

Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung

A. Holm und M. Krus,

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

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

Zusammenfassung

Um eine möglichst breite Anwendung von Rechenverfahren zur Berechnung des Wärme- und Feuchtehaushalts zu erreichen, sind vereinfachte Bestimmungsverfahren zur Ermittlung der notwendigen hygrischen Kennwerte erforderlich. Ein solches Approximationsverfahren ist bereits für die Bestimmung der Flüssigkeitstransportkoeffizienten des Saugvorganges entwickelt worden. Für den Trocknungsvorgang ergeben sich zumeist deutlich kleinere Transportkoeffizienten. Hier wird ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, aus einem einfachen Trocknungsversuch auch diese Koeffizienten zu approximieren. Wie ein Vergleich von Berechnungen unter Verwendung dieser Approximation und exakt ermittelten Koeffizienten zeigt, ergibt sich damit nur eine geringfügige, vertretbare Abweichung zum realen Verhalten.

Stichwörter: Feuchtehaushalt, numerische Simulation, Trocknung, Transportkoeffizienten, Weiterverteilung, Approximation.

Approximate Determination of the Transport Coefficients for Moisture Redistribution from a simple Drying Experiment and Numerical Adaptation.

Abstract

To reach a broad application of computation methods for the calculation of the moisture balance in building components, simplified methods for the determination of the necessary hygric material properties are required. Such an approximate method has already been developed for the determination of the transport

coefficients for liquid capillary absorption. The drying process mostly shows significantly smaller liquid transport coefficients. A new method is presented to determine approximately these coefficients from results of a simple drying experiment. A comparison of calculated results using this approximation and exactly determined coefficients shows only moderate and acceptable deviations from reality.

Key words: Moisture balance, numerical simulation, drying process, transport coefficients, moisture redistribution, approximation



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



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.

1 Einleitung

Für instationäre Berechnungen des Feuchtehaushaltes mit neuen Rechenverfahren sind z.T. zusätzliche Kennwerte notwendig, um eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung erhalten zu können. Besonderen Einfluß auf den Feuchtehaushalt hat der Flüssigtransport. Durch ihn können pro Zeiteinheit um Zehnerpotenzen größere Wassermengen im Materialinneren transportiert werden als durch Diffusion. Eine korrekte Bestimmung der Transportkoeffizienten für den Flüssigtransport ist daher von entscheidender Bedeutung. Wie in [1] dargelegt, ist dabei zwischen Befeuchtung und Trocknung zu unterscheiden, d.h. es ergeben sich für diese beiden Randbedingungen unterschiedliche Flüssigtransportkoeffizienten. Die Bestimmung dieser stark wassergehaltsabhängigen Transportkoeffizienten wird durch die Messung von Wassergehaltsprofilen im Baustoff ermöglicht, wozu Anlagen eingesetzt werden, die auf der kernmagnetischen Resonanz oder der γ -Durchstrahlung beruhen [2, 3, 4]. Oft ist eine solch genaue, aber zeit- und kostenintensive Bestimmung nicht unbedingt notwendig. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, das es gestattet, aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten, der einen integralen Faktor für die Wasseraufnahme darstellt, eine gute Näherung für die Flüssigtransportkoeffizienten des Befeuchtungsvorganges zu erhalten [5]. Zur Bestimmung der Koeffizienten zur Beschreibung des Flüssigtransports während des Trocknungsprozesses besteht derzeit noch kein vergleichbares Verfahren.

2 Grundlagen

Bringt man die Oberfläche eines kapillaraktiven, porösen mineralischen Baustoffes in Kontakt mit Wasser, wird dieses in das Material gesaugt. Da die dafür verantwortlichen kapillaren Zugkräfte im Porenraum nicht direkt erfaßbar sind, ihre meßbaren Auswirkungen (Wassergehaltsgefälle) aber in einem funktionalen Zusammenhang damit stehen müssen, hat Krischer [6] formal den Wassergehalt als treibendes Potential eingeführt. Dies führt zu folgendem Diffusionsansatz:

$$g_w = -D_w(w) \frac{dw}{dx} \quad (1)$$

g_w [kg/m²s] Flüssigtransportstromdichte
 $D_w(w)$ [m²/s] Flüssigtransportkoeffizient
 w [kg/m³] Wassergehalt

Bei der theoretischen Herleitung geht Krischer von einem Kapillarbündelmodell

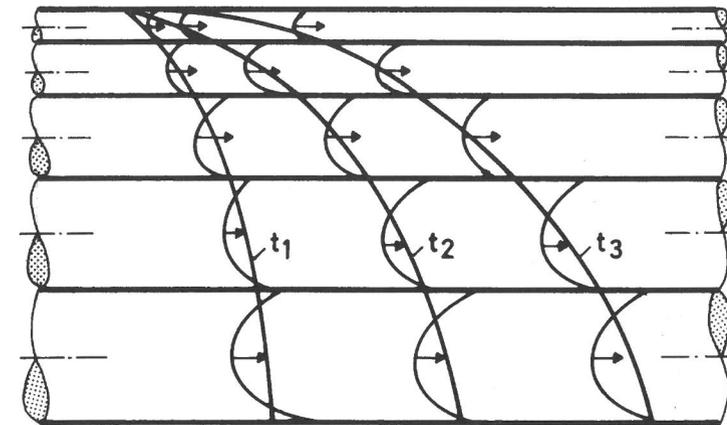
aus, das aus parallel angeordneten, widerstandslos miteinander verbundenen Zylinderkapillaren unterschiedlicher Durchmesser besteht. In allen gefüllten Kapillaren eines bestimmten Querschnitts soll Druckausgleich herrschen. Der vorliegende Unterdruck in der Flüssigkeit wird dabei durch den kapillaren Zug des ausgelasteten Meniskus der größten noch gefüllten Kapillare in diesem Querschnitt bestimmt. Dieser Zusammenhang zwischen dem in einem Querschnitt vorliegenden kapillaren Zug und dem Wassergehalt führt zu einem stark wasser-gehaltsabhängigen Kapillartransportkoeffizienten D_w .

Wird die Wasserzufuhr unterbunden, findet ein Weitertransport der Flüssigkeit statt, obwohl sich an der nicht mehr mit Wasser versorgten Oberfläche Gegenmenisken ausbilden (siehe Abbildung 1 unten). Diese Weiterverteilung der Flüssigkeit beruht darauf, daß die noch nicht gefüllten kleineren Poren aufgrund ihrer höheren Saugkraft über die vorhandenen Querverbindungen die größeren gefüllten Poren leersaugen. Es ist zu erwarten, daß dieses Weiterverteilen der Flüssigkeit deutlich langsamer abläuft als der Transport beim Saugvorgang. Es müssen also je nach Randbedingungen (benetzte oder unbenetzte Oberfläche) für den Flüssigtransport unterschiedliche Transportkennfunktionen angesetzt werden.

Eine genaue Bestimmung des wasser-gehaltsabhängigen Kapillartransportkoeffizienten, sowohl für den kapillaren Befeuchtungs- als auch für den Weiterverteilungsvorgang, ist nur mit speziellen Meßanlagen möglich. In der Regel werden dafür die Wassergehaltsprofile mit hoher Ortsgenauigkeit entweder mit Hilfe der kernmagnetischen Resonanz oder der γ -Durchstrahlung bestimmt. Oft ist aber der zeitliche und finanzielle Aufwand für eine derartige Bestimmung zu groß und eine exakte Bestimmung des Feuchtehaushalts gar nicht notwendig. Mit Hilfe der in [5] bereits vorgestellten Methode läßt sich der Kapillartransportkoeffizient D_w für den kapillaren Saugvorgang durch drei einfach zu bestimmende, meistens bereits bekannte hygrothermische Stoffkenngrößen (freie Wassersättigung, Bezugsfeuchtegehalt, Wasseraufnahmekoeffizient) leicht ermitteln. Aufbauend auf Diffusionsmessungen an zahlreichen Baustoffen im Trocken- und Feuchtebereich und theoretischen Überlegungen, wird dabei der Kapillartransportkoeffizient im hygrokopischen Feuchtebereich auf $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ festgelegt. Unter Zugrundelegung einer exponentiellen Abhängigkeit des Transportkoeffizienten vom Wassergehalt lassen sich Kapillartransportkoeffizienten bestimmen, mit denen eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Feuchteprofilen erreicht wird.

Eine ähnlich einfache abschätzende Bestimmungsmethode, wie beim Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang, gibt es für die Weiterverteilung bisher nicht. Bislang wurden auch Porenmodelle, wie z.B. in [7] und [8] be-

Normales Saugen (vor Unterbrechung)



Weiterverteilung (nach Unterbrechung)

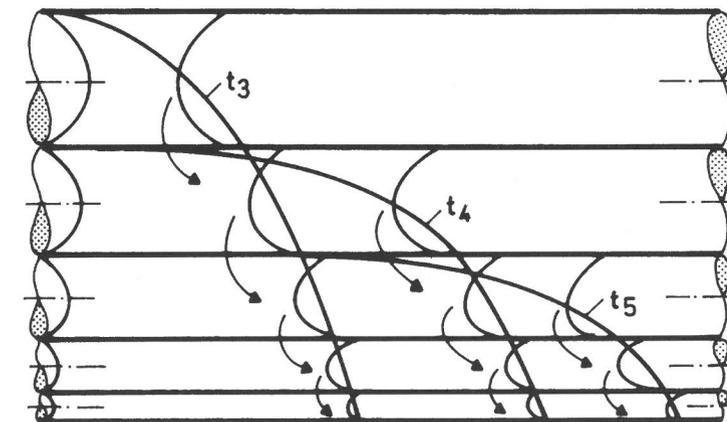


Abb. 1: Kapillartransporterscheinungen dargestellt am Modell miteinander verbundener Zylinderkapillaren unterschiedlichen Durchmessers. Oben: Durch einen geringeren Strömungswiderstand saugen die größeren Kapillaren mit größerer Geschwindigkeit. Eine kontinuierliche Feuchteverteilung bildet sich in Saugrichtung aus. Unten: Nach Unterbrechung der Wasserzufuhr findet eine Weiterverteilung der Flüssigkeit statt. Noch nicht gefüllte kleinere Kapillaren saugen aufgrund ihrer größeren Saugkraft die größeren Kapillaren leer.

schrieben, ausschließlich für die Approximation des kapillaren Saugens konzipiert und getestet. Da aber die Kenntnis des Flüssigtransportkoeffizienten der Weiterverteilung D_{ww} für die Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen notwendig ist, ist eine Methode zur vereinfachten Abschätzung dieser Koeffizienten gefragt.

Analog zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme sollten sich aus der Beobachtung des Trocknungsverhaltens eines anfangs wassergesättigten Versuchskörpers Informationen über die Kapillartransportkoeffizienten für den Weiterverteilungs- bzw. Trocknungsvorgang gewinnen lassen. Trägt man ähnlich wie beim kapillaren Wasseraufnahmeversuch nach DIN 52 617 die flächenbezogene Änderung des Wassergehaltes während des Austrocknungsvorganges im Wurzelzeitmaßstab auf, so ergibt sich ein für alle Baustoffe ähnliches Verhalten, wie in Abbildung 2 exemplarisch dargestellt. Es zeigt sich ein vom linearen

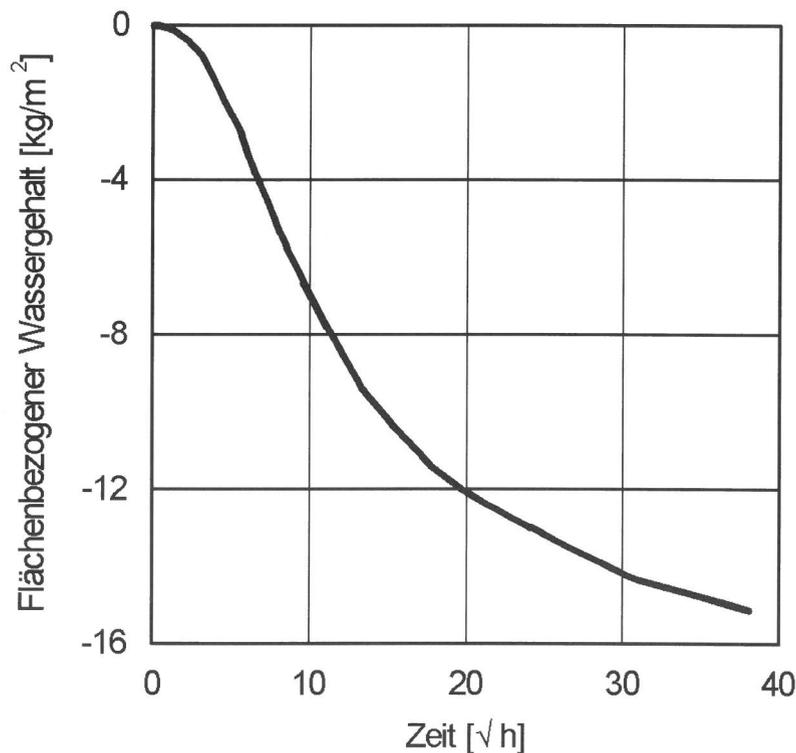


Abb. 2: Typischer Verlauf des flächenbezogenen Wassergehaltes während der Trocknung einer anfangs gesättigten Probe aus mineralischem Baustoff, dargestellt über die Wurzel der Zeit. Im Gegensatz zum Saugvorgang ist für den Trocknungsvorgang kein \sqrt{t} -Verhalten zu beobachten, da hierbei Flüssigtransport und Diffusion überlagert auftreten.

\sqrt{t} -Verhalten abweichender Verlauf. Grund dafür ist, daß es sich beim Austrocknen um eine Überlagerung aus Diffusion und kapillarem Flüssigtransport handelt.

Bei der Trocknung eines wassergesättigten porösen Baustoffes stellen sich nach Krischer [6] unterschiedliche Trocknungsphasen ein. Solange der Kapillartransport groß genug ist, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Inneren der Probe nachzuführen, muß die Verdunstung bei konstanten äußeren Klimarandbedingungen an der Oberfläche nahezu konstant bleiben. In diesem ersten Abschnitt der Trocknung herrscht an der Oberfläche des Trocknungsgutes immer Sattdampfdruck. Die Trocknungsgeschwindigkeit ist nur abhängig von den äußeren Bedingungen. Die Eigenschaften des Baustoffes haben keinen Einfluß auf die Trocknungsgeschwindigkeit, aber sie beeinflussen die zeitliche Länge des ersten Trocknungsabschnittes. Die Verdunstungsrate läßt sich für diesen Trocknungsabschnitt ähnlich dem Wärmeübergang durch

$$g_v = \beta_p (p_u - p_o) \quad (2)$$

g_v [kg/m^2s]	Wasserdampfstromdichte
β_p [kg/m^2sPa]	Wasserdampfübergangskoeffizient
p_o [Pa]	Wasserdampfpartialdruck an der Bauteiloberfläche
p_u [Pa]	Wasserdampfpartialdruck der Umgebung

beschreiben, wobei β_p aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten errechnet werden kann [9]:

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_k \quad (3)$$

α_k [W/m^2K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
-------------------------	---------------------------------------

Da der Kapillartransport im Baustoff mit sinkendem Wassergehalt stark zurückgeht, wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die an die Oberfläche transportierte Flüssigkeitsmenge nicht mehr ausreichen, um die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Der Wassergehalt und die relative Luftfeuchte an der Stoffoberfläche gehen stark zurück. Die Trocknungsgeschwindigkeit wird bestimmt durch das Zusammenspiel von immer geringer werdendem Flüssigtransport an die Oberfläche und Diffusion aus immer größerer Tiefe im Materialinneren. Dies führt dazu, daß man in diesem Trocknungsabschnitt eine stetig sinkende Trocknungsgeschwindigkeit beobachtet. Der Trocknungsverlauf ist in diesem Trocknungsabschnitt, außer von den Klimarandbedingungen, auch von der Diffusionswiderstandszahl und den Flüssigtransportkoeffizienten für die Weiterverteilung abhängig.

Nachdem sich für die meisten Baustoffe die Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang recht gut mit einer Exponentialfunktion approximieren lassen, erscheint es sinnvoll, diesen Ansatz auch für den Trocknungsvorgang anzuwenden. Im hygrokopischen Feuchtebereich, in dem der Flüssigtransport im Sorbatfilm abläuft, ist eine Unterscheidung zwischen Saugen und Weiterverteilen physikalisch nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wird derselbe Wert von $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ beim Bezugsfeuchtegehalt (Sorptionswassergehalt bei 80 % r.F.) zugrundegelegt, wie er in [5] für den Saugvorgang ausführlich erläutert wurde. Somit ergibt sich für die exponentielle Approximation des Kapillartransportkoeffizienten für den Trocknungsvorgang eine Funktion, die ebenfalls bei u_{80} mit einem Wert von $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ anfängt und - abhängig von den Ergebnissen der Trocknungsversuche - bei u_f mit einem entsprechend höheren Wert endet.

3 Durchführung der Untersuchungen

Die Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung sollen durch einfache Trocknungsversuche und rechnerische Simulation ermittelt werden. Es stehen dazu exemplarisch acht Baustoffe als Untersuchungsmaterial zur Verfügung. Von jedem Material werden rechteckige Proben bis zur freien Sättigung in Wasser gelagert, anschließend erfolgt eine Abdichtung aller Oberflächen mit einem wasserdampf- und durchlässigen Material (Eypoxidharz) mit Ausnahme der Verdunstungsfläche und Lagerung in einem Raum mit konstantem Raumklima (bei den hier vorgestellten Ergebnissen $23 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65 % r.F.). Die über die noch verbleibende Verdunstungsfläche erfolgte Austrocknung wird in regelmäßigen Abständen gravimetrisch erfaßt. Die so experimentell gewonnenen Ergebnisse dienen als Grundlage für die nun folgende rechnerische Ermittlung der Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung mit einem Feuchtetransportberechnungsprogramm.

Für diese rechnerische Ermittlung wird das bereits vielfach verifizierte Wärme- und Feuchteberechnungsprogramm WUFI [9] eingesetzt, wobei stattdessen natürlich jedes andere vergleichbare Berechnungsprogramm, das mit feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten rechnet, verwendbar ist. Da es sich beim Austrocknungsprozeß um eine Überlagerung aus Flüssigtransport und Diffusion handelt, muß neben der freien Wassersättigung und dem Bezugsfeuchtegehalt auch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Materials bekannt sein. Bei der Ermittlung der Transportkoeffizienten für den Weiterverteilungsprozeß werden die gemessenen und gerechneten Massenverläufe miteinander verglichen.

Es hat sich als sinnvoll erwiesen, bei der iterativen Bestimmung der Weiterverteilungskoeffizienten D_{ww} als Startwert die aus dem w -Wert ermittelten Trans-

portkoeffizienten des Saugvorganges einzusetzen. Für die Bestimmung von D_{ww} sind zwei Schritte durchzuführen. Zuerst muß der an der Verdunstungsfläche vorherrschende Wasserdampfübergangskoeffizient bzw. der über Gl.(3) damit verbundene Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt werden. Dazu wird dieser, ausgehend von dem in WUFI vorgeschlagenen Wert von $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ - in einem Klimaraum werden stets Lüfter eingesetzt, um im ganzen Raum ein gleichmäßiges Klima zu erreichen, so daß α stets über $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ liegen dürfte - erhöht, bis für den ersten Trocknungsabschnitt die berechneten Gewichtsverläufe mit den Messungen übereinstimmen.

Als zweiter Schritt wird der Kapillartransportkoeffizient D_{ww} für die freie Sättigung solange angepaßt, bis sich auch für die weitere Trocknung eine minimale Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Verlauf ergibt. Mit etwas Übung erreicht man bereits nach zwei bis vier Rechenläufen (je ca. 2 min Rechenzeit) eine recht gute Übereinstimmung.

Der Einfluß der geringeren Genauigkeit der approximierten Transportkoeffizienten auf den Feuchtehaushalt eines Bauteils unter natürlicher Bewitterung wird durch den Vergleich von Berechnungen mit exakten, aus gemessenen Wassergehaltsprofilen bestimmten Transportkoeffizienten und approximierten Koeffizienten dargestellt. Als Beispiel dient dazu ein Naturstein-Fassadenabschnitt unter natürlicher Bewitterung, bei dem frühere Untersuchungen [10] eine sehr gute Übereinstimmung von Messungen des Gewichtsverlaufs und der Feuchteprofile mit den unter Verwendung der genauen Koeffizienten berechneten Ergebnissen gezeigt hat. Es wird das Feuchteverhalten einer nach Westen orientierten Natursteinwand für einen Zeitraum von 2 Jahren berechnet, wobei als klimatische Randbedingungen gemessene Stundenmittelwerte eines für Holzkirchen typischen Jahres gewählt werden. Das Raumklima variiert entsprechend einer normalen Nutzung sinusförmig zwischen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und 35 % r.F. im Winter und $22 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65 % r.F. im Sommer. Um zu zeigen, wie bedeutsam die Verwendung unterschiedlicher Flüssigtransportkoeffizienten für den Saug- und Trocknungsvorgang ist, wird zusätzlich der Wasserhaushalt berechnet, der sich bei Verwendung der Flüssigtransportkoeffizienten des Saugvorganges auch für den Trocknungsprozeß einstellen würde.

4 Ergebnisse

Die feuchtetechnischen Grundkennwerte der untersuchten Werkstoffe sind in Tabelle 1 aufgelistet. Mit diesen Angaben lassen sich die Startwerte für die iterativ zu berechnenden Flüssigtransportkoeffizienten des Trocknungsvorganges bestimmen. Wie aus den Werten der Tabelle ersichtlich, beinhaltet die Palette der unter-

Tab.1: Feuchtetechnische Kennwerte der hier untersuchten Werkstoffe.

Material	Rohdichte [kg/m ³]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]	Bezugsfeuchte u_{80} [kg/m ³]	freie Sättigung u_f [kg/m ³]	Wasseraufnahmekoeffizient w [kg/m ² √h]
Rüthener Sandstein	1950	17	9,1	141	11,2
Sander Sandstein	2120	33	16	109	1,3
Baumberger Sandstein	1980	20	18	170	2,4
Falkenlöwe Ziegel	1790	11	0,8	231	14,7
Glindow Ziegel	1970	20	0,53	198	4,6
Perleberg Ziegel	1670	11	6,5	237	6,8
Kalksandstein	1900	28	22	222	3,2
poröses Glas	1500	27	100	300	2,4

suchten Proben recht unterschiedliche Baustoffe (verschiedene Natursandsteine, moderne und alte Ziegel und Kalksandstein) sowie ein Material, das nicht als Baustoff eingesetzt wird, aber aufgrund seiner extremen Porenradialcharakteristik bezüglich des Feuchteverhaltens von Interesse ist [11]. In der Auswahl sind sowohl extrem sorptionsfähige Materialien als auch Werkstoffe mit sehr niedrigem Sorptionswassergehalt, und es sind solche mit kleinem Wasseraufnahmekoeffizienten (Sander Sandstein mit 1,3 kg/m²√h) bis zu einem recht großen w-Wert vorhanden.

Tabelle 2 zeigt die durch Anpassung des berechneten Trocknungsverlaufs des ersten Trocknungsabschnittes an die Meßergebnisse sich ergebenden Wärmeübergangskoeffizienten. Mit zwei Ausnahmen ergibt sich immer ein Wert von 14 bzw. 15 W/m²K. Bei den Messungen an Falkenlöwer Ziegel ist wahrscheinlich der höhere Wert von 17 W/m²K dadurch bedingt, daß die Proben im Klimaraum in

Tab. 2: Aus rechnerischer Anpassung ermittelte Wärmeübergangskoeffizienten an den jeweiligen Verdunstungsflächen.

Material	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
Rüthener Sandstein	14
Sander Sandstein	14
Baumberger Sandstein	14
Falkenlöwe Ziegel	17
Glindow Ziegel	15
Perleberg Ziegel	15
Kalksandstein	14
poröses Glas	10

der Nähe des Lüfters lagen. Beim porösen Glas handelt es sich um Meßergebnisse aus früheren Versuchen [11], wobei die Trocknung im Labor bei 20 °C und einer mittleren relativen Luftfeuchte von 50 % durchgeführt wurde. Unter diesen Bedingungen ist ein geringerer Wärmeübergangskoeffizient zu erwarten (keine Lüftung).

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Messung des Trocknungsverlaufs für die drei Natursandsteine in Abbildung 4 bzw. Abbildung 5 für die drei Ziegel bzw. den Kalksandstein und das poröse Glas als Punkte dargestellt. In allen Fällen ergibt sich ein recht ähnlicher typischer Verlauf mit unterschiedlich langem ersten Trocknungsabschnitt (konstante Wassergehaltsabnahme) und anschließendem zweiten Trocknungsabschnitt. Als durchgezogene Linien sind in diesen Bildern die Ergebnisse der gemäß Abschnitt 3 durchgeführten Berechnungen aufgeführt. In allen Fällen ist eine sehr gute Übereinstimmung des berechneten Wassergehaltsverlaufs zu den Messungen erreichbar. In Tabelle 3 sind die dafür verwendeten Transportkoeffizienten bei freier Wassersättigung (bei U_{80} wird sie auf $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s festgelegt) aufgelistet. Mitaufgeführt sind die Transportkoeffizienten des Saugvorganges sowie das Verhältnis D_{ws}/D_{ww} . Dabei zeigt sich, daß D_{ww}

Tab. 3: Aus Tabelle 1 nach [5] bzw. aus rechnerischer Anpassung ermittelte Transportkoeffizienten für den kapillaren Saug- bzw. Trocknungsvorgang sowie deren Verhältnis.

Material	Flüssigtransportkoeffizient		Verhältnis D_{ws}/D_{ww} [-]
	Saugen $D_{ws}(u_f)$ [m ² /s]	Trocknen $D_{ww}(u_f)$ [m ² /s]	
Rüthener Sandstein	$9,70 \cdot 10^{-6}$	$3,20 \cdot 10^{-6}$	3
Sander Sandstein	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$4,13 \cdot 10^{-8}$	3
Baumberger Sandstein	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$1,10 \cdot 10^{-7}$	2
Falkenlöwe Ziegel	$5,38 \cdot 10^{-6}$	$3,58 \cdot 10^{-6}$	1,5
Glindow Ziegel	$5,80 \cdot 10^{-7}$	$3,87 \cdot 10^{-6}$	1,5
Perleberg Ziegel	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-7}$	10
Kalksandstein	$3,14 \cdot 10^{-7}$	$6,30 \cdot 10^{-8}$	5
poröses Glas	$7,60 \cdot 10^{-8}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$	3

immer kleiner ist als D_{ws} , deren Verhältnis aber stark materialabhängig ist. Während innerhalb der untersuchten Natursandsteine der Unterschied nur gering ist, ergibt sich bei den Ziegeln sowohl der kleinste als auch der größte Faktor (1,5 bis 10).

Die Ergebnisse der Berechnung des Feuchteverlaufs einer bewitterten Natursteinwand sind für einen Zeitraum von zwei Jahren in Abbildung 6 dargestellt. In Abbildung 6 oben wird der unter Zugrundelegung der exakt bestimmten Transportkoeffizienten berechnete Verlauf mit dem mit Hilfe der approximierten Koeffizienten berechneten verglichen. Dabei ergeben sich nur geringfügige Unterschiede. Verwendet man für die Weiterverteilung dagegen die Koeffizienten des Saugvorgangs, ergibt sich eine sehr deutliche Abweichung mit Wassergehalten, die nach zwei Jahren mehr als 30 % unter den wirklichen liegen (siehe Abbildung 6 unten).

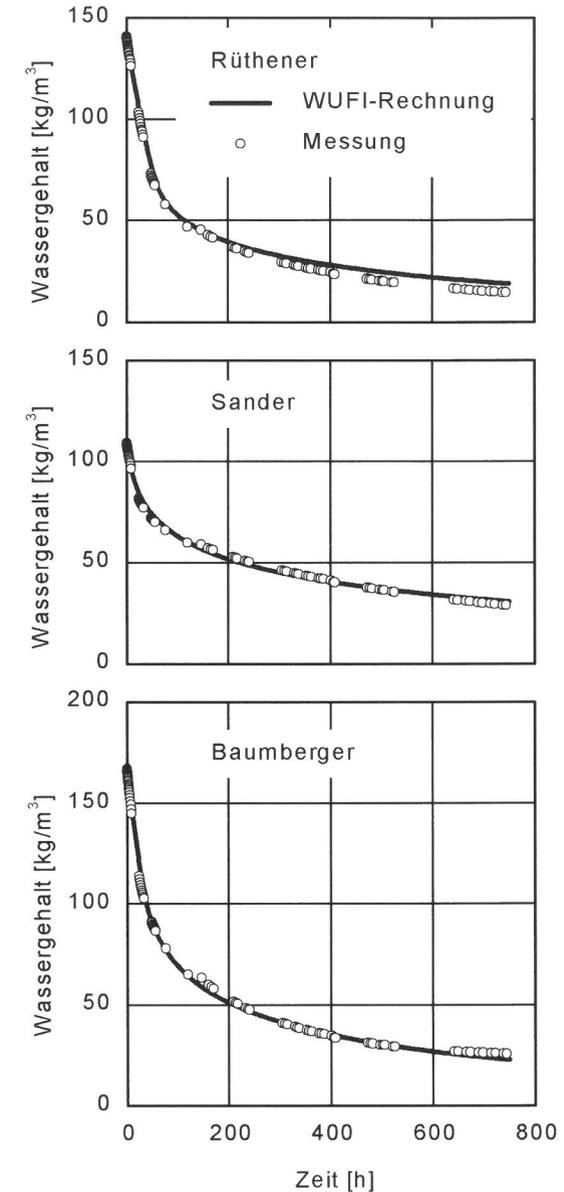


Abb. 3: Trocknungsverlauf einer anfangs gesättigten Probe aus Natursandstein bei einseitiger Austrocknung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte. Die Meßergebnisse sind als Punkte dargestellt, die Rechenergebnisse als durchgezogene Linie. Das Ende des 1. Trocknungsabschnittes ist mit einem Pfeil angedeutet.

Oben: Rüthener Sandstein Mitte: Sander Sandstein
Unten: Baumberger Sandstein

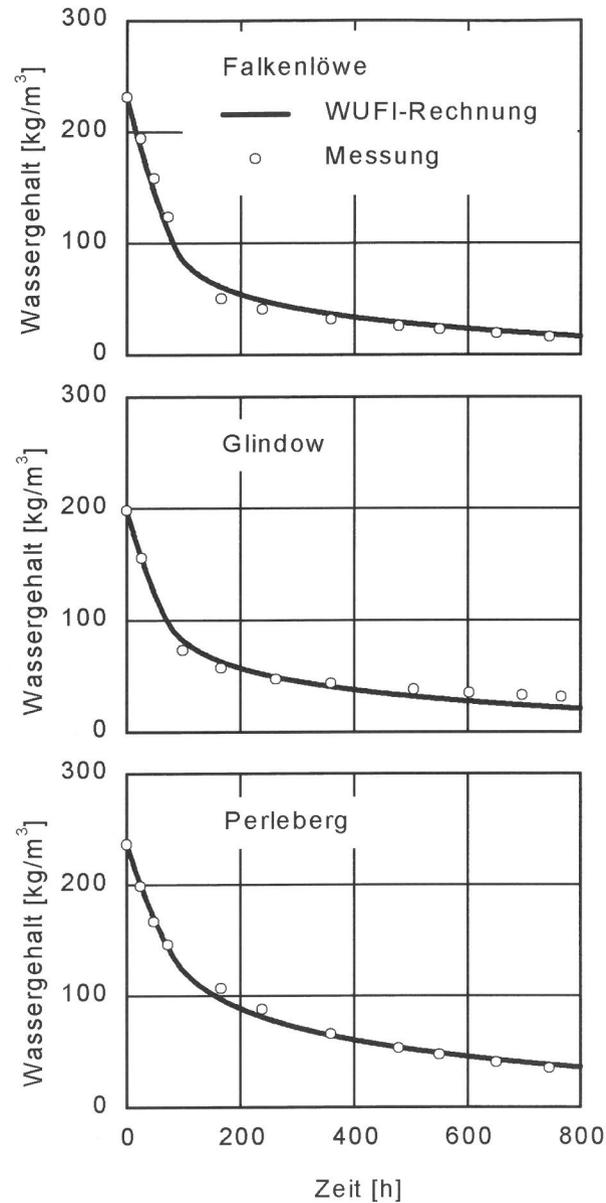


Abb. 4: Trocknungsverlauf einer anfangs gesättigten Probe aus Ziegel bei einseitiger Austrocknung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte. Die Meßergebnisse sind als Punkte dargestellt, die Rechenergebnisse als durchgezogene Linie.

Oben: Falkenlöwer Ziegel (nachgestellter Handstrichziegel)

Mitte: Glindower Ziegel (nachgestellter Handstrichziegel)

Unten: Perleberger Ziegel (historischer Ziegel ca. 300 Jahre alt)

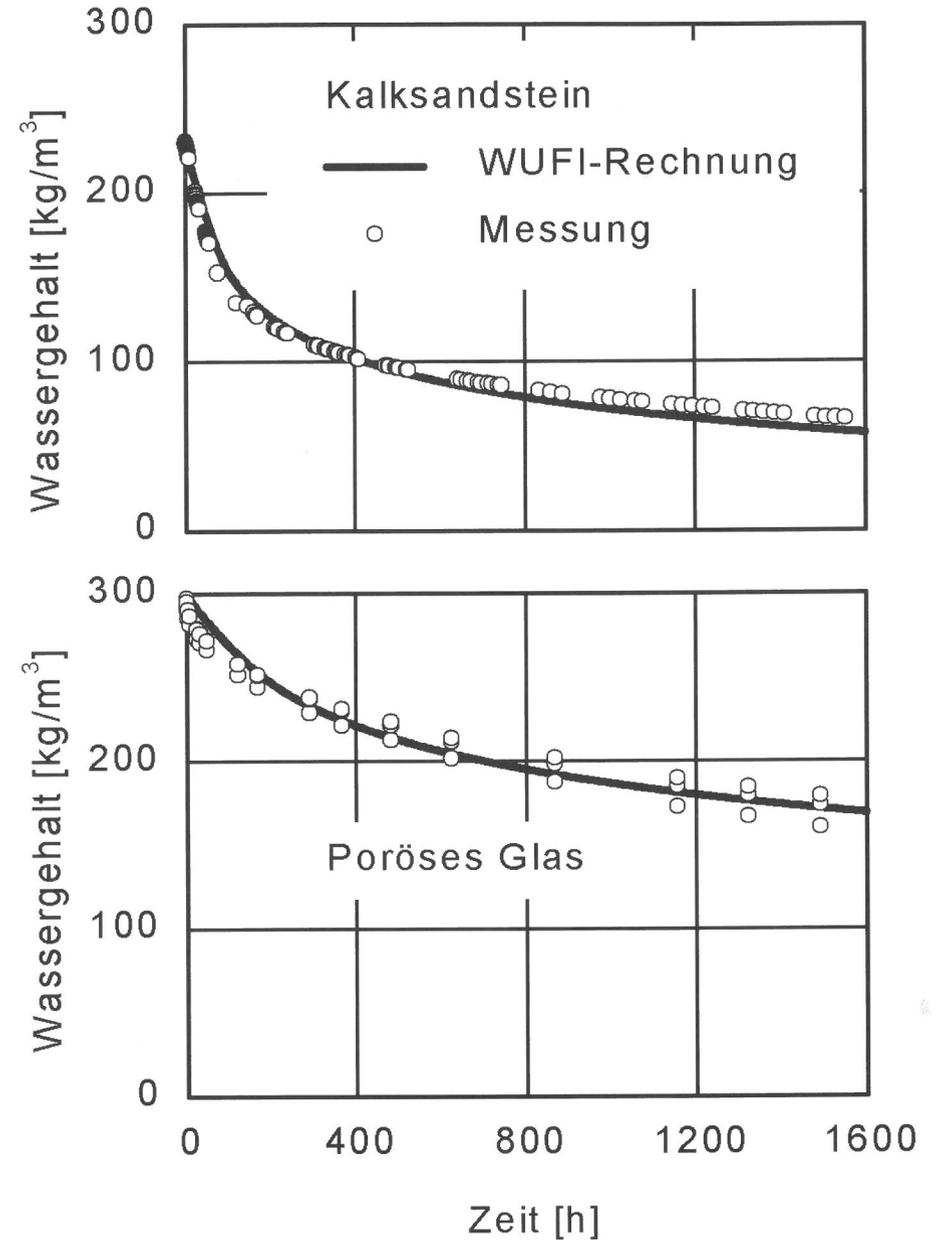


Abb. 5: Trocknungsverlauf einer anfangs gesättigten Probe aus Kalksandstein (oben) und porösem Glas (unten) bei einseitiger Austrocknung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte. Die Meßergebnisse sind als Punkte dargestellt, die Rechenergebnisse als durchgezogene Linie. Das Ende des 1. Trocknungsabschnittes ist mit einem Pfeil angedeutet.

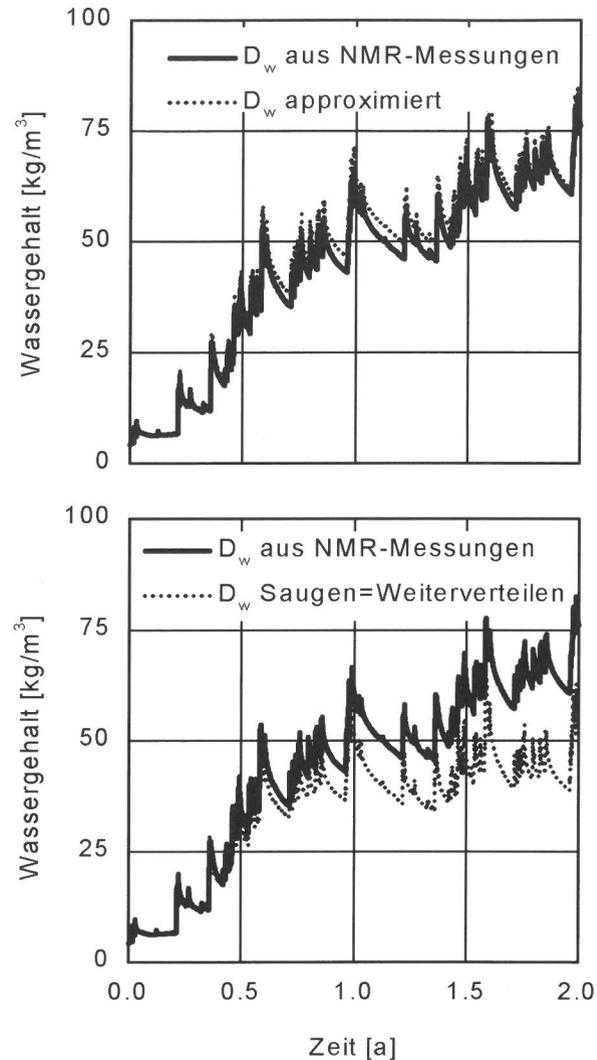


Abb. 6: Berechnete Verläufe des Wassergehaltes für eine einseitig bewitterte Natursandsteinfassade für einen Zeitraum von 2 Jahren. Als Klimarandbedingungen wurden Stundenmittelwerte eines für Holzkirchen typischen Jahres verwendet.

Oben: Vergleich von mit approximierten Koeffizienten berechnetem Verlauf (gestrichelte Linie) und mit exakten Transportkoeffizienten berechnetem Verlauf (durchgezogene Linie).

Unten: Bei Verwendung derselben Transportkoeffizienten für Saugen und Weiterverteilen berechneter Verlauf (gestrichelte Linie) verglichen mit korrekt berechnetem Verlauf (durchgezogene Linie).

In Abbildung 7 sind für einen zufällig ausgewählten Zeitpunkt die berechneten Wassergehaltsprofile dargestellt. Auch hier zeigt sich bei Verwendung der approximierten Transportkoeffizienten eine gute Übereinstimmung. Wird dagegen nicht zwischen Saugen und Weiterverteilen unterschieden, ergibt sich eine deutlich abweichende Verteilung (gepunktete Linie in Abbildung 7).

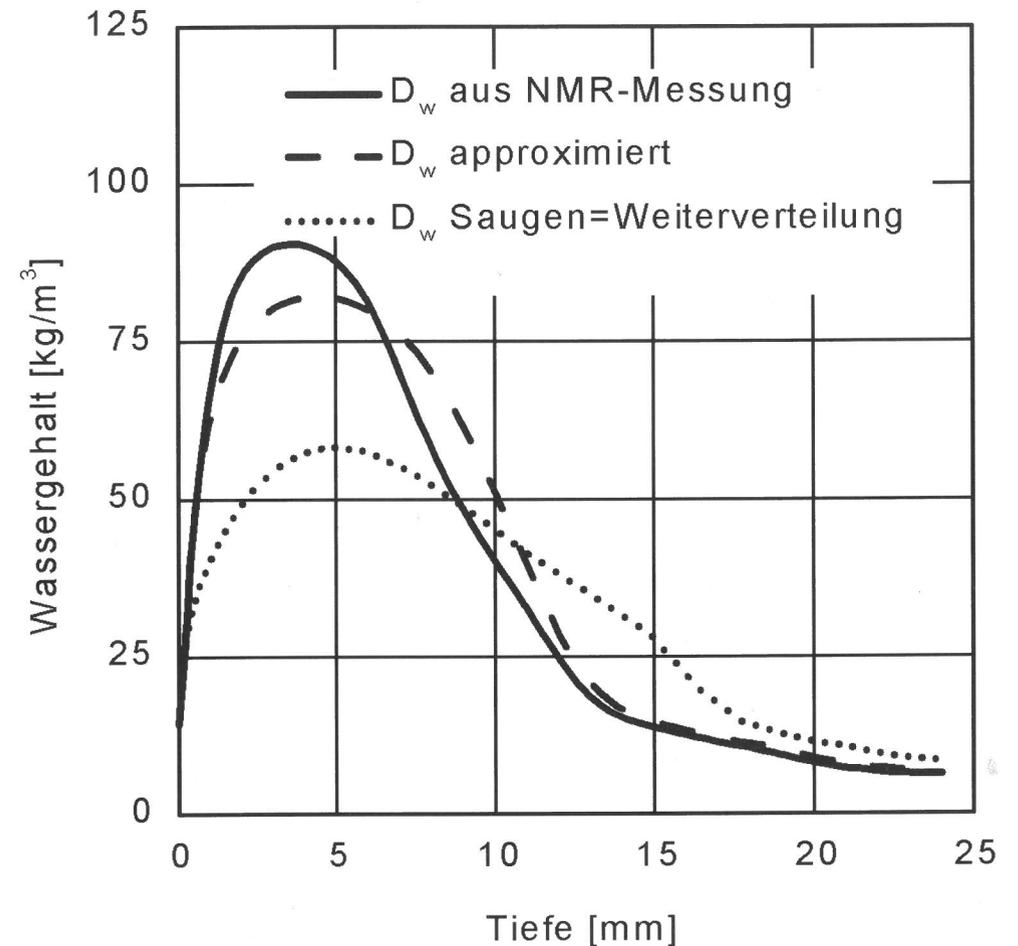


Abb. 7: Wassergehaltsprofile zu einem zufällig ausgewählten Zeitpunkt der Berechnung. Während die mit approximierten Koeffizienten (gestrichelte Linie) und die mit exakten Koeffizienten berechnete Verteilung nur geringfügige Unterschiede aufweist, ist bei Verwendung der Transportkoeffizienten des Saugvorganges auch für die Weiterverteilung nur noch wenig Übereinstimmung zu beobachten.

5 Zusammenfassung

Inzwischen existieren eine ganze Reihe von Wärme- und Feuchteberechnungsprogrammen, mit denen das Feuchteverhalten eines Bauteils mit guter Übereinstimmung zur Realität berechenbar ist. Von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Rechenergebnisse ist die Korrektheit der Stoffkennwerte. Es stehen dafür zum Teil neu entwickelte Meßanlagen zur Verfügung, mit denen diese genau bestimmt werden können. Häufig ist aber der dafür erforderliche Zeit- und Kostenaufwand für die Aufgabenstellung zu groß bzw. eine hohe Genauigkeit gar nicht notwendig. Aus diesem Grund sind vereinfachte Bestimmungsmethoden für die Stoffkennwerte generell wünschenswert. Für die Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang besteht seit längerem eine solche vereinfachte Bestimmungsmethode. Für die sich deutlich davon unterscheidenden Transportkoeffizienten des Trocknungsvorganges ist ein Verfahren entwickelt worden, das es gestattet, aus einem einfachen Trocknungsversuch eine gute Approximation für diese Koeffizienten zu berechnen.

Das Verfahren beruht ebenfalls auf einer exponentiellen Näherung für die feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten. Da im hygroskopischen Feuchtebereich eine Unterscheidung zwischen Saugen und Weiterverteilen nicht sinnvoll ist, wird auch hierbei beim Bezugsfeuchtegehalt, entsprechend in [5] dargestellten theoretischen Überlegungen und durch Messungen belegt, für alle mineralischen Baustoffe der Transportkoeffizient materialunabhängig auf $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ festgelegt. Den kompletten exponentiellen Verlauf der Transportkoeffizienten erhält man durch iterative Anpassung des mit Hilfe eines Wärme- und Feuchteberechnungsprogramms berechneten Verlaufs an die Meßergebnisse. Diese Anpassung wird in zwei Schritten durchgeführt. Zuerst wird der beim Versuch vorliegende Wärmeübergangskoeffizient bestimmt, anschließend erfolgt die Anpassung des Transportkoeffizienten. Mit etwas Übung erreicht man bereits nach zwei bis vier kurzen Rechengängen eine gute Übereinstimmung zur Messung.

Wie die Untersuchungen an einer Auswahl recht unterschiedlicher Baustoffe (verschiedene Natursandsteine, alte und neue Ziegel, Kalksandstein, poröses Glas) zeigen, kann für alle diese Werkstoffe mit den derart bestimmten Flüssigtransportkoeffizienten der Trocknungsvorgang gut beschrieben werden. Dabei ergeben sich für die Trocknung stets kleinere Transportkoeffizienten als beim Saugvorgang, wobei der Unterschied stark materialabhängig ist. Am Beispiel einer bewitterten Natursandsteinfassade wird gezeigt, daß sich die mit diesen vereinfachten Koeffizienten berechneten Ergebnisse nur unwesentlich von den genau berechneten unterscheiden. Allerdings ist die Übereinstimmung zu den Messungen zu verbessern, wenn die Transportkoeffizienten entsprechend aufwendig

aus Feuchteprofilmessungen genauer bestimmt werden. Es wird anhand dieses Beispiels aber auch gezeigt, daß bei Verwendung der Transportkoeffizienten des Saugvorgangs auch für den Trocknungsvorgang der Wasserhaushalt von Bauteilen nicht korrekt berechenbar ist.

6 Literatur

- 1 Krus, M.: *Feuchtetransport- und Speicherkoefizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken*. Diss. Universität Stuttgart (1995).
- 2 Krus, M., Kießl, K.: *NMR-Messung des kapillaren Eindringverhaltens von Wasser und Hydrophobierungsmitteln in porösen Gesteinen und Ableitung neuer Kapillartransport-Kenngrößen*. Wiss. Zeitschrift TH Wismar 38 (H. 6), 265-269 (1992).
- 3 Descamps, F.: *Continuum and Discrete Modelling of Isothermal Water and Air Transfer in Porous Media*. Diss. Katholieke Universiteit Leuven (1997).
- 4 Kopinga, K., Pel, L.: *One dimensional scanning of moisture in porous materials with NMR*. Rev. Sci. Instrum. 65 D, 3673-3681(1994).
- 5 Krus, M., Holm, A. und Schmidt, Th.: *Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert*. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3, 219-234 (1997).
- 6 Krischer, O., Kast, W.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York (1978).
- 7 Garrecht, H.: *Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbehaftung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk*. Diss. Universität Karlsruhe (1992).
- 8 Meng, B.: *Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen*. Diss. RWTH Aachen (1993).
- 9 Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Diss. Univ. Stuttgart (1994).

- 10 Krus, M., Künzel, H.M., Kießl, K.: *Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk*, Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart (1996).
- 11 Winter, K., Krus, M. und Künzel, H.M.: *Feuchtetransport in feinporigen Materialien*. Intern. Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3, 15-28 (1997).