

Einfluss des Wassergehalts auf die Gaspermeabilität von Mörtel und Beton

Vom Fachbereich Bauwesen an der
Universität Duisburg – Essen
angenommene

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur

von

Dipl.-Ing. Franka Tauscher
aus Münster (Westfalen)

Tag der mündlichen Prüfung: 17. November 2004

Hauptreferent: em. Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hubert K. Hilsdorf

Koreferent: Univ. Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Max. J. Setzer

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. Werner Richwien

Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und
Materialwissenschaft

Band 8

Franka Tauscher

**Einfluss des Wassergehalts auf
die Gaspermeabilität von Mörtel und Beton**

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4076-4

ISSN 1435-7275

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die vorliegende Arbeit von Frau Dr. Tauscher geht auf Arbeiten unter Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. eh. Hubert K. Hilsdorf zurück, die mehr als 15 Jahre zurück liegen. Unter Professor Dr.-Ing. Harald S. Müller wurden die Experimente zunächst fortgesetzt. In den letzten drei Jahren hat sich dann eine lebhafte Diskussion zwischen Frau Tauscher und dem IBPM der Universität Duisburg-Essen ergeben, die schließlich zur vorliegenden Arbeit geführt haben.

Die Arbeit reiht sich in eine Reihe von Forschungsarbeiten ein, die am Institut die Dauerhaftigkeit von Beton betrachtet haben. Hier sind vor allen auch Transportvorgänge ein ganz entscheidender Parameter. Bereits in der Dissertation von Dr. Gräf wurde die Korrelation zwischen Diffusion und Gaspermeabilität behandelt.

In den zahlreichen Arbeiten von Professor Hilsdorf wurde dargelegt, dass die Permeabilität des Betons ein wichtiges Kriterium für Dauerhaftigkeit darstellt. In der vorliegenden Arbeit hat Frau Tauscher insbesondere den Einfluss des Wassergehalts und den Einfluss von Feuchtegradienten auf die Messergebnisse messtechnisch erfasst, in dem sie an einzelnen Mörtelscheiben und an einem Mehrschichtsystem aus Mörtelscheiben unterschiedlicher Feuchte den Gasdurchfluss im Permeationsversuch gemessen hat. Es hat sich dabei auch herausgestellt, dass der Gasdurchfluss nicht linear vom Prüfdruck abhängt. Durch eine Kombination von Kapillarporenmodell und Perkolations-theorie ist es möglich diese Nichtlinearität adäquat zu beschreiben.

Als Herausgeber der Schriftenreihe lege ich Wert darauf, dass Professor Hilsdorf auch in diesem Fall der Doktorvater war. Lediglich bei den theoretischen Modellen hat eine Mitwirkung durch das IBPM der Universität Duisburg-Essen stattgefunden. Dennoch ergänzt die vorliegende Arbeit die Schriften, die am Institut zur Dauerhaftigkeit veröffentlicht worden sind.

Prof. Dr. Max J. Setzer

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe und im Anschluss an meine Tätigkeit dort.

Auf Initiative von Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hubert K. Hilsdorf, der bis 1995 die Abteilung Baustofftechnologie des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe leitete, entstand 1989 das RILEM Technical Committee (TC) 116-PCD „Permeability of concrete as a criterion of its durability“. 1992 übernahm Herr Professor Dr.-Ing. J. Kropp (seit 1994 an der Hochschule Bremen) die Obmannschaft des TC, initiierte das Forschungsprojekt „Standard test methods for concrete permeability measurements“ und führte die Arbeiten 1998/1999 zu Ende. Die Ergebnisse des Projekts waren der Anlass für die vorliegende Arbeit.

Mit der Emeritierung von Herrn Professor Hilsdorf im Jahr 1995 übernahm Herr Professor Dr.-Ing. H.S. Müller die Leitung der Abteilung Baustofftechnologie. Ohne die freundliche Unterstützung Herrn Professor Müllers während meines letzten Jahres der Zugehörigkeit zum Institut und in der darauf folgenden Zeit wäre der erfolgreiche Abschluss der Dissertation in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen. Hierfür gilt Ihm mein herzlicher Dank.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Hilsdorf für die Anregung zu dieser Arbeit und die Betreuung. Seine kritischen Anmerkungen und wertvollen Hinweise haben wesentlich zum Gelingen beigetragen. Er hat mich nicht nur mit wissenschaftlicher sondern auch mit menschlicher Größe geduldig über die Jahre begleitet und in meinem Ziel die Arbeit zum Abschluss zu bringen fortwährend bestärkt.

Mein ganz herzlicher Dank gilt aber auch Herrn Professor Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Max. J. Setzer für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferates. Seine Diskussionsbereitschaft und seine Hinweise waren eine wertvolle Hilfe. Seiner unkonventionellen und wissenschaftlich orientierten Art habe ich den Abschluss der Arbeit im Jahr 2004 an der Universität Duisburg-Essen zu verdanken.

Allen beteiligten Kolleginnen und Kollegen gilt, ebenso wie meiner Familie, mein Dank für die mir entgegengebrachte Hilfsbereitschaft und den besonderen Einsatz.

Bergisch Gladbach im April 2005

Franka Tauscher

Kurzfassung

Die Gaspermeabilität ist ein geeignetes Prüfverfahren zur Charakterisierung des Transportwiderstandes des Porensystems von Zementstein, Mörtel oder Beton. Je offener das Porensystem, desto leichter und schneller dringen Gase oder Flüssigkeiten ein und können die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen. Der feinen Porenstruktur von Zementstein, Mörtel oder Beton ist die Kondensation von Wasserdampf bei unterschiedlicher Luftfeuchte eigen: mit zunehmender Luftfeuchte reduziert das kondensierte Porenwasser den für das Gas zugänglichen Porenraum. So beeinflusst der Wassergehalt sowohl das Eindringen schädigender Gase in den Beton als auch den Gasdurchfluss unter einem äußeren Druckgradienten in der Permeationsprüfung. Für die Messung der Gaspermeabilität zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit werden die Prüfkörper nicht scharf getrocknet. Daraus resultiert ein Feuchtegradient im Prüfkörper, der den Messwert beeinflusst. Diese Wechselwirkung zwischen Wassergehalt, Feuchtegradient und Gaspermeabilität wurde in der vorliegenden Arbeit untersucht.

Der Einfluss des Wassergehalts auf die Gaspermeabilität wurde an dünnen Mörtelscheiben gezeigt, deren Wassergehalt gleichmäßig über den Prüfkörper verteilt war und sich im Gleichgewicht mit der Umgebungsfeuchte zwischen 44 und 93 % rel. Feuchte befand. Die Untersuchungen ergaben aber auch, dass der Gasdurchfluss im Permeationsversuch nicht linear vom Prüfdruck abhängig ist. Durch eine Kombination von Kapillarporenmodell und Perkolationstheorie konnte die Nichtlinearität bestätigt und der Einfluss des Wassergehalts nachgestellt werden.

Der Einfluss von Feuchtegradienten auf die Gaspermeabilität wurde an zusammengesetzten Prüfkörpern nachgestellt, die durch Übereinanderlegen von Mörtelscheiben mit verschiedener Feuchte entstanden. So wurde gezeigt, dass es trotz der Nichtlinearität der Gasströmung und der Wasserdampfbewegung in der Permeationsprüfung möglich ist, den Permeabilitätskoeffizient des zusammengesetzten Prüfkörpers aus den Koeffizienten der einzelnen Scheiben abzuschätzen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	
2.1	Berechnung der Gaspermeabilität als Kennwert für poröse Körper	4
2.1.1	Einführung	4
2.1.2	Laminare Gasströmung durch poröse Körper	7
2.1.3	Turbulente Gasströmung durch poröse Körper	10
2.1.4	Abweichungen vom laminaren Fließverhalten in porösen Körpern	12
2.1.4.1	Nicht-Newtonsches Fließverhalten	12
2.1.4.2	Zunahme von Trägheitseinflüssen	13
2.1.4.3	Abnahme der Molekülkonzentration des Prüfgases, Molekularströmung	16
2.2	Gaspermeabilität von Beton	21
2.2.1	Prüfverfahren	21
2.2.2	Versuchstechnische Einflüsse auf die Gaspermeabilität von Beton	24
2.2.3	Materialspezifische Einflüsse auf die Gaspermeabilität von Beton	26
2.2.4	Einfluss der Materialfeuchte	38
2.2.5	Einfluss von Feuchtegradienten	44
2.2.6	Beschreibung des Feuchtegehaltes	50
3	Experimentelle Untersuchungen	
3.1	Allgemeine Überlegungen	54
3.2	Abmessungen und Zusammensetzung der Prüfkörper	56
3.3	Versuchsprogramm	57
3.4	Herstellung der Prüfkörper	58
3.5	Trocknen der Prüfkörper	59
3.6	Versuchsmethoden	62
3.6.1	Hydratationsgrad	62
3.6.2	Gesamtporosität	65
3.6.3	Porengrößenverteilung	66
3.6.4	Wassergehalt	70
3.6.5	Kapillarer Sättigungsgrad	71
3.6.6	Porenfüllungsgrad	71
3.6.7	Gaspermeabilität nach dem CEMBUREAU-Verfahren	72
3.6.7.1	Aufbau und Funktion des Prüfgerätes	72

3.6.7.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	74
3.6.7.3	Nachweis der Dichtheit des Gerätes und der Präzision des Mess- verfahrens.....	76
4	Versuchsergebnisse	
4.1	Zusammensetzung der Mörtel.....	80
4.2	Druckfestigkeit	80
4.3	Hydratationsgrad	81
4.4	Gesamtporosität	84
4.5	Porengrößenverteilung	85
4.6	Desorptionsisotherme.....	92
4.7	Kapillarer Sättigungsgrad	96
4.8	Porenfüllungsgrad	98
4.9	Gaspermeabilität	101
4.9.1	Wasserverlust während der Permeationsprüfung	102
4.9.2	Gasdurchfluss.....	106
4.9.2.1	Auswertung als vollständig laminare Gasströmung	112
4.9.2.2	Auswertung als nichtlineare laminare Gasströmung	117
4.9.2.3	Auswertung nach Klinkenberg.....	125
4.9.2.4	Diskussion der Auswertverfahren.....	127
5	Diskussion der Versuchsergebnisse	
5.1	Einfluss der Vorlagerung	136
5.2	Einfluss des Wasserverlustes während der Permeationsprüfung.....	138
5.3	Einfluss des Wassergehalts auf die Gaspermeabilität	141
5.4	Zusammenhang zwischen Porosität, Wassergehalt und Gas- permeabilität	146
5.4.1	Gesamtporosität	146
5.4.2	Kapillarer Sättigungsgrad	148
5.4.3	Porenfüllungsgrad	152
6	Modell zur Berechnung der Gaspermeabilität	
6.1	Diskussion geeigneter Porenmodelle	156
6.2	Kapillarporenmodell für die Porosität von Zementstein, Mörtel und Beton	160
6.3	Perkulationsmodell für Zementstein, Mörtel und Beton.....	167
6.4	Kombination des Kapillarporenmodells mit der Perkolationstheorie	170
6.5	Effektives Porenvolumen	177

6.6	Berechnung des charakteristischen Permeabilitätskoeffizient der laminaren Gasströmung	177
6.7	Berücksichtigung des nichtlinearen Anteils der Gasströmung	180
6.8	Berücksichtigung des Wassergehalts der Prüfkörper.....	183
6.9	Grenzen des Porenmodells	194
6.10	Ergebnisse der Berechnung der Permeabilitätskoeffizienten am Porenmodell	195
6.11	Eigenschaften der die Gasströmung begrenzenden Kapillarenstücke M_c im Porenmodell	203
7	Gasströmung durch Zementmörtel als dynamisches System	207
8	Permeationsmessungen an den aus mehreren Mörtelscheiben zusammengesetzten Prüfkörpern	
8.1	Zielsetzung und Vorüberlegungen.....	213
8.2	Berechnung der Permeabilitätskoeffizienten zusammengesetzter Prüfkörper	214
8.3	Versuchsprogramm	217
8.4	Versuchsergebnisse	218
8.4.1	Gewichtsveränderungen.....	218
8.4.2	Permeationsmessungen und deren Vergleich mit den rechnerischen Werten	219
8.5	Diskussion der Versuchsergebnisse	226
8.5.1	Feuchtebewegung und Nichtlinearität der Gasströmung	226
8.5.2	Einfluss von Feuchtegradienten auf die Gaspermeabilität homogener Prüfkörper	228
9	Zusammenfassung	232
10	Literaturverzeichnis	234

Anhang

Anhang A	Ergebnisse der Permeationsprüfung der Mörtelscheiben.....	A1
Anhang B	Herleitung der Koeffizienten der nichtlinearen laminaren Gasströmung.....	B1
Anhang C	Ergebnisse der Permeationsversuche der Schichtkörper.....	C1