

Über den Einfluß des Zements und der Eigenschaften der Zementsuspensionen auf die Injizierbarkeit in Lockergesteinsböden

Von Justus Bonzel und Jürgen Dahms, Düsseldorf

Übersicht

Im Tief-, Grund-, Wasser- und Bergbau werden Zementeinpresungen zum Verfestigen und/oder Abdichten von Lockergestein und klüftigem Gestein angewendet. Die dabei einzupressenden Zementsuspensionen sollen gut in das Gestein eindringen. Sie müssen daher fließfähig sein und dürfen in den meisten Anwendungsfällen nur möglichst wenig zum Entmischen neigen. Zur weiteren Klärung der stofflichen und der technologischen Zusammenhänge wurden im Otto-Graf-Institut der TU Stuttgart und im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, umfangreiche Untersuchungen über den Einfluß des Zements und der Eigenschaften der Zementsuspensionen auf die Injizierbarkeit in Lockergesteinsböden durchgeführt.

Zementsuspensionen aus 19 nach Art, Zusammensetzung, Feinheit und Festigkeit verschiedenen Zementen und mit Wasserzementwerten zwischen 0,50 und 2,00 wurden auf Fließ-, Sedimentier- und Einpreßverhalten untersucht. Die scheinbare Viskosität der Suspensionen lag zwischen 4 und 100 cP, die dynamische Viskosität zwischen 4 und 81 cP. Für die Bingham'sche Fließgrenze ergaben sich Werte zwischen 0,1 und 183 dyn/cm². Der Wasserzementwert der Zementsuspensionen sollte im allgemeinen auf höchstens 2,0 begrenzt werden, da durch eine Vergrößerung des W/Z-Wertes das Fließvermögen der Suspensionen in der Regel nicht verbessert wird.

Als Kenngröße für das Sedimentiervermögen wurde die Sedimentiergeschwindigkeit ermittelt. Sie lag bei den untersuchten Suspensionen insgesamt zwischen 0 und $60 \cdot 10^{-4}$ cm/s, sollte aber in Anwendungsfällen mit möglichst langsamem Sedimentieren etwa $30 \cdot 10^{-4}$ cm/s nicht überschreiten.

Die Einpreßversuche an Probekörpern aus Standardböden (Naturesand 1/2 mm, 0,8/1,2 mm bzw. 0,8/1,5 mm) mit Einpreßdrücken zwischen 0,1 und etwa 10 kp/cm² ergaben kennzeichnende Unterschiede im Verhalten der verschiedenen Zementsuspensionen. Bei einachsigen Einpreßversuchen an kleinen Probekörpern ließen sich Suspensionen mit Zementen mittlerer Feinheit am leichtesten einpressen. Diese Ergebnisse wurden auch durch die räumlichen Auspreßversuche an würfelförmigen großen Probekörpern (1 m³) bestätigt. Allerdings ließen sich dabei auch Suspensionen mit feingemahlten Zementen gut verpressen. Bei den wegen nicht guter Fließfähigkeit schlecht verpreßbaren Zementsuspensionen konnten größere Eindringtiefen durch eine Erhöhung des Einpreßdruckes nur im begrenzten Maße, durch eine Vergrößerung des W/Z-Wertes jedoch fast immer erreicht werden.

1. Allgemeines

Das Einpressen einer Zementinjektion ist ein seit langem bewährtes Verfahren für die Verfestigung von Felsgestein und von Lockergesteinsböden sowie für ihre Abdichtung gegen Wasser. Es wird daher in erster Linie im Tief-, Grund-, Wasser- und Bergbau angewendet. Erfahrungen über diese Bauweise liegen insbesondere bei ausführenden Spezialfirmen vor. Sie erstrecken sich vorwiegend auf Fragen der Injektionstechnik und der Bauausführung, weniger auf die stofflichen und technologischen Zusammenhänge, deren Beachtung jedoch für den Erfolg einer Zementeinpressung ebenfalls von wesentlicher Bedeutung ist.

Der Arbeitskreis „Zementinjektionen“ des Vereins Deutscher Zementwerke stellte sich daher vor einigen Jahren die Aufgabe, die für dieses Teilgebiet der Injektionstechnik vorliegenden Erfahrungen zu sammeln und auszuwerten, dabei auftretende Fragen möglichst zu klären und dafür zu sorgen, daß die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse allgemein zur Verfügung stehen und genutzt werden können. Im Arbeitskreis „Zementinjektionen“ haben folgende Herren mitgearbeitet: Dr.-Ing. J. Bonzel (Leiter des Arbeitskreises) und Dr.-Ing. J. Dahms, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf; Dr.-Ing. M. Donel, Terrasond Grundbau, Krupp-Cementation GmbH, Essen-West; Dipl.-Ing. R. Helfferich, Deilmann Bergbau GmbH, Dortmund-Kurl; Dr.-Ing. K. F. Henke und Dr.-Ing. W. Kaiser, Otto-Graf-Institut an der Technischen Universität Stuttgart, Abteilung für Erd- und Grundbau; Dipl.-Ing. A. Knickmeyer, Dr.-Ing. W. Schaefer und Dr.-Ing. F. Schuermann, Steinkohlenbergbauverein, Essen; Dr.-Ing. E. h. W. Koenig und Dipl.-Ing. E. Wälter, Ruhrtalsperrenverein, Essen; Dr. F. Schröder und Dr.-Ing. R. Vinkeloe, Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, Rheinhausen; Dr. H. Steinegger, Portland-Zementwerke Heidelberg AG, Leimen; Dipl.-Ing. W. Striebel, Dyckerhoff Zementwerke AG, Wiesbaden-Biebrich; Dr.-Ing. H.-J. Wierig, Zement- und Beton-Laboratorium Beckum GmbH und Co KG, Beckum.

Die vorliegende Veröffentlichung berichtet über Versuche über den Einfluß des Zements und der Eigenschaften der Zementsuspensionen auf die Injizierbarkeit in Lockergesteinsböden. Diese Versuche wurden mit Unterstützung des Vereins Deutscher Zementwerke in den Jahren 1962 bis 1971 im Otto-Graf-Institut der Technischen Universität Stuttgart, Abteilung für Erd- und Grundbau (Abteilungsleiter Dr.-Ing. K. F. Henke), durchgeführt und teilweise im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf. Sie wurden vom Arbeitskreis „Zementinjektionen“ betreut. Zum Teil wurden die Versuche bereits an anderer Stelle veröffentlicht [1]. Erkenntnisse aus den Versuchen und die gesammelten praktischen Erfahrungen wurden vom Arbeitskreis ferner bei der Aufstellung des 1970 erschienenen „Vorläufigen Merkblattes für Zementeinpressungen im Bergbau“ [2] berücksichtigt.

2. Stand der Erkenntnisse

Seit gut 100 Jahren wird das Einpressen von Zementsuspensionen zur Verfestigung und zur Abdichtung von Lockergesteinsböden und von klüftigem Gestein verwendet, siehe u. a. [3, 4, 5].

Eine der ersten Zementinjektionen soll im Jahre 1864 auf der Zeche Rheinpreußen in 70 m Tiefe vorgenommen worden sein [4]. Inzwischen wird diese Bauweise in großem Umfang auf den verschiedensten Gebieten des Bauwesens und des Bergbaus angewendet. Zahlreiche Veröffentlichungen berichten über solche Anwendungen sowie teilweise über die Grundlagen des Verfahrens und seine Weiterentwicklung. Die Mehrzahl der Veröffentlichungen geht auf spezielle Anwendungsfälle ein, einige sind jedoch von allgemeinerer Bedeutung für das Verfahren, siehe u.a. [1 bis 10].

2.1 Zementsuspension

Die Zementsuspension muß so beschaffen sein, daß sie in die Hohlräume der Lockergesteinsböden bzw. der klüftigen Gesteine möglichst weit eindringen und den Untergrund verfestigen bzw. abdichten kann. Vor der Bauausführung ist daher durch eine Eignungsprüfung festzustellen, ob die für die Bauausführung vorgesehene Suspension die für den jeweiligen Anwendungsfall erforderlichen Eigenschaften aufweist.

Als wesentliche Anforderung an eine Zementsuspension stellt H. Neumann [4] ein möglichst niedriges Sediment- und Injektionsvolumen und eine möglichst lange Sedimentierzeit heraus. Dabei wird unter Sedimentvolumen der Quotient aus dem Volumen der Zementschicht des ohne zusätzliche Druckeinwirkung sedimentierten und abgefilterten Zements und aus der Zementmenge verstanden. Als Injektionsvolumen wird der Quotient aus dem Volumen der unter Druck abgefilterten Zementschicht und aus der Zementmenge bezeichnet. Während das Sediment- und das Injektionsvolumen verhältnismäßig aufwendig zu bestimmen sind, lassen sich die Sedimentierzeit und die mit ihr ermittelte Sedimentiergeschwindigkeit einfach ermitteln. Aus diesem Grunde und wegen ihrer größeren Aussagekraft wurde im „Vorläufigen Merkblatt für Zementeinpressungen im Bergbau“ [2] die Sedimentiergeschwindigkeit bei freiem Sedimentieren als Kenngröße aufgenommen. Sie soll in der Regel und besonders für das Verpressen von engen Hohlräumen bei Prüfung nach Abschnitt 6.2.2 des Merkblattes etwa $30 \cdot 10^{-4}$ cm/s nicht überschreiten.

Das Eindringen der Suspension in den Boden setzt ein angemessenes Fließvermögen voraus. Das Fließvermögen flüssiger Stoffe wird mit der Viskosität, dem Fließwiderstand, beurteilt. Der Viskositätskoeffizient η — der Quotient aus der Scherbeanspruchung τ und dem aus dem Verhältnis von Geschwindigkeitsgefälle und Lamellendicke sich ergebenden Schergeschwindigkeitsgefälle D — ist für Newtonsche Flüssigkeiten, wie z. B. Wasser, konstant und unabhängig vom Schergeschwindigkeitsgefälle und von der Scherbeanspruchung. Zementsuspensionen verhalten sich aber ähnlich wie Bingham'sche Flüssigkeiten. Ihr Fließverhalten unterscheidet sich von dem der Newtonschen Flüssigkeiten im wesentlichen dadurch, daß bei Aufbringen einer bestimmten Geschwindigkeit zunächst ein für die jeweilige Suspension konstanter Anlaufwiderstand f , auch Anlaßwert, Schwellwert oder Fließgrenze genannt, überwunden werden muß und sich erst danach die bei der Newtonschen Flüssigkeit vorhandene Abhängigkeit für η er-

gibt. Die Viskosität kann mit Auslaufbecher, Auslauftrichter (Marschtrichter) oder Rotationsviskosimeter bestimmt werden. Die Anforderungen an Rotationsviskosimeter werden von H. L. Jessberger [11] eingehend beschrieben. Aufgrund vergleichender Untersuchungen mit verschiedenen Geräten bezeichnet G. Brux [12] u. a. das bei den nachfolgenden Versuchen verwendete Fann-Viskosimeter als geeignet zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen. Im „Vorläufigen Merkblatt für Zementeinpressungen im Bergbau“ [2] wird die Viskosität für enge Spalten (etwa um 0,5 mm) und für Lockergestein mit einem Kleinstkorn unter 2 mm begrenzt. Danach soll die mit dem Fann-Viskosimeter ermittelte scheinbare Viskosität¹⁾ in solchen Fällen 30 cP nicht überschreiten.

Die Eigenschaften der Zementsuspension sind vom Zement und vom Verhältnis des Wassergehaltes W zum Zementgehalt Z, dem Wasserzementwert (W/Z-Wert), abhängig. In der Vergangenheit war es üblich, Zementsuspensionen mit sehr großen Wasserzementwerten bis zu 10 herzustellen. H. Cambefort [13] wies noch 1969 darauf hin, daß sich das Eindringvermögen der Zementsuspensionen ein wenig verbessern läßt, wenn die Suspension mit sehr viel Wasser, z. B. mit einem Wasserzementwert von 10, angesetzt wird. Dagegen führte H. Neumann [4] bereits 1958 kleinere Wasserzementwerte von 2 bis 5 an.

Bei Verpreßarbeiten im Bergbau wurden — abgesehen von Einpressungen, bei denen die Suspension sehr rasch sedimentieren soll — insbesondere bei wasserempfindlichen Böden schon immer wasserärmere Zementsuspensionen verwendet. Nach dem „Vorläufigen Merkblatt für Zementeinpressungen im Bergbau“ [2] soll der Wasserzementwert von reinen Zementsuspensionen im allgemeinen zwischen 0,50 und 1,00 liegen und sind Wasserzementwerte über 2,00 zu vermeiden, da dadurch das Fließvermögen nicht mehr deutlich verbessert wird und zudem andere Eigenschaften, wie z. B. das Sedimentieren und die Festigkeit, nachteilig beeinflußt werden können. Auch bei Verpreßarbeiten auf anderen Anwendungsgebieten hat sich in den letzten Jahren die Erkenntnis durchgesetzt, daß Wasserzementwerte über 2,00 das Fließvermögen nicht mehr deutlich verbessern und aus technischer Sicht im allgemeinen nicht notwendig sind.

2.2 Zusätze

Zementsuspensionen erhalten zur Verbesserung des Eindringens in Lockergesteinsböden oder klüftiges Gestein mit kleinen Hohlräumen häufig Zusätze wie z. B. Ton, Bentonit oder Chemikalien, siehe u. a. [1, 10, 11, 13 bis 16]. In der Regel sollen mit solchen Zusätzen das Fließvermögen und die Stabilität der Suspension ohne gesteigertes Sedimentieren verbessert werden. Nach Versuchen von W. Kaiser [1] mit wasserreichen Zementsuspensionen und verschiedenen Zusätzen ist eine Verbesserung der technologischen Eigenschaften von Suspensionen durch geeignete Zu-

¹⁾ Die scheinbare Viskosität wird erhalten als halber Skalenwert (abgelesen am Viskosimeter bei 600 Umdrehungen in cP).

sätze möglich. W. Wittke [15] preßte Zementsuspensionen mit Tonbeimengungen und mit besonders niedrigen Wasser-Feststoff-(Zement + Ton)-Werten von 0,35 bis 0,45 in Klüftmodelle ein. Dabei drangen die Zementsuspensionen noch in Spalten und Klüfte mit Öffnungsweiten unter 0,2 mm ein. Nach H. L. Jessberger [10] ist bei Verwenden von Suspensionen mit Zusätzen neben der Viskosität auch die Fließgrenze (siehe unter 2.1) zu beachten, da sie je nach Zusatz sehr unterschiedlich ausfallen kann. So betrug z. B. die Fließgrenze einer Suspension mit $W/Z = 1,00$ nach einer Ruhezeit von 10 Minuten rd. 40 dyn/cm² und für die gleiche Zementsuspension mit Bentonitzusatz rd. 200 dyn/cm². H. Wöhlbier und K. Baston [16] weisen besonders auf die deutlich geringere Festigkeit der Suspensionen mit erhöhtem Tonanteil hin.

2.3 Beschaffenheit des Untergrundes

Das Verhalten einer Suspension beim Einpressen hängt von ihrer Abstimmung auf die Beschaffenheit des Untergrundes ab. Vor dem Verpressen muß daher die Beschaffenheit des Untergrundes z. B. mit Hilfe von Kernbohrungen, Schürftgruben, vorgetriebenen Stollen und Probeeinpressungen untersucht werden. Hinweise über die erforderlichen Untersuchungen enthalten unter anderem DIN 4093 [17] und das „Vorläufige Merkblatt für Zementeinpressungen im Bergbau“ [2].

Überwiegend wird die Ansicht vertreten, siehe u. a. [3, 4, 5, 7, 13 und 18], daß Risse und Spalten mit einer kleinsten Weite bis zu etwa 0,1 mm und Lockergestein mit einem Kleinstkorn bis zu 0,6 mm mit Suspensionen aus üblichen Zementen noch verpreßt werden können.

Häufig wird das Eindringvermögen der Zementsuspensionen in Lockergestein auch mit der Durchlässigkeitsziffer k des Bodens nach Darcy gegenüber Wasser beurteilt, siehe u. a. [5]. Nach M. Donel [5] sind Lockergesteinsböden mit einem k -Wert von wenigstens $7,5 \cdot 10^{-2}$ cm/s mit üblichen Zementsuspensionen und Lockergesteinsböden mit einem k -Wert von $1 \cdot 10^{-2}$ cm/s mit Suspensionen aus sehr fein gemahlten Zementen noch verpreßbar.

2.4 Einpreßverfahren und Einpreßtiefe

Beim Einpressen kommt der Beziehung zwischen Eindringtiefe und Einpreßdruck besondere Bedeutung zu. Aufbauend auf Untersuchungen von E. Maag [19] stellte H. M. Müller-Kirchenbauer [8, 9] für Bingham'sche Flüssigkeiten, zu denen auch die Zementsuspensionen gerechnet werden (siehe Abschnitt 2.1), Formeln für den Zusammenhang zwischen Eindringtiefe, Einpreßmenge und Verpreßzeit auf. K. Baston [7] bezweifelt aufgrund seiner Untersuchungen, daß zwischen Einpreßdruck und Eindringtiefe eine lineare Beziehung besteht und daß eine Vergrößerung des Einpreßdruckes stets eine entsprechende Vergrößerung der Eindringtiefe zur Folge hat.

Einen Einfluß auf die Eindringtiefe kann auch der Grad des Sedi-mentierens der Suspension haben. Mit zunehmender Entfernung vom Bohrloch verringert sich die Fließgeschwindigkeit der

Suspension und erhöht sich ihre Neigung zum Sedimentieren. H. Cambefort [13] empfiehlt daher Fließgeschwindigkeiten von 3 bis 4 cm/s. Dieser Hinweis dürfte aber nur auf Suspensionen mit grobkörnigen Zementen und sehr hohen W/Z-Werten zutreffen.

3. Umfang der Versuche

Wie aus Abschnitt 2 hervorgeht, liegen keine systematischen Untersuchungen über die vom Zement abhängigen Eigenschaften der Suspensionen vor. Auch die 1962 veröffentlichte DIN 4093 [17] und die DIN 18 309 [20] enthalten keine stofflichen und technologischen Angaben. Hierzu sollen die angesetzten Untersuchungen (siehe Abschnitt 1) einen Beitrag liefern.

Einbezogen wurden insgesamt 19 Zemente verschiedener Art, Herkunft, Feinheit, Festigkeitsklasse und Zusammensetzung. Einige Zemente unterschieden sich lediglich durch unterschiedliche Mahlfineinheit und der nur dadurch veränderten Eigenschaften.

Von den Eigenschaften der Zementsuspensionen erschienen für die Beurteilung der Einpreßfähigkeit in erster Linie das Fließvermögen und das Sedimentieren von Bedeutung. Zementsuspensionen mit unterschiedlichem Fließ- und Sedimentiervermögen ergaben sich durch die Verwendung der sehr verschiedenen Zemente und durch die unterschiedlichen Wasserzementwerte, die insgesamt zwischen 0,50 und 2,00 lagen.

Um den Einfluß der Eigenschaften der Zemente und der Zementsuspensionen auf das Eindringvermögen der Suspensionen beurteilen zu können, wurden Einpreßversuche in Standardböden an kleinen Probekörpern (Plexiglaszylinder) von etwa 60 mm Durchmesser und 550 mm Höhe vorgenommen. Dabei wurden die Eindringtiefe und die Eindringgeschwindigkeit der Suspension ermittelt und Rohdichte, Druckfestigkeit, Porenraum sowie Zement- und Sandanteil der mit Zementsuspensionen verpreßten Standardböden bestimmt. Mit einigen Zementsuspensionen wurden auch Einpreßversuche in Standardböden an Würfeln von 1 m Kantenlänge durchgeführt, um einen Anhalt dafür zu bekommen, ob die bei den Einpreßversuchen an kleinen Probekörpern gewonnenen Erkenntnisse etwa auf praktische Verhältnisse übertragen werden können.

4. Durchführung und Ergebnisse der Versuche

4.1 Zement

Die Zemente wurden nach DIN 1164 (Juni 1970) auf Zusammensetzung, Raumbeständigkeit, Erstarren, Mahlfineinheit und Druckfestigkeit nach 28 Tagen und z. T. auch nach 2 Tagen geprüft. Außerdem wurde die Kornverteilung der Zemente mit Hilfe einer Sedimentationsanalyse nach Andreasen bestimmt. Alle Zemente waren raumbeständig. Die Mittelwerte der wesentlichsten Untersuchungsergebnisse sind in Tafel 1 zusammengestellt. Da die Zemente noch mit der Bezeichnung nach der alten Norm (DIN 1164, Dez. 1958) geliefert wurden, enthält Tafel 1 die etwa entsprechende Bezeichnung nach DIN 1164 (Juni 1970) in Klammern.

Tafel 1 Eigenschaften und Zusammensetzung der verwendeten Zemente

Nr.	Zement		Zusammensetzung				Erstarren		Spez. Oberfläche in cm ² /g	Druckfestigkeit in kp/cm ² im Alter von		Korngröße in 10 ⁻³ mm, die unterschritten wird von		
	Art und Festigkeitsklasse	Werk	Hüttensand- bzw. Traß-gehalt in Gew.-%	Klinkerphasen				Beginn		Ende	2 Tagen	28 Tagen	20 %	90 %
				C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF							
1	PZ 475 (550)	sdca		65	6	11	8	1 h 35 min	3 h 00 min	5360	-	639	2,7	28
2	PZ 475 (550)	ntu		61	14	12	6	2 h 10 min	3 h 50 min	4680	384	638	3,7	31
3	PZ 475 (550)	sba		70	2	9	10	2 h 20 min	4 h 05 min	5050	390	620	3,3	32
4	PZ 475 (550)	wdcl		66	6	13	6	1 h 55 min	3 h 15 min	5020	417	602	3,8	28
5	PZ 475 (550)	sln		58	11	11	10	2 h 20 min	3 h 55 min	5440	407	597	3,2	26
6	PZ 375 (450F)	sba		65	8	-	18	4 h 40 min	6 h 50 min	3830	-	516	4,0	36
7	PZ 375 (350F)	sdca		61	10	11	10	2 h 20 min	4 h 30 min	3030	-	439	5,2	72
8	PZ 275 (350F)	nhn		66	9	10	8	2 h 40 min	4 h 25 min	2630	-	416	10,0	82
9	PZ 275 (450L)	nhn		66	9	10	8	2 h 25 min	4 h 15 min	3570	-	513	5,4	50
10	PZ 275 (450F)	nhn		66	9	10	8	1 h 50 min	3 h 15 min	4180	-	540	5,0	41
11	PZ 275 (350F)	wwl		78	3	8	4	2 h 55 min	4 h 40 min	4110	-	475	6,1	73
12	HOZ 375 (450L)	wml	49					2 h 50 min	4 h 40 min	3840	-	616	5,3	48
13	HOZ 375 (450L)	wgl	35					2 h 45 min	5 h 05 min	3610	171	482	4,6	50
14	HOZ 275 (350L)	wre	77					5 h 45 min	7 h 55 min	3190	61	405	5,7	43
15	HOZ 275 (350L)	wre	77					5 h 45 min	8 h 15 min	3820	-	444	5,0	38
16	HOZ 275 (450L)	wre	77					5 h 45 min	7 h 45 min	4220	101	503	4,4	32
17	HOZ 275 (450L)	wre	77					5 h 22 min	7 h 55 min	4730	-	566	4,0	25
18	HOZ 275 (350L)	sdcn	82					4 h 00 min	7 h 20 min	4220	83	448	4,1	32
19	TrZ (350L)	slb	30					2 h 40 min	5 h 10 min	4220	-	427	4,6	61

4.2 Zementsuspensionen

4.2.1 Herstellung

Mit allen Zementen wurden Suspensionen mit Wasserzementwerten von 2,00, 1,40 und 1,00 und mit einem Wasserzementwert hergestellt, der zwischen 0,50 und 0,80 lag und bei dem die jeweilige Suspension im Fann-Viskosimeter bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 600 U/min einen Fließwiderstand zwischen 40 und 60 Skalenteilen aufwies (siehe Abschnitt 4.2.2).

Der Zement wurde bei laufendem Mischer während 1 Minute dem Anmachwasser von rd. 20 °C langsam zugegeben; anschließend wurde 2 Minuten lang mit 1200 U/min weitergemischt. Um ein Entmischen zu vermeiden, wurde anschließend die Suspension während der Entnahme für die einzelnen Prüfungen im Vorratsbehälter mit rd. 800 U/min weitergerührt. Die Temperatur der fertigen Suspension lag etwa zwischen 18 und 21 °C.

4.2.2 Viskosität

Die Viskosität der Suspensionen wurde mit dem Fann-Viskosimeter, Typ 35 S mit Rotor-Bob-Kombination R 1-B 1 und der Torsionsfeder F 1, bestimmt, siehe Bild 1 und eingehende Beschreibung in [1]. Beim Fann-Viskosimeter steht die Zementsuspension in dem schmalen ringförmigen Raum zwischen zwei in geringem Abstand konzentrisch angeordneten Metallzylindern (Rotor und

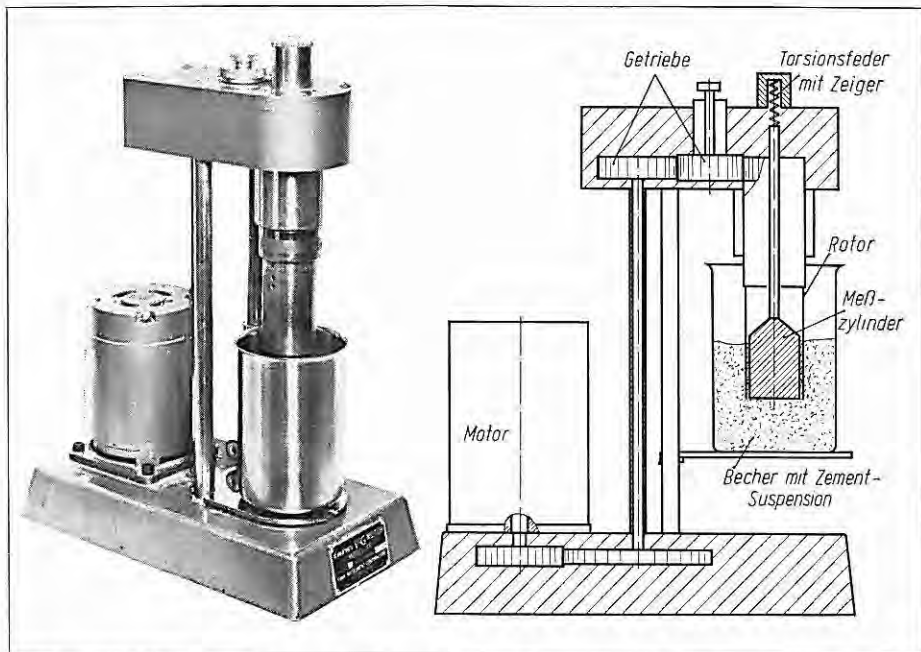


Bild 1 Gerät für Viskositätsmessungen (Fann-Instrument Corporation)

Meßzylinder), von denen der äußere (Rotor) beim Versuch mit unterschiedlicher Umdrehungsgeschwindigkeit angetrieben wird. Das dabei von der Flüssigkeit auf den inneren, zunächst sich nicht bewegenden Zylinder (Meßzylinder) übertragene Drehmoment wird über eine Feder auf die Skalenteilung an der oberen Seite des Geräts übertragen und dort abgelesen. Nach Angaben der Fann-Instrument Corporation ist die Torsionsfeder des Viskosimeters so dimensioniert, daß eine Auslenkung um einen Skalenstrich einem Drehmoment von $360,31 \text{ dyn} \cdot \text{cm}$ entspricht. Bei Berücksichtigung der Abmessungen des Viskosimeters, siehe [1], ergibt sich dann für eine Auslenkung um einen Skalenstrich eine Schubspannung von $\tau_R = 5,077 \text{ dyn/cm}^2$.

Der Versuch wurde bei 600, 300, 200, 100, 6 und 3 U/min durchgeführt. Mit Hilfe der Versuchsergebnisse wurden die Beziehungen zwischen Geschwindigkeitsgefälle und Schubspannung (Fließkurven) gezeichnet, aus denen dann als Kennwerte für das Fließvermögen der Suspension die scheinbare Viskosität (halbe Skalenablesung des Viskosimeters bei 600 U/min in cP), die dynamische Viskosität η (in cP) und die Bingham'sche Fließgrenze τ_0 (in dyn/cm^2) nach W. Kaiser [1] ermittelt wurden. Bild 2 zeigt als Beispiel die Fließkurven von Suspensionen mit drei Zementen unterschiedlicher Mahlfineinheit. Die Kennwerte für das Fließvermögen aller untersuchter Suspensionen sind in Tafel 2 zusammengestellt.

4.2.3 Sedimentieren

Zur Prüfung des Sedimentierens wurde eine Versuchsanlage mit sechs senkrecht stehenden Plexiglaszylindern von rd. 60 mm Innendurchmesser und 550 mm Höhe verwendet, die oben und unten mit einer Gummidichtung verschlossen waren. Jeder dieser Plexiglaszylinder war von einem Plexiglaszylinder mit 120 mm Innendurchmesser umgeben. Zur Konstanthaltung der Suspensionstemperatur war der Raum zwischen dem größeren und dem kleineren Plexiglaszylinder mit Wasser gefüllt, dessen Temperatur

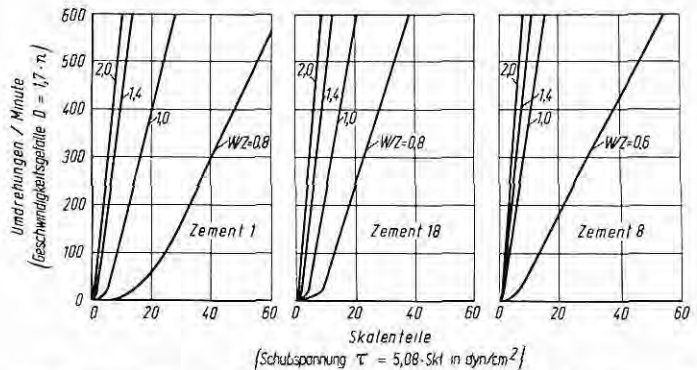


Bild 2 Beziehung zwischen Geschwindigkeitsgefälle und Schubspannung (Fließkurven) von Suspensionen unterschiedlicher Zusammensetzung

Tafel 2 Kennwerte für das Fließ- und Sedimentierverhalten der Zementsuspensionen

Zement Nr.	W/Z-Wert	Fließverhalten			Sedimentierverhalten		
		Scheinbare Viskosität SkI (cP)	Dynamische Viskosität η cP	Bingham'sche Fließgrenze τ_0 dyn/cm ²	H/S *) %	Sedimentiergeschwindigkeit bei 0,5H cm/s · 10 ⁻⁴	Injektionsvolumen l in cm ³ /g bei 1 kp/cm ²
1	0,8	31	22	83,5	< 1	< 3	0,81
	1,0	14	12	21,1	4	< 3	0,81
	1,4	6	6	3,7	17	20	0,81
	2,0	5	4	2,7	33	30	0,81
2	0,8	26	20	182,6	< 1	< 3	0,69
	1,0	14	11	22,1	5	3	0,70
	1,4	7	6	4,0	28	16	0,71
	2,0	4	4	1,5	38	25	0,83
3	0,8	22	18	36,1	< 1	< 3	0,82
	1,0	11	9	15,7	4	< 3	0,82
	1,4	6	6	4,0	24	25	0,84
	2,0	4	4	1,8	38	26	0,85
4	0,8	26	20	54,9	< 1	< 3	
	1,0	13	10	19,1	4	< 3	
	1,4	7	6	5,4	23	22	
	2,0	5	4	1,6	38	25	
5	0,8	28	22	65,5	< 1	< 3	
	1,0	12	10	19,4	< 1	< 3	
	1,4	7	7	5,3	8	4	
	2,0	4	4	1,9	29	47	
6	0,7	23	18	48,2	< 1	< 3	0,69
	1,0	7	7	12,6	5	18	0,69
	1,4	6	5	3,6	24	35	0,71
	2,0	4	4	2,3	40	42	0,73
7	0,5	40	30	94,1	< 1	< 3	0,63
	1,0	8	7	3,8	14	19	0,69
	1,4	5	5	0,5	34	20	0,69
	2,0	4	4	0,2	52	66	0,66
8	0,6	28	26	19,6	7	6	0,66
	1,0	8	8	1,4	29	19	0,67
	1,4	6	5	1,4	44	41	0,68
	2,0	4	4	0,2	57	94	0,68
9	0,7	23	20	23,5	3	4	
	1,0	10	9	7,1	23	12	
	1,4	6	6	1,0	36	20	
	2,0	4	4	0,6	49	43	
10	0,7	26	21	45,9	1	3	
	1,0	10	9	13,7	20	13	
	1,4	6	5	4,0	32	16	
	2,0	4	4	0,9	49	33	
11	0,7	19	17	26,4	4	6	0,70
	1,0	9	8	4,9	19	10	0,72
	1,4	6	6	1,6	33	15	0,73
	2,0	4	4	0,1	46	32	0,73
12	0,6	28	21	43,8	2	< 3	0,69
	1,0	8	7	5,5	24	8	0,69
	1,4	5	5	0,4	38	15	0,68
	2,0	4	4	0,1	56	35	0,68

*) H=Höhe des abgesonderten Wassers; S=ursprüngl. Einfüllhöhe der Suspension

Zer- ment Nr.	WZ- Wert	Fließverhalten			Sedimentverhalten		
		Wiskosität Dynamische Viskosität Skt (cP)	η cp Binghamische Fließgrenze T_0 dyn/cm ²	H/S (%)	Sedimen- tierge- schwindig- keit bei 0,5H in cm ³ /g bei 1 kp/cm ²	Sedimen- tierge- schwindig- keit bei 0,5H in cm ³ /g bei 10 ⁻⁴ kp/cm ²	WZ- Wert
13	0,6	27	23	39,5	2	< 3	0,68
	1,0	8	7,8	24	20	0,70	0,70
	1,4	6	3,7	40	30	0,70	0,69
14	0,7	25	21	31,7	9	5	0,68
	1,0	10	8	10,3	29	11	0,70
	1,4	6	5	2,9	44	52	0,68
15	0,5	100	81	176,7	3	< 3	0,68
	0,7	24	20	32,9	15	5	0,70
	1,0	9	8	9,9	30	9	0,70
16	0,8	22	17	47,2	14	5	0,68
	1,0	12	10	21,6	25	7	0,70
	1,4	6	5	9,0	38	13	0,68
17	0,8	31	23	79,0	2	< 3	0,68
	1,0	15	12	33,7	13	6	0,70
	1,4	8	6	13,4	30	10	0,68
18	0,8	19	15	35,5	6	3	0,68
	1,0	10	9	13,4	18	8	0,70
	1,4	6	5	3,5	31	11	0,68
19	0,7	20	15	46,7	2	< 3	0,68
	1,0	9	8	14,3	19	10	0,70
	1,4	6	5	4,9	33	15	0,68

) H=Höhe des abgesonderten Wassers; S=ursprüngl. Einfüllhöhe der Suspension

während des Versuches mit Hilfe eines Thermostats auf etwa 20 °C gehalten wurde. Die Suspension wurde mittels Druckluft aus dem Mischbehälter durch einen Gummischlauch, der durch eine Öffnung in der oberen Dichtung in den Flexiglaszylinder eingeführt wurde, Luftfrei in die Flexiglaszylinder mit rd. 60 mm Innendurchmesser bis zu einer Höhe von 50 cm eingefüllt. Nach dem Einfüllen wurde das Absinken des Zementstiegeles in den in Ruhe gelassenen Flexiglaszylindern bei freiem Sedimentieren und teilweise bei Sedimentieren unter einem Druck von 1 und 5 atü während der ersten 20 Minuten jede Minute und anschließend alle 2 Minuten abgelesen. Der Versuch wurde als beendet angesehen, wenn die Höhe des Zementstiegeles im Flexiglaszylinder wenigstens 30 Minuten lang konstant blieb. Die Versuchsanlage ist in Bild 3 dargestellt. Bild 4 zeigt als Beispiel die Sedimentierkurven von Suspensionen mit drei Zementen verschiedener Mahlfähigkeit. Für alle untersuchten Suspen-

sionen ist das Absinken des Zementspiegels bis zum Versuchsende in Prozent der ursprünglichen Füllhöhe und die mittlere Sedimentiergeschwindigkeit bis zur Hälfte der während des Versuchs sich ergebenden gesamten Zementspiegelabsenkung H in Tafel 2 angegeben. Die Sedimentiergeschwindigkeit wurde nach folgender Gleichung ermittelt, siehe auch [2]:

$$v_{0,5 H} = \frac{0,5 H}{T_{0,5 H}}$$

In dieser Gleichung bedeuten:

H = die gesamte, während eines Versuchs ermittelte Zementspiegelabsenkung,

$T_{0,5 H}$ = Zeit bis zur Hälfte der gesamten Zementspiegelabsenkung,

$v_{0,5 H}$ = mittlere Sedimentiergeschwindigkeit bis zur Hälfte der gesamten Zementspiegelabsenkung.

Für einige Suspensionen wurde zusätzlich ihr Verhalten untersucht, wenn die Dichtung an der Unterseite der mit Mörtel gefüllten Plexiglaszylinder durch ein Filter (spezifische Durchlässigkeit gegenüber Wasser $1,23 \cdot 10^{-4}$ cm/s) ersetzt worden war und die Suspension bei einem Druck von 1 und 5 atü abgefiltert wurde. Aus den Ergebnissen dieses Versuches wurde das spezi-

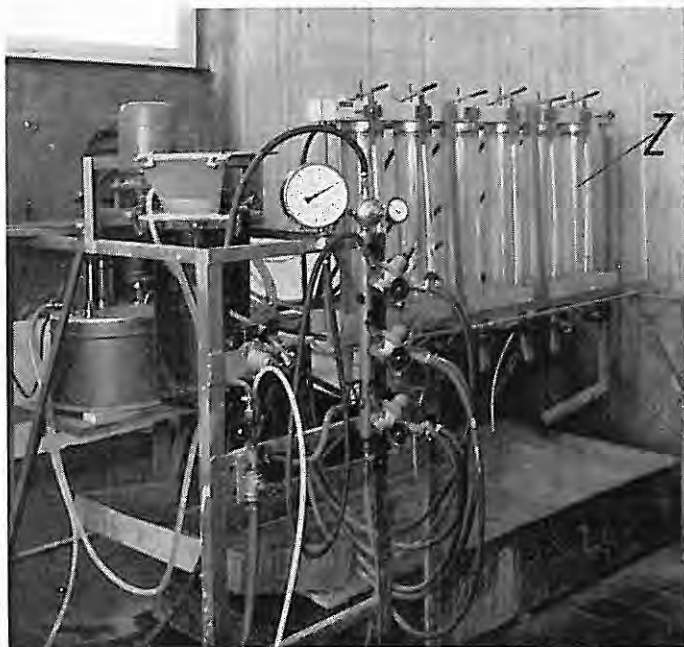


Bild 3 Anlage für Sedimentierversuche (Z = Zylinder zur Aufnahme der Suspension)

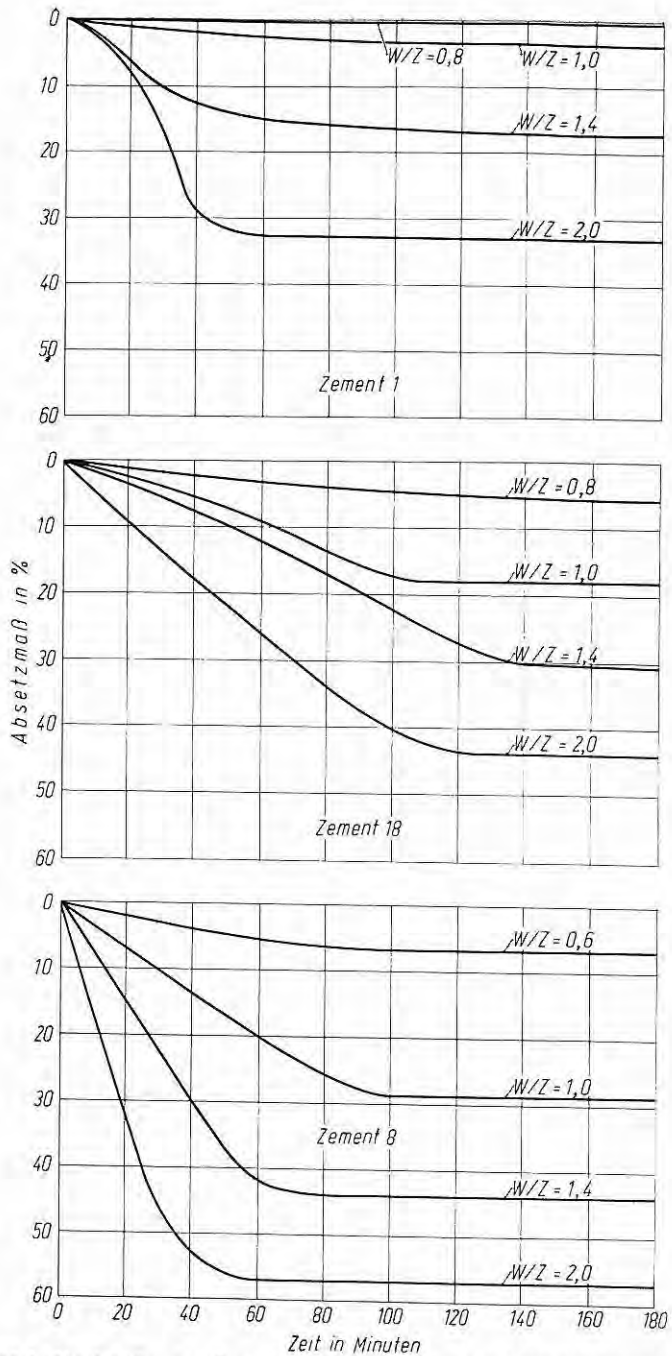


Bild 4 Absetzmaße von Suspensionen unterschiedlicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Zeit als Verhältnis der Höhe des abgesonderten Wassers zur ursprünglichen Höhe der Suspension

fische Injektionsvolumen I , das ein Maß für die Ergiebigkeit des Zements für Injektionszwecke ist, nach folgender Gleichung [4] ermittelt:

$$I = \frac{V_k}{Z} \text{ cm}^3/\text{g}$$

In dieser Gleichung bedeuten:

V_k = Volumen der abgefilterten Zementschicht in cm^3 ,

Z = Zementgehalt der abgefilterten Zementschicht in g.

Das spezifische Injektionsvolumen der untersuchten Suspensionen ist für einen Druck von $1 \text{ kp}/\text{cm}^2$ ebenfalls in Tafel 2 angegeben.

4.3 Einpreßversuche an kleinen Probekörpern

4.3.1 Durchführung

Für diese Einpreßversuche wurde die Versuchsanlage des Sedi-
mentierversuches (siehe Abschnitt 4.2.3 und Bild 3) geringfügig
umgebaut. Die zwei konzentrisch angeordneten Plexiglaszylinder
wurden jeweils durch einen etwas stärkeren Plexiglaszylinder von
rd. 60 mm Innendurchmesser, 550 mm Länge und 3 mm Wand-
dicke ersetzt. Auch die Fassungsringe der Plexiglaszylinder wur-
den verstärkt. Am unteren Ende der Plexiglaszylinder wurde als
Auflagefläche für den Sand ein Sieb mit 1 mm Maschenweite und
zum Einpressen der Zementsuspension unter diesem Sieb ein
Anschlußstutzen angeordnet. Die Versuchsanlage ist in Bild 5
dargestellt.

Als sog. Standardböden wurden ein Natursand der Korngruppe
 $1/2 \text{ mm}$ aus Schnaittenbach/Oberpfalz und bei einigen Versuchen
auch ein Natursand der Korngruppe $0,8/1,2 \text{ mm}$ aus dem Raum
Stuttgart verwendet. Beide Sande bestanden überwiegend aus
Quarz und enthielten geringe Anteile an Feldspat. Die Korn-

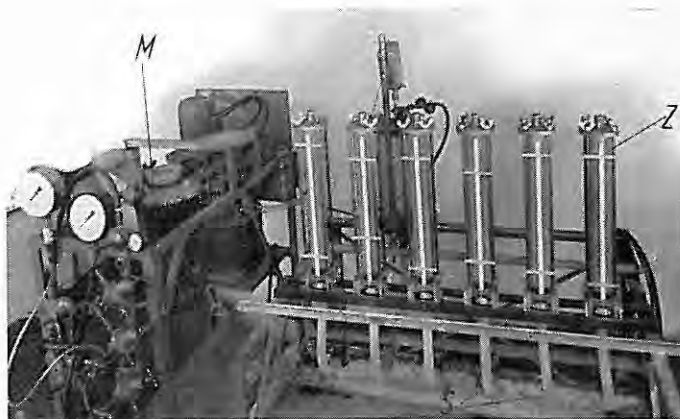


Bild 5 Anlage für Einpreßversuche (Z = Zylinder mit Sand, M = Mischer, S = Verpreßschlauch)

Tafel 3 Eigenschaften der Natursande für die Versuche nach Abschnitt 4.3

Korngruppe mm	Unterkorn Gew.-%	Überkorn Gew.-%	Ungleichkörnigkeitsgrad $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	Spezif. Durchlässigkeit k des verdichteten Sandes nach Darcy gegenüber Wasser cm/s	Äquivalenter Porenradius *) des verdichteten Sandes mm
1/2	2 bis 7	4 bis 9	1,45	0,514	0,09
0,8/1,2	1 bis 6	3 bis 8	1,16	0,322	0,07

*) ermittelt aus den Gesetzen der Fließgeschwindigkeit nach Darcy und Hagen-Poiseuille

form war überwiegend gedungen. Weitere Angaben über die Sande gehen aus Tafel 3 hervor.

Der Sand wurde in lufttrockenem Zustand in die Plexiglaszylinder eingefüllt und durch Rütteln bis auf einen Gesamtporenraum von rd. 38,6 % verdichtet. Die entsprechend Abschnitt 4.2.1 hergestellten Suspensionen wurden dann in den vorher erwähnten Vorratsbehälter gefüllt, dort mit rd. 800 U/min weitergerührt und anschließend mit Druckluft von unten in die mit Sand gefüllten Plexiglaszylinder eingepreßt.

Beim Sand 1/2 mm wurde in der Regel mit einem Einpreßdruck von 0,5 kp/cm² begonnen. Drang die Zementsuspension bei diesem Einpreßdruck nicht wesentlich in die Sandprobe ein, so wurde der Einpreßdruck auf 1 kp/cm² und, falls zum ausreichenden Eindringen nötig, anschließend noch auf 2 oder sogar 4 kp/cm² erhöht. War die Eindringtiefe beim Einpreßdruck von 0,5 kp/cm² größer als 50 cm, so wurde ein weiterer Einpreßversuch mit einem Druck von 0,25 kp/cm² und, falls nötig, auch noch ein Versuch mit einem Einpreßdruck von 0,1 kp/cm² durchgeführt.

Als Ergänzung dazu wurden Einpreßversuche an feinerem Sand 0,8/1,2 mm vorwiegend nur mit einem Einpreßdruck von 0,5 kp/cm² und nur mit Suspensionen mit Wasserzementwerten von 1,4 und 2,0 vorgenommen.

Der Einpreßversuch wurde als beendet angesehen, wenn sich die Zementsuspension im Plexiglaszylinder weniger als 5 mm je min weiter nach oben bewegte, wenn oberhalb des Zementsuspensionspiegels Wasser abgefiltert wurde oder wenn die Sandprobe ganz von der Suspension durchdrungen war.

4.3.2 Eindringen der Suspension

Bei den Einpreßversuchen wurde die Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt. Die erhaltenen Eindringtiefen sind in Tafel 4 zusammengestellt.

4.3.3 Eigenschaften und Zusammensetzung des mit Zementsuspension verpreßten Sandes

Nach dem Einpreßversuch wurden die Plexiglaszylinder ausgebaut und an beiden Seiten mit Stopfen verschlossen. Nach einem Tag wurden die Stopfen abgenommen und die Zylinder 25 Tage

Tafel 4 Eindringtiefen

Zement Nr.	W/Z- Wert	Sand 1/2 mm						Sand 0,8/1,2 mm	
		Eindringtiefe in cm bei einem Druck in kp/cm ² von							
		0,1	0,25	0,5	1	2	4	0,5	1
1	0,8				4,1	7,0	11,8		
	1,0			5,2	5,9	11,1	21,9		
	1,4	6,2		6,9	11,4	20,9			
	2,0	15,3	17,5	24,9	41,0			19,9	
2	0,8				12,7	26,1	> 50		
	1,0			15,5	20,3	37,6	> 50		
	1,4			30,2	36,9	> 50		15,9	
	2,0	41,5	> 50	> 50				43,8	
3	0,8			15,8	20,2	47,9			
	1,0	31,5	40,7	45,0					
	1,4	> 50	> 50	> 50				> 50	
	2,0	> 50	> 50	> 50				> 50	
4	0,8			9,4	15,1	31,1	> 50		
	1,0			12,0	23,2	> 50			
	1,4			28,5	43,5			17,0	
	2,0	> 50		> 50				> 50	
5	0,8			20,4	28,6	> 50			
	1,0			29,4	47,3	> 50			
	1,4		36,5	> 50				29,1	
	2,0	> 50	> 50	> 50				50	
6	0,7	15,7	34,3	> 50					
	1,0	45,6	> 50	> 50					
	1,4	> 50	> 50	> 50				> 50	
	2,0	> 50	> 50	> 50				> 50	
7	0,5				3,4	6,5	9,4		
	1,0			13,1	13,9	23,0	33,9		
	1,4	14,5	16,8	19,7	31,5				
	2,0	> 50	> 50	> 50				28,1	
8	0,6			5,8		7,3	8,6		
	1,0			17,7	20,3	28,4	35,9		
	1,4			22,9	22,7	> 50			
	2,0	45,6		> 50				nicht eingedrungen	
9	0,7			12,1		45,1	> 50		
	1,0			45,5	> 50	> 50			
	1,4	> 50		> 50				24,4	
	2,0	> 50		> 50				> 50	
10	0,7			12,7	19,7	38,2	> 50		
	1,0			28,8	43,7	> 50			
	1,4	30,3	> 50	> 50				16,2	
	2,0	> 50	> 50	> 50				32,9	
11	0,5			2,7		9,9	16,5		
	0,7			20,5	32,2	49,6			
	1,0	37,5	> 50						
	1,4	> 50	> 50					4,5	
2,0	> 50	> 50	> 50				14,6		
13	0,6				> 50				
	1,0	48,3	> 50	47,8					
	1,4	> 50	> 50					> 50	
	2,0	> 50	> 50	> 50				> 50	

Fortsetzung der Tafel 4

Zement Nr.	W/Z- Wert	Sand 1/2 mm						Sand 0,8/1,2 mm	
		Eindringtiefe in cm bei einem Druck in kp/cm ² von							
		0,1	0,25	0,5	1	2	4	0,5	1
14	0,7			26,0	24,8	29,0	40,2		
	1,0			41,8	> 50				
	1,4	48,6	> 50	> 50				28,8	
	2,0	> 50		> 50				42,4	
15	0,5			13,5	16,4	30,8	34,0		
	1,0	> 50	> 50						
	1,4	> 50	> 50						
	2,0	> 50						> 50	
16	0,8	23,0	> 50	> 50					
	1,0	41,2	> 50	> 50					
	1,4	> 50		> 50				> 50	
	2,0	> 50		> 50				> 50	
17	0,8	15,1	39,1	> 50	> 50				
	1,0	27,9	> 50	> 50					
	1,4	> 50		> 50				> 50	
	2,0	> 50		> 50				> 50	
18	0,8	27,6	> 50	> 50					
	1,0	40,5	> 50	> 50					
	1,4	> 50		> 50				> 50	
	2,0	> 50		> 50				> 50	
19	0,7					39,4	> 50		
	0,8			17,8	24,3	20,9	39,8		
	1,0		34,4	41,0	> 50				
	1,4	> 50						> 50	
	2,0	> 50		> 50				> 50	

lang unter Wasser bei 20 °C gelagert. Danach wurden, soweit möglich, aus dem unteren, mittleren und oberen Teil dieser Probekörper durch Sägeschnitte und Entfernen des Plexiglas- mantels Zylinder von rd. 60 mm Durchmesser und Höhe hergestellt. Nach Ermittlung der Feuchtrohdichte wurden diese Zylinder auf beiden Stirnseiten mit einem schwach plastischen Zementmörtel in einer Schichtdicke von 2 bis 5 mm eben abge- glichen und nach anschließender 2tägiger Wasserlagerung im Alter von 28 Tagen entsprechend DIN 1048 auf Druckfestigkeit geprüft.

In gleicher Weise wurden aus einem weiteren Plexiglaszylinder Zylinder von 60 mm Höhe und Durchmesser aus der mit Zement- suspension verpreßten Sandprobe entnommen und im Alter von 56 Tagen auf Rohdichte in feuchtem Zustand und nach Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz geprüft. Die Rohdichte im feuchten Zustand lag insgesamt zwischen 1,94 und 2,31 kg/dm³, die Trockenrohdichte insgesamt zwischen 1,70 und 2,12 kg/dm³. Anschließend wurde eine repräsentative Teilprobe bis zum Durch- gang durch das 63 µm-Maschensieb zerkleinert und daran mittels Pyknometer mit n-Heptan die Dichte (früher: Reindichte) be- stimmt; sie lag insgesamt zwischen 2,46 und 2,63 kg/dm³. Aus

Tafel 5 Eigenschaften der mit Zementsuspensionen verpreßten Sande (kleine Probekörper)

Zement Nr.	W/Z-Wert	Korngröße des Sandes mm	Einpreßdruck kp/cm ²	Lage der Probenmitte über dem Sieb cm	Druckfestigkeit 28 Tage kp/cm ²	Porengehalt 56 Tage %	Verhältnis Zement Sand Gew.-T.
1	0,8	1/2	5	10 15	42 79	26 25	1: 6,4 1: 6,8
	1,0	1/2	4	6 19	25 23	31 26	1:10,5 1: 7,7
	1,4	1/2	2	6 14	11 47	33 28	1:13,7 1: 9,5
	2,0	1/2	1	5 36	7 24	34 29	1:16,0 1: 9,0
	2,0	0,8/1,2	2	20 30	8 17	35 33	1:15,6 1:12,5
2	0,8	1/2	2	6 18	61 148	27 27	1: 7,0 1: 6,5
	1,0	1/2	2	5 30	53 106	29 25	1: 9,3 1: 5,9
	1,4	1/2	1	5 30	25 52	30 27	1:10,2 1: 6,4
	1,4	0,8/1,2	0,5	12	50	29	1: 7,8
	2,0	1/2	0,1	6 28	10 38	31 29	1:12,2 1: 8,2
	2,0	0,8/1,2	0,5	6 39	7 28	33 29	1: 9,8 1: 7,8
3	0,8	1/2	2	6 42	104 205	23 19	1: 5,2 1: 4,6
	1,0	1/2	0,5	5 38	66 159	26 22	1: 6,5 1: 5,3
	1,4	1/2	0,1	5 45	33 64	29 26	1: 7,9 1: 6,2
	1,4	0,8/1,2	0,5	5 38	21 99	31 27	1: 7,8 1: 6,3
	2,0	1/2	0,1	6 45	15 32	30 27	1:10,2 1: 7,8
	2,0	0,8/1,2	0,5	5 45	15 35	33 29	1:10,0 1: 7,7
4	0,8	1/2	2	6 23	100 147	23 21	1: 5,6 1: 4,9
	1,0	1/2	1	5 17	67 113	27 24	1: 8,3 1: 6,1
	1,4	1/2	1	6 37	16 58	30 25	1:10,6 1: 6,7
	1,4	0,8/1,2	0,5	5 12	16 52	34 28	1:12,9 1: 7,4
	2,0	1/2	0,1	6 40	15 24	31 27	1:10,9 1: 7,7
	2,0	0,8/1,2	0,5	5 36	5 45	34 30	1:11,6 1: 8,7
5	0,8	1/2	1	5 22	140 234	23 21	1: 4,9 1: 4,8
	1,0	1/2	1	6 40	64 136	26 21	1: 6,5 1: 5,3
	1,4	1/2	0,25	5 28	26 62	30 25	1: 8,6 1: 6,1
	1,4	0,8/1,2	0,5	6 19	21 72	32 32	1:11,3 1: 7,4
	2,0	1/2	0,1	5 45	15 27	30 28	1: 8,6 1: 7,7
	2,0	0,8/1,2	0,5	6 45	16 37	33 29	1:11,0 1: 6,5

Fortsetzung der Tafel 5

Zement-Nr.	W/Z-Wert	Korngröße des Sandes mm	Einpreßdruck kp/cm ²	Lage der Probenmitte über dem Sieb cm	Druckfestigkeit 28 Tage kp/cm ²	Porengehalt 56 Tage %	Verhältnis Zement:Sand 56 Tage Gew.-T.
6	0,7	1/2	0,25	6	131	21	1: 4,6
				28	151	19	1: 3,7
	1,0	1/2	0,1	6	63	23	1: 4,8
				38	79	25	1: 5,2
	1,4	1/2	0,1	6	28	28	1: 7,4
				44	49	26	1: 6,6
1,4	0,8/1,2	0,5	6	23	30	1: 7,7	
			45	57	25	1: 5,2	
2,0	1/2	0,1	6	13	28	1: 9,5	
			44	20	29	1: 8,1	
2,0	0,8/1,2	0,5	6	14	32	1:10,2	
			45	29	29	1: 7,5	
7	0,5	1/2	4	5	84	26	1: 5,7
				4	42	28	1: 8,8
	1,0	1/2	4	32	26	27	1: 8,9
				4	47	26	1: 6,5
	1,4	1/2	1	26	16	28	1:10,6
				4	21	34	-
1,4	0,8/1,2	1	13	23	31	-	
			4	19	30	1:10,8	
2,0	1/2	0,1	44	16	30	1:10,7	
			4	18	30	1: 8,4	
2,0	0,8/1,2	0,5	22	8	32	1:12,4	
			6	36	28	1: 8,6	
8	1,0	1/2	4	27	34	26	1: 6,5
				7	16	29	1:11,2
	1,4	1/2	1	13	20	29	1: 8,5
6				18	28	1: 8,5	
2,0	1/2	0,1	44	12	27	1: 9,1	
			6	80	20	1: 4,1	
9	0,7	1/2	2	36	140	20	1: 4,6
				6	38	28	1: 7,2
	1,0	1/2	0,5	41	64	23	1: 5,3
				6	31	28	1: 7,3
	1,4	1/2	0,1	45	44	26	1: 6,8
				7	19	31	1: 7,1
1,4	0,8/1,2	0,5	20	33	28	1: 8,4	
			6	16	29	1: 9,8	
2,0	1/2	0,1	45	17	27	1: 8,4	
			6	14	33	1:13,0	
2,0	0,8/1,2	0,5	45	21	31	1: 8,9	
			6	107	22	1: 4,7	
10	0,7	1/2	2	31	199	19	1: 4,0
				6	42	27	1: 7,4
	1,0	1/2	1	36	89	22	1: 5,1
				6	30	29	1: 8,6
	1,4	1/2	0,1	25	48	26	1: 6,2
				5	18	31	1: 8,7
1,4	0,8/1,2	0,5	12	43	29	1: 7,1	
			6	18	30	1: 9,9	
2,0	1/2	0,1	45	25	28	1: 7,5	
			7	9	33	1:13,9	
2,0	0,8/1,2	0,5	26	16	29	1: 8,5	

Fortsetzung der Tafel 5

Zement Nr.	W/Z-Wert	Korngröße des Sandes mm	Einpreßdruck kp/cm ²	Lage der Probenmitte über dem Sieb cm	Druckfestigkeit 28 Tage kp/cm ²	Porengehalt 56 Tage %	Verhältnis Zement:Sand 56 Tage Gew.-T.
11	0,7	1/2	0,5	5 16	173 45	20 23	1: 5,0 1: 5,8
	1,0	1/2	0,1	6 30	91 15	24 33	1: 5,4 1: 9,3
	1,0	1/2	0,25	6 26	106 58	21 28	1: 5,6 1: 7,5
	1,4	1/2	0,1	5 48	21 23	26 28	1: 6,5 1: 6,9
	2,0	0,8/1,2	1,5	10	6	35	1: 14,1
13	0,6	1/2	0,5	6 42	194 140	20 18	1: 4,0 1: 3,6
	1,0	1/2	0,1	6 42	56 63	24 21	1: 5,7 1: 5,2
	1,4	1/2	0,1	6 44	32 35	27 24	1: 8,6 1: 6,4
	1,4	0,8/1,2	0,5	6 45	28 44	29 26	1: 8,5 1: 6,0
	2,0	1/2	0,1	6 44	14 13	28 27	1: 10,0 1: 8,3
	2,0	0,8/1,2	0,5	5 44	16 24	32 29	1: 9,1 1: 8,4
14	0,7	1/2	4	6 30	88 157	23 17	1: 5,5 1: 4,6
	1,0	1/2	0,5	6 36	48 78	27 22	1: 7,7 1: 5,3
	1,4	1/2	0,1	6 44	31 51	29 25	1: 7,9 1: 6,3
	1,4	0,8/1,2	0,5	6 18	22 51	31 29	1: 9,0 1: 7,1
	2,0	1/2	0,1	6 44	15 23	30 27	1: 9,9 1: 7,8
	2,0	0,8/1,2	0,5	6 32	8 9	33 30	1: 13,1 1: 9,4
15	0,5	1/2	2	5 26	251 112	19 22	1: 3,8 1: 4,7
	1,0	1/2	0,1	6 44	64 69	26 24	1: 6,5 1: 5,6
	1,4	1/2	0,1	6 44	27 38	28 26	1: 7,9 1: 6,5
	1,4	0,8/1,2	0,1	5 26	42 42	30 28	1: 7,6 1: 7,7
	2,0	1/2	0,1	6 44	20 14	30 29	1: 10,2 1: 8,1
	2,0	0,8/1,2	0,1	6 44	9 19	32 32	1: 9,1 1: 9,5
16	0,8	1/2	0,25	6 44	202 197	20 18	1: 5,0 1: 4,4
	1,0	1/2	0,1	6 34	103 136	24 21	1: 6,4 1: 5,4

Fortsetzung der Tafel 5

Zement Nr.	W/Z-Wert	Korngröße des Sandes mm	Einpreßdruck kp/cm ²	Lage der Probenmitte über dem Sieb cm	Druckfestigkeit 28 Tage kp/cm ²	Porengehalt 56 Tage %	Verhältnis Zement Sand 56 Tage Gew.-T.
16	1,4	1/2	0,1	6	41	29	1: 7,8
				44	67	25	1: 5,8
	2,0	0,8/1,2	0,5	6	47	30	1: 8,2
				45	89	24	1: 6,2
17	0,8	1/2	0,25	5	217	19	1: 4,6
				33	205	19	1: 4,6
	1,4	1/2	0,1	5	129	24	1: 5,8
				22	148	22	1: 5,2
2,0	0,8/1,2	0,5	6	59	27	1: 6,7	
			45	65	25	1: 6,1	
18	1,4	1/2	0,1	6	44	29	1: 7,5
				45	111	24	1: 6,3
	2,0	1/2	0,1	9	24	29	1: 9,2
				45	46	27	1: 8,1
	2,0	0,8/1,2	0,5	6	21	31	1:10,0
				45	54	27	1: 7,2
19	0,8	1/2	0,1	5	172	21	1: 4,6
				23	174	20	1: 4,2
	1,4	1/2	0,1	6	99	24	1: 6,0
				35	113	22	1: 5,0
	2,0	1/2	0,1	6	30	27	1: 7,1
				44	58	24	1: 6,1
2,0	0,8/1,2	0,5	5	34	30	1: 7,0	
			45	67	26	1: 5,9	
19	0,7	1/2	2	6	94	24	1: 5,3
				33	135	20	1: 4,1
	1,4	1/2	0,5	6	46	26	1: 8,7
				34	94	24	1: 6,9
	2,0	1/2	0,1	6	24	27	1:14,0
				44	35	27	1: 8,1
2,0	0,8/1,2	0,5	6	22	33	1:14,3	
			44	13	29	1:19,8	
2,0	0,8/1,2	0,5	6	14	30	1:14,3	
			19	11	32	1:17,0	

der Dichte ρ_0 und der Trockenrohddichte ρ wurde der Porenraum p nach der Gleichung $p = 1 - \rho / \rho_0$ berechnet. An einer weiteren repräsentativen Probe dieser Zylinder wurde nach DIN 52 170 der Gehalt an Zement und Sand ermittelt.

Die Feststellungen über die Druckfestigkeit, den Porenraum und die Zusammensetzung sind in Tafel 5 zusammengestellt.

4.4 Einpreßversuche mit großen Probekörpern

4.4.1 Durchführung

Die Versuchsanlage, Bild 6, bestand aus einem 100-l-Turbo-Mischer, wie er zur Herstellung von Ausgußmörtel nach dem Colcrete-Verfahren verwendet wird, aus einer Monopumpe mit Manometer und Aufnahmebehälter für zwei bis drei Mischerfüllungen und aus einem zerlegbaren, würfelförmigen Blechbehälter von 1 m Kantenlänge. An der Unterseite des Blechbehälters wurde mittig ein 50 cm langes und 30 mm weites durchlöcherntes (Lochdurchmesser 3 mm) Rohr als Einpreßlanze (siehe Bild 7) eingeführt. Bei einigen Versuchen befand sich am oberen Ende der Einpreß-

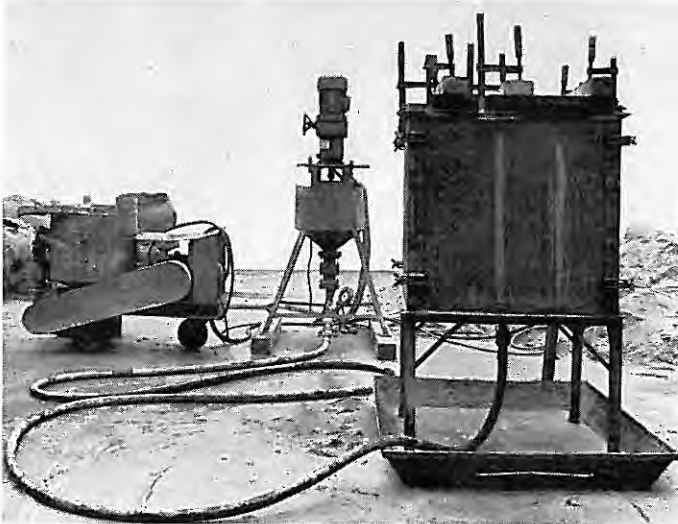


Bild 6 Anlage für Einpreßversuche mit großen Probekörpern (Mischer, Pumpe, Blechbehälter für Probekörper)

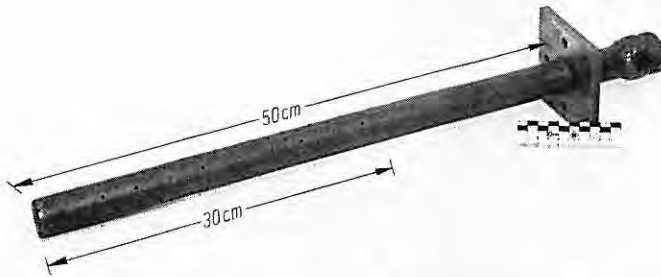


Bild 7 Einpreßrohr (Rohrdurchmesser 30 mm, Durchmesser der Austrittslöcher 3 mm)

lanze zur Nachprüfung des Druckabfalls ein Flüssigkeitsdruckaufnehmer, dessen Ergebnisse mit einem X-Y-Schreiber aufgezeichnet wurden.

Als „Standardboden“ wurde zunächst ein vorwiegend quarzhaltiger Natursand 1/2 mm aus dem Raum Frechen verwendet. Da der Sand von allen einbezogenen Zementsuspensionen sehr leicht durchflossen wurde und mit ihm ein unterschiedliches Eindringvermögen der verschiedenen Suspensionen daher nicht feststellbar war, wurde nach weiten Vorversuchen ein vorwiegend quarzhaltiger Natursand der Korngruppe 0,8/1,5 mm aus dem Raume Kirchhellen/Niederrhein verwendet. Seine Oberflächenfeuchtigkeit betrug rd. 2 Gew.-%. Die Eigenschaften beider Sande sind in Tafel 6 zusammengestellt.

Tafel 6 Eigenschaften der Natursande für die Versuche nach Abschnitt 4.4

Korngruppe mm	Unterkorn Gew.-%	Überkorn Gew.-%	Ungleichkörnigkeitsgrad $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	Spezif. Durchlässigkeit k des verdichteten Sandes nach Darcy gegenüber Wasser cm/s	Äquivalenter Porenradius *) des verdichteten Sandes mm
1/2	3 bis 4	9 bis 12	1,45	0,45	0,10
0,8/1,5	2 bis 11	2 bis 5	1,51	0,25	0,07

*) ermittelt aus den Gesetzen der Fließgeschwindigkeit nach Darcy und Hagen-Poiseulle

Der Sand 0,8/1,5 mm wurde in würfelförmige Blechkästen von 1 m Kantenlänge lagenweise eingeschaufelt; jede Lage wurde mit einem 6 kg schweren Eisenstampfer verdichtet. Das Gewicht der Füllungen lag zwischen 1620 und 1650 kg und betrug im Mittel 1635 kg. Mit einer angenommenen Kornrohddichte des Sandes von 2,60 kg/dm³ errechnete sich der Gesamtporenraum der Sandfüllung zu rd. 36,5 %.

Es wurden Suspensionen mit 6 verschiedenen Zementen und mit W/Z-Werten zwischen 0,50 und 2,00 verwendet (Tafel 7). Zement und Wasser wurden nach dem Einfüllen in den Mischer rd. 1 min lang mit etwa 1800 U/min gemischt. Die so entstandenen Suspensionen (Tafel 7) wurden in den Auffangbehälter der Monopumpe befördert und anschließend mit einem Druck von vorwiegend 2 bis 3 kp/cm² über das Einpreßrohr in die Sandfüllung eingepreßt. Nur in wenigen Fällen baute sich ein größerer Druck auf (siehe Tafel 7). In der Regel war dies nicht möglich, weil bereits vorher Zementsuspensionen oder abgefiltriertes Wasser an einer oder mehreren Stellen der vier unteren Kanten oder in der Mitte der Oberseite des würfelförmigen Behälters austrat. In diesen Fällen wurde der Versuch abgebrochen, ebenso wenn der Druck stark anstieg und die Suspension auch dabei nicht weiter in den Sand eindrang. Für die Fließ- und Sedimentiereigenschaften der Suspensionen gelten die Angaben in Tafel 2.



4.4.2 Eindringen der Suspension

Die eingepreßte Suspensionsmenge ergab sich aus der hergestellten Menge abzüglich der nicht eingepreßten Menge in Leitungen und Pumpe sowie der aus dem Probekörper ausgetretenen Menge. Einpreßmenge und -dauer sowie der maximale Pumpendruck sind in Tafel 7 angegeben. Der oberhalb des Einpreßrohres angebrachte Druckaufnehmer zeigte im Mittel einen um etwa 1 kp/cm^2 geringeren Druck an als das Manometer an der Pumpe. 48 Stunden nach dem Einpressen wurden die Formwände abgenommen und wurde der nicht verpreßte Sand entfernt. Einige der durch Verpressen entstandenen Körper sind in Bild 8 wiedergegeben.



Bild 8 Beispiele für die bei den Einpreßversuchen entstandenen großen Probekörper.

Tafel 7 Zusammenstellung für das Verpressen großer Probekörper

Zement	W/Z- Wert	max. Einpreßdruck kp/cm ²	Einpreßdauer min	eingepreßte Suspension l
1	0,8	3	14	187
	1,0	3	15	208
	1,4	2	8	82
6	0,7	2 bis 3	19	173
	1,0	2	13	146
7	0,5	3	2	15
	1,0	3	3	63
	1,4	2	15	116
11	0,7	3	8	33
	1,0	4	17	100
	1,4	2	8	54
15	0,5	10	16	118
	0,7	2	23	206
	1,0	2	16	156
	1,0	2 bis 3	9	68
	1,4	2 bis 3	11	75
	2,0	4	6	41
19	0,7	2	9	113
	1,0	2	12	121
	1,4	2	7	74

4.4.3 Eigenschaften des mit Zementsuspension verpreßten Sandes

Aus jedem der mit Zementsuspension verpreßten Körper, die im Freien (mittlere Tagestemperatur zwischen 1 und 18 °C) ungeschützt lagerten, wurden 7 Tage nach dem Verpressen in drei verschiedenen Höhenlagen (siehe Bild 9) Bohrkerne mit 10 cm Durchmesser naß herausgebohrt und durch Zersägen in Zylinder mit 10 cm Höhe aufgeteilt. Diese wurden 7 Tage unter Wasser bei 20 °C und 10 Tage an der Luft bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach Ermittlung der Rohdichte wurden die Stirnseiten der Zylinder gemäß DIN 1048, Blatt 1, mit Zementmörtel abgeglichen. Nach weiterer Luftlagerung bis zum Alter von 28 Tagen wurden sie nach DIN 1048, Blatt 1, auf Druckfestigkeit geprüft. Rohdichte und Druckfestigkeit der Zylinder sind in Tafel 8 zusammengestellt.

5. Erörterung der Versuchsergebnisse des Abschnitts 4

5.1 Zement

Die Zemente (siehe Abschnitt 4.1) unterschieden sich nach Art, Herkunft, Herstellverfahren, Zusammensetzung, Festigkeitsklasse und Eigenschaften, siehe Tafel 1. Alle Zemente waren normgerecht. Der Erstarrungsbeginn lag zwischen 1 h 35 min und 5 h 45 min und die 28-Tage-Druckfestigkeit zwischen 416 und 639 kp/cm². Diese unterschiedlichen Festigkeiten dürften in diesem Bereich für den Einpreßerfolg ohne Bedeutung sein, da hiervon unabhängig eine ausreichende Verfestigung des Unter-

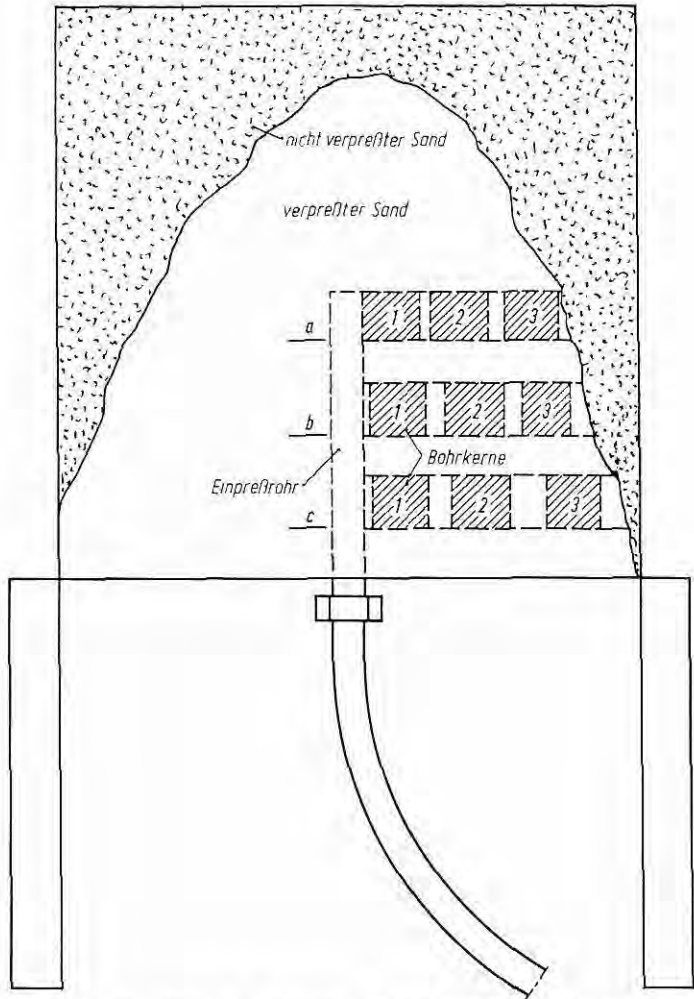


Bild 9 Entnahmestellen der Bohrkernproben für die Druckfestigkeitsprüfung

grundes praktisch immer erreicht wird, wenn sonst geeignet zusammengesetzte Zementsuspensionen genügend eindringen und die Hohlräume verfüllen; siehe Tafeln 5 und 8.

Die 19 Zemente unterschieden sich in ihrer Feinheit erheblich; sehr feine und mittelfeine Zemente waren mehr vertreten als gröbere Zemente. Insgesamt lag die spezifische Oberfläche der Zemente zwischen 2630 und 5440 cm²/g. 20 Gew.-% der Zementkörner waren — abgesehen von einer Ausnahme (Zement 8) — je nach Zement kleiner als 2,7- bis 5,7 · 10⁻³ mm, 90 Gew.-% waren kleiner als 25- bis 82 · 10⁻³ mm. Die „90.-%-Grenze“ deckt

Tafel 8 Rohdichte und Druckfestigkeiten von Zylindern (10/10 cm)
aus den großen Probekörpern

Ze- ment	W/Z- Wert	Lage des Kerns (s. Bild 9)	Rohdichte (lufttrocken) kg/dm ³			Druckfestigkeit nach 28 Tagen kp/cm ²		
			Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 1	Probe 2	Probe 3
1	0,8	a	2,08	2,20	2,18	225*	330	286
		b	2,12	2,18	2,08	240*	264	169
		c	2,15	2,08	2,01	283	208	178
	1,0	a	2,06	2,09	1,98	124	155	95
		b	1,95	2,05	1,89	120	132	82
		c	1,93	2,02	1,97	131*	139	150
1,4	a	1,96	1,97	1,96	95	100	99	
	b	1,75		1,71	75		58	
6	0,7	a	2,14	2,19	2,11	415*	398	240
		b	2,16	2,16	2,19	370*	361*	370
		c	2,16	2,18	2,13	303	355*	383*
	1,0	a	2,00	2,08	2,00	129	159	101
b		2,12	2,04	1,98	194	140	134	
7	0,5	c	2,07			137*		
	1,0	a	1,96	1,99	1,94	121*	158*	66*
		b	1,99		1,88	101*		48
		c	1,98	1,99	2,00	152*	201*	138*
	1,4	a	1,95		1,77	70		31
		b	1,97		1,77	109*		21
c		2,15		1,87	350		51	
11	0,7		2,21			(267*)		
	1,0	a	2,19	2,14	2,00	390*	255	141
		b	2,22	2,18	1,85	434*	320	50
		c	2,18	2,21	1,96	581*	340	105
1,4	a	1,80			39			
	c	2,01			182			
15	0,5	(a)	2,09	2,07	1,95	823	744	550
	0,7	a	2,20	2,18	2,19	314	286	268
		b	2,20	2,19	2,12	382*	334*	240*
		c	2,13	1,95	2,08	199	145	191
	1,0	a	2,22	2,21	2,13	291	209	125
		b	2,13	2,07	2,10	168	141	153
	1,4	a	2,02		1,88	84		57
		b	1,83		1,81	62		55
c		1,84		1,83	75		64	
2,0	a	1,80		1,82	45		33	
19	0,7	a	2,19	2,21	2,20	398*	406*	258*
	1,0	a	2,09	2,10	1,98	202	220	76
		b		2,10	2,10		243*	140
		c	2,13	2,05	2,00	289	171	112
1,4	a	1,95		2,02	79		93	
	c	2,02			112			

*) Gefüge ist ungleichmäßig mit Zementsteinadern durchsetzt

somit zwar die ins Auge fallenden großen Unterschiede der Kornverteilung auf, auf die spezifische Oberfläche wirkten sich jedoch die durch die „20-%-Grenze“ gekennzeichneten Unterschiede im Feinstanteil stärker aus. Dies wird auch durch Bild 10 bestätigt. Die Korngröße, die von 20 Gew.-% der Zementkörner des jeweiligen Zementes unterschritten wird, nahm mit abnehmender spezifischer Oberfläche praktisch linear zu. Für die „90-%-Grenze“ ergab sich keine solche Beziehung zur spezifischen Oberfläche des Zements. Der Einfluß der Feinheit des Zements auf das Einpreßverhalten der Suspension kann insbesondere durch einen Vergleich der Suspensionen aus Zementen gleicher Zusammensetzung beurteilt werden. Dies sind die Zemente 8 bis 10 bzw. 14 bis 17, die jeweils stofflich gleich sind, jedoch unterschiedlich fein gemahlen wurden. Die Zemente 9 und 10 wurden durch Feinermahlen des Zements 8 in einer Durchlaufmühle, die Zemente 15 bis 17 durch Feinermahlen des Zements 14 in einer Sichter-mühle erhalten.

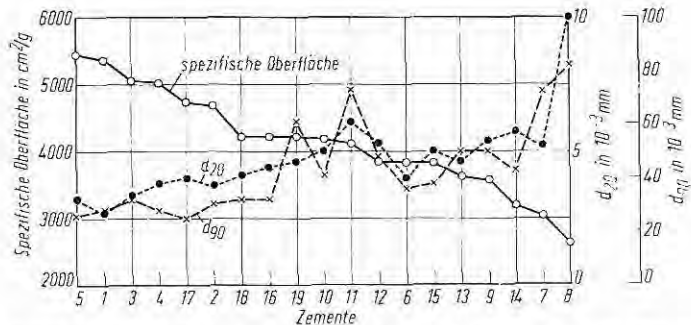


Bild 10 Spezifische Oberflächen und Korngrößen, die von 20 bzw. 90 Gew.-% der Zementkörner (d_{20} und d_{90}) des jeweiligen Zementes unterschritten werden

5.2 Eigenschaften der Suspensionen

Als kennzeichnende Eigenschaften der Suspensionen wurden die Fließeigenschaften und die Sedimentiereigenschaften untersucht.

5.2.1 Fließeigenschaften

Die Fließeigenschaften der untersuchten Suspensionen (siehe Abschnitt 4.2.2) waren sehr verschieden. Insgesamt lag die scheinbare Viskosität zwischen 4 und 100 cP, die dynamische Viskosität zwischen 4 und 81 cP und die Bingham'sche Fließgrenze zwischen 0,1 und 182,6 dyn/cm². Da sich scheinbare und dynamische Viskosität bei den Versuchen praktisch gleich verhielten, wird im folgenden nur die aus den Fließkurven einfach bestimmbare scheinbare Viskosität einbezogen.

Die scheinbare Viskosität ist — wie zu erwarten — abhängig von den beiden Einflußgrößen Zement und W/Z-Wert. Sie lag für Sus-

pensionen mit $W/Z = 1,0$ je nach Zement zwischen 7 und 15 cP, für Suspensionen mit $W/Z = 1,4$ zwischen 5 und 8 cP und für Suspensionen mit $W/Z = 2,0$ zwischen 4 und 5 cP, siehe Tafel 2. Im Bereich kleinerer W/Z -Werte ist der Viskositätsunterschied größer. Dies kann den Ergebnissen der Tafel 2 durch Vergleich entnommen werden, da der W/Z -Wert unterhalb von 1,0 bei den Versuchen so gewählt wurde, daß sich mit den verschiedenen Zementen Suspensionen mit nicht sehr verschiedener Viskosität ergaben. Im Bereich $W/Z \leq 1,0$ wiesen Suspensionen mit den Zementen 1, 2, 4, 5 und 17 eine vergleichsweise hohe und Suspensionen mit den Zementen 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 18 und 19 eine vergleichsweise niedrige Viskosität auf.

Die Viskosität der Zementsuspensionen ist demnach unter sonst gleichen Bedingungen bei gleichem W/Z -Wert um so größer, je feiner der Zement ist, und bei gleichem Zement um so größer, je geringer der W/Z -Wert ist. Wie auch aus Bild 11 ersichtlich ist, sind der Abnahme der Viskosität mit wachsendem W/Z -Wert jedoch Grenzen gesetzt. Die scheinbare Viskosität strebt beim W/Z -Wert von 2,0 etwa einen Wert von 4 cP an und verändert sich mit weiter zunehmendem W/Z -Wert nur noch unwesentlich. Beim W/Z -Wert von 2,0 und größer wirkte sich auch die Feinheit des Zements praktisch nicht mehr auf die Viskosität der Zementsuspensionen aus.

Für die Bingham'sche Fließgrenze ergeben sich in der Tendenz ähnliche Feststellungen. Sie lag für Suspensionen mit $W/Z = 1,0$ zwischen 1,4 und 33,7 dyn/cm², mit $W/Z = 1,4$ zwischen 0,4 und

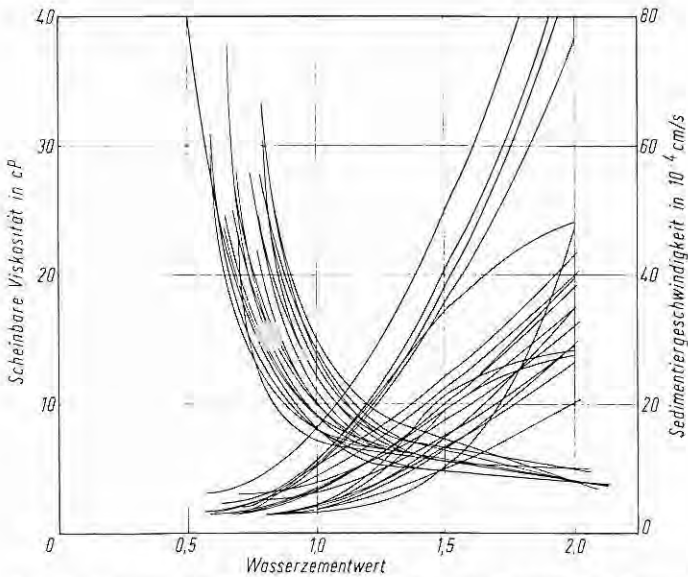


Bild 11 Scheinbare Viskosität und Sedimentiergeschwindigkeit der Suspensionen in Abhängigkeit vom Wasserzementwert

13,4 dyn/cm² und mit $W/Z = 2,0$ zwischen 0,1 und 3,0 dyn/cm², siehe Tafel 2. Mit größeren W/Z -Werten als 2,0 wird auch die Bingham'sche Fließgrenze nicht mehr nennenswert kleiner.

Aus den Untersuchungen über die Fließeigenschaften ist zu folgern, daß Suspensionen mit guter Fließeigenschaft zwar einen je nach Zement unterschiedlich großen W/Z -Wert aufweisen können, daß aber mit größeren W/Z -Werten als 2,0 die Viskosität von reinen Zementsuspensionen praktisch nicht mehr nennenswert verringert und die Fließfähigkeit praktisch nicht mehr verbessert wird.

5.2.2 Sedimentiereigenschaften

Auch die Sedimentiereigenschaften (siehe Abschnitt 4.2.3) waren je nach Zusammensetzung der Suspensionen sehr verschieden. Das freie Sedimentieren ergab insgesamt Höhen des abgesonderten Wassers zwischen 1 und 58 % und Sedimentiergeschwindigkeiten bei 0,5 H etwa zwischen 3- und $94 \cdot 10^{-4}$ cm/s, siehe Tafel 2. Beide Größen waren abhängig vom Zement und vom W/Z -Wert. Bei Suspensionen mit $W/Z = 1,0$ lag das freie Sedimentieren zwischen 1 und 30 % und die Sedimentiergeschwindigkeit zwischen 3- und $20 \cdot 10^{-4}$ cm/s, bei Suspensionen mit $W/Z = 1,4$ das freie Sedimentieren zwischen 8 und 44 % und die Sedimentiergeschwindigkeit zwischen 4- und $52 \cdot 10^{-4}$ cm/s und bei Suspensionen mit $W/Z = 2,0$ das freie Sedimentieren zwischen 29 bis 58 % und die Sedimentiergeschwindigkeit zwischen 19- und $94 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Während das freie Sedimentieren bei den Suspensionen mit den feineren Zementen 1 bis 5 geringer und bei den Suspensionen mit den gröberen und mittelfeinen Zementen 8, 9 und 12 bis 16 ausgeprägter war als bei den Suspensionen mit den übrigen Zementen, war die Sedimentiergeschwindigkeit bei den Suspensionen mit den Zementen 1 bis 5, 12 und 16 bis 18 geringer und praktisch nur bei den Suspensionen mit den Zementen 8 und 13 deutlich größer als bei den Suspensionen mit den übrigen Zementen. Freies Sedimentieren und Sedimentiergeschwindigkeit waren im Bereich der W/Z -Werte unterhalb von 1,0 vergleichsweise klein, nahmen aber mit wachsendem W/Z -Wert stark zu, siehe auch Bild 11. Sie waren bei Suspensionen mit gröberen Zementen unter sonst gleichen Bedingungen durchweg größer als bei Suspensionen mit feineren Zementen. Die zementbedingten Unterschiede waren beim freien Sedimentieren ausgeprägter als bei der Sedimentiergeschwindigkeit. So zeigten z. B. die Suspensionen mit den mittelfeinen Zementen 9, 12 und 14 bis 16 zwar insgesamt starkes, aber langsames Sedimentieren.

Für viele Anwendungsfälle dürfte daher die Sedimentiergeschwindigkeit ein zutreffenderer Beurteilungsmaßstab sein als das freie Sedimentieren, da durch eine Beurteilung mit Grenzwerten des freien Sedimentierens u. U. bereits Suspensionen für bestimmte Anwendungsfälle als unbrauchbar bezeichnet werden, die zwar stark, aber langsam sedimentieren und für den vorgesehenen Anwendungsfall durchaus brauchbar sind. Im Grunde ist dieses Verhalten typisch z. B. für Suspensionen mit feiner gemahlten Hochofenzementen.

5.2.3 Injektionsvolumen

Das für einige Suspensionen ermittelte spezifische Injektionsvolumen I (siehe Abschnitt 4.2.3 und Tafel 2), das einen Aufschluß über die Ergiebigkeit eines Zements für Injektionszwecke geben soll und das um so größer ist, je poröser bzw. wasserreicher die abgefilterte Zementschicht ist, lag insgesamt zwischen 0,63 und 0,85 cm³/g. Es war für Suspensionen mit Zementen größerer Feinheit und größeren Wasserhaltevermögens größer als für die übrigen Suspensionen. Eine Abhängigkeit vom W/Z-Wert konnte nicht festgestellt werden. Da sich ein systematischer Zusammenhang zu anderen Größen nicht ergab, wird auf das spezifische Injektionsvolumen bei den weiteren Betrachtungen nicht mehr eingegangen.

5.2.4 Suspensionen für kleine Hohlräume

Zementsuspensionen für das Einpressen in Böden mit kleinen Hohlräumen sollen für gutes Eindringen möglichst gute Fließeigenschaften aufweisen und während des Eindringens möglichst nicht sedimentieren. Diese beiden Forderungen sind gegenläufig und müssen daher so abgestimmt werden, daß sie erfüllbar sind und die Suspension geeignet ist. Aufgrund theoretischer Überlegungen (siehe auch Bilder 11 und 12) dürften für das Einpressen in Böden mit kleinen Hohlräumen Suspensionen mit einer scheinbaren Viskosität etwa von 8 bis 12 cP und mit einer Sedimentiergeschwindigkeit etwa von 8- bis 13 · 10⁻⁴ cm/s das Optimum darstellen. Auch Suspensionen mit davon nach oben oder unten etwas abweichenden Werten (siehe auch [2]) sind in der Regel noch geeignet, doch dürfte die Eignung für das Einpressen in Böden mit kleinen Hohlräumen, soweit sie nach den Fließ- und Sedimentiereigenschaften beurteilt wird, mit zunehmender Abweichung abnehmen und bei großen Abweichungen in Frage gestellt sein. Diese zunächst nur aus den Suspensionseigenschaften abgeleitete Aussage bedarf der Bestätigung durch die Ergebnisse der Einpreßversuche (siehe Abschnitt 5.3).

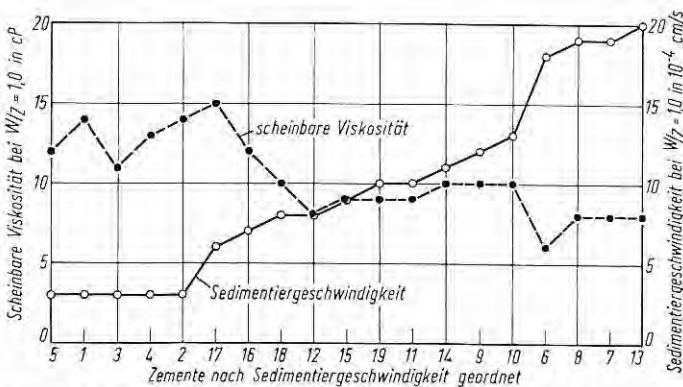


Bild 12 Scheinbare Viskosität und Sedimentiergeschwindigkeit der Suspensionen mit einem Wasserzementwert von 1,0

5.3 Eindringen der Suspension

5.3.1 Auswertung der Ergebnisse

Das Eindringen in die „Standardböden“ war sowohl bei den Einpreßversuchen mit kleinen Probekörpern (siehe Abschnitt 4.3) als auch bei den Einpreßversuchen mit großen Probekörpern (siehe Abschnitt 4.4) für die verschiedenen Zementsuspensionen sehr unterschiedlich.

Bei den Versuchen an kleinen Probekörpern schwankte die Eindringtiefe je nach Suspension, Einpreßdruck und Sand insgesamt zwischen 0 und > 50 cm (siehe Tafel 4). Die tatsächliche obere Grenze konnte nicht immer ermittelt werden, weil der Versuch nach 50 cm Eindringtiefe wegen der Höhe des Probekörpers beendet war.

Als weitere Bewertungsgröße für das Eindringen in die Sande wurde die mittlere Eindringgeschwindigkeit der Zementsuspension

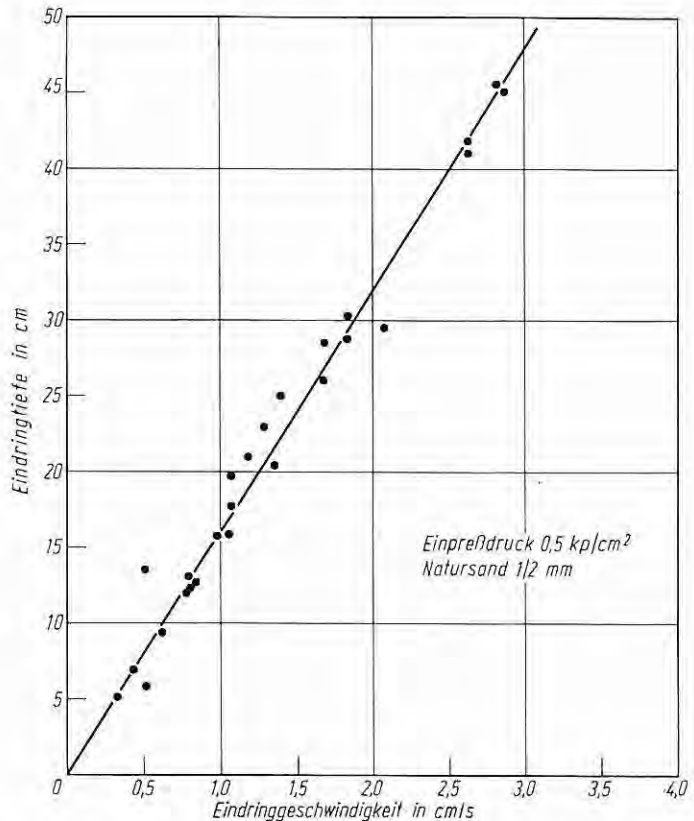


Bild 13 Eindringtiefe und Eindringgeschwindigkeit von Suspensionen in Natursand $1/2 \text{ mm}$ bei einem Einpreßdruck von $0,5 \text{ kp/cm}^2$ (kleine Probekörper)

während der ersten 15 Sekunden nach Beginn des Einpreßversuchs herangezogen. Diese Eindringgeschwindigkeit lag je nach Suspension, Sand und Einpreßdruck insgesamt zwischen 0,39 und 18,5 cm/s. Die Ergebnisse über die Eindringtiefe und die Eindringgeschwindigkeit lassen erkennen (siehe Bild 13), daß zwischen beiden ein annähernd linearer Zusammenhang besteht. Der lineare Zusammenhang ergab sich auch bei anderen Einpreßdrücken als 0,5 kp/cm². Die entsprechenden Geraden verliefen für geringere Einpreßdrücke etwas steiler und für höhere Einpreßdrücke etwas flacher. Die Neigung der entsprechenden Geraden war abhängig vom Einpreßdruck und nahm mit zunehmendem Einpreßdruck ab. Die Grundsätze für die Bewertung des Eindringens der Suspension in Natursand 1/2 mm nach der Eindringtiefe und der Eindringgeschwindigkeit sind für die Versuche mit kleinen Probekörpern in Tafel 9 angegeben.

Tafel 9 Bewertung des Eindringens in Natursand 1/2 mm bei Versuchen mit kleinen Probekörpern

Bewertung		Eindringtiefe cm	Eindringgeschwindigkeit *) cm/s
1	kein Eindringen	≤ 10	< 0,6
2	mäßiges Eindringen	10 bis 20	0,6 bis 1,2
3	befriedigendes Eindringen	20 bis 30	1,2 bis 1,9
4	gutes Eindringen	30 bis 40	1,9 bis 2,5
5	sehr gutes Eindringen	≥ 40	> 2,5

*) Einpreßdruck 0,5 kp/cm²

In der Tendenz führten die Einpreßversuche bei großen Probekörpern, die etwa das Verhalten bei praktischer Anwendung wiedergeben sollen, zu ähnlichen Ergebnissen. Unter sonst ähnlichen Verhältnissen war jedoch das Verpressen der großen Körper deutlich wirksamer als beim einachsigen Einpreßversuch mit kleinen Probekörpern, so daß zum Erkennen des unterschiedlichen Eindringens der verschiedenen Suspensionen für die großen Probekörper anstelle des Sandes 1/2 mm der Natursand 0,8/1,5 mm gewählt werden mußte.

Aufgrund der gewählten Versuchsanordnung, deren Aufwand zu begrenzen war, konnte der Einpreßerfolg bei den Versuchen mit großen Probekörpern nicht mit Hilfe der Eindringtiefe oder der Eindringgeschwindigkeit beurteilt werden. Deshalb wurden Abmessungen und Form des verpreßten Körpers zur Beurteilung herangezogen. Zur Kennzeichnung sind fünf für das Eindringverhalten typische Körperformen in Bild 14 dargestellt.

Bei Form 1 (kein Eindringen) war die Suspension nur in unmittelbarer Nähe des Einpreßrohres oder oberhalb, entlang der Zuleitung für den eingesetzten Druckaufnehmer, eingedrungen. Der Sand kann in diesem Bereich verdrängt oder aufgelockert worden sein. — Form 2 entstand, weil die Suspension nur sehr schwer in den Sand eindrang (mäßiges Eindringen) und sich daher über die ganze Höhe weitgehend gleichmäßig (zylinderförmig) ausbrei-

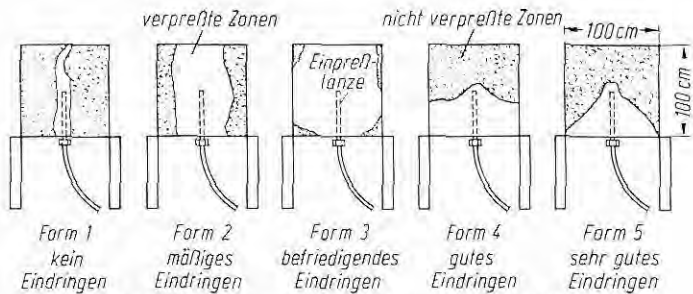


Bild 14 Beurteilung der Formen der verpreßten großen Probekörper

tete. — Die Verhältnisse bei der Ausbildung der Form 3 (befriedigendes Eindringen) waren ähnlich, jedoch war dabei die Eindringtiefe deutlich größer. — Form 4 ist ein Beispiel für „gutes“ Eindringen. Die Suspension drang dabei so ein, daß der Sand im unteren Teil des Behälters (Bereich des Einpreßrohres) rasch und vollständig durchdrungen war. — Im Falle der Form 5 drang die Suspension noch besser in den Sand ein (sehr gutes Eindringen). Fließverhalten und Form des Einpreßkörpers waren etwa so, wie sie sich auch beim Einpressen von Wasser ergeben würden.

Das Ergebnis der Beurteilung nach diesem Schema gibt Tafel 10 wieder.

Tafel 10 Bewertung des Eindringens in Natursand 0,8/1,5 mm bei Versuchen mit großen Probekörpern

Zement	Bewertung *) bei Suspensionen mit einem W/Z-Wert von					
	0,5	0,7	0,8	1,0	1,4	2,0
1	—	—	3	4	5	—
6	—	3	—	4	—	—
7	1	—	—	1	2	—
11	—	1	—	4	4	—
15	1	3	—	4	5	5
19	—	2	—	3	5	—

- *) 1 = kein Eindringen
 2 = mäßiges Eindringen
 3 = befriedigendes Eindringen
 4 = gutes Eindringen
 5 = sehr gutes Eindringen

5.3.2 Einfluß der Eigenschaften der Zementsuspensionen

Es konnte vorausgesetzt werden, daß Zementsuspensionen, die in Böden mit kleinen Hohlräumen gut eindringen, günstige Fließ-eigenschaften (Viskosität) und geringes Sedimentieren aufweisen (vgl. auch 5.2). Bei einem Vergleich der Suspensionseigenschaf-

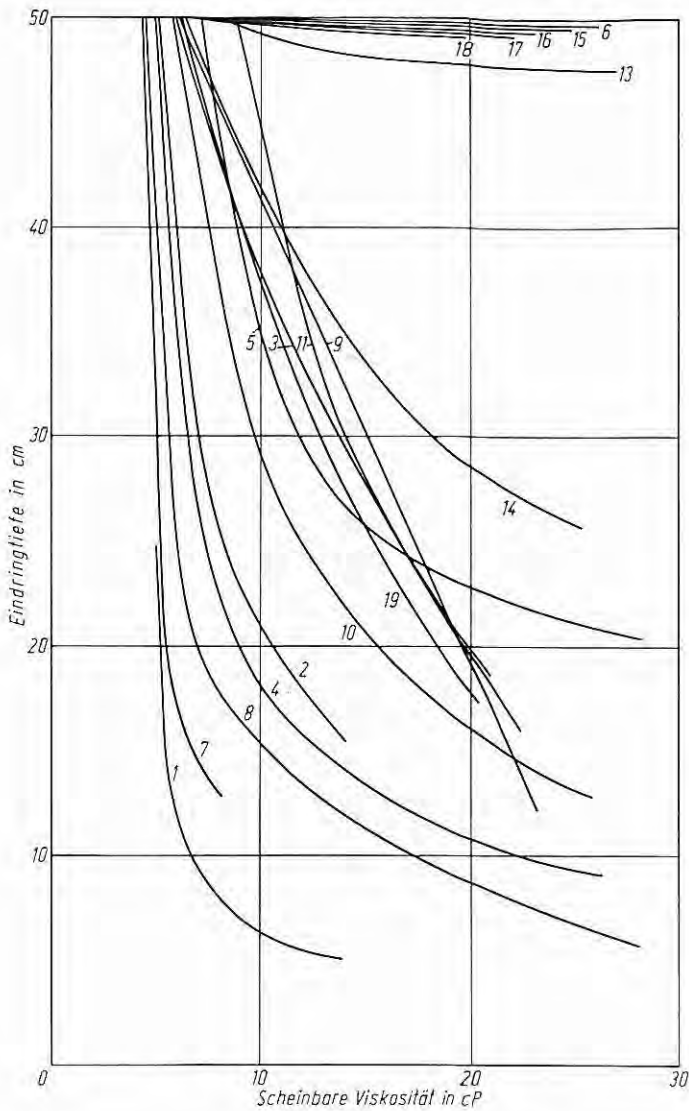


Bild 15 Eindringtiefe in Abhängigkeit von der scheinbaren Viskosität für Suspensionen aus verschiedenen Zementen (kleine Probekörper)

ten (siehe Tafel 2) mit den dazu gehörigen Eindringtiefen (siehe Tafel 4) oder den entsprechenden Eindringgeschwindigkeiten ist festzustellen, daß die Eindringtiefe der Suspension mit den meisten Zementen bei gleichem Sand und gleichem Einpreßdruck mit abnehmender Viskosität zunimmt. Eine klare Beziehung zwischen Viskosität und Eindringtiefe bzw. Eindringgeschwindigkeit konnte

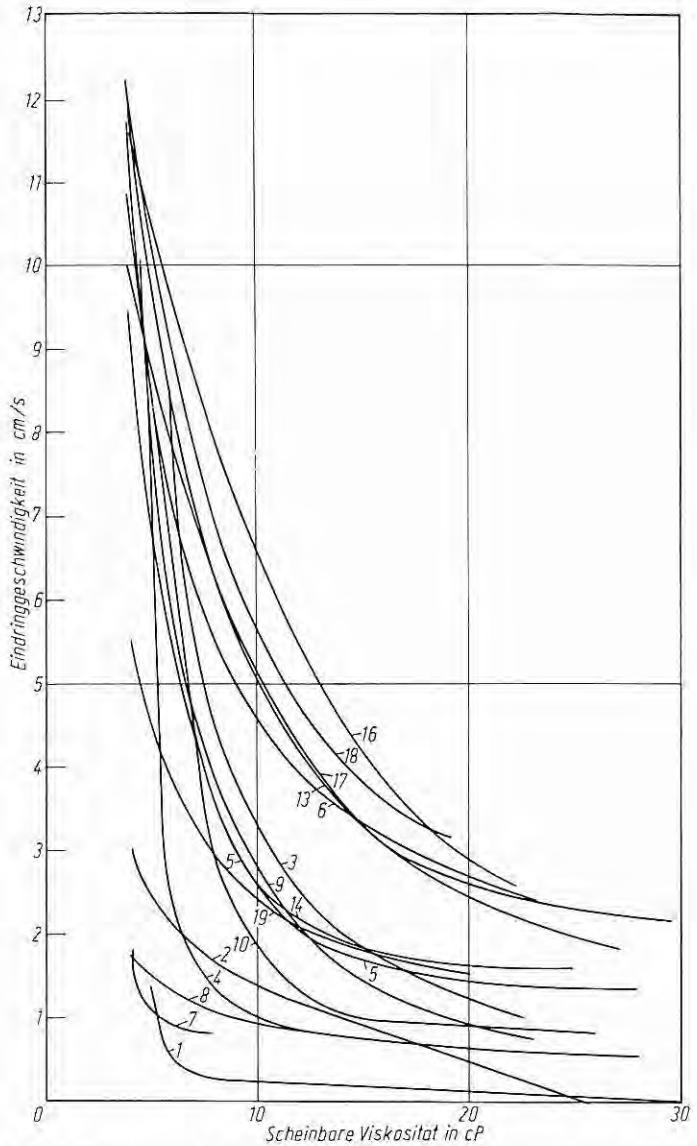


Bild 16 Eindringgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der scheinbaren Viskosität für Suspensionen aus verschiedenen Zementen (kleine Probekörper)

jedoch nicht festgestellt werden, da die Versuche an kleinen Probekörpern mit Suspensionen annähernd gleicher Viskosität bei gleichem Einpreßdruck teilweise sehr unterschiedliche Eindringtiefen bzw. Eindringgeschwindigkeiten ergaben (siehe u. a. Bilder 15 und 16). Sehr ausgeprägt war dies z. B. bei den Suspensionen aus den Zementen 1 und 17. Während die Suspensionen aus den

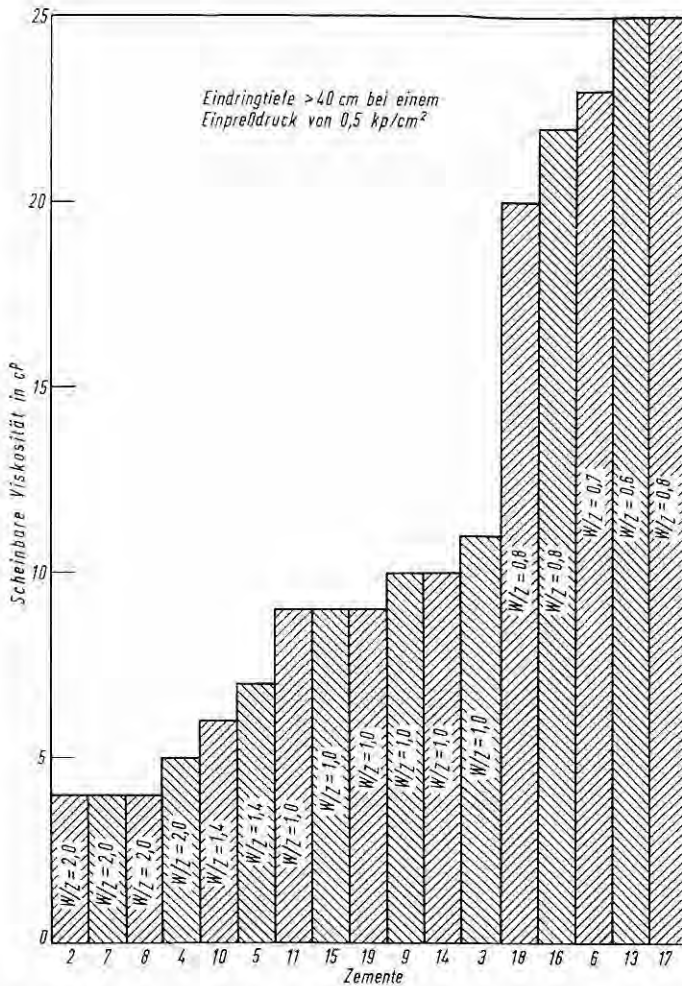


Bild 17 Scheinbare Viskosität von Suspensionen aus verschiedenen Zementen mit „sehr gutem“ Eindringvermögen bei einem Einpreßdruck von 0,5 kp/cm² (kleine Probekörper)

Zementen 2 und 4 bei etwa gleicher Viskosität und einem Einpreßdruck von 0,5 kp/cm² auch etwa gleiche Eindringtiefen aufwiesen, zeigten Suspensionen aus den Zementen 1 und 17 und teilweise Suspensionen aus den Zementen 7, 15 und 19 ($W/Z \geq 1,0$) trotz nahezu gleicher Viskosität bei den Versuchen mit kleinen Probekörpern sehr unterschiedliche Eindringtiefen.

In Bild 17 ist die scheinbare Viskosität der Suspensionen aufgetragen, die bei den Versuchen mit kleinen Probekörpern und einem Einpreßdruck von 0,5 kp/cm² über 40 cm, d. h. „sehr gut“, eindringen. Diese scheinbare Viskosität lag insgesamt zwischen

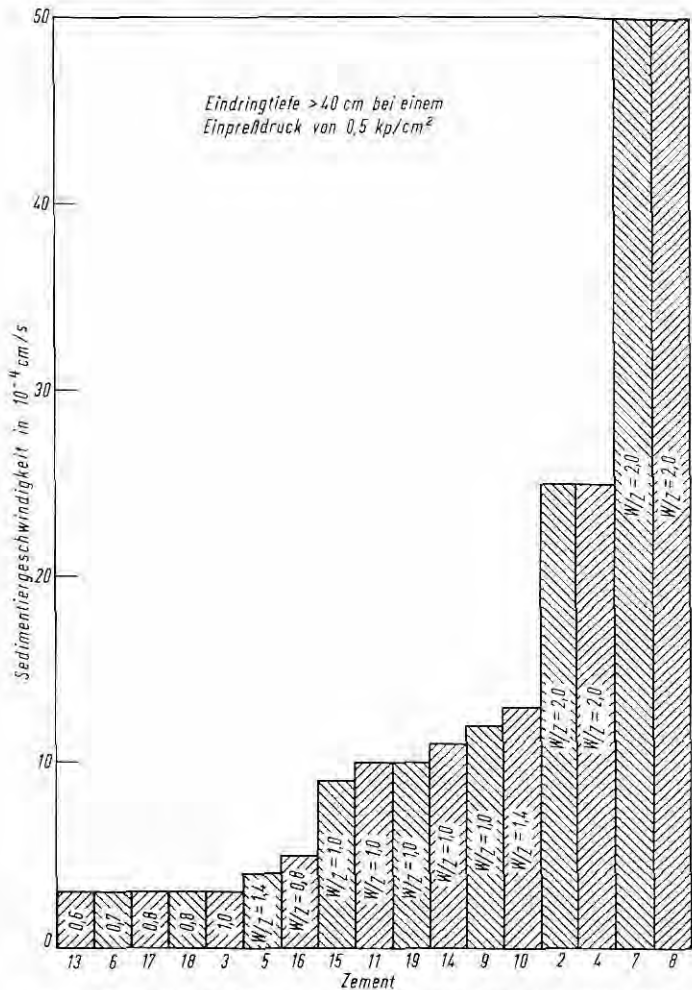


Bild 18 Sedimentiergeschwindigkeit von Suspensionen aus verschiedenen Zementen mit „sehr gutem“ Eindringvermögen bei einem Einpreßdruck von 0,5 kp/cm² (kleine Probekörper)

4 und 31 cP. Dies bedeutet, daß der in Abschnitt 5.2.4 genannte optimale Bereich zu eng ist, wenn alle Suspensionen mit „sehr gutem“ Eindringvermögen hineinfallen sollen. Andererseits ist aber festzustellen, daß sich im Viskositätsbereich ≤ 30 cP auch zahlreiche Suspensionen befinden, die bei dieser Viskosität kein „sehr gutes“ oder „gutes“ Eindringen zeigen. Die Viskosität ist daher ein für die Beurteilung und Eignung der Suspension zwar notwendiger, aber allein nicht ausreichender Kennwert.

Ähnliche Feststellungen ergeben sich auch zur Frage der Abhängigkeit zwischen Sedimentieren bzw. Sedimentiergeschwindigkeit

auf der einen Seite und Eindringtiefe bzw. Eindringgeschwindigkeit auf der anderen Seite. Eine Nachprüfung der Beziehung zwischen Eindringen und Sedimentieren sowie der Beziehung zwischen Eindringen und Sedimentiergeschwindigkeit bestätigt (siehe Tafeln 2 und 4), daß die Sedimentiergeschwindigkeit eine zutreffendere Beurteilungsgröße ist als das Sedimentieren (siehe auch Abschnitt 5.2.2). So war z. B. bei den „sehr gut“ eingedrungenen Suspensionen mit den Zementen 16, 17, 18 und 19 (mittelfeine und feine Zemente) das Sedimentieren relativ groß, aber die Sedimentiergeschwindigkeit relativ klein.

Ein klarer Zusammenhang zwischen Kennwerten des Sedimentierens und des Eindringens ergab sich jedoch nicht. In Bild 18 ist die Sedimentiergeschwindigkeit der Suspensionen aufgetragen, die bei den Versuchen mit kleinen Probekörpern und einem Einpreßdruck von $0,5 \text{ kp/cm}^2$ in Natursand $1/2 \text{ mm}$ über 40 cm , d. h. „sehr gut“, eingedrungen sind. Die Sedimentiergeschwindigkeit lag dabei insgesamt zwischen 3 - und $94 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$. Im gleichen Bereich lag auch die Sedimentiergeschwindigkeit der Suspensionen, die weniger gut oder nicht eingedrungen sind. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß sich stärkeres Sedimentieren und große Sedimentiergeschwindigkeit bei längeren Verpreßwegen nachteiliger auswirken. Auf jeden Fall dürften die Suspensionen zu bevorzugen sein, die bereits bei kleinerem Wasserzementwert und

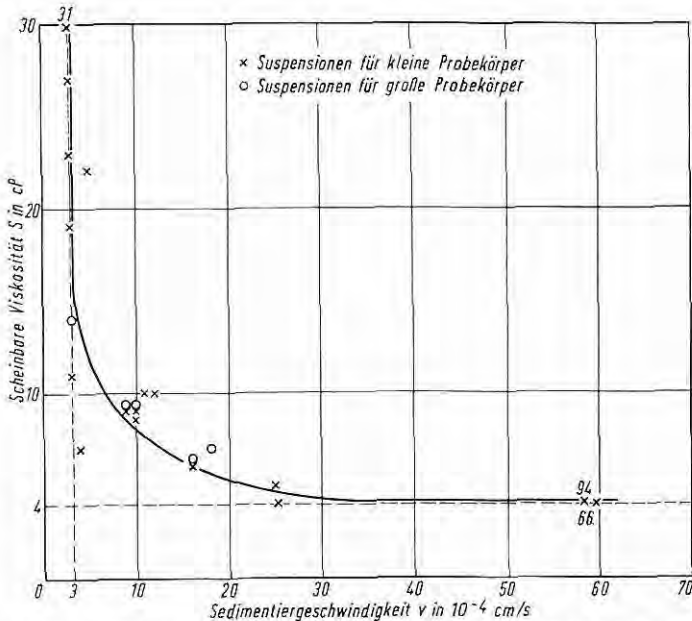


Bild 19 Zusammenhang zwischen scheinbarer Viskosität und Sedimentiergeschwindigkeit von Suspensionen mit „sehr gutem“ Eindringvermögen bei einem Druck von $0,5 \text{ kp/cm}^2$ (kleine Probekörper) und bei einem Druck von 2 bis 3 kp/cm^2 (große Probekörper)

etwas höherer Viskosität „sehr gut“ eindringen. In der Regel ist bei solchen Suspensionen die Sedimentiergeschwindigkeit kleiner als etwa $20 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

Bild 19 zeigt den Zusammenhang zwischen scheinbarer Viskosität S und Sedimentiergeschwindigkeit v von Suspensionen, die bei einem Druck von $0,5 \text{ kp/cm}^2$ in die kleinen Probekörper (Natarsand $1/2 \text{ mm}$) und bei einem Druck von 2 bis 3 kp/cm^2 in die großen Probekörper (Natarsand $0,8/1,5 \text{ mm}$) „sehr gut“ eingedrungen sind. Die einzelnen Punkte lassen sich näherungsweise durch eine hyperbelförmige Kurve etwa der Gleichung

$$S = \frac{23}{v - 3} + 4$$

darstellen. Für Einpreßarbeiten in Böden mit kleinen Hohlräumen dürften aus den bereits vorher erwähnten Gründen insbesondere Suspensionen des mittleren Bereichs, d. h. etwa mit $S \leq 20 \text{ cP}$ und $v \leq 20 \cdot 10^{-4}$ cm/s, vorteilhaft sein.

5.3.3 Einfluß des Zements

Bei den Erörterungen in Abschnitt 5.3.2 wurde ersichtlich, daß das Eindringverhalten der Suspension unter sonst gleichen Bedingungen auch von den Zementeigenschaften abhängig sein kann; nach Abschnitt 5.1 kommen hierfür im wesentlichen nur die Kornverteilung sowie Art und Zusammensetzung des Zements in Betracht.

Bei den Versuchen erwiesen sich alle einbezogenen Zemente zum Einpressen in die Natursande $1/2 \text{ mm}$ bzw. $0,8/1,5 \text{ mm}$ als geeignet. Jedoch waren Eindringtiefe und Eindringgeschwindigkeit bei gleichem Wasserzementwert und gleicher Viskosität der Suspension je nach Zement teilweise sehr unterschiedlich, so daß bei Suspensionen mit einigen Zementen für entsprechend gutes Eindringen ein größerer Wasserzementwert und damit meist eine niedrigere Viskosität oder/und ein größerer Einpreßdruck erforderlich waren.

Bereits aus den Bildern 17 und 18 geht hervor, daß Suspensionen mit „sehr gutem“ Eindringen je nach Zement sehr unterschiedliche Viskosität und sehr unterschiedliches Sedimentierverhalten aufweisen können. Die Ergebnisse der Versuche mit kleinen Probekörpern in Tafel 4 zeigen, daß von Suspensionen gleicher Viskosität nur die mit einigen Zementen noch „gut“ oder „sehr gut“ in den feinen Sand $0,8/1,2 \text{ mm}$ eingedrungen sind. Aus einem Vergleich der Tafeln 2 und 4 und aus den Bildern 15 und 16 ist zu erkennen, daß eine bestimmte Eindringtiefe oder bestimmte Eindringgeschwindigkeit bei gleicher Viskosität und gleichem Einpreßdruck mit einigen Zementen erreicht wird, mit anderen nicht. So war bei den Einpreßversuchen mit kleinen Probekörpern und einem Einpreßdruck von $0,5 \text{ kp/cm}^2$ trotz etwa gleicher Viskosität und sehr niedriger Sedimentiergeschwindigkeit z. B. das Eindringverhalten der Suspension mit den Zementen 1 und 17 sehr verschieden. Die Einpreßversuche mit großen Probekörpern lieferten ein etwas anderes Ergebnis, da sich dabei Sus-

pensionen mit Zement 1 zwar nicht „sehr gut“, aber doch „gut“ verhielten (siehe Tafel 10).

Aber auch z. B. die Suspensionen mit Zement 18 zeigten bei den Einpreßversuchen mit kleinen Probekörpern trotz etwa gleicher Viskosität und etwa gleichem Sedimentierverhalten ein deutlich besseres Eindringen als die Suspensionen mit den Zementen 11 und 19. Diese drei Zemente hatten etwa gleiche spezifische Oberfläche, unterschieden sich aber in der stofflichen Zusammensetzung und in der Kornverteilung des 80-%-Anteils oberhalb etwa $5 \cdot 10^{-3}$ mm. Dieser Kornanteil lag beim gut eingedrungenen Zement 18 etwa zwischen 4- und $32 \cdot 10^{-3}$ mm, bei den nicht so gut eingedrungenen Zementen 11 und 19 jedoch etwa zwischen 6- und 73- bzw. 5- und $61 \cdot 10^{-3}$ mm. Schließlich ist noch zu erwähnen, daß das Eindringen der Suspensionen mit Zement 6 (spezifische Oberfläche $3830 \text{ cm}^2/\text{g}$ und $d_{90} = 36 \cdot 10^{-3}$ mm) bei gleicher Viskosität, aber geringerer Sedimentiergeschwindigkeit deutlich besser ist als bei Zement 7 (spezifische Oberfläche $3030 \text{ cm}^2/\text{g}$ und $d_{90} = 72 \cdot 10^{-3}$ mm). Das Eindringen der Suspensionen mit Zement 6 ist praktisch ebenso gut wie das der Suspensionen mit Zement 15, der zwar einer anderen Zementart entspricht, aber etwa die gleichen Kornverteilungskennwerte aufweist wie Zement 6.

In Bild 20 ist das Eindringverhalten der Suspensionen mit $W/Z = 1,0$ für die Versuche mit kleinen Probekörpern (Einpreßdruck $0,5 \text{ kp/cm}^2$) und — soweit durchgeführt — mit großen Probekörpern (Einpreßdruck 2 bis 3 kp/cm^2) in Abhängigkeit von den verwendeten Zementen, ihrer spezifischen Oberfläche und der Korngröße aufgetragen, die von 90 Gew.-% der Zementkörner des jeweiligen Zements unterschritten wird. Dabei wurden die Ergebnisse der Einpreßversuche mit großen Probekörpern mit Hilfe der Bewertungsmaßstäbe der Tafeln 9 und 10 durch Ein-

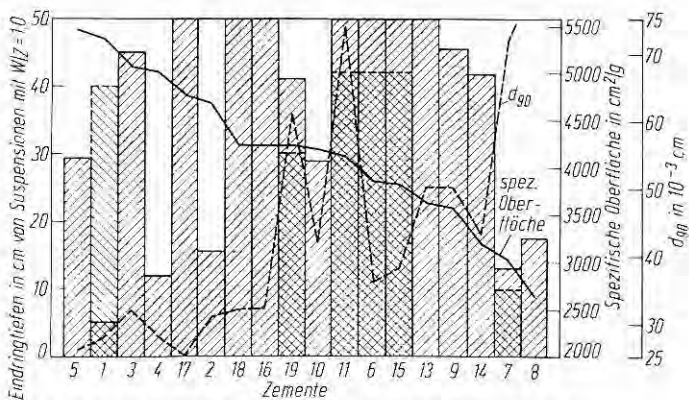


Bild 20 Eindringtiefe von Suspensionen mit verschiedenen Zementen (aufgetragen nach spezifischer Oberfläche der Zemente)

dringtiefen ersetzt. Diese Darstellung zeigt, daß die Ergebnisse über das Eindringverhalten der Suspensionen bei kleinen und großen Probekörpern — abgesehen von der Suspension mit Zement 1 — befriedigend übereinstimmen, daß aber eine klare Abhängigkeit zwischen Eindringverhalten der Suspension und spezifischer Oberfläche des Zements bzw. Korngröße, die von 90 Gew.-% der Zementkörner des jeweiligen Zements unterschritten wird, nicht besteht. Dies dürfte unter anderem darauf zurückzuführen sein, daß das Eindringen der Suspension in erster Linie von den Suspensionseigenschaften und erst in zweiter Linie vom Zement abhängt und daß sich vom Zement außer der Kornverteilung auch Art und Zusammensetzung auswirken können. Aus einem Vergleich des Eindringverhaltens der Suspensionen mit den Zementen 6 und 15 kann jedoch gefolgert werden, daß Portlandzemente und Hochofenzemente mit etwa gleichen Kennwerten für die Kornverteilung Suspensionen mit etwa gleicher Viskosität und etwa gleich gutem Eindringvermögen ergeben können. Danach wäre der Einfluß von Zementart und -zusammensetzung von untergeordneter Bedeutung.

Der Einfluß der Kornverteilung des Zements kann am Eindringverhalten der Suspensionen mit den Zementen 8, 9 und 10 bzw. 14, 15, 16 und 17 abgeschätzt werden, da die Zemente 9 und 10 durch Feinermahlen des Zements 8 und die Zemente 15 bis 17 durch Feinermahlen des Zements 14 erhalten wurden, also gleiche Zusammensetzung aufweisen. Zunächst ist festzustellen, daß sich das Feinermahlen sowohl bei den Zementen 8 bis 10 als auch bei den Zementen 14 bis 17 nicht sehr stark auf das Eindringen ausgewirkt hat. Bei den Zementen 8 bis 10 bewirkte das Feinermahlen (spezifische Oberfläche 2630, 3570 und 4180 cm²/g) kaum eine Änderung der Viskosität, jedoch bei den wasserreicheren Suspensionen eine deutliche Abnahme der Sedimentiergeschwindigkeit und eine geringe Verbesserung des Eindringens mit zunehmender spezifischer Oberfläche. Die Verbesserung des Eindringens kann sowohl durch die Veränderung der mehr vom Feinstanteil abhängigen spezifischen Oberfläche als auch durch die Veränderung der Kornverteilung im Grobbereich des Zements bedingt sein, da sich mit feinerer Mahlung auch die Grenzkorngröße, unterhalb der mehr als 90 % der Zementkörner liegen, von 82- auf 50- bzw. 41 · 10⁻³ mm änderte.

Die nur durch unterschiedliche Feinmahlung verschiedenen Zemente 14 bis 17 verhielten sich alle „sehr gut“, das Optimum lieferte jedoch nicht die Suspension mit dem feinsten Zement (Zement 17, spezifische Oberfläche 4730 cm²/g), sondern die Suspension mit einem Zement mittlerer Feinheit (Zement 15, spezifische Oberfläche 3820 cm²/g). Bei den Zementen 14 bis 17 dürfte die geringe Veränderung der Eindringtiefe auf die Veränderungen im Feinstanteil (Veränderung der spezifischen Oberfläche) zurückzuführen sein, da die Kornverteilung im Grobbereich bei diesen Zementen nicht sehr unterschiedlich war (siehe Tafel 1).

Aus den Ergebnissen der Einpreßversuche mit kleinen und großen Probekörpern kann für Böden mit kleinen Hohlräumen gefolgert werden, daß Suspensionen mit feingemahlten Zementen und mit Zementen mittlerer Feinheit in der Regel günstiger sind

als Suspensionen mit gröberen Zementen, daß bei sehr groben Zementen die Anteile an großen Zementkörnern störend sein können, daß sich auch Suspensionen aus feingemahlene Zementen „sehr gut“ verhalten können, daß aber Suspensionen aus Zementen mit mittlerer Feinheit und nicht zu breitem Grobkornbereich wohl das Optimum darstellen.

5.3.4 Einfluß des Sandes

Wie ein Vergleich der Ergebnisse der Tafeln 3 und 6 zeigt, konnten bei den Einpreßversuchen mit kleinen und mit großen Probekörpern sowohl die beiden Natursande 1/2 mm (aus Schnaittenbach und Frechen) als auch die Sande 0,8/1,2 mm (aus Stuttgart) und 0,8/1,5 mm (aus Kirchhellen) als annähernd gleich angesehen werden. Zur Unterscheidung des Eindringvermögens der Suspensionen erwies sich für die einachsigen Einpreßversuche mit kleinen Probekörpern der Sand 1/2 mm und für die räumlichen Einpreßversuche mit großen Probekörpern der Sand 0,8/1,5 mm als der geeignetste. Einpreßversuche mit kleinen Probekörpern wurden mit Sand 0,8/1,2 mm nur zur Ergänzung und insbesondere für Suspensionen durchgeführt, die in den Sand 1/2 mm „sehr gut“ eingedrungen sind. Die Eindringgeschwindigkeit war beim Sand 1/2 mm im Mittel 2,5mal so groß wie beim Sand 0,8/1,2 mm.

Bemerkenswert ist, daß Suspensionen mit fast allen Zementen auch noch in den verdichteten Sand 0,8/1,2 mm eindringen, was von Praktikern in der Vergangenheit häufig bezweifelt wurde. Suspensionen mit vielen Zementen zeigten bei Wasserzementwerten von 1,4 und 2,0 selbst in diesem Sand noch „gutes“ bis „sehr gutes“ Eindringen.

5.3.5 Einfluß des Einpreßdruckes

Der Einfluß des Einpreßdruckes auf das Eindringverhalten der Suspensionen kann nur an den Ergebnissen der Einpreßversuche mit kleinen Probekörpern beurteilt werden, da die Versuche mit großen Probekörpern — abgesehen von wenigen Ausnahmen — nur mit einem Einpreßdruck von 2 bis 3 kp/cm² durchgeführt wurden. Bei den Versuchen mit kleinen Probekörpern wurden die Suspensionen mit Drücken zwischen 0,1 und 4 kp/cm² eingepreßt.

Die Eindringtiefe und die Eindringgeschwindigkeit der Suspensionen nahm mit steigendem Druck zu, allerdings in der Regel nicht so stark wie bei Verbesserung der Fließeigenschaften. Die Verbesserung des Eindringens infolge Drucksteigerung war je nach Zement und Viskosität der Suspensionen sehr verschieden. Eine Verdoppelung des Druckes z. B. hatte bei Suspensionen hoher Viskosität meist nur eine geringe, bei Suspensionen geringer Viskosität in der Regel aber eine größere Zunahme der Eindringtiefe (etwa bis 100 %) zur Folge. Vorwiegend im Bereich höherer Viskosität ergab sich dabei auch eine Zementabhängigkeit, da z. B. bei $W/Z = 1,0$ die Drucksteigerung bei Suspensionen mit einigen Zementen (z. B. den Zementen 1, 7 und 8) nur eine sehr geringe, bei Suspensionen mit anderen Zementen (z. B. den Ze-

menten 2, 4, 5, 10, 11 und 17) jedoch eine deutliche Vergrößerung der Eindringtiefe bewirkte. Die durch Drucksteigerung nur wenig vergrößerte Eindringtiefe wäre durch eine weitere Drucksteigerung kaum, wohl aber durch eine Verringerung der Viskosität weiter zu vergrößern gewesen. Im Bereich geringer Viskosität, wie z. B. bei Suspensionen mit $W/Z = 2,0$, traten aber zementbedingte Unterschiede bei verschiedenem Einpreßdruck nur noch wenig hervor.

Die Versuchsergebnisse lassen den Schluß zu, daß eine Drucksteigerung nicht in jedem Fall und unbegrenzt eine Vergrößerung der Eindringtiefe zur Folge hat und daß sie bei Suspensionen mit möglichst geringer Viskosität und möglichst niedriger Sedi-mentiergeschwindigkeit am wirksamsten ist.

5.4 Eigenschaften der erhärteten Probekörper

Die Eigenschaften der durch Verpressen der Sande entstandenen kleinen Probekörper gehen aus Tafel 5 und die der großen Probekörper aus Tafel 9 hervor. Bei den Versuchen mit kleinen Probekörpern lag die 28-Tage-Druckfestigkeit zwischen 5 und 251 kp/cm^2 (Zylinder 6/6 cm), der Porengehalt nach Trocknung bei 105 °C zwischen 17 und 35 % und das Gewichtsverhältnis von Zement zu Sand zwischen 1 : 3,6 und 1 : 19,8. Bei den Versuchen mit großen Probekörpern ergaben sich Druckfestigkeiten zwischen 21 und 823 kp/cm^2 (Zylinder 10/10 cm).

Bei den Zylindern aus den kleinen und großen Probekörpern nahm die Druckfestigkeit mit zunehmendem Wasserzementwert der Suspensionen ab (siehe u. a. Bild 21), so daß für die Suspensionen mit allen Zementen die höchste Druckfestigkeit beim Wasserzementwert unter 1,0 und die niedrigste Druckfestigkeit beim Wasserzementwert von 2,0 erhalten wurde. Letztere betrug in der Regel 3 bis 10 % des vergleichbaren Größtwertes. Die im Einzelfall erreichte Druckfestigkeit war von der Normdruckfestigkeit des jeweiligen Zementes weitgehend unabhängig, jedoch abhängig vom Eindringverhalten der Suspension. Von Suspensionen gleichen W/Z -Wertes ergaben mit gewissen Streuungen im allgemeinen Suspensionen mit besserem Eindringverhalten die höhere Festigkeit. So schwankte die Druckfestigkeit z. B. bei den Versuchen mit kleinen Probekörpern und bei Verwendung von Suspensionen mit $W/Z = 1,0$ zwischen 23 und 159 kp/cm^2 . Dabei ergaben durchweg die gut eingedrungenen Suspensionen, z. B. mit den Zementen 3, 16, 17 und 18, hohe und die nicht gut eingedrungenen Suspensionen, z. B. mit den Zementen 1, 7 und 8, niedrige Druckfestigkeiten. Die sich bei Verwendung der Suspensionen mit $W/Z = 2,0$ einstellenden Druckfestigkeiten lagen insgesamt zwischen 7 und 46 kp/cm^2 . Sie streuten vermutlich deshalb deutlich weniger, weil bei $W/Z = 2,0$ das Eindringverhalten der Suspensionen aus verschiedenen Zementen nicht mehr sehr unterschiedlich war. Die Druckfestigkeitsergebnisse der wenigen Versuche mit großen Probekörpern zeigten die gleiche Tendenz.

Beim Vergleich der Festigkeiten der beiden Zylinder, die jeweils aus einem der kleinen Probekörper entnommen wurden, ist festzustellen, daß in den meisten Fällen für die untere Probe eine

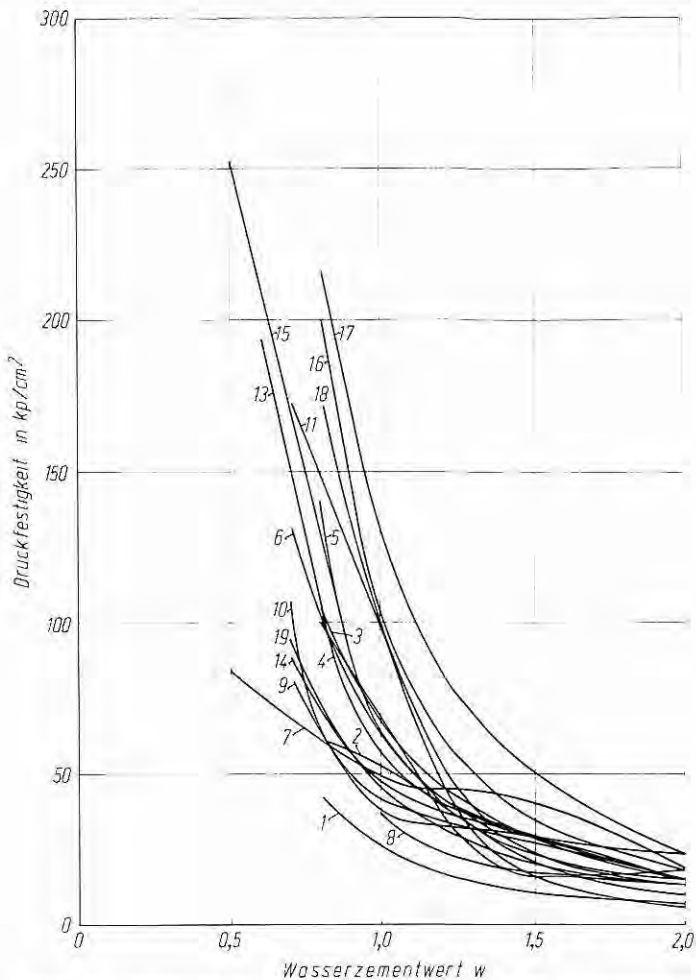


Bild 21 Druckfestigkeit des verpreßten Natursandes 1/2 mm in Abhängigkeit vom Wasserzementwert für Suspensionen aus den Zementen 1 bis 19 (kleine Probekörper)

geringere Festigkeit erhalten wurde als für die obere Probe. Eine Ausnahme bildeten die Zylinder aus den Zementen 7, 8 und 11 sowie bei einigen Zementen (z. B. Zemente 13, 15, 16 und 17) die Probekörper, die mit Suspensionen mit niedrigem Wasserzementwert verpreßt worden sind. Offensichtlich hat sich bei den zuletzt genannten Zementen, bei denen also der untere Zylinder eine höhere Festigkeit lieferte, mehr Zement im unteren Bereich angelagert, was auch aus dem dabei meist geringeren Porengehalt gefolgert werden kann. Die Zementanreicherung kann bei den Suspensionen mit den Zementen 7 und 8 durch die höhere Sedi-

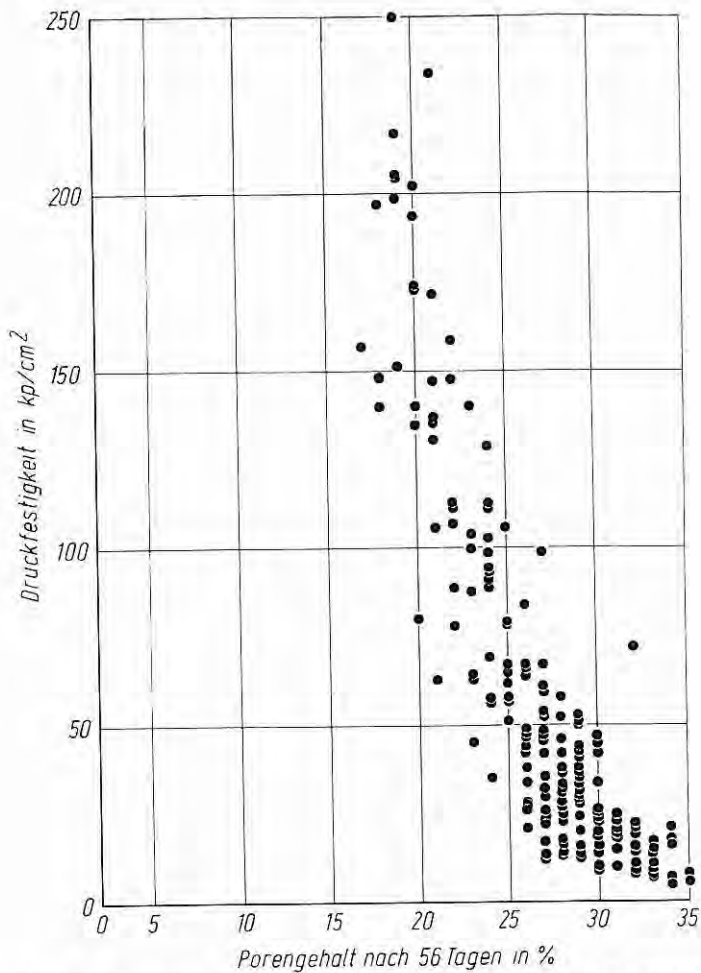


Bild 22 Druckfestigkeit des verpreßten Natursandes 1/2 mm in Abhängigkeit von seinem Porengehalt für Suspensionen aus den Zementen 1 bis 19 (kleine Probekörper)

mentiergeschwindigkeit bedingt sein und bei den Suspensionen mit den niedrigen Wasserzementwerten durch eine bessere Ausfüllung feinerer Porensysteme, da diese Suspensionen immer gut eindringen. Bei den übrigen Probekörpern, bei denen die oberen Zylinder die höhere Festigkeit ergaben, hat sich möglicherweise im oberen Bereich durch Ausfilterung feiner Zement abgelagert und eine dichtere Schicht gebildet. Das günstigste Eindringverhalten dürften die Suspensionen aufweisen, die eine möglichst gleichmäßige Festigkeit über den ganzen verpreßten Bereich des Probekörpers ergeben.

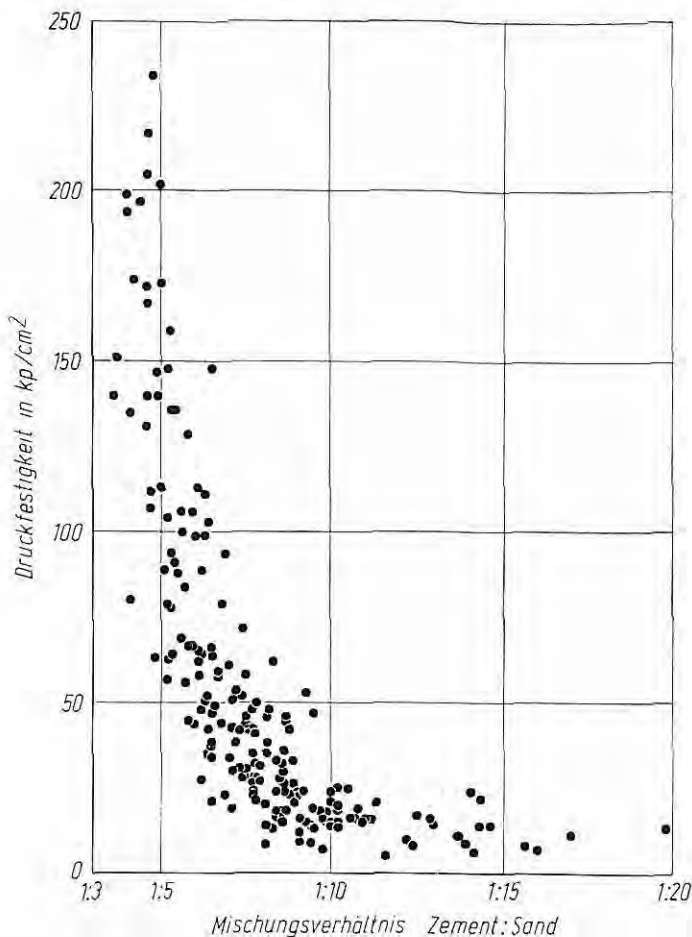


Bild 23 Druckfestigkeit des verpreßten Natursandes 1/2 mm in Abhängigkeit vom Verhältnis Zement zu Sand für Suspensionen aus den Zementen 1 bis 19 (kleine Probekörper)

Diese Feststellungen lassen sich nicht ohne weiteres auf die Ergebnisse der Einpreßversuche mit großen Probekörpern übertragen. Die Ergebnisse wurden zum Teil durch Fehlstellen in Form von Zementleimadern beeinflusst, die vermutlich durch Auflockerung des Bodens während des Einpressens entstanden. In der Regel wurde hier die höchste Druckfestigkeit in der Nähe des Einpreßrohres erhalten; die Festigkeit nahm in der Regel mit der Entfernung vom Einpreßrohr ab, etwa in der Reihenfolge c 1, b 2, a 3 (siehe Tafel 8). Diejenigen Suspensionen, die sich gut oder gar sehr gut verpressen ließen, ergaben im allgemeinen fast gleiche Festigkeiten über den ganzen Querschnitt.

Diese Ausführungen über die *Druckfestigkeit* gelten entsprechend für den Porengehalt und das Verhältnis von Zement zu Sand, da sich zwischen Druckfestigkeit und Porengehalt bzw. Druckfestigkeit und Verhältnis von Zement zu Sand ein *entsprechender Zusammenhang* ergab, siehe auch Bilder 22 und 23.

6. **Schlußfolgerungen**

Bei umfangreichen Untersuchungen über den Einfluß des Zements und der *Eigenschaften* der Zementsuspensionen auf die Injizierbarkeit in Lockergesteinsböden, die in den Jahren 1962 bis 1971 im Otto-Graf-Institut der T. U. Stuttgart, Abteilung für Erd- und Grundbau, und im *Forschungsinstitut der Zementindustrie*, Düsseldorf, mit 19 verschiedenen Zementen, mit Wasserzementwerten zwischen 0,50 und 2,00 und mit Standardböden aus *Natursanden* 1/2 mm, 0,8/1,5 mm und 0,8/1,2 mm durchgeführt wurden, läßt das Einpressen von Zementsuspensionen in Böden mit kleinen Hohlräumen die nachstehenden Folgerungen zu:

6.1 Zementsuspensionen, die gut eindringen sollen, müssen möglichst gute Fließeigenschaften aufweisen und dürfen während des Eindringens nur möglichst wenig sedimentieren.

6.2 Die Viskosität von Zementsuspensionen kann mit einem Rotationsviskosimeter zufriedenstellend bestimmt werden. Die aus den sich dabei ergebenden Fließkurven ermittelte scheinbare Viskosität sollte — bestimmt mit dem Fann-Viskosimeter — 30 cP nicht überschreiten, möglichst aber unter 20 cP liegen.

6.3 Für die Beurteilung des Sedimentierverhaltens ist die Sedimentiergeschwindigkeit eine zutreffendere Größe als das Sedimentieren, da Suspensionen mit großem, aber langsamem Sedimentieren für ein Einpressen geeignet sind. Die Sedimentiergeschwindigkeit sollte $30 \cdot 10^{-4}$ cm/s nicht überschreiten, möglichst aber unter $20 \cdot 10^{-4}$ cm/s liegen.

6.4 Zwischen Eindringverhalten und Viskosität sowie Eindringverhalten und Sedimentiereigenschaften ergab sich ein Zusammenhang, der jedoch vom Zement abhängig ist.

6.5 Für das Einpressen in die Natursande eigneten sich grundsätzlich Suspensionen mit allen einbezogenen Zementen.

Von den Zementeigenschaften ist praktisch nur die Kornverteilung des Zements von Bedeutung. Suspensionen mit feingemahlene Zementen und mit Zementen mittlerer Feinheit sind in der Regel günstiger als Suspensionen mit gröberen Zementen. Jedoch stellen Suspensionen aus Zementen mit *mittlerer Feinheit* und mit nicht zu breitem Grobkornbereich etwa das Optimum dar.

6.6 Der Wasserzementwert der Zementsuspensionen sollte 2,0 nicht überschreiten, da W/Z-Werte über 2,0 das Fließvermögen der Suspension in der Regel nicht mehr deutlich verbessern; sie sind auch praktisch im allgemeinen nicht notwendig.

6.7 Suspensionen mit fast allen Zementen drangen auch noch in den verdichteten Sand 0,8/1,2 mm ein und zeigten bei W/Z-Werten von 1,4 und 2,0 teilweise sogar noch gutes bis sehr gutes Eindringen.

6.8 Eine Steigerung des Einpreßdrucks führt nicht in jedem Falle und unbegrenzt zu einer deutlichen Vergrößerung der Eindringtiefe der Suspension. Die Drucksteigerung ist bei Suspensionen mit geringer Viskosität am wirksamsten.

6.9 Die 28-Tage-Druckfestigkeit der verpreßten Sande nimmt mit zunehmendem W/Z-Wert der Suspensionen ab und ist von der Zementnormfestigkeit praktisch unabhängig. Die Druckfestigkeit wird unter sonst gleichen Bedingungen mit den am besten eindringenden Suspensionen am größten erhalten.

6.10 Zwischen Druckfestigkeit und Porengehalt sowie zwischen Druckfestigkeit und Verhältnis Zement zu Sand des Verpreßkörpers ergab sich ein Zusammenhang, so daß für den Porengehalt und für das Verhältnis Zement zu Sand entsprechende Folgerungen gelten wie für die Druckfestigkeit.

6.11 Allgemein ist anzumerken, daß für Einpreßarbeiten in Böden mit größeren Hohlräumen die hier genannten Begrenzungen nicht zutreffen. Dort sind grundsätzlich alle Zementsuspensionen geeignet, soweit zum Füllen der Hohlräume nicht sogar Mörtel oder Beton zweckmäßig bzw. erforderlich ist.

SCHRIFTTUM

- [1] Kaiser, W.: Die technologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen und die daraus ableitbaren Folgerungen für die Praxis im Tiefbau. Dissertation T. U. Stuttgart 1968. Schriftenreihe Otto-Graf-Institut, H. 42, Stuttgart 1969.
- [2] Vorläufiges Merkblatt für Zementeinpressungen im Bergbau. beton 20 (1970) H. 1, S. 19/22; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 21/32.
- [3] Koenig, H. W.: Neuzeitliche Einpreßtechnik. Die Wasserwirtschaft 42 (1952) H. 4, S. 120/132.
- [4] Neumann, H.: Das Sedimentvolumen als Kenngröße für die Untersuchung von Injektionszementen. Zement-Kalk-Gips 11 (1958) H. 8, S. 339/345.
- [5] Donel, M.: Zur Bestimmung der Grenzen bei Poreinjektionen mit Zement und Chemikalien bei Verfestigungs- und Abdichtungsarbeiten im Bergbau und Baugewerbe. Freiburger Forschungshefte A 105, Akademie-Verlag, Berlin 1958.
- [6] Kützner, Ch.: Theoretische Betrachtungen zur Felsinjektion mit Zement und praktische Folgerungen für die Winterarbeit. Die Bautechnik 41 (1964) H. 1, S. 2/8.
- [7] Baston, K.: Beitrag zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Injektionsdruck, Einwirkradius und erreichter Druckfestigkeit unter besonderer Berücksichtigung der Elastizitätseigenschaften zementierter Proben von Lockergestein. Bergbauwissenschaften 13 (1966) H. 10, S. 401/416.
- [8] Müller-Kirchenbauer, H. M.: Zur Theorie der Injektionen. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, H. 32, Karlsruhe 1968.
- [9] Müller-Kirchenbauer, H. M.: Untersuchungen zur Eindringung von Injektionsmassen in porigen Untergrund und zur Auswertung von Probeverpressungen. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, H. 39, Karlsruhe 1969.
- [10] Jessberger, H. L.: Die Einpreßmittel für den Baugrund und ihr Verhalten bei Einpressungen. VDI-Zeitschrift 112 (1970) H. 3, S. 181/186.
- [11] Jessberger, H. L.: Die viskosen und thixotropen Eigenschaften von Ton-Wasser-Gemischen. VDI-Zeitschrift 105 (1963) H. 1, S. 8/13.
- [12] Brux, G.: Rheologische Eigenschaften von Wasserzementsuspensionen für Injektionen. Straßen- und Tiefbau 18 (1964) H. 11, S. 1260/1270.
- [13] Cambefort, H.: Bodeninjektionstechnik. Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1969.
- [14] Donel, M.: Erste Erfahrungen mit Zement-Injectol-Suspensionen beim Abdichten zweier Schächte. Glückauf 102 (1966) H. 20, S. 1052/1055.
- [15] Wittke, W.: Neues Verfahren zum Verpressen von klüftigem Fels mit Pasten auf der Basis von Zement. VDI-Zeitschrift 111 (1969) H. 22, S. 1568/1575.
- [16] Wöhlbier, H., und K. Baston: Überblick über die im Bergbau verwendeten Injektionsverfahren. Bergbauwissenschaften 11 (1964) H. 9/10, S. 197/204.
- [17] DIN 4093 — Grundbau; Einpressungen in Untergrund und Bauwerke. Richtlinien für Planung und Ausführung.
- [18] Jessberger, H. L.: Erkundung des Baugrundes für Einpreßarbeiten. VDI-Zeitschrift 111 (1969) H. 8, S. 540/547.
- [19] Maag, E.: Über die Verfestigung und Dichtung des Baugrundes. Erdbaukurs der E. T. H., Zürich 1938.
- [20] DIN 18 309 — VOB Teil C: Erdarbeiten, Einpreßarbeiten.