

Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton

Von Justus Bonzel und Eberhard Siebel, Düsseldorf

Übersicht

Das Vorhandensein des für Luftporenbeton geforderten Gehaltes an kleinen Luftporen muß in der Bundesrepublik Deutschland vor und während der Herstellung der Bauteile durch Prüfung des Luftgehaltes L_d des Frischbetons überwacht werden. In der Regel ist eine solche Prüfung für die Beurteilung des Mikroluftporengehaltes von sachgerechtem Luftporenbeton auch ausreichend. In Schadens- oder in Zweifelsfällen kann es aber notwendig werden, Proben des erhärteten Betons aus Bauteilen herauszuarbeiten und daran die Luftporenkennwerte des Festbetons zu bestimmen. Eine solche Bestimmung muß bei der Wirksamkeitsprüfung von Luftporenbildnern stets durchgeführt werden. Daher ist das dafür zumeist angewendete Prüfverfahren (Sehnenmeßverfahren), das auf Untersuchungen und Festlegungen zunächst in den USA, dann auch im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, basiert, in den Wirksamkeitsprüfrichtlinien für Betonzusatzmittel des Instituts für Bautechnik, Berlin, beschrieben worden. Als Luftporenkennwerte des Festbetons werden dabei der Luftgehalt L_a , der Abstandsfaktor AF und, falls erforderlich, der Mikroluftporengehalt L_{300} bestimmt.

In der Bundesrepublik Deutschland wird diese Bestimmung derzeit vorwiegend von sieben Prüfanstalten durchgeführt. Dabei hat es sich als wünschenswert erwiesen, daß das Bestimmungsverfahren zur Verringerung der Prüfstreuungen zwischen den Prüfanstalten noch genauer festgelegt wird. Aus diesem Grunde hat eine Bearbeitungsgruppe der damit befaßten Prüfanstalten das Bestimmungsverfahren überarbeitet und dafür die „Anleitung für die Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton – Mikroskopische Luftporenuntersuchung (Fassung 1981)“ aufgestellt. Diese „Anleitung“ enthält Angaben über Begriffe, Geräte, Prüfkörper, Vorbereitung der Prüfflächen, mikroskopische Untersuchung und Errechnung der Luftporenkennwerte. Mit den die „Anleitung“ begleitenden Ausführungen werden die Zusammenhänge, die Änderungen gegenüber der bisherigen Fassung des Bestimmungsverfahrens und das Vorgehen bei der Bestimmung der Luftporenkennwerte erläutert und begründet.

1. Einleitung

Nach den in der Bundesrepublik Deutschland bestehenden Vorschriften, siehe z. B. [1, 2, 3], muß Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand, soweit es sich nicht um einen erdfeuchten Beton für

entsprechende Betonwaren handelt, neben sachgerechter Zusammensetzung und Herstellung sowie sachgerechtem Einbau einen auf die Feinmörtelmenge abgestimmten Gehalt an kleinen Luftporen (Mikroluftporen) aufweisen. In vielen Fällen ist es einfacher und auch möglich, den erforderlichen Mikroluftporengehalt nicht auf die Feinmörtelmenge, sondern auf das Zuschlaggrößtkorn oder auf den Mehlkorngesamtgehalt des Betons abzustimmen, siehe z.B. [2, 3]. Auch für Beton mit hohem Widerstand gegen starke Frosteinwirkungen ist in einigen Fällen ein solcher Mikroluftporengehalt gefordert [1]. Zur Erzielung des erforderlichen Mikroluftporengehaltes muß dem Beton ein Luftporenbildner [4] zugegeben werden, der ein Prüfzeichen des Instituts für Bautechnik, Berlin, besitzt und überwacht wird.

Das Vorhandensein des ausreichenden Mikroluftporengehaltes kann bei Verwendung eines solchen Luftporenbildners und bei sachgerechter Zusammensetzung und Herstellung des Betons in der Regel mit Hilfe des z. B. im Luftporentopf nach dem Druckausgleichsverfahren ermittelten Luftgehaltes L_d des Frischbetons beurteilt werden, wenn der Beton im Luftporentopf ebenso wie die Festigkeitsprüfkörper praktisch vollständig verdichtet wird. Aus diesem Grunde enthalten die Vorschriften für entsprechende Betonbauteile [1, 2, 3] für den Regelfall nur Anforderungen an den Luftgehalt des Frischbetons.

Bei der Wirksamkeitsprüfung von Luftporenbildnern [5] werden jedoch Luftporenkennwerte am Festbeton bestimmt, mit deren Hilfe die Frage nach einem ausreichenden Mikroluftporengehalt direkt beurteilt werden kann (siehe Abschnitt 2). Eine Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton kann auch in Zweifelsfällen oder bei Schadensfällen notwendig werden.

In der Bundesrepublik Deutschland wird die Bestimmung der Luftporenkennwerte des Festbetons derzeit vorwiegend von 7 Prüfanstalten¹⁾ durchgeführt, und zwar in Anlehnung an das Sehnenmeßverfahren nach Rosiwal (siehe u. a. [5, 6, 7, 8]). Zur Vereinheitlichung des Bestimmungsverfahrens und zur Verringerung der Prüfstreuungen wurde die nachfolgend abgedruckte „Anleitung für die

1) Prüfanstalten für die Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton:

Forschungsinstitut der Zementindustrie, Tannenstraße 2-4, 4000 Düsseldorf 30

Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg – Otto-Graf-Institut – Abteilung I, Baustoffe, Pfaffenwaldring 4, 7000 Stuttgart 80

Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der TU Hannover, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Nienburger Straße 3, 3000 Hannover

Institut für Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, Am Fasanengarten, 7500 Karlsruhe 1

Institut für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München, Arcisstraße 21, 8000 München 21

Staatl. Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, Marsbruchstraße 186, 4600 Dortmund-Aplerbeck

ZEMLABOR – Dr.-Ing. Werner Loch GmbH, Institut für Baustoffprüfungen, Hans-Böckler-Straße 20, 4720 Beckum

Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton – Mikroskopische Luftporenuntersuchung (Fassung 1981)“ in einer Bearbeitergruppe der damit befaßten Prüfanstalten erarbeitet. Diese „Anleitung“ enthält Angaben über Begriffe, Geräte, Prüfkörper, Vorbereitung der Prüfflächen, mikroskopische Untersuchung und Errechnung der Luftporenkennwerte. In der Bearbeitergruppe haben mitgearbeitet: Prof. Dr.-Ing. Bonzel, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf (Leiter), Prof. Dr.-Ing. Hilsdorf, Technische Universität Karlsruhe, Dr.-Ing. Loch, ZEMLABOR Beckum, Prof. Dr.-Ing. Manns, Otto-Graf-Institut Stuttgart, Baudir. Scheer, MPA Dortmund, Dipl.-Ing. Siebel, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, Prof. Dr. techn. Springenschmid, Technische Universität München und Prof. Dr.-Ing. Wierig, Technische Universität Hannover, sowie auf schriftlichem Wege Dr. techn. Sommer, Forschungsinstitut des VÖZ Wien. Es wird gebeten, Erfahrungen mit dieser Anleitung und dem darin beschriebenen Bestimmungsverfahren²⁾ dem Forschungsinstitut der Zementindustrie, Tannenstraße 2, 4000 Düsseldorf 30, mitzuteilen.

2. Luftporenkennwerte

2.1 Begriffe

Die üblicherweise für Luftporenkennwerte verwendeten Begriffe sind im „Merkblatt für die Verwendung von Luftporenbildnern für Beton“ [9] definiert. Soweit möglich und für die Bestimmung der Luftporenkennwerte nötig, wurden diese Begriffe in der nachfolgend abgedruckten „Anleitung“ praktisch unverändert übernommen. Den wichtigsten Luftporenkennwerten wurden in der „Anleitung“ zur einfacheren Handhabung beim Gebrauch jedoch übliche Kurzbezeichnungen zugeordnet.

Beim Frischbeton wird unterschieden zwischen „Verdichtungs-poren“ (Hohlräume infolge unvollständiger Verdichtung), „Luftporen“ (im allgemeinen durch Luftporenbildner erzeugte, kugelige und annähernd kugelige Hohlräume) und „wassergefüllten Poren“, die manchmal z. B. unter groben Zuschlagkörnern im weichen Beton entstehen und im Festbeton nach Austrocknen luftgefüllt sind. In jüngerer Zeit werden Luftporen teilweise auch durch andere Verfahren, wie z. B. durch die Zugabe kleiner gasgefüllter Kunststoffhohlkugeln [10, 11], im Frischbeton erzeugt. Mit Luft gefüllte Hohlräume können im Beton auch durch die Bildung von Rissen entstehen.

Da bei der mikroskopischen Bestimmung nach dem in der „Anleitung“ beschriebenen Verfahren im Festbeton nicht immer zwischen den genannten Porenarten unterschieden werden kann, mußten einige Definitionen des „Merkblattes für die Verwendung von Luftporenbildnern für Beton“ [9] etwas verändert werden. Einige Kennwerte dieses Merkblattes wurden in die „Anleitung“ aus den vorher

²⁾ Die Anerkennung des in der „Anleitung“ beschriebenen Bestimmungsverfahrens für die Wirksamkeitsprüfung von Luftporenbildnern mit Prüfzeichen setzt voraus, daß das Institut für Bautechnik, Berlin, dieses Bestimmungsverfahren dafür übernimmt.

genannten Gründen nicht übernommen, weil sie nur theoretische Bedeutung haben. Die Definition des Luftgehaltes L_a des Festbetons wurde so erweitert und konkretisiert, daß damit gleichzeitig weitgehend festgelegt ist, wie beim Auszählen der Poren vorzugehen ist und welche Hohlräume dabei einzubeziehen sind.

Aufgrund der für die Luftporenkennwerte getroffenen Festlegungen enthält der Luftgehalt L_d des Frischbetons alle luftgefüllten Hohlräume des Frischbetons, d. h. in der Regel die Verdichtungs- und die Luftporen. Im Luftgehalt L_a des Festbetons sind alle bei der gewählten Vergrößerung sichtbaren Hohlräume (außer den als Risse erkennbaren Hohlräumen) enthalten, deren größte Sehnenlänge in der geschliffenen Prüffläche auf der Meßlinie 4,00 mm nicht überschreitet. Außer Verdichtungsporen und Luftporen werden dabei also auch ausgetrocknete, im Frischbeton wassergefüllte Poren berücksichtigt. Eine Abstimmung der maximalen einzubeziehenden Porengröße auf den Porendurchmesser war nicht möglich, weil der in der Schnittfläche sichtbare Teil der Pore darauf keinen Schluß zuläßt und nur auf der Meßlinie liegende Porensehnen gemessen und registriert werden.

Die für die Bestimmung des Luftgehaltes L_a des Festbetons gemessenen und registrierten Porensehnen liegen auch der Bestimmung des Abstandsfaktors AF und der Bestimmung des Mikroluftporengehaltes L 300 zugrunde. Die dafür im „Merkblatt“ [9] vorgesehene Definitionen wurden im Gegensatz zur Definition des Luftgehaltes L_a des Festbetons trotzdem nicht wesentlich geändert, weil sich auf die Größe des Abstandsfaktors AF und des Mikroluftporengehaltes L 300 im wesentlichen die kleinen kugeligen und annähernd kugeligen Luftporen auswirken.

Bei dem in der „Anleitung“ für die Bestimmung festgelegten Vorgehen werden also auch die nicht durch Luftporenbildner erzeugten, im Prüfzustand luftgefüllten Poren berücksichtigt. Die sich dadurch bei der Bewertung der so bestimmten Luftporenkennwerte möglicherweise ergebenden Abweichungen von der zugrunde liegenden Vorstellung dürften klein sein, weil ihr Anteil im Bereich der Mikroluftporen gering ist, weil wenigstens einige dieser Poren sicherlich wie Luftporen wirken und weil die an die Luftporenkennwerte gestellten Anforderungen auf diese Vorgehensweise abgestimmt sind.

2.2 Anwendung

Für die Beurteilung eines ausreichenden Gehaltes des Betons an Mikroluftporen werden in der Bundesrepublik Deutschland außer dem Luftgehalt L_d des Frischbetons in bestimmten Fällen (siehe Abschnitt 1) die am Festbeton ermittelten Luftporenkennwerte

Luftgehalt L_a ,

Abstandsfaktor AF und

Mikroluftporengehalt L 300

angewendet. Diese Kennwerte sollen dann Auskunft darüber geben, ob die Anzahl der wirksamen Luftporen genügend groß und der Abstand jedes Punktes des Zementsteins von der nächsten Luftpore genügend klein ist (Abstandsfaktor AF) und ob der Mikroluftporengehalt L 300 genügend groß ist. Der Luftgehalt L_a des Festbetons wird zur Gesamtbeurteilung der Betonbeschaffenheit und zum Ver-

gleich mit dem Luftgehalt L_d des Frischbetons herangezogen. Da in sachgerechtem Luftporenbeton mit bisher üblichen Luftporenbildnern mit Prüfzeichen des Instituts für Bautechnik, Berlin, gleichmäßig verteilt Mikroluftporen abgestufter Größe entstehen und der Mikroluftporengehalt L_{300} bei Vorhandensein eines ausreichend kleinen Abstandsfaktors AF in der Regel ausreichend groß ist, siehe u. a. [10], kann in solchen Fällen auf die aufwendigere Bestimmung des Mikroluftporengehaltes L_{300} verzichtet werden. Die alleinige Ermittlung des Abstandsfaktors AF und des Luftgehaltes L_a des Festbetons genügt zur Beurteilung aber nicht, wenn die vorher genannte Voraussetzung nicht zutrifft, d. h. wenn z. B. der Luftporenbildende Betonzusatz nicht zu den bewährten Luftporenbildnern zu rechnen ist und wie bei den kleinen gasgefüllten Kunststoffhohlkugeln nur sehr feine Mikroluftporen in den Frischbeton einführt. In solchen Fällen muß zur Beurteilung eines ausreichenden Gehaltes an Mikroluftporen mit Luftporenkennwerten des Festbetons unbedingt auch der Mikroluftporengehalt L_{300} mitherangezogen werden. Siehe u. a. [10, 11].

2.3 Anforderungen

Anforderungen an einen oder mehrere Luftporenkennwerte des Betons gibt es in der Bundesrepublik Deutschland für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand und teilweise für Beton mit hohem Frostwiderstand sowie für die Wirksamkeitsprüfung von Luftporenbildnern und für die Wirksamkeitsprüfung von gleichzeitig zu Beton mit Fließmittel nach [3] verwendeten Luftporenbildnern und Fließmitteln.

Für den Luftgehalt L_d des Frischbetons sind die entsprechenden Anforderungen in den einschlägigen Vorschriften enthalten oder erwähnt, siehe Abschnitt 1 sowie u. a. [1, 2, 3, 5, 9, 10]. In der Regel enthalten diese Vorschriften Mindestwerte für den Luftgehalt L_d in Abhängigkeit vom Zuschlaggrößtkorn, teilweise in Abhängigkeit von anderen Kennwerten der Betonzusammensetzung, wie z. B. dem Mehlkorngesamtgehalt.

Für die Luftporenkennwerte des Festbetons sind die entsprechenden Anforderungen in der Bundesrepublik Deutschland in der Regel nicht verbindlich vorgeschrieben, wohl aber in einigen Vorschriften für die Wirksamkeitsprüfung von Betonzusatzmitteln erwähnt, siehe u. a. [3, 5]. Bei der Beurteilung des Betons mit Hilfe von Luftporenkennwerten des Festbetons werden folgende durch Untersuchungen belegte Grenzwerte zugrunde gelegt:

Abstandsfaktor AF : höchstens 0,20 mm

Mikroluftporengehalt L_{300}
(für Beton mit 32 mm Größtkorn): mindestens 1,5 %

3. Prüfkörper und Prüfflächen

3.1 Prüfkörper

In der „Anleitung“ wird unterschieden zwischen Prüfkörpern für die Wirksamkeitsprüfung von Betonzusatzmitteln und solchen, die in Zweifelsfällen aus Betonbauteilen zur Nachprüfung der Luftporenkennwerte herausgearbeitet werden.

Für die Wirksamkeitsprüfung sieht die „Anleitung“ – abweichend von den Wirksamkeitsprüfrichtlinien [5] – die Herstellung von Prüfwürfeln mit 15 cm Kantenlänge vor, weil solche Würfel einfacher zu handhaben sind und in jüngerer Zeit zunehmend an Stelle des 20-cm-Würfels angewendet werden. Um eine noch zuverlässigere Aussage über die Wirksamkeit der Luftporenbildner zu erhalten, ist – ebenfalls abweichend von den Wirksamkeitsprüfrichtlinien [5] – aus dem mittleren Bereich von zwei 15-cm-Würfeln je ein rund 10 cm breites und rund 4 cm dickes Betonprisma über die ganze Würfelhöhe rechtwinklig zur Herstelloberseite naß herauszusägen, von denen eine Fläche 10 cm x 15 cm jedes Prismas als Prüffläche verwendet wird, siehe dazu Bild 1 der „Anleitung“. Über die Betonzusammensetzung sowie über die Herstellung und Lagerung dieser Prüfkörper enthält die „Anleitung“ keine Angaben, dafür sind die Wirksamkeitsprüfrichtlinien [5] zugrunde zu legen.

Anlaß zu einer Prüfung der Luftporenkennwerte am Beton aus Bauteilen ist in der Regel das Auftreten von Frost- oder von Frost-Tausalz-Schäden auf einer bestimmten Bauteilfläche. Aus diesem Grunde ist dafür der Bohrkern von der betrachteten Bauteilfläche aus zu entnehmen. Auch die aus diesen Bohrkernen herauszusägenden zwei Betonprismen sollen unmittelbar an die betrachtete Bauteilfläche angrenzen, siehe dazu Bild 2 der „Anleitung“. Der Abstand zwischen diesen beiden Betonprismen sollte im geschliffenen Zustand mindestens 4 mm betragen, damit im allgemeinen dieselben Poren nicht zweimal gezählt werden. Von diesen beiden Prismen je Bohrkern werden jeweils beide rechtwinklig zur betrachteten Bauteilfläche stehenden Flächen von rund 14 cm x 4 cm als Prüffläche zum Auszählen der Poren herangezogen. Werden in Ausnahmefällen Bohrkern mit kleinerem Durchmesser als 15 cm aus dem Bauteil herausgearbeitet, so muß die Anzahl der Bohrkern der erforderlichen Prüffläche entsprechend vergrößert werden.

3.2 Prüfflächen

Eine sehr wichtige Voraussetzung für ein möglichst genaues Auszählen der Poren ist, daß die Prüffläche und die ihr gegenüberliegende Fläche eines Prismas planparallel zueinander verlaufen, daß die Prüffläche keine Ausbrüche aufweist sowie eben und ausreichend glatt geschliffen ist und daß sich die Porenränder eindeutig und klar darstellen. Um den Aufwand beim späteren Schleifen der Prüfflächen möglichst gering halten zu können, sollte hierauf bereits beim Heraussägen der Prismen geachtet und sollten die Sägeschnitte sehr sorgfältig geführt werden. Besonders geeignete Geräte und ganz besondere Sorgfalt sind jedoch beim Schleifen der Prüfflächen erforderlich, weil dabei sonst die Porenränder ausbrechen oder abgerundet werden und sich nicht mehr scharf genug darstellen. Dies ist erfahrungsgemäß eine der Hauptursachen für ungenaue Ergebnisse und vergrößert häufig auch den für die Bestimmung erforderlichen Zeitaufwand beträchtlich. Bewährt hat sich ein Schleifen mit einer Topfschleifscheibe in einer Schleifmaschine. Bei Anwendung von Schleifmaschinen muß beachtet werden, daß der abschließende Feinstschliff nur mit geringer Zustellung und mit geringem Vortrieb oder geringem Anpreßdruck der Schleifmaschine sowie mit viel Schleifflüssigkeit hergestellt werden

darf. Auch bei der Reinigung der geschliffenen Prüfflächen dürfen die Porenränder nicht beschädigt werden, wie z. B. durch zu gewalttames Vorgehen, und darf kein Schleifgut in den Poren verbleiben. Bei Beton geringer Festigkeit (Druckfestigkeit unter 20 N/mm^2) können unter Umständen besondere Maßnahmen notwendig werden, wie z. B. die Füllung der Poren der Prüfflächen vor dem Schleifen mit einem dünnflüssigen eingefärbten Gießharz unter Vakuum.

4. Mikroskopische Untersuchung

4.1 Geräte und Personal

Der Kernpunkt der Bestimmung der Luftporenkennwerte ist außer dem sachgerechten Schleifen der Prüfflächen (siehe Abschnitt 3.2) die mikroskopische Untersuchung des Festbetons, bei der die auf den Meßlinien liegenden Porensehnen und Feststoffstrecken sowie die Anzahl der Poren zu ermitteln und ggf. die Porensehnen nach Größen zu klassieren sind. Eine zuverlässige Bestimmung und eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sind auf Dauer nur zu erwarten, wenn das Verfahren der mikroskopischen Untersuchung einfach, die dabei verwendete Prüfeinrichtung bedienungsfreundlich und wenig fehleranfällig und das Prüfpersonal zuverlässig sowie erfahren oder entsprechend geschult ist.

Erforderlich ist mindestens eine Prüfeinrichtung mit Kreuzmeßtisch, Beleuchtung, Stereomikroskop und Zählgerät, siehe auch [12]. Der Kreuzmeßtisch muß in den beiden horizontalen Richtungen, d. h. in Meßlinienrichtung und rechtwinkelig dazu, beweglich sein. Als zweckmäßig hat sich erwiesen, daß der Meßtisch in Meßlinienrichtung durch einen Motor geschwindigkeitsgesteuert bewegt und dabei auch der vom Meßtisch zurückgelegte Weg gemessen werden kann. – Die Beleuchtungseinrichtung für den Prüfkörper muß ausreichend stark sein und sorgfältig so auf die Prüffläche gerichtet werden, daß die Poren und ihre Ränder vom Prüfer leicht erkannt werden können.

Das Stereomikroskop muß eine 50- bis 100fache Vergrößerung des betrachteten Teils der Prüffläche ermöglichen. Da die Betrachtung der geschliffenen Prüffläche durch das Stereomikroskop während längerer Zeit sehr ermüdend sein kann, enthalten zahlreiche Prüfeinrichtungen auch eine Fernsehkamera und einen Monitor. Die Fernsehkamera muß dann an das Stereomikroskop angeschlossen werden, und zwar möglichst an einen zusätzlichen Schacht des Stereomikroskopes, damit ohne Veränderung der Mikroskopeinstellung sowohl das nicht räumlich erscheinende Bild auf dem Monitor als auch das Bild beim direkten Durchsehen durch das Stereomikroskop angesehen werden kann. Für die Bestimmung mit Fernsehanlage kann es erforderlich sein, daß mit dem Stereomikroskop auch eine über das 100fache hinausgehende Vergrößerung möglich ist (siehe Abschn. 4.2).

Das Zählgerät dient dazu, die gemessenen Porensehnen und Feststoffstrecken zu addieren und ggf. zu registrieren sowie die Ergebnisse und die Anzahl der Poren zu speichern. Soll auch der Mikroluftporengehalt bestimmt werden, so ist außer dem Zählwerk ein

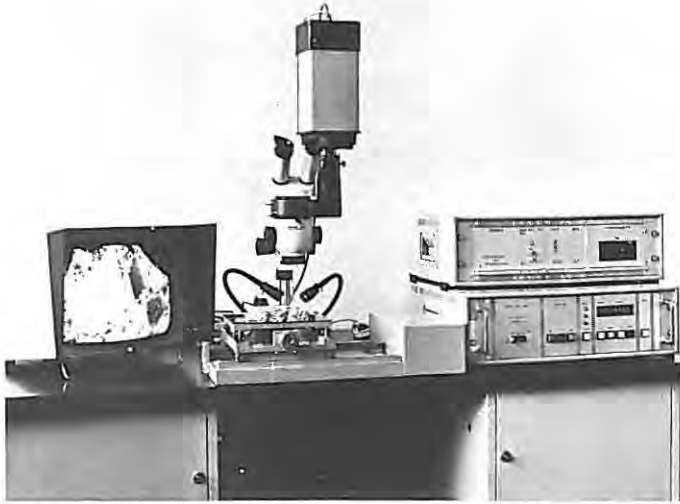


Bild 1 Prüfeinrichtung des Forschungsinstituts der Zementindustrie zur Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton

Gerät für die Klassierung der Porensehnenlängen erforderlich (siehe u. a. [12]), wenn die Klassierung nicht im Rechner erfolgt. Bild 1 zeigt die derzeit im Forschungsinstitut der Zementindustrie für die Bestimmung der Luftporenkennwerte verwendete Prüfeinrichtung, die eine Weiterentwicklung des Gerätes nach [12] ist und bei dem alle Meßergebnisse von einer Kassette aufgenommen und an einen Kleinrechner weitergegeben sowie dort ausgewertet werden.

4.2 Verfahren

Die Grundlagen für das Auszählen der Poren wurden bereits mit den Begriffen in Abschnitt 2.1 erläutert. Danach sind beim Auszählen die Länge aller auf den Meßlinien liegenden Sehnen der bei 50- bis 100facher Vergrößerung sichtbaren Hohlräume, die nicht als Risse erkennbar sind und deren Sehnenlänge auf der Meßlinie 4,00 mm nicht überschreitet, und die Länge der auf den Meßlinien liegenden Feststoffstrecken zu bestimmen. Einbezogen werden dabei nur Poren mit einer auf der Meßlinie liegenden Porensehnenlänge von höchstens 4,00 mm, um den bisher beim Auszählen gewonnenen Erfahrungsstand nicht zu verlassen. Zur Zeit wird jedoch untersucht, ob dieser Grenzwert ohne wesentliche Veränderung der Aussage in Zukunft auf höchstens 6,00 mm erhöht werden kann.

Um eine möglichst zuverlässige Aussage zur jeweiligen Fragestellung zu bekommen, sollen die Meßlinien bei Betonprüfkörpern für die Wirksamkeitsprüfung von Betonzusatzmitteln – abweichend von den Festlegungen der Wirksamkeitsprüfrichtlinien [5] – über die Prüffläche verteilt, und zwar zu je einem Drittel im Bereich nahe der Herstelleroberseite des Prüfkörpers, im Bereich nahe der Unterseite und dazwischen im mittleren Bereich (siehe Abschnitt 4.1

und Bild 3 der „Anleitung“) liegen. Bei Betonprüfkörpern für die Untersuchung des Betons aus Bauteilen sollen die Meßlinien alle im Bereich nahe der betrachteten Bauteilfläche (siehe Abschnitt 4.2 und Bild 3 der „Anleitung“) liegen. Soll dabei als Luftporenkennwert auch der Mikroluftporengehalt L 300 bestimmt werden, so müssen die ermittelten Porensehnenn beim Auszählen auch in 25 bis 30 unmittelbar aufeinanderfolgende Porensehnennklassen eingeteilt werden, sofern bei der Auswertung nicht alle Einzelergebnisse in den Rechner gegeben und dort klassiert werden.

Wird für das Auszählen der Poren eine Fernsehkamera verwendet, so ist – insbesondere bei „Schwarz-Weiß-Bildern“ – dafür zu sorgen, daß dabei sowohl durchscheinende, weitgehend farblose als auch sehr dunkle bis schwarze Zuschläge nicht als Poren angesehen werden. Für die Bestimmung der Luftporenkennwerte ist das unmittelbare Auszählen der Poren mit dem Stereomikroskop maßgebend (Referenzverfahren) und muß daher das Ergebnis beim Auszählen mit Fernsehanlage mit dem Ergebnis der unmittelbaren Bestimmung mit Stereomikroskop praktisch übereinstimmen. Diese Übereinstimmung erfordert umfangreiche Vergleichsversuche zwischen beiden Auszählverfahren, Prüfpersonal mit entsprechender Erfahrung und in der Regel für das Auszählen mit Hilfe der Fernsehanlage eine noch stärkere Vergrößerung der Prüffläche, die dann auch über das 100fache hinausgehen kann.

Für Beton mit einem Zuschlaggrößtkorn von 16 mm und von 32 mm wurde die für das Auszählen erforderliche Gesamtlänge der Meßstrecke auf 240 cm festgelegt, weil sie sich für die Bestimmung als ausreichend lang erwiesen hat, siehe u. a. [10]. Für Beton mit kleinerem Zuschlaggrößtkorn ist es vertretbar, die erforderliche Gesamtlänge der Meßstrecke in Anlehnung an die entsprechenden Vorschriften der USA [6] bei einem Größtkorn von 8 mm auf 180 cm, bei einem Größtkorn von 4 mm auf 140 cm und bei einem Größtkorn von 2 mm auf 120 cm zu ermäßigen.

5. Berechnung der Luftporenkennwerte

Für die Berechnung der Luftporenkennwerte werden die Porenzahl, die Porensehnennstrecke, die Feststoffstrecke und der Stoffraumanteil des Zementsteins benötigt, für die Berechnung des Mikroluftporengehaltes L 300 außerdem die Einteilung der Porensehnennstrecke und der dazugehörigen Porenanzahl in 25 bis 30 unmittelbar aufeinanderfolgende Klassen. Als Stoffraumanteil des Zementsteins wird in der Regel der Zementleimgehalt bei der Betonherstellung zugrunde gelegt, weil seine Ermittlung am Festbeton sehr aufwendig und insbesondere, wenn die Ausgangsstoffe nicht verfügbar sind, auch nicht sehr genau ist und weil die Luftporenkennwerte durch die bei der Betonherstellung üblichen Schwankungen des Zementleimgehaltes erfahrungsgemäß nicht wesentlich beeinflusst werden. Ist der Zementleimgehalt bei der Betonherstellung nicht bestimmt worden, so können statt dessen die Sollwerte für den Zement- und den Wassergehalt eingesetzt werden. Werden diese Angaben für den untersuchten Beton angezweifelt, so sollten die Luftporenkennwerte für zwei Grenzwerte eines geschätzten Bereiches des Zementleimgehaltes bestimmt und angegeben werden.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu beachten, daß der errechnete Luftgehalt L_a des Festbetons nicht gleich dem Luftgehalt L_d des Frischbetons zu sein braucht, bei sachgerechtem Luftporenbeton dafür aber ein brauchbarer Anhaltswert ist, wie Untersuchungen [10] gezeigt haben. Der bei der Bestimmung des Mikroluftporengehaltes L_{300} mit anfallende Luftporengehalt L_s des Festbetons (siehe Tafel 2 der „Anleitung“), der nur als Rechengröße bestimmt und als Luftporenkennwert nicht verwendet wird, muß mit dem Luftgehalt L_a des Festbetons weitgehend übereinstimmen. Weicht er, bezogen auf den Luftgehalt L_a , mehr als 10 % davon ab, so sollte geprüft werden, ob ein Fehler vorliegt.

Die Errechnung des Abstandsfaktors AF und des Mikroluftporengehaltes L_{300} ist in der „Anleitung“ genau beschrieben. Für den Abstandsfaktor gibt es zwei Modellvorstellungen, siehe auch [13]. Da beide Modellvorstellungen unterschiedliche, aber etwas zu große Abstandsfaktoren AF liefern, wird jeweils der kleinere der beiden Abstandsfaktoren bestimmt und angegeben, was durch die Zuordnung des Verhältniswertes zwischen Zementsteinvolumen und Luftgehalt L_a in der „Anleitung“ geregelt wird.

Die Errechnung des Mikroluftporengehaltes L_{300} ist etwas aufwendiger, bei der Speicherung aller Ergebnisse auf einer Kassette und ihrer Auswertung mit einem Rechner jedoch nur für die Programmierstellung. Wenn die zuletzt genannte Einrichtung zur Verfügung steht, sollte bei Bestimmung der Luftporenkennwerte des Festbetons in Zukunft außer dem Abstandsfaktor AF auch stets der Mikroluftporengehalt L_{300} mitbestimmt werden, da mit dem gleichzeitigen Erhalten des bereits erwähnten Luftporengehaltes L_s und der Porenverteilung eine Kontrolle der übrigen Luftporenkennwerte des Festbetons und eine weitergehende Beurteilung des Festbetons möglich ist.

Für die Berechnung des Mikroluftporengehaltes L_{300} enthält die „Anleitung“ in Tafel 2 ein ausführliches Beispiel, aus dem alle Rechenschritte hervorgehen. Für den Fall, daß in Spalte 10 der Tafel 2 einmal negative Luftporengehalte auftreten, sieht die „Anleitung“ die Anwendung einer der drei folgenden Möglichkeiten:

- a) Inkaufnehmen von negativen Luftporengehalten in Spalte 10 der Tafel 2 oder
- b) Verschieben der Klassengrenzen in Spalte 1 der Tafel 2 oder
- c) Anpassung der Anzahl der Poren in Spalte 2 der Tafel 2 durch Erhöhung bzw. Erniedrigung der Zahlen der benachbarten Klassen

vor, weil alle drei Möglichkeiten zu nahezu übereinstimmenden Ergebnissen für den Mikroluftporengehalt L_{300} führen. Zum besseren Verständnis der Tafel 2 der „Anleitung“ ist noch anzumerken, daß für die Spalten 10 und 11 – entgegen der Definition in [9] – aus Gründen der Einheitlichkeit und der Praktikabilität die Bezeichnung „Luftporengehalt“ gewählt wurde und daß der Porendurchmesser in Spalte 8, dessen Zahl nach Umrechnung in μm identisch mit der oberen Klassengrenze in Spalte 1 ist, keine Begrenzung der Porengröße darstellt, sondern als Nenndurchmesser und Rechenwert der

jeweiligen Klasse zugeordnet ist, weil die Klassen ja durch die Porensehnen begrenzt sind und jeder gemessenen Sehne ein in der Regel größerer Porendurchmesser entspricht.

Im Prüfbericht sollte neben den errechneten Luftporenkennwerten (Festbetonluftgehalt La, Abstandsfaktor AF und Mikroluftporengehalt L 300) stets auch der bei der Auswertung der Ergebnisse zugrunde gelegte Zementgehalt und Wassergehalt des untersuchten Betons sowie sein Zuschlaggrößtkorn und die bei der mikroskopischen Untersuchung durchgeführte Meßstrecke angegeben werden.

SCHRIFTTUM

- [1] DIN 1045 – Beton- und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung, Dezember 1978.
- [2] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton 78) und Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 16/1978 vom 15. 12. 1978 sowie die Ergänzung für Fahrbahndecken aus Beton mit Fließmittel (ZTV Beton, Erg. 80) und Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 10/1980 vom 27. 5. 1980 des Bundesministers für Verkehr, Abt. Straßenbau.
- [3] Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten (ZTV-K 76) und Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/1976 vom 1. 4. 1976 sowie die dazugehörigen Ergänzungen. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau.
- [4] Richtlinien für die Zuteilung von Prüfzeichen für Betonzusatzmittel (Prüfrichtlinien), Fassung März 1973. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 4 (1973) Nr. 3, S. 86/88 (wird zur Zeit überarbeitet).
- [5] Richtlinien für die Prüfung der Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 6 (1975) Nr. 1, S. 10/14 und S. 19/20 (wird zur Zeit überarbeitet).
- [6] ASTM C 457-71: Microscopical determination of air void content and parameters of the air void system in hardened concrete.
- [7] Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons – Beziehungen und Prüfverfahren. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 167. Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1964.
- [8] Sommer, H.: Zur mikroskopischen Ermittlung der Luftporenkennwerte an erhärtetem Straßenbeton. Dissertation TU Wien, 1975.
- [9] Merkblatt für die Verwendung von Luftporenbildnern für Beton (Ausgabe 1980). Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Köln 1980.
- [10] Bonzel, J., und E. Siebel: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. beton 27 (1977) H. 4, S. 153/157; H 5, S. 205/211, und H. 6, S. 237/244; ebenso Betontechnische Berichte 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 55/104.
- [11] Sommer, H.: Ein neues Verfahren zur Erzielung der Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betons. Betonwerk + Fertigteil-Technik 44 (1978) H. 9, S. 476/484.
- [12] Lusche, M.: Ein neues Gerät zur Bestimmung von Luftporenkennwerten am erhärteten Beton. Materialprüfung 16 (1974) Nr. 4, S. 106/109.
- [13] Manns, W.: Bemerkungen zum Abstandsfaktor als Kennwert für den Frostwiderstand von Beton. beton 20 (1970) H. 6, S. 253/255; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 89/94.

Anleitung für die Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton – Mikroskopische Luftporenuntersuchung

(Fassung 1981)

1. Allgemeines

Mit Hilfe der am Festbeton bestimmten Luftporenkennwerte (Luftgehalt La, Mikroluftporengehalt L 300 und Abstandsfaktor AF, siehe Tafel 1) kann die Luftporenverteilung beurteilt und kann festgestellt werden, ob der erhärtete Beton die für Luftporenbeton geforderten Luftporen enthält. Diese Anleitung beschreibt die Herstellung und Prüfung der Betonprüfkörper und die Auswertung der Prüfergebnisse für die Bestimmung der Luftporenkennwerte sowohl an in Formen hergestellten als auch an aus Betonbauteilen herausgearbeiteten Betonproben. Mit ihr soll die Bestimmung dieser Kenngrößen vereinheitlicht werden.

Andere als in dieser Anleitung beschriebene Verfahren, wie z. B. makrofotografische Sehnenmeßverfahren und automatische Bildanalyse, können ebenfalls zur Bestimmung der Luftporenkennwerte verwendet werden, wenn sie nachweislich zu den gleichen Ergebnissen führen wie die hier beschriebenen Verfahren.

Tafel 1 Luftporenkennwerte

Frischbeton	Luftgehalt (Ld) in Vol.-%	Gehalt an Verdichtungs-poren und Luftporen
Festbeton	Luftgehalt (La) in Vol.-%	Gehalt der bei 50- bis 100facher Vergrößerung im Zementstein sichtbaren Poren (außer Rissen) mit einer Sehnenlänge von höchstens 4,00 mm auf der Meßlinie
	Mikroluftporengehalt L 300 in Vol.-%	Gehalt an kleinen kugeligen oder annähernd kugeligen Luftporen bis zu einem Durchmesser von höchstens 0,30 mm (300 µm)
	Abstandsfaktor (AF) in mm	Ein aus einem idealisierten Porengefüge abgeleiteter Kennwert für den größten Abstand eines Punktes des Zementsteins von der nächsten Luftpore

2. Begriffe

Folgende Begriffe, die sinngemäß [1] entsprechen, werden in dieser Anleitung verwendet:

Verdichtungs-poren: Hohlräume, die aufgrund unvollständiger Verdichtung im Beton vorhanden sind

mit Wasser gefüllte Poren:	Hohlräume, die im Frischbeton mit Wasser und im Festbeton nach dem Austrocknen mit Luft gefüllt sind
Luftporen:	Kugelige und annähernd kugelige Poren, die vorwiegend durch Luftporenbildner erzeugt worden sind

3. Geräte

Zum Herausarbeiten der Prüfkörper, zur Bearbeitung der Prüfflächen und zum Auszählen der Poren sind an Geräten eine Betonsäge, eine Schleifmaschine zum Ebenschleifen und zur Herstellung eines Feinstschliffes und ein Porenzählgerät erforderlich. Zum Porenzählgerät gehören ein motorisch oder von Hand betriebener Kreuzmeßtisch, ein Stereomikroskop mit 50- bis 100facher Vergrößerung, eine Beleuchtungseinrichtung und eine Zählleinrichtung mit Anzeige für die Summe der Feststoffstrecken und der Porensehnen sowie für die Anzahl der Poren. Wird eine an das Mikroskop ange-setzte Fernsehkamera mit angeschlossenem Monitor verwendet, so ist die Vergrößerung so zu wählen, daß die dabei erhaltenen Ergebnisse mit den Ergebnissen der ohne Fernsehübertragung direkt mit dem Mikroskop ausgezählten Poren übereinstimmen.

Für die Bestimmung des Mikroluftporengehalts L 300 wird eine Klassiereinrichtung benötigt, in der die gemessenen Porensehnen in Klassen verschiedener Sehnengröße eingeteilt werden können.

4. Prüfkörper

4.1 Prüfkörper für die Wirksamkeitsprüfung von Luftporenbildnern

Wird für Luftporenbildner eine Wirksamkeitsprüfung im Sinne von [2] durchgeführt, so ist aus zwei Betonwürfeln von 15 cm Kantenlänge je ein rd. 10 cm breites, rd. 15 cm hohes und rd. 4 cm dickes Prisma naß so herauszusägen, daß die Schnittflächen rechtwinklig zur Herstellungsoberseite liegen (siehe Bild 1). Nur eine Seite rd. 15 cm x rd. 10 cm jedes Prismas dient nach Vorbereitung (siehe Abschnitt 5) als Prüffläche zum Auszählen der Poren.

4.2 Prüfkörper aus Bauteilen mit Frost- bzw. Frost-Tausalz-Einwirkung

Sollen die Luftporenkennwerte am Festbeton von Bauteilen bestimmt werden, so ist dazu je Bestimmung – von der der Frost- bzw. der Frost-Tausalz-Einwirkung ausgesetzten Betonfläche ausgehend – mindestens ein Bohrkern mit einem Durchmesser von 15 cm und mit einer allseitigen Höhe von mindestens 5 cm zu entnehmen.¹⁾

¹⁾ In der Regel werden aus dem zu untersuchenden Bauteil mindestens 2 Bohrkern e naß herausgebohrt, bei geschädigten Bauteilen je 1 Bohrkern aus der Schadensstelle und aus dem nicht geschädigten Bereich in der Nähe der Schadensstelle.

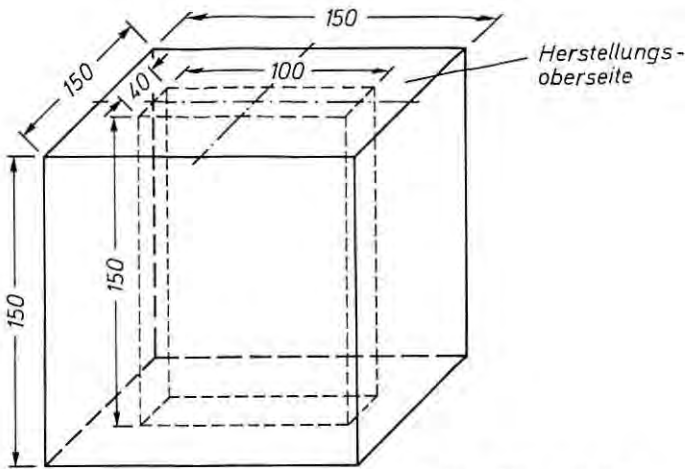


Bild 1 Prisma 150 mm x 100 mm x 40 mm aus dem 150-mm-Würfel

Von der unmittelbar der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Einwirkung ausgesetzten Betonfläche des Bohrkerns ausgehend werden zwei Prismen mit einer Länge von rd. 14 cm, einer Höhe von rd. 4 cm und einer Dicke von rd. 3 cm so aus dem Bohrkern naß herausgesägt, daß die Schnittflächen rd. 14 cm x rd. 4 cm rechtwinklig zu der unmittelbar der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Einwirkung ausgesetzten Betonfläche des Bohrkerns liegen (siehe Bild 2). Beide Schnittflächen rd. 14 cm x rd. 4 cm jedes Prismas dienen nach Vorbereitung (siehe Abschnitt 5) als Prüfflächen zum Auszählen der Poren.

Für spezielle Untersuchungszwecke, wie z.B. Bestimmung der Luftporenkennwerte in unterschiedlicher Höhe des Bohrkerns, können die Prismen auch so aus dem Bohrkern naß herausgesägt werden, daß die Schnittflächen der Prismen parallel zu der unmittel-

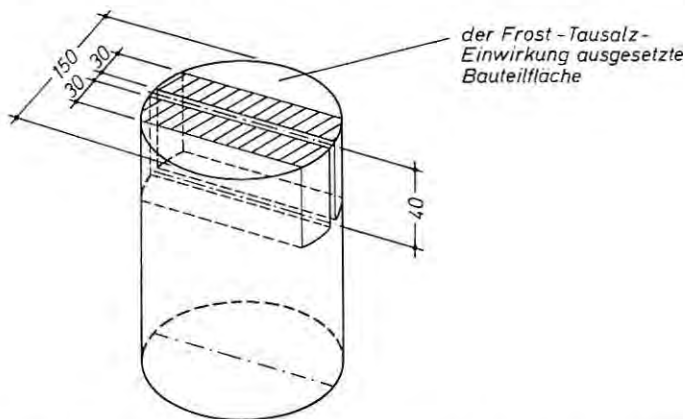


Bild 2 Zwei Prismen rd. 140 mm x rd. 40 mm x rd. 30 mm aus einem Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm

telbar der Frost- bzw. der Frost-Tausalz-Einwirkung ausgesetzten Betonfläche des Bohrkerns liegen.

5. Vorbereitung der Prüfflächen

Die vorgesehenen Prüfflächen (bei den aus den Würfeln nach Abschnitt 4.1 herausgesägten Prismen je eine Fläche mit den Abmessungen von rd. 10 cm x rd. 15 cm, bei den aus den Bohrkernen nach Abschnitt 4.2 herausgesägten Prismen jeweils beide Flächen mit den Abmessungen von rd. 14 cm x rd. 4 cm) werden naß so lange geschliffen, bis sie eben sind. Darüber hinaus sollen die beiden Prüfflächen bzw. die Prüffläche und die der Prüffläche gegenüberliegende Fläche möglichst planparallel sein. Anschließend wird auf der Prüffläche mit geringem Vortrieb sowie geringer Zustellung der Schleifmaschine und – damit sich die Poren nicht mit Schleifrückständen zusetzen – mit viel Schleifflüssigkeit bei dem Schleifvorgang ein Feinstschliff hergestellt. Bei Schleifgeräten ohne Vortrieb darf dabei nur mit geringem Anpreßdruck geschliffen werden. Für den Feinstschliff können Schleifscheiben mit einer Körnung nicht größer als D 30 nach DIN 848 oder andere, wenigstens gleichwertige Verfahren angewendet werden. In der Regel muß eine Probe bei Herstellung des Feinstschliffs mehrmals überschliffen werden. Nach dem Feinstschliff sind die Platten, insbesondere die Prüfflächen, z. B. mit Wasser und Preßluft oder einer geeigneten Bürste (siehe z. B. ASTM C 457-71 [3]) zu reinigen. Bei der Reinigung – auch bei der Reinigung unter Wasser mit Ultraschall – ist dafür zu sorgen, daß die Porenränder dadurch nicht beschädigt werden. Die geschliffenen Flächen müssen nach dem Feinstschliff eben und glatt sein (im trockenen Zustand einen matten Glanz aufweisen). Die Porenränder dürfen nicht ausgebrochen oder gerundet, sondern müssen scharfkantig sein. Reproduzierbare Ergebnisse sind nur bei sorgfältigem und sachgerechtem Feinstschliff und Reinigen der Prüffläche zu erwarten.

6. Mikroskopische Untersuchung

Die Prüfkörper werden so auf den Kreuzmeßtisch gelegt, daß die durchfahrenden Meßlinien parallel zur Herstelloberseite des Prüfkörpers nach Abschnitt 4.1 bzw. parallel zur unmittelbar der Frost- bzw. der Frost-Tausalz-Einwirkung ausgesetzten Betonfläche des Bohrkerns nach Abschnitt 4.2 verlaufen.

Auf den Prüfflächen der Prüfkörper nach Abschnitt 4.1 sind je vier Meßlinien im oberen, im mittleren und im unteren Bereich anzuordnen. Die jeweils zusammengehörenden vier Meßlinien sollen einen Abstand von rd. 6 mm voneinander haben, die oberste Meßlinie und die unterste Meßlinie sollen rd. 6 mm unterhalb des oberen bzw. oberhalb des unteren Randes der Prüffläche liegen, siehe Bild 3.

Auf diese Weise ergibt sich eine Meßstrecke von 1,20 m je Würfel und von 2,40 m je Beton.

Auf den Prüfflächen der Prüfkörper nach Abschnitt 4.2 sind fünf Meßlinien anzuordnen, die untereinander einen Abstand von rd. 6 mm haben. Die oberste Meßlinie soll 2 bis 3 mm unter der unmittel-

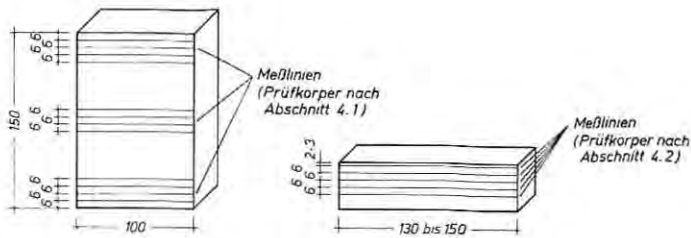


Bild 3 Verteilung der Meßlinien auf den Prüfflächen (Abmessungen in mm)

bar der Frost- bzw. der Frost-Tausalz-Einwirkung ausgesetzten Betonfläche des Bohrkerns liegen, siehe Bild 3. Auf diese Weise ergibt sich eine Meßstrecke von 0,60 m je Prüffläche, von 1,20 m je Prisma und von 2,40 m je Bohrkern.

Bei der Porenzählung sind alle bei 50- bis 100facher Vergrößerung sichtbaren Poren im Zementstein mit einer Sehnenlänge auf der Meßlinie von höchstens 4,00 mm zu erfassen. Ausgenommen hiervon sind nur offensichtliche Risse. Erstreckt sich eine Pore über zwei Meßlinien, so ist ihr Anteil auf beiden Meßlinien mitzuzählen. Sollten trotz sorgfältigen Schleifens Porenränder ausgebrochen sein und sollte eine solche Ausbruchstelle beim Auszählen auf einer Meßlinie liegen, so ist bei der Ermittlung der Sehnenlänge oder bei der Entscheidung, ob die betreffende Pore in die Auswertung einzubeziehen ist, vom ergänzten Kreisquerschnitt auszugehen (siehe Bild 4).

Für die Bestimmung des Luftgehaltes L_a und des Abstandsfaktors AF sind folgende Größen zu ermitteln und, soweit es sich um Summen von Meßstrecken handelt, mit einer Genauigkeit von mindestens 0,01 cm für die Errechnung nach den Abschnitten 7.1 und 7.2 zu verwenden:

- Summe der Feststoffstrecken (ΣF)
- Summe der Porensehnenstrecken (ΣP) und
- Anzahl der Poren (A).

Für die Bestimmung der Porenverteilung und des Mikroluftporengehalts L_{300} muß zusätzlich die Anzahl der Sehnen bestimmter Größenklassen ermittelt werden. Hierfür sollen die Sehnenlängen von $\leq 10 \mu\text{m}$ bis $4000 \mu\text{m}$ in 25 bis 30 unmittelbar aufeinanderfol-

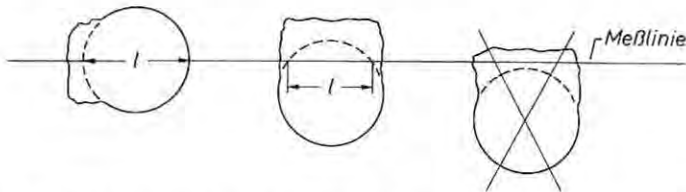


Bild 4 Bei der mikroskopischen Auszählung zu berücksichtigende Sehnenlängen l bei ausgebrochenen Porenrändern

gende Klassen eingeteilt werden. Die Werte müssen mit einer Genauigkeit von mindestens 10 µm in die Errechnung nach Abschnitt 7.3 eingehen.

7. Errechnung der Luftporenkennwerte

Für die Errechnung des Luftgehalts La, des Abstandsfaktors AF und des Mikroluftporengehalts L 300 werden außer den Ergebnissen des Abschnittes 6 benötigt:

Zementgehalt z in kg/m³,

Wassergehalt w in kg/m³ und

Dichte des Zements ρ_z in kg/dm³.

In der Regel werden der Zementgehalt und der Wassergehalt für die Bestimmung der Luftporenkennwerte nicht gesondert bestimmt, sondern aus vorhandenen Prüfwerten der Betonherstellung entnommen. Sind diese Prüfwerte nicht zu erhalten, so sind die Sollwerte zugrunde zu legen. Als Dichte des Zements dürfen die Werte nach DIN 1164 Teil 4 verwendet werden. Im Prüfbericht sind der Luftgehalt La und der Mikroluftporengehalt L 300 auf 0,1 Vol.-% und der Abstandsfaktor auf 0,01 mm genau anzugeben.

7.1 Luftgehalt La:

$$\text{Luftgehalt } La = \frac{\sum P \cdot 100}{\sum P + \sum F} \quad [\text{Vol.-%}]$$

7.2 Abstandsfaktor AF:

Stoffraumanteil des Zements

$$v_z = \frac{z}{1000 \cdot \rho_z} \cdot 100 \quad [\text{Vol.-%}]$$

Stoffraumanteil des Wassers

$$v_w = \frac{w}{1000 \cdot \rho_w} \cdot 100 = \frac{w \cdot 100}{1000 \cdot 1} \quad [\text{Vol.-%}]$$

Volumen des Zementsteins

$$v_z + v_w$$

Verhältnis Zementstein zu Luftgehalt

$$\frac{v_z + v_w}{La}$$

durchschnittliche Sehnenlänge der Poren

$$l = \frac{\sum P}{A} \quad [\text{cm}]$$

Spezifische Oberfläche

$$O = \frac{4}{l} \quad \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \right]$$

Tafel 2 Mikroluftporengehalt L 300, Luftporengehalt Ls und Porenverteilung des Festbetons

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Klassen-Nr.	Klassen für die gemessenen Sehnenlängen (Impulse)	Anzahl der gemessenen Sehnen	Anzahl der gemessenen Sehnen je cm Meßlinie (1/cm)	$\frac{2 \cdot 10^8}{\pi \cdot 5d \cdot 5m}$ (1/cm ²)	Spalte 3 x Spalte 4 (1/cm ³)	Anzahl der Poren je cm ³ Beton und Klasse (1/cm ³)	Summenanzahl der Poren je cm ³ Beton (1/cm ³)	Porendurchmesser d _{LP} (µm)	Porenhalt beim Durchmesser d _{LP} (10 ³ µm ³)	Luftporengehalt je Klasse (%)	Summe des Luftporengehaltes (%)
1	0 ... 2	65	0,27 083	848 826	229 890	140 461	140 461	10	0,5236	0,007	0,01
2	3 ... 4	59	0,24 583	363 783	89 430	9 370	149 831	20	4,1888	0,004	0,01
3	5 ... 6	83	0,34 583	231 498	80 060	6 495	156 326	30	14,137	0,009	0,02
4	7 ... 8	104	0,43 333	169 765	73 565	24 422	180 748	40	33,510	0,082	0,10
5	9 ... 10	88	0,36 667	134 025	49 143	13 160	193 908	50	65,450	0,086	0,19
6	11 ... 12	78	0,32 500	110 716	35 983	11 103	205 011	60	113,10	0,126	0,31
7	13 ... 16	136	0,56 667	43 905	24 880	13 409	218 420	80	268,08	0,359	0,67
8	17 ... 20	80	0,33 333	34 412	11 471	3 926,0	222 345,0	100	523,60	0,206	0,88
9	21 ... 24	64	0,26 667	28 294	7 545,1	2 340,1	224 685,4	120	904,78	0,212	1,1
10	25 ... 28	52	0,21 667	24 023	5 205,1	2 683,0	227 368,3	140	1 436,8	0,385	1,5
11	29 ... 32	29	0,12 083	20 873	2 522,1	600,0	227 968,3	160	2 144,7	0,129	1,6
12	33 ... 36	25	0,10 417	18 453	1 922,2	613,0	228 581,4	180	3 053,6	0,187	1,8
13	37 ... 40	19	0,07 917	16 536	1 309,1	622,7	229 203,9	200	4 188,8	0,261	2,1
14	41 ... 44	11	0,04 583	14 979	686,6	230,2	229 434,1	220	5 575,3	0,128	2,2
15	45 ... 48	8	0,03 333	13 691	456,4	36,1	229 470,3	240	7 238,2	0,026	2,2
16	49 ... 52	8	0,03 333	12 606	420,2	79,5	229 549,8	260	9 202,8	0,073	2,3
17	53 ... 56	7	0,02 917	11 681	340,7	114,0	229 663,8	280	11 494	0,131	2,4

Tafel 2 (Fortsetzung)

18	57 ... 60	5	0,02083	10 882	226,7	32,3	229 696,1	300	14 137	0,046	2,5 (L 300)
19	61 ... 70	12	0,05000	3 887,8	194,4	53,9	229 749,9	350	22 449	0,121	2,6
20	71 ... 80	10	0,04167	3 372,8	140,5	16,4	229 766,4	400	33 510	0,055	2,6
21	81 ... 90	10	0,04167	2 978,3	124,1	35,2	229 801,6	450	47 713	0,168	2,8
22	91 ... 100	3	0,03333	2 666,5	88,9	72,0	229 873,6	500	65 450	0,471	3,3
23	101 ... 200	24	0,10000	169,2	16,9	14,4	229 887,9	1 000	523 599	0,754	4,0
24	201 ... 300	6	0,02500	101,66	2,54	1,03	229 889,0	1 500	1 767 146	0,182	4,2
25	301 ... 400	5	0,02083	72,653	1,51	0,81	229 889,8	2 000	4 188 790	0,338	4,5
26	401 ... 500	3	0,01250	56,526	0,71	0,52	229 890,3	2 500	8 181 231	0,425	5,0
27	501 ... 600	1	0,00417	46,258	0,19	0,19	229 890,5	3 000	14 137 167	0,272	5,2
28	601 ... 800	0	0	18,176	0	0	0	4 000	33 510 322	0	5,2 (Ls)

Die Spalten der Tafel 2 enthalten folgende Angaben bzw. Rechenwerte:

Spalte 0: Nummer der Klasse

Spalte 1: Grenzwerte der Klassen für die gemessenen Sehnenlängen (Angabe in Impulsen; ein Impuls \triangleq 0,005 mm)

Spalte 2: Anzahl der gemessenen Sehnen je Klasse

Spalte 3: Anzahl der Sehnen je Klasse dividiert durch die gesamte Meßstrecke (Rechenwert); Beispiel: Wert der Spalte 2 dividiert durch 240 cm

Spalte 4: Rechenwert je Klasse zur Bestimmung der Porenverteilung ($m \triangleq$ Mittel der Zahlen in Spalte 1; $d \triangleq 1 +$ Differenz der Zahlen in Spalte 1; Beispiel für Klasse 4: $m = 7,5$; $d = 2$)

Spalte 5: Rechenwert zur Bestimmung der Porenverteilung

Spalte 6: Anzahl der Poren je cm^3 Beton der jeweiligen Klasse (ergibt sich als Differenz zwischen der Zahl der Klasse und der Zahl der darunterstehenden nächsten Klasse in Spalte 5)

Spalte 7: Summierung der Zahlen in Spalte 6 bis zur jeweiligen Klasse

Spalte 8: Nennporendurchmesser d_{LP} der jeweiligen Klasse (ergibt sich durch Multiplikation des oberen Grenzwertes der Klasse in Spalte 1 mit $5 \mu\text{m}$)

Spalte 9: Porenhalt wird errechnet mit der Gleichung $v = d_{LP}^3 \frac{\pi}{6}$

Spalte 10: Luftporengehalt der Klasse²⁾ (ergibt sich durch Multiplikation der Werte der Spalten 6 und 9)

Spalte 11: Der Luftporengehalt ergibt sich durch Summierung der Werte der Spalte 10 bis zur jeweiligen Klasse

²⁾ Die dabei in Spalte 10 u. U. auftretenden negativen Luftgehalte dürfen verwendet werden; sie können jedoch vermieden werden, wenn die Klassengrenzen (Spalte 1) entsprechend verschoben werden. Hilfsweise kann hierfür die Zahl der Sehnen einer Klasse (Spalte 2) um dieselbe Zahl erniedrigt werden, wie sie in der benachbarten kleineren Klasse erhöht wurde.

Wenn das Verhältnis von Zementsteinvolumen zu Luftgehalt des

Festbetons gleich oder kleiner als 4,33 ist $\left(\frac{v_z + v_w}{L_a} \leq 4,33 \right)$,

dann ist der Abstandsfaktor AF_1 zu berechnen.

$$AF_1 = \frac{(v_z + v_w)}{L_a} \cdot \frac{10}{O} \quad [\text{mm}]$$

Wenn das Verhältnis von Zementstein zu Luftporengehalt größer

4,33 ist $\left(\frac{v_z + v_w}{L_a} > 4,33 \right)$,

dann ist der Abstandsfaktor AF_2 zu berechnen

$$AF_2 = \frac{30}{O} \left[1,4 \left(\frac{v_z + v_w}{L_a} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad [\text{mm}]$$

7.3 Mikroluftporengehalt L 300:

Der Mikroluftporengehalt wird in Anlehnung an [4] errechnet. Diese Errechnung berücksichtigt, daß die Wahrscheinlichkeit, eine Pore beim Sägen oder Schleifen anzuschneiden und nachher mit einer Meßlinie zu durchfahren, bei kleinem Porendurchmesser viel geringer ist als bei größerem Durchmesser. Weiterhin geht in die Rechnung ein, daß es wahrscheinlicher ist, eine Sehne zu durchfahren als den Porendurchmesser.

Das Rechenschema und ein Beispiel sind in Tafel 2 enthalten. Spalte 11 der Tafel 2 enthält bei Klasse 18 den Mikroluftporengehalt L 300 und bei Klasse 28 den auf diese Weise errechneten Luftporengehalt L_s des Festbetons, der bei sachgerechtem Luftporenbeton mit dem nach Abschnitt 7.1 errechneten Luftgehalt L_a des Festbetons weitgehend übereinstimmen muß.

8. Schrifttum

- [1] Merkblatt für die Verwendung von Luftporenbildnern für Beton. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1980.
- [2] Richtlinien für die Prüfung der Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 6 (1975) Nr. 1, S. 10/14 und S. 19/20.
- [3] ASTM C 457-71.
- [4] Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons – Beziehungen und Prüfverfahren. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 167, Berlin 1964, S. 3/57.