

Eigenschaften und Verhalten von Beton nach 29jähriger Lagerung im Freien

Von Kurt Walz, Düsseldorf

Übersicht

In Vorarlberg (Partenen, rd. 1050 m N. N.) wurden zahlreiche Platten 70 · 40 · 15 cm aus sehr unterschiedlich zusammengesetztem Beton 29 Jahre lang der Witterung ausgesetzt. Die Betone unterschieden sich im Zementgehalt (200 und 300 kg/m³), in der Zementart, im Sandgehalt des Zuschlaggemisches, in der Konsistenz und im Wasserzementwert (0,50 bis 1,29). Der untere Teil der Platten stand in fließendem Wasser.

Die Abwitterung an den Flächen des luftgelagerten Teils war selbst bei Beton minderer Güte (rd. 200 kg Zement/m³, W/Z-Wert bis 1,29) nur gering. Durch das rasch fließende, sehr weiche und schwach saure Wasser entstand demgegenüber eine stärker hervortretende Abtragung. Risse und Frostabsprengungen fanden sich nicht. Die Druckfestigkeit im luftgelagerten Teil der Platten hatte bei jedem der Betone gegenüber seiner Ausgangsfestigkeit (W_{28} rd. 75 bis 500 kp/cm²) deutlich, z. T. bis auf das rd. 4,5fache, zugenommen. Die Carbonatisierungstiefe war auch bei Beton mit nur 200 kg Zement/m³ sehr gering, und die bei einem Teil der Platten unter abgespitzten Betonflächen liegenden Stahlstäbe wiesen auch bei nur 30 mm Betonüberdeckung praktisch keine Rostung auf.

Im ganzen gesehen ergab sich ein auffällig günstiges Verhalten dieser im Laboratorium hergestellten Betone. Darunter befanden sich auch Betone, die bei diesen Klima- und Lagerungsverhältnissen normalerweise nicht eingebaut würden.

1. Einleitung

Der Bericht befaßt sich mit den Eigenschaften und dem Verhalten von eindeutig definierten Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung nach 29jähriger Beanspruchung durch Witterung und strömendes Wasser ¹⁾).

Die Untersuchungen wurden unmittelbar vor dem Kriege geplant, da damals für große Bauwerke, insbesondere auch Brücken, häufig die Frage gestellt wurde,

unter welchen Voraussetzungen Beton im Freien über viele Jahre hinweg ausreichend beständig ist und ob eine Verkleidung mit Naturstein in dieser Hinsicht ggf. entfallen kann,

¹⁾ Vortrag auf der 6. Fachtagung „Betontechnologie“ im Forschungsinstitut des Vereins Österreichischer Zementfabrikanten in Wien am 25. 11. 1971.

wie sich Beton verschiedener Zusammensetzung bei einer Frost-Tau-Wechselbeanspruchung im Laboratorium im Vergleich zur natürlichen Bewitterung verhält und

ob ein hoher Grad der Witterungsbeständigkeit in einfacher Weise durch bestimmte Grenzwerte des Betonaufbaus gewährleistet werden kann.

Auch wenn durch die hierzu notwendigen, letztlich ausschlaggebenden Langzeitversuche im Freien keine zeitgerechte Antwort zu den damals aufgeworfenen Fragen zu erwarten war, so nahm der Deutsche Ausschuß für Stahlbeton die Angelegenheit doch zum Anlaß, einen entsprechenden Versuchsplan durch die Forschungs- und Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart (später Otto-Graf-Institut der Universität Stuttgart) aufstellen zu lassen. Dort wurden auch, 1941 beginnend, die Untersuchungen mit Mitteln des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfSt) durchgeführt. Ein Bericht über die Versuche in den ersten 12 Jahren ist als Heft 127 des DAfSt 1957 erschienen ²⁾. Er enthält alle Angaben über die Eigenschaften der Ausgangsstoffe, die Zusammensetzung der 17 Betonmischungen, die Herstellung von 380 Betonplatten (überwiegend mit den Abmessungen 70 · 40 · 15 cm) und über die 114 Würfel mit 20 cm Kantenlänge. In diesem Bericht finden sich weiter kennzeichnende technologische Feststellungen an den verwendeten Zementen, über die Festigkeitsentwicklung der Betone, deren Wasseraufsaugvermögen, Rohdichte, Reindichte, Porenraum und den Sättigungswert, der sonst zur Beurteilung des Frostwiderstands von Natursteinen oder keramischen Baustoffen herangezogen wird.

Aus jeder Betonmischung wurden 20 Platten hergestellt, von denen im Jahre 1941 je 6 Platten im Alter von 2 Monaten, etwa zur Hälfte in Wasser stehend, den Witterungseinflüssen ausgesetzt wurden, und zwar in Stuttgart (rd. 200 m N. N.), in Blaubeuren auf der Südseite der Schwäbischen Alb (520 m N. N.) und in Partenen im Montafon (rd. 1050 m N. N.). Von 2 etwas kleineren Platten ist im Alter von 2½ Jahren im Laboratorium eine der Flächen 50 · 40 cm liegend 100 Frostwechseln ausgesetzt worden. Zum einseitigen Befroren der nassen Betonfläche strich über diese ein Kaltluftstrom von - 12 °C. Das Auftauen erfolgte durch eine 1 cm hohe Wasserschicht von ursprünglich rd. 60 bis 80 °C. Anschließend wurde die Biegezugfestigkeit bestimmt. Diese wurde mit der Biegezugfestigkeit verglichen, die später an 2 Platten jeder Mischung nach rd. 12jähriger Lagerung im Freien erhalten wurde ²⁾.

Außerdem wurden aus 2 Mischungen je 18 Platten ausgelagert, die 5 Bewehrungsstäbe mit verschiedener Überdeckung enthielten und deren Flächen 70 · 40 cm mit dem Spitzmeißel rd. 10 mm tief abgespitzt worden sind. Man wollte damit feststellen, inwieweit sich die damals übliche mechanische Bearbeitung auf den Korrosionsschutz der Überdeckung und auf die Witterungsbeständigkeit der

²⁾ Walz, K.: Witterungsbeständigkeit von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 127, Berlin 1957 (Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin).

Flächen auswirkt³⁾. (Auf die ebenso untersuchten 66 Natursteinplatten 70 · 40 · 15 cm aus Graniten, Sandsteinen, Muschelkalken und Süßwassertuff wird hier nicht eingegangen. Die Natursteinplatten ließen mit wenigen Ausnahmen keine Veränderungen erkennen. Soweit dies der Fall war, wird dies später vergleichsweise erwähnt.)

Die Betone waren nach Tafel 1 aus gewöhnlichem Portlandzement, Hochofenzement oder Eisenportlandzement sowie Rheinkiesand 0/30 mm nach Sieblinie D/E mit 50 % Sand 0/7 mm oder nach Sieblinie E/F mit 70 % Sand 0/7 mm zusammengesetzt worden⁴⁾. Der Zementgehalt betrug rd. 200 oder rd. 300 kg/m³. Die Mischungen wurden als Rüttelbeton, etwas nasser als erdfeucht, oder als weicher Beton mit Ausbreitmaßen zwischen 46 und 53 cm hergestellt. Die Wasserzementwerte ergaben sich in dem weiten Bereich zwischen 0,50 und 1,29, und dementsprechend sowie abhängig vom Zement fiel auch die 28-Tage-Druckfestigkeit sehr unterschiedlich zwischen 73 kp/cm² und 498 kp/cm² aus. Einige Mischungen enthielten Zuschlag bis 80 mm Größtkorn oder Moränekies.

Als 1941 die Betone hergestellt wurden, war wohl in einigen noch sporadisch aus den USA eingegangenen Berichten bereits die eindeutige Verbesserung des Frostwiderstandes durch ungewollt in den Beton eingetragene kleinste Luftporen beschrieben worden. Ihre zunächst abnorm erscheinende Wirkungsweise war jedoch noch nicht erklärbar, und noch weniger standen die heute bewußt angewandten LP-Zusatzmittel zur Verfügung; man würde sie heute bei einer solchen Forschungsarbeit berücksichtigen. Trotzdem erscheinen die hier nach 29 Jahren an den Betonen ohne künstlich eingeführte Luftporen gewonnenen Ergebnisse in verschiedener Hinsicht aufschlußreich. Insbesondere können sie mit den Festlegungen für die Zusammensetzung verglichen werden, die für Beton mit hohem Frostwiderstand ohne künstliche Luftporen in die neue DIN 1045 und ÖNORM B 4200 aufgenommen wurden.

Mit diesen Ausführungen wurde ein Überblick über den Anlaß zu den Untersuchungen und das vorliegende Versuchsmaterial gegeben. Im folgenden wird überwiegend nur auf die *Feststellungen an den in Partenen 29 Jahre lang ausgelagerten Platten* eingegangen und der Übersichtlichkeit wegen auch nur auf jene aus Beton mit Portlandzement bzw. Hochofenzement und Rheinkiesand. (Ein ausführlicher Bericht wird für ein Heft der Schriftenreihe des DAfSt z. Z. vorbereitet. Die Versuche werden an jedem der drei Auslagerungsorte mit in der Regel noch 3 Platten einer Reihe fortgesetzt.)

³⁾ Die Arbeiten bei der Auslagerung der Platten, bei den periodischen Besichtigungen, bei der Wartung und bei der Entnahme von Proben wurden durch die Portland-Cementfabrik Gebr. Spohn in Blaubeuren und durch die Materialprüfungsanstalt Schruns der Vorarlberger Illwerke AG wesentlich unterstützt.

⁴⁾ Der durch Naßsiebung in Korngruppen aufgeteilte Zuschlag vom Rhein aus der Karlsruher Gegend bestand aus Gestein mit hohem Frostwiderstand. Er wies keinen nennenswerten Ton- oder Glimmergehalt auf; der Feinstsand 0/0,2 mm enthielt etwa 0,3 Gew.-% Glimmer. In den Zuschlaggemischen D/E und E/F betrug der Feinstsandgehalt 0/0,2 mm wiederum nur 1 bzw. 2 Gew.-%.

Tafel 1 Eigenschaften der Betonmischungen für Platten 70 · 40 · 15 cm zur Auslagerung im Freien

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Reihe	Zement	Zuschlag Art	Stieblinie Zuschlag	1 m ³ frischer, verdichteter Zement	Beton enthielt Zuschlag	Wasser	W-Wert $\frac{W}{Z}$	Beschaffenheit des frischen Betons	Aus- breit- maß cm	Ein- dring- maß cm	20-cm-Würfel (Alter 28 Tage) P ₂₈ kg/dm ³	W ₂₈ kg/cm ²
a	PZ D	Rheinkiessand 0/30 mm	D/E	204	1997	159	0,78	etw. nasser als erf.	—	4,1	2,38	253
b	(rd. 200 kg/m ³)			201	1924	205	1,02	weich	52	—	2,36	175
c			E/F	197	1832	201	1,02	etw. nasser als erf.	—	4,5	2,27	125
d				195	1773	252	1,29	weich	50	—	2,25	73
e			D/E	303	1926	151	0,50	etw. nasser als erf.	—	4,2	2,41	498
f	PZ D	Rheinkiessand 0/30 mm	D/E	302	1839	199	0,66	weich	52	—	2,39	393
g	(rd. 300 kg/m ³)			302	1765	193	0,64	etw. nasser als erf.	—	4,4	2,30	272
h			E/F	300	1714	246	0,82	weich	52	—	2,31	212
i	(rd. 200 kg/m ³)	Rheinkiessand	D/E	205	1969	176	0,86	weich	48	—	2,34	137
k	HOZ S (rd. 300 kg/m ³)	0/30 mm		304	1857	189	0,62	weich	48	—	2,37	295
l	(rd. 200 kg/m ³)	Rheinkiessand	D/E	203	1950	187	0,92	weich	46	—	2,34	98
m	HOZ R (rd. 300 kg/m ³)	0/30 mm		300	1831	189	0,63	weich	46	—	2,37	232
n	(rd. 200 kg/m ³)	Rheinkiessand	D/E	201	1930	199	0,99	weich	52	—	2,37	89
o	EPZ B (rd. 300 kg/m ³)	0/30 mm		299	1821	200	0,67	weich	53	—	2,41	230
p		Rheinmaterial bis 80 mm	G/H	195	1970	185	0,95	weich	49	—	2,39	199
q	PZ D (rd. 200 kg/m ³)	Rheinsand 0/7 mm und Moränekies 7/30 mm	D/E	199	1956	195	0,98	weich	54	—	2,41	171
r		Rheinsand 0/7 mm u. Moränematerial 7/80 mm	G/H	195	1994	181	0,93	weich	50	—	2,41	177
s	(rd. 200 kg/m ³)	Rheinkiessand	D/E	200	1920	200	1,00	weich	52	—	2,38	167
t	PZ D (rd. 300 kg/m ³)	0/30 mm	D/E	303	1850	197	0,65	weich	51	—	2,40	351

2. Feststellungen an den ausgelagerten Platten

2.1 Auslagerung

Die Platten wurden im Alter von 2 Monaten etwa bis zur halben Höhe in Wasser eingestellt, davon je 114 in Stuttgart senkrecht stehend in Becken mit ruhendem Wasser und in Blaubeuren sowie Partenen in fließendes Wasser mit einer Neigung von 60° nach Süden gerichtet. Bild 1 gibt zur Veranschaulichung einen Abschnitt aus der derzeitigen Lagerungsstrecke in der Aach bei Blaubeuren wieder.

In *Partenen* standen die Platten nach Bild 2 bis 1959 (rd. 18 Jahre) in einem Abzweig der III der Besonnung ausgesetzt. Sie wurden dann direkt am Ufer der III und später in einem gleichlaufenden Gerinne aus U-förmigen Betonfertigteilen gelagert (Bild 3). In *Partenen* bleiben die Platten in den Monaten November bis Februar



Bild 1 Einlagerungsstrecke in der Aach bei Blaubeuren



Bild 2 Abschnitt der Einlagerungsstrecke in Partenen bis 1959

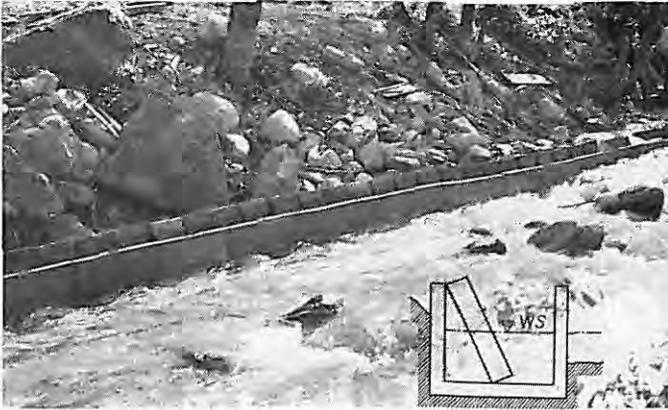


Bild 3 Derzeitige Einlagerungsstrecke in der III bei Partenen

wegen der im Süden steil aufsteigenden Talseite ohne Besonnung; im Winter sind sie von etwa Dezember bis März weitgehend eingeschneit, ohne daß jedoch das Wasser im Gerinne einfriert. Seit 1959 liegen dort die Platten im Sommer vorwiegend im Baum-schatten. Nach den für Partenen vorliegenden Erfahrungen über Besonnung und Schneebedeckung sowie nach den Angaben der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien über die Zahl der Gefrierpunktdurchgänge der Luft ist im langjährigen Mittel in Partenen 5 cm über dem Boden mit rd. 240 Gefrier-punktdurchgängen der Luft zu rechnen. Wievielen Gefrier-punktdurchgängen der durchfeuchtete Beton über dem Wasserspiegel ausgesetzt war, ist nur in etwa anzugeben, insbesondere weil die eigentlichen Verhältnisse des Kleinklimas an der Einlagerungs-stelle von jenen der meteorologischen Station abweichen dürften. Man kann aber nach einer auf gewissen Annahmen beruhenden Berechnung ungefähr 650 Frost-Tau-Wechsel voraussetzen, die in der Randzone der Platten-Vorderseite während der 29jährigen Auslagerung wirkten. Unbekannt bleibt allerdings der zeitliche Verlauf des Temperaturabfalls bei den einzelnen Frost-Tau-Wech-seln, der für eine Frostwirkung von großer Bedeutung ist. (Man würde heute bei solchen Untersuchungen zweifellos mit einem Temperaturschreiber den Temperaturverlauf in verschiedener Tiefe einer Platte und auch den der Luft 1 oder 2 Winter lang erfassen, um damit eine Beziehung der Frost-Tau-Wechsel im Beton zu dem bekannten langjährigen Mittel der Gefrierpunktdurchgänge der Luft einer zugehörigen meteorologischen Station ableiten zu können.)

Die Fließgeschwindigkeit des Wassers im Gerinne in Partenen wurde im Juni 1970 zu rd. 2 m/s ermittelt. Wesentlich für eine Erosion am wassergelagerten Teil der Platten ist hier aber die chemische Beschaffenheit des Wassers. Über die Jahre hinweg fand sich die Gesamthärte des Illwassers zwischen 0 und etwa 2° dH, der pH-Wert zwischen rd. 5,5 und 6,5 und die kalkangrei-fende Kohlensäure zwischen etwa 2 und 16 mg/l. Sulfate waren nur in unbedeutender Menge vorhanden.

2.2 Äußerer Befund der Platten

Die nachfolgenden Bilder geben zunächst die typische Beschaffenheit der Platten vor der Auslagerung wieder. Für die mehlkornarmen Mischungen mit nur 200 kg Zement/m³ waren mehr oder weniger große „sandige“ Flächen typisch, die durch das im Frischbeton sich absondernde Wasser entstanden waren und die erfahrungsgemäß der Verwitterung einen Angriffspunkt bieten (Bild 4). „Sandige“ Flächen wiesen demgegenüber die Platten aus Beton mit einem Zementgehalt von 300 kg/m³ nicht auf (Bild 5). Bild 6 gibt eine der Platten mit Stahlstäben und abgeputzter Fläche im Ausgangszustand wieder.

Bei der augenscheinlichen Beurteilung des Zustandes der Platten im Juni 1970, also nach rd. 29jähriger Auslagerung, wurde zwischen dem wassergelagerten Teil und dem luftgelagerten Teil unterschieden. (Auch die luftgelagerte obere Hälfte wurde gelegentlich durch Spritzwasser benetzt und bei Hochwasser überspült.) Im einzelnen wurde für jede Platte sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite der Grad der Veränderung festgestellt.

Risse, Ausbrüche oder Abbrüche an Ecken und Kanten, wie sie sonst für eine Schädigung durch Frost kennzeichnend sind, waren nicht aufgetreten. Nach Augenschein fand sich eine unterschiedliche, mehr oder weniger gleichmäßig verteilte, flächenhafte Abtragung. Diese war auf der nach Süden gerichteten Vorderfläche des luftgelagerten Teils meist etwas ausgeprägter als auf der Rückseite.

Der durchschnittliche Befund der zusammengehörenden Platten wurde in 5 Grade der Abtragung „schwach“ bis „stark“ eingeteilt. Hierbei sind auch die mit „stark“ beurteilten Abtragungen nur als relativ für den hier festgestellten Befund zu sehen; sie müssen nicht ohne weiteres auch bei der Bewertung des Zustandes von massigeren Bauwerken mit gleicher Bedeutung gelten:

Grad 1: schwach; überwiegend nur Zementhaut und wenig Feinmörtel abgetragen; Beispiel Bild 7, obere Partie des luftgelagerten Teils.

Grad 2: schwach bis mäßig; Befund zwischen Grad 1 und 3.

Grad 3: mäßig; Feinmörtel bis rd. 3 mm Tiefe abgetragen; einzelne Kies- und größere Sandkörner freiliegend; Beispiel Bild 8, obere Partie des luftgelagerten Teils.

Grad 4: mäßig bis stark; Befund zwischen Grad 3 und 5.

Grad 5: stark; Mörtel bis rd. 7 mm Tiefe über und zwischen den Kieskörnern abgetragen; gröbere Sandkörner z. T. ausgebrochen; Kieskörner stark hervortretend (wie z. B. bei Waschbeton); Beispiel Bild 9, unterer, wassergelagerter Teil.

Um einen möglichst einfachen Überblick zu bieten, ist das arithmetische Mittel der Einzelbewertungen des Abtragungsgrades aus den 3 zusammengehörenden Platten in Bild 10 aufgetragen, oben für den luftgelagerten Teil und unten für den wassergelagerten Teil. (Die anderen 3 der ursprünglich ausgelagerten 6 Platten wurden bereits nach rd. 12 Jahren auf Biegezugfestigkeit geprüft.)

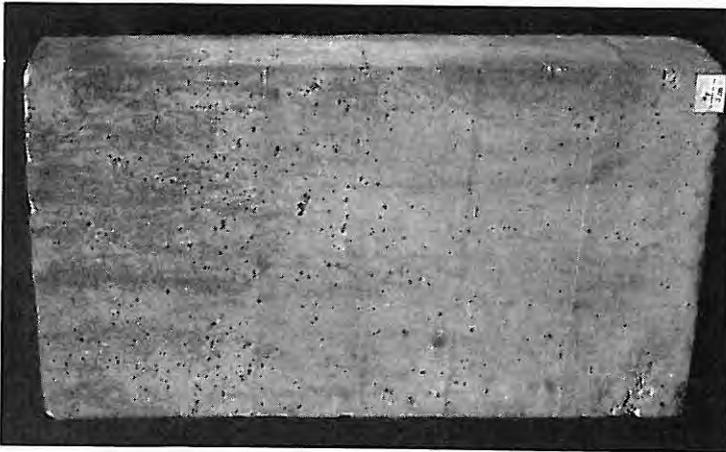


Bild 4 Beschaffenheit einer Betonplatte 70 · 40 · 15 cm aus Beton mit 200 kg Zement je m³ vor dem Auslagern (Platte a1 mit „sandiger“ Fläche im oberen Teil)

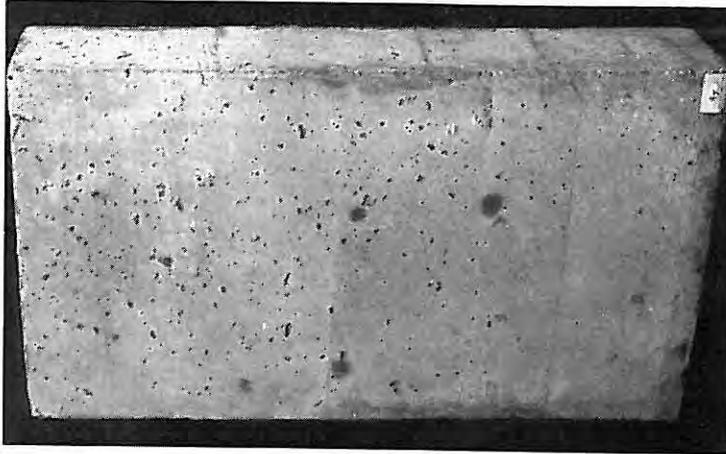


Bild 5 Beschaffenheit einer Betonplatte 70 · 40 · 15 cm aus Beton mit 300 kg Zement je m³ vor dem Auslagern (Platte e1)



Bild 6 Bewehrte Betonplatte 70 · 40 · 15 cm mit abgespitzten Flächen 70 · 40 cm vor dem Auslagern (Platte s3)

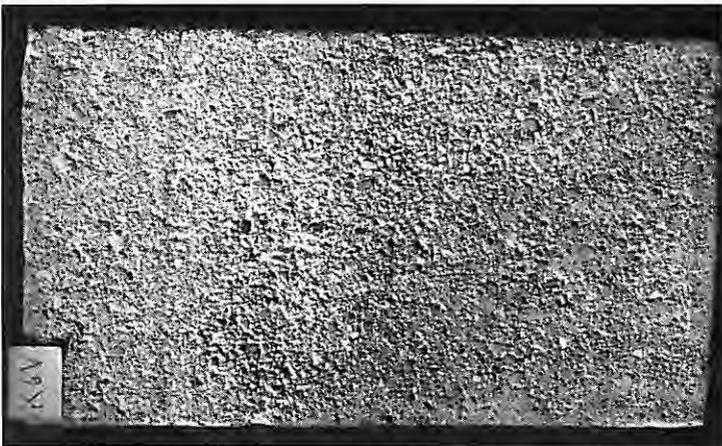


Bild 7 Betonplatte k6v; **Grad 1** in der oberen Partie des luftgelagerten Teils; Zementhaut und wenig Feinmörtel abgetragen (Wassergelagerter Teil; Feinmörtel z. T. bis rd. 3 mm Tiefe abgetragen; einzelne Kies- und größere Sandkörner freiliegend; **Grad 2**)

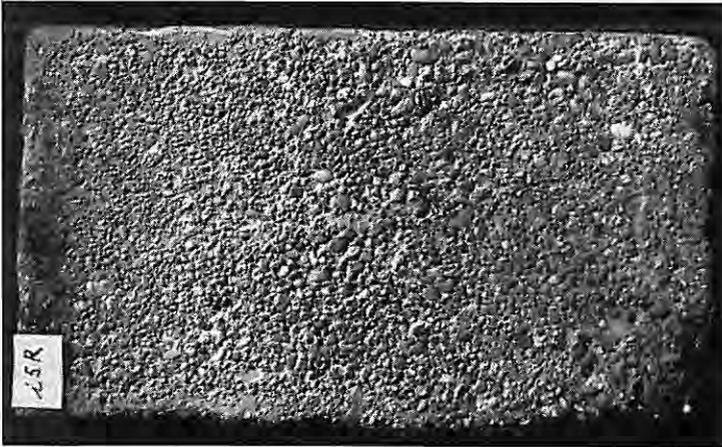


Bild 8 Betonplatte i5R; **Grad 3** in der oberen Partie des luftgelagerten Teils; Feinmörtel bis rd. 3 mm Tiefe abgetragen (Wassergelagerter Teil; Mörtel über und zwischen den Kieskörnern abgetragen; **Grad 4**)



Bild 9 Betonplatte d20v; **Grad 5** im wassergelagerten Teil; Mörtel bis rd. 7 mm Tiefe über und zwischen den Kieskörnern abgetragen (Luftgelagerter Teil; Feinmörtel etwas abgetragen; **Grad 1**)

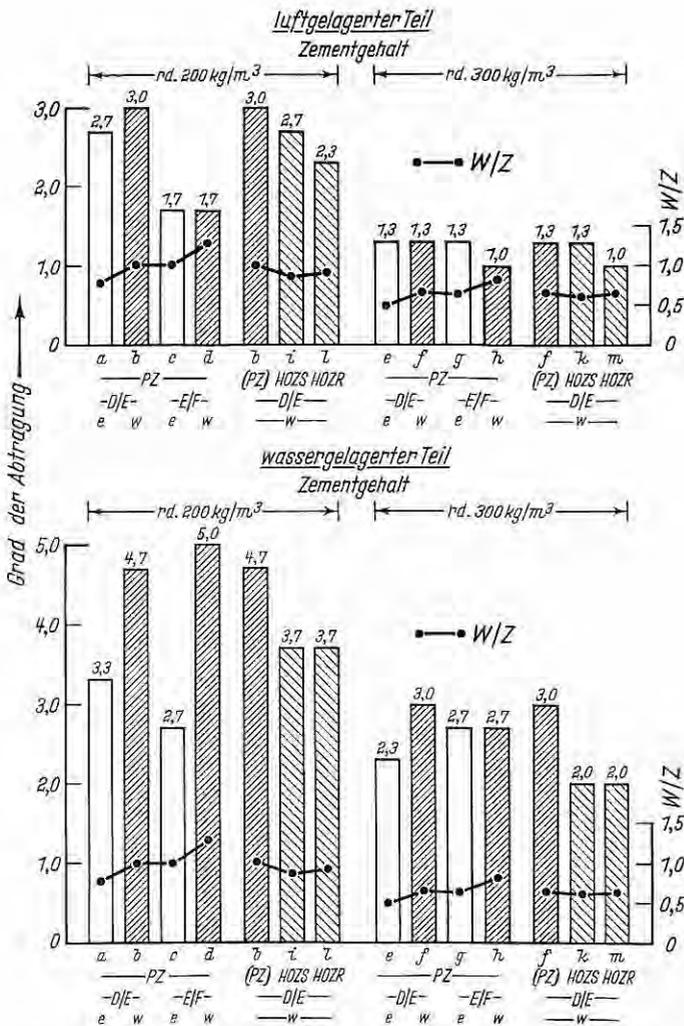


Bild 10 Grade der Abtragung bei den Platten in Partenen (Ordinate links) und Wasserzementwerte (Ordinate rechts); Darstellung oben für den luftgelagerten und unten für den wassergelagerten Teil der Platten

Aus Bild 10 geht allgemein hervor, daß die Abtragung an den luftgelagerten Flächen der Platten – hier vorwiegend von einer Abwitterung herrührend – immer um etwa 1 bis 3 Grade geringer war als auf dem Flächenteil, der vom strömenden Wasser beansprucht worden war. Ein eigentliches Abwittern infolge Gefügelockerung durch Gefrieren, Temperaturwechsel sowie Trocknen und Durchfeuchten hatte im wassergelagerten Teil nicht stattgefunden. Vielmehr ist hier der die Zuschlagkörner verkittende Zementstein durch das rasch strömende, sehr weiche und schwach

saure und kohlen säurehaltige Wasser herausgelöst worden. Ein Sandschliff kann diesen Vorgang noch etwas unterstützt haben.

Im *luftgelagerten Teil* erwiesen sich die Betone mit 300 kg Zement je m^3 und Wasserzementwerten zwischen 0,50 und 0,82 – wie nicht anders zu erwarten war – widerstandsfähiger als die mit 200 kg Zement/ m^3 und Wasserzementwerten zwischen 0,78 und 1,29. Im übrigen unterschieden sich die Betone mit 300 kg Zement/ m^3 mit Abtragungsgraden zwischen 1 und 1,3 nur unbedeutend voneinander; bei ihnen waren lediglich die Zementhaut und der Feinmörtel etwas abgewittert. Aber auch die Betone mit 200 kg Zement/ m^3 wiesen mit Abtragungsgraden bis 3 (siehe Bild 8) wohl eine mehr ins Auge fallende, für den Bestand eines Bauwerks praktisch aber nicht wesentliche Veränderung auf.

Auffallend ist weiter, daß die Betone mit 200 kg Zement je m^3 und dem sandreichen Zuschlaggemisch E/F sich meist günstiger verhielten als die mit einem Zuschlag, dessen Sieblinie D/E im „besonders guten Bereich“ verläuft. Dieser Sachverhalt überrascht, insbesondere weil der Wasserzementwert einer der Mischungen (d; 200 kg Zement je m^3 , weich angemacht) mit 1,29 sehr hoch liegt.

Die Betone aus den beiden Hochofenzementen erwiesen sich, im Vergleich zu den entsprechenden aus Portlandzement, z. T. geringfügig widerstandsfähiger.

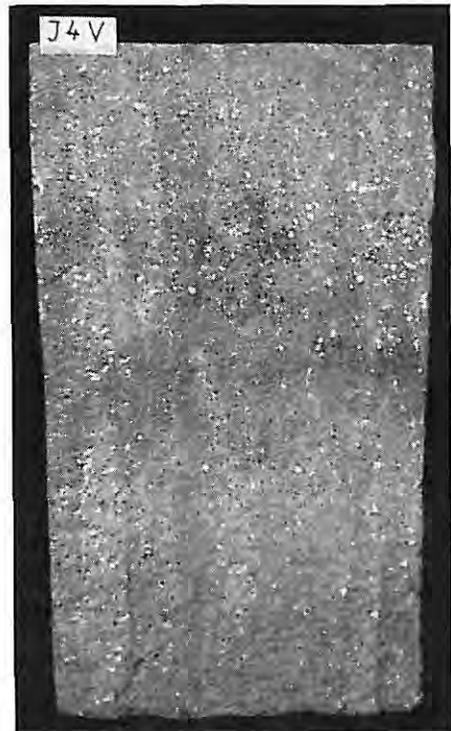


Bild 11
Platte J4v aus
Muschelkalk von
Crailsheim; untere
Hälfte rd. 29 Jahre sehr
weichem, strömendem
Wasser (Illwasser)
ausgesetzt

Im *strömenden, chemisch angreifenden Wasser* war im Durchschnitt die Abtragung bei den Betonen aus 300 kg Zement je m³ mit Wasserzementwerten von 0,50 bis 0,82 naturgemäß geringer als bei jenen mit 200 kg Zement je m³ und Wasserzementwerten von 0,78 bis 1,29. Innerhalb dieser Bereiche ist jedoch eine Abhängigkeit des Abtragungsgrades vom Wasserzementwert nicht immer folgerichtig zu erkennen. Doch erwiesen sich auch die ungünstig zusammengesetzten Mischungen mit dem sandreichen Zuschlaggemisch E/F wieder unerwartet widerstandsfähig; die Abtragung war im Durchschnitt nicht größer als beim Beton mit dem sandärmeren, in der Regel als günstiger zu beurteilenden Zuschlaggemisch D/E.

Die Erosion an den Platten aus Beton mit 300 kg Hochofenzement je m³ war etwas geringer als bei den vergleichbaren Platten aus Portlandzement.

Das starke Angriffsvermögen dieses Gewässers auf Beton wirkte sich entsprechend auch auf die eingesetzten Natursteinplatten aus Kalkgestein aus. Von den Platten aus dem Süßwassertuff waren vom wassergelagerten Teil schon nach 12 Jahren nur noch einige kleinere Stücke vorzufinden, und bei den Platten aus Muschelkalk (Bild 11) war nach 29 Jahren der ursprüngliche Querschnitt 40 · 15 cm des vom Wasser angeströmten Teils auf 38 · 12,5 cm, also allseitig um rd. 1 cm, abgetragen worden.

2.3 Festigkeit des Betons der Platten

Wegen der verhältnismäßig geringen augenscheinlichen Veränderung des luftgelagerten Teils der Platten in Partenen lag die Frage nahe, ob durch eine Festigkeitsprüfung nicht doch noch Indizien für eine weitergehende Veränderung oder Schädigung des Betons erhalten würden. Aus diesem Grunde wurde aus dem luftgelagerten Teil aller Platten je ein Kern rechtwinklig zur Fläche 70 · 40 cm mit einer Diamantkrone in einer der Plattenecken herausgebohrt. Die Bohrkerne mit 10 cm Durchmesser waren entsprechend der Plattendicke 15 cm hoch. Zwei der drei Kerne wurden an beiden Enden um je rd. 2,5 cm gekürzt, so daß nach dem Ebenschleifen der Flächen ein Zylinder von 10 cm Höhe und 10 cm Durchmesser für eine Druckprüfung zur Verfügung stand. Die Druckfestigkeit der 29 Jahre den Witterungseinflüssen ausgesetzten Betone konnte nun mit der früher ermittelten 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit der Betone verglichen werden. Dazu war es jedoch nötig, die zugehörigen Umrechnungsfaktoren zwischen Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit zu ermitteln. Solche Umrechnungsfaktoren sind erfahrungsgemäß abhängig von der Gestalt der Bohrkerne, aber auch von der Achsrichtung des Bohrkerns zur Einfüllrichtung des Betons, von dem Anteil der angeschnittenen größeren Zuschlagkörner am Bohrkernmantel und von der Bohreinwirkung auf dessen Gefüge sowie allgemein von der Festigkeit des Betons. Um möglichst zutreffende Umrechnungsfaktoren einsetzen zu können, wurden diese im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf an gesondert hergestellten Betonen entsprechender Zusammensetzung ermittelt. Es wurden dazu 20-cm-Würfel und gekürzte Bohrkerne 10/10 cm benutzt, die rechtwinklig zur Einfüllrichtung aus anderen, sonst gleich hergestellten Wür-

fein herausgebohrt wurden. Je nach Zusammensetzung und Druckfestigkeit des Betons ergab sich bei der Prüfung im Alter von 2 Monaten die Würfeldruckfestigkeit nach Luftlagerung zum 0,89- bis 1,04fachen der Bohrkern-Druckfestigkeit (Mittel 0,95). Mit den einzelnen Umrechnungsfaktoren wurde dann die Bohrkern-Druckfestigkeit der 29 Jahre alten Plattenbetone auf ihre entsprechende Würfel-Druckfestigkeit $W_{29 \text{ Jahre}}$ umgerechnet. Sie lag zwischen 290 und 849 kp/cm^2 .

In Bild 12 ist die Ausgangs-Würfeldruckfestigkeit W_{28} nach 28 Tagen (Ordinate rechts) und der Verhältniswert $W_{29 \text{ Jahre}} \text{ zu } W_{28 \text{ Tage}}$ aufgetragen (Ordinate links), außerdem der Wasserzementwert. In der linken Hälfte der Darstellung finden sich die Betone mit 200 kg und rechts die mit 300 kg Zement je m^3 , jeweils unterteilt nach Portlandzement und Hochofenzement, nach der Sieblinie des Zuschlaggemisches und der Konsistenz e (etwas nasser als erdfeucht) und w (weich).

Aus Bild 12 ergibt sich eine ganze Reihe bemerkenswerter Beziehungen, die in der Tendenz eindeutig sind und denen die Bohrkern-Druckfestigkeiten von zwei Platten zugrunde liegen, die sich höchstens um $\pm 6\%$ vom Mittelwert unterscheiden, meist jedoch nur um 1 bis 2 $\%$. Als wesentlich ist herauszustellen, daß die Druckfestigkeit des bewitterten Betons im luftgelagerten Platten-teil nach 29 Jahren immer deutlich größer erhalten wurde als nach 28 Tagen, und zwar, je nach Beton, zum 1,70- bis 4,47fachen (Reihe e bzw. l).

Man kann demnach pauschal feststellen, daß die Druckfestigkeit durch die Bewitterung nicht gelitten hat, mindestens nicht im Kern der nur 15 cm dicken Platten. Selbst wenn Betone mit z. T. sehr niedriger Ausgangs-Druckfestigkeit nach 28 Tagen – z. B. unter 100 kp/cm^2 – in der ersten Zeit der Auslagerung durch Frosteinwirkung überhaupt in Mitleidenschaft gezogen worden wären,

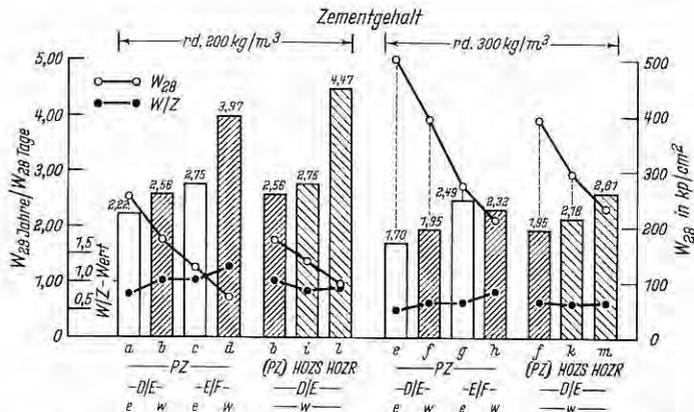


Bild 12 Verhältniswerte der Würfeldruckfestigkeit W nach 29 Jahren und 28 Tagen sowie Wasserzementwert (Ordinate links); Druckfestigkeit W_{28} nach 28 Tagen (Ordinate rechts)

wurde dies durch die weiter fortschreitende Hydratation und Festigkeitsentwicklung mehr als behoben.

Weiter wird erkennbar, daß die Festigkeitsentwicklung bis zum Alter von 29 Jahren um so größer ausfiel, je geringer die Ausgangsdruckfestigkeit W_{28} war. Die Steigerungsrate der Druckfestigkeit war demgemäß beim Beton mit 300 kg Zement je m^3 deutlich geringer als bei dem mit 200 kg Zement je m^3 . Beim Beton mit Hochofenzement war die Festigkeitssteigerung immer und z. T. wesentlich größer als bei sonst gleichem Beton aus Portlandzement.

Schließlich kann man noch für die mehr Varianten aufweisenden Mischungen aus Portlandzement entnehmen, daß die Festigkeit bei hohen Wasserzementwerten relativ stärker anstieg, z. B. wenn der Beton das sandreichere Zuschlaggemisch E/F aufwies oder weich (w) gegenüber nur etwas nasser als erdfeucht (e) hergestellt worden war.

3. Platten mit abgespitzten Flächen und Stahleinlagen

Die Platten mit abgespitzten Flächen und einbetonierten Stahlstäben (Bild 6) sind aus den weich angemachten Mischungen mit 200 bzw. 300 kg Portlandzement je m^3 und mit Rheinkiessand 0/30 mm nach Sieblinie D/E hergestellt worden (Reihen s und t in Tafel 1; Betone wie Reihe b bzw. f). Der Wasserzementwert betrug bei der zementarmen, an sich für üblichen Stahlbeton nicht mehr gängigen Mischung mit nur 200 kg Zement je m^3 Beton 1,00 und bei der Mischung mit 300 kg Zement 0,65.

Die abtragende Wirkung der Witterung und des Wassers war an den abgespitzten Flächen nicht deutlicher als bei den zugehörigen Platten mit ursprünglich schalungsglaten Flächen (siehe Reihen b und f).

Vom Kopfe des luftgelagerten Teils von je zwei Platten wurde ein 20 cm hoher Abschnitt abgesägt. Nach dem Spalten der Abschnitte in der Ebene der Stäbe wurden die kleinsten Überdeckungen der Stahlstäbe an der abgespitzten Vorderseite im Mittel zu 30 mm, 47 mm und 64 mm festgestellt, siehe Bild 13. Die heraus-

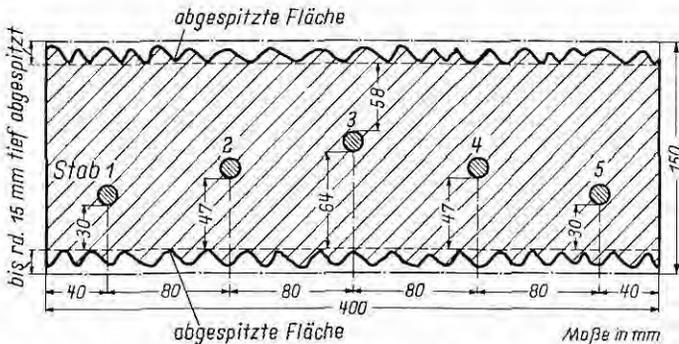


Bild 13 Querschnitt der abgespitzten Betonplatten 70 · 40 · 15 cm und mittlere kleinste Überdeckung der 5 Bewehrungsstäbe

gelösten Stäbe sind anschließend auf Rostbefall untersucht worden, wobei ein 5 cm langes Stabstück, das an der mit Bitumen gestrichenen Stirnfläche begann, von der Beurteilung ausgenommen wurde. Bei augenscheinlicher Untersuchung fielen keine Veränderungen auf, die man als Rostung bezeichnen würde. Erst bei künstlicher Beleuchtung und mit der Lupe waren verstreut kleine Stellen mit einem Durchmesser bis etwa 2 oder 3 mm und hauchähnlicher, dunkelbräunlicher Färbung erkennbar. Im übrigen war auch der Flächenanteil dieser, selbst bei engster Auslegung kaum als „Rostung“ einzustufenden Verfärbungen sehr gering; er nahm insgesamt bei den 4 Stäben 1 und 5 mit der geringsten Überdeckung von 30 mm im Mittel aus beiden Platten nur rd. 0,5 % der Staboberfläche ein. Die „Rostfläche“ war bei den Stäben mit Überdeckungen von 47 und 64 mm eher noch etwas größer, und ein Unterschied im Beton mit 200 und 300 kg Zement je m³ fand sich nicht.

Man kann also allgemein festhalten, daß durch die 29jährige Bewitterung auch im Beton mit nur 200 kg Portlandzement je m³ und einem Wasserzementwert von 1,00 bei nur 30 mm Überdeckung die Bewehrungsstäbe nicht rosteten, obwohl der überdeckende Beton durch die Meißelschläge beim Abspitzen nicht unerheblich beansprucht worden sein dürfte.

An den 5 Spaltflächen eines jeden bewehrten Plattenabschnitts sowie an den 3 Bohrkernen aus dem luftgelagerten Teil der Platten, die aus dem gleichen Beton hergestellt worden waren (Reihe b bzw. f), wurde die Carbonatisierungstiefe mittels Phenolphthalein festgestellt. Für die gleichmäßig verteilten Meßstellen ergab sich die Carbonatisierungstiefe bei den

abgespitzten Platten	Bohrkernen
aus Beton mit 200 kg Zement je m ³ und dem W/Z-Wert von rd. 1,00 im Mittel zu 6 mm (max. 12 mm)	im Mittel zu 3 mm (max. 10 mm)
aus Beton mit 300 kg Zement je m ³ und dem W/Z-Wert von rd. 0,65 im Mittel zu 6 mm (max. 11 mm)	im Mittel zu 2 mm (max. 5 mm)

Bei den mit ursprünglich schalungsglatte Fläche ausgelagerten Platten (Bohrkerne) war demnach die Carbonatisierungstiefe etwas kleiner ausgefallen als an den abgespitzten Flächen. Doch war auch hier die Carbonatisierung beim Beton mit nur 200 kg Zement je m³ und einem Wasserzementwert von 1,00 mit 6 mm im Mittel sehr gering und nicht größer als beim Beton mit 300 kg Zement je m³ und einem Wasserzementwert von 0,65. Dieser Befund erklärt sich daraus, daß der Beton auch im luftgelagerten Teil vermutlich mehr oder weniger stark durchfeuchtet war, was auf den kurzen Abstand zur Wasseroberfläche und auf Spritzwasser zurückzuführen ist.

Für diese Verhältnisse (feuchte Umgebung im Freien, unmittelbar über dem Wasser mit wiederholtem Benetzen der Betonfläche) wäre also mit Überdeckungen von 3,0 cm bis 2,0 cm, die nach DIN 1045 (neu), Tabelle 10, Zeile 3, hierfür mindestens verlangt werden, ausreichend gesichert, daß die Carbonatisierung nicht bis zur Bewehrung vordringt. Da Bewehrungsstahl, der in Beton mit

geschlossenem Gefüge liegt, in der Regel nur im carbonatisierten Bereich rosten kann, ist bei der hier festgestellten äußerst geringen Carbonatisierungstiefe selbst für den zementarmen Beton mit hohem Wasserzementwert die praktisch als rostfrei befundene Staboberfläche erklärlich.

4. Zusammenfassung

4.1 Die Versuchsplatten 70 · 40 · 15 cm aus Beton sehr unterschiedlicher Zusammensetzung standen in Partenen (rd. 1050 m N. N.) rd. 29 Jahre lang mit ihrem unteren Teil in rasch fließendem, sehr weichem Wasser, das zudem einen geringen Gehalt an kalkangreifender Kohlensäure aufwies und schwach sauer war. Der obere, luftgelagerte Teil der Platten über dem Wasserspiegel war der Witterung und dabei ungefähr 650 Wechseln zwischen Gefrieren und Auftauen ausgesetzt.

Die Betonmischungen für die Platten bestanden aus rd. 200 oder 300 kg Zement je m³, Rheinkiessand 0/30 mm mit 50 % oder 70 % Sand 0/7 mm und aus gewöhnlichem Portlandzement oder Hochofenzement. Dadurch und durch die Abstimmung des Frischbetons auf die zwei sehr unterschiedlichen Konsistenzgrade „etwas nasser als erdfeucht“ und „weich“ entstanden Wasserzementwerte von 0,50 bis 1,29. Die Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen fand sich zwischen 73 und 498 kp/cm². Veränderungen an den Platten nach 29jähriger Lagerung im Freien wurden getrennt für den luft- und den wassergelagerten Teil nach Augenschein beurteilt, außerdem wurde an Bohrkernen die Druckfestigkeit des Betons im luftgelagerten Teil ermittelt.

4.2 Der Befund nach Augenschein ergab allgemein, daß die Abtragung durch Witterungseinflüsse im luftgelagerten Teil der Platten wesentlich geringer war als im unteren, vom strömenden Wasser beaufschlagten Teil.

Im luftgelagerten Teil war bei den Platten aus Beton mit 300 kg Zement je m³ lediglich die Zementhaut sowie etwas Feinmörtel abgewittert und bei den Platten mit 200 kg Zement je m³ der Feinmörtel bis rd. 3 mm Tiefe. Risse und Abplatzungen waren nicht festzustellen, so daß diesen Abwitterungen in der Praxis meist keine wesentliche Bedeutung zukommen würde.

Am wassergelagerten Teil verursachte das strömende Wasser eine stärkere Abtragung, die bei den weniger günstig zusammengesetzten Betonen mit Zementgehalten von nur 200 kg/m³ und Wasserzementwerten von 0,78 bis 1,29 das gröbere Korngefüge erreichte. Auf massigere Bauteile bezogen würde diese Abtragung noch keine Gefährdung ihres Bestands bedeuten.

Auffallend war immer das vergleichsweise günstige Verhalten der Mischungen mit dem sandreichen Zuschlaggemisch.

4.3 Die Druckfestigkeit des Betons im luftgelagerten Teil der Platten hatte, verglichen mit der Druckfestigkeit nach 28 Tagen, in keinem Fall gelitten; sie nahm im Gegenteil in den 29 Jahren auf das 1,70- bis 4,47fache zu, und zwar prozentual um so mehr, je kleiner die Ausgangs-Druckfestigkeit des Betons war.

4.4 Die *Stahlstäbe* der bewehrten Platten, die im luftgelagerten Teil mit einer kleinsten Überdeckung von rd. 30 mm unter abge- spitzten Flächen lagen, wiesen praktisch keinen Rost auf. Die Carbonatisierung reichte selbst bei den Platten aus Beton mit 200 kg Portlandzement je m³ und einem Wasserzementwert von 1,00 nur 6 mm tief, weil der Beton in diesem Bereich mehr oder weniger durchfeuchtet war.

4.5 Insgesamt verhielten sich die Platten in Partenen sehr gün- stig, auch solche aus Beton geringer Güte, den man unter diesen Verhältnissen nicht einbauen würde. Vergleicht man hier- mit die Festlegungen in DIN 1045 oder ÖNORM B 4200 für Beton mit hohem Frostwiderstand und für den Rostschutz der Beweh- rung, so ist festzustellen, daß diese Festlegungen auch für Ver- hältnisse wie hier in Partenen auf der sicheren Seite liegen.

Zum Beispiel wird in DIN 1045 im Regelfall für Beton mit hohem Frostwiderstand, der keine künstlichen Luftporen enthält, der Wasserzementwert nach oben mit 0,60 begrenzt, oder bei Stahl- beton darf wegen des Rostschutzes in keinem Fall der Wasser- zementwert größer als 0,75 und der Zementgehalt kleiner als 240 kg/m³ sein.

Davon soll nun nicht abgeleitet werden, daß diese Bedingungen für die Betonzusammensetzung unangemessen hoch angesetzt sind. Denn es muß beachtet werden, daß es sich bei den aus- gelagerten Platten um sehr sorgfältig und gleichmäßig hergestell- te Erzeugnisse aus dem Laboratorium handelt. Demgegenüber müssen die Festlegungen für den Beton von Bauwerken in Anbe- tracht der weniger beherrschbaren Baustellenverhältnisse ein- gemessenes „Vorhaltemaß“ einschließen.

4.6 Um die Ursache für das günstige Verhalten der Betone gerin- ger Güte zu klären, sind über die hier nur phänomenologisch wiedergegebenen Feststellungen hinaus weitere Untersuchungen nötig, z. B. über die Art des Porengefüges und die Porengröße. Die im ersten Bericht²⁾ wiedergegebenen Kennwerte für die Was- seraufnahme, den Porenraum und den Sättigungswert der Betone reichen zusammen mit ihrem Wasserzementwert und der Festig- keit für eine Erklärung noch nicht aus.