

Bemerkungen zum Abstandsfaktor als Kennwert für den Frostwiderstand von Beton

Von Wilhelm Manns, Düsseldorf

Übersicht

Zur Beurteilung der Wirksamkeit von eingeführten Luftporen werden als LP-Kennwerte der Gesamtluftporengehalt, der Gehalt an Luftporen bis 0,3 mm Durchmesser und der Abstandsfaktor benutzt. Der Abstandsfaktor ist eine aus einem idealisierten Porensystem abgeleitete Bewertungsgröße für den Größtabstand von einem beliebigen Punkt im Zementstein zur nächsten Luftpore. Zur numerischen Erfassung dieser Größe werden die von Powers entwickelten Berechnungsarten über die Zementsteinschichtdicke und über die Raumdiagonale eines Würfels verwendet. Der Gültigkeitsbereich beider Berechnungsformeln, nach denen der Abstandsfaktor als Funktion der spezifischen Oberfläche des Luftporensystems, des Gesamtluftporengehalts und des Zementstein-gehalts bestimmt wird, wird grafisch dargestellt.

1. Allgemeines

Frost beansprucht Beton in erster Linie durch hydraulischen Druck, der beim Gefrieren von Wasser in den Poren durch die Volumenzunahme von rd. 9 % entsteht. Demgegenüber treten die Beanspruchungen zurück, die durch den Kristallisationsdruck beim Wachsen der Eiskristalle entstehen oder durch den osmotischen Druck bei der Diffusion zwischen Gefrierzonen mit unterschiedlicher Konzentration der im Porenwasser gelösten Stoffe [1, 2].

Wie Untersuchungen gezeigt haben, ist in dem praktisch wichtigen Temperaturbereich nur das sogenannte freie Wasser in den Kapillarporen des Zementsteins gefrierbar, nicht gefrierbar ist das chemisch oder physikalisch in den Hydratationsprodukten des Zements gebundene Wasser [1]. Der durch das Gefrieren in den Kapillarporen sich aufbauende Porenwasserüberdruck ist abhängig von der Geschwindigkeit der Eisbildung, der Durchlässigkeit des Kapillarsystems und dem Vorhandensein einer Abflußmöglichkeit des nach und nach unter Druck geratenden Porenwassers [2]. Der entstehende Porenwasserüberdruck ist also um

so geringer, je näher für das Wasser in Kapillarporen eine Abflußmöglichkeit vorhanden ist. Abflußmöglichkeiten für das Wasser in Kapillaren bieten die durch LP-Mittel im Zementstein erzeugten, kugeligen Luftporen, deren Durchmesser denjenigen der Kapillaren rund um das 10fache übersteigt [3].

Bei Straßenbeton werden auch in Deutschland zur Beurteilung der Wirksamkeit solcher künstlich erzeugten Luftporen im erhärteten Beton sogenannte LP-Kennwerte benutzt; diese sind der Gesamtluftporengehalt, der Gehalt an feinen Luftporen bis 0,3 mm Durchmesser sowie der Abstandsfaktor [4, 5, 6]. Während die beiden erstgenannten Kennwerte, die meist in Vol.-% angegeben werden, ohne weiteres verständlich sind, ist zu dem wichtigen Begriff Abstandsfaktor eine besondere Auslegung nötig, die seine Berechnung berücksichtigt.

Ausgehend von der Überlegung, daß die Frostbeständigkeit des Zementsteins und bei frostbeständigem Zuschlag ebenso auch der Frostwiderstand des Betons um so größer sein müssen, je geringer der Abstand von irgendeinem Punkt des Zementsteins zum Rand der nächsten Luftpore ist, war für diese Beziehung eine einfache Maßzahl zu schaffen. Powers [7] hat 1949 für die von ihm mit „spacing factor“ bezeichnete Maßzahl zwei Berechnungsverfahren für das künstlich erzeugte Luftporensystem im Beton unter Berücksichtigung des vorhandenen Zementsteinvolumens vorgeschlagen, die unverändert heute noch in den Vereinigten Staaten von Amerika benutzt werden [8].

Die dabei erhältliche Maßzahl hat unter der nicht sehr glücklichen Übersetzung „Abstandsfaktor“ Eingang in die Betontechnologie auch in Deutschland gefunden und sich bei der Beurteilung der Wirksamkeit des Porensystems bewährt.

Im folgenden werden die beiden Modellvorstellungen für die Ermittlung des Abstandsfaktors erläutert. Bei der einen wird die Zementsteinschichtdicke und bei der anderen die Raumdiagonale eines Zementsteinwürfels, in deren Mitte eine Pore liegt, zur numerischen Erfassung herangezogen. Beide Berechnungsarten werden verglichen und ihr Anwendungsbereich angegeben.

2. Berechnung des Abstandsfaktors über die Zementsteinschichtdicke (AF 1)

Bei der mikroskopischen Ausmessung des Luftporensystems im erhärteten Beton werden aus den Meßwerten unter anderem folgende Größen berechnet:

Die spezifische Oberfläche O aller Luftporen in cm^2 je cm^3 Luftporengehalt,
der Gesamtluftporengehalt L des erhärteten Betons in Vol.-%,

der Zementsteingehalt ohne Luftporen ($V_z + V_w$) in Vol.-%; hierbei sind, jeweils in Vol.-%, V_z der Stoffraum des Zements und V_w der Stoffraum des Wassers je m^3 verdichteten Frischbeton.

Wenn man das Zementsteinvolumen auf die Gesamtoberfläche des Luftporensystems bezieht, erhält man eine einfache Kenn-

größe für die mittlere Schichtdicke des die Poren umgebenden Zementsteins. Hierbei gelangt man zu nachstehender Berechnungsvorschrift für den Abstandsfaktor AF 1:

$$AF\ 1 = \frac{10 (V_z + V_w)}{O \cdot L} \quad [mm] \quad (1)$$

Diese Größe, ähnlich der Zementsteinschichtdicke, die auf die Zuschlagoberfläche bezogen wird, hat den offensichtlichen Nachteil, daß sie nicht die ebenfalls mit Zementstein gefüllten Zwickel zwischen den Luftporen berücksichtigt.

3. Berechnung des Abstandsfaktors über die Würfeldiagonale (AF 2)

Eine diesen Nachteil vermeidende Modellvorstellung beruht auf der Umrechnung der unterschiedlich großen Poren des Luftporensystems in gleich große Poren, deren Verhältnis Oberfläche zu Volumen gleich der spezifischen Oberfläche O des Gesamtluftporengehaltes ist, und der mittigen Anordnung dieser Poren in einem regelmäßigen System von gleich großen Zementsteinwürfeln, siehe Bild 1.

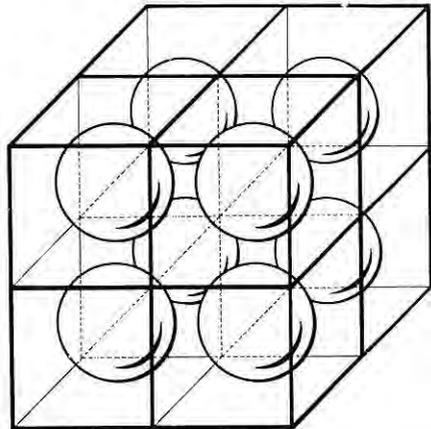


Bild 1 Idealisiertes Porensystem

Der Radius r der ideellen, gleich großen Kugelporen mit der spezifischen Oberfläche O ergibt sich aus dem Verhältnis von Kugeloberfläche zu Kugelvolumen:

$$O = \frac{4 \pi r^2}{\frac{4}{3} \pi r^3} = \frac{3}{r} \quad (2)$$

$$r = \frac{3}{O} \quad (3)$$

Den gesamten Luftporengehalt L kann man sich als N ideale, gleich große Poren vorstellen:

$$N = \frac{L}{\frac{4}{3} \cdot \pi r^3} = \frac{L \cdot 0^3}{36 \cdot \pi} \quad (4)$$

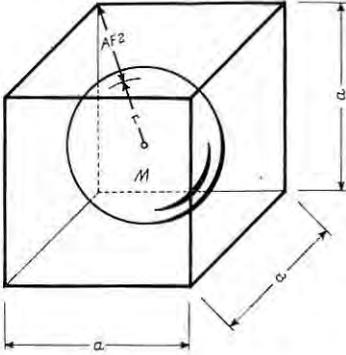


Bild 2 Einzelwürfel des idealisierten Porensystems

Das Volumen V , die Kantenlänge a und die Raumdiagonale d eines in der Mitte mit einer Luftpore besetzten Würfels (Bild 2) betragen:

$$V = \frac{V_z + V_w + L}{N} = \frac{36 \cdot \pi (V_z + V_w + L)}{L \cdot 0^3} \quad (5)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{36 \cdot \pi (V_z + V_w + L)}{L \cdot 0^3}} \quad (6)$$

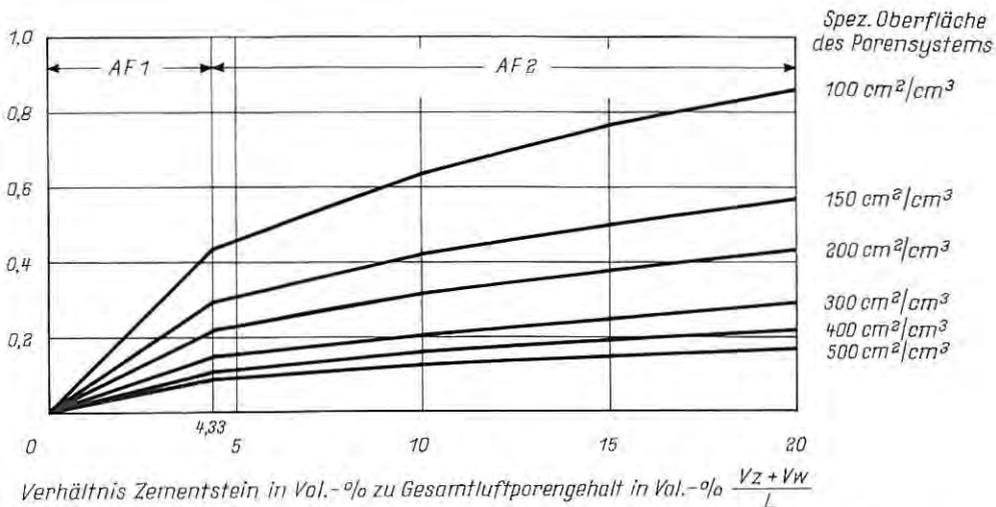
$$d = \sqrt{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{36 \cdot \pi (V_z + V_w + L)}{L \cdot 0^3}} \quad (7)$$

In diesem Modell hat der in der Würfecke liegende Zementstein die weiteste Entfernung von der Porenwandung, nämlich die halbe Würfeldiagonale, vermindert um den Porenradius. Diese Strecke gilt daher als Abstandsfaktor AF 2:

$$AF\ 2 = 10 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{\frac{36 \cdot \pi (V_z + V_w + L)}{L \cdot 0^3}} - \frac{3}{0} \right) [\text{mm}] \quad (8)$$

oder in der von Powers eingeführten Schreibweise:

$$AF\ 2 = \frac{30}{0} \left[1,4 \left(\frac{V_z + V_w}{L} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] [\text{mm}] \quad (9)$$



3. Abstandsfaktor in Abhängigkeit von Zementsteingehalt, Gesamtluftporengehalt und spezifischer Oberfläche des Porensystems

4. Gegenüberstellung beider Berechnungsarten

Beim Vergleich nach Bild 3 stellt man fest, daß die beiden Formeln für $\frac{V_z + V_w}{L} = 4,33$ gleiche Abstandsfaktoren liefern, daß

AF 1 im unteren Bereich kleiner ist als AF 2, während im oberen Bereich dies umgekehrt ist. Da beide Abstandsfaktoren den wirklich vorhandenen Größtabstand einer beliebigen Stelle im Zementstein vom nächsten Porenrand überschätzen, schlägt Powers [7] vor, den jeweils kleineren Wert als Abstandsfaktor zu benutzen, also im unteren Bereich AF 1 und im oberen Bereich AF 2. Diese Regelung ist auch in der Prüfvorschrift ASTM C 457-67 T enthalten, die den Abstandsfaktor als nützliche Bewertungsgröße bezeichnet, da er in einer gewissen Beziehung zum Größtabstand irgendeines Punktes im Zementstein zum nächsten Porenrand steht. Dieser Abstand ist aber, wie unter 1 dargelegt, für den Frostwiderstand des Zementsteins bzw. des Betons, dessen Kapillaren mit Wasser gefüllt sind, eine kennzeichnende Größe.

5. Zusammenfassung

5.1 Der Frostwiderstand eines Betons mit frostbeständigem Zuschlag ist um so größer, je geringer der Abstand von irgendeinem Punkt des Zementsteins zur nächsten Luftpore ist.

5.2 Um die Wirksamkeit eines Luftporensystems in dieser Hinsicht zu beurteilen, werden Betonschnitte mikroskopisch ausgemessen und aus den Meßwerten unter Benutzung einer idealisierten Porenanordnung im Zementstein ein Abstandsfaktor AF [mm] errechnet.

5.3 Der Abstandsfaktor hängt ab von der Feinheit (spezifische Oberfläche) der Luftporen, dem Gesamtluftporengehalt des Betons und dem Zementsteingehalt.

5.4 Der Abstandsfaktor kann nach zwei verschiedenen Modellvorstellungen berechnet werden; sie gehen auf die Berechnung der Dicke der Zementsteinschicht oder auf die Berechnung der Raumdiagonale eines Zementsteinwürfels mit einer zentrisch eingelagerten Pore zurück. Der Anwendungsbereich der beiden Berechnungen ist abhängig vom Volumenverhältnis des Zementsteins und des Porengehalts, so daß für bestimmte Verhältniswerte entweder die eine oder die andere Berechnungsart anzuwenden ist. Für die in der Praxis am häufigsten benutzten Betonmischungen und LP-Gehalte ist die Berechnung des Abstandsfaktors als Würfeldiagonale vorzunehmen. Dieses Verfahren ist in der Prüfvorschrift ASTM Standard C 457-67 T beschrieben und wird bei den Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie benutzt.

SCHRIFTTUM

- [1] Powers, T. C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 41 (1945) S. 245/272; ebenso Schriftenreihe Research Laboratory of the Portland Cement Association, Bulletin 5 (1945).
- [2] Powers, T. C.: The physical structure and engineering properties of concrete. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Bulletin 90 (1958).
- [3] Walz, K.: Luftporenbildende Betonzusatzmittel. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 123, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1956.
- [4] Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons — Beziehungen und Prüfverfahren. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 167, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1964.
- [5] Bonzel, J.: Beton mit hohem Frost- und Tausalz-widerstand. beton 15 (1965) H. 11, S. 469/474, und H. 12, S. 509/515; ebenso Betontechnische Berichte 1965, Beton-Verlag, Düsseldorf 1966, S. 185/216.
- [6] Walz, K., und H. Helms-Derfert: Luftporen-Kennwerte von Betonfahrbahndecken — Einfluß auf das Abwintern durch Tausalze. beton 16 (1966) H. 4, S. 155/159; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 75/87.
- [7] Powers, T. C.: The air requirement of frost-resistant concrete. Proc. Highw. Res. Board 29 (1949) S. 184/202; ebenso Schriftenreihe Research Laboratory of the Portland Cement Association, Bulletin 33 (1949).
- [8] ASTM C 457-67 T: Microscopical determination of air-void content, specific surface and spacing factor of the air-void system in hardened concrete. 1969 Book of ASTM Standards, Part 10, Philadelphia 1969.