

Vergleichende amerikanische Untersuchungen über 4 Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung an Beton^{*)}

Deutsche Bearbeitung, insbesondere im Hinblick auf den Einfluß künstlicher Luftporen, von Axel Schäfer, Düsseldorf

Übersicht

Der Widerstand des Betons gegen häufige Frost-Tau-Wechsel kann im Laboratorium mit verschiedenen Verfahren geprüft werden. Der Wert der einzelnen Verfahren ist umstritten, weil der Vergleich mit dem Verhalten unter natürlichen Verhältnissen, die Einhaltung gleicher Versuchsbedingungen in verschiedenen Laboratorien und der Vergleich der Prüfergebnisse untereinander schwierig sind.

Das Highway Research Board veranlaßte daher 1953 an 13 amerikanischen Laboratorien Gemeinschaftsuntersuchungen, um ein gut reproduzierbares Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung festzulegen, mit dem verschiedene Betone nach ihrem Widerstand gegen natürliche Bewitterung beurteilt werden können. Es wurden die Ergebnisse verschiedener Verfahren untereinander und zum Teil auch mit den Feststellungen mikroskopischer Untersuchungen über die im Beton vorhandenen Luftporen verglichen.

Mit den Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen konnte man im allgemeinen unterschiedliche Betone hinsichtlich ihres Widerstandes einordnen. Die absoluten Ergebnisse verschiedener Verfahren und verschiedener Laboratorien waren allerdings sehr unterschiedlich, weil die Verfahren verschiedenartig beansprucht und weil die Laboratorien die Prüfbedingungen nicht immer ausreichend gleich einhalten konnten.

Die Luftporen-Kennwerte ließen nur eine Unterscheidung des Frostwiderstandes von Betonen mit gleichem Zuschlag zu. Trotz starker Streuungen, die u. a. auf Unterschiede in der Herstellung der Betone zurückgeführt wurden, konnten in etwa Beziehungen zwischen einzelnen Luftporen-Kennwerten untereinander und zum Verhalten der Betone bei Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen gefunden werden.

1. Einleitung

Das „Highway Research Board Committee on Durability of Concrete – Physical Aspects“ [1] beauftragte 1953 13 Laboratorien, jeweils alle oder nur einen Teil der folgenden 4 Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung an drei von ihm festgelegten Betonen mit unterschiedlichem Luftgehalt, Zuschlag und Wasserzementwert durchzuführen und die damit erhaltenen

^{*)} Report on cooperative freezing-and-thawing tests of concrete. Highway Research Board, Spec. Rep. 47, Washington 1959, 67 S.

Beständigkeitsfaktoren (siehe unten) zu vergleichen. Ein Laboratorium stellte zusätzlich nach dem „Linear-Traversal“-Verfahren¹⁾ Luftporen-Kennwerte (Luftgehalt, spezifische Oberfläche, Anzahl der Poren je Längen- und Raumeinheit²⁾, Zementleim-Luft-Verhältnis und Abstandsfaktor³⁾) mikroskopisch fest. Es sollte hierdurch festgestellt werden, ob Beziehungen der Luftporen-Kennwerte untereinander und zu den Ergebnissen der Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen bestehen. Ähnliche Untersuchungen führten in den letzten Jahren u. a. auch T. C. Powers [3, 4], J. E. Backstrom, R. W. Burrows, R. C. Mielenz und V. E. Wolkodoff [5, 6] und F. K. Fears [7] mit zum Teil gleichen Ergebnissen durch; sie fanden im allgemeinen, daß der Frostwiderstand von Beton mit Ansteigen des Luftgehaltes, der spezifischen Oberfläche und der Anzahl der Poren je cm Meßlinie und mit Abnehmen des Abstandsfaktors verbessert wird.

2. ASTM-Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung

Der Widerstand des Betons gegen Frost-Tau-Wechsel im Laboratorium wird oft als Maß für den Widerstand gegen Witterungseinflüsse, vor allem Frost, in der Natur angesehen. Man nimmt an, daß sich Betone unter dem Einfluß großer klimatischer Schwankungen besser verhalten werden, wenn sie die – zweifellos scharf wirkende – Kurzprüfung der Frost-Tau-Wechsel besser überstehen, als solche Betone, die dabei Frostschäden erleiden. Diese Folgerung wurde durch sogenannte „Langzeit-Versuche“ zum großen Teil bestätigt [8, 9, 10].

Die „American Society for Testing Materials“ (ASTM) hat 4 vorläufige Normen zur Durchführung von Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen für Beton herausgegeben:

- C 290–52 T⁴⁾ Tentative method of test for resistance of concrete specimens to rapid freezing and thawing in water.
- C 291–52 T Tentative method of test for resistance of concrete specimens to rapid freezing in air and thawing in water.
- C 292–52 T Tentative method of test for resistance of concrete specimens to slow freezing and thawing in water or brine.
- C 310–52 T Tentative method of test for resistance of concrete specimens to slow freezing in air and thawing in water.

¹⁾ An parallelen, über die Schlifffläche gelegten Geraden („Meßlinien“) werden die Anzahl und die Summe der Porensehnen und die Summe der Feststoffstrecken bestimmt; siehe dazu ASTM C 457 — 60 T.

²⁾ Die Verteilung der Porensehnen nach ihrer Größe („Sehnen-Klassierung“) wird festgestellt und daraus nach dem Verfahren von G. W. Lord und T. F. Willis [2] die Anzahl der Luftporen je cm³ Zementstein und je cm³ Beton berechnet.

³⁾ Zur Berechnung des Abstandsfaktors dient der Abstand eines von den Rändern der nächstliegenden Luftporen am weitesten entfernten Punktes in jedem Bereich des Zementsteins. Der Abstandsfaktor ist annähernd der gemittelte Wert aller derartigen Abstände.

⁴⁾ Die Ausgaben „61 T“ sind demgegenüber nur geringfügig abgeändert worden.

Die Prüfverfahren unterscheiden sich hauptsächlich darin, daß Betonprismen (Breite und Höhe zwischen 8 und 13 cm und Länge zwischen 36 und 41 cm) entweder in Luft oder in Wasser, entweder langsam (max. in 24 h) oder schnell (max. in 3 h) bei jeweils $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ gefroren werden. Daher werden im folgenden nachstehende Abkürzungen benutzt:

- C 290: Schnell-Wasser (SW)
- C 291: Schnell-Luft (SL)
- C 292: Langsam-Wasser (LW)
- C 310: Langsam-Luft (LL)

An den Prismen werden der dynamische E-Modul und dessen Veränderung bei zunehmender Zahl der Frost-Tau-Wechsel (z. B. nach ASTM C 215 mittels der Resonanzfrequenz von Transversalwellen) bestimmt. In den 4 Normen wird daraus ein „Beständigkeitsfaktor“ BF („durability factor“) abgeleitet:

$$\text{BF} = \frac{P \cdot N}{M} (\%)$$

Hierbei sind:

- P = relativer dynamischer E-Modul nach N Wechseln in % des dynamischen E-Moduls bei Versuchsbeginn ohne Frosteinwirkung,
- M = vorgesehene Anzahl der Wechsel (bei diesen Untersuchungen 300),
- N = Anzahl der Wechsel, nach denen P auf einen bestimmten Prozentanteil (hier 60 %) abgesunken ist; der Versuch wird dann abgebrochen. Unterschreitet P diesen Prozentsatz nicht, so ist N gleich der vorgesehenen Zahl M der Wechsel.

Es soll hier dabei offen gelassen werden, ob die Biegefestigkeit und deren Veränderung bei zunehmender Zahl der Frost-Tau-Wechsel nicht bessere Kennwerte für den Frostwiderstand des Betons liefern (siehe dazu in [11] Bilder 3 und 11). Gegenüber der zerstörungsfreien Bestimmung des dynamischen E-Moduls hat ein solches Prüfverfahren versuchstechnisch jedoch den Nachteil, daß sehr viele Prüfkörper erforderlich sind.

3. Betone

Allen drei Betonen war gemeinsam:

Portland-Zement der Type I (gewöhnlicher Zement);

Zementgehalt rd. 310 kg/m^3 ;

LP-Zusatzmittel in einer für den festgelegten Luftgehalt erforderlichen, veränderlichen Menge;

Zuschlaggemisch 0/25 mm, in allen Fällen mit quarzhaltigem Sand bis rd. 5 mm;

Konsistenz: Setzmaß 5 bis 7,5 cm, das entspricht einem Ausbreitmaß nach DIN 1048 von etwa 42 bis 48 cm;

Verdichtung (Stampfen) und Nachbehandlung (12 Tage Wasserlagerung).

Unterschiedliche Merkmale der Betone:

Beton HG: Hoher Luftgehalt (6 bis 7 %); „guter“ Frostwiderstand des Grobzuschlags (quarzhaltiger Kies); Wassermenge 0,47.

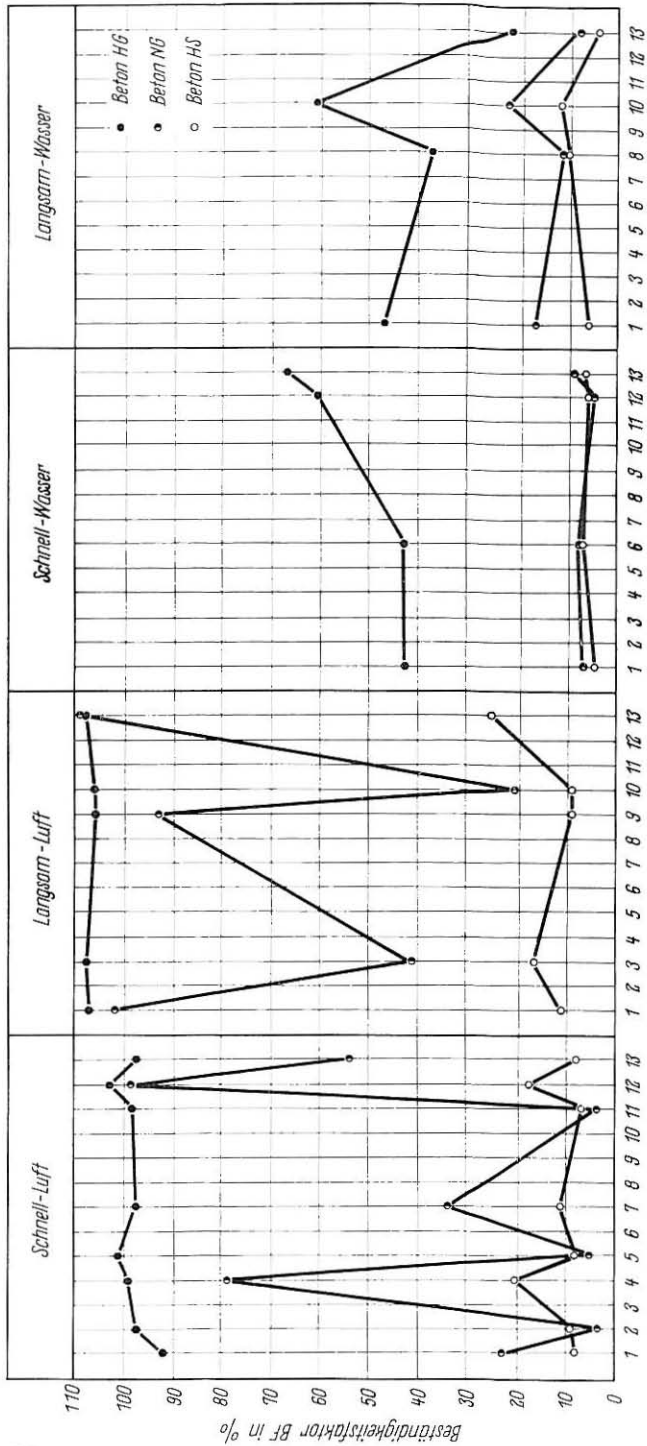


Bild 1 Beständigkeitsfaktor BF, ermittelt durch 4 Verfahren in 13 Laboratorien (aufgezeichnet nach Werten aus [1])
L a b o r a t o r i e n

Beton NG: Niedriger Luftgehalt (2,5 bis 3‰); „guter“ Frostwiderstand des Grobzuschlags (quarzhaltiger Kies), Wasserzementwert 0,52.

Beton HS: Hoher Luftgehalt (6 bis 7‰); „schlechter“ Frostwiderstand des Grobzuschlags (weicher, feinporiger, geschichteter, dolomitischer, toniger Kalkstein); Wasserzementwert 0,61.

4. Vergleich der Beständigkeitsfaktoren BF

Die 13 Laboratorien prüften die drei Betone zum Teil mit allen 4 Verfahren. Jeder Beton wurde daher insgesamt 21mal auf seinen Frostwiderstand geprüft. Die Ergebnisse sind in den Bildern 1 und 2 dargestellt.

Beton HG erreichte bei allen Verfahren in den einzelnen Laboratorien – außer beim Langsam-Luft-Verfahren im Laboratorium 13 – jeweils den höchsten Beständigkeitsfaktor. HS hatte bei 17 Anwendungen und NG bei 4 Anwendungen den kleinsten Beständigkeitsfaktor. Der Beständigkeitsfaktor nahm demnach mit den 4 Verfahren im großen und ganzen in der Reihenfolge der Betone HG – NG – HS ab. Mit den beiden Luft-Verfahren wurde dabei zwischen dem Frostwiderstand des Betons HG und demjenigen des Betons HS ein besonders großer Unterschied festgestellt, während mit den beiden Wasser-Verfahren der Frostwiderstand aller drei Betone in einen nur etwa halb so großen Bereich eingeordnet werden konnte. Die Beständigkeitsfaktoren des Betons NG streuten bei den beiden Luft-Verfahren außerordentlich stark; dies wurde zum Teil auf Unterschiede in der Herstellung (siehe unten) zurückgeführt. Es ist jedoch auch möglich, daß die Beständigkeitsfaktoren dieses Betons besonders stark von Unterschieden in den Prüfbedingungen (siehe unten) beeinflußt wurden, weil Beton NG etwa in der Mitte zwischen hohem und niedrigem Frostwiderstand lag und daher auf kleinere Einflüsse stärker ansprach. Die Abnahme in der Reihenfolge HG – NG – HS geht auch aus Tafel 1, Zeilen 1 bis 4, hervor, wenn man die Mittelwerte der Beständigkeitsfaktoren der verschiedenen Betone nach dem gleichen Verfahren vergleicht.

Betrachtet man die verschiedenen Verfahren, angewendet auf jeweils den gleichen Beton (wie in Bild 2 dargestellt), so ergab das Langsam-Luft-Verfahren im Mittel den höchsten Beständigkeitsfaktor; es folgt das Schnell-Luft-Verfahren (mit besonders großem Abstand bei Beton NG), weiterhin das Langsam-Wasser-Verfahren und mit fast ebenso kleinem Beständigkeitsfaktor das Schnell-Wasser-Verfahren (mit Ausnahme von Beton HG, bei dem die beiden letzten Verfahren im Durchschnitt umgekehrt wirkten). Im großen und ganzen war also die Schädigung am geringsten durch das Langsam-Luft-Verfahren und am stärksten durch das Schnell-Wasser-Verfahren. Verglichen mit dem am häufigsten (in 8 Laboratorien) durchgeführten Schnell-Luft-Verfahren, das in Abwandlung auch in Deutschland oft angewendet wird [u. a. 12, 13], erzielten die beiden Wasser-Verfahren 0,2- bis 0,8mal so große und das Langsam-Luft-Verfahren 1,1- bis 2,0mal so große Beständigkeitsfaktoren.

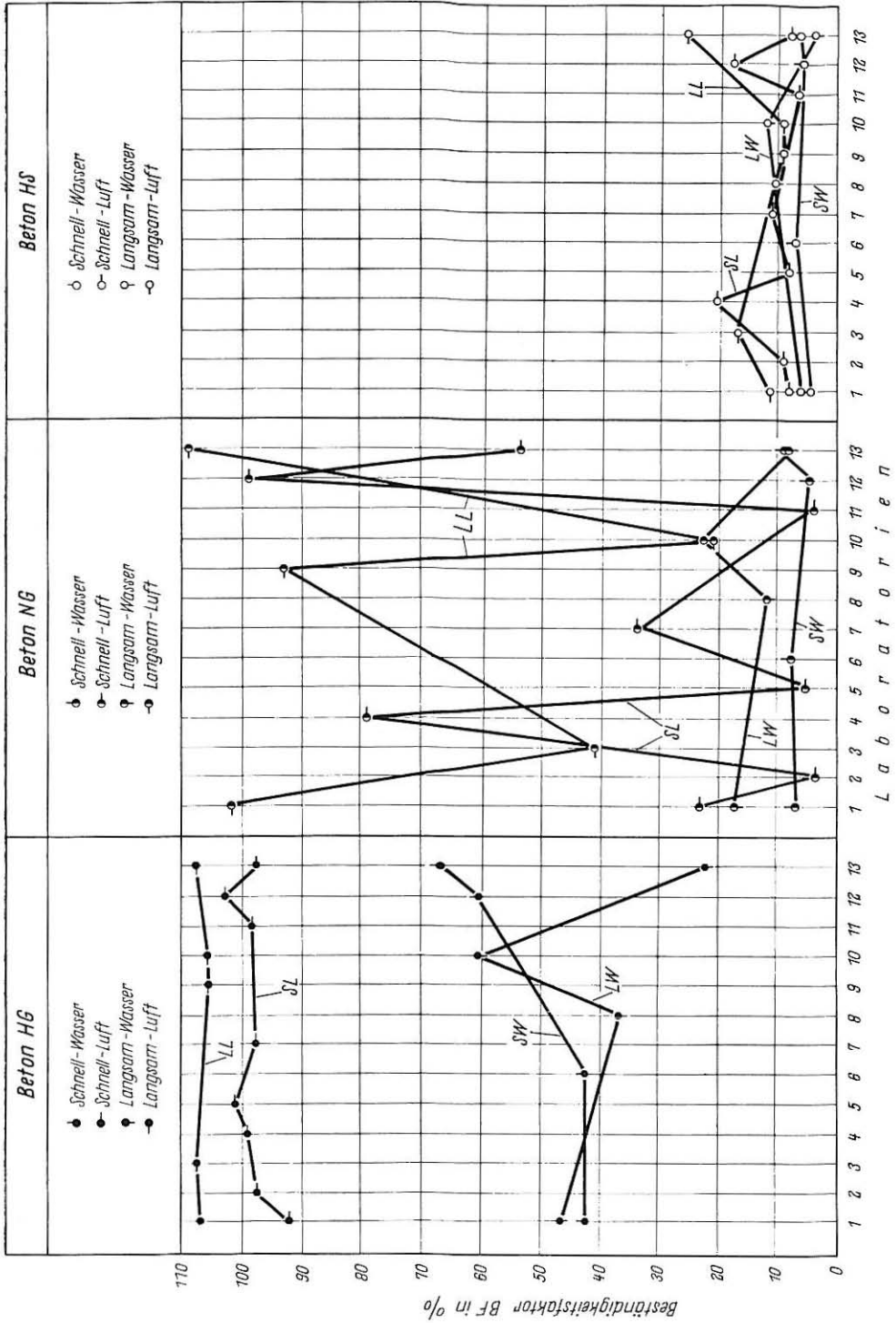


Bild 2 Beständigkeitsfaktor BF verschiedener Betone (aufgezeichnet nach Werten aus [1])

Die großen Unterschiede in der Wirkung der 4 Frost-Prüfverfahren, ausgedrückt durch den Beständigkeitsfaktor der sich entsprechenden Betone, werden zurückgeführt auf Verschiedenheiten in:

1. der Frost-Tau-Beanspruchung, wie sie durch die 4 verschiedenen Verfahren bedingt sind. (Der Wärmeübergang ist bei Wasserlagerung wesentlich größer als bei Luftlagerung. Dadurch treten vor allem beim Schnell-Wasser-Verfahren ein sehr großes Temperaturgefälle und damit Eigenspannungen auf, die sich mit der sprengenden Wirkung des Eises überlagern);

2. der Frost-Tau-Beanspruchung des gleichen Verfahrens, das aber den 13 Laboratorien noch Unterschiede in der Durchführung gestattete. (Z. B. sind beim Schnell-Luft- und Langsam-Luft-Verfahren die relative Luftfeuchtigkeit im Frostschränk, die Geschwindigkeit der Luftbewegung und die Lage der Prismen im Frostschränk in der Norm nicht vorgeschrieben. Dadurch trockneten beim Gefrieren in Luft die Prismen verschieden stark aus; die Streuung war hier besonders groß. Beim Gefrieren in Wasser war die Sättigung – besonders bei Beton HS und NG – gleichmäßiger. – Unterschiede im zeitlichen Ablauf der einzelnen Wechsel, der Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit – soweit diese im festgelegten Bereich lagen – hatten keinen hervortretenden Einfluß);

3. der Herstellung der Betone in den Laboratorien. (Bei entsprechenden Betonen – besonders bei NG – wurden verschiedene Rohdichten festgestellt, obwohl die Herstellungsbedingungen weitgehend aufeinander abgestimmt wurden; unterschiedlich waren z. B. Herstellungs- und Mischtemperaturen und die Mischmaschinen. Bei NG wurde mit fallender Rohdichte ein Steigen des Luftgehalts und damit des Beständigkeitsfaktors beobachtet. Diese drei Bestimmungen wurden allerdings – zur Vermeidung der in Abschnitt 5 genannten Unsicherheiten – an ein und denselben Prismen durchgeführt, der Luftgehalt also an Schliffen von befrostedem Beton festgestellt);

4. der Herstellung der 9 Prismen je Prüfverfahren innerhalb jedes Laboratoriums, da immer nur 3 Prismen aus einer Mischung angefertigt wurden.

Die kleinsten Unterschiede der Beständigkeitsfaktoren der einzelnen Betone zwischen den einzelnen Laboratorien erhielt man

bei Beton HS und NG durch das Schnell-Wasser-Verfahren, das allerdings – infolge der „Schärfe“ dieses Verfahrens – für beide Betone nur Beständigkeitsfaktoren unter 10 % ergab und keine größeren Unterschiede dieser zwei Betone herausstellte, und

bei Beton HG durch das Schnell-Luft- und Langsam-Luft-Verfahren, die so wenig angriffen, daß sehr guter Beton praktisch nicht geschädigt wurde.

5. Luftporen-Kennwerte

Für die mikroskopischen Untersuchungen fertigte jedes Laboratorium je Beton zusätzlich nur ein Prisma an, das für alle Prismen dieses Betons kennzeichnend sein sollte. Die Versuchs-

Tafel 1 Mittelwert des Beständigkeitsfaktors BF und Luftporen-Kennwerte (Grenzen aus 13 Einzelwerten)

		Beton HG	Beton NG	Beton HS	
1	Beständigkeitsfaktor BF (Mittelwert)	Schnell-Wasser (4) *)	52 %	7 %	6 %
2		Schnell-Luft (8) *)	98 %	37 %	10 %
3		Langs.-Wasser (4) *)	41 %	15 %	8 %
4		Langs.-Luft (5) *)	106 %	73 %	13 %
5	Luftgehalt im Frischbeton (Druckverfahren)	%	6,3 bis 7,1	2,2 bis 3,0	6,3 bis 7,1
6	Luftgehalt im erhärt. Beton (mikroskopisch)	%	4,3 bis 6,8	1,6 bis 2,9	4,4 bis 7,8
7	Anzahl der Luftporen je cm Meßlinie	$\frac{1}{\text{cm}}$	4,9 bis 8,7	0,7 bis 1,7	5,4 bis 8,9
8	Spezifische Oberfläche der Luftporen	$\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$	410 bis 570	130 bis 290	420 bis 600
9	Zementleim-Luft-Verhältnis	—	5,6 bis 3,4	15,4 bis 8,7	5,7 bis 3,1
10	Abstandsfaktor der Luftporen	mm	0,11 bis 0,07	0,53 bis 0,23	0,11 bis 0,07
11	Anzahl der Luftporen je cm ³ Beton	$\frac{10^4}{\text{cm}^3}$	22 bis 56	1 bis 6	21 bis 50
12	Anzahl der Luftporen je cm ³ Zementstein	$\frac{10^4}{\text{cm}^3}$	75 bis 190	2 bis 22	78 bis 170

*) Einklammer ist die Anzahl der Laboratorien, die das Prüfverfahren jeweils anwendeten und aus deren Ergebnis der Mittelwert gebildet wurde

prismen stammten aber je nach Anzahl der durchgeführten Frost-Tau-Wechsel-Verfahren aus einer der 3 bis 12 Herstellungen, die in Luftgehalt und Konsistenz nicht genau gleich ausfielen. Streuungen in den folgend herausgestellten Beziehungen sind also dadurch z. T. erklärlich, zumal einige Luftporen-Kennwerte bei Beton NG ausnahmsweise jeweils als Mittel an 9 befestigten Prismen bestimmt und dadurch verändert wurden (vergrößert oder verkleinert im Vergleich zum nicht befestigten Beton).

5.1 Beziehung zwischen den verschiedenen Luftporen-Kennwerten untereinander

In Tafel 1, Zeilen 5 bis 12, sind die Luftporen-Kennwerte als Grenzen von 13 Einzelwerten angegeben. Die Kennwerte wurden mit Ausnahme des „Luftgehaltes im Frischbeton“ von einer Stelle (Portland Cement Association) an dem einen Prisma mikroskopisch bestimmt. Bei der Untersuchung wurden alle Poren ab rd. 0,01 mm Durchmesser erfaßt.

Die Luftgehalte der Frischbetone (nach dem Druck-Ausgleichsverfahren ermittelt) waren rd. 20 % größer als die am erhärteten durch Handstampfung verdichteten Beton mikroskopisch ermittelten Luftgehalte. (Bei A. Klein, D. Pirtz, M. Polivka [14] war der Luftgehalt von Frischbeton rd. 15 % größer als der Festbetonluftgehalt, wenn eine Dichtraumrechnung und rd. 10 % kleiner, wenn ein Sättigungsverfahren angewendet wurde.) Zunehmender Luftgehalt des Frischbetons hatte auch eine Erhöhung des Luftgehaltes im erhärteten Beton zur Folge. Weiterhin nahmen damit zu: die spezifische Oberfläche der Luftporen (die folglich kleiner wurden), die Anzahl der Luftporen je cm Meßlinie, je cm³ Beton und je cm³ Zementstein.

Andererseits wurden mit zunehmendem Luftgehalt das Zementleim-Luft-Verhältnis und der Abstandsfaktor der Luftporen kleiner (weil bei der Berechnung die Zementleimmenge durch den Luftgehalt bzw. durch die Anzahl der Poren je cm Meßlinie dividiert wird). Der Abstandsfaktor lag bei einer Porenzahl von 0,7 bis 1,7 je cm Meßlinie und bei einem Luftgehalt von rd. 1,5 bis 3 % im großen Bereich zwischen 0,53 und 0,23 mm (Beton NG) und bei einer Porenzahl von rd. 5 bis 9 je cm Meßlinie und einem Luftgehalt von rd. 4 bis 8 % zwischen nur 0,11 und 0,07 mm (Beton HG und HS).

Qualitativ stehen die Luftporen-Kennwerte also untereinander in Beziehung; eine quantitative Angabe ist jedoch hier wegen der stark streuenden Einzelwerte nicht möglich.

5.2 Beziehung zwischen Luftporen-Kennwerten und Beständigkeitsfaktoren

Die Luftporen-Kennwerte der Betone HG und HS waren sehr ähnlich, obwohl die Beständigkeitsfaktoren nach allen 4 Frost-Tau-Wechsel-Verfahren von HG sehr viel größer als von HS waren (siehe Tafel 1). Der Grund für diese scheinbare Unzulänglichkeit der Luftporen-Kennwerte zur Beurteilung des Frostwiderstandes liegt darin, daß Beton HS Zuschlag mit geringem Frostwiderstand enthielt und daß die Eigenschaften des Zuschlags nicht in die Luftporen-Kennwerte eingehen. Voraussetzung für einen frostwiderstandsfähigen Beton ist ein frostwiderstandsfähiger Zementstein mit entsprechenden Luftporen-Kennwerten und ein frostwiderstandsfähiger Zuschlag, so daß Luftporen-Kennwerte auch nur bei frostwiderstandsfähigem Zuschlag als alleiniges Kriterium herangezogen werden können. (Alle nicht oder nur schwach saugenden Gesteine liefern praktisch frostwiderstandsfähigen Zuschlag.)

Das zweite, unterscheidende Merkmal dieser Betone, der Wasserelementwert (HG = 0,47, HS = 0,61), hat die Luftporen-Kennwerte

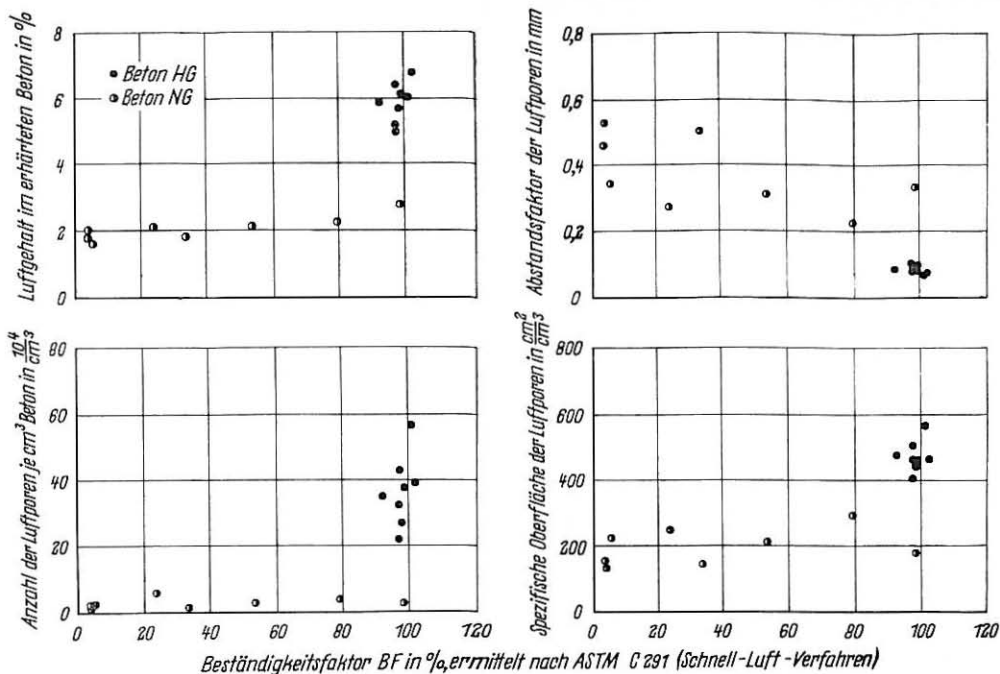


Bild 3 Beziehung zwischen Luftporen-Kennwerten und Beständigkeitsfaktoren der Betone HG und NG (aufgezeichnet nach Werten aus [1])

wenig beeinflusst. (Der größere Wassorzementwert führte im erhärteten Beton HS zu einem etwas größeren Luftgehalt und einer Vergrößerung der Anzahl der Luftporen je cm Meßlinie.)

Vergleicht man in Tafel 1 nur die Betone mit gleichem, frostwiderstandsfähigem Zuschlag, so zeigen sowohl die mittleren Beständigkeitsfaktoren als auch alle Luftporen-Kennwerte wesentlich günstigeren Frostwiderstand des Betons HG gegenüber NG an. Das bedeutet, daß der Widerstand dieser Betone mit frostwiderstandsfähigem Zuschlag durch die Luftporen-Kennwerte beurteilt werden kann, unter der Voraussetzung, daß Mittel aus vielen Einzelwerten zugrunde gelegt werden.

In Bild 3 wurden die Beständigkeitsfaktoren, die bei dem am häufigsten durchgeführten Schnell-Luft-Verfahren erhalten wurden, in Beziehung zu 4 Luftporen-Kennwerten der Betone HG und NG gesetzt. Innerhalb der Kennwerte für Beton HG oder innerhalb der Werte für NG sind Gesetzmäßigkeiten, wie z. B. Ansteigen des Beständigkeitsfaktors mit Zunehmen des Luftgehaltes, der Anzahl der Luftporen je cm³ Beton und der spezifischen Oberfläche der Poren – bei Abnehmen des Abstands-faktors – kaum vorhanden. Zieht man jedoch beide Betone in die Betrachtung ein, so sind diese Zusammenhänge qualitativ zu erkennen. Die Beziehungen der Beständigkeitsfaktoren, die nach den anderen drei Verfahren festgestellt wurden, zu den Luftporen-Kennwerten, sind in der Tendenz ähnlich, doch ebenfalls stark streuend.

Die Unsicherheit in der Aussage wird zum großen Teil durch das starke Streuen der nach den beiden Luftverfahren bestimmten Beständigkeitsfaktoren des Betons NG hervorgerufen. Dagegen hatte Beton HG weniger streuende und nach allen 4 Frost-Tau-Wechsel-Verfahren im Mittel die größten Beständigkeitsfaktoren, so daß hoher Frostwiderstand angenommen werden kann, der im Falle des Betons HG durch folgende Luftporen-Kennwerte ausgedrückt wird:

Luftgehalt im Frischbeton: mindestens rd. 6 %

Luftgehalt im erhärteten Beton: mindestens rd. 5 %

Anzahl der Luftporen je cm Meßlinie: mindestens 5 Poren/cm

Spezifische Oberfläche der Luftporen: mindestens rd. 400 cm²/cm³

Abstandsfaktor der Luftporen: höchstens rd. 0,1 mm

Anzahl der Luftporen im Beton: mindestens rd. 20 · 10⁴/cm³

Anzahl der Luftporen im Zementstein: mindestens rd. 70 · 10⁴/cm³.

6. Zusammenfassung

In 13 Laboratorien wurde der Frostwiderstand von drei Betonen mit verschiedenen Luftgehalten, Zuschlägen und Wassermenge nach 4 ASTM-Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung untersucht. Die Luftporen-Kennwerte der Betone wurden mikroskopisch festgestellt.

6.1 Aus den Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen wurden Beständigkeitsfaktoren errechnet, die nach den einzelnen Verfahren meistens die gleiche Reihenfolge des Frostwiderstandes der drei Betone ergaben. In den ASTM-Verfahren wird mittels dynamischem E-Modul geprüft; nicht untersucht wurde, ob durch die Biegeprüfung eine andere Bewertung erhalten worden wäre.

6.2 Die Beständigkeitsfaktoren der verschiedenen Betone zeigten bei Prüfung nach ASTM C 291 und C 310 (Luft-Verfahren) größere Unterschiede des Frostwiderstandes der Betone an als bei Prüfung nach ASTM C 290 und C 292 (Wasser-Verfahren).

6.3 Die Beständigkeitsfaktoren der einzelnen Betone waren im allgemeinen nach ASTM C 310 (Langsam-Luft) am größten; es folgten C 291 (Schnell-Luft), C 292 (Langsam-Wasser) und C 290 (Schnell-Wasser). Gefrieren in Luft hatte also schwächere Wirkung als Gefrieren in Wasser.

6.4 Sehr große Streuungen innerhalb eines Laboratoriums und zwischen den einzelnen Laboratorien wurden durch nicht ausreichend eingegrenzte Prüfbedingungen der Normverfahren und daher – beim Gefrieren in Luft – vor allem durch verschieden starkes Austrocknen der Proben verursacht, ferner durch getrennte Herstellung der zu vergleichenden Prismen.

6.5 Mikroskopisch wurden Luftgehalt, spezifische Oberfläche und Abstandsfaktor der Luftporen, Anzahl der Poren je Längen- und Raumeinheit und Zementleim-Luft-Verhältnis festgestellt. In Annäherung konnten Beziehungen zwischen diesen Luftporen-Kennwerten – trotz großer Streuungen infolge Verschiedenheiten in der Herstellung (Rohdichte) zwischen einzelnen Laboratorien – aufgezeigt werden.

6.6 Qualitative Beziehungen zwischen Beständigkeitsfaktoren und Luftporen-Kennwerten von Betonen mit gleichen Zuschlägen wurden aufgestellt. Ein Beton mit nicht frostwiderstandsfähigem Zuschlag lieferte trotz günstiger Luftporen-Kennwerte sehr kleine Beständigkeitsfaktoren. Dies bestätigt die bekannte Tatsache, daß Zementstein, der hier durch Luftporen frostwiderstandsfähig gemacht wurde, einen Beton mit nicht widerstandsfähigem Zuschlag gegen Frostschäden nicht schützen kann.

SCHRIFTTUM :

- [1] Highway Research Board: Report on cooperative freezing-and-thawing tests of concrete. Spec. Rep. 47, Washington 1959, 67 S.
- [2] Lord, G. W., and T. F. Willis: Calculation of air bubble size distribution from results of a Rosiwal traverse of aerated concrete. Amer. Soc. Test. Mat.-Bull. 177 (1951) S. 56/61.
- [3] Powers, T. C.: The air requirement of frost-resistant concrete. Proc. Highw. Res. Board 29 (1949) S. 184/202.
- [4] Powers, T. C.: Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 50 (1954) S. 741/760.
- [5] Backstrom, J. E., R. W. Burrows, R. C. Mielenz and V. E. Wolkodoff: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 2 — Influence of type and amount of air-entraining agent. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 261/273.
- [6] Mielenz, R. C., V. E. Wolkodoff, J. E. Backstrom and R. W. Burrows: Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 4 — The air void system in job concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 507/517.
- [7] Fears, F. K.: Correlation between concrete durability and air-void characteristics. Highw. Res. Board, Bull. 196 (1958) S. 17/28.
- [8] Walz, K.: Witterungsbeständigkeit von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 127. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1957, 32 S.
- [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. Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1955/56) S. 159/193.
- [10] Kennedy, Th. B., and K. Malher: Correlation between laboratory accelerated freezing and thawing and weathering at Treat Island, Maine. Proc. Amer. Concr. Inst. 51 (1954) S. 141/151.
- [11] Walz, K., und G. Weil: Feststellungen über den Einfluß luftporenbildender Zusatzmittel auf die Festigkeit und die dynamische Elastizitätszahl von Beton bei Frostwechseln. Der Bauingenieur 30 (1955) H. 1, S. 15/20.
- [12] Walz, K.: Über den Einfluß des Zements auf den Widerstand des Betons gegen häufiges Durchfrieren. beton 10 (1960) S. 164/169; ebenso Betontechnische Berichte 1960. Beton-Verlag, Düsseldorf 1961, S. 9/22.
- [13] Prüfrichtlinien für Betonzusatzmittel, Fassung 1958 mit Änderungen 1960. Betonsteinzeitung 10 (1960) S. 424/431.
- [14] Klein, A., D. Pirtz and M. Polivka: Exploratory tests to develop a method for determining the air content of hardened concrete. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 50 (1950) S. 1283/1286.