

# Zwanzig-Jahres-Bericht der Langzeit-Versuche über das Verhalten von Zement im Beton \*)

Von Fritz Keil, Düsseldorf

## Übersicht

*Die Langzeit-Versuche über das Verhalten verschiedenartiger Zemente in Beton sollten zeigen, ob eine Beziehung besteht zwischen Zusammensetzung, Feinheit und Herstellungsbedingungen des Zements und dem Widerstand des daraus hergestellten Betons gegen schädigende äußere Einwirkungen, wie z. B. die von Wasser, Sulfatlösungen, Temperaturveränderungen sowie die des Verkehrs, besonders auf solchen Betonstraßen, auf denen das Eis mit Auftausalzen beseitigt wird.*

*Die meisten Versuchskörper waren den besonderen Umweltbedingungen etwas mehr als 20 Jahre ausgesetzt. Die Auslagerung begann 1941 bis 1942. Neuere Versuchsreihen kamen in den Jahren 1949, 1958, 1959 und 1961 hinzu. Dieser Bericht gibt eine Übersicht über das Verhalten der verschiedenen Versuchszemente und -betone und ergänzt die Feststellungen des Zehn-Jahres-Berichtes [8].*

*Wie schon früher berichtet, wurde keine feste Beziehung zwischen Zusammensetzung und Feinheit der Zemente und dem Verhalten des Betons gegen Gefrieren und Auftauen gefunden. Unterschiede in der Herstellung der Zemente beeinflussten die Beständigkeit des Betons nicht in ausgeprägter Form. Der Widerstand gegen Sulfatangriff wurde erhöht durch Erniedrigung des rechnerischen  $C_3A$ -Gehaltes im Zement. Die äußere Beschaffenheit nach mehr als 20 Jahren Beanspruchung bestätigt die früheren Feststellungen, wonach die Einführung künstlicher Luftporen den Widerstand des Betons gegen Frost-Tau-Wechsel wesentlich erhöht, besonders bei Betonfahrbahnen und an Betonteilen, die sich im Zustand dauernder Sättigung durch Grundwasser befinden.*

\*) Twenty-Year Report on the Long-Time Study of Cement Performance in Concrete. By Advisory Committee "Long-Time Study of Cement Performance in Concrete", Chairman W. C. Hansen.

## 1. Einführung

Die Anregung für diese Versuche gab im Jahre 1938 P. H. Bates, damals Leiter der Abteilung Ton- und Silikatprodukte im National Bureau of Standards. Unter dem Präsidenten F. T. Sheets der Portland Cement Association fand der Plan die Unterstützung der US-Zementindustrie.

Ein Zehn-Jahres-Bericht über die Langzeit-Versuche wurde 1953 der Jahresversammlung des American Concrete Institute in Boston, Massachusetts, vorgelegt [8]. In ihm waren die Versuche beschrieben und die aus den 10jährigen Ergebnissen zu ziehenden Folgerungen niedergelegt. Der vorliegende Zwanzig-Jahres-Bericht über die Zeit von 1942 bis 1962 soll über diese umfassendste jemals durchgeführte Untersuchung des Zementverhaltens im Beton weiteren Aufschluß geben.

Der ursprüngliche Versuchsplan der Langzeit-Versuche sah mehrere Außenlagerungen vor, um das Verhalten von 27 Zementen aller 5 ASTM-Typen zu vergleichen. Bild 1 zeigt, wo und wann die

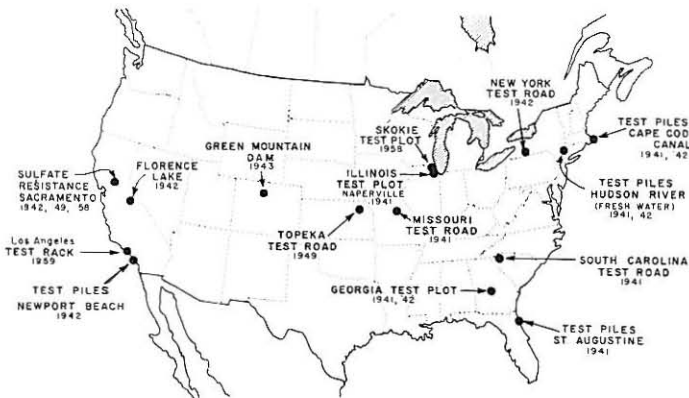


Bild 1 Lage der Prüffelder mit Versuchsbeginn (test piles = Versuchspfähle; test plot = Versuchsfeld; test rack = Versuchsstroß; test road = Versuchsstraße; sulfate resistance = Sulfatwiderstand)

Versuchsfelder (Lagerstellen) in den USA angelegt wurden und daß sie in Gebieten mit sehr unterschiedlichen Witterungsbedingungen liegen. Das Programm sah weiterhin vor, daß von jedem Zement alle Arten von Laboratoriums-Prüfungen gemacht würden, um dadurch die kennzeichnenden Unterschiede ausfindig machen zu können, mit denen man die Veränderungen im Verhalten des Betons erklären zu können hoffte. Es wurden demgemäß festgelegt: Festigkeit, Feinheit, Reindichte, Kornanalyse, rechnerischer und mikroskopischer Mineralbestand, Hydratationswärme, Schwinden, Quellen, Verhalten in Wasser und Sulfatlösungen. Diese Prüfungen haben sich über den ganzen 20jährigen Zeitraum seit ihrer Herstellung erstreckt. Man darf mit Sicherheit behaupten, daß

über diese LTS-Zemente<sup>1)</sup> mehr bekannt ist als über jeden anderen jemals untersuchten Zement.

Tafel 1 zeigt die wichtigeren chemischen und physikalischen Eigenschaften dieser Zemente, und zwar den Gehalt an den Hauptbestandteilen, den Nebenbestandteilen, die rechnerische Phasenzusammensetzung nach ASTM (d. h. nach Bogue) sowie die spezifische Oberfläche nach ASTM und nach dem Luftdurchlässigkeitsverfahren (Lea und Nurse).

Die LTS-Zemente sollten für die hauptsächlichlichen Produktionsgebiete der Vereinigten Staaten repräsentativ sein und den Bereich der chemischen Zusammensetzung überdecken, der üblicherweise bei Zementen der ASTM-Typen vorkommt. 21 Klinker wurden von Ende 1940 bis Mitte 1941 in Mengen von 200 bis 300 t im laufenden Betrieb unter strenger Kontrolle in verschiedenen Teilen des Landes aus verschiedenen Rohstoffen nach dem Trocken- oder Naßverfahren durch Brennen mit Kohle, Öl oder Erdgas hergestellt und dann mit Gips, entsprechend 1,2 bis 2,0% SO<sub>3</sub>, bei Typ III 1,7 bis 2,3% SO<sub>3</sub>, zu 21 Zementen vermahlen. Zusätzlich wurden 6 der 21 Klinker mit Gips und einem luftporenbildenden Zusatzmittel (LP-Stoff) gemahlen, wodurch insgesamt 27 Versuchszemente vorlagen. Davon waren

vom Typ	I	II	III	IV	V	Gesamtzahl
Zemente ohne LP-Zusatz (Nr.)	8 (11-18)	5 (21-25)	3 (31, 33, 34)	4 (41-43, 43A)	1 (51)	21
LP-Zemente (Nr.)	4 (11T, 12T, 16T, 18T)	1 (21T)	1 (33T)	—	—	6

Die 6 LP-Zemente sind gekennzeichnet durch den Buchstaben „T“ hinter der Zementnummer. Der Ausdruck „A/E-Zemente“ („air-entraining cements“) war bis 1940 noch nicht üblich, als diese Zemente hergestellt wurden; der Buchstabe „T“ sollte bedeuten, daß es ein „behandelter“ („treated“) Zement war. (Man glaubte, mit dieser Auswahl alle erdenklichen Varianten damals vorkommender Zemente erfaßt zu haben, und hatte von den Unterschieden in den Rohstoffen und in der Herstellung einen starken Einfluß auf die Eigenschaften des Betons erwartet.)

Nach dem Erscheinen des Zehn-Jahres-Berichtes im Jahre 1953 [8] wurde das Versuchsprogramm erweitert, um über bestimmte Stufen der ursprünglichen Untersuchung genaueren Aufschluß zu erhalten und vorher nicht berücksichtigte Bereiche zu bestreichen. Vor allem sind auch Portlandzemente vom Typ IS, d. h. mit

<sup>1)</sup> LTS bedeutet Long-Time Study

Tafel 1 Chemische und physikalische Eigenschaften der Zemente

Zement Nr.	Hauptbestandteile Oxide in Gew.-% <sup>1)</sup>							Nebenbestandteile Gew.-% <sup>2)</sup>			Errechnete Komponenten Gehalte in Gew.-% <sup>4)</sup>					Spezifische Oberfläche cm <sup>2</sup> /g	
	bestimmt <sup>1)</sup>			korrigiert <sup>2)</sup>				Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	fr. CaO	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	ASTM <sup>5)</sup>	Luftdurch- lässigkeit <sup>6)</sup>
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Glühv.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO										
Zemente Typ I																	
11	2,4	1,6	1,0	20,7	5,6	63,3	3,6	0,21	0,51	0,4	50,0	22,0	12,1	7,2	2,7	1820	3436
11T	2,3	1,5	1,2	20,7	5,7	63,3	3,6	0,22	0,51	0,5	51,0	21,0	12,2	7,1	2,6	2010	3640
12	2,4	1,6	0,6	21,4	5,8	63,5	3,0	0,28	0,40	0,1	45,0	28,0	12,6	7,3	2,7	1815	3276
12T	2,3	1,5	0,7	21,5	5,7	63,6	3,0	0,31	0,40	0,1	46,0	27,0	12,5	7,1	2,7	1790	3152
13	2,1	1,6	1,8	22,2	4,7	64,2	1,0	0,04	0,19	1,6	50,0	26,0	10,1	6,5	2,8	1665	3428
14	3,0	1,7	0,9	22,1	4,7	62,9	2,4	0,06	1,30	0,2	42,5	32,0	6,2	9,2	2,9	1880	3424
15	2,5	1,9	0,9	20,2	5,4	66,6	0,7	0,08	0,23	0,4	64,5	10,0	12,1	7,5	3,2	1845	3229
16	3,5	1,7	1,1	21,4	4,7	63,9	1,9	0,23	0,46	0,7	53,5	21,0	7,5	10,7	2,9	1785	3261
16T	3,4	1,8	1,3	21,3	4,8	63,6	1,9	0,23	0,44	0,8	52,5	22,0	7,9	10,4	3,1	1680	3114
17	3,1	1,7	0,9	21,4	5,4	64,8	0,9	0,08	0,43	0,4	52,0	23,0	10,4	9,3	2,9	1770	3985
18	2,3	1,8	1,0	21,3	6,1	63,7	2,1	0,12	0,13	0,3	44,5	28,0	13,2	6,8	3,1	1750	3268
18T	2,2	1,7	0,9	21,5	6,1	63,9	2,1	0,14	0,13	0,4	44,0	28,5	13,2	6,7	2,9	1960	3756
Zemente Typ II																	
21	3,2	1,2	0,7	23,9	4,0	64,0	1,2	0,22	0,40	0,7	40,0	41,0	6,4	9,7	2,1	1630	2891
21T	3,2	1,3	0,6	24,0	4,1	63,9	1,2	0,21	0,43	0,6	38,0	40,0	6,6	9,7	2,2	1750	2983
22	3,9	1,4	0,6	22,4	4,5	62,7	3,1	0,24	0,37	0,1	41,5	33,5	6,6	11,7	2,4	1775	3065
23	5,4	1,5	0,7	21,4	4,3	63,9	0,9	0,59	0,14	0,4	51,0	24,0	3,7	16,6	2,6	1875	3109
24	4,8	1,8	1,4	20,8	4,8	60,5	2,8	0,06	1,30	0,9	41,0	29,0	5,4	14,8	3,0	1925	3697
25	4,9	1,9	0,6	22,6	4,6	61,9	2,2	0,21	0,54	0,2	34,0	39,0	4,7	14,9	3,2	1825	3267

Fortsetzung der Tafel 1

Zement Nr.	Hauptbestandteile Oxide in Gew.-% <sup>1)</sup>							Nebenbestandteile Gew.-% <sup>2)</sup>			Errechnete Komponenten Gehalte in Gew.-% <sup>3)</sup>					Spezifische Oberfläche cm <sup>2</sup> /g	
	bestimmt <sup>1)</sup>			korrigiert <sup>2)</sup>				Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	fr. CaO	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	ASTM <sup>5)</sup>	Luftdurch- lässigkeit <sup>6)</sup>
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Glühv.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO										
Zemente Typ III																	
31	2,1	2,2	1,5	20,3	5,0	63,3	3,2	0,23	0,22	1,5	56,0	17,0	10,8	6,4	3,8	2795	5795
33	2,5	2,3	1,5	20,0	5,2	63,8	1,4	0,21	0,44	1,8	60,0	17,0	10,4	7,7	3,9	2530	5272
33T	2,4	2,2	1,4	20,4	5,1	63,8	1,4	0,21	0,46	1,8	57,0	16,0	10,4	7,3	3,7	2510	5169
34	3,3	1,7	1,5	20,4	3,9	63,3	2,3	0,28	0,28	2,3	64,0	10,5	5,7	10,1	2,9	2465	4969
Zemente Typ IV																	
41	5,0	2,0	1,3	22,9	4,6	59,2	2,7	0,06	1,19	0,4	20,0	51,0	4,5	15,2	3,4	1915	3679
42	2,7	1,5	0,9	26,2	2,8	62,9	1,7	0,16	0,26	0,2	27,0	55,0	3,5	8,2	2,6	1920	3501
43	4,5	2,1	0,7	23,2	4,9	61,1	1,5	1,00	0,08	0,1	25,0	48,0	6,2	13,8	3,6	1965	3846
43A	3,1	1,9	0,8	25,2	3,7	63,3	1,0	0,33	0,01	0,4	29,0	52,0	5,3	9,3	3,2	1915	3633
Zement Typ V																	
51	3,3	1,4	0,8	24,4	3,1	63,8	1,6	0,08	0,22	0,5	41,0	39,0	3,7	10,0	2,4	2025	3483

<sup>1)</sup> alle Prüfungen nach ASTM C 114-40 außer SiO<sub>2</sub> (nach ASTM C 114-40 T)

<sup>2)</sup> die Oxid-Werte wurden um den Gehalt an Nebenbestandteilen wie folgt berichtigt:

SiO<sub>2</sub> durch Abzug des unlöslichen Rückstands  
 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> durch Abzug von P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und TiO<sub>2</sub>  
 CaO durch Abzug von freiem CaO  
 MgO durch Abzug von Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>3)</sup> Na<sub>2</sub>O und K<sub>2</sub>O nach ASTM C 114-42; freies CaO nach ASTM C 114-40 T

<sup>4)</sup> berücksichtigt freies CaO, nicht Nebenoxide

<sup>5)</sup> ASTM C 115-41 T (mit dem Turbidimeter nach Wagner)

<sup>6)</sup> Lea und Nurse, Journal Soc. Chem. Ind. 58 (1939) Nr. 9, S. 277

einem Gehalt an Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke), und Gemische von Zementen mit Puzzolanen einbezogen und Veränderungen in den Auslagerungsbedingungen vorgenommen worden. Eine zusammenfassende Beschreibung dieser neuen Versuchsreihen wurde jüngst veröffentlicht [14].

Der Kreis des für die Betreuung maßgeblichen Ausschusses hat sich in den 24 Jahren seiner Tätigkeit stark verändert. Nur zwei seiner jetzigen Mitglieder gehörten ihm schon bei seiner Gründung im Jahre 1939 an. Der Ausschuß setzt sich nach wie vor aus 12 Mitgliedern zusammen, von denen 8 den Kreis der Zementverbraucher, besonders aus dem Straßen- und Wasserbau, und 4 die Zementhersteller vertreten.

Der vorliegende Zwanzig-Jahres-Bericht ist ebenso unterteilt wie der Zehn-Jahres-Bericht, und zwar

- Abschnitt 2: Straßen in strengem, mäßigem und mildem Klima,
- Abschnitt 3: Prüfkörper in Sulfatböden in mildem Klima,
- Abschnitt 4: Pfähle und andere Prüfkörper in Meerwasser und Süßwasser, in strengem und mildem Klima,
- Abschnitt 5: Dünne und dickere Betonteile unter strengen natürlichen Wetterbedingungen,
- Abschnitt 6: Prüfkörper von bauwerksähnlichen Abmessungen auf Versuchsfeldern in strengem und in mildem Klima.

Die Ergänzungen des ursprünglichen Versuchsplans sind in den einzelnen Abschnitten angegeben.

## 2. Versuchsstraßen; Reihen 1, 2, 3 und 20

Der Zehn-Jahres-Bericht [8] befaßte sich mit 3 Versuchsstraßen

<i>im Staate</i>	<i>New York</i>	<i>Süd-Karolina</i>	<i>Missouri</i>
mit	strengem	milden	mäßig strengem Klima

Alle Versuchsstrecken hatten insgesamt mehr als 10 km Länge. Um örtliche Einflüsse auszuschalten, wurde in jeder Versuchsstraße jeder Zement an mehreren Stellen verwendet. Eine vierte, die *Topeka*-Versuchsstraße in Kansas, als Teil des Langzeit-Versuchs im Jahre 1949 gebaut, wird ebenfalls behandelt.

### 2.1 Versuchsstraße New York

#### Reihen 1, 1 A (größeres Setzmaß), 1 B (ohne und mit LP-Stoff)

*Strenges Klima, jährlicher Schneefall i. M. 2,37 m; Reihe 1 im Staate New York hatte 168 Prüffelder von 45 m Länge und 3,6 m Breite*

Die Veränderungen auf der Versuchsstraße New York, wie sie im Zehn-Jahres-Bericht [8] und anderen Veröffentlichungen über die Langzeit-Versuche [7, 9, 11] beschrieben wurden, haben sich während der gesamten Laufzeit von Reihe 1 fortgesetzt. Da die

Oberfläche der Versuchsstraße im Interesse der Sicherheit jetzt erneuert wird und damit ihre Beobachtung nicht mehr möglich ist, erscheint eine Reihe von Folgerungen über das Verhalten von Zement und Beton als Ergebnis des 20jährigen Verhaltens angebracht.

In Reihe 1 hatte man aus 24 der 27 LTS-Zemente „normalen“ Beton mit im Mittel 360 kg Zement je m<sup>3</sup> Beton für den Bau einer in ebenem Gelände liegenden Betonstraße verwendet, in Reihe 1 A nur 6 Zemente für eine ähnliche Betonstraße, deren Beton jedoch eine weichere Konsistenz hatte, nämlich ein Setzmaß von etwa 10 bis 13 cm statt bisher 5 bis 8 cm. Reihe 1 B umfaßte 12 Zemente in Beton der Zusammensetzung von Reihe 1, jedoch auf einer Betonstraße mit einer Steigung bis zu 4,8 ‰, wo eine starke Streuung von Tausalzen nötig war. Ursprünglich sollte auf den Strecken der Reihen 1 und 1 A kein Salz gestreut werden; das erwies sich aber einige Jahre nach dem Bau der Straße als unumgänglich.

Der Einfluß der durch LP-Stoffe künstlich eingeführten Luftporen überschattet, was das Abwittern (scaling) der Betondecken betrifft, in allen 3 Versuchsreihen jeden anderen Einfluß. In Reihe 1 B standen 6 „unbehandelte“ Zemente (ohne LP-Stoff) und ihre „behandelten“ Gegenstücke, d. h. LP-Zemente mit zugemahlenem Vinsol-Harz in Flockenform, unmittelbar zum Vergleich, um die Wirkung auf das Abwittern in diesem stark mit Salz gestreuten Abschnitt der Versuchsstrecke zu zeigen. Ähnliche Vergleiche lieferten auch Teilstrecken innerhalb der Reihen 1 und 1 A, bei denen je 3 Zemente mit und ohne LP-Zusatzmittel in weniger mit Salz bestreuten Abschnitten verwendet wurden. Tafel 2 zeigt für jede der drei Reihen die überaus günstige Wirkung der Luftporen bei Betonfahrbahnen.

Tafel 2 Reihen 1, 1 A und 1 B; Versuchsstraße New York  
Abwittern in ‰ der Fläche, Mittel von 4 Teilabschnitten  
(8 Prüfstrecken)

Zement-Nr.	Reihe 1		Reihe 1 A		Reihe 1 B	
	ohne LP	mit LP	ohne LP	mit LP	ohne LP	mit LP
11 und 11T	53	nicht verwendet	nicht verwendet		72	0
12 und 12T	19	0	63	0	77	0
16 und 16T	54	0	93	0	88	0
18 und 18T	44	nicht verwendet	nicht verwendet		37	0
21 und 21T	71	0	100	0	100	0
33 und 33T	24	nicht verwendet	nicht verwendet		52	0

Wie die Tafel zeigt, entstand auf den Strecken mit LP-Beton kein Abwittern, dagegen in starkem Maße auf denen aus Beton ohne Luftporen; damit ist der Nutzen der eingeführten Luftporen für

diese Beanspruchung des Betons klar erwiesen. Bild 2 von einem Teil der Versuchsstraße New York zeigt den Unterschied in dem Verhalten von Beton mit und ohne Luftporen deutlich. Das Bild wurde im Jahre 1962 aufgenommen.



Bild 2 Versuchsstraße New York; Fahrbahn im Vordergrund mit Zement ohne Luftfeinführung, im Hintergrund mit LP-Zement

Reihe 1 A sollte zeigen, ob sich Beton mit dem höheren Setzmaß von 10 bis 13 cm anders verhält als der mit 5 bis 8 cm wie in Reihe 1. Ein Setzmaß von 10 bis 13 cm entspricht ungefähr einem Ausbreitmaß von 50 bis 52 cm. Da überhaupt kein Versuchsabschnitt mit Luftporen abgewittert ist, lassen sich nur die Abschnitte mit Beton ohne Luftporen (Null-Beton) vergleichen. Das ist nur für die Zemente 12, 16 und 21 aus Reihe 1 A und Reihe 1 möglich und in Tafel 3 angegeben. Der Null-Beton (ohne Luftporen) verhält sich in keinem der Abschnitte günstig. Mit niedrigerem Setzmaß (niedrigerem Wasserzementwert) hatte er jedoch ein etwas besseres Verhalten. Aus den Aufzeichnungen geht zwar

Tafel 3 Reihen 1 und 1 A; Versuchsstraße New York  
Einfluß des Setzmaßes (Wassergehalt) auf das Abwittern  
Beton ohne eingeführte Luftporen, Mittel von 4 Teil-  
abschnitten

Zement-Nr.	Reihe 1 Setzmaß 5,1 bis 7,6 cm	Reihe 1 A Setzmaß 10,2 bis 12,7 cm
12	19 %	16 %
16	54 %	93 %
21	71 %	100 %



nicht deutlich hervor, daß dieselbe Menge Salz auf den Strecken der beiden Reihen verwendet worden ist; man darf aber wohl annehmen, daß die Mengen etwa vergleichbar sind und daß die Unterschiede im Abwintern von dem verschiedenen Setzmaß (Wasserelementwert) des Betons herrühren.

Tafel 4 gibt die einzelnen Abwinternungswerte der vier Teilabschnitte für jeden in Reihe 1 verwendeten Zement wieder, auch die nach

Tafel 4 Reihe 1; Versuchsstraße New York  
Abwintern für alle Teilabschnitte von jedem Zement und mittlerer Luftgehalt

Zement Nr.	Abwintern in %						Luftporenkennwerte <sup>3)</sup>	
	Abschnitt				Mittel <sup>1)</sup>	Mittel <sup>2)</sup>	%	Anzahl je cm
	1	2	3	4				
11	5	85	60	64	53	53	1,26	0,27
12	13	44	12	8	19	—	—	—
13	73	100	75	100	87	87	1,63	0,30
14	Sp	25	25	14	16	16	0,69	0,15
15	6	88	33	100	57	57	1,30	0,24
16	50	60	58	47	54	—	—	—
17	42	100	55	15	53	53	0,98	0,20
18	8	82	8	78	44	44	1,05	0,18
Mittel	25	73	41	53	48	52	1,15	0,22
21	92	45	48	100	71	—	—	—
22	6	70	60	100	59	59	0,99	0,23
23	93	91	100	80	91	91	1,63	0,34
24	79	22	15	79	49	49	1,68	0,30
25	18	54	15	40	32	32	2,25	0,43
Mittel	58	56	48	80	60	58	1,64	0,32
31	100	94	18	15	57	57	1,53	0,39
33	10	40	38	8	24	24	0,62	0,18
34	92	100	68	80	85	85	2,57	0,45
Mittel	67	78	41	34	55	55	1,57	0,34
41	2	0	0	0	Sp	Sp	2,24	0,96
42	Sp	4	60	55	30	30	0,91	0,17
43	8	21	Sp	27	14	14	3,15	0,66
43A	3	10	5	Sp	4	4	1,48	0,35
Mittel	3	9	16	20	12	12	1,94	0,54
51	9	85	38	15	37	37	1,14	0,21
LP-Zemente								
12T	0	0	0	0	0	0	3,22	1,86
16T	0	0	0	0	0	0	5,09	3,92
21T	0	0	0	0	0	0	3,56	2,03
Mittel	0	0	0	0	0	0	3,96	2,60

<sup>1)</sup> Mittel von allen Zementen

<sup>2)</sup> Mittel von allen Zementen mit Luftgehaltswerten

<sup>3)</sup> Werte nach dem Meßlinienverfahren von Bohrkernen aus charakteristischem Beton

Sp = Spuren

dem Meßlinienverfahren bestimmten Luftporenkennwerte von Bohrkernen, die im Jahre 1961 von der Straßenbau-Verwaltung des Staates New York entnommen worden waren. Die Tafel zeigt, daß in vielen Fällen die 4 einzelnen Abwitterungswerte eines Zementes stark streuen können. Diese Unterschiede lassen sich nicht genau erklären, aber sie weisen darauf hin, daß wahrscheinlich die örtliche Lage eines Teilabschnitts sein Verhalten wesentlich beeinflusst. In einigen Fällen ist einer der Teilabschnitte bis zu 100% abgewittert. — Zu diesem Schluß kam die Besichtigungsgruppe, als alle Abschnitte ganz mit einem bituminösen Überzug versehen wurden.

Das auffälligste Ergebnis von Reihe 1 war die völlige Beständigkeit der LP-Zemente gegen das Abwittern. Unter den Zementen ohne LP-Stoffe hatte der Zement-Typ IV im Mittel den niedrigsten Abwitterungswert. Tafel 4 zeigt aber auch, daß von den Null-Zementen (d. h. denen ohne LP-Stoff) die des Typs IV im Mittel den höchsten Luftgehalt und die höchste Porenzahl besaßen. Ver-

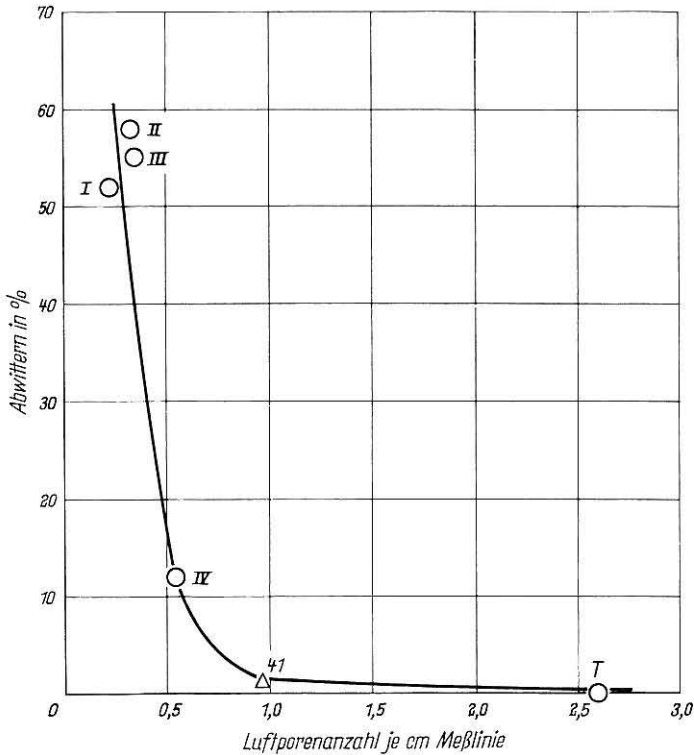


Bild 3 Versuchsstraße New York; Beziehung zwischen Abwittern und Luftporenanzahl je cm Meßlinie bei Beton aus verschiedenen Zement-Typen

schiedene Untersuchungen haben nachgewiesen, daß der Widerstand des Betons gegen das Abwittern durch Frost-Tau-Wechsel und durch Tausalze von der Menge der Luftporen und der Luftporen-Charakteristik abhängt. Wie Bild 3 zeigt, besteht für die Versuchsstrecke der Reihe 1 ein enger Zusammenhang zwischen dem mittleren Abwitterungswert und der durchschnittlichen Luftporenzahl je cm. Die LP-Zemente ergaben Beton mit durchschnittlich 2,6 Luftporen je cm und ein ausgezeichnetes Verhalten. Die Zemente vom Typ IV waren leicht luftporenbildend, sie hatten im Mittel 0,54 Luftporen je cm und verhielten sich besser als die Betone aus den Zementen der Typen I, II und III mit nur 0,22, 0,32 und 0,34 Luftporen je cm. Zement 41 war, wie Bild 3 zeigt, zufällig leicht luftporenbildend und lieferte Beton mit 0,96 Luftporen je cm und wesentlich besserem Verhalten.

## **2.2 Versuchsstraße Süd-Karolina; Reihe 2**

*Mildes Klima, jährlicher Schneefall i. M. 2 cm*

Nach 20jähriger Versuchsdauer in mildem Klima unterscheidet sich die Betonfahrbahn in der Versuchsstraße Süd-Karolina äußerlich wenig von dem Zustand, wie er unmittelbar nach dem Bau war. Es bestehen keine bemerkenswerten Unterschiede im Verhalten der Zemente. Der Beton enthielt im Mittel 330 kg Zement je m<sup>3</sup>.

Unglücklicherweise steht diese Versuchsstraße, da sie 1962 und 1963 auf 4 Fahrbahnen verbreitert und ihre Oberfläche erneuert wurde, für die weitere Beobachtung nicht mehr zur Verfügung. (Bild 4 mit einer Aufnahme der Straße im Jahre 1962 ist hier nicht wiedergegeben.)

## **2.3 Versuchsstraße Missouri; Reihe 3**

*Mäßig strenges Klima, jährlicher Schneefall i. M. 50 cm*

Die Versuchsstraße Missouri bei Mexico aus Beton mit durchschnittlich 320 kg Zement je m<sup>3</sup> liegt in einer Gegend mit mäßig strengem Klima. Sie hat ein fast horizontales Längsprofil (Bild 5; hier nicht wiedergegeben), einen verhältnismäßig leichten Verkehr und ist nur selten mit Salz gestreut worden. Der Hauptschaden an dieser Straße sind zahlreiche Aussprengungen über nicht frostbeständigen Zuschlagkörnern aus Hornstein bzw. Flintstein gewesen, von denen die meisten innerhalb eines Jahres nach dem Bau auftraten. Diese Aussprengungen kann man mit den verwendeten Zementen nicht in Beziehungen bringen.

Nach 20jähriger Beanspruchung werden jetzt die ersten Anzeichen von Schäden erkennbar. Spuren von leichtem Abwittern sind an 26 von 120 Versuchsabschnitten zu beobachten, in jedem Falle aber an höchstens 1/2 bis 1 % der jeweils betroffenen Oberfläche. Völlig frei von Abwitterungen sind die Abschnitte mit 8 von den 21 verwendeten Zementen ohne LP-Stoff, außerdem alle aus den 3 LP-Zementen. Vergleiche zwischen den Zementen im Hinblick auf ihre Abwitterung sind bis jetzt nicht angängig.

## 2.4 Versuchsstraße Topeka; Reihe 20

### Zemente „alter“ und „neuer“ Art

Die Versuchsstrecke in der Nähe von Topeka, Kansas, wurde im Jahre 1949 mit 36 Abschnitten zu rd. 330 m und 5 Abschnitten mit rd. 16 m Länge hauptsächlich deshalb gebaut, um das Verhalten der „altmodischen“ mit dem der „modernen“ Zemente im Straßenbeton zu vergleichen. Einzelheiten dieser Reihe sind in dem Bericht von P. Klieger über die Erweiterung der Langzeit-Versuche enthalten [14]. Für diese Reihe wurden 3 Zemente ohne LP-Stoffe 19 A, 19 B, 19 C hergestellt.

Sie unterscheiden sich hauptsächlich durch

	19 A	19 B	19 C
Mahlfeinheit nach Blaine in $\text{cm}^2/\text{g}$	2500	2470	3200
Rechn. Gehalt an $\text{C}_3\text{S}$ in %	36,8	48,6	52,0

Obgleich einiger Schaden an dieser Straße vorgekommen ist, kann davon aber wenig oder gar nichts den Unterschieden unter den Zementen zugeschrieben werden. Der Beton hatte Zementgehalte von  $360 \text{ kg/m}^3$  mit einem höchsten Wasserzementwert von 0,57 und von  $315 \text{ kg/m}^3$  mit einem höchsten Wasserzementwert von 0,60. Die Betonfahrbahnen wurden sowohl nach den Vorschriften von 1924 als auch nach denen von 1949 hergestellt.

Der grobe Zuschlag für diesen Beton war ein stark wassersaugender gebrochener Kalkstein mit 5,1 cm und mit 2,5 cm Größtkorn. Der hauptsächlichliche Schaden tritt in Form von „D-Rissen“<sup>2)</sup> längs den Straßenfugen und -kanten ein (Bild 6), ganz ausgesprochen in den Abschnitten mit dem gebrochenen Zuschlagstoff von 5,1 cm Größtkorn, viel weniger dagegen in denen mit nur 2,5 cm Größtkorn. Absichtlich wurde in einigen der Abschnitte mit 5,1 cm Größtkorn Luft eingeführt. Die künstlichen Luftporen scheinen insofern den Widerstand verbessert zu haben, als in keinem dieser Abschnitte Abwittern aufgetreten ist, während an einigen Abschnitten ohne Luftporen kleine oberflächliche Abwitterungen von weniger als 1 % entstanden sind. Wahrscheinlich können die Luftporen bei diesem stark wassersaugenden Zuschlagstoff mit 5,1 cm Größtkorn die Bildung der „D-Risse“ nicht verhindern. Da LP-Beton aus dem feineren Kalksteinzuschlag mit 2,5 cm Größtkorn nicht hergestellt wurde, ist dabei keine Aussage über den Nutzen der Luftporen möglich.

<sup>2)</sup> „D-Risse“ ist die Abkürzung für „Deposit-Risse“ und hat folgende Bedeutung: In einer Betonstraße wird ein Schaden, der auf den Witterungseinfluß zurückzuführen ist, gewöhnlich erst sichtbar durch das Auftreten von feinen, mehr oder weniger dicht beieinander liegenden parallelen Oberflächenrissen an den Ecken von einzelnen Platten längs der Fugen und Risse und manchmal längs der Plattenkanten. Diese Risse sind häufig mit einer dunkel gefärbten Ablagerung (deposit) gefüllt, hauptsächlich Calciumcarbonat. Daher rührt der Name „D-Risse“ oder „Deposit-Risse“.



Bild 6 Versuchsstraße Topeka; typische Bildung von D-Rissen und Ausfasern an Ecken und Fugen nach 12 Jahren

### 3. Sulfatlagerung; Reihen 7, 7 A, 7 B

#### 3.1 Anfängliche Lagerungsbedingungen

Das Versuchsfeld für die Sulfatlagerung liegt in Sacramento, Kalifornien. Das anfängliche Programm von Reihe 7 sah 1000 Balken  $13\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 86\text{ cm}$  aus allen LTS-Zementen vor. Sie wurden im Dezember 1942 in zwei Becken von  $12\text{ m} \times 16\text{ m} \times 0,25\text{ m}$  eingelagert. Beide enthielten natürlich vorkommenden Boden, Behälter 1 mit 10%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , auf den trockenen Boden bezogen, Behälter 2 mit derselben Menge eines Gemisches aus  $\frac{1}{3}\text{ Na}_2\text{SO}_4$  und  $\frac{2}{3}\text{ MgSO}_4$ . Die Prüfkörper wurden liegend in die Böden eingebettet und tauchten normalerweise nur zur Hälfte ihrer Höhe von 15 cm darin ein. Vor Zeit zu Zeit wurde Wasser bis zur Bedeckung eingefüllt, das anschließend langsam verdunstete. Der Angriff durch den Natriumsulfat-Boden war stärker als durch das Gemisch mit Magnesiumsulfat. In Behälter 1 entstand als Niederschlag ein weißer, fetter Stoff; in Behälter 2 war er glasartig. — Bei den Reihen 7 A und 7 B wurde nur in Natriumsulfat-Boden eingelagert.

Schon nach 6jähriger Lagerung konnte im Jahre 1949 Kapitel 5 des LTS-Berichtes erscheinen [5], das die Ergebnisse und Folgerungen über die Bewährung der Zemente behandelt und die Folgerungen aus anderen Arbeiten über den Einfluß des Zementgehalts und Wasserzementwerts im Beton, des  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalts im Zement und der künstlich eingeführten Luftporen auf den Sulfatangriff bestätigt. Die im Jahre 1949 niedergeschriebenen Folgerungen wurden im Zehn-Jahres-Bericht [8] zusammengefaßt und sind nachstehend in einigen Punkten wörtlich wiedergegeben:

- „1) Die Untersuchung von Beton derselben Konsistenz aus 27 verschiedenen Zementen mit 3 verschiedenen Zementgehalten

hat ergeben, daß Unterschiede im Widerstand gegen Sulfat-angriff hauptsächlich auf den folgenden beiden Einflüssen beruhen:

- a) dem Zementgehalt des Betons,
- b) der Zusammensetzung des Zements, wie sie der rechnerische Gehalt an Tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) angibt.

Bei den zementreichen Mischungen mit Gehalten von rd.  $390 \text{ kg/m}^3$  war der Sulfatangriff gering; nach 6 Jahren Lagerung war zwischen den Zementen mit einigen Ausnahmen ein nur geringer Unterschied im Widerstand erkennbar. Bei dem mageren Beton mit rd.  $220 \text{ kg}$  und dem dazwischen liegenden Beton mit  $310 \text{ kg}$  Zement verlief der Angriff schneller; bei ihnen war die Bedeutung der Zementzusammensetzung deutlich erkennbar. Da gegenüber Sulfat der Zement den angreifbaren Bestandteil des Betons darstellt, ist die Zunahme des Sulfatwiderstandes mit der Zunahme des Zementanteils bemerkenswert. Infolge des niedrigeren Wasserzementwerts und der niedrigeren Porosität der zementreicheren Mischungen ließ sich sogar mit Zementen von ungünstiger Zusammensetzung ein hoher Widerstand gegen Sulfatangriff für Zeitspannen bis zu 6 Jahren erreichen.

Obleich sich bei diesen Prüfungen keine quantitative Abhängigkeit zwischen dem Widerstand des Betons gegen Sulfatangriff und dem  $C_3A$ -Gehalt des Zements herausstellte, wurde doch erkennbar, daß der Prozentgehalt an  $C_3A$  ein ziemlich gutes Kriterium des Sulfatwiderstands darstellt. Die Tatsache, daß es einige markante Ausnahmen von der Beziehung zwischen dem Sulfatwiderstand und dem  $C_3A$ -Gehalt gibt, weist darauf hin, daß es einen noch unbekanntem Faktor in der Zementzusammensetzung oder in der Herstellung der Zemente gibt, der den Sulfatwiderstand beeinflusst.

- 2) Die Luftführung bewirkte einige Verbesserung im Sulfatwiderstand; im Falle von 2 der 6 Zemente war sie beachtlich. Weil der Luftgehalt im allgemeinen geringer war als man für den besten Widerstand gegen Salzanfall auf Straßen verlangt, darf man die geringe Verbesserung im Falle der 4 anderen Zemente nicht einer günstigen Wirkung der Luftporen zuschreiben.
- 3) Als ein Mittel, um den Sulfatwiderstand von Beton auf Grund von Zementprüfungen vorauszusagen, scheinen sowohl der rechnerische  $C_3A$ -Gehalt und die Ausdehnungs-Messung von Mörtelprismen 1:6 der Abmessungen  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$  wertvoll zu sein. Eine Grenze von 7% in dem  $C_3A$ -Gehalt ermöglichte eine gute Trennung zwischen den Zementen mit günstigem und ungünstigem Verhalten. Aber es ist ein weiteres Kriterium nötig, um Zemente mit günstigem von denen mit bestem Verhalten zu unterscheiden. Ein niedriger  $C_3A$ -Gehalt, wie z. B. 5%, erfüllt diesen Zweck nicht, da er einige Zemente mit bestem Verhalten ausschließt."

Die vorstehenden, auf 6 Jahre Lagerung fußenden Folgerungen lassen sich jetzt ergänzen. Das ist in den folgenden Abschnitten

auf Grund der 20jährigen Lagerung der Betonkörper mit 390 kg Zement je m<sup>3</sup> im Becken 1 von Sacramento geschehen.

Lerch hat in einer Arbeit [15] die Phasenzusammensetzung der Zemente unter Berücksichtigung der Nebenoxide nochmals berechnet. Tafel 5 enthält unter C die neuerdings von Kantro, Copeland,

Tafel 5 Reihe 7; Beton in sulfathaltigen Böden  
10- und 20jährige mittlere Schadensstufen von zwei Betonbalken mit 390 kg Zement je m<sup>3</sup> aus allen Zementen in Becken 1 von Sacramento im Vergleich zum errechneten C<sub>3</sub>A-Gehalt  
Schadensstufen: 1 = unverändert... 6 = völlige Zerstörung

Zement Nr. 1)	% C <sub>3</sub> A 2)			Schadensstufe	
	A	B	C	10 Jahre	20 Jahre
23	3,8	2,1	3,8	1,1	1,4
51	3,8	2,2	1,2	1,1	1,5
42	3,4	2,7	1,4	1,3	1,4
41	4,7	3,4	1,0	1,3	1,9
25	4,8	3,8	1,4	1,1	1,4
43A	5,3	3,9	1,7	1,0	1,3
24	5,4	4,4	2,7	1,0	2,1
43	6,2	4,8	3,5	1,2	1,5
21	6,3	5,1	3,4	1,3	2,1
21T	6,6	5,4	—	1,1	1,4
16T	7,9	6,8	—	1,1	1,6
22	6,6	5,4	3,2	1,5	3,0
34	5,6	5,2	3,6	2,2	5,2
16	7,4	6,4	4,3	3,8	5,3
14	8,2	7,1	3,5	2,2	4,7
13	10,0	8,9	6,5	1,9	5,5
17	10,4	9,1	8,8	4,1	5,9
33	10,4	9,2	7,1	4,2	6,0
33T	10,4	9,3	—	1,6	5,0
31	10,7	9,6	7,4	4,5	6,0
15	12,0	9,9	9,7	5,2	6,0
11	12,1	10,9	8,3	2,3	5,4
11T	12,2	11,0	—	1,6	4,7
12T	12,5	11,1	—	4,9	6,0
12	12,6	11,2	7,8	5,5	6,0
18	13,0	12,2	7,0	6,0	6,0
18T	13,2	12,2	—	5,7	6,0

1) die erste Ziffer der Nummern gibt den Zementtyp (nach ASTM) an;  
T = LP-Zement

2) C<sub>3</sub>A-Gehalte, wie sie sich auf folgende Weise ergeben:

A: C<sub>3</sub>A-Gehalt errechnet ohne Korrektur für Nebenoxide, Daten aus Kapitel 5

B: C<sub>3</sub>A-Gehalt errechnet mit Korrektur für Nebenoxide

C: C<sub>3</sub>A-Gehalt röntgenographisch bestimmt, Daten nach D. L. Kantro, L. E. Copeland, C. H. Weise und S. Brunauer: Quantitative determination of the major phases in portland cements by X-ray diffraction methods. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 6 (1949) Nr. 1, S. 20/40; ebenso PCA Research Department, Bulletin 166

Weise und Brunauer röntgenographisch bestimmten Werte für den  $C_3A$ -Gehalt in (LTS-)Zementen ohne Luftporen, unter A die aus dem früheren LTS-Bericht, Kapitel 5, [5] und unter B die von Lerch korrigierten Werte, d. h. in zeitlicher Reihenfolge. Die Tafel gibt auch die unterschiedlichen Schadensstufen für die beiden Balken aus Beton mit 390 kg Zement je  $m^3$  nach 10 und 20 Jahren Lagerung in Becken 1 wieder.

Nach 10 Jahren gehörten zu den Balken mit ausgezeichnetem Verhalten, d. h. mit einer mittleren Schadensstufe von 1,1 bis 1,5, die aus Zementen der Typen II, IV und V und die aus den LP-Zementen 21T und 16T.

Nach den 20-Jahres-Werten kann man die Balken in 2 abgegrenzte Gruppen trennen, und zwar in die mit den Schadensstufen 3 oder niedriger und in 4,7 oder höher. Eine Schadensstufe von 1,5 oder niedriger nach 10 Jahren zeigt ebenso wie ein Wert von 3 oder niedriger nach 20 Jahren die beste Bewährung an. Auf dieser Grundlage darf man annehmen, daß Zemente, die man nach 10 Jahren als beste bezeichnet hat, es auch noch nach 20 Jahren sind.

Nach Folgerung 3 des LTS-Berichtes von 1953, Kapitel 5, [5] ermöglichte ein  $C_3A$ -Gehalt von etwa 7 % ohne Korrektur für Nebenoxide eine gute Trennung zwischen Zementen von gutem und ungünstigem Verhalten. Auf Grund der jetzigen Versuche ist Folgerung 3 dadurch zu ergänzen, daß ein  $C_3A$ -Gehalt von 5,5 %, wenn er durch Berücksichtigung der Nebenoxide korrigiert ist, und von etwa 3,5 %, wenn er röntgenographisch bestimmt ist, einen ziemlich guten Grenzwert darstellt, um bei zementreichem Beton (390 kg Zement je  $m^3$ ) beste Bewährung von ungünstigem Verhalten zu unterscheiden. Künstliche Luftporen haben sich bei den Versuchen als vorteilhaft erwiesen; sie sichern aber keinen hohen Widerstand gegen Sulfatangriff, wenn der Zement einen ziemlich hohen  $C_3A$ -Gehalt hat. Der Einfluß der Nebenoxide auf die Menge und die Sulfatanfälligkeit der tonerdehaltigen Phasen im Zement ist noch nicht ganz klar.

### 3.2 Erweiterung der Sulfatlagerung

*Reihe 7 A: Zemente neuer und alter Art (1949)*

*Reihe 7 B:  $C_3A$ -freier Zement und Zemente mit LP-Stoff (1958)*

Um gewisse Phasen des Sulfatwiderstands weiter aufzuklären, wurden die beiden zusätzlichen Reihen 7 A und 7 B begonnen; beide lagerten wieder in den Behältern von Sacramento, jedoch in dem stärker angreifenden Boden mit hohem Gehalt an Natriumsulfat (ohne Magnesiumsulfat). Bild 7 zeigt die Sulfatlagerungs-Behälter im Zustand von 1962. Der Behälter im Hintergrund enthält die wenigen noch übrigen Balken von Reihe 7 und alle Balken von Reihe 7 A. Der Behälter im Vordergrund enthält die Balken von Reihe 7 B. Eine Beschreibung dieser Reihen wurde von P. Klieger in Kapitel 14 des LTS-Berichtes veröffentlicht [14].

Die erste zusätzliche Reihe war 7 A mit je 4 Zementen der Typen V und II, von denen einer jeden Typs in demselben Werk hergestellt





Bild 7 Beton in sulfathaltigem Boden in Sacramento

war, und einigen Original-LTS-Zementen der Typen II, IV und V zum Vergleich. Die Versuche sollten Aufschluß darüber geben, welche Vorteile die Verwendung der Zemente vom Typ II, IV und V und weiterhin das Vorhandensein künstlicher Luftporen bietet. Die Prüfbalken von  $13 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 86 \text{ cm}$  aus Beton mit rd. 310 und mit rd. 390 kg Zement je  $\text{m}^3$  wurden 1949 in die Prüfung einbezogen. Die bisherigen Veränderungen eignen sich noch nicht für einen ausführlichen Bericht. Die einzige Folgerung, die sich zur Zeit (Ergebnisse von 1962) ziehen läßt, ist, daß die Zemente der Typen II, IV und V in dem zementreichen Beton mit 390 kg je  $\text{m}^3$  der strengen Beanspruchung in dem Sacramento-Versuchsfeld sehr gut widerstehen. Die vorteilhafte Wirkung der Luftporen ist wieder offenkundig, die Luftporen können aber, wie schon mit Reihe 7 festgestellt, eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Sulfatangriff nicht sichern, wenn der Zement verhältnismäßig viel  $\text{C}_3\text{A}$  enthält.

Die zweite, 1958 begonnene Zusatzreihe 7 B umfaßt die Beobachtung des Verhaltens von 3 der ursprünglichen LTS-Zemente der Typen I, II und V im Vergleich mit einem  $\text{C}_3\text{A}$ -freien Zement allein und in Mischungen mit 20 und 40 % Flugasche oder Monterey-Schiefer als Ersatz des Portlandzementes, ferner mit 3 Portland-Hochofenschlacke-Zementen (Hüttenzementen) sowie 3 Portlandzementen, die aus ähnlichen Klinkern vermahlen waren, wie sie zur Herstellung der 3 Portland-Hochofenschlacke-Zemente gedient hatten. Die Betonbalken mit den Abmessungen  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 76 \text{ cm}$  enthielten rd. 220, rd. 310 und rd. 390 kg Zement je  $\text{m}^3$  Beton. Einige Versuchsbalken wurden mit Dampf behandelt. Sichtbare Veränderungen sind bei den mageren Mischungen dieser Prüfreihe ziemlich schnell entstanden, aber es ist noch zu früh, um Folgerungen daraus abzuleiten.

Die Zusammensetzung der Zemente für die Reihen 7 A und 7 B ist in dem Bericht von P. Klieger enthalten [14]. Tafel 6 zeigt die 1962 festgestellten Schadensstufen der Proben von Reihe 7 A. Die

Tafel 6 Reihe 7 A; Beton in sulfathaltigen Böden  
 Probenbewertung 1962, Becken 1, Beginn Mai 1949  
 Schadensstufen: 1 = unverändert . . . 6 = völlige Zer-  
 störung

Zement		Mischung 2	Mischung 3
Nr.	Beschreibung	310 kg Zement je m <sup>3</sup>	390 kg Zement je m <sup>3</sup>
21	ohne Lufteinführung	1,7	1,2
2M	" "	1,5	1,2
2 I	" "	3,5	1,4
2S	" "	1,8	1,2
2L	" "	2,0	1,3
Mittel		<u>2,1</u>	<u>1,3</u>
21-A	LP-Zement	1,3	1,2
2M-A	" "	1,4	1,2
2 I-A	" "	1,5	1,2
2 I-2A	" "	1,8	nicht hergestellt
2S-A	" "	1,5	1,2
2L-A	" "	1,7	1,2
Mittel		<u>1,5</u>	<u>1,2</u>
21-AA	hoher Luftgehalt	1,3	nicht hergestellt
2L-AA	" "	1,3	nicht hergestellt
Mittel		<u>1,3</u>	
41	ohne Lufteinführung	1,5	1,3
43	" "	1,6	1,6
43A	" "	1,6	1,3
Mittel		<u>1,6</u>	<u>1,4</u>
41-A	LP-Zement	1,7	1,2
43-A	" "	1,7	1,4
43A-A	" "	1,4	1,2
Mittel		<u>1,6</u>	<u>1,3</u>
51	ohne Lufteinführung	1,3	1,3
5M	" "	1,4	1,3
5 I	" "	1,6	1,3
5S	" "	1,9	1,4
5L	" "	2,1	1,4
Mittel		<u>1,7</u>	<u>1,3+</u>
51-A	LP-Zement	1,3	1,3
5M-A	" "	1,4	1,2
5M-2A	" "	1,3	nicht hergestellt
5 I-A	" "	1,3	1,3
5S-A	" "	1,5	1,2
5L-A	" "	1,3	1,3
Mittel		<u>1,3+</u>	<u>1,3</u>
51-AA	hoher Luftgehalt	1,2	nicht hergestellt
5 I-AA	" "	1,3	nicht hergestellt
Mittel		<u>1,2+</u>	

Tafeln 7 und 8 zeigen die Schadensstufen für die Proben der Reihe 7 B. Die Schadensstufe 1 bedeutet keine Schädigung, während die Schadensstufe 6 völlige Zerstörung anzeigt. Photographien der Proben mit Schadensstufen von 1 bis 5 zeigt Bild 8.

#### 4. Meer- und Süßwasserlagerung; Reihen 8 A, B, C, D, E, F und G

Das Verhalten von 22 der ursprünglichen 27 Versuchszemente in Betonversuchspfählen hat der 1960 als Kapitel 12 erschienene LTS-Bericht [12] für die eine Süßwasser- und die drei Meerwasserlagerungen behandelt. Die Süßwasser- und eine der Meerwasserreihen lagern in sehr strengem Klima, die übrigen beiden Meer-

Tafel 7 Reihe 7 B; Beton in sulfathaltigen Böden  
 Probenbewertung 1963, Becken 2, Beginn November 1958  
 Schadensstufen: 1 = unverändert . . . 6 = völlige Zerstörung

Zement	Zement-Ersatz nach Gewicht	220 kg Zement je m <sup>3</sup>	310 kg Zement je m <sup>3</sup>	390 kg Zement je m <sup>3</sup>
12	—	4,7	1,5	1,2
21	—	2,6	1,4	1,1
51	—	2,7	1,5	1,2
LS	—	3,0	1,3	1,1
PS-1	—	4,2	3,1	1,8
P-1	—	4,7	2,4	1,2
A/E 12	—	2,3	1,2	1,2
A/E 12	20 % MS	2,8	1,3	1,2
A/E 12	40 % MS	3,9	2,9	2,6
A/E 12	20 % FA	1,9	1,2	1,2
A/E 12	40 % FA	3,1	1,4	1,2
A/E 21	—	1,5	1,2	1,3
A/E 21	20 % MS	2,9	1,5	1,2
A/E 21	40 % MS	4,1	3,5	2,1
A/E 21	20 % FA	1,6	1,2	1,2
A/E 21	40 % FA	3,2	2,3	2,2
A/E 51	—	2,0	1,4	1,3
A/E 51	20 % MS	2,3	1,5	1,4
A/E 51	40 % MS	4,1	3,5	3,2
A/E 51	20 % FA	2,4	1,2	1,2
A/E 51	40 % FA	3,1	2,0	1,8
A/E LS	—	1,8	1,3	1,2
A/E LS	20 % MS	3,3	1,7	1,6
A/E LS	40 % MS	4,1	3,6	3,3
A/E LS	20 % FA	2,0	1,5	1,3
A/E LS	40 % FA	2,6	1,8	1,6
A/E PS-1	—	3,5	2,5	1,7
A/E PS-2	—	4,9	2,5	1,7
A/E PS-3	—	1,8	1,8	1,2
A/E P-1	—	3,5	1,8	1,3
A/E P-2	—	2,0	1,6	1,5
A/E P-3	—	1,6	1,2	1,2

MS = Monterey-Schiefer  
 FA = Flugasche

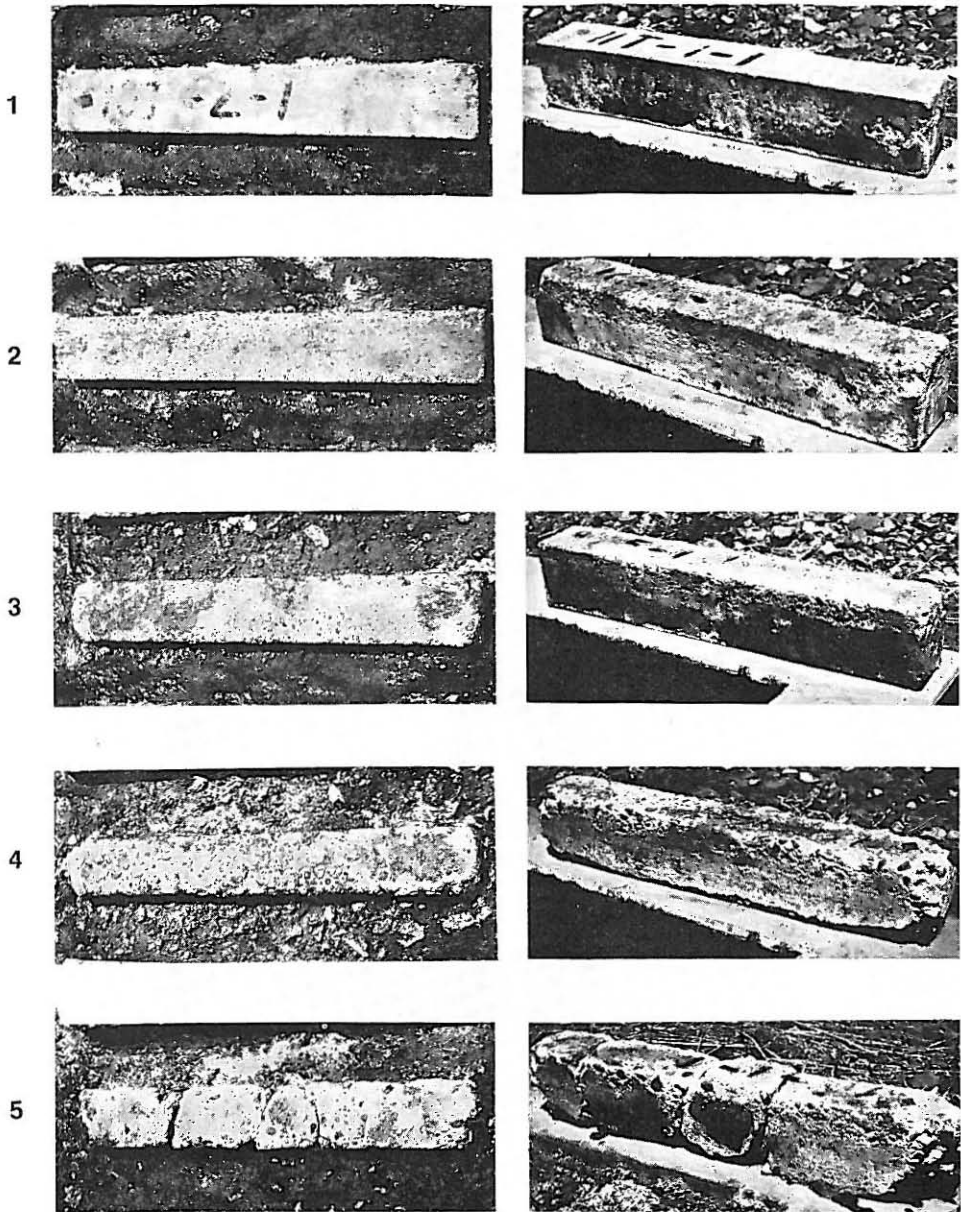


Bild 8 Typische Proben, die den Umfang der Schädigung in den verschiedenen Stufen zeigen; links: Aufsicht der Proben im Behälter; rechts: aus dem Behälter genommene Proben (Proben sind nicht identisch); die Ziffern geben die Schadensstufen an

**Tafel 8** Reihe 7 B; Beton in sulfathaltigen Böden  
 Bewertung 1963 der bei verschiedenen Temperaturen  
 nachbehandelten Proben  
 Becken 2, Mischung 2 mit 310 kg Zement je m<sup>3</sup>, Beginn  
 November 1958  
 Schadensstufen: 1 = unverändert ... 6 = völlige Zer-  
 störung

Zement	Zement-Ersatz	23 °C	60 °C
A/E 12	—	1,2	1,5
A/E 12	20 % MS	1,3	1,8
A/E 12	20 % FA	1,2	1,3
A/E 18	—	—	1,3
A/E 21	—	1,2	1,3
A/E 51	—	1,4	1,3
A/E PS-1	—	2,5	1,4

wasserreihen in mildem Klima. Seit Erscheinen des Zehn-Jahres-Berichtes (Kapitel 8) [8] und in den 3 Jahren nach Veröffentlichung von Kapitel 12 des LTS-Berichtes sind in diesen Versuchsreihen viele Veränderungen eingetreten. Tafel 9 faßt die Einzeldaten der Schadensstufen von den 4 Versuchsreihen bis zu den Jahren 1962 und 1963 zusammen.

#### 4.1 Pfähle bei Cape Cod; Reihe 8 A

##### *Meerwasser mit strenger Frost-Tau-Beanspruchung*

Die 6 bis 9 m langen Pfähle mit quadratischem Querschnitt von 60 cm × 60 cm stehen an einer Stelle, wo der Gezeitenunterschied 2,70 m beträgt. Bei Flut ragen sie nur noch wenig aus dem Wasser. Die Pfähle wurden durch 8 Längsstäbe mit 3,8 cm Überdeckung bewehrt. (Diese Überdeckung hat sich als zu gering erwiesen.)

Bild 9 zeigt einen allgemeinen Überblick über die Pfähle bei Cape Cod, Massachusetts. Zur besseren Kennzeichnung ihrer Veränderungen wurden vom Jahre 1950 an, in dem man ihr Aussehen erstmals zahlenmäßig gekennzeichnet hat, bis zum Jahre 1962 die Schadensstufen graphisch wie in Bild 10 aufgetragen. Aus einer Betrachtung der in Bild 10 gezeigten Daten folgt:

- 1) Pfahl 21-1 war innerhalb von 7 Jahren (1949) völlig zerfallen, war aber auch nach 10 Jahren Lagerung (1952) noch immer der einzige völlig zerstörte Versuchskörper.
- 2) Nach 15 Jahren waren 5 Pfähle (21, 13, 14, 42 und 43), sämtlich in der zementarmen Mischung 1 mit 280 kg Zement je m<sup>3</sup> Beton, zerstört. 25 Pfähle waren dagegen noch in bestem oder nahezu bestem Zustand mit niedrigerer Schadensstufe als 2; dazu gehörten alle 3 Pfähle aus den Zementen 25, 43A, 16T und 21T, ferner Pfähle in den zementreicheren Mischungen 2 und 3 mit 390 kg Zement je m<sup>3</sup> Beton und einem Setzmaß von 5 bzw. 20 cm aus den Zementen 41, 43 und 12T, endlich Pfähle mit zementreicher

Tafel 9 Reihen 8 A, 8 B, 8 C und 8 D  
Zusammenfassung über das Verhalten der Versuchspfähle in Seewasser und Süßwasser

Zement	Schadensstufen 1962 1 = unverändert . . . 10 = völlige Zerstörung						Rißlänge in m					
	in Cape Cod, Massachusetts, in Seewasser (streng)			in Saugerties, New York, in Süßwasser (streng)			1962 in St. Augustine, Florida, in Seewasser (mild)			1963 in Newport Beach, Kalifornien, in Seewasser (mild) *)		
	Mischung*)			Mischung*)			Mischung*)			Mischung*)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	10,0	5,0	6,9	5,7	5,4	7,6	3,50	1,20	2,30	3,65	0	2,15
12	9,3	5,2	6,0	6,6	4,6	5,2	8,25	0	0,45			
13	10,0	6,0	10,0	5,5	4,2	5,2	3,05	0	0,30			
14	10,0	3,7	10,0	7,9	4,6	6,5	3,95	2,75	3,95			
15	10,0	5,4	7,4	6,9	4,8	5,6	1,70	0	0			
16	10,0	9,0	5,5	6,4	5,0	6,2	11,60	0	1,20			
18	10,0	6,2	8,2	5,1	3,3	5,2	4,25 <sup>1)</sup>	1,20 <sup>2)</sup>	3,20 <sup>3)</sup>	4,60	0	3,65
21	10,0	5,1	7,0	6,9	4,6	5,8	2,60	0,30	0,75			
22	10,0	6,4	5,9	6,5	5,2	5,6	8,40	0	0,15			
23	10,0	5,3	5,4	6,0	5,1	5,3	9,60	0	4,40	5,20	0	3,05
24	10,0	6,5	6,1	7,9	4,6	5,2	9,90	2,15	6,85			
25	5,9	7,2	5,3	5,4	5,3	4,1	7,45	0,30	1,20			
31	9,5	9,0	—	7,0	5,6	7,0	2,45	0	2,00			
33	9,2	7,2	7,0	7,0	5,9	7,4	2,15	0,90	0,30			
34 <sup>5)</sup>										3,95	0	4,60
41	7,6	2,6	4,9	5,7	3,0	5,1	8,85	2,45	0,30			
42	10,0	3,3	7,4	5,1	3,8	1,8	7,60	0	0,15			
43	10,0	—	5,6	5,7	5,1	5,8	5,20	0,90	1,50	6,70	0	2,45
43A	6,0	2,9	5,2	5,2	4,6	5,3	1,85	0,30	0,90	1,85	0	0,60
51	10,0	5,8	6,5	5,9	4,4	4,6	8,25	0	6,85	6,30	0	1,50

LP-Zement

12T	7,4	5,3	5,2	6,0	5,0	5,6	0,45	0	0			
16T	5,3	5,1	6,9	5,5	4,1	5,4	2,30	0,15	0			
21T	5,6	3,9	5,9	5,5	4,2	5,4	0,30	0	0			

*) Mischung	1	2	3
kg Zement je m <sup>3</sup>	280	390	390
Setzmaß cm	5,1	5,1	20,3

<sup>1)</sup> allgemeines Erweichen und Zertreiben unterhalb 2,00 m

<sup>2)</sup> Erweichen und geringe Abtragung an den Kanten unterhalb 2,45 m

<sup>3)</sup> starkes Erweichen und Zertreiben unterhalb 2,45 m; einiger Stahl freigelegt

<sup>4)</sup> nur 7 Zemente sind an dieser Reihe beteiligt

<sup>5)</sup> Zement 34 nur in Newport Beach verwendet



Bild 9 Pfähle bei Cape Cod; Überblick

Mischung und niedrigem Setzmaß aus den Zementen 12, 13, 14, 15, 18, 24 und 42.

3) Nach 20 Jahren Lagerung waren 15 Pfähle völlig zerstört. Aus Mischung 1 waren die Zemente 11, 13, 14, 15, 16, 18, 21, 22, 23, 24, 42, 43 und 51 betroffen; dazu gehörten auch 2 Pfähle aus Mischung 3 mit den Zementen 13 und 14. Kein Pfahl in dieser Versuchsreihe blieb unbeeinflusst.

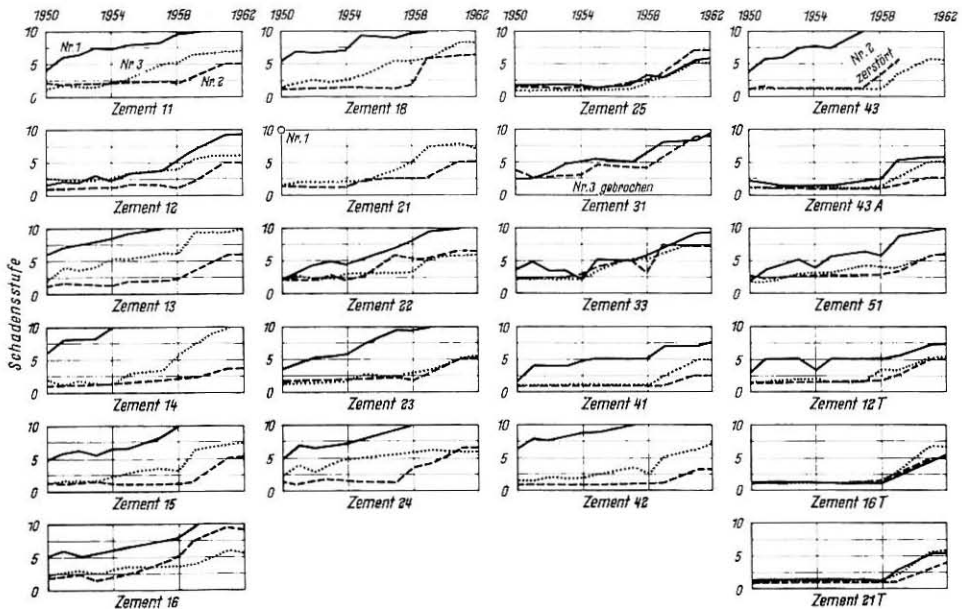


Bild 10 Schadensstufen der Pfähle bei Cape Cod in den Jahren 1950 bis 1962

4) Besonders zu erwähnen ist das ausgezeichnete Verhalten bestimmter Zemente bis zum Alter von 16 Jahren; das sind die Zemente 25, 43A, 16T und 21T, bei denen alle 3 Pfähle durch die Lagerung unbeeinflusst blieben. Man darf auch den Zement 12T vernünftigerweise mit in diese Gruppe aufnehmen, da der Pfahl 12T-1 augenscheinlich beim Verladen und nicht durch die Lagerung beschädigt worden ist.

#### 4.2 Pfähle bei Saugerties; Reihe 8 B

*Süßwasser, weniger strenges Klima*

Bei der Lagerstelle Saugerties, New York, zeigt sich kein Unterschied zwischen den Zementtypen und nur ein geringer Vorteil der künstlichen Luftporen. Der Schadensgrad der Proben ist in dieser Reihe auffallend gleichmäßig; das wird man auf die Wirkung von säurehaltigem Abwasser aus einer Papiermühle zurückführen müssen, das das Wasser der Pfahlagerstelle während dreier Kriegsjahre verunreinigte. Bild 11 zeigt die Nahaufnahme einiger durch den Säureangriff beschädigter Pfähle.

#### 4.3 Milde Lagerungsbedingungen; Reihen 8 C (St. Augustine) und 8 D (Newport Beach)

Unter den milden Lagerungsbedingungen von *St. Augustine*, Florida, hat man als Kriterium für die Schadensstufe die Rißlänge über den Bewehrungsstäben jedes Pfahles bestimmt. Mit nur einer bemerkenswerten Ausnahme ist an keinem der Pfähle eine andere Zerstörung beobachtet worden als diese Rißbildung, obgleich bei einigen der Pfähle die zusätzliche Wirkung einer Alkali-Silicat-Reaktion nicht völlig auszuschließen ist.

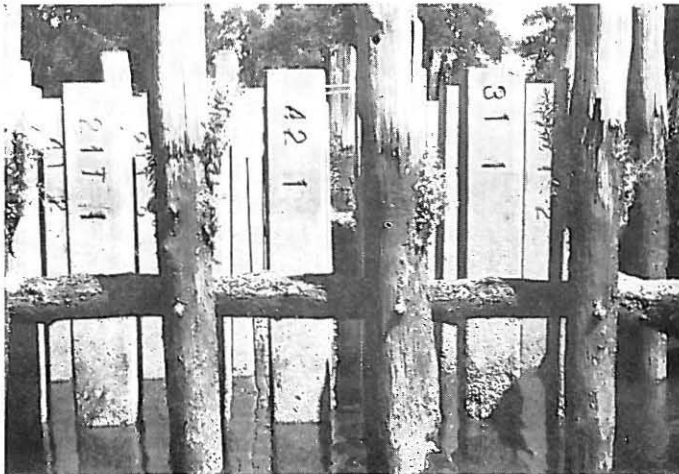


Bild 11 Pfähle bei Saugerties, die den allgemeinen Angriff an allen Pfählen zeigen; Ansicht bei Ebbe



Bei St. Augustine zeigten die Pfähle mit dem Zement 18 in allen 3 Mischungen offensichtlich einen sehr starken Angriff von Meerwasser, der in einem Weichwerden und Abtragen des Betons besonders an den Kanten der Pfähle erkennbar wird, wie Bild 12 zeigt. Die Anfälligkeit des Zements 18 mit dem höheren  $C_3A$ -Gehalt gegen Sulfatangriff wurde schon vorher bei der Lagerung in Sacra-



Bild 12 Pfähle bei St. Augustine mit Zement 18 ( $C_3A$ -Gehalt 12,2 %) )

mento (Tafel 5) festgestellt; man darf deshalb eine Ähnlichkeit zwischen Sulfat- und Meerwasserangriff annehmen.

Bild 13 gibt die Länge der Risse in jedem Pfahl von 1951 bis 1962 wieder. Diese Darstellung macht folgende Beziehung erkennbar:

1) Der Nutzen der künstlichen Luftporen tritt bei allen 3 LP-Zementen hervor, besonders ausgeprägt in der zementarmen Mischung 1 mit 280 kg Zement je  $m^3$ . Zement 16T hat auffällig viele Risse, trotzdem ist die Rißbildung, verglichen mit der des luftporenfreien Betons, zu vernachlässigen. Zement 16 in derselben Mischung 1 besitzt die stärksten Risse von allen Pfählen dieser Lagerung.

2) Das günstige Verhalten einer zementreicheren Mischung mit rd. 390 kg Zement je  $m^3$  Beton ist in fast jedem Falle deutlich erkennbar. Ausnahmen sind die Zemente 14 und 24, bei denen eine zerstörende Alkali-Silicat-Reaktion möglich ist, und Zement 51, bei dem die Mischungen 1 und 3 sich ähnlich ungünstig verhalten, während die wie 3 ebenfalls zementreiche Mischung 2 mit nur 5 cm Setzmaß völlig unverändert geblieben ist.

3) 27 von den ursprünglich 66 Pfählen hatten nicht mehr als 46 cm Rißlänge. Dieser Rißanteil darf nach 20jähriger Lagerung als ziemlich unbedeutend gelten.

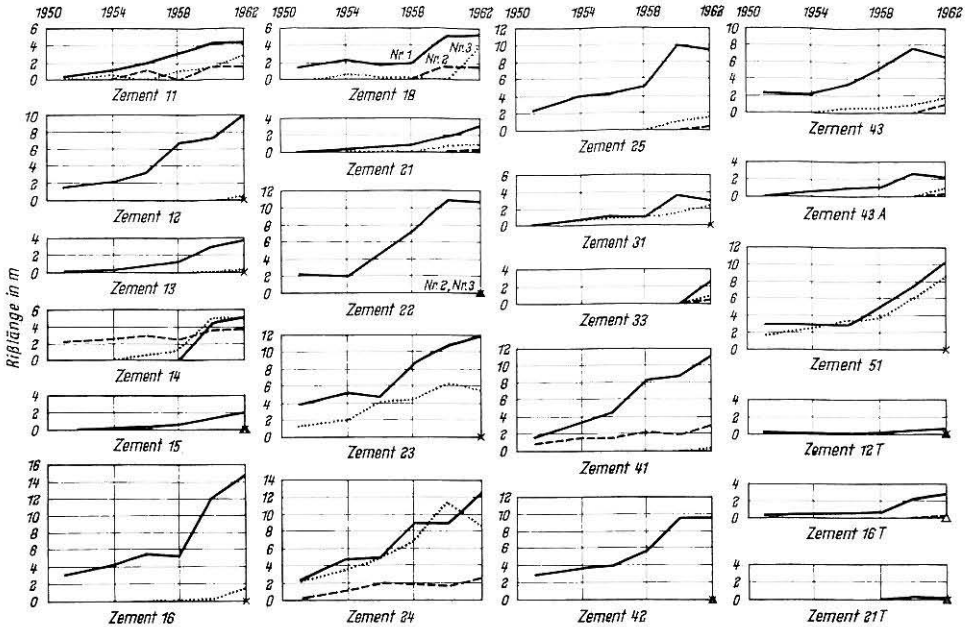


Bild 13 Rißlänge der Pfähle bei St. Augustine in den Jahren 1951 bis 1962

4) Zement 33 verhielt sich bei dieser Lagerung ausgezeichnet. Bis 1962 wurden an keinem der 3 Pfähle Risse beobachtet.

5) Die Zemente 15 und 43A haben sich in St. Augustine ausgezeichnet verhalten.

Auf der Lagerstelle *Newport Beach*, Kalifornien, mit nur 7 dabei verwendeten Zementen ohne künstliche Luftporen ist als einzige Schädigung die Rißbildung über dem Bewehrungsstahl zu beobachten, wie Bild 14 zeigt. Wie in den anderen Fällen herrscht der Einfluß des Mischungsverhältnisses vor.

Die mit Mischung 2 hergestellten Pfähle zeigen keine Risse. Es bestehen keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Zementen. Interessanterweise ist in *Newport Beach* an den Pfählen mit Zement 18 außer der Rißbildung über den Bewehrungsstählen keine Schädigung erkennbar.

Das 20jährige Verhalten unter diesen vier Lagerungsbedingungen läßt dem Augenschein nach folgende allgemeine Schlüsse zu:

1) 38 mm Betonüberdeckung über dem Bewehrungsstahl reichen für diese Beanspruchung nicht aus. (In DIN 4030, Abs. 6.3, wird für Beton im Meerwasser eine Überdeckung von mindestens 50 mm gefordert.)

2) Das Rosten und Ausdehnen des Bewehrungsstahls hat bei dieser schweren Beanspruchung möglicherweise einige andere Arten der Zerstörung verdeckt.



Bild 14 Pfähle bei Newport Beach, die typische Risse über der Bewehrung zeigen

3) Für dauerhaften Beton sind ein niedriger Wasserzementwert, ein niedriges Setzmaß und ein hoher Zementgehalt nötig. Mischung 2 mit 390 kg Zement je  $m^3$  und höchstens 5 bis 8 cm Setzmaß stellt die Mindestmischung dar, die für diese strengen Lagerungsbedingungen zu empfehlen ist.

4) Die Einführung von künstlichen Luftporen ist unter strengen Lagerungsbedingungen und mindestens gleichermaßen unter milden Lagerungsbedingungen von einigem Vorteil. Jedoch ist die in den Pfählen durch die Luftporen bewirkte Verbesserung unter Frostbedingungen geringer, als das in anderen Reihen der Langzeit-Versuche der Fall ist.

5) Ein Angriff durch Meerwasser trat unter milden Lagerungsbedingungen nur bei einem Zement mit hoher Sulfat-Anfälligkeit auf.

6) Rosten und Absprengen über der Stahlbewehrung tritt in mildem Klima deutlicher auf als in strengem Klima.

Das Versuchsfeld von Cape Cod nähert sich nach 20 Jahren dem Zeitpunkt, wo sein Fortbestehen nicht mehr von Nutzen ist. Nur 75 % der Probepfähle, meist aus zementreicherem Beton, sind noch für Untersuchungen verfügbar. Die Prüfung der restlichen Pfähle soll nur so lange fortgesetzt werden, als man daraus nützliche Aufschlüsse erwarten darf. Die vorhandenen Anlagen im Meerwasser und im Süßwasser werden auch in Zukunft weiter betreut.

#### 4.4 Beton im Meerwasser; Reihe 8 F

Mit Reihe 8 F wurde 1959 die ursprüngliche Meerwasserlagerung erweitert. Sie sollte nur den Meerwasserangriff auf Beton ohne die erschwerende Auswirkung durch den Bewehrungsstahl zeigen. Im Hafen von *Los Angeles*, Kalifornien, wurde ein Lagerungsrost ge-

baut, auf dem die Probekörper dem mittleren Tide-Wechsel ausgesetzt sind, wie Bild 15 zeigt. Die verwendeten 3 Betonmischungen mit rd. 5 bis 8 cm Setzmaß enthielten rd. 220, 310 und 390 kg Zement je m<sup>3</sup> Beton.

Folgende Zemente wurden einbezogen: alle Original-LTS-Zemente außer den beiden nicht mehr verfügbaren Zementen 34 und 42, ferner die 3 Zemente der Topeka-Versuchsstraße, ein C<sub>3</sub>A-freier Zement und 3 Portland-Hochofenschlacke-Zemente (Hüttenzemente) und die ihnen entsprechenden reinen Portlandzemente, endlich auch Gemische aus Puzzolanen mit einigen Portlandzementen.

Eine Anzahl Prüfkörper wurde bei niedrigem Druck mit Dampf behandelt. Im Jahre 1962 war noch keine Schädigung erkennbar.

#### 4.5 Zusätzliche Meerwasserlagerung; Reihe 8 G

Reihe 8 G, begonnen im Jahre 1961, stellt eine Erweiterung der Meerwasserlagerung in *Los Angeles* dar. An dieser Lagerung sind vorgespannte und nicht vorgespannte Betonbalken von 15 cm × 15 cm × 120 cm im Tidewechsel und oberhalb des höchsten Wasserstandes beteiligt. In einige der nicht vorgespannten Balken wurden vernickelte Stäbe eingelegt. Für den Beton wurde LTS-Zement 24 mit 4,7 % C<sub>3</sub>A, LTS-Zement 13 mit 10,1 % C<sub>3</sub>A und C<sub>3</sub>A-freier Zement verwendet. Die Überdeckung des Bewehrungsstahles reicht



Bild 15 Lagerrost im Hafen von Los Angeles

von 25 bis 57 mm. Der Zementgehalt des Betons beträgt rd. 280 und rd. 390 kg/m<sup>3</sup>.

Bisher sind noch keine Veränderungen zu berichten.

## **5. Beton in mäßigen bis dünnen Querschnitten; Reihen 9 A und 9 B**

### **5.1 Gehwegplatten Florence Talsperre; Reihe 9 A**

Die Versuchsplatten dieser Reihe sollen das Verhalten von Beton in 2100 m Höhe unter besonders strengen Witterungsbedingungen zeigen. Nach 20 Jahren Lagerung sind die 15 cm dicken Platten von 1 m × 3 m nicht so geschädigt worden, daß man zwischen Beton aus den verschiedenen Zementen Unterschiede genau festlegen kann.

Zwei Punkte sind bei diesen Versuchen von besonderem Interesse. Der erste ist die Tatsache, daß der ursprüngliche Gehweg, der durch Beton aus den LTS-Zementen ersetzt worden ist, schon nach 10 Jahren Lagerdauer ernste Oberflächenschäden gezeigt hatte, während der für den Versuch verwandte Ersatz 20 Jahre lang gelegen hat, bis er oberflächliche Veränderungen erkennen ließ. Man darf den ausgeprägten Unterschied in dem Verhalten hauptsächlich zwei Umständen zuschreiben – einmal der Verwendung anderer Zuschlagstoffe, zum anderen einer besseren Überwachung sowohl der Betongüte als auch der Art des Einbringens und der Verarbeitung bei dem Ersatzbeton aus den LTS-Zementen.

Der zweite interessante Punkt war das Auftreten von sehr kleinen Rissen längs den Gehwegkanten in den Versuchsabschnitten bei einigen der langsam erhärtenden Zemente nach schon 3 Jahren. Damals hielt man das Auftreten dieser sehr schwachen Risse für ein frühes Anzeichen der Schadensart, die sich in der ursprünglichen Konstruktion so unangenehm ausgewirkt hatte. Jedoch nach mehr als 15 Jahren zusätzlicher Lagerungsdauer hat diese Ribbildung nicht zugenommen; alle Versuchsplatten scheinen noch in fast ausgezeichnetem Zustand zu sein.

Im Zuge der laufenden Unterhaltungsarbeiten an der Florence Talsperre, Kalifornien, hat man den Gehweg auf dem First des Dammes im Jahre 1959 mit Leinöl behandelt. Durch ein Versehen wurden auch die Versuchsplatten des Gehweges in diese Behandlung einbezogen. Soweit sich feststellen ließ, war die Behandlung bei allen Platten gleich und kann daher deren künftiges Verhalten nicht wesentlich beeinflussen.

### **5.2 Brüstung Green Mountain Talsperre; Reihe 9 B**

Diese Reihe besteht aus 22 cm dicken Platten 2,7 m × 1 m einer Brüstung, die auf einem Erddamm in Colorado in einer Höhe von 2400 m strengen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind. Wie bei der Florence Talsperre haben sich keine Unterschiede in dem Verhalten der 24 verwendeten Versuchszemente gezeigt. Die einzigen in den 20 Jahren entstandenen Schädigungen sind Haarrisse in sehr feinem Muster und willkürlich verlaufender Form, die nach den ersten wenigen Jahren Lagerung sichtbar wurden, und einige sehr beschränkte Bereiche von D-Rissen (s. Abschn. 2.4) an Stellen der Brüstung, die während der Bauzeit von außen her beschädigt

worden waren. Alle Versuchsabschnitte der Brüstung sind nach 20jähriger sehr strenger Beanspruchung nahezu unverändert.

## **6. Versuchsfelder bei milder und strenger Beanspruchung; Reihen 10 A, 10 B und 10 C**

### **6.1 Versuchsfeld Naperville; Reihe 10 A**

In Naperville, Illinois, wurden 3 Typen von Prüfkörpern verwendet: Betonsäulen, Betonplatten und mit Sand und Wasser gefüllte Betontröge. Diese waren mehr als 20 Jahre einem strengen Klima ausgesetzt. Tafel 10 gibt die 1962 festgestellten Schadensstufen der Betontröge wieder. Nur diese eine Art Prüfkörper zeigt nach 20 Jahren Lagerzeit eine bemerkenswerte Schädigung. Auch das genaue Studium der Schadenswerte hat keine bedeutungsvolle Beziehung zwischen Zusammensetzung des Zements und Beständigkeit des Betons erkennbar gemacht.

Die wichtigste Folgerung aus dem Verhalten dieser 378 *Probetröge* in der ursprünglichen Anordnung bezieht sich auf die Lufteinführung. 84 Betontröge waren mit den 6 LP-Zementen hergestellt worden. Keiner von ihnen zeigt eine bemerkenswerte Schädigung. Sie haben eine durchschnittliche Schadensstufe von 1,0+. 84 Tröge sind auch mit den Vergleichszementen ohne LP-Stoff hergestellt worden. Deren Schadensstufen bewegen sich zwischen vollständiger Zerstörung (Schadensstufe 6) und schadensfreiem, unverändertem Zustand (Schadensstufe 1) mit einem Mittelwert von 2,3 für alle 84 Tröge. Durch die 20jährigen Vergleichsversuche steht somit die überaus wertvolle Wirkung der Lufteinführung außer allem Zweifel.

Die Unterschiede im Verhalten der Prüfkörper aus den 21 LTS-Zementen und den anderen Zementtypen ohne LP-Stoffe reichen für allgemeine Feststellungen nicht aus. Wenn man die Schadenswerte aller Proben betrachtet — außer denen von Reihe E-6X, in der nur Zemente der Typen II, IV und V ohne LP-Stoff verwendet wurden —, kann man feststellen, daß die Zemente des Typs IV als Gruppe im Verhalten die Bestwerte zeigen. Die Mittelwerte sind in Tafel 11 angegeben.

In den Jahren 1941 und 1942 wurden in Naperville neben den Betontrögen und -säulen auch *Probezylinder 10/20* cm hergestellt, die für die Betonkörper jeder Lagerungsart repräsentativ waren. Einige dieser Zylinder wurden auf Festigkeit geprüft, einige im Freien eine Reihe von Jahren dem Wetter ausgesetzt und später im Raum gelagert. Als erkennbar wurde, daß sich die Lufteinführung als maßgeblicher Faktor für das Verhalten der ausgelagerten Prüfkörper erweisen könnte, und als außerdem die Technik zur Bestimmung des Luftgehaltes von erhärtetem Beton entwickelt war, wuchs die Bedeutung dieser Kontrollzylinder. Aus diesen Zylindern wurden seitdem kleine Platten herausgeschnitten, an denen optische Messungen des Luftgehaltes mit dem Meßlinienverfahren durchgeführt wurden, soweit sie sich identifizieren ließen. Diese Messungen liefern die Luftgehalte für fast alle Betontröge und -säulen von Naperville.

Man hat in Naperville auch versucht, das Verhalten der Proben ohne Lufteinführung mit deren Luftgehalt in Beziehung zu setzen.

Tafel 10 Reihe 10 A; Versuchsfeld Illinois

Schadensstufen der Betontrog-Prüfkörper (76 cm × 76 cm × 76 cm) im August 1962

Schadensstufen: 1 = unverändert (keine Schädigung) . . . 6 = völlige Zerstörung

LP-Zemente							Zemente														Mi- schung	Zement- gehalt kg/m <sup>3</sup>	Setz- maß cm	Daten der Herstellung					
33T	21T	18T	16T	12T	11T	Typ V 51	Typ IV 43A 43 42 41				Typ III 34 33 31			Typ II 25 24 23 22 21					Typ I 18 17 16 15 14 13 12 11										
1	1+	1	1+	1,1	1	1+	1	1+	1+	1	1	1+	1+	1,1	1,1	1	1	1	1+	1	1+	1	1	1	D-1	330	7,6	2.- 6. 9. 1941	
1	1,1	1	1,3	1,1	1	1	1	1	1	1+	1	1	1	2,8	1	4,4	2	3,7	1	1	1,7	1	1	1	1+		D-2*	3,8	8.-11. 9. 1941
1+	1	1	1	1	1	1	1	1,2	1	1	1	1,1	1	1+	1,1	1,2	1	1	1	1	2,8	1	1	1	1		D-3	20,3	13.-15. 9. 1941
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	D-4	250	7,6	17.-20. 9. 1941
1	1,1	1	1	1	1	3,2	1	1,4	1,6	1+	2,5	1	1	1+	3	1,3	1,4	1,4	1	1	1,2	1,1	6	1	1	D-5		3,8	20.-24. 9. 1941
1	1	1+	1	1	1	1	1	1,1	1,1	1,9	1	6	1	6	2,3	6	1,7	1,7	6	6	6	6	6	1,4	6	D-6		20,3	24.-26. 9. 1941
1	1	1	1	1	1	1,2	1	1,1	1+	1	1	1+	1	1	1+	1	1+	1	1	1+	1	1	1+	1	1	E-1	330	7,6	26.-28. 9. 1941
1+	1	1	1+	1	1	1+	1,5	2,3	2,3	1	1,4	1	1,1	3,2	2,4	3,5	1	6	1	1	1	1	1,4	1	1	E-2		3,8	28. 9.-1. 10. 1941
1	1	1	1	1	1	1,1	1	1	2,1	1	1	1	1	1,6	1	4,2	6	2,7	6	1	6	6	6	6	1,1	6		E-3	20,3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1+	1	1	1+	1	6	1	1	1	1+	1,4	1	6	1	1	1,1	1	E-4	250	7,6	3.- 8. 10. 1941
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2,7	1+	1,1	3,4	1,4	1	1	1,1	2	3,8	1+	1,1	E-5		3,8	8.-13. 10. 1941
1	1	1	1	1	1	6	1	1+	6	1,1	6	6	6	6	6	6	6	1	6	6	6	6	6	6	6	E-6		20,3	13.-15. 10. 1941
1+	1	1+	1+	1+	1	1	1	1	1+	1	1	1	1	1	1	1,8	1	1,1	1	1	1,2	1	1+	1	1	D-2X	330	3,8	15.-17. 10. 1941
1	1	1+	1	1+	1	1	1	1	1	1	1	2,4	1	1	1	1	1+	1,3	1	1	1	1	1,2	1	1	D-7**	250	20,3	1.- 4. 6. 1942
						6	6	2,7	1,5	1				6	2,4	1+	6	1								E-6X***	250	20,3	5.-11. 6. 1942

\*) Prüfkörper der Mischung D-2 wurden mit einem 2,5 cm-Rüttler, der Mischungen D-5, E-2, E-5 und D-2X mit einem 4,4 cm-Rüttler verdichtet; Mischung D-2X ist eine Wiederholung der Mischung D-2 mit Ausnahme der Rüttlergröße.

\*\*) Wiederholung von Mischung D-6; jedoch wurden die Formen mit Überstand gefüllt und erst nach einer Stunde abgestrichen.

\*\*\*) Wiederholung von Mischung E-6 mit den Zementtypen II, IV und V.

Bemerkungen: Mischungen D wurden mit Sand und Kies aus Plainfield, Illinois, hergestellt.

Mischungen E wurden mit Sand aus Springville, N. Y., und Kies aus Plainfield, Illinois, hergestellt.

Sämtlicher Beton mit 3,8 cm Setzmaß wurde durch Rüttler, sämtlicher Beton mit 7,6 cm und 20,3 cm Setzmaß von Hand verdichtet.

Tafel 11 Reihe 10 A; Versuchsfeld Illinois  
 Mittlere Schadensstufen der Betonrog-Prüfkörper  
 Schadensstufen: 1 = unverändert . . . 6 = völlige Zer-  
 störung

Zement-Typ	Schadens- stufe	Anzahl der Proben
LP-Zement	1,0 +	Mittel aus 84 Einzelwerten
Typ IV	1,2	" " 56 "
Typ V (Zement 51)	1,5	" " 14 "
Typ III	1,7	" " 42 "
Typ I	2,1	" " 112 "
Typ II	2,2	" " 70 "

In einigen Fällen, bei denen der gemessene Luftgehalt über 3 % lag, scheint sich die Wirkung der Luftporen in dem Verhalten der Proben widerzuspiegeln. Im ganzen gesehen kann aber das Verhalten der Betonrog-Proben aus Zementen ohne LP-Stoff mit den geringen, durch das Meßlinienverfahren bestimmten Mengen eingeführter Luft nicht in Beziehung gebracht werden.

Vergleicht man die 6 LP-Zemente mit den entsprechenden Zementen ohne LP-Stoff, dann entsprechen die Luftgehalte dem Verhalten der Prüfkörper fast ausnahmslos sehr gut. Das weist darauf hin, daß die niedrigen Luftgehalte der sich in ihrem Zustand verschlechternden Prüfkörper nicht ausreichen, um die Betonröge gegen die Beanspruchung zu schützen, während die Luftgehalte der Prüfkörper mit den LP-Zementen einen ausreichenden Schutz gegen diese Beanspruchung gewährleisten.

Da Zemente innerhalb jeden Types alle Grade der Zerstörung von Stufe 1 = „unverändert“ bis zu 6 = „völlige Zerstörung“ zeigen, ist es offenkundig, daß der mittlere Schadenswert weniger aussagt, als das beim Vergleich der LP-Zemente mit ihren Gegenständen ohne LP-Stoff der Fall war. Die Tatsache, daß Zement der Typen IV, V und III, und zwar in dieser Reihenfolge, an der Spitze der Liste der Verhaltenswerte stehen, läßt vermuten, daß die potentielle Zusammensetzung der Klinker nicht für ihr Verhalten entscheidend ist, weil diese Typen die Extreme in der Phasen-Zusammensetzung der zum Versuch herangezogenen Zemente verkörpern. Es scheint vielmehr so, als ob die Unterschiede in den Hauptkomponenten wenig, wenn überhaupt etwas, mit den Unterschieden in dem Verhalten der Betonröge von Naperville zu tun haben.

## 6.2 Versuchsfeld Perry; Reihe 10 B

Von Rissen an einigen der Versuchsplatten abgesehen, die auf Alkali-Zuschlag-Reaktion zurückzuführen sind, ist die Schädigung der Betonproben in dem Versuchsfeld Perry, Georgia, zu gering, um dafür eine Schadensbewertung einzuführen. Die Versuchsanordnung ist der von Naperville sehr ähnlich und umfaßt 27



Versuchszemente. Zusätzlich wurden jedoch zwei Serien 76 cm-Würfel und eine Serie hochkant stehender Platten für diese Versuchsreihe hergestellt. Die Beanspruchung auf dem Versuchsfeld Perry ist mild; nach 20 Jahren Beanspruchung ist die Schädigung zu gering, um daraus Schlüsse auf die Wirkung von Lufteinführung, Zusammensetzung oder anderen Eigenschaften ziehen zu können.

### **6.3 Versuchsfeld Skokie; Reihe 10 C**

Als Ergänzung zu dem Versuchsfeld Naperville wurde 1958 ein Versuchsfeld nahe bei den PCA-Laboratorien in Skokie, Illinois, eingerichtet. Das Hauptziel dieser Außenversuchsanlage ist es, das Verhalten einiger der ursprünglichen LTS-Zemente mit anderen Gemischen aus zementähnlichen Stoffen zu vergleichen, nicht nur in den Betontrögen, die dem Frost-Tau-Wechsel, sondern auch in eben liegenden Platten, die Auftausalzen ausgesetzt sind.

Zu diesen Prüfungen wurden 10 der Original-LTS-Zemente, 2 der Topeka-Versuchsstraße, 2 Portland-Hochofenschlacke-Zemente und ein im Laboratorium hergestelltes Gemisch aus 4 Zementen des Typs I herangezogen. Zusätzlich wurde in dem Gemisch der vier Zemente des Typs I ein Teil durch gebrannten Schiefer und Flugasche ersetzt. Calciumchlorid wurde als Zusatz bei denselben Laboratoriums-Mischzementen verwendet.

Die Betontröge wurden mit 2 verschiedenen Zementgehalten, nämlich mit rd. 220 und rd. 330 kg/m<sup>3</sup>, hergestellt, und zwar aus allen Zementen ohne LP-Stoff, aus den LP-Zementen nur in der Mischung mit rd. 330 kg/m<sup>3</sup>. Der Beton der Probeplatten enthielt 330 kg/m<sup>3</sup>, sowohl mit als auch ohne Luftporen. Für alle Prüfkörper wurde ein einheitliches Zuschlagsgemisch aus einem natürlichen Sand von Elgin, Illinois, und einem gebrochenen Kies von Eau Claire, Wisconsin, verwendet.

Die Betontröge sind mit feuchtem Sand gefüllt; der Beton ist auf diese Weise sehr stark wassergesättigt, während er der Frost-Tau-Wirkung unterliegt. Die Betonplatten werden während des Winters zur Beseitigung von Schnee und Eis periodisch mit körnigem Calciumchlorid bestreut. Wülste rund um die Kanten der Platten halten nach dem Tauen Salz und Salzlösung zurück.

Diese Betonkörper wurden 1958 hergestellt und lagern jetzt 5 Jahre. Die günstige Wirkung der Lufteinführung auf das Verhalten sowohl der Betontröge als auch der Betonplatten ist deutlich erkennbar, obgleich nicht alle Betone ohne Lufteinführung durch diese schwere Beanspruchung geschädigt worden sind. Kein Trog aus LP-Beton weist irgendein Anzeichen von Schädigung, keine Platte aus LP-Beton irgendein Anzeichen von Abwittern auf, außer denjenigen, bei denen ein Teil des Zements durch gebrannten Schiefer und Flugasche ersetzt war; an diesen sind zahlreiche flache Oberflächennarben und -aussprengungen zu erkennen.

Unterschiede in dem Verhalten der Zemente sind für einen Einzelbericht noch zu wenig ausgeprägt.

## 7. Zusammenfassung und Folgerung

Die in dem Zehn-Jahres-Bericht enthaltenen Folgerungen stimmen im allgemeinen mit denen dieses Zwanzig-Jahres-Berichts überein. Mit geringen Änderungen entsprechen die jetzigen Folgerungen 1 und 7 den früheren Folgerungen 8 und 6. Die jetzigen Folgerungen 2 bis 6 und 8 sind aus dem Zehn-Jahres-Bericht wörtlich übernommen und entsprechen den früheren Folgerungen 1 bis 5 und 7.

1) Der Hauptzweck dieser Untersuchung war es, festzustellen, ob und wie Zusammensetzung, Feinheit und Herstellungsbedingungen eines Zements das Verhalten eines daraus hergestellten Betons beeinflussen. Wenn durch diese Untersuchung auch vieles klar gestellt wurde, so läßt sich offensichtlich das Verhalten der Zemente im Beton durch solche Angaben nicht hinreichend kennzeichnen oder erklären, so daß die üblichen Verfahren, Zemente zu prüfen und zu analysieren, für eine Vorhersage ihres Verhaltens nicht ausreichen. Man hat allen Grund anzunehmen, daß unerforschte physikalische Eigenschaften oder physikalisch-chemische Zusammenhänge von großer Bedeutung sind. Der Ausschuß empfiehlt, die Untersuchung fortzusetzen und dabei einen größeren Nachdruck auf die grundlegenden Eigenschaften des Zements und des daraus entstehenden Zementleims zu legen. Von einem solchen Weg darf man einen genaueren Aufschluß über die Unterschiede im Verhalten der Betonkörper erwarten.

2) Die LTS-Zemente waren sorgfältig hergestellt und entsprachen in jeder Hinsicht den dafür gültigen Normenvorschriften. Sie unterscheiden sich nur in verschiedenem Umfang in ihrem Wasserbedarf, der Anfangserhärtung, in der Neigung zu frühzeitigem Ansteifen und zum Bluten.

Sie unterscheiden sich auch in ihrer Wirkung auf die Beständigkeit von Beton, was der Hauptzweck dieser Untersuchung ist. Aber unter den Zementen ohne Lufteinführung läßt sich keine feste Rangfolge in der Dauerhaftigkeit erkennen; einige gegen bestimmte Einwirkungen sehr beständige Zemente erwiesen sich anderen Einwirkungen gegenüber als wenig widerstandsfähig; sogar bei ein und derselben Beanspruchung, wie z. B. auf dem Versuchsfeld Naperville, haben sich die in einigen Betonmischungen guten Zemente nicht notwendigerweise auch in anderen Mischungen gut verhalten.

3) Es besteht keine direkte Beziehung zwischen dem Verhalten des Betons gegen Frost-Tau-Wechsel und der chemischen Zusammensetzung oder Feinheit des Zements, es sei denn, daß der Beton bald nach seinem Einbringen dem Frost ausgesetzt war. In solchen Fällen, wo die langsam erhärtenden Zemente besonders anfällig zu sein schienen, war der Beton nur kurz nachbehandelt worden und hatte vor dem Frost wenig oder gar keine Zeit gehabt abzutrocknen. Da der Erhärungsanstieg des Zements von seiner Zusammensetzung und Feinheit abhängt, kann unter solchen besonderen Bedingungen auch die Beständigkeit als von solchen Faktoren abhängig erscheinen.

- 4) Zwischen der Art oder dem Vorkommen der Zementrohstoffe und dem Verhalten der Zemente im Beton war keine Beziehung festzustellen.
- 5) Für Zemente üblicher Zusammensetzung und Feinheit haben die normalen Unterschiede in den Herstellungsverfahren und -bedingungen keinen Einfluß auf die Beständigkeit des daraus hergestellten Betons.
- 6) Der Widerstand von Beton gegen den Angriff durch Sulfatsalzlösungen erhöht sich mit der Abnahme des potentiellen  $C_3A$ -Gehalts im Zement. Die Luftführung verbesserte das Verhalten fast aller Prüfkörper, die abwechselnd dem Austrocknen und Durchfeuchten in Sulfatsalzlösungen ausgesetzt waren.
- 7) Es ist offenkundig erwiesen, daß die sachgemäße Verwendung der Luftführung den Beton in wesentlichem Maße befähigt, Gefrieren und Tauen ohne Schädigung zu widerstehen. Die Luftführung erwies sich als besonders vorteilhaft, um das Abwittern (scaling) zu verhindern, wenn man Chloride zur Beseitigung von Eis auf Betonstraßen verwendet.
- 8) Die vorteilhafte Wirkung der Luftführung kommt auch bei Beton mit großem Setzmaß oder niedrigem Zementgehalt zur Geltung, man darf daraus aber nicht folgern, daß dadurch die Forderung nach guten Zuschlagstoffen, sachgemäßem Mischungsverhältnis und guter Betonausführung aufgehoben wird. —

Die Langzeit-Untersuchung ist auf Versuche mit Beton aus weiteren Zementen und auf Versuche über die Korrosion von vorgespannten und anderen Bewehrungsstählen in Meerwasser ausgedehnt worden.

Künftige Berichte werden sich dementsprechend mit den einzelnen Phasen der Betonbeständigkeit beschäftigen, die man im ursprünglichen Programm nicht vorgesehen hatte. Die Veränderungen sind bisher noch nicht so weit fortgeschritten, daß sich darüber eingehender berichten ließe, als das hier geschehen ist.

#### **SCHRIFTTUM :**

Die Nummern 1 bis 14 entsprechen den Kapiteln 1 bis 14 des LTS-Berichtes.

- [1] McMillan, F. R., und I. L. Tyler: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 1 — History and scope. Proc. Amer. Concr. Inst. 44 (1947/48) S. 441/453; ebenso PCA Research Department, Bulletin 26, 1948. Ref. in Zement-Kalk-Gips 2 (1949) H. 4, S. 69/72.
- [2] McMillan, F. R., und W. C. Hansen: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 2 — Manufacture of the test cements. Proc. Amer. Concr. Inst. 44 (1947/48) S. 553/602; ebenso PCA Research Department, Bulletin 26, 1948. Ref. in Zement-Kalk-Gips 2 (1949) H. 4, S. 69/72.

- [3] Lerch, W., und C. L. Ford: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 3 – Chemical and physical tests of the cements. Proc. Amer. Concr. Inst. 44 (1947/48) S. 745/795; ebenso PCA Research Department, Bulletin 26, 1948. Ref. in Zement-Kalk-Gips 2 (1949) H. 4, S. 69/72.
- [4] Brown, L. S.: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 4 – Microscopical study of clinkers. Proc. Amer. Concr. Inst. 44 (1947/48) S. 877/923; ebenso PCA Research Department, Bulletin 26, 1948. Ref. in Zement-Kalk-Gips 2 (1949) H. 4, S. 69/72.
- [5] McMillan, F. R., T. E. Stanton, I. L. Tyler und W. C. Hansen: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 5 – Concrete exposed to sulfate soils. PCA Research Department, Bulletin 30, 1949.
- [6] Verbeck, G. J., und C. W. Foster: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 6 – The heats of hydration of the cements. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 50 (1950) S. 1235/1262; ebenso PCA Research Department, Bulletin 32, 1949. Ref. in Zement-Kalk-Gips 11 (1958) H. 2.
- [7] Jackson, F. H., und I. L. Tyler: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 7 – New York test road. Proc. Amer. Concr. Inst. 47 (1950/51) S. 773/796; ebenso PCA Research Department, Bulletin 38, 1951. Ref. in Zement-Kalk-Gips 4 (1951) H. 11, S. 308/310.
- [8] Ten-year-report on the long-time study of cement performance in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 49 (1952/53) S. 601/614; ebenso PCA Research Department, Bulletin 43, 1953. Ref. in Zement-Kalk-Gips 6 (1953) S. 345/346.
- [9] Jackson, F. H.: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 9 – Correlation of the results of laboratory tests with field performance under natural freezing and thawing conditions. Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1955/56) S. 159/193; ebenso PCA Research Department, Bulletin 60, 1955. Ref. in Zement-Kalk-Gips 10 (1957) H. 5.
- [10] Klieger, P.: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 10 – Progress report on strength and elastic properties of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1957/58) S. 481/504; ebenso PCA Research Department, Bulletin 89, 1958. Ref. in Zement-Kalk-Gips 11 (1958) H. 9, S. 418/423.
- [11] Jackson, F. H.: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 11 – Report on the condition of three test pavements after 15 years of service. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1957/58) S. 1017/1032; ebenso PCA Research Department, Bulletin 102, 1958. Ref. in Zement-Kalk-Gips 12 (1959) H. 8, S. 369/370.
- [12] Tyler, I. L.: Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 12 – Concrete exposed to sea water and fresh water. Proc. Amer. Concr. Inst. 56 (1959/60) S. 825/836; ebenso PCA Research Department, Bulletin 114, 1960.
- [13] Jackson, F. H.: History and philosophy of the long-time study of cement performance in concrete. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 1 (1959) Nr. 3, S. 14/22.
- [14] Klieger, P.: Extensions to the long-time study of cement performance in concrete. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 5 (1963) Nr. 1, S. 2/14; ebenso PCA Research Department, Bulletin 157, 1963. Ref. in Zement-Kalk-Gips 17 (1964) H. 2.
- [15] Lerch, W.: Significance of tests for sulfate resistance. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 61 (1961) S. 1043/1049.