

**Holm, A., Krus, M., und Künzel, H.M.:** Grenzen der Feuchtetransportberechnung bei Betonaußenbauteilen. Tagungsband 5. Internationales Kolloquium – Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen. AEDIFICATIO Publishers, Freiburg 1999, S.775-782.

### **Grenzen der Feuchtetransportberechnung bei Betonaußenbauteilen**

A. Holm, M. Krus, H.M. Künzel  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
(Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c.mult. Dr. E.h.mult. Karl Gertis)

Inzwischen existiert eine ganze Reihe von Programmen, mit denen das Feuchteverhalten eines Bauteils mit guter Übereinstimmung zur Realität berechenbar ist. Die derzeitige Problematik besteht deshalb hauptsächlich in der Verfügbarkeit der erforderlichen Stoffkennwerte. Im Rahmen dieser Arbeit sind diese für eine ausgewählte praxisübliche Betonsorte gemessen worden. Bei der Kennwertbestimmung haben sich einige Besonderheiten, vor allem bei der Wasserdampfdiffusion und der kapillaren Wasseraufnahme, ergeben. So ist zum Beispiel die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl stark feuchte- und schichtabhängig. Das Verhalten der kapillaren Wasseraufnahme ist stark abhängig von der Art der Vorkonditionierung. Die durchgeführten Berechnungen für ein bewittertes Betonprisma zeigen für das erste halbe Jahr eine gute Übereinstimmung. Setzt man den Vergleich aber fort, kommt es zu starken Abweichungen zwischen Rechnung und Experiment. Im Gegensatz zu der Berechnung zeigt der Beton einen „Selbstabdichtungseffekt“, für den eine hypothetische Erklärung zur Diskussion gestellt wird.

Stichwörter: Beton, Feuchtehaushalt, Berechnung, Bewitterung

#### **Abstract**

In the meantime there exists a whole range of programs with which the moisture behaviour of a structural component can be calculated to close approximation with reality. Thus the present problems lie mainly in the availability of the material properties required. Within the framework of this study, these have been measured for a selected, commonly used type of concrete. In determining the parameters, several peculiarities, particularly in the case of vapour diffusion and capillary water absorption, were observed. The vapour diffusion resistance, for instance, is strongly dependent on r.H. and layer. The behaviour of the capillary water absorption is strongly dependent on the type of pre-conditioning. The calculations for the moisture behaviour of a concrete prism exposed to natural climatic conditions show a good degree of concordance for the first six months. But if the experiment

is continued, there are strong deviations between the calculations and the experiment. In contrast to the calculations the concrete shows a „self-sealing“ effect for which a hypothetical explanation is tried to give.

Keywords: Concrete, Moisture Behaviour, Calculations, Weathering

### 1 Problemstellung

Bei Betonaußenbauteilen stehen mit zunehmender Tendenz Sanierungsmaßnahmen an. In diesem Zusammenhang treten stets Fragen hinsichtlich des feuchtetechnischen Verhaltens und der dabei unter natürlichen Klimawirkungen ablaufenden Transportvorgänge sowie der dadurch verursachten Risiken auf. Diese können entweder mit Hilfe von Experimenten oder durch rechnerische Abschätzung beantwortet werden. Auf Grund der Tatsache, daß Experimente oft zeitaufwendig, zum Teil meßtechnisch problematisch und kostspielig sind, ist in den letzten Jahren intensiv an der Entwicklung rechnerischer Ansätze und Verfahren zur Ermittlung realer Wärme- und Feuchtetransportvorgänge gearbeitet worden. Die derzeitige Problematik solcher Rechenmethoden besteht hauptsächlich in der Verfügbarkeit der dafür erforderlichen Stoffeigenschaften bzw. Transportkoeffizienten. Sind diese vorhanden, so können Feuchteberechnungsverfahren einen wesentlichen Beitrag zur Abschätzung, Bewertung und Optimierung des Feuchtehaushalts in Außenbauteilen unter realen Klimasituationen leisten. Für den Baustoff Beton besteht bezüglich feuchtetechnischer Kennwerte erheblicher Untersuchungsbedarf. Im Rahmen dieser Arbeit sollen dazu für eine ausgewählte praxisübliche Betonsorte die für Feuchteberechnungsverfahren notwendigen Stoffeigenschaften bzw. Transportkoeffizienten bestimmt werden [1]. Die unter Verwendung dieser Kennwerte mit dem PC-Programm WUFI [2] durchgeführten Berechnungen des Feuchtetransportes werden mit Freilandmessungen verglichen, um die Grenzen der Feuchtetransportberechnung bei Betonaußenbauteilen aufzuzeigen.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen lassen sich zwei Teile unterscheiden. Der erste Teil ist die Bestimmung der Materialkennwerte. Den zweiten Teil bildet die rechnerische Validierung mit Labor- und Freilandmessungen.

### 2. Probenherstellung

Der flüssige Beton (B25; CEM I 32,5 R) wird in Würfel mit einer Kantenlänge von 20 cm gegossen und nach dem Entschalen für 3 Monate unter konstanten Bedingungen in einem Klimaraum bei 23°C und 80% relativer Luftfeuchte gelagert. Nachfolgend werden die Proben für die entsprechenden Versuche formatiert und konditioniert. Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl erfolgt an rechteckigen ca. 2 cm dicken Scheiben mit einer Fläche von

10 x 15 cm<sup>2</sup>. Die Proben für die Bestimmung der Flüssigtransportkoeffizienten und der Freilandbewitterung besitzen einen Querschnitt von 5x5 cm<sup>2</sup> bei einer Länge von ca. 15 cm und sind an den Flanken mit einem Epoxidharz abgedichtet, so daß der Feuchtetransport nur eindimensional stattfinden kann. Alle Proben werden vor Versuchsbeginn bei 70°C und trockener Luft bis zur Massenkonstanz getrocknet.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Materialkennwerte

Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ( $\mu$ -Wert) erfolgt in Abhängigkeit von der relativen in Anlehnung an DIN 52 615. In Abbildung 1 links sind die  $\mu$ -Werte für den Trockenbereich und den Feuchtbereich in Abhängigkeit vom Abstand zur oberen Schalungsfläche dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Schichtabhängigkeit. Für alle Schichten ist der  $\mu$ -Wert im Feuchtbereich größer als im Trockenbereich (ca. 25 %). Die Messungen an denselben Proben nach 2 zeigen, daß im Rahmen der Meßgenauigkeit der Einfluß des Betonalters und somit der Carbonatisierung vernachlässigbar ist. Die Abhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von der relativen Feuchte kann Abbildung 1 rechts entnommen werden. Gemessen wird an verschiedenen Scheiben eines Würfels. Der  $\mu$ -Wert ist stark feuchteabhängig und nimmt bis ca. 60 % r.F. zu; bei höheren Feuchten werden die Werte wieder kleiner. Die Schichtabhängigkeit ist erneut zu beobachten.

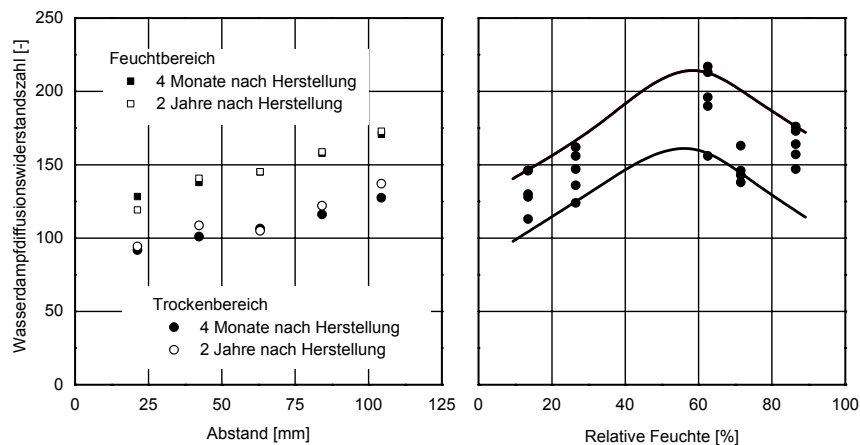


Abbildung 1 Diffusionswiderstandszahlen für den Trockenbereich und den Feuchtbereich in Abhängigkeit vom Abstand zur oberen Schalungsfläche (links) sowie in Abhängigkeit von der mittleren relativen Luftfeuchte (rechts).

Das nach DIN 52 617 bestimmte kapillare Wasseraufnahmeverhalten ist in Abbildung 1 links dargestellt. Nach Norm ist die Probe vor Versuchsbeginn zu trocknen. Es zeigt sich ein vom  $\sqrt{t}$ -Gesetz abweichendes Verhalten. Wird die Probe hingegen bei 65 % r.F. konditioniert (Hohlkreise), so ist das Wasseraufnahmeverhalten annähernd linear mit der Wurzel der Saugzeit.

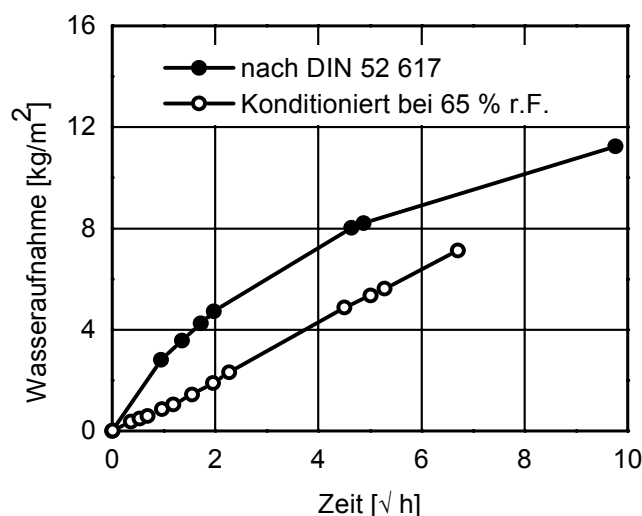


Abbildung 2 Wasseraufnahme einer getrockneten Probe (Punkte) und einer bei 65 % r.F. konditionierten Probe (Kreise) aufgetragen über die Wurzel der Zeit.

### 3.2 Freilandversuche und rechnerische Untersuchungen

In Abbildung 3 links ist der mit Hilfe von WUFI berechnete Verlauf des über die Gesamtdicke gemittelten Wassergehalts im Vergleich zum gemessenen Feuchteverlauf des Betonprismas für einen Zeitraum von 6 Monaten nach Beginn der Bewitterung dargestellt. Die Messung (Linie) und Berechnung (Hohlkreise), die relativ gut übereinstimmen, zeigen einen von kurzen Trocknungsperioden unterbrochenen Anstieg. Abbildung 3 rechts zeigt die sich in den Fassadenprismen einstellenden Feuchteprofile für zwei verschiedene Zeitpunkte während der anfänglichen Befeuchtungsphase. Auch hierbei ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung.

Setzt man allerdings die Beobachtung über die ersten 6 Monaten hinaus fort, so ergibt sich für den gesamten Zeitraum von 2 Jahren der in Abbildung 4 links dargestellte Feuchteverlauf. Auffällig ist das aus feuchtetechnischer Sicht träge Ver-

halten des Betonprismas nach ca. 6 Monaten. Der gemessene mittlere Wassergehalt verändert sich kaum mit den äußeren Bedingungen und bleibt konstant auf ca.  $100 \text{ kg/m}^3$ . Der berechnete Verlauf weicht deutlich vom gemessenen ab und nimmt weiterhin zu. Ein ähnliches Verhalten ist bei den Feuchteprofilen zu beobachten. Diese sind für verschiedene Zeitpunkte Abbildung 4 rechts zu entnehmen. Hier kommt es zu einem scheinbaren Stillstand der Feuchteverteilung.

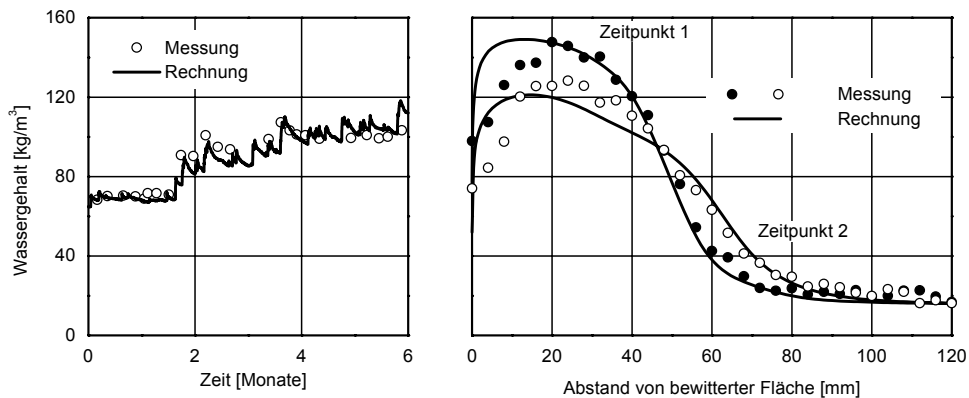


Abbildung 3 Gemessene und berechnete Wassergehalte einer einseitig bewitterten Probe für die ersten sechs Monate des Beobachtungszeitraumes (links Verlauf des Wassergehaltes und rechts Feuchteprofile zu verschiedenen Zeitpunkten).

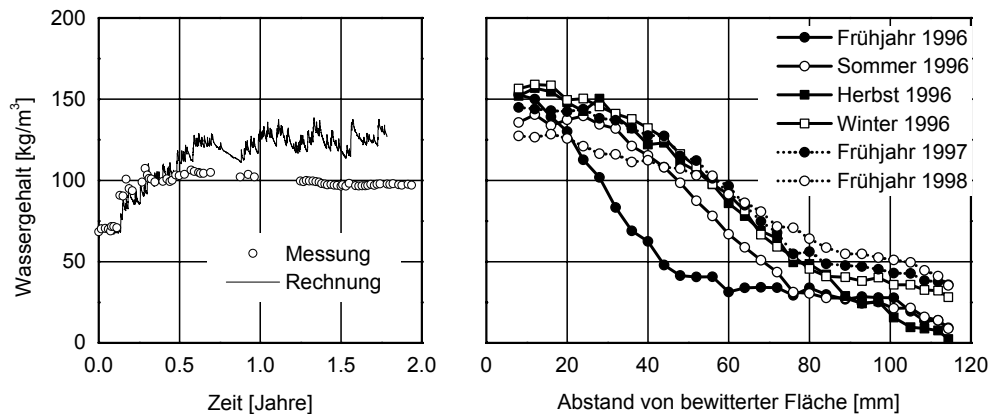


Abbildung 4 Gemessene und berechnete Wassergehalte einer einseitig bewitterten Probe für die ersten 2 Jahre (rechts) des Beobachtungszeitraumes (links Verlauf des Wassergehaltes und rechts Feuchteprofile zu verschiedenen Zeitpunkten).

#### 4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Bestimmung des Diffusionswiderstandes zeigt, daß der  $\mu$ -Wert stark schichtabhängig ist und um bis zu ca. 25 % variieren kann, wobei er mit zunehmender Tiefe größer wird. Der Einfluß des Betonalters und somit der Carbonatisierung ist im Rahmen der Meßgenauigkeit vernachlässigbar. Der  $\mu$ -Wert ist stark feuchteabhängig und hat einen Maximalwert bei ca. 60 % mittlerer relativer Luftfeuchte. Dies kann damit erklärt werden, daß das im Zementgel eingelagerte Wasser zu einer Verengung des freien Porenraums aufgrund von führt und damit der Diffusionswiderstand ansteigt. Dieses Sorptionswasser ist zu stark gebunden um am Feuchtetransport teilzunehmen. Erst beim bei höherer Luftfeuchte aufgenommenen Wasser kann ein Flüssigtransport stattfinden der zu einer Erhöhung des Gesamttransports führt. Die Folge ist, daß im Gegensatz zu den meisten anderen Baustoffen [3] im Feuchtbereich höhere Diffusionswiderstandszahlen als im Trockenbereich ermittelt werden.

Das Abweichen vom  $\sqrt{t}$ -Verhalten bei der kapillaren Wasseraufnahme könnte ebenfalls durch Quellvorgänge erklärbar sein. Die ohnehin schon sehr kleinen Kapillarporen werden durch das Quellen verkleinert, so daß die Wasseraufnahme behindert wird. Das belegen auch Untersuchungen der Wasser- und Hexanaufnahme von Zementstein [4]. Das Hexan wird entsprechend dem  $\sqrt{t}$ -Verhalten aufgesaugt, nicht aber das Wasser. Gleichzeitige Messungen der hygrischen Quellung zeigen, daß der Zementstein bei der Hexanaufnahme, im Gegensatz zur Wasseraufnahme, nicht quillt. Daß die Wasseraufnahme des untersuchten Betons bei einer Vorkonditionierung auf 65 % relativer Feuchte aber annähernd dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz folgt, könnte daran liegen, daß hier die kleinen Kapillarporen bereits mit Wasser gefüllt und gequollen sind (siehe auch [5]).

Führt man Feuchteberechnungen mit den ermittelten Werten durch, so erzielt man für die ersten sechs Monate eine gute Übereinstimmung zwischen den rechnerisch und experimentell bestimmten Feuchteprofilen und dem mittleren Feuchteverlauf. Setzt man den Vergleich über die ersten sechs Monate hinaus fort, kommt es zu starken Abweichungen zwischen der Rechnung und dem Experiment. Auffallend ist die scheinbare „Selbstabdichtung“ des Betons. Die gemessenen Feuchteprofile zeigen, daß die Feuchtefront nach dem ersten halben Jahr fast unverändert bleibt. Eine mögliche Erklärung für das „anormale“ Verhalten des Betons könnte sein, daß sich flüssiges Wasser in den extrem kleinen Gelporen des Zementsteins wie ein „Bingham-Medium“ verhält. Allerdings ergeben Messungen an einem Material mit einer dem Zementstein vergleichbaren Porenradienverteilung ein Wasseraufnahmeverhalten entsprechend dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz [6]. Auch der Versuch einer Erklärung durch Ablagerungsvorgänge kann entkräftet werden, indem man die kapillaren Wasseraufnahmeversuche mehrfach wiederholt.

Auch ein Saugversuch über die bewitterte Oberfläche an einer der Freibewitterungsproben mit einer „scheinbar“ unveränderbaren Feuchtefront zeigt, daß die Feuchtefront nicht weiter in das Probeninnere hinein wandert. Nach über 450 Stunden sind nur ca. die ersten 50 mm der Probe gesättigt. Führt man denselben Versuch an der gleichen Probe anschließend über die Rückseite durch, so müßte man die gleiche Eindringtiefe, wie bei der vorderseitigen Wasseraufnahme erwarten. Die gemessenen Feuchteprofile zeigen aber, daß schon nach ca. 50 Stunden die Probe fast komplett durchfeuchtet ist.

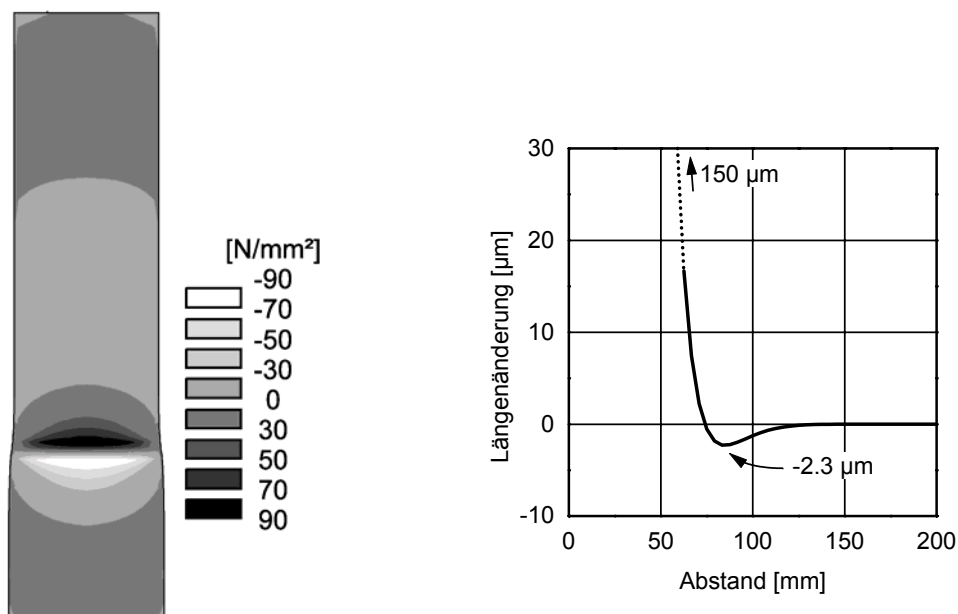


Abbildung 4 Berechnung der durch die Quellung auftretende Spannung hinter der aufgequollenen Zone (links) sowie der durch die Spannung hervorgerufene Verengung des Querschnitts (rechts).

Nachdem die bereits beschriebenen Modelle („Bingham-Medium“, Ablagerungen) keine ausreichende Erklärung für die gemessene Absperrwirkung des Betons darstellen, wird ein weiteres Erklärungsmodell zur Diskussion gestellt. Wie bereits beschrieben, findet durch Quellvorgänge eine Verengung der Kapillarporen statt. Ein Teil der Quellung wird durch das Materialgerüst nach außen weitergegeben und führt zu einer meßbaren makroskopischen Quellung der Probe (bei Zementstein bis zu 6 ‰ Quellung [4]). Findet in einem Stab aus homogenem Material für einen Teil der Probenlänge eine Quellung statt (hygrische Dehnung),

so tritt hinter der gequollenen Zone aufgrund der sich dabei einstellenden Kräfte immer eine Zone mit vermindertem Querschnitt auf. Da durch innere Quellung der Querschnitt der Kapillarporen schon stark verkleinert ist, könnte auch eine geringfügige Verengung zu der beobachteten Unterbindung des Wassertransport führen. Eine erste überschlägige Berechnung dieses Phänomens mit einem Finite-Elemente-Rechenprogramm zeigt die sich ergebenden Spannungen hinter der gequollenen Zone (Abbildung 5 links) und die dadurch hervorgerufene Verengung des Querschnitts (rechts). Wird der Probe dagegen von der Rückseite Wasser zugeführt, so bewirkt die damit verbundene Quellung ein Aufheben der vorhandenen Verengung, so daß damit die dargestellten Beobachtungen erklärbar werden. Natürlich ist dieses Modell erst ein erster Versuch zur Erklärung der beobachteten Phänomene und muß durch weitere Messungen überprüft werden.

#### 5 Literatur

- [1] Krus, M.: *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken.* Dissertation Universität Stuttgart 1995.
- [2] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [3] Künzel, H.; Bernhardt, P.: Wasserdampfdurchlässigkeit von Baustoffen bei verschiedenen Feuchtezuständen. Berichte aus der Bauforschung (1973), H. 80, S. 15-19, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [4] Krus, M., Künzel, H.M.: Das Wasseraufnahmeverhalten von Betonbaustoffen. IBP-Mitteilung 22 (1995) Nr. 273.
- [5] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Berichte aus dem Baustoffinstitut der TU München (1991), H. 1, S. 1-131.
- [6] Winter, K., Krus, M., Künzel, H.M.: Feuchtetransport in feinporigen Materialien. Intern. Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3 (1997), H. 1, S. 1-14.