

## **Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert**

**M. Krus, A. Holm und Th. Schmidt**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik,

(Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis)

### **Zusammenfassung**

Die Untersuchung des Feuchtehaushalts von Bauteilen anhand von Computerberechnungen gewinnt immer mehr an Bedeutung, da mit Hilfe neuer Berechnungsmodelle gute Übereinstimmung mit Messergebnissen erreicht wird. Einer breiten Anwendung dieser Verfahren steht jedoch bisher die relativ aufwendige meßtechnische Bestimmung der unverzichtbaren Kapillartransportkoeffizienten entgegen. Hier wird deshalb eine neue Methode vorgestellt, diese Koeffizienten aus bekannten Standardstoffkennwerten (freie Wassersättigung, Bezugsfeuchtegehalt und Wasseraufnahmekoeffizient) abzuschätzen. Diese sind für überschlägige Berechnungen des Feuchtehaushalts vieler Materialien ausreichend genau, wie ein Vergleich der damit berechneten Saugprofile mit gemessenen Profilen zeigt.

Stichwörter: Feuchtigkeitsverteilung, numerische Simulation, Kapillartransportkoeffizienten, w-Wert

*Estimating the capillary transport coefficients of mineral building materials from the water absorption coefficient.*

### **Abstract**

*Computer calculations are of increasing importance for the assessment of moisture balance in building components, since modern calculation methods achieve good agreement with measurements. A broader application of these methods is hampered, however, by the laborious measurements needed to determine the capillary transport coefficients essential for the calculations. A new*

*method is therefore presented which allows to estimate the coefficients from well-known standard material properties (free capillary saturation, practical moisture content and water absorption coefficient). These coefficients are sufficient for estimative assessment of the moisture balance of many materials, as is demonstrated by comparison of suction profiles calculated in this way and measured profiles.*

**Key words:** *Moisture distribution, numerical simulation, capillary transport coefficients, water absorption coefficient*



**Dr.-Ing. Martin Krus**, 1984 Diplom Chemieingenieurwesen Universität Karlsruhe. 9/85 bis 11/86 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart. Seit 11/86 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen. Seit 2/95 Gruppenleiter in der Abteilung Hygrothermik. 1995 Promotion an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen an der Universität Stuttgart.



**Dipl.-Phys. Andreas Holm**, Studium der Physik an der Technischen Universität München. Seit 1996 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen.



**Dipl.-Phys. Thomas Schmidt**, Studium der Physik an der Universität Regensburg. Seit 1994 für das Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen tätig.

## 1 Einleitung

Die Untersuchung des Feuchtehaushaltes von Bauteilen anhand von Computerberechnungen gewinnt immer mehr an Bedeutung, da mit Hilfe neuer Berechnungsmodelle gute Übereinstimmungen mit Messergebnissen erreicht werden, z.B. [1, 2]. Durch derartige Berechnungen können zahlreiche kostenintensive und langfristige Freibewitterungs- oder Laborversuche ganz oder teilweise ersetzt werden. Voraussetzung jeder Berechnung sind möglichst genaue und physikalisch korrekte Stoffkennwerte. Vor allem die Feuchtetransportkoeffizienten beeinflussen die Rechenergebnisse wesentlich. Während die Bestimmung der Transportkoeffizienten für die Dampfdiffusion einfach und seit langem im Rahmen einer DIN-Norm [3] geregelt ist, gestaltet sich die Bestimmung der wassergehaltsabhängigen Kapillartransportkoeffizienten aufwendiger. Sie erfordert die Bestimmung von Wassergehaltsverteilungen im Baustoff mit Hilfe von speziellen Messanlagen, die z.B. auf der kernmagnetischen Resonanz oder der g-Durchstrahlung beruhen. Oft ist aber der zeitliche und finanzielle Aufwand für eine derartige Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten zu groß und eine exakte Bestimmung des Feuchtehaushaltes gar nicht notwendig. Für diese Fälle wäre eine Methode zur näherungsweise Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten ( $w$ -Wert) vorteilhaft, dessen Bestimmung ebenfalls normiert ist [4] und der für zahlreiche Baustoffe bereits bekannt ist.

## 2 Beziehung zwischen Kapillartransport- und Wasseraufnahmekoeffizient

Zur Bestimmung einer Näherungsfunktion für die Kapillartransportkoeffizienten ist die Beschreibung der Beziehung zwischen dem  $w$ -Wert als integralem Faktor für die Wasseraufnahme und den feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten notwendig. Der Wasseraufnahmekoeffizient ist nach DIN 52617 gemäß folgender Gleichung definiert:

$$m_w = w \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

$m_w$  [kg/m<sup>2</sup>] aufgenommene Wassermenge

$w$  [kg/m<sup>2</sup>√h] Wasseraufnahmekoeffizient

Krischer [5] hat mit dem Wassergehalt als treibendem Potential den Kapillartransportkoeffizienten gemäß folgendem Diffusionsansatz eingeführt:

$$g_w = -D_w(u) \frac{du}{dx} \quad (2)$$

$g_w$  [kg/m<sup>2</sup>h] Flüssigtransportstromdichte  
 $D_w(u)$  [m<sup>2</sup>/s] Kapillartransportkoeffizient  
 $u$  [kg/m<sup>3</sup>] Wassergehalt

Aus dem 2. Fick'schen Gesetz erhält man für ein konstantes  $D_w$  mit der Fehlerfunktion als Lösungsansatz folgende Beziehung:

$$m_w(t) = \int_{t=0}^t g_w(x=0, t) dt = \frac{2\sqrt{D_w} u_f}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad (3)$$

Ein Vergleich mit Gl. (1) ergibt nach einfacher Umformung:

$$D_w = \frac{\pi w^2}{4 u_f^2} \quad (4)$$

$u_f$  [kg/m<sup>3</sup>] freie Wassersättigung

Gl. (4) ist allerdings nur für konstante, also feuchteunabhängige Kapillartransportkoeffizienten korrekt. Für nicht konstante Transportkoeffizienten ist die Beziehung zwischen  $D_w$  und dem  $w$ -Wert wesentlich komplizierter und nur in Ausnahmefällen analytisch lösbar. Deshalb wurde hier ein Korrekturfaktor  $K$  eingeführt, so daß sich die folgende Beziehung für den mittleren Kapillartransportkoeffizienten ergibt:

$$\overline{D_w} = \frac{\pi w^2}{4 u_f^2} \quad (5)$$

### 3 Exponentielle Approximation

Für die meisten Baustoffe lassen sich die Kapillartransportkoeffizienten recht gut mit einer Exponentialfunktion approximieren [6, 7, 1]:

$$D_w(u) = D_{w0} \exp\left(\frac{u}{u_f} \ln \frac{D_{wf}}{D_{w0}}\right) \quad (6)$$

$D_{wf}$  [m<sup>2</sup>/s] Kapillartransportkoeffizient bei freier  
Wassersättigung

$D_{wo}$  [m<sup>2</sup>/s] Kapillartransportkoeffizient bei trockenem  
Baustoff

Für den mittleren Kapillartransportkoeffizienten nach Gl. (6) ergibt sich:

$$\overline{D_w} = \frac{D_{wf} - D_{wo}}{\ln(D_{wf} / D_{wo})} \quad (7)$$

Aus Gl. (5) ergibt sich damit folgende Bestimmungsgleichung für  $D_{wf}$ :

$$D_{wf} = \frac{K \pi w^2 \ln(D_{wf} / D_{wo})}{4 u_f^2} + D_{wo} \quad (8)$$

Der Korrekturfaktor ist, wie durch eine etwas umfangreichere theoretische Herleitung gezeigt werden kann, nur abhängig vom Verhältnis  $D_{wf}/D_{wo}$  und wurde empirisch bestimmt. Dazu wurde bei Verwendung der exponentiellen Näherung für verschiedene Verhältnisse  $D_{wf}/D_{wo}$  die zeitabhängige Wasseraufnahme rechnerisch bestimmt, in Gl. (8) eingesetzt und der Faktor K so angepasst, daß die Gleichung erfüllt wird. Es ergibt sich für K folgende Bestimmungsgleichung:

$$K = 0,025 \cdot 10^{(-0,4 (\log(D_{wf}/D_{wo}) - 3))} + 0,61 \quad (9)$$

Abb. 1 zeigt den Korrekturfaktor im Bereich von 1 bis 100 000 für  $D_{wf}/D_{wo}$ . Damit sind die meisten mineralischen Baustoffe abgedeckt.

Nach wie vor bleibt aber das Problem, daß Gl. (8) eine Gleichung mit zwei Unbekannten darstellt, so daß für ihre Lösung weitere Annahmen gemacht werden müssen. Künzel [1] legt das Verhältnis von  $D_{wf}/D_{wo}$  auf drei Zehnerpotenzen fest und erhält damit für viele Baustoffe eine recht gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung. Allerdings bleibt auf diese Weise der Einfluss der unterschiedlichen Porenradienverteilungen (grob- oder feinporiger Baustoff) auf die Form der Wassergehaltsprofile unberücksichtigt. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Weg gegangen, indem die Feuchtetransportvorgänge im hygroskopischen Feuchtebereich genauer betrachtet werden.

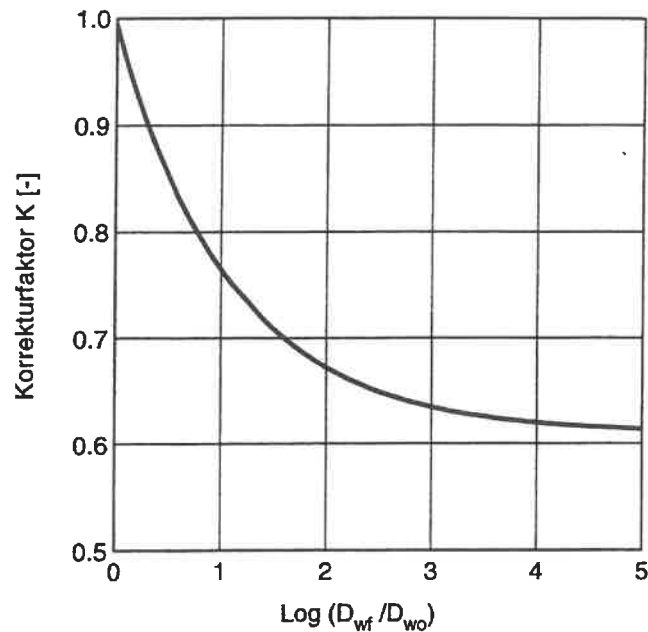


Abb 1 Korrekturfaktor in Gl. (9) für verschiedene Verhältnisse von  $D_{wf}/D_{wo}$ .

#### 4 Kapillartransportkoeffizienten im hygroskopischen Feuchtebereich

Im hygroskopischen Feuchtebereich wird der Wassergehalt durch die Sorptionsisotherme beschrieben. Der Bereich unterhalb etwa 50 % rel. Luftfeuchte ist bestimmt durch eine monomolekulare bis multimolekulare Belegung der inneren Oberflächen mit Wasser. In diesem Bereich ist die Bindung des Wassers so stark, daß ein merklicher Flüssigtransport ausgeschlossen werden kann. Oberhalb von 50 % tritt im Mikroporenbereich mit Porenradien zwischen  $10^{-9}$  und  $10^{-7}$  m die sog. Kapillarkondensation auf, die auf eine Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes über konkav gekrümmten Menisken zurückzuführen ist [8, 9]. Der bei Messung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes poröser Baustoffe nach DIN 52615 für den Feuchtebereich ermittelte im Vergleich zum Trockenbereich stets kleinere Diffusionswiderstand ist auf einen der Diffusion überlagerten Flüssigtransport in diesem Feuchtebereich zurückzuführen [10]. Aus der Differenz der dabei im höheren Luftfeuchtebereich zu den im Trockenbereich gemessenen Massenströmen lassen sich bei Kenntnis der Sorptionsisotherme für den hygroskopischen Feuchtebereich die Kapillartransportkoeffizienten berechnen. Das Berechnungsverfahren ist in [7] ausführlich erläutert. Die auf diese Weise aus Diffusionsmessungen im Trocken- und Feuchtebereich ermittelten Flüssigtransportkoeffizienten sind für eine Reihe von Baustoffen in Tabelle 1 aufgelistet.

Wie aus dieser Tabelle ersichtlich, ergibt sich für alle aufgeführten

Materialien fast der gleiche Transportkoeffizient von etwa  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dies ist nicht überraschend, wenn man bedenkt, daß unter diesen Bedingungen in allen Proben die Poren bis zum gleichen maximalen Porenradius mit Wasser gefüllt sind. Damit sollte sich auch ein vergleichbarer Kapillartransportkoeffizient ergeben. Die größten Abweichungen vom Mittelwert von  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  ergeben sich beim Porenbeton und beim Gips. Beide Materialien besitzen einen niedrigen Diffusionswiderstand und entsprechend geringen Unterschied zwischen Trocken- und Feuchtbereich, wodurch sich hier der größte Einfluß der Messfehler ergeben dürfte.

Es erscheint somit vernünftig, für eine Approximation den Kapillartransportkoeffizienten im hygroskopischen Feuchtbereich auf  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  festzulegen. Dieser Kapillartransportkoeffizient ist dem mittleren Sorptionswassergehalt bei der Diffusionsmessung im Feuchtbereich (50 / 93 % r.F.), also der Sorptionsfeuchte bei 71,5 % r.F. zugeordnet. Da für die meisten Baustoffe nur der Wassergehalt bei 80 % r.F. (Bezugsfeuchtegehalt) bekannt ist, ist es sinnvoll, diesen Wert zugrunde zu legen. Somit ergibt sich für die exponentielle Approximation des Kapillartransportkoeffizienten eine Funktion, die bei  $u_{80}$  mit einem Wert von  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  anfängt und - abhängig vom w-Wert des Materials - bei  $u_f$

Tabelle 1: Aus isothermen Diffusionsmessungen im Trocken- und Feuchtbereich bestimmte Flüssigtransportkoeffizienten [7]. Für die Berechnung ist die Kenntnis der Sorptionsisotherme notwendig.

Material	mittlerer Sorptionsfeuchtegehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	Flüssigtransportkoeffizient $D_{wo}$ [m <sup>2</sup> /s]
Baumberger	31	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Obernkirchner	2,7	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Rüthener	11	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Sander	18	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Gips	7,1	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Kalksandstein	24	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Porenbeton	44	$1,1 \cdot 10^{-10}$
Ziegel	2,9	$2,6 \cdot 10^{-10}$

mit einem entsprechend höheren Wert endet. Da bei Gl. (8) von einer Exponentialfunktion ausgegangen wurde, die bei  $u = 0$  beginnt, muss Gl. (8) durch Multiplikation mit dem Faktor  $u_f/(u_f - u_{80})$  angepasst werden:

$$D_{wf} = \frac{K \pi w^2 \ln(D_{wf} / D_{wo})}{4 u_f (u_f - u_{80})} + D_{wo} \quad (10)$$

$u_{80}$  [kg/m<sup>3</sup>] Sorptionswassergehalt bei 80 % r.F. (Bezugsfeuchtegehalt)

$D_{wo}$  [m<sup>2</sup>/s] Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsfeuchtebereich, stoffunabhängig auf  $2 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s festgesetzt

Ein Umstellen von Gl. (10) ergibt:

$$\frac{4 (D_{wf} - D_{wo})}{\pi K \ln(D_{wf} / D_{wo})} = \frac{w^2}{u_f (u_f - u_{80})} \quad (11)$$

Die rechte Seite von Gl. (11) ist bekannt, die linke nur von  $D_{wf}$  abhängig. Gl. (11) ist in Abb. 2 dargestellt, so daß bei Kenntnis des  $w$ -Wertes, der freien Wassersättigung und des Bezugsfeuchtegehaltes auch  $D_{wf}$  auf einfache Weise graphisch bestimmt werden kann.

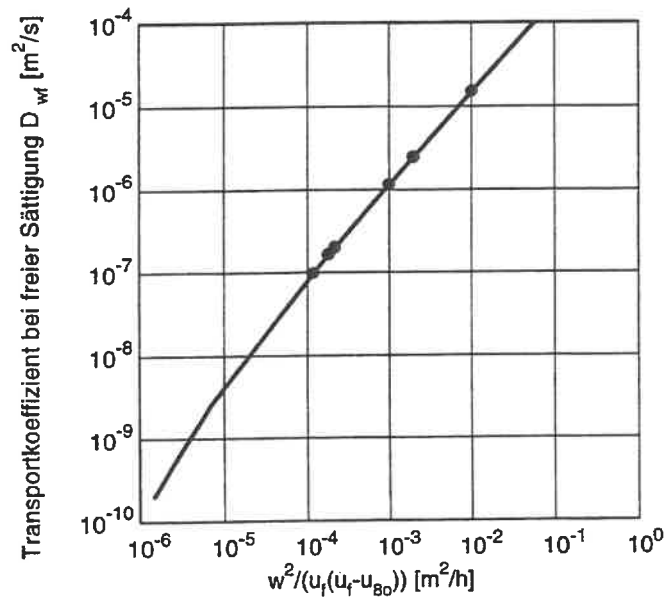


Abb. 2 Darstellung von Gl. (11) zur graphischen Bestimmung von  $D_{wf}$ . Die Werte für die aufgeführten Materialien sind als Punkte eingezeichnet.



## 5 Anwendungsbeispiele und Vergleich mit Messungen

Für die Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten nach Gl. (10) ist lediglich die Kenntnis der feuchtetechnischen Grundkennwerte  $u_{80}$ ,  $u_f$  und  $w$ -Wert notwendig. Tabelle 2 zeigt für eine Anzahl von Baustoffen die auf diese Weise gewonnenen Ergebnisse für  $D_{wf}$  und in Abb. 3 sind die Kapillartransportkoeffizienten dieser Werkstoffe dargestellt. Die Kapillartransportkoeffizienten erstrecken sich je nach Material über 2,7 bis annähernd 5 Zehnerpotenzen.

In Abb. 4 sind für die vier Natursandsteinvarietäten die mit Hilfe dieser approximierten Kapillartransportkoeffizienten berechneten Profile den während der Saugversuche gemessenen Profilen gegenübergestellt. Obwohl es sich bei diesen Sandsteinen um in ihren feuchtetechnischen Eigenschaften sehr unterschiedliche Werkstoffe handelt, erhält man mit dieser Approximation eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Lediglich beim grobporigen Rütthener Sandstein mit seinem extrem großen  $w$ -Wert von 18 kg/m<sup>2</sup>·h sind merkliche Unterschiede zwischen Messung und Rechnung zu erkennen.

Tabelle 2: Feuchtetechnische Grundkennwerte der verwendeten Materialien und daraus berechnete exponentielle Approximation des Flüssigtransportkoeffizienten bei freier Wassersättigung nach Gl. (10). Für den Transportkoeffizienten bei  $u_{80}$  wird ein Wert von  $2 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s festgelegt, womit sich die Transportkoeffizienten über den in der Tabelle mitangegebenen Bereich von 2,0 bis 4,9 Zehnerpotenzen erstrecken.

Material	Bezugs- feuchte- gehalt $u_{80}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	freie Wasser- sättigung $u_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser- aufnahme- koeffizient $w$ [kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0.5</sup> ]	Flüssig- transport- koeffizient $D_{wf}$ [m <sup>2</sup> /s]	$\log \frac{D_{wf}}{D_{w0}}$ [-]
Baumberger	36	210	2,6	$1,66 \cdot 10^{-7}$	2,9
Obernkirchner	2,8	90	2,8	$1,15 \cdot 10^{-6}$	3,8
Rütthener	12	185	18	$1,51 \cdot 10^{-5}$	4,9
Sander	19	120	1,2	$9,82 \cdot 10^{-8}$	2,7
Kalksandstein	25	250	3,2	$1,63 \cdot 10^{-7}$	2,9
Ziegel	3,1	340	15	$2,46 \cdot 10^{-6}$	4,1
Gipsputz	7,9	350	5,1	$2,00 \cdot 10^{-7}$	3,0

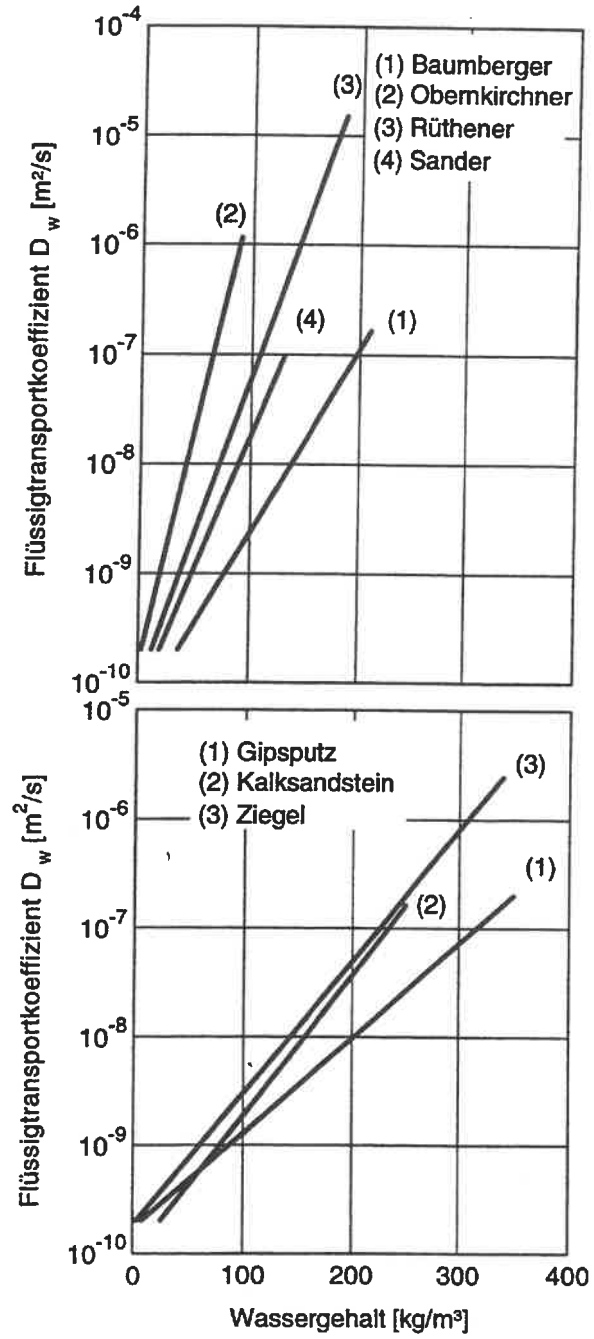


Abb. 3: Exponentielle Näherung für den Kapillartransportkoeffizienten, aufgetragen über dem Wassergehalt. Oben: vier Natursteinvarietäten  
Unten: drei künstliche Baustoffe

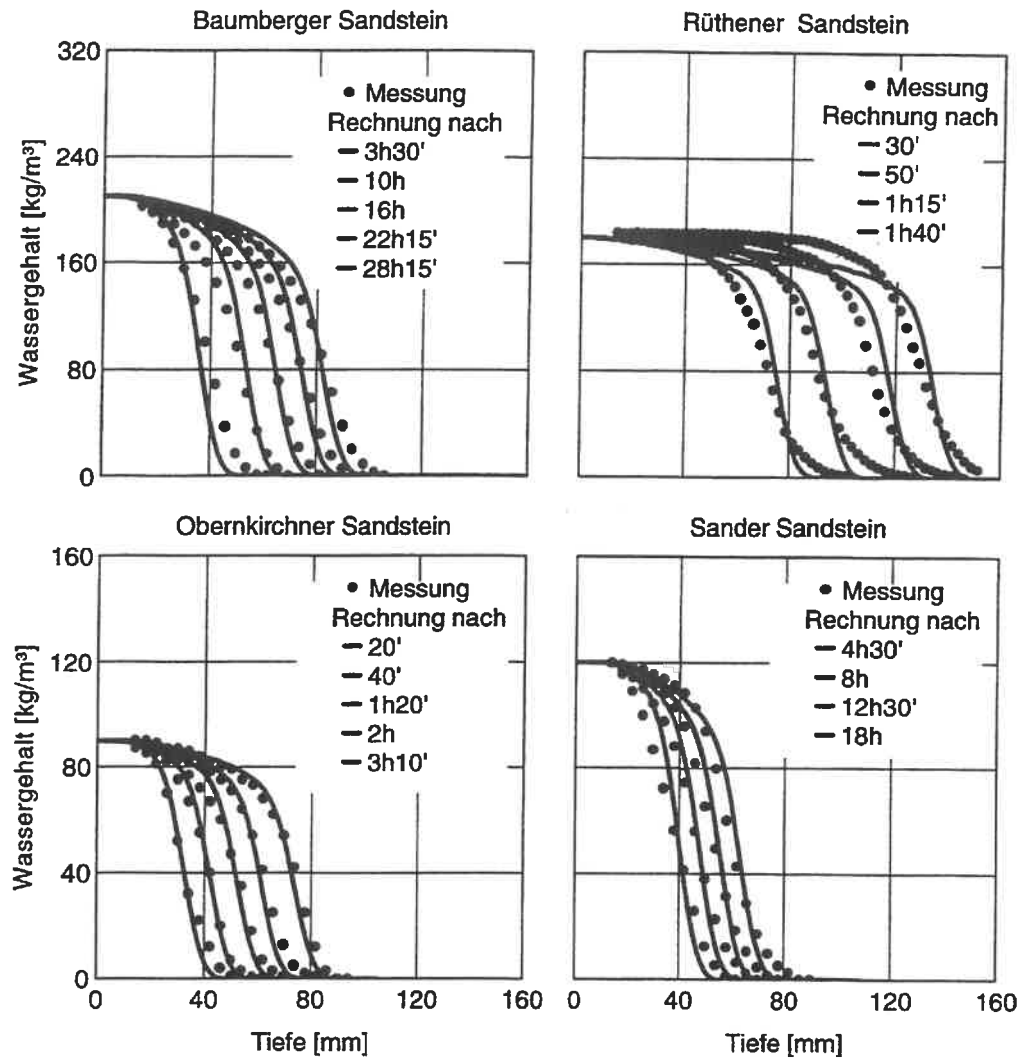


Abb. 4: Wassergehaltsverteilungen über die Tiefe verschiedener Natur-sandsteinproben zu unterschiedlichen Zeitpunkten, anhand von NMR-Messungen bzw. Berechnungen eines Saugvorganges. Mit Hilfe der in Bild 3 oben dargestellten exponentiellen Approximationen wurden die mit einer durchgezogenen Linie dargestellten Verteilungen berechnet

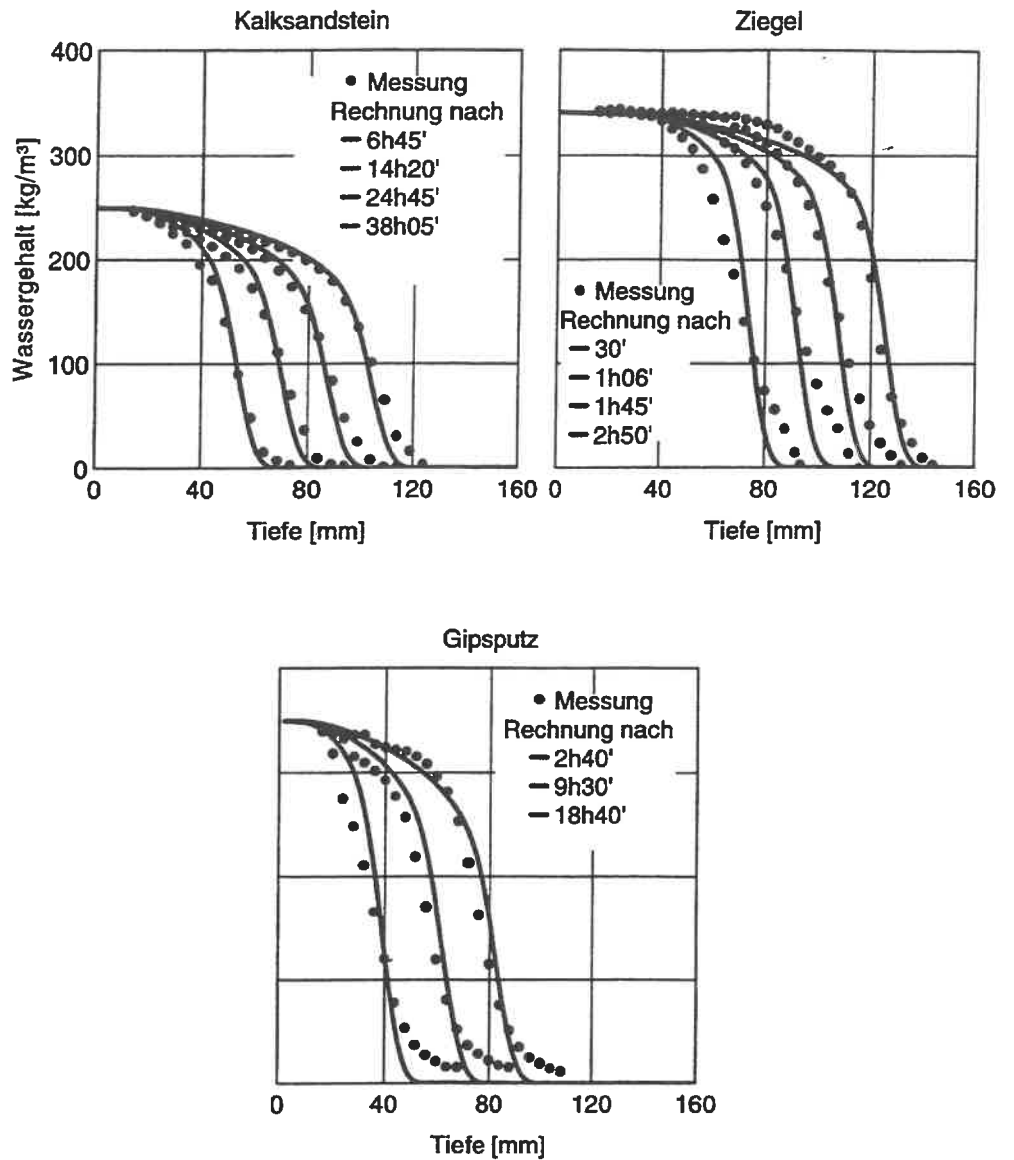


Abb. 5: Wassergehaltsverteilungen über die Tiefe verschiedener künstlicher Baustoffe zu unterschiedlichen Zeitpunkten, anhand von NMR-Messungen bzw. Berechnungen eines Saugvorganges. Mit Hilfe der in Bild 3 unten dargestellten exponentiellen Approximationen wurden die mit einer durchgezogenen Linie dargestellten Verteilungen berechnet

Für die künstlichen Baustoffe - Kalksandstein, Ziegel und Gipsputz - sind in Abb. 5 die berechneten Verteilungen ebenfalls mit den gemessenen Verteilungen dargestellt. Obwohl sich die  $w$ -Werte dieser drei Baustoffe um mehr als den Faktor 5 unterscheiden, ergibt sich bei allen dreien eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung.

Verwendet man für die Berechnung Kapillartransportkoeffizienten, die aus den Messprofilen berechnet wurden - Abb. 6 zeigt für den Rühthener Sandstein die so gewonnenen Koeffizienten-, ist erwartungsgemäß eine noch bessere Übereinstimmung zu erreichen (Abb. 7).

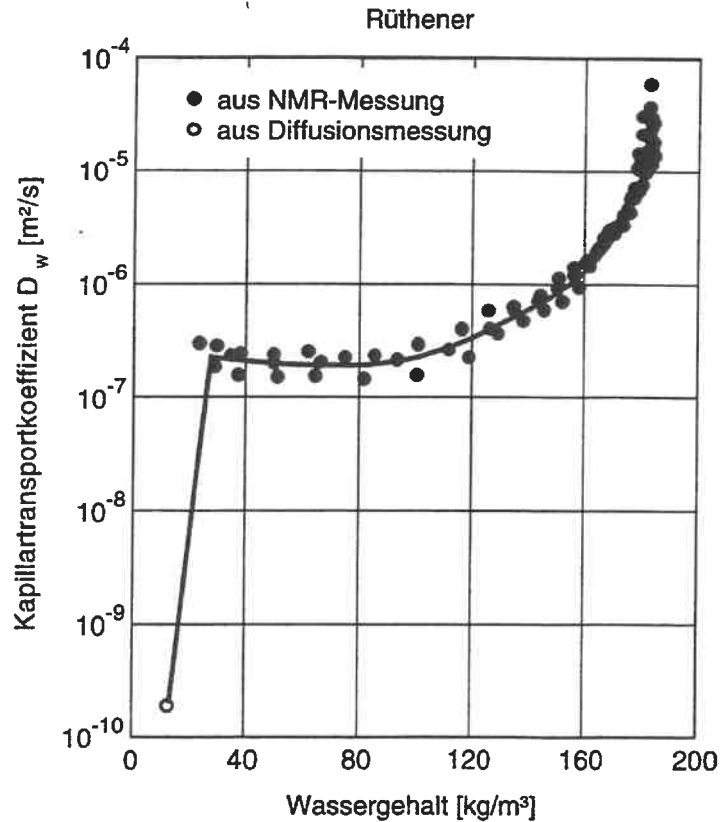


Abb. 6: Kapillartransportkoeffizienten des Rühthener Sandsteins, ermittelt aus gemessenen Verteilungen (siehe Bild 4 links unten). Der für den Sorptionsfeuchtebereich aus Diffusionsmessungen ermittelte Transportkoeffizient ( $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ist als Kreis mit eingezeichnet.

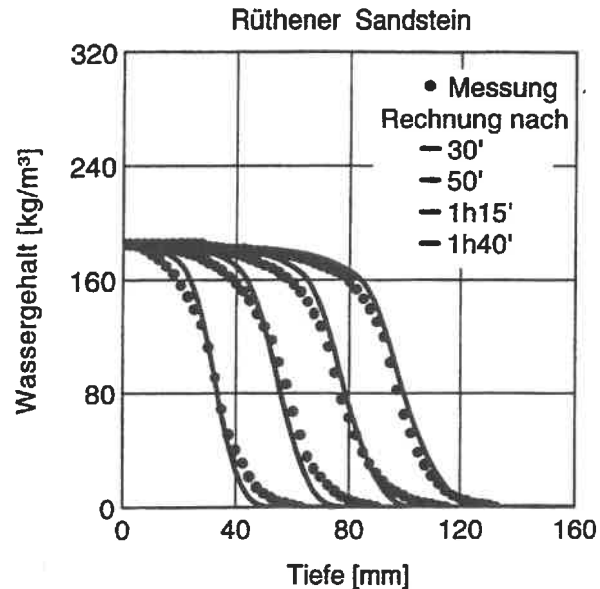


Abb. 7: Wassergehaltsverteilungen über die Tiefe einer Probe aus Rüthener Sandstein zu verschiedenen Zeitpunkten. Mit Hilfe der in Bild 6 dargestellten Kapillartransportkoeffizienten wurden die mit einer durchgezogenen Linie dargestellten Verteilungen berechnet.

## 6 Folgerungen

Bei der Berechnung des Feuchtehaushaltes von Bauteilen hat, sofern ein Kontakt kapillaraktiver Materialien mit flüssigem Wasser vorliegt, die Wahl der Kapillartransportkoeffizienten einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Rechenergebnisse. Diese Kapillartransportkoeffizienten können heutzutage mit entsprechender Messtechnik für die meisten Baustoffe recht genau bestimmt werden. Häufig ist aber der dafür erforderliche Zeit- und Kostenaufwand für die Aufgabenstellung zu groß und/oder eine hohe Genauigkeit gar nicht notwendig. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, bei Kenntnis der feuchtetechnischen Grundkennwerte (freie Wassersättigung, Bezugsfeuchtegehalt, Wasseraufnahmekoeffizient) ohne weitere Messung eine gute Näherung für den Kapillartransportkoeffizienten zu erhalten.

Dieses Verfahren beruht auf einer exponentiellen Näherung für den feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten. Beim praktischen Feuchtegehalt ist der Kapillartransportkoeffizient, entsprechend den dargestellten theoretischen

Überlegungen und durch Messungen belegt, für alle mineralischen Baustoffe näherungsweise gleich groß. Der Wert für diesen Wassergehalt wird materialunabhängig auf  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  festgelegt. Damit lässt sich, wie in Gl. (1) bis (11) hergeleitet, aus dem  $w$ -Wert der komplette exponentielle Verlauf auf einfache Weise graphisch ermitteln oder iterativ berechnen. Anhand von sieben in ihren Eigenschaften sehr unterschiedlichen Baustoffen wird gezeigt, daß mit den derart gewonnenen Näherungen für die Kapillartransportkoeffizienten eine durchweg gute Übereinstimmung berechneter und gemessener Feuchteprofile erreicht wird. Allerdings ist die Übereinstimmung zu verbessern, wenn entsprechend aufwendig aus Feuchteprofilen ermittelte Koeffizienten verwendet werden können. Dieses Näherungsverfahren kann natürlich nur für solche Werkstoffe sinnvolle Kapillartransportkoeffizienten liefern, deren Saugverhalten dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz folgt.

Nicht vergessen darf man dabei auch, daß sich bei den meisten Baustoffen die Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang wesentlich von denen für die Trocknung unterscheiden [7, 1]. Einen dem  $w$ -Wert vergleichbaren Kennwert gibt es für die Kapillartransportvorgänge während der Trocknung derzeit ebenso wenig, wie ein Näherungsverfahren zur Bestimmung der dabei vorliegenden Transportkoeffizienten. Zur Bestimmung eines Näherungsverfahrens, vergleichbar dem gerade beschriebenen, finden aber zur Zeit intensive Untersuchungen statt, so daß eventuell in nächster Zeit ein solches Verfahren aufgezeigt werden kann.

### Literatur

- 1 Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Diss. Universität Stuttgart (1994).
- 2 Häupl, P.; Stopp, H.; Strangfeld, P.; Fechner, H.: *Vergleich gemessener und berechneter Feuchteverteilungen bei innerer Kondensatbildung in Baustoffproben*. Bauphysik 16 (1994), H. 5, S. 138 - 147.
- 3 DIN 52615: *Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen*. November 1987.
- 4 DIN 52617: *Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen*. Mai 1987.
- 5 Krischer, O. und Kast, W.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin (1978).

- 6 Kießl, K.: *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen*. Diss. Universität Essen Gesamthochschule (1983).
- 7 Krus, M.: *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken*. Diss. Universität Stuttgart (1995).
- 8 Gertis, K. und Werner, H.: *Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen*. Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1972), H. 258, S. 6 - 36.
- 9 Klopfer, H.: *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden (1974).
- 10 Krus, M.: *Ist der Diffusionswiderstand von Baustoffen wirklich feuchteabhängig?* 9. Bauklimatisches Symposium: Tagungsbeiträge Bd. 1, 14.- 16. September 1994 in Dresden. Dresden: TU, 1994, S. 287 - 302.