

Porosität des Feinmörtels im Beton

DI Dr. Jürgen Macht, Univ.-Doz. DI Dr. Peter Nischer
 Forschungsinstitut der VÖZ, Wien

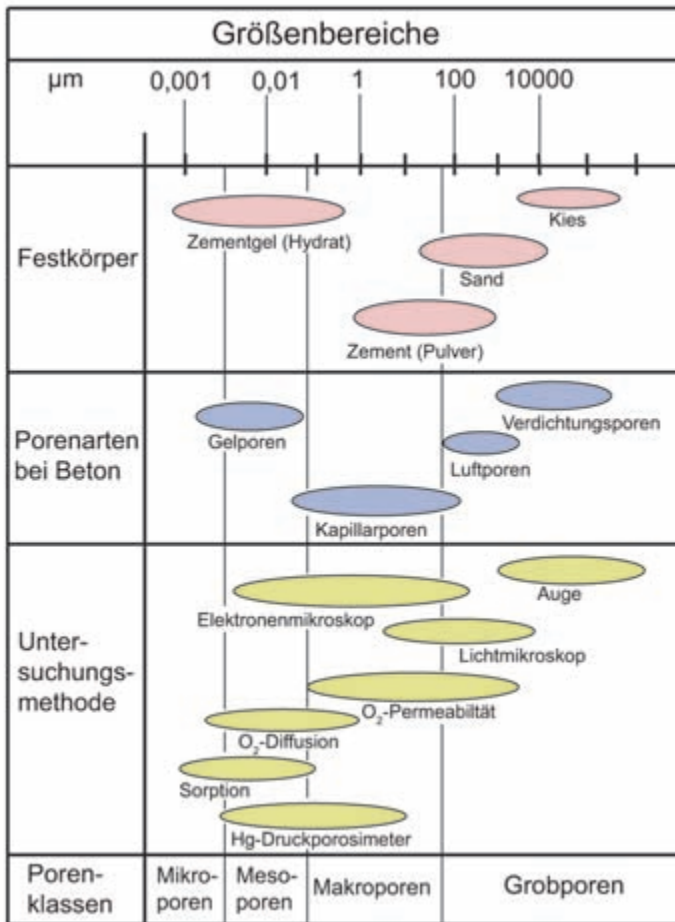


Abb. 1: Größenbereiche von Feststoffen, Poren und Messverfahren [2]
 Alle Fotos und Diagramme: © VÖZFI

Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Zuge des vom FFG¹ geförderten Forschungsprogramms „prokis Querschnittstechnologien“ durchgeführt. Dadurch war eine Vernetzung von zwei kooperativen Forschungsinstituten von ACR²-Mitgliedern, dem Forschungsinstitut der VÖZ (VÖZFI) und dem Zentrum für Elektronenmikroskopie Graz (ZfE), und damit unterschiedlicher Untersuchungsmethoden möglich.

Einleitung

Die Poren im Festbeton sind für die Dauerhaftigkeit und Festigkeit von entscheidender Bedeutung. In der Literatur wird unterschieden in Verdichtungs-poren, Luftporen, Kapillarporen und Gelporen [1, 2], siehe Abbildung 1. Verdichtungs- und Luftporen sind in einer Größenordnung, die entweder noch mit freiem Auge oder zumindest mit dem Lichtmikroskop wahrgenommen werden können. Dies wird auch bei der Bestim-

mung der Luftporenkennwerte im Festbeton in der Norm [3] ausgenutzt. Für die so genannten Gel- und Kapillarporen muss auf andere, aufwändigere Untersuchungsmethoden zurückgegriffen werden (Abbildung 1).

In der vorliegenden Studie wurde die Quecksilberdruckporosimetrie, die eine quantitative Aussage über die Mengen an vorhandenen Poren im Messbereich erlaubt, mit der Elektronenmikroskopie verknüpft. Auf Grund des von beiden Methoden abgedeckten Größenbereiches ist eine Verknüpfung äußerst sinnvoll. Dadurch ist es möglich, Aussagen über die Form und das Aussehen der entstehenden Poren dieser Größe zu machen.

Quecksilberdruckporosimetrie

Quecksilber ist eine nicht benetzende Flüssigkeit, d. h. der Benetzungswinkel liegt über 90°. Das Quecksilber dringt daher nur unter Aufbringen von Druck in die Poren des untersuchten Materials ein. Ein Quecksilberdruckporosimeter misst den Zusammenhang zwischen aufgebrachtem Druck und dem Volumen an eingepresstem Quecksilber. Mithilfe der erweiterten Washburn-Gleichung (1) wird daraus die Porengrößenverteilung bestimmt [z. B. 4, 5].

$$d = \frac{-f\sigma}{p} \cos\theta \quad (1)$$

In Gleichung (1) bezeichnet d den Porendurchmesser, p den auf das Quecksilber aufgetragenen Druck, σ die Oberflächenspannung des Quecksilbers und θ den Kontakt-/Benetzungswinkel des Quecksilbers auf der Probe sowie f einen so genannten Formfaktor [5].

Wie aus Gleichung (1) ersichtlich, ist die errechnete Porengröße indirekt proportional dem aufgetragenen Druck, d. h. je größer der bei der Messung aufgezeich-

¹ Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH, www.ffg.at
² Austrian Cooperative Research, www.acr.at

nete Druck ist, umso kleiner ist die zugeordnete Porengröße. Das vom VÖZFI verwendete Porosimeter kann einen Druck im Bereich von 0,136 bis 2.000 bar aufbringen.

Über die Materialparameter des Quecksilbers gibt es zahlreiche Untersuchungen [z. B. 4, 5]. In der vorliegenden Arbeit wurde für ρ ein Wert von 0,48 N/m sowie für θ ein Wert von 117° verwendet.

Für den Formfaktor f scheint ein Wert von 2,5 die Form der Poren am besten zu charakterisieren, wie in den elektronenmikroskopischen Aufnahmen (siehe Abbildung 5) ersichtlich ist.

Elektronenmikroskopie

Nähere Informationen über die Elektronenmikroskopie sind im Artikel [6] dieser Zeitschrift gegeben.

Untersuchungsprogramm

Untersucht wurde Feinmörtel mit einem Größtkorn von 2 mm. Der W/B-Wert betrug 0,55. Die Zusammensetzung sowie Frischbetonkennwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Als Probekörper wurden Prismen 4/4/16 cm hergestellt. Das Ausschalen erfolgte nach einem Tag, anschließend wurden die Probe-

körper bis zum Prüfalter im Feuchtkasten gelagert. Von den Prismen wurden im vorgesehenen Prüfalter die Festigkeiten gemäß ÖNORM EN 196-2 ermittelt und etwa 2 mm dicke Scheiben geschnitten, die zur Vermeidung einer weiteren Hydratation mit Vakuumtrocknung bis zur Massekonstanz getrocknet wurden. Diese Scheiben wurden mit Quecksilberdruckporosimetrie und dem Elektronenmikroskop untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Alter von 0, 0,6 (15 Stunden) 1, 2, 4 und 7, 28 und 90 Tagen präsentiert. Die Probekörper im Alter von 0 Tagen für die Elektronenmikroskopie und die Quecksilberdruckporosimetrie wurden durch Mikrowellentrocknung des frischen Mörtels erhalten.

Ergebnisse

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen (Biegezug- und Druckfestigkeit), die bei der Vakuumtrocknung abgegebene Wassermenge sowie die bei der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelte Gesamtporosität zusammengefasst. Die zeitliche Entwicklung von Druckfestigkeit,

Tabelle 1: Betonzusammensetzung und Frischbetonprüfwerte

W/B	[-]	0,55
ρ_{FB}	[kg/m ³]	2.200
Zement	Sorte	CEM II/A-S 42,5R
	[kg/m ³]	650
Wasser	[kg/m ³]	358
Gestein	[kg/m ³]	1.190
Luft	[%]	0,7
A ₁₀	[mm]	244
Zementstein	[Vol.-%]	57

Tabelle 2: Prüfergebnisse

Alter [Tage]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Gesamtporosität [Vol.-%]	Wasserabgabe [l/m ³]
0	0	0	33,9	339
0,6	2,9	9	28,3	295
1	4,5	17	25,0	259
2	7,2	30	23,5	243
4	7,5	39	22,9	223
7	9,6	43	18,9	211
28	10,8	54	17,2	190
90	11,1	65	16,0	186

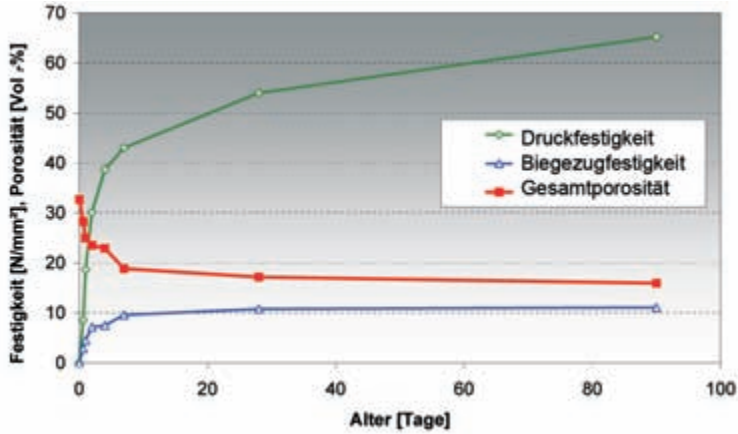


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der Festigkeiten sowie der Gesamtporosität

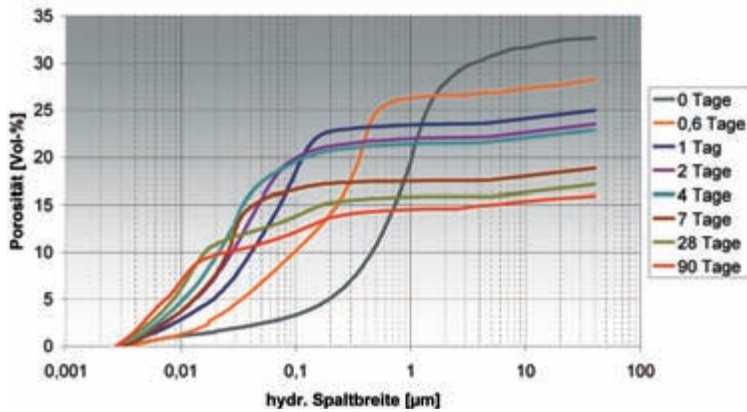


Abb. 3: Porengrößenverteilungen in unterschiedlichem Betonalter

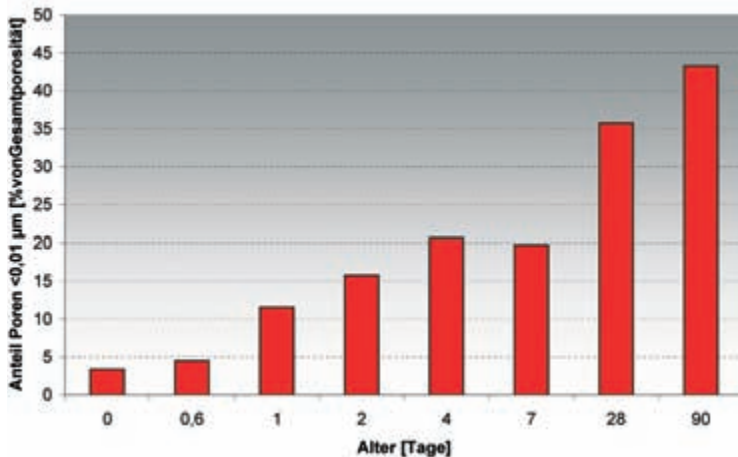


Abb. 4: Anteil der Poren < 0,01 µm an der Gesamtporosität in unterschiedlichem Betonalter

Biegezugfestigkeit und Gesamtporosität ist in Abbildung 2 dargestellt. Wie nicht anders zu erwarten, nehmen die Festigkeiten zu und die Gesamtporosität nimmt auf Grund der fortschreitenden Hydratation ab.

Die Porengrößenverteilung zu den unterschiedlichen Betonaltern ist in Abbildung 3 dargestellt. Neben der Tatsache, dass der Gesamtporengehalt abnimmt, ist in diesem Diagramm die Zunahme an feinen Poren mit steigendem Alter sehr gut ersichtlich. Dies wird auch noch durch Abbildung 4 betont. Hier wird zu den verschiedenen Untersuchungsterminen der prozentuelle Anteil an Poren < 0,01 µm an der Gesamtporosität zusammengestellt. In sehr jungem Alter sind nicht einmal 5 % aller gemessenen Poren < 0,01 µm, nach 90 Tagen sind über 40 % aller Poren < 0,01 µm. Dies ist insofern von Bedeutung, da diese Poren (< 0,01 µm) unter normalen Umweltbedingungen stets mit Porenlösung gefüllt und daher praktisch undurchlässig für Gase sind [2] und somit in der Regel keine negativen Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Betons haben.

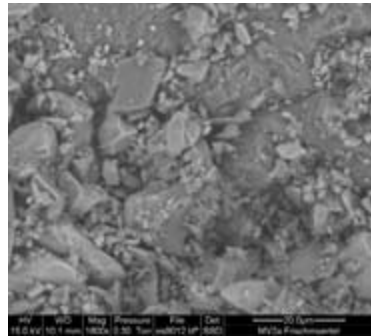
Mithilfe der elektronenmikroskopischen Untersuchungen ist eine qualitative Beurteilung der Poren möglich. Abbildung 6 zeigt Aufnahmen in 1.600-facher Vergrößerung in unterschiedlichem Betonalter. Im frischen Zustand (0 Tage) liegen die Zementkörner noch als Einzelkörner vor. Durch die Hydratation wird das Gefüge immer dichter, die spaltähnlichen Poren wachsen immer weiter zusammen. Das bestätigt die Zunahme an feinen Poren, wie sie auch durch die Quecksilberdruckporosimetrie festgestellt wurde (Abbildung 4).

Zusammenfassung

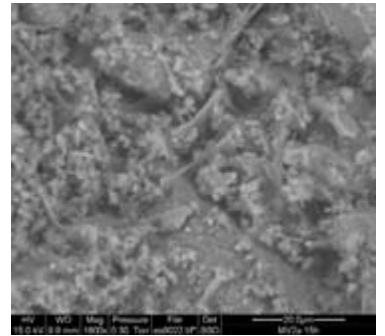
Durch die Kombination von Quecksilberdruckporosimetrie und Elektronenmikroskopie ist sowohl eine quantitative als auch qualitative Beurteilung der Porosität von Beton möglich. Es können somit z. B. die Auswirkungen unterschiedlicher Sieblinien im Mehlkornbereich [7] besser beurteilt und verstanden werden. Betone mit höchsten Anforderungen – sei es nun Festigkeit oder Dichtheit – können bei der Entwicklung durch eine Kombination beider Prüfverfahren noch gezielter optimiert werden.

Literatur

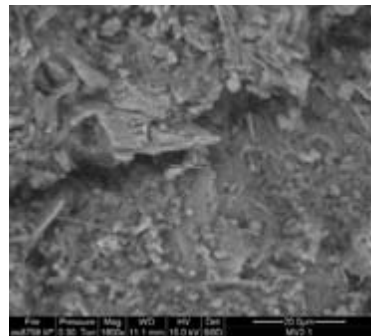
- [1] Setzer, M. J.: Zum Mikrogefüge des Zementsteins und dessen Einfluss auf das mechanische Verhalten des Betons. Zement und Beton Heft 85/86, 1975.
- [2] Stark, J.; Wicht, B.: Zement und Kalk: der Baustoff als Werkstoff. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2000.
- [3] ÖNORM B 3303: Betonprüfung. Österreichisches Normungsinstitut.
- [4] Kumar, R.; Bhattacharjee, B.: Study on some factors affecting the results in the use of MIP method in concrete research. Cement and Concrete Research 33 (2003), S. 417–424.
- [5] Cook, R. A.; Hover, C. H.: Mercury Porosometry of Cement-based materials and Associated Correction Factors. ACI materials Journal, March – April 1993.
- [6] Pölt, P.; Reichmann, A.; Hofer, F.: Charakterisierung und Schadensanalyse von Baustoffen mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie. Zement und Beton Heft 1/07, 2007.
- [7] Macht J.; Nischer, P.: Mehlkornoptimierung – Notwendigkeit und Möglichkeiten zur Ermittlung der Korneigenschaften. BFT Heft 4, 2006.



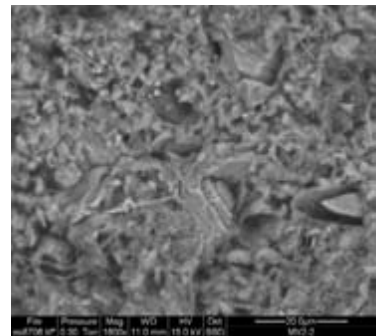
0 Tage



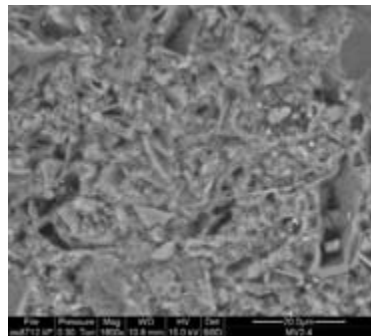
0,6 Tage



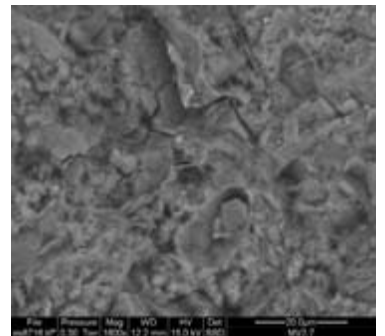
1 Tag



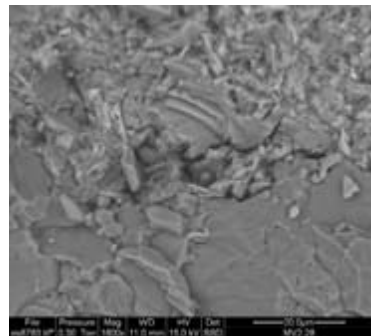
2 Tage



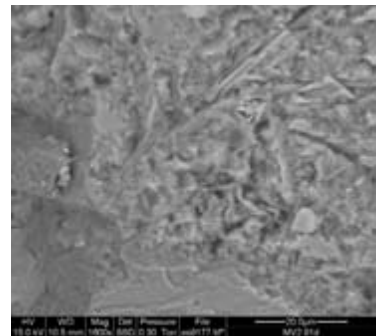
4 Tage



7 Tage



28 Tage



90 Tage

Abb. 5: Elektronenmikroskopische Aufnahme (Vergrößerung: 1.600-fach) in unterschiedlichem Alter Alle Fotos und Diagramme: © VÖZFI