

# Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 und 50 Jahren

Von Kurt Walz, Düsseldorf

## Übersicht

*Unter Benutzung deutscher (D) und amerikanischer Versuchsberichte (A) wird die Entwicklung der Druckfestigkeit von Betonen sehr unterschiedlicher Zusammensetzung bis zum Alter von 30 Jahren bzw. 50 Jahren dargestellt.*

*Nach den Versuchen D, die 1941 mit einem Portlandzement, zwei Hochofenzementen und einem Eisenportlandzement angesetzt wurden, fand sich nach 30jähriger Lagerung im Freien die Druckfestigkeit bei 8 Betonen aus dem Portlandzement im Mittel zum 2,3fachen der 28-Tage-Druckfestigkeit und bei 8 Betonen aus den Hüttenzementen im Mittel zum 3,1fachen. Bei den Versuchen A mit 24 Betonen, die 1923 aus 4 Portlandzementen hergestellt wurden, erreichte die 50-Jahre-Druckfestigkeit nach Lagerung im Freien im Mittel das 2,4fache der 28-Tage-Druckfestigkeit.*

*Die Festigkeitssteigerung fiel im allgemeinen um so größer aus, je kleiner die Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen bzw. je größer die Wasserzementwerte gewesen waren.*

*Der E-Modul der Betone A lag im Alter von 50 Jahren nach Lagerung im Freien zwischen 380 000 und 480 000 kp/cm<sup>2</sup> und im Mittel um etwa 65 000 kp/cm<sup>2</sup> über den Rechenwerten der DIN 1045.*

## 1. Einführung

Bei den Untersuchungen über die „Witterungsbeständigkeit von Beton“ [1] wurde an den im Freien gelagerten Betonplatten in den Jahren 1970 bis 1972 nebenbei auch die Druckfestigkeit der rd. 30 Jahre alten Betone ermittelt [2]. Da die Zusammensetzung der 1941 hergestellten Betone umfassend definiert ist und außerdem die Würfeldruckfestigkeit für 28 Tage und 2,5 Jahre vorliegt, geben diese Untersuchungen einen verlässlichen Aufschluß über die langjährige Festigkeitsentwicklung von Betonen mit sehr unterschiedlicher Zusammensetzung.

Speziell auf die langjährige Entwicklung einiger Eigenschaften von Betonen ausgerichtete Versuche wurden in den USA bereits 1910, ferner 1923 und 1937 begonnen. Im jüngsten darüber erschienenen Bericht [3] finden sich u. a. Aufzeichnungen über die Festigkeitsentwicklung der 1923 hergestellten Betone bis zum Alter von 50 Jahren.

Nachfolgend werden Versuchsdaten aus den Berichten zusammengestellt, die Aufschluß über die Festigkeitsentwicklung bzw. die „Altersfestigkeit“ des Betons geben, die hin und wieder, aus welchen Gründen auch immer, mit etwas Unsicherheit behaftet angesprochen wird.

## 2. Die Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 Jahren

### 2.1. Beton und Zemente

2.1.1. Die *Zusammensetzung* der im Jahre 1941 hergestellten 14 verschiedenen Betone (Reihen a bis o) ist in Tafel 1 wiedergegeben. Für jede Reihe wurden zahlreiche 20-cm-Würfel und Platten 70/40/15 cm gefertigt.

Als Zemente wurden ein Portlandzement (PZ D), zwei Hochofenzemente (HOZ S, HOZ R) und ein Eisenportlandzement (EPZ B) verwendet. Der Zementgehalt betrug rd. 200 und 300 kg/m<sup>3</sup>. Die Sieblinie D/E des Rheinkiesandes 0/30 mm verlief in der Mitte des „besonders guten“ Bereichs (50 % Sand 0/7 mm) und die Sieblinie E/F im oberen Teil des „brauchbaren“ Bereichs (70 % Sand 0/7 mm) nach DIN 1045, Ausgabe 1936. Der Wassergehalt war so bemessen worden, daß sowohl „nahezu erdfeuchte“ als auch „weiche“ Betone entstanden (entsprechend den heutigen Konsistenzgraden K 1 bzw. K 3). Damit wurden Wasserzementwerte zwischen 0,50 und 1,29 erhalten und Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen von 498 bis 73 kp/cm<sup>2</sup>.

Tafel 1 Zusammensetzung und Eigenschaften des Frischbetons

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Reihe	Zement je m <sup>3</sup> rd.	Zuschlag		1 m <sup>3</sup> frischer, verdichteter Beton enthält			W/Z-Wert	Beschaffenheit	Ausbreitmaß cm	Konsistenz (DIN 1045) etwa
		Art	Sieblinie	Zement kg	Zuschlag kg	Wasser kg				
a	200 kg PZ D	Rheinkies- sand 0/30 mm	D/E	204	1 997	159	0,78	nahezu erdf.	—	K 1
b			D/E	201	1 924	205	1,02	weich	52	K 3
c			E/F	197	1 832	201	1,02	nahezu erdf.	—	K 1
d			E/F	195	1 773	252	1,29	weich	50	K 3
e	300 kg PZ D		D/E	303	1 926	151	0,50	nahezu erdf.	—	K 1
f			D/E	302	1 839	199	0,66	weich	52	K 3
g			E/F	302	1 765	193	0,64	nahezu erdf.	—	K 1
h			E/F	300	1 714	246	0,82	weich	52	K 3
i	200 kg HOZ S 300 kg		D/E	205	1 969	176	0,86	weich	48	K 3
k			D/E	304	1 857	189	0,62	weich	48	K 3
l	200 kg HOZ R 303 kg		D/E	203	1 950	187	0,92	weich	46	K 3
m			D/E	300	1 831	189	0,63	weich	46	K 3
n	200 kg EPZ B 300 kg		D/E	201	1 930	199	0,99	weich	52	K 3
o			D/E	299	1 821	200	0,67	weich	53	K 3

Insgesamt wird damit ein weites Gebiet von Betonzusammensetzungen erfaßt, die auch heute üblich sind.

Da die Festigkeitsentwicklung eines Betons weitgehend von den Eigenschaften des verwendeten Zements bestimmt wird, werden nachfolgend kennzeichnende Feststellungen aus [1] über die Zemente wiedergegeben, ergänzt und beurteilt sowie mit den in DIN 1164, Ausgabe 1970, für die derzeitigen Zemente geforderten Eigenschaften verglichen.

2.1.2. Die damalige *chemische Analyse* der Zemente, auf die heute übliche Form umgestellt, findet sich in Tafel 2. Für den PZ D können daraus folgende Klinkerphasen errechnet werden: Tricalciumsilicat ( $C_3S$ ) 62 %, Dicalciumsilicat ( $C_2S$ ) 13 %, Tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) 10 %, Tetracalciumaluminatferrit ( $C_4AF$ ) 9 %.

Tafel 2 Chemische Zusammensetzung der Zemente  
(glühverlustfrei; Gew.-%)

Bestandteile	PZ D	HOZ S	HOZ R	EPZ B
Unlös.	0,37	—	—	—
SiO <sub>2</sub>	20,90	27,06	29,50	24,61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,73	9,75	9,10	6,93
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	0,91
FeO	—	2,10	0,83	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,86	—	—	2,24
MnO	—	0,54	0,81	—
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	0,88
CaO (ges.)	65,82	53,56	54,12	59,16
MgO	1,99	4,77	3,58	1,75
SO <sub>3</sub>	1,43	1,70	1,43	2,10
S <sup>2-</sup>	—	0,90	1,19	0,40
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	0,87	—	—	1,20
Rest	0,03	0,07	0,04	0,02
O <sub>2</sub> -Äquiv., neg. <sup>1)</sup>	—	0,45	0,60	0,20
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00

<sup>1)</sup> Sauerstoff-Äquivalent, negativ

Der für die Eigenschaften eines HOZ oder EPZ wesentliche Hütten-sandgehalt wurde 1941 nicht festgestellt. Nach der chemischen Analyse, nachträglich ungefähr berechnet<sup>1)</sup>, dürfte der Hütten-sandgehalt beim HOZ S und HOZ R je um 50 % und beim EPZ B um 25 % gelegen haben.

2.1.3. Zur Kennzeichnung der *Mahlfeinheit* der Zemente wird aus der 1941 nach Andreasen ermittelten gesamten Kornverteilung der Anteil 0/0,02 mm angeführt; er betrug beim PZ D 38 %, HOZ S 47 %, HOZ R 50 % und beim EPZ B 40 %. Aus der allerdings nur bis herab zu 0,01 mm experimentell bestimmten Kornverteilung

<sup>1)</sup> Berechnung im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, und unabhängig davon im Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft Eisenhütten-schlacken, Duisburg.

kann nach einer Umrechnung im Forschungsinstitut der Zementindustrie gefolgert werden, daß die Zemente nach DIN 1164, Ausgabe 1970, Blatt 4, folgende Mahfeinheit (spezifische Oberfläche) aufgewiesen hätten: PZ D etwa 2300 cm<sup>2</sup>/g, HOZ S etwa 3800 cm<sup>2</sup>/g, HOZ R etwa 2500 cm<sup>2</sup>/g und EPZ B etwa 2600 cm<sup>2</sup>/g.

2.1.4. Die *Normfestigkeit* der vier Zemente wurde 1941 bereits mit weichem Prüfmörtel ermittelt. (Das Prüfverfahren war gesondert in DIN 1166, Ausgabe 1939, festgelegt.) Dabei wurden gegenüber heute ein etwas anderer Normsand und ein Wasserzementwert von 0,60 benutzt (heute 0,50). Tafel 3 enthält die Normdruckfestigkeiten.

Tafel 3 Normdruckfestigkeit der Zemente nach dem Prüfverfahren DIN 1166 (1939) bzw. DIN 1164 (1942); Wasserzementwert 0,60

1	2	3	4
Zement	Druckfestigkeit in kp/cm <sup>2</sup> nach		
	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten
PZ D	327	541	619
HOZ S	163	387	558
HOZ R	176	305	377
EPZ B	205	377	512

Mit den Normdruckfestigkeiten im Alter von 7 und 28 Tagen entsprachen nach der dann 1942 herausgegebenen DIN 1164 der PZ und der EPZ einem „Zement 325“ und die beiden Hochofenzemente einem „Zement 225“.

Die Normdruckfestigkeiten der Zemente in Tafel 3 wurden nach den im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf vorhandenen umfangreichen Ergebnissen von früheren Vergleichsversuchen auf Druckfestigkeiten umgerechnet, die sich bei der Prüfung nach der heute geltenden DIN 1164, Ausgabe 1970, ungefähr ergeben würden. Diese in Tafel 4 aufgeführten 2-, 7- und 28-Tage-Druckfestigkeiten lassen erkennen, daß der PZ der Festigkeitsklasse Z 450 L, der HOZ S sowie HOZ R der Festigkeitsklasse Z 350 L und der EPZ B der Festigkeitsklasse Z 350 F ent-

Tafel 4 Umgerechnete Normdruckfestigkeiten der 1941 verwendeten Zemente nach DIN 1164 (1970); Wasserzementwert 0,50

1	2	3	4	5	6
Zement	Druckfestigkeit in kp/cm <sup>2</sup> nach <sup>1)</sup>				entsprechend Festigkeitsklasse
	2 T.	7 T.	28 T.	3 M.	
PZ D	168	(385)	627	(733)	Z 450 L
HOZ S	(64)	185	425	(605)	Z 350 L
HOZ R	(82)	200	347	(417)	Z 350 L
EPZ B	101	(240)	410	(490)	Z 350 F

<sup>1)</sup> Für das Prüfmörtel der eingeklammerten Werte ist in DIN 1164 keine Mindestdruckfestigkeit vorgeschrieben

sprochen haben würden. Ihre Normdruckfestigkeiten unterscheiden sich naturgemäß nach 2 bzw. 7 Tagen, aber auch noch z. T. deutlich nach 28 Tagen und 3 Monaten.

2.1.5. Zur *Beurteilung der Zementeigenschaften* für die spätere Festigkeitsentwicklung der Betone soll aus den obigen Feststellungen folgendes hervorgehoben werden:

Der PZ D, nach dem heutigen Stand [4] beurteilt, wies einen mittleren  $C_3S$ -Gehalt (62 %) und einen mittleren  $C_2S$ -Gehalt (13 %) auf. Durch hohen  $C_3S$ -Gehalt wird die Festigkeitsentwicklung zu Anfang und durch hohen  $C_2S$ -Gehalt im späteren Alter gefördert.

Der Hüttensandgehalt der beiden HOZ S und R liegt mit etwa 50 % im mittleren Bereich der heute in DIN 1164 festgelegten Grenzen für den Hüttensandgehalt von Hochofenzementen; Entsprechendes gilt auch für den EPZ B mit einem Hüttensandgehalt von etwa 25 %. Mit zunehmendem Hüttensandgehalt ist unter sonst gleichen Verhältnissen im allgemeinen eine langsamere Anfangserhärtung und eine starke Nacherhärtung verbunden.

Die geringste Mahlfineinheit, die PZ D mit etwa 2300  $cm^2/g$  aufwies, liegt noch etwas über der Mahlfineinheit von 2200  $cm^2/g$ , die nach DIN 1164, Ausgabe 1970, mindestens gefordert wird. (In seltenen Fällen findet sich heute die untere Grenze bei Portlandzementen mit rd. 2400  $cm^2/g$ .) Ein fein gemahlener Zement erhärtet anfänglich rascher, jedoch in späterem Alter weniger stark als sonst gleicher Zement mit gröberer Mahlung.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die vier im Jahre 1941 für den Beton der Langzeitversuche verwendeten Zemente auch der heutigen Zementnorm DIN 1164 entsprochen hätten.

## 2.2. Lagerung der Probekörper

Die Platten ( $h = 70$  cm,  $b = 40$  cm,  $d = 15$  cm) sind in stehenden Formen und die 20-cm-Würfel nach DIN 1048 im Laboratorium hergestellt worden.

2.2.1. Alle *Platten* lagerten zunächst  $\frac{1}{2}$  Monat bei 15...20 °C unter feuchten Tüchern und  $1\frac{1}{2}$  Monate in Raumluft; sie wurden dabei wöchentlich einmal angehäßt. Im Alter von 2 Monaten (Herbst 1941) wurden je 6 Platten für die Auslagerung in Blaubeuren (516 m N. N.), in Partenen, Vorarlberg (1085 m N. N.), und in Stuttgart entnommen.

In Blaubeuren und Partenen wurden die Platten im Freien rd. 35 cm tief in fließendes Wasser eingesetzt.

In Stuttgart (230 m N. N.) befanden sich die Platten, bedingt durch die Kriegsverhältnisse, rd. 1 Jahr lang an der Luft (14täglich angehäßt), rd.  $2\frac{1}{4}$  Jahre im Freien gegen Niederschläge geschützt und  $8\frac{1}{4}$  Jahre im Freien den Niederschlägen ausgesetzt. Anschließend standen die Platten 7 Jahre lang im Freien in Becken, die 35 cm hoch mit Wasser gefüllt waren (Alter rd. 19 Jahre). Diese Lagerung wurde dann an einem anderen Lagerort in Stuttgart (450 m N. N.) fortgesetzt.

2.2.2. Ein Teil der *Würfel* lagerte 28 Tage unter feuchten Tüchern (Prüfung im Alter von 28 Tagen) und ein anderer Teil, wegen be-

sonderer Feststellungen, zunächst 14 Tage feucht, dann 11 $\frac{1}{2}$  Monate an der Luft mit häufigem Annässen, 15 Monate trocken und schließlich 2 Monate in Wasser (Prüfung im Alter von rd. 2 $\frac{1}{2}$  Jahren).

Die verhältnismäßig ausführlich wiedergegebene Lagerung der Platten und der Würfel bis zur Prüfung zeigt, daß ihre Lagerung in den ersten Jahren nicht immer gleichartig war. Dies dürfte sich jedoch auf die Festigkeitsentwicklung nicht wesentlich ausgewirkt haben, weil dem Beton der Würfel und auch dem des luftgelagerten Teils der Platten immer wieder Feuchtigkeit zur weiteren Hydratation zur Verfügung stand.

### **2.3. Prüfung des Betons auf Druckfestigkeit**

Im Alter von 28 Tagen und rd. 2 $\frac{1}{2}$  Jahren wurden je 3 Würfel nach der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Lagerung geprüft.

Zur Prüfung des Betons im Alter von rd. 30 Jahren wurde aus je zwei der in Blaubeuren, Partenen und Stuttgart gelagerten Platten ein Bohrkern entnommen. Die Kerne mit 10 cm Durchmesser und 15 cm Länge wurden aus dem luftgelagerten Teil der Platten, rechtwinklig zu den Plattenflächen 70 cm · 40 cm, also rechtwinklig zur Einfüllrichtung des Betons bei der Herstellung, mit einer Diamantkrone herausgebohrt.

Zusätzlich wurden aus einer der an den 3 Orten gelagerten Platten der Reihen b, d, f, h, i, l und m je ein Bohrkern aus dem unteren, im Wasser stehenden Teil gewonnen.

An jedem Ende der Bohrkern 10/15 cm wurde eine rd. 2,5 cm dicke Scheibe abgesägt. Die Stirnflächen der so entstandenen Zylinder von 10 cm Durchmesser und 10 cm Höhe (10/10 cm) wurden vor Ermittlung der Druckfestigkeit eben geschliffen. Um diese Zylinderdruckfestigkeit des rd. 30 Jahre alten Betons auf die nach 28 Tagen und rd. 2 $\frac{1}{2}$  Jahren festgestellten Würfeldruckfestigkeiten beziehen zu können, war die Zylinderdruckfestigkeit auf die ihr entsprechende Würfeldruckfestigkeit umzurechnen. Das Verhältnis der Würfeldruckfestigkeit zur Druckfestigkeit von herausgebohrten Zylindern hängt außer von den Abmessungen, der Festigkeit des Betons und dem Anteil an Grobzuschlag auch von der Achsrichtung des Bohrkerns zur Einfüllrichtung des Betons und von der Bohreinwirkung ab.

Um möglichst zutreffende Verhältniszerte für die Umrechnung benutzen zu können, wurden diese im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf mit gesondert hergestellten Betonen, deren Zusammensetzung für den Bereich der Betonzusammensetzung der Platten kennzeichnend war, ermittelt. Dabei wurden je drei 20-cm-Würfel sowie je drei, aus entsprechenden 20-cm-Würfeln rechtwinklig zur Einfüllrichtung herausgebohrte und abgelängte Zylinder 10/10 cm auf Druckfestigkeit geprüft. Je nach Zusammensetzung und Druckfestigkeit des Betons ergab sich für die 2 Monate alten lufttrockenen Proben die Würfeldruckfestigkeit zum 0,89- bis 1,04fachen der Zylinder-Druckfestigkeit, im Mittel zum 0,95-fachen.

Mit den für die einzelnen Mischungen geltenden Verhältniszerten wurde die entsprechende Würfeldruckfestigkeit  $W_{30j}$  des Betons

der rd. 30 Jahre lang ausgelagerten Platten errechnet. Die Druckfestigkeiten der beiden Zylinder aus dem luftgelagerten Teil von zwei Platten wichen vom Mittelwert mit einer Ausnahme nur um 2 % bis 6 % ab.

Die Druckfestigkeiten des im Wasser stehenden Teils der Platten (1 Prüfwert je Reihe und Lagerort) waren – ohne erkennbare Tendenz – bei 13 der 21 Druckfestigkeiten kleiner als im luftgelagerten Teil ausgefallen. Die Abweichungen der Druckfestigkeiten des wassergelagerten Teils von denen des luftgelagerten Teils waren meist verhältnismäßig gering. Im Gesamtmittel fand sich die Druckfestigkeit für den luftgelagerten Teil des Betons zu 464 kp/cm<sup>2</sup> und für den wassergelagerten Teil zu 447 kp/cm<sup>2</sup>, also um 3,8 % kleiner und praktisch somit gleich groß.

Im großen und ganzen blieb die Festigkeitsentwicklung des Betons der Platten in Blaubeuren etwas zurück. Doch wurden an den drei Lagerorten für den gleichen Beton Druckfestigkeiten nach rd. 30 Jahren erhalten, die sich, auf die 28-Tage-Druckfestigkeit bezogen, mit wenigen Ausnahmen nicht ausschlaggebend unterschieden. Es war auch festzustellen, daß die Festigkeitsentwicklung der 14 Betone in ihrem Verhältnis zueinander an den einzelnen Lagerorten überwiegend ähnlich war.

Daher wurde zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung der Mittelwert aus den Druckfestigkeiten des luftgelagerten Teils der zu-

Tafel 5 Druckfestigkeit der Betone nach 28 Tagen, rd. 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Jahren und rd. 30 Jahren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Reihe	Zement je m <sup>3</sup> rd.	Sieb-linie	W/Z	Kon-sistenz	Druckfestigkeit W kp/cm <sup>2</sup> nach			W <sub>2,5J</sub> /W <sub>28</sub>	W <sub>30J</sub> /W <sub>28</sub>
					28 T.	2,5 J.	30 J.		
a	200 kg PZ D	D/E	0,78	K 1	253	257	509	1,0	2,0
b			1,02	K 3	175	176	430	1,0	2,5
c		E/F	1,02	K 1	125	147	328	1,2	2,6
d			1,29	K 3	73	98	280	1,3	3,8
e	300 kg PZ D	D/E	0,50	K 1	403	583	795	1,2	1,6
f			0,66	K 3	393	428	702	1,1	1,8
g		E/F	0,64	K 1	272	312	632	1,1	2,3
h			0,82	K 3	212	245	462	1,2	2,2
i	200 kg HOZ S	D/E	0,86	K 3	137	235	429	1,7	3,1
k	300 kg		0,62		295	432	555	1,5	1,9
l	200 kg HOZ R		0,92		98	172	378	1,8	3,9
m	300 kg		0,83		232	372	569	1,6	2,5
n	200 kg EPZ B		0,99		89	155	432	1,7	4,9
o	300 kg		0,67		230	341	600	1,5	2,6

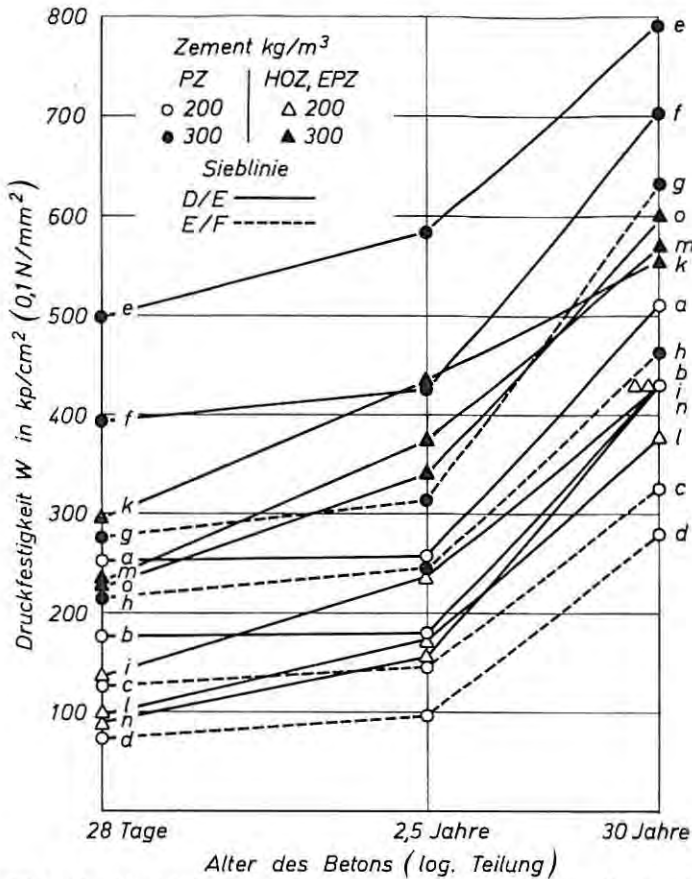


Bild 1 Druckfestigkeiten W der Betone im Alter von 28 Tagen, 2 1/2 Jahren und 30 Jahren

sammengehörigen rd. 30 Jahre alten Platten der drei Lagerorte gebildet. Diesem Mittelwert liegen damit in der Regel 6 Prüfwerte zugrunde (bei den beiden Reihen a und n nur 5 Prüfwerte). Diese Druckfestigkeit nach 30 Jahren ist zusammen mit der nach 28 Tagen und nach rd. 2 1/2 Jahren in Tafel 5, Spalten 6, 7 und 8, sowie in Bild 1 aufgeführt. In den Spalten 9 und 10 findet sich die Druckfestigkeit nach rd. 2 1/2 Jahren und rd. 30 Jahren als Vielfaches der 28-Tage-Druckfestigkeit und in Bild 2 ist, hierauf bezogen, die Entwicklung der Druckfestigkeit des Betons in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung dargestellt.

## 2.4. Entwicklung der Druckfestigkeit

2.4.1. Die Druckfestigkeit bis zum Alter von 30 Jahren war bei allen Betonen trotz der klimatisch z. T. erheblichen Einwirkungen immer deutlich angestiegen (Bild 1).



Die Druckfestigkeit des Betons im luftgelagerten Teil der Platten erreichte gemäß Tafel 5, Spalte 10, nach 30 Jahren, bezogen auf die 28-Tage-Druckfestigkeit

bei den 14 Betonen insgesamt  
das 1,6- bis 4,9fache, im Mittel das 2,7fache,

bei den 8 Betonen mit PZ D  
das 1,6- bis 3,8fache, im Mittel das 2,3fache,

bei den 6 Betonen mit HOZ S, HOZ R und EPZ B  
das 1,9- bis 4,9fache, im Mittel das 3,1fache.

2.4.2. Die *Festigkeitszunahme bis zum Alter von 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Jahren* unterschied sich beim Beton mit den drei „Hüttenzementen“ S, R und B nur wenig; sie betrug im Mittel das 1,6fache der 28-Tage-Druckfestigkeit. Bei den Betonen mit PZ D war die Zunahme mit dem 1,1fachen auffallend gering. Insbesondere nahm die Druckfestigkeit bei den Betonen a und b bis zum Alter von 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Jahren praktisch nicht und bei den Betonen f und g nur wenig zu. Da die Würfel nach Wasserlagerung geprüft wurden, lag die Vermutung nahe, daß eine unterschiedliche Wasseraufnahme der einzelnen Betone sich in einer entsprechenden, unterschiedlich verminderten Naß-Druckfestigkeit ausgewirkt haben könnte. Die für alle Betone festgestellten Wasseraufnahmen, siehe [1, Tafel 12], gaben dazu jedoch keine Erklärung, wie auch die in anderer Richtung angestellten Überlegungen.

2.4.3. Interessante *betontechnologische Zusammenhänge* zwischen der Festigkeitsentwicklung bis zum Alter von 30 Jahren und der Betonzusammensetzung vermittelt die Darstellung in Bild 2. Daraus wird u. a. folgendes ersichtlich:

a. Die Druckfestigkeit stieg in der Regel um so mehr an, je kleiner die Ausgangsdruckfestigkeit  $W_{28}$  war. Die Druckfestigkeit nahm demgemäß beim Beton mit 200 kg Zement/m<sup>3</sup> mehr zu als beim Beton mit 300 kg Zement/m<sup>3</sup>. Im Mittel betrug die Festigkeitssteigerung der Betone mit 200 kg Zement/m<sup>3</sup> das 3,3fache von  $W_{28}$  und die der Betone mit 300 kg Zement/m<sup>3</sup> nur das 2,1fache, entsprechend dem Verhältnis 1,6 zu 1,0.

b. Die Festigkeitssteigerung der Betone aus gleichem Zement (Betone a bis h aus PZ D) wurde daher auch mit zunehmendem, d. h. ungünstigerem Wasserzementwert sowohl beim Beton mit 200 als auch beim Beton mit 300 kg Zement/m<sup>3</sup> und unabhängig von der Sieblinie des Zuschlags und der Konsistenz im ganzen entsprechend größer erhalten.

Eine eindeutige Erklärung für diesen Sachverhalt, der ebenso mit den Versuchen in Abschnitt 3 nachgewiesen werden konnte, kann noch nicht gegeben werden. Ob die eine oder andere der nachfolgend angeführten, theoretisch möglichen Ursachen in Frage kommt, ist noch offen und wird im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf demnächst untersucht.

Wenn man nach T. C. Powers unterstellt, daß für die Festigkeit das Verhältnis des Volumens der Hydratationsprodukte (Gel) zum ursprünglich eingenommenen Volumen von Zement und Wasser

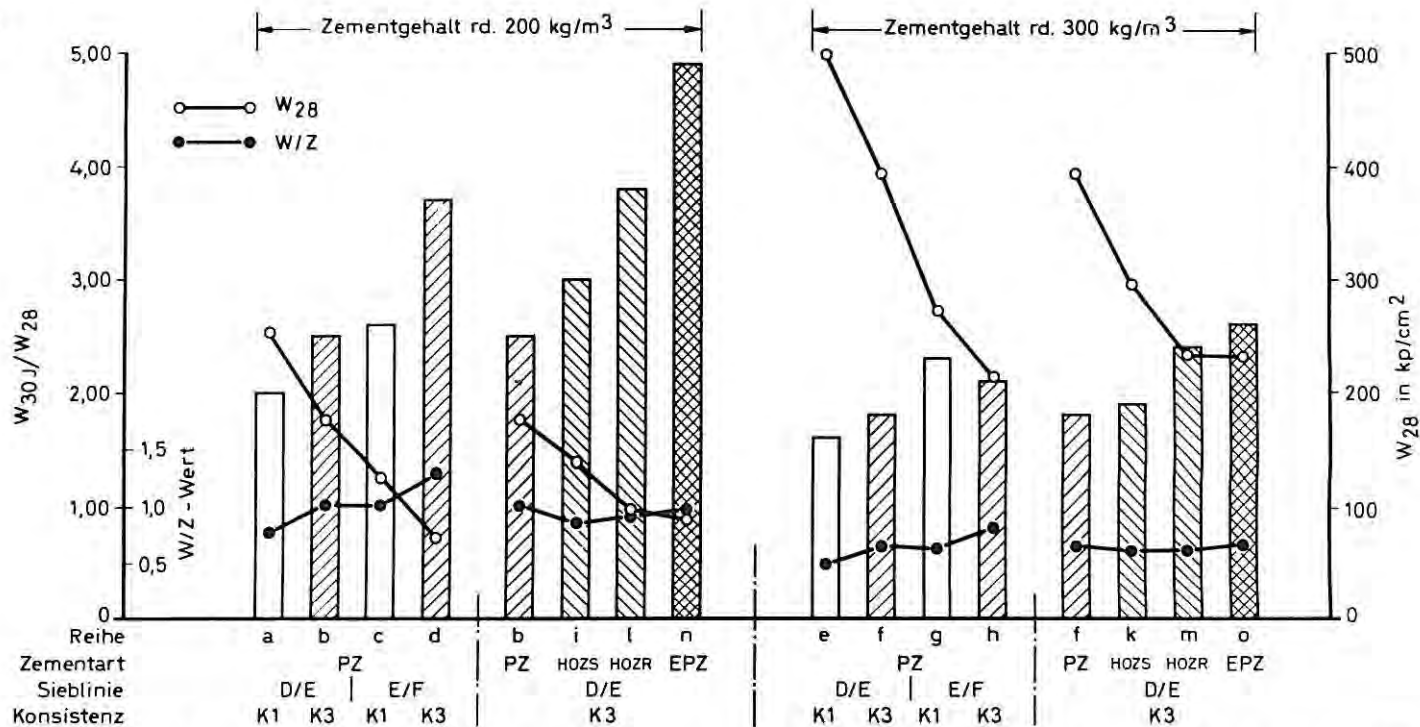


Bild 2 Entwicklung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung (Druckfestigkeit  $W_{28}$  nach 28 Tagen in  $\text{kp/cm}^2$  und nach 30 Jahren als Verhältnis  $W_{30j}/W_{28}$ )

maßgebend ist, dann führt nach einer Überschlagsrechnung ein höherer Wasserzementwert nicht nur zu einem ungünstigeren Verhältnis bei vollständiger Hydratation, sondern es ist auch bei niedrigeren Hydratationsgraden, wie in der ersten Zeit, der prozentuale Anstieg dieses Verhältnisses bei höheren Wasserzementwerten zunächst kleiner. Das Verhältnis von Hydratationsprodukten zu ursprünglichem Volumen nimmt dann aber in höherem Alter zu, auch wenn angenommen wird, daß ab einem Alter von 28 Tagen der Hydratationsgrad mit der Zeit verhältnismäßig ansteigt. Andererseits ist bekannt, daß die Hydratation des Zements bei höheren Wasserzementwerten anfänglich wesentlich schneller abläuft als bei niedrigeren Wasserzementwerten und daß dieser Unterschied nach längerer Hydratationsdauer stärker hervortritt.

Bei Zement gleicher Mahifeinheit ist bei höherem Wasserzementwert im statistischen Mittel der Abstand der einzelnen Zementkörner voneinander größer als bei niedrigem Wasserzementwert; d. h. die zwischen den einzelnen Zementkörnern befindliche Wasserschicht ist dicker. Während die Hydratationsprodukte bei niedrigem Wasserzementwert wegen der dünnen Wasserschicht direkt ineinander wachsen und damit die Festigkeit bewirken, müssen die Hydratationsprodukte bei hohem Wasserzementwert und damit dicker Wasserschicht erst den Raum um die ursprünglichen Zementkörner füllen, ehe sie ineinanderwachsen. Bei hohem Wasserzementwert muß daher ein erheblicher Teil des Zements hydratisiert sein — was erst später der Fall ist —, ehe eine intensivere Festigkeitsbildung beginnt. Für diese Erklärung spricht auch die Tatsache, daß bei gleichem Wasserzementwert feiner gemahlene Zemente aus gleichem Klinker schneller und höhere Festigkeit liefern als grob gemahlene Zemente, weil der Abstand zwischen den Zementkörnern kleiner ist.

Schließlich ist damit zu rechnen, daß sich die Hydratationsprodukte auch nach vollständiger Hydratation des Zements noch verändern und auf diese Weise ein Gefüge mit höherer Festigkeit entstehen kann. Dabei ist es denkbar, daß diese Veränderungen in einem porenreicheren Zementstein leichter ablaufen als in einem sehr dichten Zementstein.

2.4.4. *Zusammenfassend* lassen diese Untersuchungen erkennen, daß unter den vorliegenden Verhältnissen die sorgfältig im Laboratorium hergestellten Betone durch rd. 30jährige Witterungsbeanspruchung in feuchter Umgebung und Höhenlagen bis rd. 1000 m N. N. nicht nur äußerlich keine praktisch bedeutsamen Veränderungen erkennen ließen [2], sondern in allen Fällen eine erhebliche Steigerung der Druckfestigkeit aufwiesen. Dies traf auch für Betone mäßiger oder geringer Güte zu, die sich durch hohe Wasserzementwerte zwischen 0,86 und 1,29 bzw. niedere 28-Tage-Druckfestigkeiten von 175 kp/cm<sup>2</sup> bis herab zu 73 kp/cm<sup>2</sup> auszeichneten.

### **3. Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 50 Jahren [3]**

Soweit dies zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung angezeigt erscheint (z. T. wurden nach 50 Jahren etwas kleinere Druckfestig-

keiten ermittelt als nach 25 Jahren), werden aus dem 1975 erschienenen Bericht [3] und aus zwei vorausgegangenen Berichten der Jahre 1931 [5] und 1943 [6] nachfolgend Angaben über Besonderheiten der Ausgangsstoffe, Betonzusammensetzung, Lagerung und Prüfung der 1923 hergestellten Betonzylinder 15/30 cm gemacht.

### 3.1. Ausgangsstoffe

#### 3.1.1. Zement

Die vier Zemente 3M, 4M, 5M und 7M wiesen, mit geringen Unterschieden, im Mittel eine Oberfläche (Mahlfeinheit) von 1229 cm<sup>2</sup>/g auf [6]. Das Prüfverfahren wurde nicht genannt. Vermutlich wurde die Oberfläche durch Trübungsmessung im Turbidimeter nach Wagner bestimmt. Die so ermittelte Oberfläche verhält sich zur Oberfläche, die mit dem Luftdurchlässigkeitsverfahren erhalten wird, wie etwa 1 : 1,7 (siehe dazu ASTM Stand. Spec. C 150-73a). Hiernach wäre die spezifische Oberfläche der vier Zemente rd. 2100 cm<sup>2</sup>/g (siehe dazu DIN 1164 Blatt 4). Es handelte sich nach dem heutigen Stand also um grob gemahlene Zemente mit langsamem Erhärtungsfortschritt.

Diese Tendenz wird durch den verhältnismäßig hohen C<sub>2</sub>S-Gehalt der vier Zemente noch verstärkt (siehe auch Abschnitt 2.1.5). Aus der chemischen Analyse [6] errechneten sich folgende Klinkerphasen für

Zement	3 M	4 M	5 M	7 M	
C <sub>3</sub> S	44	33	47	30	%
C <sub>2</sub> S	30	39	25	41	%
C <sub>3</sub> A	11	14	15	13	%
C <sub>4</sub> AF	7	9	7	9	%

Der Mittelwert des C<sub>2</sub>S-Gehalts liegt mit 34 % erheblich über dem Mittelwert von 15 % C<sub>2</sub>S derzeitiger Portlandzementklinker in der Bundesrepublik Deutschland und z. T. auch noch über deren Höchstwert von 30 % [4, Tafel I.02].

Nach den Analysen ergab sich der Gehalt an Alkalien als Na<sub>2</sub>O-Äquivalent (DIN 1164 Blatt 3, Abschnitt 2.2.14.5) für

Zement	3 M	4 M	5 M	7 M	
zu	0,8	0,7	0,3	0,9	%.

Bei der Prüfung mit Mörtel 1 : 3 (Gew.-T.) aus Normsand unterschieden sich die Zugfestigkeiten wie auch die Druckfestigkeiten [5] der vier Zemente im Alter von 28 Tagen nicht wesentlich (maximal bis rd. ± 6 % vom Mittelwert).

#### 3.1.2. Zuschlag

Der für alle Betone verwendete Natursand 0/4,8 mm bestand etwa zu 60 % aus Quarz, 30 % aus Dolomit und 10 % aus magmatischem Gestein. Als Grobzuschlag 4,8/38 mm diente

- Kies K (rd. 75 % Dolomit, 20 % Quarz, 5 % magmatisches Gestein; 50 % gebrochene Körner)  
 Dolomit D („hartes, dauerhaftes Gestein“; gebrochen)  
 Granit G („hartes, dauerhaftes Gestein“; gebrochen)

Die gut abgestufte Kornzusammensetzung wurde für alle Betone gleichgehalten.

### 3.2. Zusammensetzung der Betone

Insgesamt wurden sechs Serien mit Reihen unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt; jede Serie bestand aus vier Reihen mit je einem anderen der vier Zemente (insgesamt 24 Reihen bzw. Mischungen). In Tafel 6 finden sich in den Spalten 3 bis 6 kennzeichnende Angaben über die Betonzusammensetzung der Se-

Tafel 6 Zylinderdruckfestigkeiten bis zum Alter von 50 Jahren und E-Moduln im Alter von 50 Jahren; Zusammenfassung von Versuchsergebnissen aus [3]

1	2	3	4	5	6	7	8					12	13								
							Serie	Linienzug nach Bild 3	MV Raum-T.	Grobzuschlag	kg/m <sup>3</sup>			W/Z	Lagerung <sup>1)</sup>	Zylinderdruckfestigkeit <sup>2)</sup> in kp/cm <sup>2</sup> nach					E-Modul <sup>2)</sup> 50 J. kp/cm <sup>2</sup>
																28 T.	1 J.	10 J.	25 J.	50 J.	
1		1:2:4	K	287	0,51	F	195	261	425	472	442	432 600									
2		1:2:4	D	308	0,54	F	194	293	442	483	493	480 200									
3		1:2:4	G	302	0,51	F	175	253	405	479	456	392 700									
Mittel	a	1:2:4	—	299	0,52	F	188	269	424	478	464	—									
4	b	1:1,5:3	K	369	0,41	F	261	345	507	539	552	455 000									
5		1:2:4	K	281	0,67	F	125	198	285	349	317	379 400									
6		1:3:6	K	200	0,69	F	102	172	275	332	297	427 000									
Mittel	c	—	K	—	0,68	F	113	185	280	340	307	—									
7 (1)		1:2:4	K	287	0,51	R	195	226	295	382	384	343 000									
8 (5)		1:2:4	K	281	0,67	R	125	181	194	260	280	326 200									
Mittel	d	1:2:4	K	284	—	R	160	203	244	321	332	—									

<sup>1)</sup> F = im Freien, R = in Raumluft

<sup>2)</sup> Mittel aus vier Reihen mit je einem andern der Zemente 3 M, 4 M, 5 M u. 7 M

rien 1 bis 6 (Zementgehalte von 200 bis 369 kg/m<sup>3</sup>, Wasserzementwerte zwischen 0,69 und 0,41, drei Grobzuschläge). Die Konsistenz der Betone war plastisch bis weich. Weiter sind in Tafel 6 die Serien 7 und 8 aufgeführt, die in ihrer Zusammensetzung den Serien 1 und 5 entsprachen, jedoch später in Raumluft gelagert wurden (siehe im folgenden Abschnitt).

### 3.3. Lagerung der Betonzylinder

Vier Stunden nach dem Füllen der stehenden Zylinderform 15/30 cm wurde auf die obere Fläche eine Abgleichschicht aus Zementleim aufgetragen [5]. Die entformten Zylinder befanden sich bis zum Alter von 28 Tagen in einem feuchten Raum, um dann, wie die der Serien 1 bis 6, stehend im Freien (Madison, Wis.), oder wie die der Serien 7 und 8 in Raumluft eines Untergeschosses gelagert zu werden; siehe Tafel 6, Spalte 7.

Im Freien bewegte sich die Lufttemperatur zwischen  $-32^{\circ}\text{C}$  und  $35^{\circ}\text{C}$ ; das Jahresmittel der Niederschläge betrug rd. 800 mm und die mittlere relative Luftfeuchtigkeit rd. 75 % (65 % bis 100 %). Nach der Anzeige von Thermoelementen zu schließen, unterlagen die Zylinder jährlich etwa 25 Wechseln zwischen Gefrieren und Tauen, in 50 Jahren also rd. 1250 Wechseln.

Während der Lagerung in Raumluft lagen die Temperaturen zwischen  $16^{\circ}\text{C}$  und  $27^{\circ}\text{C}$  [3]. Über die Luftfeuchtigkeit wird in [5] bis zum Alter von fünf Jahren mitgeteilt, daß sie 40 bis 80 % betrug.

### 3.4. Prüfung

#### 3.4.1. Prüfungsvorgang

Im Bericht [3] wird dazu auf Einzelheiten in den früheren Berichten [5, 6] verwiesen und mitgeteilt, daß die 50-Jahre-Prüfung (1973) mit einer 450-t-Pressen durchgeführt wurde. (Ob die zwischen nur rd. 50 t und 100 t liegenden Bruchlasten der Zylinder mit einem kleineren Lastbereich der Presse ermittelt wurden, ist nicht angegeben.) Wie bei der Prüfung nach 25 Jahren verfahren wurde, ist nicht bekannt; es wurde lediglich erwähnt, daß die Zylinder der späteren, 1937 begonnenen Versuche im Alter von 25 Jahren in einer 180-t-Pressen geprüft wurden. Dem letzten Bericht, der der 50-Jahre-Prüfung vorausging [6, 1943], ist weiter zu entnehmen, daß bei der Prüfung nach zehn Jahren (1933) die Prüfgeschwindigkeit 1,5 mm/min betrug, daß ursprüngliche Zementabgleichschichten (siehe Abschnitt 3.3), die während der Lagerung schadhafte wurden, durch Gipsschichten ersetzt wurden und daß die im Freien gelagerten Zylinder vor der Prüfung nur zwei Tage zum Ausgleich im Laboratorium standen.

Prüfungen von je fünf Zylindern auf Druckfestigkeit fanden im Alter von 7 und 28 Tagen, dann nach 1 Jahr, 5, 10, 25 und 50 Jahren statt. Der Elastizitätsmodul wurde als Sehnenmodul bei  $\frac{1}{4}$  der Druckfestigkeit an zwei Zylindern bestimmt.

#### 3.4.2. Prüfergebnisse

Die Mittelwerte der Zylinderdruckfestigkeiten sind für die wichtigsten Altersstufen in Tafel 6, Spalten 8 bis 12, zusammengestellt. In Spalte 13 ist der Mittelwert für den E-Modul nach 50 Jahren wiedergegeben. Die Mittelwerte für die einzelnen Serien wurden aus den vier sonst gleichen Reihen gebildet, die jedoch je einen anderen Zement aufwiesen. Dies erschien zulässig, da sich die Normfestigkeiten der Zemente (Abschnitt 3.1.1) und die 28-Tage-

Zylinderdruckfestigkeiten der damit hergestellten vier Betone nicht wesentlich unterschieden, vor allem aber weil jeder Serie immer vier Reihen mit diesen vier Zementen angehörten.

Die Serien 1, 2 und 3 unterschieden sich im wesentlichen durch den Grobzuschlag (Kies, Dolomit, Granit). Serie 4 wies den höchsten Zementgehalt ( $369 \text{ kg/m}^3$ ) und den kleinsten W/Z-Wert (0,41) auf. Die Serien 5 und 6 wurden mit etwa gleichem W/Z-Wert, jedoch verschieden hohem Zementgehalt hergestellt ( $281$  bzw.  $200 \text{ kg/m}^3$ ). Die Zylinder der Serien 7 und 8 lagerten in Raumluft; der Beton war der gleiche wie der der Serien 1 bzw. 5.

#### 3.4.2.1. Zylinderdruckfestigkeiten

In Bild 3 sind zum Vergleich die Mittelwerte der Zylinderdruckfestigkeiten dieser zusammengefaßten Serien als Linienzüge a bis d aufgetragen; siehe dazu Tafel 3, Spalte 2. Der Linienzug e entspricht dem Mittel der Serien 1 und 5 (Lagerung im Freien) und dient lediglich zum Vergleich mit Linienzug d (Lagerung in Raumluft). Daraus wird folgendes ersichtlich:

Für jede Altersstufe liegt die Druckfestigkeit um so höher, je kleiner der Wasserzementwert der Betone war (Linienzüge b, a, c). Dabei entspricht auch nach 50 Jahren die Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Wasserzementwert, dem Verlauf nach, den bekanntesten Beziehungen zwischen W/Z-Wert und Druckfestigkeit; siehe [7, Bild 9].

Die Druckfestigkeit der in Raumluft gelagerten Zylinder (Linienzug d) war je nach Alter um 11 % bis 31 % kleiner ausgefallen als die der Zylinder, die im Freien der Witterung ausgesetzt waren (Linienzug e).

Die Druckfestigkeiten nahmen bis zum Alter von 25 Jahren immer zu, bei Serie 2 und bei Serie 4 (im Freien; Linienzug b) sowie bei den Serien 7 und 8 (in Raumluft; Linienzug d) im Mittel auch bis zum Alter von 50 Jahren. Dagegen wurden für die Serien 1, 3, 5 und 6 nach 50 Jahren im Mittel etwas kleinere Druckfestigkeiten gefunden als nach 25 Jahren, was sich auch in den Linienzügen a (Serien 1, 2, 3) bzw. c (Serien 5, 6) ausdrückt.

In den Serien 1, 3, 5 und 6 sind aber auch rd. 19 % Reihen, deren Druckfestigkeit nach 50 Jahren größer erhalten wurde als nach 25 Jahren. Andererseits sind in den Serien 2, 4, 7 und 8 nach 50 Jahren 50 % Reihen mit kleineren Druckfestigkeiten festzustellen als nach 25 Jahren.

Auffallend ist nach Linienzug d die Festigkeitszunahme, die für die in Raumluft gelagerten Serien 7 und 8 auch nach 25 Jahren noch stattgefunden hatte, obwohl man eigentlich bei dieser „Trockenlagerung“ keinen Fortschritt der Zementhydratation mehr erwarten würde. Die acht Reihen der hiermit vergleichbaren Serien 1 und 5, die im Freien lagerten, lieferten dagegen bis auf eine Reihe kleinere Druckfestigkeiten.

Daraus könnte man schließen, daß an diesen kleineren Druckfestigkeiten auch die Witterungseinwirkung beteiligt war. (Gefügelockerungen durch Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel in der Randzone der Zylinder, deren beanspruchte Oberfläche im Verhält-

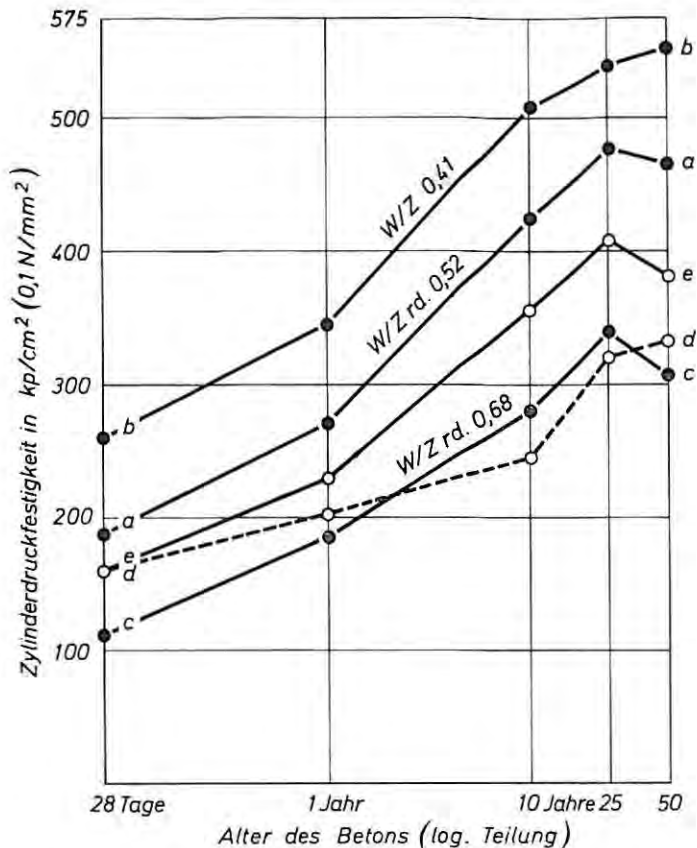


Bild 3 Entwicklung der Druckfestigkeit von Betonzylindern ( $d = 15 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ) bis zum Alter von 50 Jahren nach Lagerung im Freien und in Raumluft

- a Mittel von 3 Serien: je 4 PZ, je 1 versch. Zuschlag, W/Z = 0,51; 0,54; 0,51; Lagerung im Freien (12 Reihen bzw. Mischungen)
- b Mittel von 1 Serie: 4 PZ, 1 Zuschlag, W/Z = 0,41; Lagerung im Freien (4 Reihen bzw. Mischungen)
- c Mittel von 2 Serien: je 4 PZ, 1 Zuschlag, W/Z = 0,67; 0,69; Lagerung im Freien (8 Reihen bzw. Mischungen)
- d Mittel von 2 Serien: je 4 PZ, 1 Zuschlag, W/Z = 0,51; 0,67; Lagerung in Raumluft (8 Reihen bzw. Mischungen)
- e wie d, jedoch Lagerung im Freien

nis zum Volumen wesentlich größer ist als bei massigeren Bauteilen der Praxis. Bei Bauteilen mit größerem Querschnitt würde sich eine geschwächte Randzone entsprechend weniger in der Bruchspannung auswirken als bei den geprüften Zylindern.) Sichtbare Veränderungen an Zylindern traten offenbar nicht hervor, da im Bericht hierüber nichts ausgesagt wird.<sup>2)</sup>

<sup>2)</sup> Nach Angaben in [3] ist vorgesehen, petrographische Untersuchungen und Analysen zur Klärung der z. T. gegenläufigen Prüfergebnisse nach Lagerung in Raumluft und im Freien durchzuführen.



Schließlich kann man noch einem potentiellen Zusammenhang zwischen den Klinkerphasen der vier Zemente und den nach 25 und 50 Jahren ermittelten Druckfestigkeiten nachgehen. Dazu wird bei den Serien 1, 2 und 3 das Mittel aus den drei Reihen mit gleichem Zement gebildet und die Entwicklung der Druckfestigkeit zwischen 28 Tagen und 50 Jahren sowie zwischen 25 und 50 Jahren herausgestellt:

Zement	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	Festigkeitsentwicklung	
			28 T. - 50 J.	25 J. - 50 J.
3 M	44 ‰	30 ‰	+ 175 ‰	- 5,3 ‰
4 M	33 ‰	39 ‰	+ 146 ‰	- 3,5 ‰
5 M	47 ‰	25 ‰	+ 124 ‰	- 5,2 ‰
7 M	30 ‰	41 ‰	+ 146 ‰	+ 1,7 ‰

Man erkennt, daß für die drei Betone aus Zement 3 M, mit dem hier relativ hohen C<sub>3</sub>S-Gehalt von 44 ‰ und dementsprechend auch niederen C<sub>2</sub>S-Gehalt von 30 ‰, nach 50 Jahren im Mittel eine um 5,3 ‰ kleinere Druckfestigkeit als nach 25 Jahren festgestellt wurde. Demgegenüber nahm die gemittelte Druckfestigkeit der drei Betone aus Zement 7 M mit dem kleinsten C<sub>3</sub>S-Gehalt von 30 ‰ und größten C<sub>2</sub>S-Gehalt von 41 ‰ zwischen 25 und 50 Jahren noch zu. Dies könnte damit erklärt werden, daß der Beton aus Zement 7 M mit dem hohen C<sub>2</sub>S-Gehalt auch zwischen 25 und 50 Jahren so stark nacherhärtete, daß mindernde Einflüsse nicht als Festigkeitsabnahme zwischen 25 und 50 Jahren in Erscheinung traten.

In allen Serien fanden sich also mehr oder weniger Reihen, deren Druckfestigkeit nach 50 Jahren kleiner erhalten wurde als nach 25 Jahren. Doch lassen unterschiedliche Lagerung, Ausgangsfestigkeiten, 25-Jahre-Druckfestigkeiten, Wasserzementwerte, Zuschläge, Zemente (Klinkerphasen und Alkaligehalte), über alles gesehen, keine eindeutig gleichgerichteten Beziehungen zu den nach 50 Jahren z. T. kleiner erhaltenen Druckfestigkeiten erkennen. Man darf vielleicht auch nicht ausschließen, daß gewisse Einflüsse bei der Prüfung eine vermutlich nur geringe Festigkeitszunahme zwischen 25 und 50 Jahren oder eine nach 25 Jahren bereits gleichgebliebene Druckfestigkeit z. T. mindernd überdeckten. Auch könnten eine örtlich unterschiedliche Durchfeuchtung oder Besonnung einzelner Zylinder während der Lagerung im Freien, unterschiedlich feuchte Zylinder bei der Prüfung, verschiedenartige Beschaffenheit der Druckflächen und die Prüfgeschwindigkeit eine Rolle gespielt haben. (Prüfwerte für die einzelnen Zylinder sind im Bericht [3] nicht aufgeführt.)

Man kann nach den veröffentlichten Unterlagen nicht folgern, daß die nach 50 Jahren z. T. festgestellte kleinere Druckfestigkeit mit dem Erhärtungsmechanismus an sich bzw. mit einer altersbedingten, chemisch-mineralogischen Umwandlung der Zementsteinmatrix zusammenhängt.

Geht man von der tatsächlich festgestellten 50-Jahre-Druckfestigkeit aus, so findet sich gegenüber der 28-Tage-Druckfestigkeit für die 50-Jahre-Druckfestigkeit

bei den sechs Serien, die im Freien lagerten,  
das 2,1- bis 2,9fache, im Mittel das rd. 2,4fache,

bei den zwei Serien, die in Raumluft lagerten,  
das 2,0- und 2,2fache, im Mittel das rd. 2,1fache.

Die Druckfestigkeit bis zum Alter von 25 Jahren betrug im Freien im Mittel das rd. 2,5fache bzw. in Raumluft das rd. 2,0fache.

Mit dem bei unseren Untersuchungen verwendeten Portlandzement D [3] wurde im Mittel nach 30 Jahren im Freien das 2,3fache der Druckfestigkeit nach 28 Tagen erreicht, siehe in Abschnitt 2.4.1.

Auch hier stellt sich wieder heraus (siehe Abschnitt 2.4.3), daß die Zylinderdruckfestigkeit mit dem Alter um so mehr anstieg, je kleiner die 28-Tage-Druckfestigkeit bzw. je größer der Wasserzementwert war. Dies zeigt die nachfolgende Übersicht vergleichbarer Serien (gerundete Mittelwerte nach den Zeilen a, b, c in Tafel 6, Spalte 2).

Serien	W/Z	Zylinderdruckfestigkeit nach		
		28 Tagen	25 Jahren	50 Jahren
4 (b)	0,41	(261 kp/cm <sup>2</sup> ) 1,0	2,1	2,1
1, 2, 3 (a)	0,52	(188 kp/cm <sup>2</sup> ) 1,0	2,5	2,5
5, 6 (c)	0,68	(113 kp/cm <sup>2</sup> ) 1,0	3,0	2,7

#### 3.4.2.2. Elastizitätsmodul

Der in Spalte 13 der Tafel 6 eingetragene E-Modul ist der Mittelwert aus den jede Serie bildenden vier Reihen mit je einem anderen der vier Zemente. Der E-Modul der einzelnen Reihen mit verschiedenen Zementen, jedoch mit sonst gleicher Betonzusammensetzung, unterscheidet sich von diesem Mittelwert einer Serie maximal um - 12 % bis + 8 %, im Mittel um - 6 % bis + 5 %, so daß diese Mittelbildung für Vergleiche zulässig erscheint.

In Bild 4 sind die E-Moduln in Beziehung zu den Zylinderdruckfestigkeiten nach 50 Jahren aufgetragen und die E-Moduln von Serien, die sich durch eine bestimmte Veränderliche, wie Wasserzementwert, Zementgehalt, Zuschlag und Lagerung, unterscheiden, durch gleichstrukturierte Linien verbunden.

Daraus geht, soweit ein verständlicher Zusammenhang besteht, hervor, daß sich der Zuschlag verhältnismäßig stark auf den E-Modul auswirkte (1 - 2 - 3), daß, wie nicht anders zu erwarten ist, der E-Modul mit kleiner werdendem W/Z-Wert, bedingt durch höheren Zementgehalt, etwas größer ausfiel (1 - 4), daß aber bei etwa gleichem W/Z-Wert ein höherer Zementgehalt zu einem kleineren E-Modul führte (5 - 6) und daß bei Lagerung in Raumluft der E-Modul hinter dem des im Freien gelagerten Betons im Mittel um etwa 70 000 kp/cm<sup>2</sup> zurückblieb (1 - 5 und 7 - 8).

Im Vergleich zu diesen E-Moduln nach 50 Jahren sind die in DIN 1045, Tabelle 11, angegebenen Rechenwerte eingetragen,

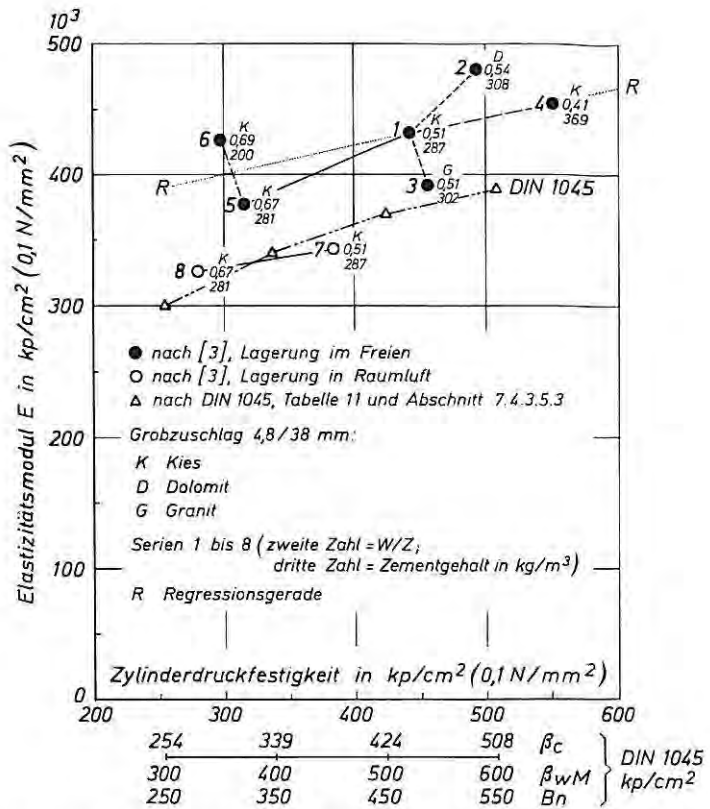


Bild 4 Elastizitätsmodul und Zylinderdruckfestigkeit der Serien 1 bis 8 (siehe Tafel 6, Spalten 12 und 13) sowie Rechenwerte des Elastizitätsmoduls nach DIN 1045, Tabelle 11. — Gleichstrukturierte Linien verbinden Prüfwerte von Serien mit bestimmten Veränderlichen

wofür die zugehörigen Würfeldruckfestigkeiten mit der Beziehung nach Abschnitt 7.4.3.5.3 der DIN 1045 in Zylinderdruckfestigkeiten umgerechnet wurden. In Bild 4 wurde außerdem die Ausgleichsgerade R eingezeichnet (Regressionsgerade R, zu der allerdings eine große Spanne des 95 %-Vertrauensbereichs gehört). Man erkennt, daß in dem sich deckenden Bereich der Druckfestigkeiten die E-Moduln der DIN 1045, bezogen auf die Ausgleichsgerade der E-Moduln des 50 Jahre im Freien gelagerten Betons, im Durchschnitt um rd. 65 000 kp/cm<sup>2</sup> kleiner sind und daß sie im Bereich der Festigkeitsklasse B<sub>n</sub> 350 etwa denen des 50 Jahre in Raumluft gelagerten Betons entsprechen.

#### 4. Zusammenfassung

4.1. Aus deutschen Versuchen (D) wird die Entwicklung der Druckfestigkeiten von Betonen bis zum Alter von 30 Jahren und aus amerikanischen Versuchen (A) bis zum Alter von 50 Jahren wiedergegeben.

4.2. Bei den Versuchen D standen Betonplatten von 15 cm Dicke, 40 cm Breite und 70 cm Höhe rd. 35 cm tief in Wasser an drei verschiedenen Lagerorten im Freien (516 m N.N., 1085 m N.N. und 230 bzw. 450 m N.N.). Die Druckfestigkeit nach 30 Jahren wurde an Bohrkernen bestimmt, die dem oberen, luftgelagerten Teil der Betonplatten entnommen worden waren.

Die Festigkeitsentwicklung bei den Versuchen A wurde an Zylindern von 30 cm Höhe und 15 cm Durchmesser verfolgt, die im Nordwesten der USA im Freien standen und den Witterungseinflüssen ausgesetzt waren.

Im Verlauf von 30 Jahren waren bei den Versuchen D der luftgelagerte Teil des Betons, für die drei Lagerorte gemittelt, schätzungsweise rd. 1000 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt und die Zylinder der Versuche A während 50 Jahren etwa 1250 Frost-Tau-Wechseln.

4.3. Die 14 Betone D wurden im Jahre 1941 und die 24 Betone A im Jahre 1923 mit jeweils vier verschiedenen Zementen hergestellt. Die Zemente der Versuche D (ein PZ, zwei HOZ, ein EPZ) würden auch den Anforderungen der z. Z. geltenden Zementnorm DIN 1164 entsprochen haben. Die Zemente der Versuche A (vier PZ) wiesen gegenüber heutigen Zementen eine verhältnismäßig grobe Mahlung und einen ungewöhnlich hohen C<sub>2</sub>S-Gehalt auf.

#### *Versuche D*

4.4. Die Betone mit der Konsistenz K 1 und K 3 unterschieden sich durch Zementgehalte von rd. 200 und 300 kg/m<sup>3</sup> und Wasserzementwerte zwischen 0,50 und 1,29. Der Zuschlag bestand aus Rheinkies sand 0/30 mm mit Sieblinien im „günstigen“ sowie „brauchbaren“ Bereich. Die 28-Tage-Druckfestigkeiten fanden sich zwischen 73 und 498 kp/cm<sup>2</sup>.

4.5. Die Druckfestigkeit war bis zum Alter von 30 Jahren bei jedem der Betone erheblich angestiegen; sie lag zwischen 280 und 795 kp/cm<sup>2</sup> gegenüber 73 und 498 kp/cm<sup>2</sup> nach 28 Tagen.

Beim Beton aus PZ erreichte die Druckfestigkeit nach 30 Jahren im Mittel das 2,3fache der 28-Tage-Druckfestigkeit und beim Beton aus den Hochofenzementen und dem Eisenportlandzement im Mittel das 3,1fache. (Durch die Witterungseinwirkung [2] war je nach Betonzusammensetzung nur ein Abwittern der Zementhaut oder höchstens ein Abtragen des Feinmörtels bis 3 mm Tiefe entstanden.)

Soweit zusätzlich die Druckfestigkeit auch für den im Wasser stehenden Teil der Betonplatten ermittelt wurde, fand sie sich praktisch gleich groß wie die Druckfestigkeit des Betons im oberen Plattenteil, der der Witterung ausgesetzt war.

4.6. Bis zum Alter der Betone von 30 Jahren war die Druckfestigkeit, allgemein gesehen, um so mehr angestiegen, je kleiner die 28-Tage-Druckfestigkeit gewesen war. So fand sich auch, daß die Steigerung bei den Betonen mit 200 kg Zement/m<sup>3</sup> im Mittel das 3,3fache und bei den Betonen mit 300 kg Zement/m<sup>3</sup> nur das 2,1fache betrug und daß bei den vergleichbaren Mischungen (PZ D)

die Festigkeitssteigerung mit größer werdendem Wasserzementwert, im ganzen unabhängig vom Zementgehalt, von der Konsistenz und der Sieblinie des Zuschlags, ebenfalls größer ausfiel.

#### *Versuche A*

4.7. Die Betone wiesen Zementgehalte zwischen 200 und 369 kg/m<sup>3</sup>, Wasserzementwerte von 0,41 bis 0,69, Zuschlaggemische 0/38 mm und plastische bis weiche Konsistenz auf. Außer der Lagerung im Freien wurden Zylinder von zwei Serien auch in Raumluft gelagert.

Die Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen lag zwischen 102 und 261 kp/cm<sup>2</sup>, was umgerechnet [8] einer Würfeldruckfestigkeit nach DIN 1048 zwischen rd. 125 und 325 kp/cm<sup>2</sup> entspricht.

4.8. Die Zylinderdruckfestigkeiten im Alter von 50 Jahren fanden sich nach Lagerung im Freien zwischen 297 und 552 kp/cm<sup>2</sup> gegenüber 102 und 261 kp/cm<sup>2</sup> nach 28 Tagen (entsprechende Würfeldruckfestigkeiten rd. 370 und 685 bzw. 125 und 325 kp/cm<sup>2</sup>). Für die vergleichbaren Serien war die Zylinderdruckfestigkeit nach Raumluftlagerung mit im Mittel 332 kp/cm<sup>2</sup> kleiner ausgefallen als nach Lagerung im Freien mit 379 kp/cm<sup>2</sup>.

Die 50-Jahre-Druckfestigkeit erreichte nach Lagerung im Freien im Mittel das 2,4fache der 28-Tage-Druckfestigkeit und nach Lagerung in Raumluft das 2,1fache. (Da die Zemente eine grobe Mahlung und einen sehr hohen C<sub>2</sub>S-Gehalt aufwiesen, wäre mit heutigen Zementen die Festigkeitszunahme bei Lagerung im Freien kleiner zu erwarten.)

Die Festigkeitssteigerung war auch hier um so größer ausgefallen, je größer der Wasserzementwert der Betone bzw. je kleiner ihre Druckfestigkeit nach 28 Tagen war.

4.9. Bei vier der sechs Serien, deren Zylinder im Freien lagerten, wurden nach 50 Jahren im Mittel etwas kleinere Druckfestigkeiten erhalten als nach 25 Jahren. Doch fanden sich in zwei dieser vier Serien auch Reihen mit größerer 50-Jahre-Druckfestigkeit. Auffallend ist, daß hingegen bei der Raumluftlagerung im Zeitraum von 25 bis 50 Jahren die Druckfestigkeit im Mittel angestiegen war.

Bei Berücksichtigung aller in den Berichten enthaltenen Unterlagen ergeben sich keine eindeutig gleichgerichteten und sinnvollen Zusammenhänge zur Erklärung der Ursache für die nach 50 Jahren z. T. etwas kleineren Druckfestigkeiten.

4.10. Die E-Moduln der Betone, die an den im Freien gelagerten Zylindern ermittelt wurden, lagen nach 50 Jahren, je nach Betonzusammensetzung, zwischen rd. 380 000 und 480 000 kp/cm<sup>2</sup>. Auf die Regressionsgerade bezogen waren die E-Moduln nach 50 Jahren um rd. 65 000 kp/cm<sup>2</sup> größer als die in DIN 1045 angegebenen Rechenwerte.

Der E-Modul der in Raumluft gelagerten Betonzylinder wurde im Mittel um etwa 70 000 kp/cm<sup>2</sup> kleiner erhalten als der des Betons im Freien.

## SCHRIFTTUM

- [1] Walz, K.: Witterungsbeständigkeit von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 127, Berlin 1957 (Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn).
- [2] Walz, K., und E. Hartmann: Witterungsbeständigkeit von Beton. 2. Bericht: Untersuchungen an rd. 30 Jahre im Freien gelagerten Betonplatten. — Erscheint demnächst in der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton.
- [3] Washa, G. W., und K. F. Wendt: Fifty year properties of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 72 (1975) S. 20/28.
- [4] Locher, F. W.: Chemie des Zements und der Hydratationsprodukte. Zement-Taschenbuch 1974/75. Bauverlag, Wiesbaden-Berlin 1974, S. 19/44.
- [5] Withey, M. O.: Some long time tests of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 27 (1930/31) S. 547/582.
- [6] Withey, M. O., und K. F. Wendt: Some long time tests of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 39 (1942/43) S. 221/238.
- [7] Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. 2. Auflage, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972.
- [8] Walz, K.: Beton- und Zementdruckfestigkeiten in den USA und ihre Umrechnung auf deutsche Prüfwerte. beton 12 (1962) H. 9, S. 420/423, und H. 10, S. 463/466; ebenso Betontechnische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 123/140.