

**Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel  
Prüfverfahren**Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton  
Deutsche Fassung EN 480-11 : 1998**DIN**  
**EN 480-11**

ICS 91.100.30

Deskriptoren: Prüfverfahren, Zusatzmittel, Beton, Mörtel, Einpreßmörtel

Admixtures for concrete, mortar and grout — Test methods — Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete; German version EN 480 : 1998

Adjuvants pour béton, mortier et coulis — Méthodes d'essais — Partie 11: Détermination des caractéristiques des vides d'air dans le béton durci; Version allemande EN 480-11 : 1998

**Die Europäische Norm EN 480-11 : 1998 hat den Status einer  
Deutschen Norm.****Nationales Vorwort**

Diese Europäische Norm wurde von der Arbeitsgruppe 5 „Zugabewasser“ (Federführung: Niederlande) des Technischen Komitees CEN/TC 104 „Beton (Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis)“ (Sekretariat: Deutschland) unter deutscher Mitwirkung erarbeitet.

Der für die deutsche Mitarbeit zuständige Arbeitsausschuß im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. ist der als Spiegelausschuß zum CEN/TC 104/SC 3 „Betonzusatzmittel“ eingesetzte Arbeitsausschuß 07.02.03 „Zugabewasser“ des Normenausschusses Bauwesen (NABau).

Fortsetzung 11 Seiten EN

— Leerseite —

ICS 91.100.10; 91.100.30

Deskriptoren: Baustoff, Beton, Festmörtel, Mörtelstoff, Einpreßmörtel, Betonzusatzmittel, Prüfung, Luftleer, Luft

**Deutsche Fassung**

**Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel  
Prüfverfahren**

**Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton**

Admixtures for concrete, mortar and grout — Test methods — Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete

Adjuvants pour béton, mortier et coulis — Méthodes d'essais — Partie 11: Détermination des caractéristiques des vides d'air dans le béton durci

Diese Europäische Norm wurde von CEN am 16. Oktober 1997 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, der Tschechischen Republik und dem Vereinigten Königreich.

**CEN**

EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

European Committee for Standardization

Comité Européen de Normalisation

**Zentralsekretariat: rue de Stassart 36, B-1050 Brüssel**

## Inhalt

	Seite		Seite
<b>Vorwort</b> .....	2	<b>7 Mikroskopisches Verfahren</b> .....	5
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	3	7.1 Grundlagen .....	5
<b>2 Normative Verweisungen</b> .....	3	7.2 Aufzeichnung der Werte .....	5
<b>3 Begriffe</b> .....	3	<b>8 Berechnungen</b> .....	6
3.1 Luftpore .....	3	8.1 Ermittelte Daten .....	6
3.2 Luftporengehalt, Symbol $A$ .....	3	8.2 Gesamtlänge der Meßlinien .....	6
3.3 Zementsteingehalt, Symbol $P$ .....	3	8.3 Gesamtanteil des Luftporenvolumens .....	6
3.4 Spezifische Oberfläche der Luftporen, Symbol $\alpha$ .....	3	8.4 Gesamtanzahl der gemessenen Sehnen .....	6
3.5 Abstandsfaktor, Symbol $\bar{L}$ .....	3	8.5 Spezifische Oberfläche der Luftporen .....	6
3.6 Verteilung der Luftporen .....	3	8.6 Verhältnis Zementstein : Luftgehalt .....	6
3.7 Gehalt an Mikroluftporen, Symbol $A_{300}$ .....	3	8.7 Abstandsfaktor .....	6
3.8 Meßlinie .....	3	8.8 Mikroluftporengehalt .....	6
3.9 Länge der Meßlinien, Symbol $T_{\text{tot}}$ .....	3	8.9 Porengrößenverteilung .....	6
3.10 Sehnenlänge, Symbol $l$ .....	3	8.9.1 Berechnungsgrundlage .....	6
3.11 Klassifizierung der Sehnenlängen .....	4	8.9.2 Berechnung der Sehnenhäufigkeit .....	6
<b>4 Zusammenfassung des Prüfverfahrens</b> .....	4	8.9.3 Berechnung der Porenhäufigkeit .....	6
<b>5 Geräte</b> .....	4	8.9.4 Berechnung der Porengrößenverteilung .....	7
5.1 Allgemeines .....	4	8.9.5 Berechnung des Luftgehalts .....	7
5.2 Vorbereitung der Probekörper .....	4	8.9.6 Darstellung der Ergebnisse .....	7
5.3 Mikroskopische Analyse .....	4	8.9.7 Spalteninhalte .....	7
<b>6 Herstellung und Vorbereitung der Prüfkörper</b> ...	4	<b>9 Prüfbericht</b> .....	7
6.1 Herstellung der Prüfkörper .....	4	<b>Anhang A</b> (informativ) Theoretische Berechnungsgrundlage für Tabelle 1 ....	9
6.2 Vorbereitung der Prüfflächen .....	4	<b>Anhang B</b> (informativ) Beispiel für die Berechnung der Luftporenverteilung ....	10

## Vorwort

Diese Europäische Norm wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 104 „Beton — Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muß den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis April 1999, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis April 1999 zurückgezogen werden.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen:

Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, die Tschechische Republik und das Vereinigte Königreich.

## 1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm beschreibt ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Luftporengefüges in einer Festbetonprobe, die luftporenbildende Zusatzmittel enthält. Das Luftporengefüge wird durch die folgenden Kenngrößen beschrieben, die in Abschnitt 3 näher definiert sind:

- i) gesamter Luftporengehalt
- ii) spezifische Oberfläche eingeführter Luftporen
- iii) Abstandsfaktor
- iv) Porengrößenverteilung
- v) Gehalt an Mikroluftporen

Das beschriebene Verfahren ist ausschließlich für Probekörper aus Beton geeignet, dessen ursprüngliches Mischungsverhältnis genauestens bekannt ist, wobei der Probekörper für dieses Mischungsverhältnis repräsentativ ist. Dies ist im allgemeinen nur bei im Labor hergestelltem Beton der Fall.

## 2 Normative Verweisungen

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

EN 480-1

Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel — Prüfverfahren — Teil 1: Referenzbeton und Referenzmörtel für Prüfungen

EN 934-2

Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel — Teil 2: Betonzusatzmittel, Definitionen und Anforderungen

ISO 2736-2

Concrete tests — Making of test specimens — Part 2: Making and curing of test specimens for strength tests

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Definitionen:

### 3.1 Luftpore

Ein von Zementstein umschlossener Hohlraum, in den Luft oder ein anderes Gas vor dem Erstarren des Zementleims eingeführt wurde. Dies gilt nicht für Poren submikroskopischer Abmessungen, wie z. B. die Eigenporosität von hydratisiertem Zementleim. Im Sinne dieses Prüfverfahrens werden alle bei der Prüfvergrößerung sichtbaren Poren im Zementstein, die eine Sehnenlänge von bis 4 mm aufweisen und die offensichtlich keine Risse sind, berücksichtigt.

### 3.2 Luftporengehalt $A$

Der Volumenanteil der Luftporen am Gesamtvolumen des Betons in %.

### 3.3 Zementsteingehalt $P$

Der Volumenanteil des Zementsteins am Gesamtvolumen des Betons in %. Dies ist die Summe aus den Volumenanteilen des Zements, des Zugabewassers und jeglicher

vorhandener Zusatzmittel. Zum Zweck dieses Prüfverfahrens wird er aus den Zugabemengen zur Herstellung des Prüfbetons errechnet.

### 3.4 Spezifische Oberfläche der Luftporen $\alpha$

Ein aus dem Verhältnis der Gesamtoberfläche der Luftporen zu ihrem Volumen errechneter Kennwert. Die Einheiten sind  $\text{mm}^{-1}$ . Das angewandte Berechnungsverfahren geht von einer mittleren Sehnenlänge aus und gilt für jedes System kugelförmiger Poren.

### 3.5 Abstandsfaktor $\bar{L}$

Ein errechneter Kennwert für den größten Abstand eines jeden Punktes im Zementstein von der Peripherie einer Luftpore, der durch den Zementstein hindurch gemessen ist. Die Einheiten sind mm. Die Berechnung dieses Kennwertes basiert auf der Annahme, daß alle vorhandenen Luftporen gleich groß und im Zementstein gleichmäßig verteilt sind, indem das Gesamtvolumen und die Gesamtoberfläche des idealisierten Porengefüges dem tatsächlichen Porengefüge gleichgesetzt werden.

ANMERKUNG: Dieses Modell ist zwar eine Näherung, es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß der ermittelte Wert größer ist als der tatsächliche Wert.

### 3.6 Verteilung der Luftporen

Eine Zusammenstellung rechnerisch ermittelter Kennwerte bezüglich der Anzahl und/oder des Volumens der Luftporen unterschiedlicher Durchmesser innerhalb des Zementsteins.

ANMERKUNG: Das für diese Berechnung angewandte Modell geht von der Annahme aus, daß ausschließlich Luftporen bestimmter abgestufter Durchmesser vorhanden sind. Diese Modellannahme nimmt daher eine Zwischenstellung zwischen den tatsächlichen Gegebenheiten und dem Modell mit dem einheitlichen Durchmesser ein, das für die Berechnung des Abstandsfaktors anzuwenden ist. Eine graphische Darstellung der Verteilung ist durch Aufzeichnung des zu jeder Porengröße zuzuordnenden Porenvolumens möglich, entweder als Volumenanteil des Zementsteins oder als Anteil am gesamten Porenvolumen.

### 3.7 Gehalt an Mikroluftporen $A_{300}$

Ein rechnerisch ermittelter Kennwert, der die Zuordnung von Luftgehalt und Luftporen mit einem Durchmesser von bis zu 0,300 mm (300  $\mu\text{m}$ ) dargestellt. Dieser Kennwert wird aus der Berechnung der Porengrößenverteilung abgeleitet.

### 3.8 Meßlinie

Eine der über die polierte Prüfoberfläche verlaufenden Linien, die durch die relative Bewegung von Mikroskop und Probekörper während der Prüfung entstehen.

### 3.9 Länge der Meßlinien $T_{\text{tot}}$

Die auf der Prüffläche während der Prüfung gemessene Gesamtlänge der Meßlinien. Sie besteht aus zwei Anteilen, der Summe der Schnittlinien mit den Feststoffbestandteilen,  $T_s$  und der Summe der Luftporensehnen,  $T_a$ . Für beide Anteile sind die Einheiten mm.

### 3.10 Sehnenlänge $l$

Der Abschnitt einer Meßlinie über einer Luftpore, Einheiten sind  $\mu\text{m}$ .

### 3.11 Klassifizierung der Sehnenlängen

Die Längen der Sehnen durch die einzelnen Luftporen werden auf der Basis der Sehnenlängensklassen zugeordnet. Die Gesamtanzahl der Sehnen in einer bestimmten Klasse  $i$ , wird mit dem Symbol  $C_i$  bezeichnet. 8.9 und Tabelle 1 enthalten Einzelheiten zu den Klassengrenzen.

## 4 Zusammenfassung des Prüfverfahrens

Zur Herstellung von Probekörpern für die Porenbestimmung werden Proben des erhärteten Betons mit Luftporenbildnern senkrecht zur Herstellungsoberseite geteilt. Diese Probekörper werden dann geschliffen, um eine glatte und ebene, für mikroskopische Untersuchungen geeignete Oberfläche zu erhalten.

Die Untersuchung des Luftporengefüges erfolgt durch Ablesen einer Reihe von Meßlinien, die parallel zur Herstellungsoberfläche verlaufen. Die Anzahl der von den Meßlinien geschnittenen Luftporen wird ebenso notiert, wie die einzelnen Sehnenlängen der durch die Poren laufenden Meßlinien. Eine mathematische Analyse der Daten ermöglicht eine Beschreibung des Luftporengefüges in Form von Parametern.

Andere Verfahren der Luftporenanalyse wie z. B. das Punktzählverfahren dürfen angewandt werden, vorausgesetzt sie können nachweislich im wesentlichen die gleichen Ergebnisse für die geforderten Luftporenkennwerte hervorbringen, wie das hier beschriebene Verfahren. Im Streitfalle muß das in dieser Norm beschriebene Verfahren angewandt werden.

## 5 Geräte

### 5.1 Allgemeines

Folgende Geräte gelten als für dieses Prüfverfahren geeignet. Andere als die beschriebenen Geräte dürfen eingesetzt werden, sofern damit nachweislich befriedigende Ergebnisse zu erzielen sind. Bei einzelnen Prüfmessungen sind gegebenenfalls nicht alle Geräte erforderlich.

### 5.2 Vorbereitung der Probekörper

- Diamantsäge
- Schleifmaschine. Eine oder mehrere geeignete Geräte zur Herstellung einer glatten Oberfläche der geforderten Qualität. Als geeignete Alternativen gelten Geräte mit einer Gußeisenscheibe, üblicherweise mit einem Mindestdurchmesser von 400 mm, unter Verwendung von Siliciumcarbid Pulver unterschiedlicher Körnung (üblicherweise 120, 60, 30, 16 und 12  $\mu\text{m}$ ) oder Geräte mit speziellen Schleifscheiben der verschiedenen Körnungen.
- Kühlschrank und Trockenschrank
- Verschiedene Chemikalien zur Behandlung der polierten Oberfläche einschließlich Glycerin, Stempeltinte (matt oder mattschwarz, nicht wasserlöslich), Zinkpaste und Gipspulver (Körnung  $\leq 3 \mu\text{m}$ ).

### 5.3 Mikroskopische Analyse

- Ein mit Motor oder per Hand betriebener Kreuzmeßtisch. Dieser besteht aus einem Objektträger, auf dem der Probekörper befestigt ist. Der Objektträger ist auf Führungsschrauben montiert, mit deren Hilfe er leicht auf und ab zu bewegen ist. Für die Bewegung senkrecht zur Prüffläche, die beim Herstellen des Probekörpers obenliegend entsteht, ist eine Führungsschraube und für die Bewegung parallel zu dieser

Fläche sind zwei Führungsschrauben erforderlich. Die Führungsschrauben sollten für die mit ihrer Hilfe ausgemessene Gesamtstrecke eine Meßgenauigkeit von 1 % ermöglichen.

- Beleuchtungseinrichtung
- Eine Vorrichtung zur Bestimmung der Meßlinienlängen und der Gesamtanzahl der durchgeschnittenen Luftporen, eingeteilt in die Klassen auf der Basis einzelner Sehnenlängen.
- Stereomikroskop, Vergrößerung  $100 \pm 10$ . Das Gerät muß über die zur Gruppenklassifizierung der gemessenen Sehnen nach 7.2 notwendige Auflösung verfügen. Andere bildgebende Mittel, wie z. B. eine an das Mikroskop montierte Fernsehkamera mit angeschlossenem Monitor dürfen eingesetzt werden. Hierbei ist das für die Messungen verwendete Bild so auszuwählen, daß die Auszählung der Luftporen zu Ergebnissen führt, die mit denen durch augenscheinliche Überprüfung mittels eines Mikroskops erzielten Ergebnissen übereinstimmen.

ANMERKUNG: Der Einsatz bildgebender Systeme mit fehlerhafter Vergrößerung kann zu unterschiedlichen Durchmessern der kleinsten sichtbaren Poren führen. Dies kann zu abweichenden Zählungen und damit zu unterschiedlichen Ergebnissen für die Berechnung der Kennwerte führen.

## 6 Herstellung und Vorbereitung der Prüfkörper

### 6.1 Herstellung der Prüfkörper

Zwei Prüfkörper mit einer Mindestgröße von 150 mm sind aus dem zu prüfenden Beton herzustellen. Für die Prüfung von Zusatzmitteln nach EN 934-2 muß der Beton EN 480-1 entsprechen. Als geeignete geometrische Prüfkörperformen gelten Würfel einer Kantenlänge von 150 mm oder Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm. Herstellung und Nachbehandlung der Prüfkörper muß nach ISO 2736-2 erfolgen.

Nach einer Lagerung von mindestens sieben Tagen ist ein Prisma von etwa 100 mm Breite, 150 mm Höhe und 40 mm Dicke ungefähr aus der Mitte der Prüfkörper herauszuschneiden, so daß die vier Schnittflächen senkrecht zur Prüffläche, die beim Herstellen des Probekörpers obenliegend entsteht, verlaufen, siehe Bild 1. Eine der größeren Flächen jedes Prismas ist nach Probenvorbereitung für die mikroskopische Prüfung zu verwenden.

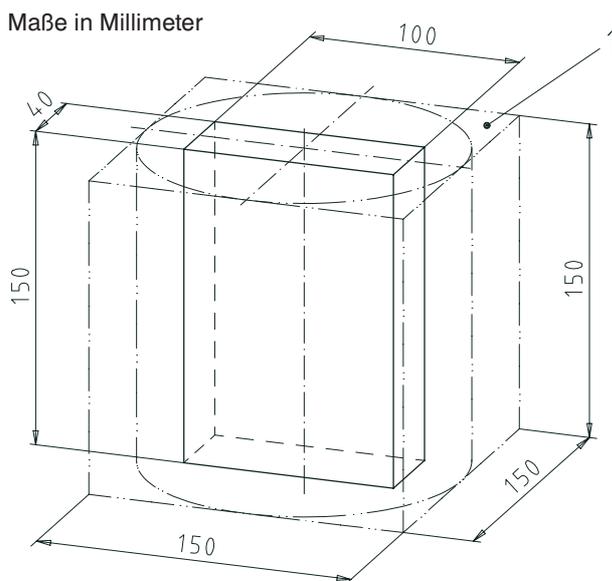
### 6.2 Vorbereitung der Prüfflächen

Die für die Prüfung vorgesehenen Oberflächen, eine je Probekörper, sind naßzuschleifen bis sie eben sind.

Nach dem Naßschliff ist eine feingeschliffene Prüffläche herzustellen, die nach Abschluß dieser Maßnahme von jeglichem Rückstand zu reinigen ist.

ANMERKUNG: Die dafür notwendige Zeit ist von dem eingesetzten Gerät abhängig, beträgt jedoch gewöhnlich etwa 5 Minuten. Während dieses Vorgangs ist darauf zu achten, daß die Prüfoberfläche und die gegenüberliegende Fläche des Prismas möglichst planparallel sind.

Das jeweilige Verfahren, das im Einzelfall anzuwenden ist, hängt vom verfügbaren Gerät ab. Das Feinschliffverfahren dient der Herstellung einer für die mikroskopische Prüfung des Luftporengefüges innerhalb des Betons geeigneten Oberfläche. Eine geeignete Oberfläche sollte in trockenem Zustand einen Mattglanz und keine erkennbaren Unebenheiten zwischen dem Zementstein und der Zuschlagoberfläche aufweisen. Die Kanten der Poren



1 Prüffläche, die beim Herstellen des Probekörpers obenliegend entsteht.

**Bild 1: Herstellung eines Prismas der Größe 150 mm × 100 mm × 40 mm aus dem Probekörper (etwaige Abmessungen)**

müssen scharf sein und sollten weder beschädigt noch abgerundet sein. Bei allen Phasen des Schliff- und Feinschliffverfahrens ist darauf zu achten, daß die Poren nicht mit Schleifstaub verstopft werden.

Nach Abschluß des Feinschliffs sind die Prüfoberflächen durch Entfernung jeglicher Schleifreste zu säubern. Geeignet ist die Verwendung von Wasser, Druckluft oder einer geeigneten Feinbürste. Während des Säuberungsvorgangs ist darauf zu achten, daß keine Porenkanten beschädigt werden. Dies kann besonders im Falle von Ultraschallsäuberung wichtig sein.

Reproduzierbare Ergebnisse sind nur bei sorgfältigem und angemessenem Feinschliff und Säuberung der Prüfflächen zu erzielen.

Die Oberfläche des Probekörpers kann einer Spezialbehandlung unterzogen werden, um den Kontrast zwischen den Luftporen und dem Zementstein zu verbessern, soweit das vorgesehene Meßverfahren dies erforderlich macht. Es ist davon auszugehen, daß dies bei automatischen Verfahren notwendig ist. Hierzu ist zunächst Tinte auf die Oberfläche des Probekörpers mit Hilfe eines Stempelkissens oder Rollers aufzutragen. Ein Eindringen der Tinte in die Luftporen ist zu vermeiden. Die Probe verbleibt nun 4 h in einem Trockenschrank bei 50°C. Anschließend ist sie mit Zinkpaste zu bedecken und abzukühlen, bevor jeglicher Zinküberschuß entfernt wird. Abschließend ist die Oberfläche mit feinem Gipspulver zu bedecken, das in die mit Zinkpaste gefüllten Luftporen zu pressen ist. Das überschüssige Gipspulver ist dann mit einem Schaber zu entfernen.

## 7 Mikroskopisches Verfahren

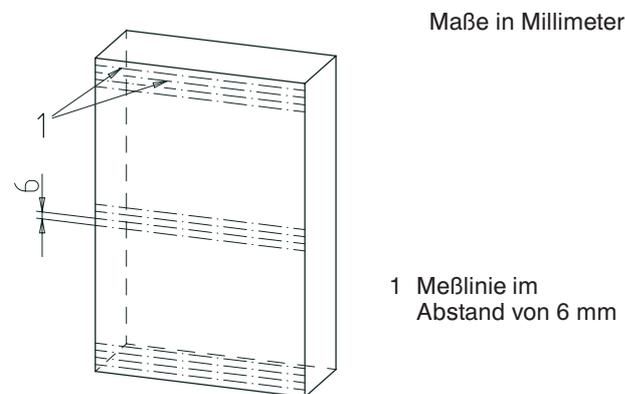
### 7.1 Grundlagen

Die Prüfkörper sind so auf dem Kreuzmeßtisch anzubringen, daß die abzulesenden Meßlinien parallel zur Einfüllseite des Prüfkörpers verlaufen.

Für jeden Prüfkörper ist eine Meßstrecke von mindestens 1200 mm erforderlich, was eine Gesamtlänge der Meßlinien von mindestens 2400 mm je Prüfung ergibt. Die Anzahl der Messungen auf der Oberfläche des Prüf-

körpers ist abhängig von der geforderten Gesamtlänge. Da es häufig sehr schwierig ist, eine einwandfreie Oberfläche bis an die Kanten des Prüfkörpers herzustellen, muß sichergestellt sein, daß kein beschädigter Bereich zur Meßlinie hinzugerechnet wird. Die Meßlinien sind wie folgt zu ziehen, siehe auch Bild 2:

- Vier Meßlinien sind im oberen Bereich der Meßfläche entlang der Breite zu ziehen. Der Abstand zwischen der oberen Kante des Prüfkörpers und der obersten Linie sowie zwischen den folgenden Linien sollte etwa 6 mm betragen.
- Weitere vier Meßlinien sind im unteren Bereich der Meßfläche zu ziehen. Der Abstand zwischen der unteren Kante des Prüfkörpers und der untersten Linie sowie zwischen den folgenden Linien sollte etwa 6 mm betragen.
- Weitere Meßlinien sind mit einem gegenseitigen Abstand von etwa 6 mm im mittleren Bereich der Meßfläche so zu ziehen, daß die geforderte Gesamtmeßlänge erreicht wird. Mindestens vier Meßlinien in diesem Bereich sind erforderlich. Falls jedoch auf der Oberfläche beschädigte Bereiche vorhanden sind, könnten mehr Linien notwendig sein, um die Mindestlänge der Meßlinien sicherzustellen.



**Bild 2: Verteilung der Meßlinien auf der Meßfläche**

### 7.2 Aufzeichnung der Werte

Die Oberfläche ist durch ein Mikroskop mit einer Vergrößerung von  $(100 \pm 10) \times$  zu betrachten. Die Vergrößerung darf während der Messung nicht verändert werden. Die Probe ist entlang der in 7.1 beschriebenen Meßlinien zu betrachten. Während der Messung sind die beiden Führungsschrauben, die die Bewegungen parallel zur Einfülloberseite ermöglichen, so einzusetzen, daß die Werte für

- den Feststoffanteil der Meßlinie  $T_s$  und
  - die Porensehnen  $T_a$
- getrennt ermittelt werden können.

Die Summe dieser beiden Werte ergibt die Gesamtlänge der Meßlinien  $T_{tot}$ .

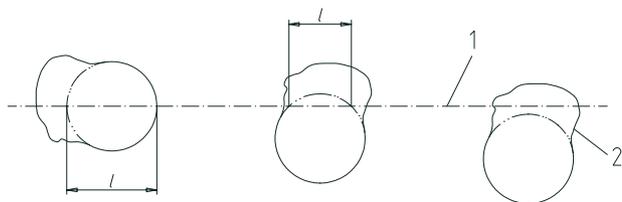
Darüber hinaus muß eine gesonderte Aufzeichnung über die Anzahl der Sehnen, die durch Schnitte der Meßlinien mit Luftporen entstehen, unter folgenden Gesichtspunkten aufgestellt werden:

- Die Länge jeder Sehne ist auf 5 µm abzuschätzen.
- Die Gesamtanzahl der Sehnen jeder Klasse ist unter Berücksichtigung der in Tabelle 1 und in 8.9 genannten Klassengrenzen festzuhalten.

Dieses Verfahren ermöglicht eine Einteilung aller ermittelten Sehnen in 28 Klassen unterschiedlicher Länge. Aus dieser Klassifizierung läßt sich dann die entsprechende Porengrößenverteilung errechnen. Bei der Zählung sind

alle bei der Prüfvergrößerung sichtbaren Sehnen zu berücksichtigen, die Poren im Zementstein mit einer gemessenen Sehnenlänge von 0 bis 4000 µm durchschneiden. Die einzige Ausnahme hierbei bilden offensichtliche Risse.

Falls trotz sorgfältigen Schleifens die Porenkanten brechen und ein solcher Bruch auf der Meßlinie liegt, dann ist die Sehnenlänge anhand des vervollständigten Kreisquerschnitts zu bestimmen. Das Verfahren zur Bestimmung der jeweiligen Sehnenlänge ist in Bild 3<sup>1)</sup> dargestellt.



- 1 Meßlinie  
2 Sehnenlänge  $l = 0$

**Bild 3: Bestimmung der Sehnenlänge,  $l$ , für Poren, deren Kanten während der mikroskopischen Prüfung beschädigt worden sind**

## 8 Berechnungen

### 8.1 Ermittelte Daten

Die folgenden Daten ergeben sich aus den Meßwerten, die während der Prüfung ermittelt werden. Zu Berechnungszwecken sind die Summen der an beiden Probekörpern für den gleichen Prüfbeton ermittelten folgenden Werte zu bilden.

- Zementsteingehalt berechnet aus dem Mischungsverhältnis,  $P$
- Summe des Feststoffanteils zu Meßlinien,  $T_s$
- Summe der Sehnen auf den Luftporen,  $T_a$
- Anzahl der einzelnen Sehnen auf den Luftporen in den verschiedenen Größenklassen,  $C_i$

### 8.2 Gesamtlänge der Meßlinien

Sie ist aus der Summe der Feststoffstrecken und Kugelporenschneckenstrecken zu berechnen.

$$T_{\text{tot}} = T_s + T_a \text{ in mm} \quad (1)$$

Die Gesamtlänge der Meßlinien muß mindestens 2400 mm betragen.

### 8.3 Gesamtanteil des Luftporenvolumens

Er ist als der Anteil der Gesamtmeßlinie, der Luftporen schneidet, zu berechnen.

$$A = \frac{T_a \times 100}{T_{\text{tot}}} \text{ in \% Volumenanteil} \quad (2)$$

<sup>1)</sup> Automatische Bildanalysen sind nicht in der Lage diese Korrekturen durchzuführen, was zu Fehlern bei der Endauswertung führen kann.

### 8.4 Gesamtanzahl der gemessenen Sehnen

Sie ergibt sich aus der Summe der Sehnenanzahl je Sehnenlängensklasse.

$$N = \sum C_i \quad (3)$$

### 8.5 Spezifische Oberfläche der Luftporen

$$\alpha = \frac{4 N}{T_a} \text{ in mm}^{-1} \quad (4)$$

### 8.6 Verhältnis Zementstein : Luftgehalt

Dies errechnet sich aus dem Verhältnis des durch das Mischungsverhältnis bestimmten Volumeninhalts des Zementsteins,  $P$ , zum Gesamtluftgehalt,  $A$ , wie in Gleichung (2) berechnet.

$$R = \frac{P}{A} \quad (5)$$

### 8.7 Abstandsfaktor

Die für diese Berechnung verwendete Gleichung ist abhängig vom Wert  $R$ , der nach Gleichung (5) berechnet wird. Falls  $R > 4,342$ , ist die Gleichung (6) anzuwenden, falls  $R \leq 4,342$ , ist Gleichung (7) anzuwenden.

$$\bar{L} = \frac{3 [1,4 (1 + R)^{1/3} - 1]}{\alpha} \text{ in mm} \quad (6)$$

oder

$$\bar{L} = \frac{P \cdot T_{\text{tot}}}{400 \cdot N} \text{ in mm} \quad (7)$$

### 8.8 Mikroluftporengehalt

Der Gehalt an Mikroluftporen  $A_{300}$  ist direkt von dem errechneten Wert in Tabelle 1, Spalte 10 für Klasse 18 abzulesen.

### 8.9 Porengrößenverteilung

#### 8.9.1 Berechnungsgrundlage

Die Porengrößenverteilung errechnet sich aus der Sehnenlängenverteilung, die bei der Messung ermittelt wird. Die berechnete Verteilung basiert auf der idealisierten Annahme, daß nur ein Satz von Luftporen mit Nenndurchmessern vorhanden ist. Als Nenndurchmesser gelten die Durchmesser, die der maximalen Sehnenlänge jeder Klasse entsprechen.

Die für diese Berechnung erforderlichen Daten sind die Gesamtlänge der Meßlinien,  $T_{\text{tot}}$ , und die Verteilung der Sehnenlängen. Ein praktisches Beispiel ist in Anhang B angeführt.

#### 8.9.2 Berechnung der Sehnenhäufigkeit

Die gemessenen Sehnen sind entsprechend ihrer Länge, die bis auf 5 µm genau festgestellt wird, nach Tabelle 1 zu klassifizieren. Die Klassennummern und Klassengrenzen sind in den Spalten 1 und 2 angegeben. Durch Vergleich mit den Klassengrenzen ist jede Sehne einer Klasse zuzuordnen, z. B. ist eine Sehne der Länge von 150 µm Klasse 11 zuzuordnen. Die Gesamtanzahl der Sehnen je Klasse ist in Spalte 3 einzutragen. Die Anzahl der Sehnen je Millimeter Meßlinie ist dann durch Division der Werte in Spalte 3 durch  $T_{\text{tot}}$  zu berechnen und die Ergebnisse sind in Spalte 4 einzutragen.

### 8.9.3 Berechnung der Porenhäufigkeit

Nicht jede Pore im Zementstein wird bei der Messung durch eine Meßlinie geschnitten, da die Meßlinien nicht die gesamte Betonprobe abdecken. Zur Ermittlung der Größenverteilung der Luftporen ist daher die Anzahl der Poren je mm<sup>3</sup> Beton zu berechnen. Es ist möglich, den Anteil der Gesamtanzahl der Luftporen zu berechnen, der eine Sehne mit bestimmter Länge der angeschnittenen Poren enthält. Der Wert dieses Anteils je Klasse von Sehnenlängen ist in Spalte 5 ausgewiesen. Aus der Division der Spalte 4 durch die Spalte 5 ergibt sich somit die Gesamtanzahl der Poren innerhalb eines mm<sup>3</sup> Beton, der Sehnen einer bestimmten Klasse beinhalten kann. Dieser Wert ist in Spalte 6 einzutragen.

ANMERKUNG: Die Werte in Spalte 5 sind in jedem Fall konstant und mit folgender Gleichung ermittelt:

$$\text{Wert} = \frac{\pi \times (5 + l_{\max} - l_{\min}) \cdot (l_{\max} + l_{\min})}{4 \times 10^6} \text{ in mm}^2$$

wobei:

$l_{\max}$  und  $l_{\min}$  die maximalen und minimalen Sehnenlängen innerhalb einer Klasse sind.

Der Faktor 5 im Zähler der Gleichung ergibt sich aus dem Abrunden aller Sehnen auf 5 µm. Die Gleichung selbst basiert auf der statistischen Abschätzung der Porendichte.

### 8.9.4 Berechnung der Porengrößenverteilung

Eine Sehne einer bestimmten Länge ist in jeder beliebigen Pore mit einem Durchmesser zu finden, der größer als die Sehnenlänge ist. Deshalb umfaßt der Wert in Spalte 6 für jede beliebige Klasse alle Poren eines Durchmessers, der größer als die Obergrenze dieser Klasse ist sowie Poren mit Durchmessern innerhalb dieser Klasse. Um ein Maß für die Anzahl von Poren eines Durchmessers, der dem der Obergrenze einer Klasse entspricht, zu erhalten, ist der Wert in Spalte 6 für die nächsthöhere Klasse vom Wert für die vorhergehende Klasse zu subtrahieren und in Spalte 7 einzutragen. Z. B. ergibt sich der Wert in Spalte 7 für Klasse 10 durch Subtraktion des Wertes in Spalte 6 für Klasse 11 von dem Wert der Spalte 6 für Klasse 10.

ANMERKUNG: Es ist in einigen Fällen möglich, daß Werte in Spalte 7 und damit auch in den Spalten, die aus ihr berechnet werden, negativ sind. Dies ist auf die Einteilung der Sehnen in Klassen zurückzuführen und kann durch entsprechende Anpassung der Klassengrenzen vermieden werden. Dies wird die letztlich ermittelte Porenverteilung nicht wesentlich beeinträchtigen. Zu Berechnungszwecken sollte der Negativwert vermerkt und berücksichtigt werden.

### 8.9.5 Berechnung des Luftgehalts

Das gesamte, jeder Porenklasse zugeordnete Porenvolumen ist durch Multiplikation der Spalte 7 mit Spalte 8, die das Volumen einer Pore mit dem Klassendurchmesser beinhaltet, zu berechnen, um den anteiligen Porengehalt zu ermitteln. Der Wert ist mit 100% zu multiplizieren und in Prozenten anzugeben. Das Ergebnis ist in Spalte 9 einzutragen. Die Summenverteilung des Porengehalts ist als Summe der Werte in Spalte 9, in Spalte 10 einzutragen.

ANMERKUNG: Die Endsumme in Klasse 28, Spalte 10 ist nominell der gesamte Luftporengehalt. Das Ergebnis sollte der Berechnung in 8.3 entsprechen, darf jedoch aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsverfahren leicht abweichen.

### 8.9.6 Darstellung der Ergebnisse

Es ist zulässig, die Porengrößenverteilung über den Nenn-durchmesser der Luftporen anhand der Werte für den größten Durchmesser jeder Klasse aus Spalte 2 und des Wertes in Spalte 10 aufzutragen. Die Aufzeichnung erfolgt entweder als Summenverteilung in %, wie er in Spalte 10 ausgewiesen ist, oder als Verteilungssumme der Porenvolumen bezogen auf das Gesamtvolumen der Poren, wie er sich aus der Division jedes Wertes in Spalte 10 durch das berechnete Gesamtporenvolumen, dargestellt durch den Wert in Spalte 10 für Klasse 28, ergibt.

### 8.9.7 Spalteninhalte

Die einzelnen Spalten in Tabelle 1 können zusammenfassend wie folgt beschrieben werden:

- Spalte 1: Die Klassennummer.
- Spalte 2: Die Ober- und Untergrenzen der Sehnenlänge für jede Klasse, in µm.
- Spalte 3: Die für jede Klasse ermittelte Anzahl der Sehnen.
- Spalte 4: Die Sehnenanzahl je Millimeter Meßlinie.
- Spalte 5: Der Flächenanteil möglicher Poren, der tatsächlich gezählt wurde. Die Einheit des Faktors ist mm<sup>2</sup>.
- Spalte 6: Die Gesamtanzahl von Poren je mm<sup>3</sup> Beton, die eine Sehnenlänge einer bestimmten Klassengröße beinhalten.
- Spalte 7: Die Gesamtanzahl der Poren eines Durchmessers, der gleich der Obergrenze der Klasse je mm<sup>3</sup> Beton ist.
- Spalte 8: Das jeder Pore einer Klasse zugeordnete Volumen in mm<sup>3</sup>.
- Spalte 9: Das allen Poren einer Klasse zugeordnete Gesamtvolumen, angegeben in % Volumenanteil des Betons.
- Spalte 10: Volumensumme der für Luftporen bis zur jeweiligen Klasse, angegeben in % bezogen auf Volumenanteil des Betons.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht muß folgende Informationen beinhalten:

- Alle Angaben zur Zusammensetzung des geprüften Betons einschließlich Angaben zur Dichte und dem gemessenen Luftgehalt des Frischbetons.
- Angaben zur Berechnung des Zementsteingehalts des Betons.
- Berechnete Werte für den Gesamtporenanteil, für die spezifische Oberfläche künstlich eingeführter Luft und für den Abstandsfaktor.

Falls erforderlich

- Gehalt an Mikroluftporen
- Ein Diagramm der Porengrößenverteilung.

**Tabelle 1: Bestimmung der Luftporenverteilung**

Gesamtlänge der Meßlinie $I_{tot}$											
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Nummer der Klasse	Klassengrenzen	Anzahl der Sehnen in der Klasse	Sehnenhäufigkeit	ermittelter Rechenwertanteil	mögliche Gesamtanzahl der Sehnen	Anzahl der Poren in der Klasse	Volumen einer Pore	Luftporengehalt je Klasse	Summe des Luftporengehaltes	
Berechnungshinweise	1) <sup>1)</sup>	1) <sup>1)</sup>	gemessener Wert $C_i$	Spalte 3 dividiert durch $I_{tot}$	1) <sup>1)</sup>	Spalte 4 dividiert durch Spalte 5	Spalte 6 abzüglich des folgenden Wertes in Spalte 6	1) <sup>1)</sup>	Spalte 7 multipliziert mit Spalte 8 und 100%	Gesamtsumme von Spalte 9	
Einheit		$\mu\text{m}$		$\text{mm}^{-1}$	$\text{mm}^2$	$\text{mm}^{-3}$	$\text{mm}^{-3}$	$\text{mm}^3$	%	%	
	1	0 bis 10			0,0 001 178			$5,24 \times 10^{-7}$			
	2	15 bis 20			0,0 002 749			$4,19 \times 10^{-6}$			
	3	25 bis 30			0,0 004 320			$1,41 \times 10^{-5}$			
	4	35 bis 40			0,0 005 890			$3,35 \times 10^{-5}$			
	5	45 bis 50			0,0 007 461			$6,54 \times 10^{-5}$			
	6	55 bis 60			0,0 009 032			$1,13 \times 10^{-4}$			
	7	65 bis 80			0,0 022 780			$2,68 \times 10^{-4}$			
	8	85 bis 100			0,0 029 060			$5,24 \times 10^{-4}$			
	9	105 bis 120			0,0 035 340			$9,05 \times 10^{-4}$			
	10	125 bis 140			0,0 041 630			$1,44 \times 10^{-3}$			
	11	145 bis 160			0,0 047 910			$2,14 \times 10^{-3}$			
	12	165 bis 180			0,0 054 190			$3,05 \times 10^{-3}$			
	13	185 bis 200			0,0 060 476			$4,19 \times 10^{-3}$			
	14	205 bis 220			0,0 066 760			$5,58 \times 10^{-3}$			
	15	225 bis 240			0,0 073 040			$7,24 \times 10^{-3}$			
	16	245 bis 260			0,0 079 330			$9,20 \times 10^{-3}$			
	17	265 bis 280			0,0 085 610			$1,15 \times 10^{-2}$			
	18	285 bis 300			0,0 091 890			$1,41 \times 10^{-2}$			
	19	305 bis 350			0,0 257 200			$2,24 \times 10^{-2}$			
	20	355 bis 400			0,0 296 500			$3,35 \times 10^{-2}$			
	21	405 bis 450			0,0 335 800			$4,77 \times 10^{-2}$			
	22	455 bis 500			0,0 375 000			$6,54 \times 10^{-2}$			
	23	505 bis 1 000			0,5 910 000			$5,24 \times 10^{-1}$			
	24	1 005 bis 1 500			0,9 837 000			1,77			
	25	1 505 bis 2 000			1,3 760 000			4,19			
	26	2 005 bis 2 500			1,7 690 000			8,18			
	27	2 505 bis 3 000			2,1 620 000			$1,41 \times 10^{+1}$			
	28	3 005 bis 4 000			5,5 020 000			$3,35 \times 10^{+1}$			

1) Die Werte in den Spalten 1,2,5 und 8 ändern sich von Prüfung zu Prüfung nicht.

## Anhang A (informativ)

### Theoretische Berechnungsgrundlage für Tabelle 1

#### A.1 Einleitung

Das Ziel der in Tabelle 1 durchgeführten Berechnung ist es, die Verteilung der Luftporendurchmesser aus der gemessenen Sehnenlängenverteilung abzuleiten. Sowie die Durchmesserverteilung von Luftporen bekannt ist, läßt sich das Volumen von Luftporen berechnen.

Bei der Zählung der Luftporen zur Feststellung der Sehnengrößenverteilung werden nur die auf den Meßlinien liegenden Poren erfaßt, eine große Anzahl bleibt dabei nicht ungeschnitten und wird daher nicht in der Sehnengrößenverteilung berücksichtigt. Anhand der Berechnungen in Tabelle 1 läßt sich die Gesamtanzahl der Poren von den durchgeschnittenen Poren durch eine statistische Betrachtung abschätzen.

#### A.2 Annahmen

Als Grundannahme gilt, daß keine Luftpore mehr als einmal von einer Meßlinie geschnitten wird. Das bedeutet, daß jede ermittelte Sehne einer Luftpore zuzuordnen ist.

Als zweite Annahme zur Berechnungsvereinfachung gilt, daß sich die tatsächliche Porengrößenverteilung durch eine Berechnung darstellen läßt, die nur Luftporen mit dem größten Durchmesser je Klasse (Spalte 2 in Tabelle 1) beinhaltet. Hier ist keine Erweiterung auf eine tatsächliche, stetige Verteilung der Luftporendurchmesser gegeben.

1. Schritt: Klassifizierung der Sehnenlängen und Berechnung der Sehnenhäufigkeit

Bei der Durchführung der Messung sowie bei der Ermittlung der Gesamtlänge der Kugelporensehnenstrecken,  $T_a$ , sind die einzelnen Sehnen bis auf 5 µm zu klassifizieren und in die unterschiedlichen Klassen einzutragen. Die Klassen sind in Spalte 2 der Tabelle festgelegt und die Anzahl von Sehnen in jeder Klasse ist in Spalte 3 einzutragen. Mit dieser Klassifizierung ist die Messung abgeschlossen. Die Werte in den übrigen Spalten der Tabelle sind durch Berechnung zu ermitteln.

Der erste Schritt beinhaltet die Berechnung der Anzahl von Sehnen jeder Klasse je Millimeter der gesamten Meßlinienlänge,  $T_{tot}$ . Das Ergebnis ist in Spalte 4 einzutragen. Damit stehen Messungen je Längeneinheit zur Verfügung, die der weiteren Berechnung des prozentualen Porenvolumens dienen.

2. Schritt: Berechnung der möglichen Gesamtanzahl von Sehnen

Wie bereits erwähnt, werden nicht alle Poren von den Meßlinien durchgeschnitten. Zur Berechnung des Gesamtluftporengehalts ist der Anteil tatsächlich vorhandener Poren an der möglichen Gesamtanzahl zu ermitteln. Dies wird durch die folgende Betrachtung möglich.

Es wird eine Luftpore von ausreichender Größe betrachtet, die Sehnen der Länge  $x$  bis  $x'$  aufweist. Eine Darstellung einer Pore ist in Bild A.1 gegeben.

Unter der Annahme, daß dies die einzige Luftpore in einem  $\text{mm}^3$  Beton ist, die symmetrisch zur Meßlinie liegt, kann die Wahrscheinlichkeit, daß durch die Meßlinie in der angeschnittenen Pore eine Sehne innerhalb der angegebenen Grenzen erzeugt wird, dadurch errechnet werden, in dem die Schnittfläche der Pore, die diese Sehne enthält, durch die Gesamtfläche des betrachteten Probekörpers geteilt wird. Die Querschnittsfläche von Beton beträgt  $1 \text{ mm}^2$  bzw.  $10^6 \mu\text{m}^2$ . Die entsprechende Schnittfläche der Pore läßt sich leicht mit Hilfe klassischer Geometrie berechnen und wie folgt darstellen:

$$\frac{\pi}{4} \cdot (4r^2 - x^2) - \frac{\pi}{4} \cdot (4r^2 - x'^2) \quad (\text{A.1})$$

Dies läßt sich vereinfachen:

$$\frac{\pi}{4} \cdot (x'^2 - x^2) \quad (\text{A.2})$$

und dann erweitern:

$$\frac{\pi}{4} \cdot (x' + x) \cdot (x' - x) \quad (\text{A.3})$$

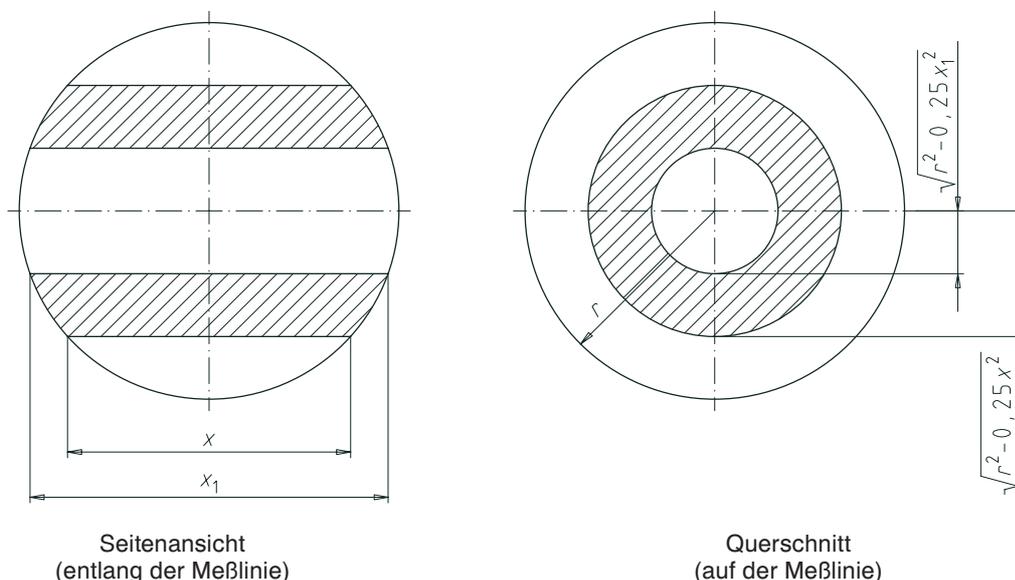


Bild A.1

Dies würde zu korrekten Ergebnissen führen, wenn die Klassifizierung anhand genauer Sehnenlängen erfolgte. Die Sehnenlängen werden jedoch genau bestimmt auf 5 µm. Falls  $x$  und  $x'$  die tatsächlichen Grenzen der Sehnen sind, dann sind die in Tabelle 1, Spalte 2 aufgeführten Klassengrenzen  $y$  und  $y'$  gegeben durch:

$$y = x + 2,5 \text{ und } y' = x' - 2,5 \quad (\text{A.4})$$

Durch Einsetzen in die vorhergehende Gleichung folgt:

$$\frac{\pi}{4} \{(y' + 2,5) + (y - 2,5)\} \cdot \{(y' + 2,5) - (y - 2,5)\} \quad (\text{A.5})$$

vereinfacht:

$$\frac{\pi}{4} \cdot (y' + y) \cdot (y' - y + 5) \quad (\text{A.6})$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß diese Pore auf einer Querschnittsfläche von insgesamt  $10^6 \mu\text{m}^2$  geschnitten wird, ist daher

$$\frac{\pi \cdot (y' + y) \cdot (y' - y + 5)}{4 \times 10^6} \quad (\text{A.7})$$

Dieser Wert ist für jede Sehnenklasse konstant und läßt sich errechnen. Die errechneten Werte sind in Spalte 5 der Tabelle 1 angegeben. Wenn diese Konstante die Wahrscheinlichkeit angibt, eine Pore zu schneiden, kann sie zur Berechnung der Gesamtanzahl der vorhandenen Poren eingesetzt werden, da die Anzahl der tatsächlich auf einem Millimeter der Meßlinie liegenden Poren (was der Länge der in  $1 \text{ mm}^3$  enthaltenen Linie, wie oben erläutert, entspricht) aus Spalte 4 der Tabelle 1 bekannt ist. Die Gesamtanzahl der vorhandenen Poren, die möglicherweise Sehnen der entsprechenden Gruppe beinhalten, ergibt sich aus der tatsächlich notierten Anzahl dividiert durch die Wahrscheinlichkeit, irgendeine einzelne Pore zu schneiden, d. h. Spalte 4 dividiert durch Spalte 5 der Tabelle 1. Das Ergebnis ist in Spalte 6 einzutragen. Aufgrund der in o. g. Betrachtung gesetzten Grenzen geben diese Werte die Anzahl der Sehnen in jeder Klasse je  $\text{mm}^3$  Beton an.

3. Schritt: Berechnung der Gesamtanzahl der Poren

Spalte 6 beinhaltet die mögliche Gesamtanzahl von Sehnen je Klasse, unabhängig davon, ob auf den Meßlinien tatsächlich eine Pore lag. Dies ist nicht mit der Gesamtanzahl der Poren gleichzusetzen. Jede Pore kann Sehnen einer Vielzahl von Sehnenklassen beinhalten und wird deshalb in o. g. Berechnung sooft gezählt, wie sie Sehnenklassen enthält. In anderen Worten, eine Sehne der Klasse  $n$  ist in Poren von einem Durchmesser  $n$  und größer zu finden.

Die Gesamtanzahl der Sehnen in Klasse 12 setzt sich aus Sehnen zusammen, die in Luftporen vorkommen, deren Durchmesser vom Höchstwert der Klasse 12 bis zur Klasse 28 reicht. Wenn  $v_n$  die Anzahl der Poren mit einem Durchmesser  $n$  ist, und  $c_n$  die Anzahl der Sehnen in Klasse  $n$ , dann gilt:

$$c_{12} = v_{12} + v_{13} + v_{14} + \dots + v_{28}$$

entsprechend:

$$c_{13} = v_{13} + v_{14} + \dots + v_{28}$$

daraus folgt:

$$v_{12} = c_{12} - c_{13}$$

Dies ermöglicht die Berechnung der Gesamtanzahl von Poren eines bestimmten Durchmessers aus der Gesamtanzahl der Sehnen. Die Eintragung erfolgt in Spalte 7 der Tabelle 1.

4. Schritt: Berechnung des Volumenanteils der Luftporen  
Der letzte Schritt besteht aus der Berechnung des Gesamtluftgehalts. Spalte 8 gibt das Volumen einer Pore mit einem Durchmesser an, der gleich dem Höchstwert jeder Klasse ist. Dieser Wert, multipliziert mit der Anzahl der Poren dieses Durchmessers, ergibt das anteilige Gesamtporenvolumen je  $\text{mm}^3$  Beton, multipliziert mit 100 % ergibt sich ein Prozentwert, der in Spalte 9 einzutragen ist. Der kumulative Porenanteil ist dann in Spalte 10 einzutragen.

## Anhang B (informativ)

### Beispiel für die Berechnung der Luftporenverteilung

8.9 und Tabelle B.1 veranschaulicht das angewandte Berechnungsverfahren. Das Beispiel gilt lediglich für die Bestimmung der Porengrößenverteilung und des Gehalts an Mikroluftporen, es gilt nicht für die Berechnung des Gesamtluftporengehalts, der spezifischen Oberfläche oder des Abstandsfaktors.

Beispielwerte zur Berechnung:

- Gesamtmeßlänge = 2400 mm
- Verteilung der Sehnenlängen, wie in Spalte 3 der Tabelle B.1 notiert.

**Tabelle B.1: Bestimmung der Luftporenverteilung**

Gesamtlänge der Meßlinie $T_{tot}$		2 400 mm									
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Nummer der Klasse	Klassengrenzen	Anzahl der Sehnen in der Klasse	Sehnenhäufigkeit	ermittelter Rechenwertanteil	mögliche Gesamtanzahl der Sehnen	Anzahl der Poren in der Klasse	Volumen einer Pore	Luftporengehalt je Klasse	Summe des Luftporengehaltes	
Berechnungshinweise	1)	1)	gemessener Wert $C_1$	Spalte 3 dividiert durch $T_{tot}$	1)	Spalte 4 dividiert durch Spalte 5	Spalte 6 abzüglich des folgenden Wertes in Spalte 6	1)	Spalte 7 multipliziert mit Spalte 8 und 100%	Gesamtsumme von Spalte 9	
Einheit		$\mu\text{m}$		$\text{mm}^{-1}$	$\text{mm}^2$	$\text{mm}^{-3}$	$\text{mm}^{-3}$	$\text{mm}^3$	%	%	
	1	0 bis 10	65	0,02 708	0,0 001 178	229,90 945	10,483	$5,24 \times 10^{-7}$	0,007	0,01	
	2	15 bis 20	58	0,02 458	0,0 002 749	89,42 646	9,372	$4,19 \times 10^{-6}$	0,004	0,01	
	3	25 bis 30	83	0,03 458	0,0 004 320	80,05 401	6,483	$1,41 \times 10^{-5}$	0,009	0,02	
	4	35 bis 40	104	0,04 333	0,0 005 890	73,57 102	24,427	$3,35 \times 10^{-5}$	0,082	0,10	
	5	45 bis 50	88	0,03 667	0,0 007 461	49,14 444	13,161	$6,54 \times 10^{-5}$	0,086	0,19	
	6	55 bis 60	78	0,03 250	0,0 009 032	35,98 317	11,108	$1,13 \times 10^{-4}$	0,126	0,31	
	7	65 bis 80	136	0,05 667	0,0 022 780	24,87 562	13,405	$2,68 \times 10^{-4}$	0,359	0,67	
	8	85 bis 100	80	0,03 333	0,0 029 060	11,47 052	3,925	$5,24 \times 10^{-4}$	0,206	0,88	
	9	105 bis 120	64	0,02 667	0,0 035 340	7,54 575	2,341	$9,05 \times 10^{-4}$	0,212	1,09	
	10	125 bis 140	52	0,02 167	0,0 041 630	5,20 458	2,682	$1,44 \times 10^{-3}$	0,386	1,48	
	11	145 bis 160	29	0,01 208	0,0 047 910	2,52 209	0,600	$2,14 \times 10^{-3}$	0,128	1,61	
	12	165 bis 180	25	0,01 042	0,0 054 190	1,92 225	0,613	$3,05 \times 10^{-3}$	0,187	1,79	
	13	185 bis 200	19	0,00 792	0,0 060 476	1,30 906	0,623	$4,19 \times 10^{-3}$	0,261	2,05	
	14	205 bis 220	11	0,00 458	0,0 066 760	0,68 654	0,230	$5,58 \times 10^{-3}$	0,128	2,18	
	15	225 bis 240	8	0,00 333	0,0 073 040	0,45 637	0,036	$7,24 \times 10^{-3}$	0,026	2,21	
	16	245 bis 260	8	0,00 333	0,0 079 330	0,42 019	0,079	$9,20 \times 10^{-3}$	0,073	2,28	
	17	265 bis 280	7	0,00 292	0,0 085 610	0,34 069	0,114	$1,15 \times 10^{-2}$	0,131	2,41	
	18	285 bis 300	5	0,00 208	0,0 091 890	0,22 672	0,032	$1,41 \times 10^{-2}$	0,046	2,46 <sup>2)</sup>	
	19	305 bis 350	12	0,00 500	0,0 257 200	0,19 440	0,054	$2,24 \times 10^{-2}$	0,121	2,58	
	20	355 bis 400	10	0,00 417	0,0 296 500	0,14 053	0,016	$3,35 \times 10^{-2}$	0,055	2,63	
	21	405 bis 450	10	0,00 417	0,0 335 800	0,12 408	0,035	$4,77 \times 10^{-2}$	0,168	2,80	
	22	455 bis 500	8	0,00 333	0,0 375 000	0,08 889	0,072	$6,54 \times 10^{-2}$	0,471	3,27	
	23	505 bis 1 000	24	0,01 000	0,5 910 000	0,01 692	0,014	$5,24 \times 10^{-1}$	0,753	4,03	
	24	1 005 bis 1 500	6	0,00 250	0,9 837 000	0,00 254	0,0 010	1,77	0,182	4,21	
	25	1 505 bis 2 000	5	0,00 208	1,3 760 000	0,00 151	0,0 008	4,19	0,388	4,55	
	26	2 005 bis 2 500	3	0,00 125	1,7 690 000	0,00 071	0,0 005	8,18	0,420	4,97	
	27	2 505 bis 3 000	1	0,00 042	2,1 620 000	0,00 019	0,0 002	$1,41 \times 10^{+1}$	0,272	5,24	
	28	3 005 bis 4 000	0	0,00 000	5,5 020 000	0,00 000	0,000	$3,35 \times 10^{+1}$	0,000	5,24	

1) Die Werte in den Spalten 1, 2, 5 und 8 ändern sich von Prüfung zu Prüfung nicht. 2) Der gerahmte Wert in Spalte 10 ist von  $A_{300}$  entnommen.