

Die Bestimmung des Luftporengehalts im Beton

Von Axel Schäfer, Düsseldorf

Übersicht

Durch Einführen künstlicher Luftporen wird Beton gegen häufige Frost-Tau-Wechsel und bei der Winterwartung der Straßen gegen Tausalze widerstandsfähig. Die durch luftporenbildende Zusatzmittel beim Mischen erzeugten kugelförmigen Poren haben vorwiegend Durchmesser von 0,01 bis 0,3 mm und wirken als „Puffer“, da sie dem Kapillarwasser beim Gefrieren eine Raumvergrößerung von 9% ermöglichen, ohne daß wesentliche Sprengkräfte auftreten. Gefriert Beton, der durch Streuen von Tausalz mit einer Salzlösung getränkt ist, so treten neben der sprengenden Wirkung des Eises osmotische Drücke durch den angestrebten Konzentrationsausgleich der gefrierenden Lösung auf, die ein Abwittern begünstigen; auch diese osmotischen Drücke werden durch künstlich eingeführte Luftporen ausgeglichen.

Die Luftporen sollen einen kleinen Abstand voneinander haben und für deutsche Witterungsverhältnisse und Straßenbetone bei der Prüfung am Mischer einen Raum von mindestens 3,5% im Frischbeton einnehmen.

Dieser Luftporengehalt muß bei der Herstellung am frischen Beton laufend überprüft und eingehalten werden. Die Verfahren dafür — besonders das Druckausgleichsverfahren — werden im folgenden beschrieben. Messungen am erhärteten Beton stimmen mit dem im Frischbeton festgestellten Luftporengehalt weitgehend überein. Zur Bestimmung am erhärteten Beton hat sich das Meßlinien-Verfahren als besonders ausschlußreich erwiesen.

1. Einführung

Zahlreiche Veröffentlichungen, die für den Zeitraum bis 1954 von K. Walz und E. Hartmann [1] bearbeitet wurden, und viele jüngere Arbeiten (siehe u. a. bei K. Walz und R. Springenschmid [2] und bei F. K. Fears [3]) bestätigen eindrucksvoll, daß Beton der Frost- und Tausalzeinwirkung widersteht, wenn er einen genügend großen Luftporengehalt aufweist, der aus vielen kleinen Poren zusammengesetzt ist. Da das Wasser in den Kapillarporen nicht zu gleicher Zeit, sondern u. a. in Abhängigkeit von deren Durchmessern nur nach und nach gefriert, kann das noch nicht gefrorene Wasser in die luftgefüllten Poren verdrängt werden, ohne daß dabei größere Drücke auftreten. Voraussetzung ist jedoch, daß die Luftporen gleichmäßig verteilt sind und nicht zu weit von den einzelnen Kapillarporen entfernt liegen.

In richtiger Erkenntnis der Bedeutung der künstlichen Luftporen für den Widerstand des Straßenbetons gegen Frost und Tausalze hat die Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen 1953 ein

„Merkblatt für die Verwendung von Luftporenbildenden (LP) Zusatzstoffen“ [4] herausgegeben. Trotzdem wird in der Praxis der vorgeschriebene Luftporengehalt aus verschiedenen Gründen [4] häufig unterschritten.

Ein unzureichender Luftporengehalt kann nur durch laufende Überprüfung auf der Baustelle verhindert werden. Diese Prüfung ist daher mindestens ebenso wichtig wie andere Baustellenprüfungen, weil damit verbundene Fehler sofort abgestellt werden können; der Aufwand für die Prüfung ist gering. Die für die Mischung etwa notwendige Zusatzmenge wird bei der ohnehin erforderlichen, der Bauausführung vorausgehenden Eignungsprüfung festgelegt.

Im folgenden werden zunächst die zur Bestimmung des Luftporengehalts am Frischbeton üblichen Verfahren beschrieben, dann die für die Nachprüfung und für besondere technisch-wissenschaftliche Untersuchungen am erhärteten Beton möglichen Verfahren. Abschließend werden die Feststellungen der einzelnen Verfahren miteinander verglichen.

2. Bestimmung am frischen Beton

Bei der Herstellung von frost- und tausalzwidstandsfähigem Beton wird der LP-Gehalt am häufigsten mit dem Druckausgleichsverfahren ([4] und ASTM C 231) geprüft. In den USA wird außerdem das Verdrängungsverfahren (ASTM C 173) benutzt, während die Stoffraumrechnung (ASTM C 138) zu ungenau ist.

Alle drei Verfahren können mit geringem Aufwand durchgeführt werden. Sie ermöglichen eine summarische Erfassung des Luftporengehalts, erlauben aber keine Aussagen über Größe und Abstand der Luftporen. Verwendet man Luftporenbildende Zusatzmittel, die die amtliche Prüfung [5] bestanden haben, in richtiger Bemessung, so kann man jedoch voraussetzen, daß mit dem Luftporengehalt auch die erforderliche ausreichend große Zahl kleiner Luftporen vorhanden ist.

Es wird häufig befürchtet, daß der nach dem Mischen bestimmte LP-Gehalt durch die Verdichtung des Betons teilweise verlorengeht, d. h. daß nachher ein wesentlich kleinerer LP-Gehalt vorhanden ist als nach der Verdichtung in einem Prüfgerät. Für Straßenbeton konnte K. Walz [6] feststellen, daß frischer Beton sofort nach dem Mischen und nach Entnahme aus einer verdichteten Straßendecke im oberen Teil etwa den gleichen Luftporengehalt aufwies. Weiteres siehe [2].

2.1 Druckausgleichsverfahren

Der in einem Drucktopf (5 bis 8 l Inhalt) sachgemäß verdichtete¹⁾ Beton wird einem bestimmten Überdruck ausgesetzt. Dadurch wird die Luft in den Luftporen auf einen Raum zusammengedrängt, der dem Überdruck nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte entspricht.

Bei einer Geräteausführung wird der Überdruck über eine Wasserfüllung auf den Beton mit einer einfachen Luftpumpe bis zu

¹⁾ Füllen und Verdichten siehe [4]

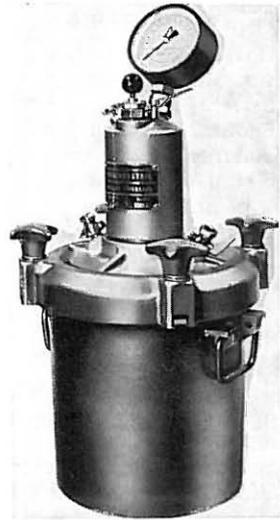
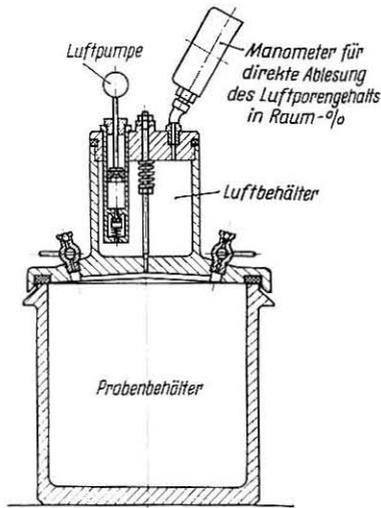


Bild 1 Gerät zur Bestimmung des Luftporengehalts im Frischbeton nach dem Druckausgleichsverfahren (Werkphoto: Chemisches Laboratorium für Tonindustrie)

einer bestimmten Manometeranzeige ausgeübt. Die Zusammen-drückung bzw. der Luftporengehalt wird in Prozent an einem Wasserstandsglas abgelesen; siehe Bild 4 in [2].

Bei einem anderen Gerät drückt eine zunächst in einer Vorkammer unter einen bestimmten Überdruck gesetzte Luftmenge nach Öffnen eines Ventils über eine dünne Wasserschicht auf den Beton. Der Luftporengehalt ergibt sich hier aus dem Druckabfall, der durch Raumverminderung der Luft im Beton entsteht, und kann am dafür geeichten Manometer in Prozent abgelesen werden; siehe Bild 1.

Beide Geräte sind schnell und einfach zu bedienen.

Neben diesen Verfahren wird der Luftporengehalt auch vereinzelt durch Anwendung von Unterdruck ermittelt, da dadurch der Luftporenraum – ebenfalls nach Boyle-Mariotte – meßbar zunimmt. Der Vorteil liegt nach Angabe von R. Loevenich-Grün und H. K. Loevenich [7] darin, daß die Prüfbehälter dabei leichter abgedichtet werden können als bei Anwendung von Überdruck, der Nachteil darin, daß die Durchführung nur im Laboratorium möglich ist. Ein mit dem verdichteten Beton gefüllter Prüfbehälter wird mit einem Deckel verschlossen, der mit einer Bürette versehen ist. Durch eine verschließbare Einfüllöffnung wird zwischen Beton und Deckel entlüftetes Wasser bis zu einer Nullmarke eingegeben und die Bürette dann z. B. an eine Wasserstrahlpumpe angeschlossen, parallel dazu ein (Quecksilber-)Manometer. Je nach Unterdruck (von 10 bis 20 Torr) vergrößert sich der Betonraum und bringt die mit ihm in Berührung stehende Wassersäule zum Ansteigen. Durch Ablesen verschiedener Höhen der Wassersäule und der entsprechenden Drücke sind Kontrollrechnungen möglich.

2.2 Verdrängungsverfahren

Das in ASTM C 173 genormte Verdrängungsverfahren bedient sich eines sog. Rollgeräts, das aus einem zylindrischen Behälter besteht, in dessen unterem Teil der Beton verdichtet wird; siehe Bilder 2 und 3 in [7]. Danach wird der obere Teil, der ein graduiertes Glasröhrchen besitzt, dicht aufgesetzt und das Gefäß bis zu einer Eichmarke mit Wasser gefüllt. Nach Verschließen wird das Gerät so lange hin- und hergerollt, bis das Wasser alle Luft aus dem Beton verdrängt und sich mehr oder weniger Schaum an dem Wasserspiegel angesammelt hat. Dann wird Alkohol nachgefüllt (Zerstörung des Schaums) und festgestellt, wieviel nötig ist, um den abgesunkenen Flüssigkeitsspiegel wieder auf den Eichstrich zu bringen; diese Menge entspricht dem Luftporengehalt.

Bei einem anderen Verdrängungsverfahren wird ein 4 cm³ großer Messingzylinder nur mit dem Feinmörtel des Betons gefüllt und in einen mit Alkohol gefüllten, rd. 30 cm³ großen Glaszylinder eingesetzt, der an einem Ende zu einem graduierten Glasrohr verjüngt ist; siehe Bild 1 in [8]. Durch Schütteln des Geräts wird der Mörtel aufgeschlämmt, die Luft entweicht, und der Alkoholspiegel sinkt um einen am Meßrohr abzulesenden Betrag. Der Luftporengehalt des Mörtels wird auf den des Betons umgerechnet. Die von W. E. Grieb [8] bestimmten Werte waren zum Teil ungenau, weil der Mörtelanteil des Betons nicht immer genau bekannt war, und streuten sehr, weil nur kleine Proben geprüft werden konnten. Die TVA (Tennessee Valley Authority) [9] stellte demgegenüber ausreichende Brauchbarkeit fest, ebenso H. H. Newlon [10], der die geringen Kosten und den auf ein Drittel gesenkten Zeitaufwand dieses Verfahrens gegenüber dem Druckausgleichsverfahren herausstellte.

Beide Verdrängungsverfahren lassen sich mit geringem Aufwand durchführen, erfordern jedoch besondere Umsicht, um die Luft aus dem Beton durch die Flüssigkeit restlos zu verdrängen.

2.3 Stoffraumrechnung am frischen Beton

Der Luftporengehalt P ist der Raum, der vom Stoffraum des kernfeuchten, oberflächentrockenen Zuschlags $\frac{G}{\rho_G}$, des Zements $\frac{Z}{\rho_{oZ}}$ und des Anmachwassers W nicht ausgefüllt wird.

Für 1000 dm³ frischen Beton gilt in Anlehnung an [11]:

$$P = 1000 - \frac{G}{\rho_G} - \frac{Z}{\rho_{oZ}} - W \quad [\text{dm}^3/\text{m}^3]$$

Hierbei sind:

- P = Luftporengehalt [dm³/m³] ($\frac{P}{10}$ ist der Luftporengehalt in [%])
- G = Gehalt an kernfeuchtem, oberflächentrockenem Zuschlag [kg/m³]
- Z = Zementgehalt [kg/m³]
- W = Anmachwasser [dm³/m³]

ρ_G = Rohdichte des kernfeuchten, oberflächentrockenen Zuschlags [kg/dm³]

ρ_{0Z} = Reindichte des Zements [kg/dm³]

Der Zuschlaggehalt G , der Zementgehalt Z und das Anmachwasser W werden aus der Rohdichte des frischen Betons und dem Mischungsverhältnis $Z : G : W$ berechnet. Abweichungen vom Soll-Mischungsverhältnis durch Entmischung und kleine Fehler in der Bestimmung der Rohdichte des Frischbetons beeinflussen den nach diesem Verfahren ermittelten Luftporengehalt stark.

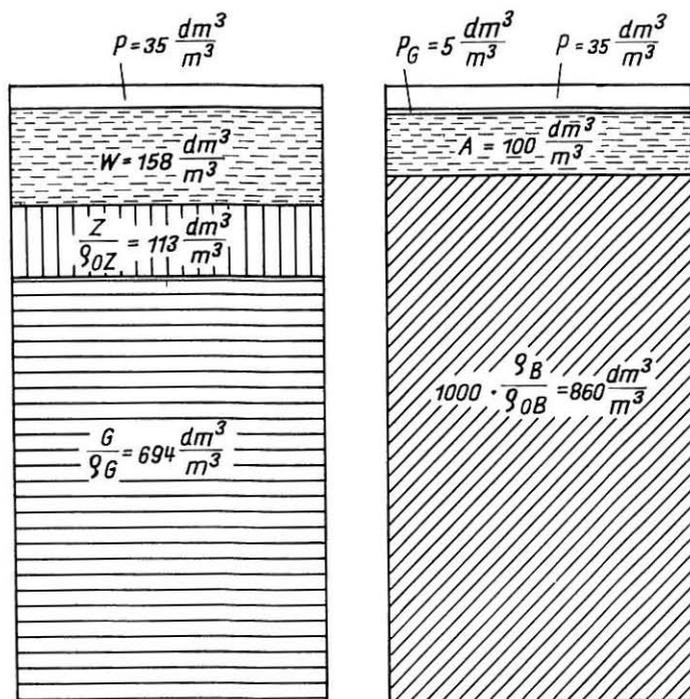


Bild 2 Beispiel für Stoffraumteile in 1 m³ frischem LP-Beton (links) und in 1 m³ erhärtetem und unter Atmosphärendruck wassergesättigtem LP-Beton (rechts)

Bei einem LP-Beton mit

$$Z = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{W}{Z} = 0,45$$

$$\text{und } G = 1800 \text{ kg/m}^3$$

setzen sich die Stoffraumteile z. B. wie in Bild 2 angegeben zusammen.

3. Bestimmung am erhärteten Beton

Mikroskopische Untersuchungen erfolgen nach dem „Punkt-Zähl“-Verfahren oder dem gebräuchlicheren „Meßlinien“-Verfahren²⁾. Viele Messungen wurden vor allem in den USA hiernach durchgeführt; siehe z. B. [12] und [13], ferner ASTM C 457, wo eine Norm die beiden Verfahren beschreibt.³⁾

Beim Mikroskopieren erhält man außer dem Luftporengehalt weitere Luftporenkennwerte (z. B. Abstandsfaktor und spezifische Oberfläche der Luftporen), die den Frostwiderstand des Betons beeinflussen. Sättigungsverfahren und Stoffraumrechnung geben dagegen nur den Luftporengehalt. Ebenso ein im folgenden nicht weiter erörtertes, auf den Gasdurchlässigkeits-Gesetzen beruhendes Verfahren von R. P. Vellines und T. Ason [16].

3.1 Meßlinien-Verfahren

Betonschnitte von mindestens 100 cm² werden mit Siliciumcarbid oder Korund geschliffen und bei 50- bis 200facher Vergrößerung mikroskopiert. Dabei sind die Luftporen bei schräg auftreffender Beleuchtung als schwarze Kreise zu erkennen. An parallelen, über die Schlifffläche gelegten gedachten Geraden werden die Porensehnen und die Feststoffstrecken gezählt, gemessen und jeweils addiert. Die gesamte Meßlinie soll insgesamt mindestens 200 cm lang sein. Der Luftporengehalt ist der prozentuale Anteil der Porensehnenlänge an der gesamten Meßlinie. A. Rosiwal [17] zeigte dies bereits 1898 beim Ausmessen von Mineralbestandteilen an Gesteinen entlang einer beliebigen Linie am Schnitt durch eine Probe („geometrische Gesteinsanalyse nach Delesse“). Messen, Zählen und Addieren der Strecken erfolgen im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, mit einer elektronisch registrierenden Einrichtung, die dem Mikroskop nachgeschaltet ist.

3.2 Sättigungsverfahren

Bei diesen Verfahren wird angenommen, daß sich beim Beton alle Poren – mit Ausnahme der Luftporen und der geschlossenen Zuschlagporen – nach Wasserlagerung unter Atmosphärendruck vollständig füllen. So gesättigt wird die unter Wasser liegende Probe beim Hochdrucksättigungsverfahren [18] einem Druck von z. B. 350 kp/cm² ausgesetzt. Während der Druckeinwirkung wird das dadurch aufgenommene Wasser volumetrisch bestimmt. Die Druckwasseraufnahme des Zuschlags und die Wasserkompression werden abgezogen, um so annähernd den Luftporengehalt zu bekommen, der infolge der Luftkompression noch um 0,3 % größer ist.

Beim Vakuumsättigungsverfahren [19] wird die Luft aus dem getrockneten Beton durch Evakuieren entfernt und anschließend Wasser unter Aufrechterhaltung des Vakuums eingesaugt. Der danach folgende Druck (in [19] rd. 15 kp/cm²) ergibt einen größtmöglich gesättigten Probekörper, der nach Wegnahme des

²⁾ USA: „Linear-Traversal“-Verfahren

³⁾ Weitere mikroskopische Verfahren: G. J. Verbeck [14] führte Flächenintegrationen an Lochkamera-Aufnahmen durch, und E. P. Rexford [15] untersuchte Beton-Dünnschliffe mit dem „Wentworth“-Integrations-Tisch

Drucks gewogen wird. Zieht man das Gewicht der bei Atmosphärendruck gesättigten Probe ab, so erhält man den Luftporengehalt.

3.3 Stoffraumrechnung am erhärteten Beton

Wie bei den unter 3.2 beschriebenen Verfahren wird auch hier angenommen, daß sich bei „natürlicher“ Wasserlagerung bis zur Gewichtsgleiche alle Poren – mit Ausnahme der Luftporen und der geschlossenen Zuschlagporen –, also vorwiegend die Gel- und Kapillarporen, vollständig füllen [19].

Der Luftporengehalt P ist der Raum, der vom Betonstoffraum (bei 110 °C getrocknet, ohne Zementstein- und Zuschlagporen)

$1000 \cdot \frac{\rho_B}{\rho_{oB}}$, vom Wasser A , das unter Atmosphärendruck aufgenommen wird und bei 110 °C wieder verdampfbar ist, und von den geschlossenen Zuschlagporen P_G nicht ausgefüllt wird.

Für 1000 dm³ unter Atmosphärendruck wassergesättigten Beton gilt:

$$\begin{aligned} P &= 1000 - 1000 \frac{\rho_B}{\rho_{oB}} - A - P_G \quad [\text{dm}^3/\text{m}^3] \\ &= 1000 \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_{oB}}\right) - A - P_G \quad [\text{dm}^3/\text{m}^3] \end{aligned}$$

Hierbei sind:

- P = Luftporengehalt [dm³/m³]
- ρ_B = Rohdichte des bei 110 °C getrockneten Betons [kg/dm³]
- ρ_{oB} = Reindichte des Betons [kg/dm³]
- A = unter Atmosphärendruck aufgenommenes und bei 110 °C verdampfbares Wasser (vorwiegend Gel- und Kapillarporen) [dm³/m³]
- P_G = geschlossene Zuschlagporen [dm³/m³]

Da

$$\text{Gesamtporenraum} = 1000 \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_{oB}}\right) \quad [\text{dm}^3/\text{m}^3],$$

werden davon – bei anderer Betrachtungsweise – das verdampfbare Wasser und die geschlossenen Zuschlagporen abgezogen.

Schwierig ist die genaue Ermittlung der Reindichte ρ_{oB} infolge der sehr geringen Größe der Gelporen und der großen inneren Oberfläche des Zementsteins. Die Gelporen füllen sich nach ihrer Austrocknung bei der Bestimmung mittels Pyknometer (DIN 1065) nur schwer mit der Versuchsflüssigkeit, z. B. iso-Butylalkohol.

Ebenfalls pyknometrisch wird die Reindichte des Zuschlags (nach Zermahlung; Versuchsflüssigkeit Wasser) ermittelt und mit Hilfe der Rohdichte des trockenen Zuschlags (Flüssigkeitsverdrängungsverfahren) der Raum P_G der geschlossenen Zuschlagporen errechnet.

Das verdampfbare Wasser A wird durch Wiegen der zuerst unter Atmosphärendruck gesättigten und dann bei 110 °C getrockneten Betonprobe bestimmt.

Der Betonraum, auf den der Luftporengehalt bezogen ist, wird durch Ausmessen oder durch das Auftriebsverfahren (Unterwasserwägung) festgestellt.

Bei dem unter 2.3 angeführten Beton setzen sich die Stoffraumteile im erhärteten Zustand z. B. wie in Bild 2 angegeben zusammen. Dabei liegt die Annahme zugrunde, daß die geschlossenen Zuschlagporen zu $P_G = 5 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ und das bei 110°C verdampfbare Wasser zu $A = 100 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ bestimmt wurden.

4. Vergleich der Verfahren

In Tafel 1 sind die Verfahren nach der Häufigkeit ihrer Anwendung aufgeführt. Nach dem Schrifttum und nach nicht veröffentlichten Versuchsergebnissen des Verfassers wurden Näherungswerte ermittelt, die vom Luftporengehalt, der mittels Druckausgleichsverfahren am Frischbeton bestimmt wurde, nach oben oder unten abweichen.

Tafel 1 Maximale Abweichung der mit verschiedenen Verfahren bestimmten Luftporengehalte (Werte nach dem Druckausgleichsverfahren = 100 %)

Beton	Verfahren *)	Abweichung in % der Meßwerte des Druckausgleichs- verfahrens
frischer Beton	Verdrängungsverfahren [7, 8, 9, 10]	± 10
	Stoffraumrechnung am frischen Beton	± 40
erhärteter Beton	Meßlinien-Verfahren [12, 18, 20]	± 15
	Vakuumsättigungsverfahren [19]	± 15
	Hochdrucksättigungsverfahren [18]	± 15
	Stoffraumrechnung am erhärteten Beton [19]	± 20

*) In eckigen Klammern Schrifttum, dessen Meßwerte mit herangezogen wurden

Bei diesem Vergleich ist allerdings nicht ganz sicher, ob mit dem am häufigsten gebräuchlichen Druckausgleichsverfahren die Luftporengehalte erhalten werden, die der Wirklichkeit (Luftporengehalt eines in bestimmter Weise verdichteten Betons unmittelbar nach dem Mischen) am nächsten kommen und die am besten reproduzierbar sind.

Die Abweichungen des im erhärteten Beton festgestellten Luftporengehalts von demjenigen des frischen Betons sind bei ähnlicher Herstellung der Proben verhältnismäßig gering. Sowohl bei frischem als auch bei erhärtetem Beton treten die größten Abweichungen bei den Stoffraumrechnungen infolge der in den Abschnitten 2.3 und 3.3 genannten Schwierigkeiten auf.

5. Zusammenfassung

Die Verfahren zur Bestimmung des Luftporengehalts im Beton werden beschrieben und beurteilt.

5.1 Der Luftporengehalt des frischen Betons wird vor allem mit dem Druckausgleichsverfahren und in den USA außerdem auch mit den Verdrängungsverfahren bestimmt; die Stoffraumrechnung erscheint zu unsicher. Der Luftporengehalt nach den Verdrängungsverfahren weicht durchschnittlich bis zu etwa 10% von demjenigen ab, der nach dem Druckausgleichsverfahren bestimmt wird.

5.2 Die Prüfung am erhärteten Beton wird meist mikroskopisch nach dem sog. Meßlinien-Verfahren durchgeführt, da damit gleichzeitig andere, den Frostwiderstand kennzeichnende Aussagen (über Größe und Abstand der Luftporen) erhalten werden. Weitere Verfahren zur Bestimmung des Luftporengehalts am erhärteten Beton sind: Vakuumsättigungsverfahren, Hochdrucksättigungsverfahren und die Stoffraumrechnung. Alle Verfahren ergeben Werte, die durchschnittlich bis zu etwa 20% von dem Luftporengehalt abweichen, der nach dem Druckausgleichsverfahren am frischen Beton festgestellt wird.

5.3 Die Frischbetonprüfung ist besonders wichtig, weil dadurch ein unzumutbarer Luftporengehalt während der Bauausführung sofort erkannt und geändert werden kann. Nachprüfungen am erhärteten Beton sind für wissenschaftliche Arbeiten und zur Beurteilung von Schadensfällen sehr geeignet, haben jedoch für die Bauausführung weniger Bedeutung.

SCHRIFTTUM:

- [1] a) Walz, K., und E. Hartmann: Literaturzusammenstellung über die Verwendung luftporenbildender Zusatzmittel zu Straßenbeton. – b) Walz, K.: Einfluß luftporenbildender Zusatzmittel auf die Eigenschaften von Beton, insbesondere auf die Tausalzbeständigkeit von Straßenbeton. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen. Neue Folge, H. 20, Kirschbaum-Verlag, Bielefeld 1956.
- [2] Walz, K., und R. Springenschmid: Betonstraßen und Tausalzeinwirkung. beton 12 (1962) H. 11, S. 507/512.
- [3] Fears, F. K.: Correlation between concrete durability and air-void characteristics. Highw. Res. Board, Bull. 196, 1958, S. 17/28.
- [4] Vorläufiges Merkblatt für die Verwendung von luftporenbildenden Zusatzstoffen zu Straßenbeton. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1953.
- [5] Prüfrichtlinien für Betonzusatzmittel, Fassung 1958 mit Änderungen 1960. Betonstein-Zeitung 26 (1960) H. 10, S. 424/431.
- [6] Walz, K.: Feststellungen beim Einbau von Straßenbeton mit luftporenbildenden Zusatzstoffen. Straße und Autobahn 4 (1953) H. 6, S. 175/179, und H. 7, S. 233.
- [7] Loevenich-Grün, R., und H. K. Loevenich: Methoden zur Bestimmung des Luftporengehalts im Beton. Beton-Zement-Markt 4 (1954) Nr. 11/12, S. 161/167.
- [8] Grieb, W. E.: The AE-55 indicator used for determining air content of concrete. Public Roads 29 (1957) Nr. 9, S. 206/207 und 220.
- [9] Walz, K., P. Misch und H. H. Schönrock: Beton in den USA. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 30, S. 43; ebenso Beton-Verlag, Düsseldorf 1962.
- [10] Newlon, H. H.: A field investigation of the AE-55 air indicator. Highw. Res. Board, Bull. 305, 1961, S. 1/13.

- [11] Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. 2. Aufl. Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin/München 1963.
- [12] Brown, L. S., and C. U. Pierson: Linear traverse technique for measurement of air in hardened concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 47 (1950/51) S. 117/123.
- [13] Mather, K.: Measuring air in hardened concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 49 (1952/53) S. 61/64.
- [14] Verbeck, G. J.: The camera lucida method for measuring air voids in hardened concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 43 (1946/47) S. 1025/1040.
- [15] Rexford, E. P.: Discussion of a paper by George Verbeck: The camera lucida method for measuring air voids in hardened concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 43 (1946/47) S. 1040-1/1040-5.
- [16] Vellines, R. P., und T. Ason: A method for determining the air content of fresh and hardened concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 45 (1948/49) S. 665/671.
- [17] Rosiwal, A.: Verhandl. K. u. k. geol. Reichsanstalt, 1898, S. 143/156.
- [18] Erlin, B.: Air content of hardened concrete by a high-pressure method. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 4 (1962) Nr. 3, S. 24/29.
- [19] Klein, A., D. Pirtz und 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.
- [20] Schäfer, A.: Vergleichende amerikanische Untersuchungen über 4 Verfahren der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung an Beton. beton 12 (1962) H. 7, S. 314/318; ebenso Betontechnische Berichte 1962. Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 93/104. (Nach: Report on cooperative freezing-and-thawing tests of concrete. Highway Research Board, Spec. Rep. 47, Washington 1959.)