

Einfluß des Zements auf die Eigenschaften von Boden-Zement-Gemischen

Von Rupert Springenschmid, Wien,
und Hermann Helms-Derfert, Düsseldorf

Übersicht

Bisher sind keine klärenden Untersuchungen bekannt, aus denen hervorgeht, welchen Einfluß die Normenfestigkeit und Mahleinheit des Zements auf die Festigkeit und Weiterbeständigkeit von Boden-Zement-Gemischen haben. Nach anerkannter Verlahrensweise wurden aus 10 Zementen verschiedener Art, Güteklasse und Mahleinheit unter Benutzung von 3 typischen Böden (Kiessand, Flugsand und toniger Schluff) Zylinder zur Beurteilung der Druckfestigkeit in verschiedenem Alter und der Witterungsbeständigkeit hergestellt und geprüft.

Wie zu erwarten war, nahmen die Festigkeit und die Frostbeständigkeit in jedem Falle mit dem Zementgehalt zu. Wesentlich ist, daß die Druckfestigkeit der Boden-Zement-Gemische unter sonst gleichen Verhältnissen und für den üblichen Bereich des Zementgehalts etwa linear mit der Zementnormenfestigkeit anstieg, wie dies für Beton bekannt ist. Dementsprechend wurde auch die Abwitterung beim Frostversuch mit steigender Normenfestigkeit zunehmend geringer erhalten. Ein hervortretender, gleichgerichteter Einfluß der Mahleinheit auf die Festigkeit und Witterungsbeständigkeit der Boden-Zement-Gemische war — wenn die damit verbundene Erhöhung der Zementnormenfestigkeit eliminiert wurde — nicht zu erkennen.

1. Allgemeines

Unter den vielen Möglichkeiten der Bodenverfestigung mit Zement im Straßen-, Erd- und Wasserbau treten in Deutschland drei Anwendungsgebiete besonders hervor:

Verfestigungen der obersten 15 cm der Frostschutzschichten von Land- und Bundesstraßen, Autobahnen und Flugplätzen (früher als „Vermörtelung“ bezeichnet),

selbständige Tragschichten für Wirtschaftswege, welche nurmehr eine leichte bituminöse Decke von 2 bis 3 cm Dicke erhalten, und

Verbesserung bindiger Böden (Schluff-Ton-Böden) des Erdplanums von Straßen, um das Planum auch bei Niederschlägen für den Baustellenverkehr befahrbar zu machen und ein Eindringen von weichem, bindigem Boden in den Kiessand der Frostschutzschichten zu verhindern.

Je nach Verwendungsart verlangt man im ersten Falle eine 7 Tage-Druckfestigkeit von 30 kp/cm², während man sich bei Straßen und Wegen mit schwachem Verkehr und dünner Decke mit 18 kp/cm² und bei bindigen Baustellenböden mit dem Nachweis der Frostbeständigkeit begnügt [1, 2, 3]. Bei der Bodenverbesserung wird der Boden vor allem wasserfest gemacht, ohne daß man eine bestimmte Mindestdruckfestigkeit fordert – ähnlich wie bei der Stabilisierung mit Kalk.

Vor der Ausführung von Bodenverfestigungen ist stets in einer Eignungsprüfung festzustellen, ob der Boden mit Zement erhärtet und welcher Zementgehalt, welcher Wassergehalt und welche Dichte der Verfestigung nötig sind, um die erforderliche Druckfestigkeit und Wetterbeständigkeit zu erreichen.

Die Eigenschaften des Bodens bestimmen dabei in erster Linie die Eigenschaften der Verfestigung – im Gegensatz zum Beton, bei dem der Einfluß des Zuschlags ganz hinter dem Einfluß der Eigenschaften des Zementleims zurücktritt. Das ist der Grund, weshalb sich die Bodenverfestigung aus der Bodenmechanik und nicht aus der Betontechnologie entwickelt hat und man bisher den Einfluß des Zements (abgesehen von der Zementmenge) wenig beachtete. So muß auch – wie in der Bodenmechanik – bei Bodenverfestigungen der Grad der Verdichtung genau bestimmt sein, weil bei den niedrigen Zementbeigaben und der meist ungünstigen Kornabstufung eine „vollständige“, praktisch luftporenfreie Verdichtung wie bei Beton nicht möglich ist und der Gehalt an Luftporen (Verdichtungs-poren) die Festigkeiten sehr stark beeinflußt. Als ein Verdichtungsmaß, das in der Praxis erreicht werden kann, hat sich wie im Erdbau die einfache Proctordichte [4] bewährt. Sie wird erreicht, wenn ein Boden mit dem für die Verdichtung günstigsten Wassergehalt im Proctor-Zylinder (d = 10 cm, h = 12 cm) in 3 Schichten mit je 25 Schlägen eines aus 30 cm Höhe fallenden, 2,5 kg schweren Stampfers verdichtet wird.

Die meisten Einflüsse auf die Eigenschaften von Boden-Zement-Gemischen sind im Schrifttum bereits behandelt [5, 6, 7, 8, 9], besonders ausführlich im Highway Research Board, Bulletin 292 [5], und im Highway Engineering Handbook von K. B. Woods [8], wo unter anderem über die Einflüsse von Bodenart, Zementgehalt, Güte und Dauer der Durchmischung, Lagerung und in begrenztem Umfang über den Einfluß der Zementart berichtet wird. Zu den Zementeigenschaften wird lediglich bemerkt, daß man den gewöhnlichen Portlandzement (Type I) mit einem LP-Zement gleicher Type (Type IA), dem also bereits im Zementwerk ein luftporenbildendes Zusatzmittel beigegeben wurde, vertauschen kann, ohne daß sich die Druckfestigkeit und die Wetterbeständigkeit des Boden-Zement-Gemisches wesentlich ändern. Nach Versuchen von D. T. Davidson und B. W. Bruns [10] verbessert Portlandzement der Type III (etwa PZ 475 entsprechend) die Druckfestigkeit und Wetterbeständigkeit je nach Bodenart in kleinerem oder größerem Ausmaß. Englischen Versuchen [11] zufolge kann mit feineren Zementen, die durch feinere Mahlung oder durch Absieben über einem 0,06 mm-Maschensieb erhalten werden, unter sonst gleichen Verhältnissen die 7- und 28 Tage-Festigkeit beträchtlich gesteigert wer-

den. Weitergehende Beziehungen zwischen Normenfestigkeit sowie Mahlfeinheit des Zements oder der Zementart und den Eigenschaften der Boden-Zement-Gemische sind den Verfassern aus dem Schrifttum nicht bekannt. Man weiß also nicht, ob sich wie beim Beton die Festigkeit einer Boden-Zement-Mischung unter sonst gleichen Bedingungen in gleichem Verhältnis ändert wie die Normenfestigkeit des Zements.

Eine Klärung der Zusammenhänge zwischen Zementeigenschaften und den Eigenschaften des erhärteten Boden-Zement-Gemisches wäre nicht nur für die Auswahl des Zements nützlich, sondern auch beim Austausch der Zemente, da zum Zeitpunkt der Eignungsprüfung meist noch nicht feststeht, welcher Zement für die Ausführung verwendet wird, oder weil der Zement auf der Baustelle aus irgendeinem Grund kurzfristig gewechselt werden muß. Mit den nachfolgend beschriebenen Versuchen soll hierzu ein Beitrag geliefert werden.

2. Versuchsplan

In die Versuche wurden 8 verschiedene Zementarten und Zementgüteklassen einbezogen, und zwar je 1 Portlandzement der Güteklassen Z 275, Z 375 und Z 475, 1 Eisenportlandzement Z 275, je 1 Hochofenzement Z 275 mit rd. 50 % und mit rd. 70 % Hütensandanteil, 1 Traßzement Z 275 und 1 hydrophobierter Portlandzement Z 375. Davon wurden 2 Zemente in einer Labormühle nachgemahlen, um den Einfluß der Mahlfeinheit bei gleicher chemisch-mineralogischer Zusammensetzung des Zements zu erfassen. Obwohl diese insgesamt 10 Zemente nicht für die rd. 360 Zemente in der Bundesrepublik repräsentativ sind, dürfte damit doch ein Überblick geschaffen werden, der für viele praktische Belange allgemeinere Schlüsse ermöglicht.

Die verwendeten drei Böden überdecken einen weiten Bereich der in der Praxis für Bodenverfestigungen vorkommenden Typen: ein abgestufter Kiessand, ein gleichkörniger Flugsand und ein bindiger Boden. Zweifellos beeinflussen die mineralogische Zusammensetzung und die Art der Ionensättigung besonders bei bindigen Böden mit großer Kornoberfläche die Reaktion zwischen Zement und Bodenteilchen stark und bei allen Zementen auch nicht in gleicher Weise, so daß hier noch weitere Versuche nötig sind.

Der abgestufte Kiessand war der grobkörnigste Boden; er wurde gewählt, weil die Frostschuttschicht unter schwer belasteten Straßen stets aus abgestuftem Kiessand oder Sand besteht und weil deren oberste Schicht in zunehmendem Maße mit Zement verfestigt wird. Ein abgestufter Sand brauchte in die Versuche nicht aufgenommen zu werden, weil er sich wahrscheinlich ähnlich wie Kiessand verhält.

Der Flugsand unterscheidet sich von dem Kiessand durch seine größere Feinheit und seine Gleichförmigkeit; er wird in Norddeutschland, wo Kiessande selten sind, sehr oft als Tragschicht für Wirtschaftswege mit Zement verfestigt. Als schwach bindiger Boden wurde ein toniger Schluff gewählt, der in anderen Gegenden zum Bau von Wirtschaftswegen dient. Ein hochplastischer

scher Tonboden wurde in die Versuche nicht einbezogen, weil solche Böden selten mit Zement verfestigt werden. (Sie lassen sich nur außerordentlich schwer durchmischen und erfordern einen sehr hohen Zementgehalt. Wenn solche Böden auf der Baustrecke anstehen, ist es wirtschaftlicher, sie gegen Sande oder Kiessande auszutauschen.) Da sich der Einfluß des Zements bei unterschiedlichem Zementgehalt und Alter verschieden auswirken kann, wurden mit jedem der drei Böden und jedem der 10 Zemente Boden-Zement-Gemische mit 3 verschiedenen Zementgehalten hergestellt, die dem in der Praxis vorkommenden Bereich entsprachen. Insgesamt entstanden somit 90 verschiedene Boden-Zement-Gemische.

Diese 90 Gemische wurden nach 7, 28 und 90 Tagen Lagerung auf Druckfestigkeit und nach 7 Tagen auf Frostbeständigkeit geprüft (letztere bei den Kiessandmischungen nicht, da mit ihnen stets eine für Zwecke des Straßen- und Erdbaues ausreichende Frostbeständigkeit erreicht wird). Für eine praktische Beurteilung reichen die Druck- und die Frostprüfung aus.

Der angelieferte Flugsand enthielt einen geringen Anteil organischer Stoffe, wie sie häufig in oberflächennahen Schichten vorkommen. Er wurde verwendet, weil eine Paralleluntersuchung des gleichen, jedoch zuvor gereinigten Flugsandes einen Schluß auf die Größenordnung einer Verzögerung des Erhärtens durch organische Bestandteile in Boden-Zement-Gemischen erlaubte. In der Praxis kommt es verhältnismäßig oft vor, daß schwach wasserdurchlässige Sande, welche nur wenig unter der Humusschicht liegen, durch organische Stoffe so verunreinigt sind, daß die Zementerhärtung um mehrere Tage oder Wochen verzögert wird. Dies ist auch der Grund, weshalb man bei Bodenverfestigungen in erster Linie die 7 Tage-Festigkeiten prüft; ein Boden-Zement-Gemisch mit ausreichender 28 Tage-Festigkeit kann, wenn es organische Stoffe enthält, unter Umständen nach 7 Tagen noch nicht befahrbar sein und so zu Schwierigkeiten im Baubetrieb führen.

3. Baustoffe

3.1 Zement

Eine Zusammenfassung der Zemente und ihrer wichtigsten Eigenschaften nach DIN 1164 enthält Tafel 1. Die Normenfestigkeit nach 28 Tagen lag zwischen 374 und 574 kp/cm², die spez. Oberfläche nach Blaine zwischen 2840 und 5220 cm²/g. Die Zemente A und C wurden so weit nachgemahlen, daß die spez. Oberfläche um rd. 1100 bzw. 700 cm²/g zunahm. Dadurch entstanden die Zemente B und D. Die Normenfestigkeit dieser nachgemahlten Zemente war nach 7 Tagen – beim Zement B auch nach 28 Tagen – etwas höher als die der Ausgangszemente A und C, nach 90 Tagen – beim Zement D auch nach 28 Tagen – dagegen nicht nennenswert höher. Durch die feinere Mahlung wurde das Erstarren beschleunigt. Um diesen Einfluß wieder aufzuheben, wurden dem Zement B 1,4 und dem Zement D 2,8 Gew.-% Gips (CaSO₄ · 2 H₂O) zugegeben.

Tafel 1 Zemente und ihre wichtigsten Eigenschaften nach DIN 1164

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bezeichnung	Zement Art, Güteklasse, Werk	Mahlfeinheit		Erstarren bei		Biegezugfestigkeit nach Tagen			Druckfestigkeit nach Tagen		
		Rückstand auf Sieb 0,09 DIN 4188	spez. Oberfläche (Blaine)	Beginn	Ende	7	28	90	7	28	90
—	—	Gew.-%	cm ² /g	h;min	h;min	kp/cm ²			kp/cm ²		
A	PZ 275 (wbn)	9,4	2840	2;15	3;40	60	73	80	297	438	503
B	PZ 275 (wbn), nachgemahlen	4,3	3940	1;25	3;10	61	76	86	322	481	512
C	PZ 375 (wdo)	4,4	3100	2;30	4;30	69	85	93	382	567	550
D	PZ 375 (wdo), nachgemahlen	2,3	3820	1;45	3;15	75	88	100	414	553	550
E	PZ 475 (swi)	0,6	5220	2;00	4;15	87	84	97	511	574	599
F	HOZ 275 (ntu), rd. 50 % HS	1,4	3830	3;20	4;50	54	81	92	269	443	506
G	HOZ 275 (wre), rd. 70 % HS	0,4	3690	5;50	8;00	54	89	95	209	374	491
H	EPZ 275 (swe)	2,8	2890	3;00	4;40	58	85	93	279	466	512
I	Traubzement 30/70 (stb)	2,5	3460	4;35	6;20	51	75	93	233	413	514
K	PZ 375 (ntu), hydrophobiert	0,4	3770	4;55	6;10	71	81	81	369	471	574

3.2 Böden

Bild 1 gibt die Sieblinien der 3 verwendeten Böden wieder. Der Kiessand stammte vom Rhein; er hatte einen Ungleichkörnigkeitsgrad $U = d_{60}/d_{10} = 7$ und entsprach den Anforderungen, die die ZTVE – St B 59 [12] an ein frostsicheres, gut abgestuftes Kiessand-Gemisch stellen. Er eignete sich somit als Frostschuttschicht für klassifizierte Straßen. Der Flugsand stammte aus einer Grube nahe Bremerhaven. Er wies, wie aus der Sieblinie hervorgeht, einen für diese Sande typischen, sehr niedrigen Ungleichkörnigkeitsgrad von 1,3 auf, so daß er im verdichteten Zustand nach einen sehr großen Hohlraumgehalt hatte. Der tonige Schluff schließlich stammte aus Tiefenbroich bei Düsseldorf. Er enthielt rd. 13 % tonige Bestandteile ($< 0,002$ mm) und 77 % Schluff (Korn zwischen 0,06 und 0,002 mm), war schwach plastisch (Fließgrenze rd. 30 %, Plastizitätszahl rd. 8 %) und kann in der Praxis noch wirtschaftlich mit Zement verfestigt werden.

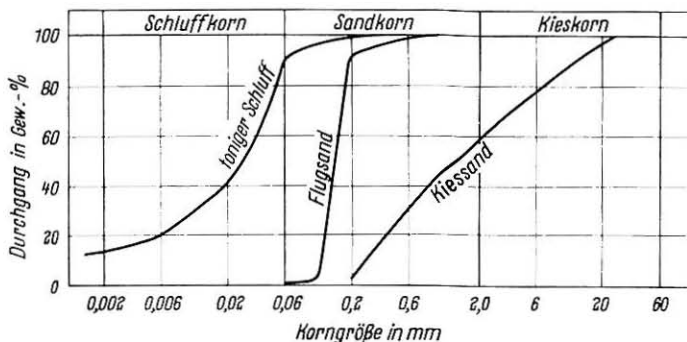


Bild 1 Kornverteilung der 3 Böden

Der günstigste Wassergehalt und die zugehörige Trockenrohdichte wurden für alle 3 Böden mit dem Proctorversuch ermittelt, und zwar beim Kiessand mit 1 Zement, beim Flugsand mit 3 und beim Schluff mit allen 10 Zementen – jeweils mit dem mittleren der drei untersuchten Zementgehalte. Aus englischen Versuchen [13] und eigenen Vergleichsprüfungen ist bekannt, daß der optimale Wassergehalt bei Veränderungen des Zementgehaltes um bis zu 2 % praktisch unverändert bleibt.

Die Ergebnisse sind in Tafel 2 zusammengestellt. Die Spalten 9 und 10 erlauben den Schluß, daß die Proctordichte und der optimale Wassergehalt innerhalb der Prüfgenaugigkeit von der Zementart unabhängig sind.

Die Prüfung der Böden auf organische Bestandteile mit Natronlauge nach DIN 4226 [14], § 5, war beim Kiessand und tonigen Schluff negativ, da die überstehende Flüssigkeit farblos blieb. Beim Flugsand war die überstehende Flüssigkeit nach einem Einwirken von 24 Stunden mittelbraun und ließ daher organische Verunreinigungen vermuten. (Eine Bestätigung hierfür ergaben die unter 5.4 erläuterten Versuchsergebnisse.)

Tafel 2 Ergebnisse der Proctorversuche

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bezeichnung des Zements	Kiessand			Flugsand			toniger Schluff		
	Zement- gehalt ¹⁾	opt. Wasser- gehalt ²⁾	Trocken- rohdichte	Zement- gehalt ¹⁾	opt. Wasser- gehalt ²⁾	Trocken- rohdichte	Zement- gehalt ¹⁾	opt. Wasser- gehalt ²⁾	Trocken- rohdichte
—	%	%	kg/dm ³	%	%	kg/dm ³	%	%	kg/dm ³
A	7	8	2,03	—	—	—	9	15,5	1,79
B	—	—	—	—	—	—	9	15,5	1,80
C	—	—	—	—	—	—	9	15	1,79
D	—	—	—	—	—	—	9	15	1,80
E	—	—	—	9	11	1,78	9	15	1,78
F	—	—	—	9	10	1,79	9	15,5	1,80
G	—	—	—	—	—	—	9	15,5	1,79
H	—	—	—	—	—	—	9	14,5	1,80
I	—	—	—	—	—	—	9	15,5	1,79
K	—	—	—	9	10	1,79	9	16	1,80

¹⁾ bezogen auf 100 % trockenen Boden²⁾ bezogen auf 100 % trockenes Boden-Zement-Gemisch

4. Durchführung der Versuche

4.1 Mischungen

Die Zementgehalte betragen beim Kiessand 4, 6 und 8%, beim Flugsand und beim tonigen Schluff 7, 9 und 11%, immer in Gew.-% bezogen auf 100% trockenen Boden. Der Wassergehalt lag beim tonigen Schluff bei 15%, beim Flugsand bei 10% und beim Kiessand bei 6,5%, bezogen auf 100% trockenes Boden-Zement-Gemisch. Bei Kiessanden ergeben sich erfahrungsgemäß die größten Festigkeiten bei einem Wassergehalt, der bis zu 2% unter dem optimalen Wassergehalt liegt. Deshalb wurde für den Kiessand ein Wassergehalt von 6,5% und nicht von 8% (vgl. Tafel 2) gewählt.

In einem Teil der Flugsandprobe wurden die organischen Stoffe mit Natronlauge neutralisiert und anschließend mit Wasser ausgewaschen. Der so gereinigte Flugsand wurde anschließend mit 7% Zement verfestigt.

4.2 Herstellen, Verdichten und Lagern

Aus jeder der unter 4.1 genannten 90 Mischungen (3 Böden \times 10 Zemente \times 3 Zementgehalte) wurden beim Flugsand und beim tonigen Schluff 10, beim Kiessand 9 Probezylinder hergestellt, und zwar je 3 für die Prüfung der Druckfestigkeit nach 7, 28 und 90 Tagen, und beim Flugsand und tonigen Schluff zusätzlich je 1 für die Frostprüfungen. Hinzu kamen die Zylinder aus den 10 Mischungen mit gereinigtem Flugsand, und zwar bei den Zementen A, D, E und I je 6 für die Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen und bei den übrigen Zementen je 3 für die 7 Tage-Druckfestigkeit.

Alle Frostkörper und die Druckzylinder aus Kiessand hatten die Abmessungen des Proctortopfes, $h = 12$ cm und $d = 10$ cm. Die Druckzylinder des Flugsandes und des tonigen Schluffes waren kleiner ($h = d = 5$ cm).

Boden und Zement wurden zunächst 2 Minuten trocken und nach der Wasserbeigabe noch 3 bis 7 Minuten je nach Bodenart von Hand gemischt. Dann wurde das Gemisch im Proctorzylinder in 3 Schichten in der im Proctorversuch vorgesehenen Weise eingestampft. Die 5 cm-Zylinder wurden in zwei Schichten auf Proctordichte verdichtet. Vor dem Einbringen einer neuen Schicht mußte die Oberfläche der alten Schicht leicht aufgeraut werden, um eine gute Verbindung der einzelnen Schichten zu sichern.

Die Probezylinder konnten sofort entformt werden. Sie lagerten zwischen Herstellung und Prüfung in feuchter Luft von $+ 20^\circ\text{C}$ und rd. 100% rel. Feuchte.

4.3 Prüfen

Um eine Trockenfestigkeit auszuschalten, lagerten die Probezylinder unmittelbar von der *Druckprüfung* bis zu ihrer Sättigung in Wasser. Für die 5 cm-Probezyylinder aus Flugsand wurde 1 h, für die 12 cm-Probezyylinder aus Kiessand wurden 4 h und für die 5 cm-Probezyylinder aus tonigem Schluff 24 h als

ausreichend angesehen. Die Zylinder waren oben und unten so ebenflächig, daß man auf ein Abgleichen verzichten konnte.

Die Frostprüfung wurde in Anlehnung an die amerikanische Prüfnorm ASTM Designation D 560-57 [2, 15] durchgeführt. Die Probezylinder wurden 12mal bei -23°C eingefroren und bei $+20^{\circ}\text{C}$ an Luft von 90 bis 100% rel. Feuchte aufgetaut. Während der Frostperiode und auch während des Auftauens standen sie auf nassen Filzplatten, damit sie kapillar Wasser ansaugen konnten. Das Kriterium für die Frostbeständigkeit ist die Abnahme des Trockengewichtes der Zylinder in %, die durch die Frostbeanspruchung und durch Abbürsten mit einer Drahtbürste in genau festgelegter Weise hervorgerufen wird.

5. Eigenschaften der Boden-Zement-Gemische

Als Grundlage der folgenden Erörterungen sind in den Tafeln 3 bis 5 die geprüften Druckfestigkeiten in kp/cm^2 und in % der zugehörigen Zementnormenfestigkeiten zusammengestellt; Tafel 6 enthält die Gewichtsverluste bei den Frostversuchen.

5.1 Einfluß des Zementgehaltes

Wie zu erwarten war, stieg mit zunehmendem Zementgehalt die Druckfestigkeit des Boden-Zement-Gemisches an. Beispiele finden sich in Bild 2 für Probezylinder aus Kiessand, geprüft

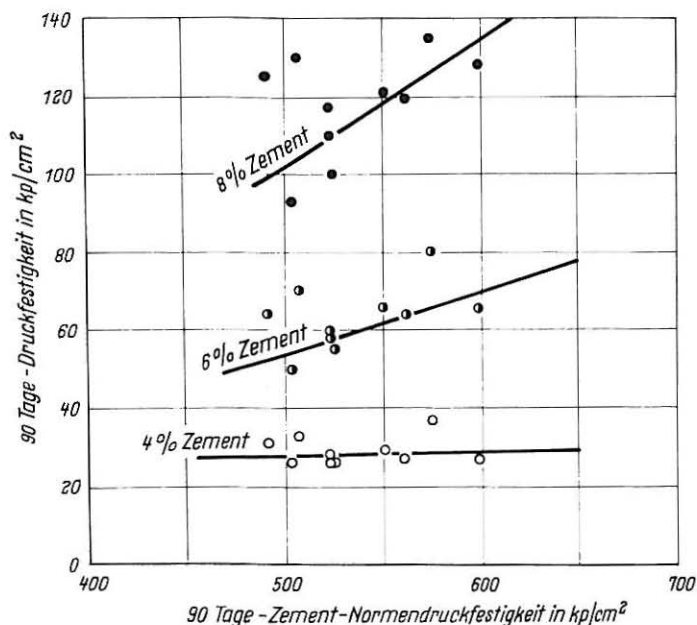


Bild 2 Einfluß der Zementnormenfestigkeit und des Zementgehaltes auf die Druckfestigkeit von Probezylindern mit Kiessand nach 90 Tagen

Tafel 3 Druckfestigkeiten der Probezylinder aus Kiessand

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Zement	Zementgehalt 4 ‰						Zementgehalt 6 ‰						Zementgehalt 8 ‰					
	Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen						Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen						Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen					
	absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit			absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit			absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90
–	kp/cm ²			‰			kp/cm ²			‰			kp/cm ²			‰		
A	11	19	26	4	4	5	26	44	50	9	10	10	51	89	93	17	20	19
B	13	19	26	4	4	5	33	57	60	10	12	12	61	100	110	19	21	21
C	18	25	27	5	4	5	40	61	64	10	11	12	76	105	119	20	19	21
D	22	28	29	5	5	5	46	63	66	11	11	12	84	115	121	20	21	22
E	24	31	27	5	5	5	59	71	66	12	12	11	116	124	128	23	22	21
F	13	27	33	5	6	7	29	58	70	11	13	14	68	102	130	25	23	26
G	10	22	31	5	6	6	22	59	64	11	16	13	52	90	125	25	24	25
H	12	21	28	4	5	6	30	52	58	11	11	11	65	97	117	23	21	23
I	11	21	26	5	5	5	24	46	55	10	11	11	48	86	100	21	21	20
K	26	32	37	7	7	6	58	70	80	16	15	14	103	130	135	28	28	23

Tafel 4 Druckfestigkeiten der Probezylinder aus Flugsand

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Zement	Zementgehalt 7 %						Zementgehalt 9 %						Zementgehalt 11 %					
	Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen						Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen						Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen					
	absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit			absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit			absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90
—	kp/cm ²			%			kp/cm ²			%			kp/cm ²			%		
A	7	14	18	2	3	4	10	20	33	4	5	7	22	37	47	7	9	9
B	9	15	17	3	3	3	12	21	33	4	4	6	25	37	48	8	8	9
C	8	14	19	2	2	3	17	25	36	5	4	7	27	38	51	7	7	9
D	10	18	20	2	3	4	18	27	38	4	5	7	32	41	58	8	7	11
E	15	18	21	3	3	3	25	30	37	5	5	6	45	51	64	9	9	11
F	10	19	26	4	4	5	14	33	45	5	8	9	26	46	68	10	10	14
G	10	25	37	5	7	7	14	38	67	7	10	14	25	50	73	12	13	15
H	9	16	19	3	4	4	15	25	38	5	5	7	24	36	57	9	8	11
I	6	12	15	3	3	3	8	18	30	4	4	6	17	29	46	7	7	9
K	14	20	28	4	4	5	26	39	44	7	8	8	41	56	65	11	12	11

Tafel 5 Druckfestigkeiten der Probezylinder aus tonigem Schluff

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Zement	Zementgehalt 7 %						Zementgehalt 9 %						Zementgehalt 11 %					
	Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen						Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen						Druckfestigkeit der Bodenverfestigung nach Tagen					
	absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit			absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit			absolut			bezogen auf zugehörige Zementnormenfestigkeit		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90
—	kp/cm ²			%			kp/cm ²			%			kp/cm ²			%		
A	30	40	52	10	9	10	37	40	68	12	9	14	38	54	86	13	12	17
B	34	38	51	11	8	10	38	43	67	12	9	13	40	58	81	12	12	16
C	36	44	56	9	8	10	38	42	77	10	7	14	42	64	93	11	11	17
D	40	43	62	10	8	11	40	44	82	10	8	15	46	64	90	11	12	16
E	55	48	65	11	8	11	51	50	91	10	9	15	58	83	93	11	15	16
F	31	36	46	12	8	9	36	40	61	14	9	12	38	51	61	14	11	12
G	16	26	43	8	7	9	23	30	60	11	8	12	28	52	77	13	14	16
H	34	39	48	12	8	9	33	42	61	12	9	12	36	53	63	13	12	9
I	31	39	55	13	9	11	33	38	64	14	9	12	36	60	77	16	14	15
K	33	57	60	9	12	10	44	41	70	12	9	12	38	66	79	10	14	14

Tafel 6 Gewichtsverluste bei den Frostversuchen an Probezylindern aus Flugsand und tonigem Schluff

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Boden	Zementgehalt	Gewichtsverluste nach 12 Frost-Tau-Wechseln bei den Zementen									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	K
—	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Flugsand	7	41	31	28	20	19	16	18	30	43	21
	9	17	10	10	9	7	7	9	11	16	7
	11	7	4	3	2	2	4	5	6	7	2
toniger Schluff	7	8	5	5	5	3	7	12	9	9	2
	9	6	4	2	2	2	4	4	5	6	1
	11	2	2	1	2	1	2	3	3	3	—

nach 90 Tagen, in Bild 3 für Flugsand nach 28 Tagen und in Bild 4 für tonigen Schluff nach 7 Tagen. Für die anderen Prüftermine ergaben sich sechs weitere, jedoch sehr ähnliche Diagramme, auf deren Wiedergabe hier verzichtet wird. Bei den nichtbindigen Böden verläuft die ansteigende Gerade für den mittleren Zementgehalt (Kies 6 %, Flugsand 9 %) meistens etwa auf der Mitte zwischen den Geraden des oberen und unteren Zementgehaltes. (Die Bilder 2 und 3 zeigen bereits die größten Abweichungen aus der Mittellage, die überhaupt vorkommen.) Man kann daraus folgern, daß der Anstieg der Druckfestigkeit mit dem Zementgehalt im großen Durchschnitt etwa linear verläuft – allerdings nur im Bereich der Zementgehalte, die die Praxis interessieren und die deshalb hier untersucht werden.

Beim tonigen Schluff war der Einfluß des Zementgehaltes nicht deutlich hervortretend. Im Alter von 7 Tagen war die Festigkeit für 7 % Zement nur ganz wenig niedriger als die für 9 und 11 %. Im Alter von 28 Tagen fiel mit 7 und 9 % die Festigkeit nahezu gleich aus, während sie mit 11 % Zement höher lag. Erst im Alter von 90 Tagen prägte sich die Festigkeitszunahme mit dem Zementgehalt deutlich aus; die ausgleichenden Geraden für die

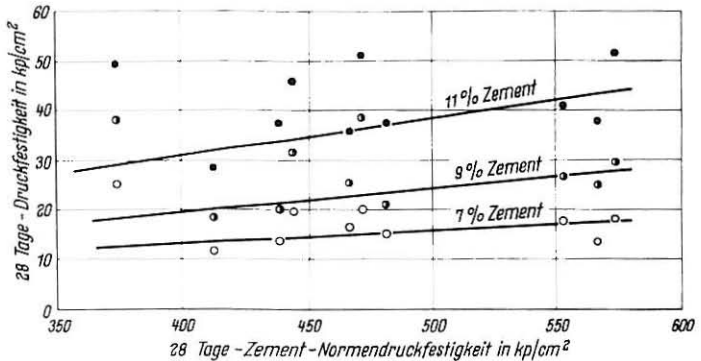


Bild 3 Einfluß der Zementnormenfestigkeit und des Zementgehaltes auf die Druckfestigkeit von Probezylindern mit Flugsand nach 28 Tagen

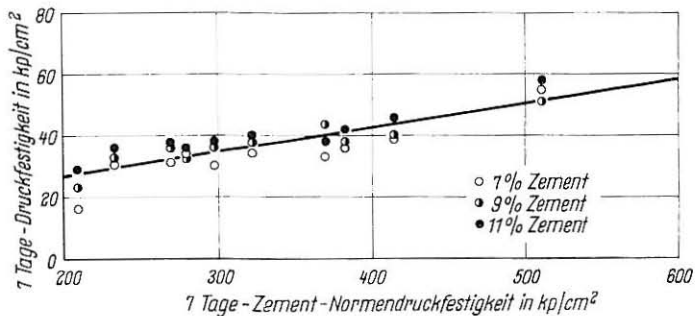


Bild 4 Einfluß der Zementnormenfestigkeit und des Zementgehaltes auf die Druckfestigkeit von Probezylindern mit tonigem Schluff nach 7 Tagen

verschiedenen Zementgehalte liegen in etwa gleichen Abständen übereinander. (Die Diagramme für 28 und 90 Tage sind nicht wiedergegeben.)

Die Frostversuche unterstreichen die Ergebnisse der Druckprüfungen. Die Frostbeständigkeit stieg (weniger Abrieb) mit dem Zementgehalt, und zwar beim Schluff (Bild 5) wie beim Flugsand (nicht dargestellt).

5.2 Einfluß der Zementnormenfestigkeit

Wie die Bilder 2 bis 4 erkennen lassen, stieg die Druckfestigkeit der Bodenverfestigung mit der Normenfestigkeit des Zements nahezu linear an, und zwar bei allen 3 Böden, allen 3 Zementgehalten und allen 3 Prüfterminen, lediglich beim Kiessand mit 4% Zement wirkte sich nach 90 Tagen eine größere Normenfestigkeit nicht mehr entsprechend in einer höheren Festigkeit des Boden-Zement-Gemisches aus. (Der Grund dafür dürfte der extrem niedrige Zementgehalt sein.)

Bei den nichtbindigen Böden Kiessand und Flugsand liegt die Mehrzahl der Werte in der Nähe der gemittelten Geraden. In allen Fällen liegen aber 3 Werte oberhalb dieser Geraden – also günstiger (Bild 2 und 3). Es handelt sich um die beiden Hochofenzemente und den hydrophobierten Portlandzement.

Die Frostversuche lehren, daß mit steigender Normenfestigkeit des Zements der Abrieb beim Frostversuch ab-, die Frostbeständigkeit also zunimmt. Am Beispiel des tonigen Schluffs ist dieser Zusammenhang in Bild 5 graphisch dargestellt. Für den Flugsand ergibt sich ein ähnliches Verhalten. Wieder liegen die Werte für die Hochofenzemente und besonders für den hydrophobierten Zement etwas günstiger unter der gemittelten Geraden, und zwar sowohl beim Flugsand als auch beim tonigen Schluff.

Die Ursache für die im Vergleich zur Normenfestigkeit günstigere Festigkeit des Boden-Zement-Gemisches aus den beiden Hochofenzementen und aus dem hydrophobierten Zement konnte

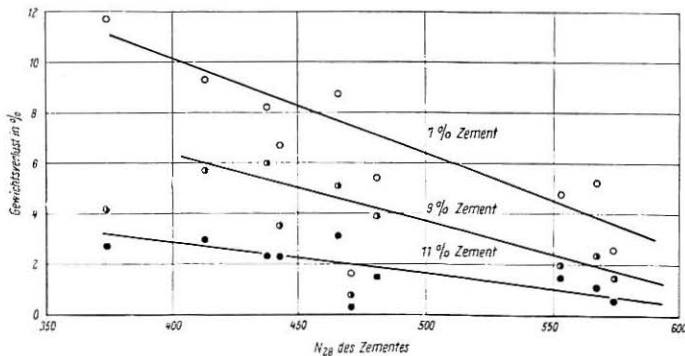


Bild 5 Frostbeständigkeit von Probezylindern mit tonigem Schluff in Abhängigkeit von Zementnormenfestigkeit und Zementgehalt

nicht festgestellt werden. Es ist möglich, daß die Porenstruktur des verdichteten Boden-Zement-Gemisches dadurch unterschiedlich beeinflußt wird.

5.3 Einfluß der Mahlfeinheit

In Bild 6 ist am Beispiel des Kiessandes die Druckfestigkeit in % der zugehörigen Zementnormenfestigkeit über der Mahlfeinheit aufgetragen. Die zunehmend feinere Mahlung führte demnach zu keiner höheren Festigkeit.

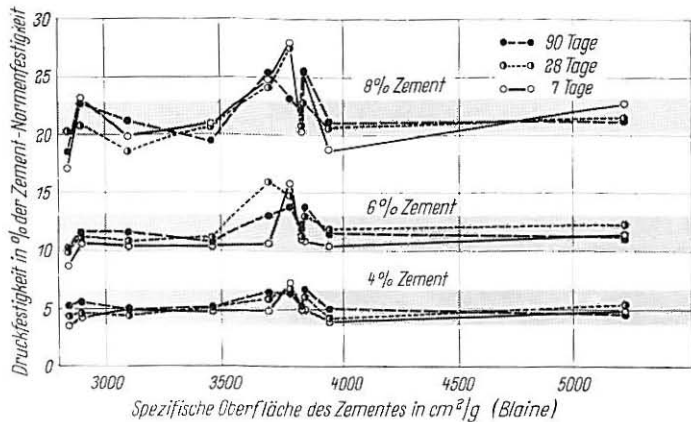


Bild 6 Einfluß der Mahlfeinheit des Zements auf die Druckfestigkeit von Probeylindern mit Kiessand, ausgedrückt in % der zugehörigen Zementnormenfestigkeit

5.4 Einfluß organischer Bestandteile im Boden

Tafel 7 enthält eine Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten, die sich mit dem ursprünglichen und dem gereinigten Boden ergaben. Da nur eine beschränkte Menge des Flugsandes gereinigt werden konnte, wurden nur mit einem Zementgehalt von 7 % Proben für die Prüfung auf Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen hergestellt.

Im Mittel erreichte die 7 Tage-Druckfestigkeit der Boden-Zement-Gemische mit nicht gereinigtem Flugsand rd. 74 % der mit gereinigtem Flugsand hergestellten Proben. Auch die 28 Tage-Festigkeiten blieben noch merklich zurück. Die Verzögerung der Zementerhärtung durch die organischen Stoffe war – wenigstens bis zum untersuchten Alter – bei den Hochofenzementen und beim Eisenportlandzement geringer als bei den Portlandzementen. Dieses Ergebnis kann kaum verallgemeinert werden, weil organische Stoffe, die die Zementerhärtung stören (hauptsächlich Huminsäuren), recht unterschiedlich in ihrem Aufbau sein können und sich, wie orientierende Versuche ergeben haben, auch bei den einzelnen Zementen verschieden verhalten.

Tafel 7 Gegenüberstellung der Druckfestigkeit von Probeylindern aus Flugsand mit und ohne Verunreinigung durch organische Stoffe

1	2	3	4	5	6	7
Zement	Druckfestigkeit der Bodenverfestigung mit Zement ¹⁾					
	Boden im ursprünglichen Zustand				nach Neutralisation der organischen Bestandteile	
	nach 7 Tagen		nach 28 Tagen		nach 7 Tagen	nach 28 Tagen
–	kp/cm ²	% ²⁾	kp/cm ²	% ²⁾	kp/cm ²	kp/cm ²
A	6,6	61	13,5	73	10,8	18,4
B	8,5	65	14,9	–	13,0	–
C	7,9	67	13,6	–	11,8	–
D	9,6	68	17,5	79	14,2	22,2
E	15,1	71	17,9	82	21,4	21,8
F	9,9	90	19,4	–	11,0	–
G	9,9	100	25,1	–	9,9	–
H	9,1	90	16,3	–	10,1	–
I	5,8	65	11,6	71	8,9	16,3
K	14,0	64	19,9	–	21,8	–
Mittel	9,6	74	17,0	76	13,3	19,7

¹⁾ Zementgehalt 7 %, bezogen auf 100 % trockenen Boden

²⁾ in % der mit gereinigtem Boden (Spalte 6 bzw. 7) gefundenen Festigkeiten

5.5 Festigkeitszunahme im Laufe der Zeit

Druckfestigkeit und Frostbeständigkeit der Bodenverfestigung nahmen im Laufe der Zeit zu, und zwar nicht einheitlich, sondern abhängig von Zement, Bodenart und Zementgehalt. In Tafel 8 wird die Nacherhärtung der Zementverfestigung zahlenmäßig erfaßt und in Beziehung zur Nacherhärtung des Zements gebracht. Um den Einfluß des Zements auszuschalten, wurden sowohl die Normfestigkeiten der 10 Zemente als auch die Druckfestigkeiten der Bodenverfestigung aller 10 Zemente gemittelt. Trotzdem zeigten sich abhängig vom Boden erhebliche Unterschiede.

Im allgemeinen war die Nacherhärtung der Boden-Zement-Gemische vom 7. Tage (Eignungsprüfung) bis zum 90. Tage (ungefähr Endfestigkeit) größer als die des Zements (Normenmörtel); beim Kiessand lag sie in der gleichen Größenordnung. Die im Flugsand enthaltenen organischen Stoffe verzögerten die Erhärtung; dadurch wird die prozentuale Nacherhärtung sehr groß.

6. Zusammenfassung

Folgende, zum Teil etwas verallgemeinerte Beziehungen lassen sich aus den Versuchsergebnissen für die vorliegenden Verhältnisse herleiten:

Tafel 8 Nacherhärtung der Bodenverfestigung mit Zement aus Kiessand, Flugsand und tonigem Schluff (Mittel der 10 Zemente)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zement- gehalt	Prüf- termin	Kiessand				Flugsand				toniger Schluff			
		Mittlere Druck- festigkeit mit allen 10 Zementen	Zunahme der mittleren Druckfestigkeit			Mittlere Druck- festigkeit mit allen 10 Zementen	Zunahme der mittleren Druckfestigkeit			Mittlere Druck- festigkeit mit allen 10 Zementen	Zunahme der mittleren Druckfestigkeit		
			vom 7. bis 28. Tag	vom 28. bis 90. Tag	vom 7. bis 90. Tag		vom 7. bis 28. Tag	vom 28. bis 90. Tag	vom 7. bis 90. Tag		vom 7. bis 28. Tag	vom 28. bis 90. Tag	vom 7. bis 90. Tag
%	Tage	kp/cm ²	%	%	%	kp/cm ²	%	%	%	kp/cm ²	%	%	%
7 (bei Kies- sand 4)	7	16				10				34			
	28	25	56	16	81	17	70	29	120	41	21	32	59
	90	29				22				54			
9 (bei Kies- sand 6)	7	37				16				37			
	28	58	57	9	70	28	75	43	150	41	11	71	89
	90	63				40				70			
11 (bei Kies- sand 8)	7	72				28				40			
	28	104	44	13	64	42	50	38	107	61	52	31	100
	90	118				58				80			
100 (Zement- prüfung)	7	329				329				329			
	28	478	45	11	62	478	45	11	62	478	45	11	62
	90	531				531				531			

6.1 Die Zementart war ohne nennenswerten Einfluß auf die Trockenrohdichte und den günstigsten Wassergehalt des Proctorversuches.

6.2 Druckfestigkeit und Frostbeständigkeit der Bodenverfestigung stiegen in der Regel mit der Normenfestigkeit des verwendeten Zements.

6.3 Druckfestigkeit und Frostbeständigkeit der Bodenverfestigung nahmen mit dem Zementgehalt zu.

6.4 Die Mahlfeinheit mäßig fein bis sehr fein gemahlener Zemente beeinflusste die Festigkeit der Bodenverfestigung praktisch nicht.

6.5 Die Festigkeit der Probezylinder aus dem Flugsand wäre nach 7 und 28 Tagen im Mittel um rd. ein Drittel größer ausgefallen, wenn der Boden keine organischen Stoffe enthalten hätte.

6.6 Beim Kiessand entwickelte sich die Nacherhärtung der Bodenverfestigung ähnlich wie die des Zementnormenmörtels (Mittel aus den 10 Zementen). Mit allen Böden war die Nacherhärtung vom 7. Tage bis zum 90. Tage größer als mit Zementmörtel oder wenigstens gleich groß.

SCHRIFTTUM :

- [1] Technische Vertragsbedingungen für den Unterbau (TVU), Entwurf 1963. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln.
- [2] Merkblatt für die Bodenverfestigung ländlicher Wege, Entwurf 1963. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln.
- [3] Norling, L. T., und R. G. Packard: Expanded short-cut test methods for determining cement-factors for sandy soils. Highw. Res. Board, Bull. 198, Washington 1958.
- [4] Merkblatt für bodenphysikalische Prüfverfahren. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1963.
- [5] Committee on soil-portland cement stabilization: Soil stabilization with portland cement. Highw. Res. Board, Bull. 292, Washington 1961.
- [6] Felt, E. J.: Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures. Highw. Res. Board, Bull. 108, S. 138/162.
- [7] Springenschmid, R.: Zur Technologie und Praxis der Bodenverfestigung mit Zement. Straßenbau-Technik 16 (1963) H. 4, S. 142/151.
- [8] Woods, K. B.: Highway Engineering Handbook. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York 1960, S. 21-7/21-85.
- [9] Grimer, F. J., und J. Krawczyk: Relations between strength and age for soil-cement, with particular reference to the prediction of later strength from earlier strength. Magaz. of Concrete Res. 15 (1963) Nr. 43, S. 21/28. (Auszug in Zement-Kalk-Gips 16 (1963) H. 9, S. 394/396.)
- [10] Davidson, D. T., und B. W. Bruns: Comparison of type I and type III portland cements for soil stabilization. Highw. Res. Board, Bull. 267, Washington 1960, S. 28/45.
- [11] Clare, K. E., und D. M. Farrar: The use of cements of different fineness in soil-cement mixtures. Magaz. of Concrete Res. 8 (1956) Nr. 24, S. 137/144, vgl. auch Zement-Kalk-Gips 10 (1957) H. 10, S. 431/432.

- [12] ZTVE - St B 59; Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. Bundesminister für Verkehr, Bonn 1959.
- [13] Soil Mechanics for Road Engineers. H. M. Stationary Office, London 1955.
- [14] DIN 4226: Betonzuschlagstoffe aus natürlichen Vorkommen. Vorläufige Richtlinien für die Lieferung und Abnahme.
- [15] Method of freezing and thawing test of compacted soil-cement mixtures. ASTM Designation D 560-57.
- [16] Laboratoriumshandbuch für die Bodenverfestigung mit Zement. Portland Cement Assoc., Chicago 1956. (Übersetzung und Bearbeitung von R. Springenschmid, Monographie Fachverband Zement, Köln 1959)