmten Vorlagerung im Alter von 42 Tagen bzw. von 90 Tagen je nach Probekörperabmessung Frosttauwechseln ausgesetzt, wobei in Luft bei  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingefroren und in Wasser bei  $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$  aufgetaut wird. Die Abkühlzeit von  $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt 30 Minuten. Die Proben bleiben 4 Stunden eingefroren, werden dann innerhalb von 60 Minuten aufgetaut und 2,5 Stunden im Wasser belassen. Jeweils nach einer bestimmten Anzahl von Frosttauwechseln werden der Elastizitätsmodul, in der Regel durch Tensometermessung, und die Ribbildung beurteilt. Bei Zerstörung der Probe oder bei Verminderung des Elastizitätsmoduls auf weniger als 50 % einer wassergelagerten Vergleichsprobe wird der Versuch abgebrochen. Maßgebend für die Beurteilung der Frostbeständigkeit ist die Anzahl der Frosttauwechsel bis zum Abbruch des Versuchs, wobei die Proben zur Frostbeständigkeit mindestens 200 Frosttauwechseln standhalten müssen.

Nach der Einpreßmörtelnorm TGL 32321/01 wird bei bestehender Frostgefährdung eine Erhärtungsprüfung durchgeführt, wobei  $150\text{ kp/cm}^2$  als „frostsichere Festigkeit“ angesehen werden.

### 2.3.7 Sonstige Anforderungen

In Frankreich wird auch die „kapillare Wasseraufnahme“ von Einpreßmörtel bestimmt. Hierdurch soll nachgewiesen werden, daß der Mörtel ausreichend dicht ist, um den Spannstahl gegen das Eindringen angreifenden Wassers zu schützen. Prismen  $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ , die bis zum Alter von 28 Tagen bei  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und 50 % rel. Luftfeuchte lagern, werden anschließend auf ein wassergesättigtes Sandbett gelegt. Die aufgenommene Wassermenge in  $\text{g/cm}^2$  Fläche wird nach 1, 2 und 7 Tagen bestimmt. Sie liegt in der Regel für 28 Tage alten Mörtel nach einer Versuchsdauer von 14 Tagen unter  $1\text{ g/cm}^2$ .

## 3. Prüfung und Überwachung

Für das zuverlässige Einhalten der Eigenschaften von Einpreßmörtel sind nicht nur Anforderungen und Prüfverfahren von Bedeutung, sondern auch der Prüfumfang bzw. die Überwachung. Eignungsprüfungen, d. h. Prüfungen, die zur Beurteilung eines in Aussicht genommenen Mörtels hinsichtlich der Eignung der Ausgangsstoffe und Erreichen der erforderlichen Eigenschaften rechtzeitig vor dem Auspressen durchgeführt werden, sind in allen Vorschriften außer denen von Großbritannien vorgesehen, auch in dem z. Z. erarbeiteten internationalen System einheitlicher Baubestimmungen [20]. Güteprüfungen zum Nachweis der Eigenschaften des Einpreßmörtels während der Bauausführung werden ebenfalls in den meisten Vorschriften verlangt, wobei in der kalten

Jahreszeit auch die dann herrschenden Temperaturen bei Herstellung und Lagerung zu berücksichtigen sind (Erhärtungsprüfung). In der Regel wird die Güteprüfung unter den gleichen Bedingungen wie die Eignungsprüfung zum Nachweis der Eigenschaften durchgeführt. Keine Güteprüfungen werden in den englischen, den niederländischen und den amerikanischen Vorschriften sowie in dem Entwurf des CEB-Model Code [20] gefordert. Als zusätzliche Prüfungen werden in Frankreich eine Qualitätskontrolle und in der Deutschen Demokratischen Republik eine Verarbeitungsprüfung (Bestimmung der Auslaufzeit) verlangt.

#### **4. Orientierende Feststellungen zur Prüfung nach den Richtlinien der Bundesrepublik Deutschland**

Durch einige Feststellungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf wurden zu den Prüfverfahren, wie sie in den Richtlinien der Bundesrepublik Deutschland beschrieben sind, einige Untersuchungen durchgeführt. Sie befaßten sich mit Einflüssen auf die Raumänderung und auf die Druckfestigkeit, mit den Porenkennwerten des erhärteten Mörtels sowie mit der Auswirkung von zwei verschiedenen Laboratoriumsmischern auf diese Eigenschaften.

##### **4.1 Herstellen des Mörtels**

Der Mörtel wurde in zwei verschiedenen Mischern M 1 und M 2 je 4 Minuten lang gemischt. Jede Füllung bestand aus 17 kg PZ 350 F und 6,035 kg Wasser mit je 1 % einer Einpreßhilfe (170 g). Der Wasserzementwert betrug somit 0,355. Zuerst wurde das Wasser in der Mischtrommel mit dem Zement während 2 Minuten vorgemischt, anschließend die pulverförmige Einpreßhilfe zugegeben und dann alle Ausgangsstoffe bei höherer Umdrehungszahl weitere 2 Minuten gemischt. Der Mischer M 1 war ein Mischer mit waagrecht liegender Trommel ( $\varnothing$  29,5 cm, Länge 29 cm, Nutzinhalt rd. 12 l). Die feststehende Mischtrommel besaß keine Einbauten oder Mischwerkzeuge; die sich drehende horizontale Welle wies drei Mischschaufeln auf. Sie wurde während des Vormischens mit rd. 200 und danach mit rd. 300 Umdrehungen pro Minute betrieben. Der Mischer M 2 hatte einen senkrechtstehenden Mischkübel (Höhe rd. 40 cm, Nutzinhalt rd. 40 l). Bei sich drehendem Kübel (4,5 bzw. 9 U/min) bewegten sich zwei mittig von oben in den Kübel eintauchende spiralförmig ineinandergreifende Mischwerkzeuge (114 bzw. 228 U/min) gegenläufig.

##### **4.2 Messen der Raumänderungen**

Als erstes Verfahren findet sich in den Richtlinien das Messen der Höhenlage mit einem Tiefenmaß und einer Anschlagplatte. Hierbei wird in den mit Mörtel rd. 100 mm hoch gefüllten Dosen mit dem Tiefenmaß die Höhe der Füllung an verschiedenen Stellen unmittelbar nach dem Einfüllen und nach etwa 24 Stunden bestimmt. Von einer Beschreibung des Tiefenmaßes wurde in den Richtlinien [6] abgesehen. In [24] wird auf zwei Veröffentlichungen von K. Walz [5, 50] hingewiesen, in denen sowohl das Verfahren als auch die

Geräte beschrieben sind. Gewöhnlich hat dabei der von der Anschlagplatte auf die Mörteloberfläche abgesenkte Taststab keine selbständige Arretierung [51, Bild 6]. Die jeweilige Höhenlage wird an der mm-Teilung des Taststabes über einen Nonius abgelesen. Zur Erleichterung der Beobachtung der Spitze des Tiefenmaßes sind Schaulöcher in der Anschlagplatte angeordnet. Später wurde auch eine Mikrometerschraube benutzt, die zur Messung in die Anschlagplatte eingeschraubt wird (Bild 2a) oder ein Taststab mit Meßwertarretierung<sup>4)</sup> (Bild 2b), der auf die Anschlagplatte lose aufgesetzt und gegen eine Feder abgesenkt wird.

Bei den drei obengenannten Geräten muß die Berührung der Taststabspitze mit der Oberfläche der Füllung durch Schaulöcher bestimmt werden. Es hat sich gezeigt, daß diese Beobachtung nicht immer einfach und eindeutig ist. Dabei ist zu beachten, daß 1 mm Höhe des Doseninhalts bei einer Füllhöhe von rd. 100 mm bereits 1 Vol.-% entspricht. Eine Weiterentwicklung ist ein Gerät mit elektrischer Kontaktanzeige, die obengenannte Nachteile vermeidet. Zur Messung steht die Dose auf einer Metallplatte mit einem Mikroamperemeter. Eine handelsübliche Mikrometerschraube mit digitaler Ablesevorrichtung und angesetzter Tastspitze (Bild 2c) wird in die Anschlagplatte eingeschraubt. Mit einer Klemmverbindung wird der Kontakt der Mikrometerschraube über das Mikroampere-meter mit der Metallplatte hergestellt (Bild 3). Durch Herunterdrehen der Tastspitze wird bei Berührung mit der Oberfläche der Mörtelfüllung der Stromkreis geschlossen. Dies wird durch einen Ausschlag des Zeigers am Mikroamperemeter angezeigt (die Speisespannung wird von zwei im Amperemeter eingesetzten 1,5-Volt-Monozellen erzeugt). Der Meßwert dieser Nullmessung wird digital an der Mikrometerschraube in mm (= Vol.-% bei 100 mm Füllhöhe) angezeigt.

Ablesungen finden in gleicher Weise unmittelbar nach der Dosenfüllung (Nullmessung) und nach 24 Stunden statt. Auch der Kontakt des Taststabes mit einer abgetrockneten Mörteloberfläche wird durch einen eindeutigen Ausschlag am Mikroamperemeter angezeigt.

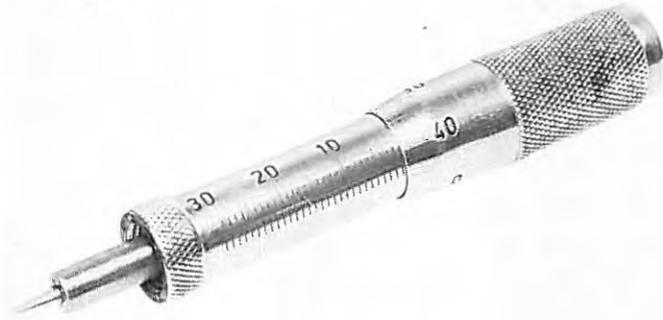
Mit diesem Verfahren ist es möglich, auch die nach den Richtlinien [6] im Anhang, Abschnitt 1.3 und Abschnitt 1.4, zu messende Dicke der u. U. nach 24 Stunden noch auf dem Mörtel stehenden Wasserschicht zu messen, was bisher bei dünnen Wasserschichten nicht einfach war.

Vergleichsmessungen mit 5 Versuchspersonen an mit Glycerin gefüllten Dosen ergaben sowohl mit dem einfachen Tiefenmaß gemäß Bild 2a als auch mit dem Tiefenmaß nach Bild 2c gleiche Streuungen, jedoch war mit letzterem ein geringerer zeitlicher Aufwand und eine erleichterte Meßwertablesung verbunden.

Bei Verwendung des Gerätes nach Bild 3 wurde bei Versuchen mit mehreren Zementleimen eine geringere Volumenverminderung bzw. eine geringfügig größere Volumenvermehrung ermittelt (etwa zwischen 0,2 und 0,3 % gegenüber der Messung mit dem einfachen

<sup>4)</sup> Chemisches Laboratorium für die Tonindustrie, Kopenhagener Straße 60-74c, 1000 Berlin 51

a



b



c



Bild 2 Tiefenmaße zur Ermittlung der Raumänderung bei Einpreßmörtel



Bild 3 Elektrische Meßvorrichtung zum Bestimmen der Raumänderung bei Einpreßmörtel

Tiefenmaß und Beurteilung der Berührung durch die Schaulöcher). Dies ist vermutlich auf empfindlicheres Ansprechen der Anzeige bei einer Berührung des Taststabes mit der Oberfläche der Mörtelfüllung zurückzuführen.

Als zweites Verfahren wird in den Richtlinien das Verfahren mit der sog. „Doppelmeßbrücke“ aufgeführt. Eine Beschreibung dieses Verfahrens fehlt. Über die Ermittlung der Raumänderung nach diesem Verfahren wird in [30, Seite 88 ff.] und [46] berichtet. Hierbei wird auf die Mörteloberfläche in der Regel 24 Stunden nach dem Einfüllen bis zu einer bestimmten Meßmarke Wasser aufgefüllt und aus dem Volumen des aufgegossenen Wassers die Raumänderung bestimmt.

Im ganzen gesehen erhebt sich die Frage, ob es sich lohnt, besonders ausgeklügelten Meßverfahren nachzugehen, wenn man in

Zukunft auch bei uns verlangen würde, daß Einpreßmörtel bei der Eignungsprüfung stets eine mäßige Volumenvergrößerung ohne Wasserabsondern aufweisen müssen. Man sollte annehmen, daß dies heute mit stabilisierenden und gleichzeitig gasbildenden Zusatzmitteln erreichbar ist.

### 4.3 Einflüsse auf die Raumänderung

Schon bei früheren Untersuchungen wurde dem Einfluß der Dosenabmessungen [47], der Temperatur [47, 52] und des Dosenverschlusses [53] nachgegangen. Nachstehend wird über weitere Versuche berichtet.

Einpreßmörtel gleicher Zusammensetzung wurde in zwei Labormischern hergestellt und die gefüllten Dosen unterschiedlich behandelt. Die Dosen wurden bis 20 mm unter dem Dosenrand gefüllt und wie folgt verschlossen:

- a) mit aufgespannter dehnbare Kunststoffolie,
- b) den Richtlinien entsprechend mit dem luftdicht aufliegenden Deckel und Spannring,
- c) wie b), jedoch war auf der Mörteloberfläche eine etwa 10 mm dicke Kunststoffscheibe festgehalten, so daß eine Volumenvergrößerung nicht stattfinden konnte.

Einige der unterschiedlich verschlossenen Dosen wurden 3 Stunden nach dem Einfüllen hintereinander von Hand hochgehoben und an anderen Stellen abgesetzt, wie das möglicherweise auch bei Prüfungen geschehen kann. Damit sollte ermittelt werden, ob ein Bewegen der Dosen die Prüfergebnisse beeinflusst. Die Raumänderungen nach 24 Stunden sind in den Zeilen 1 und 8 der Tafel 4 zusammengestellt. Danach fand sich ohne Umsetzen der Dosen im Mittel für die Mörtel aus beiden Mischern folgendes:

In den Dosen nach b), bei denen durch Gasentwicklung ein Überdruck entstand, ergab sich eine Volumenvergrößerung von 0,6 %, in den Dosen nach a), bei denen kein Überdruck wirken konnte, eine Volumenvergrößerung von 1,1 % und in den Dosen nach c) mit verminderter Ausdehnung des Mörtels keine Raumänderung. Auch bei den Versuchen in [47] wurde gefunden, daß mit steigendem Überdruck die durch Gasentwicklung erzeugte Volumenvergrößerung abnimmt.

Noch größer ist der Unterschied bei den umgesetzten Dosen. Hier entstand in den Dosen nach a) eine Volumenvergrößerung von 0,2 %, in den Dosen nach b) eine Volumenverminderung von 1,6 % und in den Dosen nach c) wiederum keine Raumänderung.

Vergleicht man die Raumänderungen in den umgesetzten Dosen mit denen in den ruhig gelagerten Dosen, so zeigt sich allgemein, daß durch das Umsetzen der Dosen, das mit schwachen Erschütterungen verbunden ist, eine Volumenverminderung des Mörtels stattgefunden hat: Bei a) von + 1,1 % auf + 0,2 %, bei b) von + 0,6 % auf - 1,6 % und bei c) trat wiederum keine Raumänderung ein, weil der Gasüberdruck in dem Mörtel erhalten blieb. In diesen Dosen, in denen keine Volumenvergrößerung stattfand, war entgegen den Feststellungen in [47] auch 7 Tage nach dem Einfüllen keine Volumenverminderung erkennbar.

Tafel 4. Einfluß des Mixers, der Dosenabdeckung und von Erschütterungen auf die Raumänderung, die Rohdichte  $\rho$ , die Druckfestigkeit  $\beta_c$  und die Luftporenkennwerte eines in zwei verschiedenen Mixern M 1 und M 2 hergestellten Einpreßmörtels

Mischer			Dosenfüllung abgedeckt mit					
			a) Folie		b) Deckel		c) aufliegender Scheibe	
			ohne Umsetzen	mit	ohne Umsetzen	mit	ohne Umsetzen	mit
M 1	Raumänderung	Vol.-%	+ 1,26	+ 0,16	+ 0,72	- 1,28	~ 0	~ 0
	$\rho_7$	kg/dm <sup>3</sup>	1,98	1,98	1,99	2,01	1,99	2,00
	$\beta_{C7}$	kp/cm <sup>2</sup>	356	419	381	476	468	441
	$\rho_{28}$	kg/dm <sup>3</sup>	1,97	1,96	1,97	2,00	1,98	1,98
	$\beta_{C28}$	kp/cm <sup>2</sup>	436	490	428	533	520	516
	Luftporengehalt <sup>1)</sup>	Vol.-%	3,3	—	3,6	—	2,9	—
	Abstandsfaktor <sup>1)</sup>	mm	0,41	—	0,48	—	0,45	—
M 2	Raumänderung	Vol.-%	+ 0,88	+ 0,32	+ 0,56	- 1,91	~ 0	~ 0
	$\rho_7$	kg/dm <sup>3</sup>	1,98	2,00	1,99	2,01	2,00	2,01
	$\beta_{C7}$	kp/cm <sup>2</sup>	362	452	382	503	456	461
	$\rho_{28}$	kg/dm <sup>3</sup>	1,98	2,02	2,00	2,01	2,00	2,00
	$\beta_{C28}$	kp/cm <sup>2</sup>	443	559	520	585	574	535
	Luftporengehalt <sup>1)</sup>	Vol.-%	3,3	—	3,0	—	3,4	—
	Abstandsfaktor <sup>1)</sup>	mm	0,40	—	0,41	—	0,33	—

<sup>1)</sup> Bei der Bestimmung der Luftporenkennwerte wurden nur kugelige Poren berücksichtigt

#### 4.4 Einflüsse auf die Druckfestigkeit

Die abschließend an den Mörteln nach 7 und 28 Tagen ermittelten Rohdichten und Druckfestigkeiten lassen zusammenfassend erkennen: Die Rohdichte des Mörtels in den umgesetzten Dosen wurde z. T. etwas größer erhalten als in den Dosen, die nicht umgesetzt wurden. Die Druckfestigkeit als Mittelwert aus M 1 und M 2 sowie aus nicht umgesetzten und umgesetzten Dosen war in den Dosen nach b) nach 7 Tagen um rd. 10 % und nach 28 Tagen um rd. 7 % größer als in den Dosen nach a) und die in den Dosen nach c) entsprechend um 15 % nach 7 Tagen bzw. 11 % nach 28 Tagen höher als die mittlere Druckfestigkeit in den Dosen nach a). Dies ist offenbar darauf zurückzuführen, daß der Mörtel in den Dosen nach b) und c) während des Erstarrens unter einem von der Gasentwicklung herrührenden Überdruck stand, wobei der Überdruck in den Dosen nach c) höher war als der in den Dosen nach b).

Durch das Umsetzen der Dosen wurde die Druckfestigkeit des Mörtels gemittelt aus den Festigkeiten der Mörtel nach a) und b) und aus den Mischern M 1 und M 2 nach 7 Tagen bzw. nach 28 Tagen um rd. 25 % bzw. um rd. 19 % gegenüber den nicht umgesetzten Dosen erhöht. Ein entsprechender Einfluß war bei den Festigkeiten des Mörtels nach c) nicht erkennbar.

#### 4.5 Einfluß des Mischers

Vergleicht man die unter sonst gleichen Verhältnissen mit den Mörteln aus Mischer M 1 und M 2 erhaltenen Feststellungen, so erhält man für die Doseninhalte gemittelt aus a) und b)

die Raumänderung mit Mischer M 1 zu + 0,22 Vol.-%,  
mit Mischer M 2 zu - 0,04 Vol.-%,

gemittelt aus a), b) und c)

die Rohdichte  $\rho_{28}$  mit Mischer M 1 zu 1,97 kg/dm<sup>3</sup>,  
mit Mischer M 2 zu 2,00 kg/dm<sup>3</sup>,

die Druckfestigkeit  $\beta_{C28}$  mit Mischer M 1 zu 487 kp/cm<sup>2</sup>,  
mit Mischer M 2 zu 536 kp/cm<sup>2</sup>.

Daraus geht hervor, daß der Mörtel aus Mischer M 1 eine etwas deutlichere Volumenvergrößerung erlangte und entsprechend damit eine etwas kleinere Rohdichte und Druckfestigkeit als der Mörtel aus Mischer M 2. Es erscheint möglich, daß die geringere Volumenvergrößerung des Mörtels aus Mischer M 2 dadurch entstanden sein kann, daß durch dessen intensivere Mischwirkung die Einpreßhilfe rascher reagierte und Treibgas bereits im Mischer aus dem Mörtel mehr oder weniger entwichen ist.

#### 4.6 Luftporenkennwerte

Zur Beurteilung des Frostwiderstandes von wassergesättigtem Beton wird den Luftporenkennwerten, insbesondere dem sog. Abstands faktor, unter sonst gleichen Verhältnissen eine ausschlaggebende Bedeutung beigemessen.

Im Hinblick auf den Frostwiderstand von Einpreßmörtel wurden daher vergleichsweise auch dessen Luftporenkennwerte gemessen. Die Messungen wurden nach dem üblichen, mechanisierten Auszählverfahren [54] an Schnittflächen durch die Mörtel aus je einer nicht bewegten Dose nach a), b) und c) vorgenommen. Je Zylinder wurden zwei Schnittflächen ausgemessen, die gleichlaufend zur Achse des Zylinders lagen und Abmessungen von rd. 95/100 mm hatten. Insgesamt wurden 12 Flächen ausgemessen.

Soweit für die Folgerungen von Bedeutung, unterschieden sich die Meßwerte nicht wesentlich, so daß für die Mörtel nach a), b) und c) sowie für Mörtel aus den Mischern M 1 und M 2 ein gemeinsames Mittel gebildet werden kann. Demnach erhält man als Luftporengehalt 3,3 Vol.-% und als Abstandsfaktor 0,41 mm.

Daraus geht hervor, daß durch die Einpreßhilfe größere Luftporen und vor allem ein wesentlich geringeres Gesamtluftporenvolumen im erhärteten Einpreßmörtel (Zementstein) entstanden als durch übliche LP-Zusatzmittel [55] im Zementstein eines LP-Betons.

## 5. Zusammenfassung

5.1 Ein Vergleich der Bestimmungen für die Herstellung, Verarbeitung und Prüfung von Einpreßmörtel in der Bundesrepublik Deutschland, in der Deutschen Demokratischen Republik, in Frankreich, Großbritannien, Japan, den Niederlanden, Österreich, Schweden, der Schweiz und den USA zeigt, daß die Anforderungen an die Herstellung und die Eigenschaften des frischen und erhärteten Einpreßmörtels unterschiedlich sind.

Im allgemeinen wird zur *Herstellung* des Einpreßmörtels Portlandzement verwendet. Ist dies nicht zwingend vorgeschrieben, so wird es zumindest empfohlen und bei Verwendung anderer Zemente eine gesonderte Eignungsprüfung verlangt. Treibende Einpreßhilfen, in der Regel auf der Basis von Aluminiumpulver, sind überall zulässig. Die Zugabe von Zuschlag mit einem Größtkorn unter 8 mm (z. B. Quarzsand, Kalksteinmehl, Traß oder auch Flugasche) zum Einpreßmörtel ist außer in der Bundesrepublik Deutschland, der Deutschen Demokratischen Republik und Österreich unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Der Wasserzementwert ist nicht überall zahlenmäßig begrenzt. Häufig wird nur gefordert „so niedrig wie möglich“, insbesondere dort, wo Zuschlag zugegeben werden darf.

Die Werte für die größtzulässigen Wasserzementwerte reichen von 0,38 bis 0,45.

5.2 In den meisten Bestimmungen außer in denen der Deutschen Demokratischen Republik und denen der USA fehlen Angaben über das sowohl auf der Baustelle als auch bei der Eignungsprüfung zu verwendende *Mischgerät*. Als geeignete Mischer werden zum einen Quirlmischer mit bis zu 4000 U/min, zum anderen Labormischer mit etwa 300 U/min empfohlen. Da außerdem auch das Fassungsvermögen der Mischer unterschiedlich ist und die Mischzeiten mit zwischen mindestens 1 Minute und höchstens 8 Minuten angegeben werden, erschwert dies zusätzlich den Vergleich der Eigenschaften des Einpreßmörtels.

5.3 Das *Fließvermögen* wird in 6 Ländern mit trichterähnlichen Geräten als Auslaufzeit des Mörtels bestimmt, die je nach Gerät zwischen 6 Sekunden und 30 Sekunden liegen kann. In der Bundesrepublik Deutschland, in Österreich und auch in Japan wird der Eintauchversuch benutzt und eine Tauchzeit von mindestens 30 Sekunden verlangt. In den Niederlanden ist eine bestimmte Viskosität in Centipoise (cP) einzuhalten; in England wird das Fließvermögen nicht geprüft.

Ein Nachweis zur Sicherung gegen zu frühes Versteifen entsprechend den Richtlinien in der Bundesrepublik Deutschland wird nur noch in Österreich verlangt.

5.4 In fast allen Vorschriften außer denen von Frankreich und den Niederlanden sind Grenzwerte für die *Raumänderung* (Volumenverminderung und zum Teil auch für die Volumenvergrößerung) angegeben. In einigen Fällen sind anstelle von Grenzen für die Raumänderung oder zusätzlich hierzu Grenzwerte für abgesonder-tes Wasser festgelegt. In der Regel ist eine gewisse Volumenverminderung zulässig. Sie liegt zwischen 3 Vol.-% und 2 Vol.-%. Japan und die USA lassen keine Volumenverminderung zu. In Österreich ist bei der Eignungsprüfung keine, bei der Güteprüfung jedoch eine Volumenverminderung bis zu 2 % erlaubt. Soweit Grenzwerte für die Volumenvergrößerung angegeben sind, reichen sie von 0,4 Vol.-% bis 10 Vol.-%. Nach den Bestimmungen, in denen abgesonder-tes Wasser angesprochen wird, darf nach 28 Tagen allgemein kein Wasser mehr auf der Mörteloberfläche stehen.

5.5 Der Nachweis der *Druckfestigkeit* von Einpreßmörtel wird in der überwiegenden Anzahl der Vorschriften sowohl im Alter von 7 Tagen als auch nach 28 Tagen gefordert. Dazu dienen Würfel mit 5 cm, 7 cm und 10 cm Kantenlänge, liegende Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm<sup>5)</sup> und Zylinder mit 5 cm bis 10 cm Durchmesser bei gleicher oder größerer Höhe. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Gestalt und Abmessung ergeben sich, bezogen auf Probekörper von rd. 10 cm Höhe und 10 cm Breite bzw. Durchmesser, für das Alter von 28 Tagen Druckfestigkeiten von 250 kp/cm<sup>2</sup> bis 300 kp/cm<sup>2</sup>.

5.6 Ein Nachweis für den *Frostwiderstand* des Einpreßmörtels wird nur in einigen Vorschriften verlangt. Dieser bezieht sich entweder auf das Verhalten des jungen Mörtels bei einmaligem Gefrieren oder auf das von älterem Mörtel bei wiederholten Frosttauwechseln. Wesentlicher erscheint die im allgemeinen aufgestellte Forderung, daß bei niederen Lufttemperaturen unter + 5 °C bzw. + 2 °C der Mörtel im Spannkanal 48 Stunden lang bzw. bis zu 5 Tagen nicht unter + 5 °C abkühlen darf.

5.7 Bei einigen orientierenden Versuchen mit Verfahren nach den Richtlinien der Bundesrepublik Deutschland fand sich ein Einfluß der Mischintensität, des Dosenverschlusses und der Lagerung der Dosen auf die Raumänderung und die Druckfestigkeit des Mörtels. Bei dichtem Dosenverschluß und bei behinderter Volumenvergrößerung des Einpreßmörtels wurde im allgemeinen eine höhere Druckfestigkeit festgestellt. Ein Umsetzen der Dosen mit dem frischen Einpreßmörtel hatte eine Volumenverminderung der Fül-

<sup>5)</sup> Druckfläche 4 cm x 4 cm

lung zur Folge und dadurch bedingt eine mittlere Zunahme der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen von rd. 19 %. Für den Einpreßmörtel wurden nach dem für Beton üblichen Verfahren die Luftporenkennwerte (Luftporenvolumen und Abstandsfaktor) ermittelt. Sie lassen erkennen, daß mit der Einpreßhilfe größere Luftporen und vor allem ein wesentlich geringeres Gesamtluftporenvolumen entstanden als im Zementstein eines LP-Betons bei Verwendung eines LP-Zusatzmittels.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Gerwick, B. C.: Construction of prestressed concrete structures. Wiley-Verlag, Interscience, New York 1971, Kapitel 5, S. 106/114.
- [2] Scotto, F.: Corrosion problems of the prestressing cable steel for nuclear pressure vessels: Its protection and its preservation. ACI Special Publication SP-34, Concrete for nuclear reactors, Vol. III, S. 1265/1284.
- [3] BS 4975:1973: Specification for prestressed concrete pressure vessels for nuclear reactors.
- [4] Kongreßbericht des 5. Kongresses der Fédération Internationale de la Précontrainte (Paris 1966). FIP, London 1968.
- [5] Walz, K.: Anforderungen an Einpreßmörtel für Spannbetonglieder und Prüfung der Eigenschaften. Bau und Bauindustrie 8 (1955) H. 16, S. 486/489.
- [6] Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkannäle, Fassung Juni 1973. Sonderheft des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Beuth-Vertrieb, Berlin-Köln-Frankfurt 1973, S. 29/36.
- [7] TGL 32321/01: Betonbau – Herstellung der Spannbewehrung – Auspressen der Spannkannäle; Fassung Januar 1975.
- [8] Groke, D., und P. Hemm: Probleme der Herstellung von Einpreßmörtel für Spannbetonbauteile. Bauplanung – Bautechnik 30 (1976) H. 1, S. 37/39 und S. 43.
- [9] Directive provisoire sur les injections des gaines des ouvrages en béton précontraint. Ministère de l'aménagement du territoire, de l'équipement, du logement et du tourisme, Paris März 1973.
- [10] CP 110:1972: Code of practice for the structural use of concrete, Part 1, Kap. 6.12, S. 114/115.
- [11] Prestressed concrete grouting standard – Prestressed concrete grouting testing methods. Japan Society of Civil Engineers (JSCE) August 1961.
- [12] Voorschriften Beton VB 1974, Deel F: Voorgespannen Beton, aanvullende bepalingen; Verbesserte Entwurf Sept. 1975, Art. F-822.
- [13] ÖNORM B 4250: Spannbetontragwerke, Berechnung und Ausführung, Ausgabe Juni 1974.
- [14] Svensk Byggnorm – Supplement 25: 2. Spaennbetongnormen Statens Planverk 1969.
- [15] Bronormer, TB 103. Statens Vaegverk 1976-09.
- [16] SIA-Norm 162: Norm für die Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Bauwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Richtlinie Nr. 22: Injektion von Spannkabeln. Ausgabe 1968.

- [17] CRD-C 588-70: Specification for expansive grouts, Ausgabe März 1970. Handbook for Concrete and Cement. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg.
- [18] CRD-C 589-70: Methods of sampling and testing expansive grouts, Ausgabe März 1970. Handbook for Concrete and Cement. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg.
- [19] CEB/FIP: Internationale Richtlinien zur Berechnung und Ausführung von Betonbauwerken, 2. Auflage, Cement and Concrete Association, London 1970, S. 91/92.
- [20] CEB: Bulletin d'information No. 117-D. Internationales System einheitlicher Baubestimmungen, Bd. II, Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton. 3. Entwurf Fassung Dez. 1976 Paris, Abschnitt 22.6.3.3.
- [21] Norme technique per l'impiego delle strutture in cemento armato pre-compresso. Ministero du Lavori Pubblici. Servizio Technico Centrale 1970.
- [22] Hughes, B. P., und C. J. Middleton: High strength cement grouts. Concrete (1975) H. 10, S. 31/32.
- [23] Vorläufige Richtlinien für das Auspressen von Spanngliedern mit Zementmörtel, Fassung Nov. 1955. Beton- und Stahlbetonbau 51 (1956) H. 9, S. 215/216.
- [24] Vorläufige Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkä-näle, Fassung Juli 1957. Beton- und Stahlbetonbau 52 (1957) H. 12, S. 292/294.
- [25] Korrosionsschutz bei Spannbeton- und Stahlbetonbauten. Erlaß des Ministers für Landesplanung, Wohnungsbau und öffentliche Arbeiten des Landes NRW vom 16. 7. 1963 (Az II B 2 – 2.750 Nr. 1675/63),
- [26] ZTV-K 76: Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten, Ausgabe 1976. Hrsg.: Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau, Abt. Wasserstraßen; Deutsche Bundesbahn. Verkehrsblatt-Verlag Dortmund 1976, S. 24.
- [27] Richtlinien für Bemessung und Ausführung von Spannbetonbauteilen, Fassung Juni 1973, Sonderheft des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Beuth-Vertrieb, Berlin-Köln-Frankfurt 1973, S. 5/27.
- [28] Groke, D., und P. Hemm: Neues Zusatzmittel für Einpreßmörtel. Bauplanung – Bautechnik 27 (1973) H. 10, S. 505/506.
- [29] Groke, D., und P. Hemm: Baustellenversuche mit einem neuen Zusatzmittel für Einpreßmörtel. Bauplanung – Bautechnik 28 (1974) H. 3, S. 150/151.
- [30] Benz, G.: Einpreßmörtel. Chemische Fabrik Grünau GmbH, Illertissen 1975, S. 64 ff.
- [31] Wern, A. H., M. Schupack und W. Larson: Prestressing system for H. B. Robinson nuclear plant. Journal of the power division, Proc. Amer. Soc. Civil Eng. (ASCE) März 1971, S. 539/566.
- [32] CRD-C 566-64: Specifications for grout fluidifier, Ausgabe Dezember 1964. Handbook for Concrete and Cement. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg.
- [33] CRD-C 79-58: Method of test for flow of grout mixtures, Ausgabe September 1958. Handbook for Concrete and Cement. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg.
- [34] CRD-C 80-64: Method of test for water retentivity of grout mixtures, Ausgabe Dezember 1964. Handbook for Concrete and Cement. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg.
- [35] CRD-C 81-74: Method of test for expansion of grout mixtures, Ausgabe Juni 1974. Handbook for Concrete and Cement. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg.
- [36] CRD-C 82-76: Method of test for time of setting of grout mixtures, Ausgabe Dezember 1976. Handbook for Concrete and Cement. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg.

- [37] CRD-C 88-64: Method of test for compressive strength of grout fluidifier test mortars, Ausgabe Dezember 1964. Handbook for Concrete and Cement. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg.
- [38] Recommended practice for grouting of post-tensioned prestressed concrete. Journal of the Prestressed Concrete Institute (PCI) 17 (1972) Nr. 6, S. 18/25.
- [39] Notes on the preparation and grouting of ducts in prestressed concrete members. Cement and Concrete Association, London 1971 — Advisory Note.
- [40] Albrecht, W.: Versuche mit Sondermischern für Einpreßmörtel. Beton- und Stahlbetonbau 55 (1960) H. 11, S. 248/252.
- [41] Onderzoek voor injectieproblemen bij voorgespannen beton. CUR-Rapport Nr. 27, 1963.
- [42] Injecteren van verticale spankanalen. CUR-Rapport Nr. 51, 1971.
- [43] Rendchen, K.: Einfluß verschiedener Zemente auf das Fließverhalten und die Stabilität von Zementsuspensionen. beton 26 (1976) H. 9, S. 321/325; ebenso Betontechnische Berichte 1976, Beton-Verlag, Düsseldorf 1977, S. 123/133.
- [44] Albrecht, W.: Über die Raumänderung des Einpreßmörtels. Beton- und Stahlbetonbau 52 (1957) H. 12, S. 302/306.
- [45] Röhnisch, A.: Erläuterungen zu den Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkanäle (Fassung Juni 1973). Beton- und Stahlbetonbau 71 (1976) H. 11, S. 275/279.
- [46] Schmid, H.: Vereinfachtes Verfahren zur Messung der Raumänderung von Einpreßmörtel. Beton- und Stahlbetonbau 54 (1959) H. 7, S. 177/178.
- [47] Albrecht, W., und H. Schmid: Einpreßmörtel für Spannbeton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 142, Berlin 1960.
- [48] Johansen, R.: Grouting of post-tensioned prestressed concrete members. RILEM-Bulletin, Neue Serie Nr. 13 (1961), S. 9/23.
- [49] Venuat, M.: Injection et protection des armatures de précontrainte. Le Moniteur, Oktober 1973, S. 109/113.
- [50] Walz, K.: Einpreßmörtel für Spannbeton. Zement-Kalk-Gips 10 (1957) H. 2, S. 54/55.
- [51] Schmid, H.: Über die Prüfung von Einpreßmörtel für Spannkanäle. Beton- und Stahlbetonbau 52 (1957) H. 12, S. 298.
- [52] Völter, O., und G. Benz: Temperatur- und Wasserzementwertänderungen eines Einpreßmörtels für Spannkanäle unter Praxisbedingungen. Straße Brücke Tunnel 26 (1974) H. 3, S. 58/66.
- [53] Völter, O.: Die Veränderlichkeit des Einpreßmörtels auf der Baustelle. Beton- und Stahlbetonbau 57 (1962) H. 10, S. 239/244.
- [54] Walz, K.: Beurteilung der Betonzusatzmittel nach den „Wirksamkeitsprüfrichtlinien“. beton 25 (1975) H. 2, S. 59/64, und Richtlinien für die Prüfung der Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln, Fassung Oktober 1974. beton 25 (1975) H. 3, S. 97/100; ebenso Betontechnische Berichte 1975, S. 33/56, Beton-Verlag, Düsseldorf 1976.
- [55] Bonzel, J.: Beton mit hohem Frost- und Tausalz widerstand. beton 15 (1965) H. 11, S. 469/474, und H. 12, S. 509/515; ebenso Betontechnische Berichte 1965, S. 185/216, Beton-Verlag, Düsseldorf 1966.