

M. Krus, K. Kießl

Kapillartransportkoeffizienten von Baustoffen aus NMR-Messungen

Einleitung

Der Transport flüssigen Wassers in kapillarporösen Baustoffen und die Bewertung dieses Vorganges sind unter verschiedenen praktischen Gesichtspunkten von Bedeutung. Zum einen wird bei der Berechnung von Bauteiloberflächen, wie z.B. bei verputzten Wänden oder Natursteinmauerwerken, eine bestimmte Menge Wasser entsprechend den kapillaren Saugigenschaften der Baustoffe aufgenommen und im Inneren verteilt. Sie soll gemäß Regenschutzanforderungen auch wieder ausdiffundieren können. Andererseits können über praktisch kaum vermeidbare Fehlstellen an Oberflächen (z.B. Risse bei Mörtelfugen, Abplatzungen bei Natursteinen) oder per Diffusion aus dem Innenraum lokale Feuchteanreicherungen im Bauteilquerschnitt auftreten, die sich aufgrund von Kapillareffekten im Material ausbreiten und oft zu Schädigungen führen. Die Abschätzung oder Beurteilung dieser Vorgänge ist mit Hilfe herkömmlicher Kennwerte, z.B. mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten w , oder mittels experimenteller Untersuchungen nur orientierend möglich. Rechnerische Methoden, die heute mehr und mehr dafür eingesetzt werden, liefern Informationen über örtliche und zeitliche Wassergehaltsverteilungen im Baukörper bei den jeweiligen Klima- bzw. Beanspruchungssituationen und stellen somit ein wesentliches Hilfsmittel für praktische feuchtetechnische Untersuchungen dar. Für die Berechnung benötigt man jedoch bestimmte Koeffizienten [1], die für viele Baustoffe noch nicht hinreichend bekannt sind. Die Bestimmung von Kapillartransportkoeffizienten für poröse Baustoffe mit Hilfe von NMR-Messungen und damit erzielbare Berechnungsergebnisse werden im folgenden anhand von Beispielen vorgestellt.

NMR-Messung

Wie bereits in [2] beschrieben, stellt die NMR-Messung (Nuclear Magnetic Resonance) eine selektive Methode zur quantitativen Bestimmung von Wasserstoffkernen in Probekörpern, damit also auch zur Bestimmung von Wasserkonzentrationen in Baustoffen dar. Eine nach diesem Prinzip arbeitende Versuchseinrichtung erlaubt die Messung von zeitlich veränderlichen Flüssigkeitsverteilungen längs einer prismatischen Baustoffprobe während des kapillaren Saugvorganges durch kontinuierliches Abscannen. Die maximale Querschnittsabmessung der Probe kann derzeit 30 mm betragen (eine Vergrößerung des Meßquerschnitts auf ca. 70 mm ist vorgesehen). Die örtliche Schrittweite zur Auflösung der Flüssigkeitsverteilung längs der Probe beträgt ca. 4 mm. Die Genauigkeit der Wassergehaltsmessung liegt je nach Materialporosität und erforderlicher Meßdauer von ca. 2,5 bis 10 sec je Meßpunkt bei 0,5 bis 0,1 Vol.-%. Diese Messung gibt Aufschluß über Zeitverlauf

und örtliche Verteilungscharakteristik der eindringenden Flüssigkeit, wobei über ein spezielles Zufuhrsystem auch der zeitliche Verlauf der insgesamt aufgenommenen Flüssigkeitsmenge (entspricht w -Wert-Bestimmung aus Saugversuch) registriert werden kann.

Ermittlung des Kapillartransportkoeffizienten

Der Kapillartransportkoeffizient für die eindimensionale kapillare Flüssigkeitsbewegung in einem porösen Baustoff kann nach folgender empirischen Beziehung für den Kapillarmassenstrom definiert werden:

$$\dot{m}_K = \rho \cdot FKU(u) \frac{du}{dx} \quad (1)$$

- \dot{m}_K Kapillarmassenstromdichte in $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- ρ Dichte der Flüssigkeit (z.B. Wasser) in kg/m^3
- u Wassergehalt in m^3/m^3
- FKU Kapillartransportkoeffizient, wassergehaltsabhängig, nach [1] in m^2/h

Der Koeffizient FKU läßt sich, wie in [1] gezeigt, für poröse Baustoffe durch folgenden Exponentialansatz beschreiben (Index o für extrapolierten Wert bei $u = 0$; Index f für Wert bei freier Wassersättigung des Materials $u = u_f$):

$$FKU(u) = FKU_o \cdot \exp\left(\frac{u}{u_f} \cdot \ln \frac{FKU_f}{FKU_o}\right) \quad (2)$$

Bildet man einen Mittelwert für den Funktionsverlauf des Ansatzes (2) gemäß

$$\overline{FKU} = \frac{FKU_f - FKU_o}{\ln(FKU_f / FKU_o)} = \text{const.} \quad (3)$$

und integriert damit die so linearisierte Differentialgleichung für den instationären Kapillartransport (analog dem 2. Fick'schen Gesetz), so erhält man folgende Beziehung für den Zeitverlauf der aufgenommenen Flüssigkeitsmenge:

$$m(t) = \frac{2 \rho u_f \sqrt{\overline{FKU}}}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

Vergleicht man mit der bekannten Definitionsgleichung für den w -Wert

$$m(t) = w \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

so ergibt sich der Zusammenhang

$$\overline{FKU} = \pi \left(\frac{w}{2 \rho u_f}\right)^2 \quad (6)$$

Gesteinsart	Dichte [kg/m ³]	Porosität [Vol.-%]	u_f [Vol.-%]	FKU_f [m ² /h]	FKU_f / FKU_0 [-]	w-Wert [kg/m ² h ^{0,5}]
Kerscher Sandstein	2050	23	12	$3,0 \times 10^{-3}$	$0,60 \times 10^3$	3,7
Obernkirchner Sandstein	2147	19	9	$2,3 \times 10^{-3}$	$0,32 \times 10^3$	2,2
Kalksandstein	1900	29	21	$8,0 \times 10^{-4}$	$0,50 \times 10^3$	2,7

Tabelle 1: Zusammenstellung von Kapillartransporteigenschaften bzw. w-Werten für die untersuchten Gesteinsarten.

Bei bekanntem w-Wert und bekannter freier Flüssigkeitssättigung u_f kann damit eine Größenordnung für einen mittleren FKU-Wert bestimmt werden, der zunächst die Zeitcharakteristik des kapillaren Saugvorgangs kennzeichnet. Berücksichtigt man die Tatsache, daß die kapillare Flüssigkeitsaufnahme auch bei nichtlinearem Ansatz mit FKU gemäß (2) dem Wurzel-t-Gesetz folgt, so muß noch die Steigung der exponentiellen FKU-Funktion um den Mittelwert \overline{FKU} variiert werden, um auch die Ortscharakteristik berechneter Verteilungen an die gemessenen Verteilungskurven anzupassen. Bei den exponentiellen Steigungen der FKU-Funktionen für die zu betrachtenden Baustoffe mit FKU_f / FKU_0 -Verhältnissen in der Größenordnung von 10^2 bis 10^3 ist diese Näherung mit Genauigkeiten in Bezug auf die aufgenommene Flüssigkeit von weniger als ca. 5 % möglich und somit praktisch völlig ausreichend.

Meß- und Rechenergebnisse

In der NMR-Anlage ist das kapillare Eindringen von Wasser in Natursandstein (Kerscher und Obernkirchner) sowie in Kalksandstein untersucht worden. Aus den dabei gemessenen Wassergehaltsverteilungen zu verschiedenen Zeitpunkten während des Saugvorgangs (Bild 1, Meßpunkte) und aus den ebenfalls festgestellten u_f und w-Werten konnten dann nach der vorher erläuterten Vorgehensweise FKU-Funktionen für diese Baustoffe ermittelt werden (Bild 2). Die mit diesen Funktionen berechneten Verteilungen werden in Bild 1 mit den Meßwerten verglichen. Örtlich wie auch zeitlich ist eine ausgezeichnete Übereinstimmung festzustellen. Die wesentlichen Kapillartransport-Daten für diese Baustoffe sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Es bleibt zu vermerken, daß damit nicht nur rechnerische Abschätzungen der Wasseraufnahme, sondern - aufgrund der gezeigten Abhängigkeit der Koeffizienten vom Wassergehalt - auch kapillare Transport- bzw. Ausgleichsvorgänge unterhalb der freien Wassersättigung beschreibbar sind, so wie dies z.B. im Fall von Feuchteakkumulationen im Baustoffinneren oder auch infolge künstlicher Beeinflussung bzw. Unterbindung des kapillaren Feuchtetransport durch Hydrophobierungszonen [3] geschieht.

Literatur

- [1] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Diss. Universität Essen, 1983.
- [2] Kießl, K. und Krus, M.: Messung von Wassergehalten und Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen mittels kernmagnetischer Resonanz. IBP-Mitteilung 14 (1987), Nr. 148.
- [3] Krus, M.: Messung des kapillaren Feuchtetransports und des Einflusses von Hydrophobierungsmitteln mit Hilfe der kernmagnetischen Resonanz. Wissensch. Zeitschrift TH Wismar 1 (1989), Heft 1, S. 35-37.

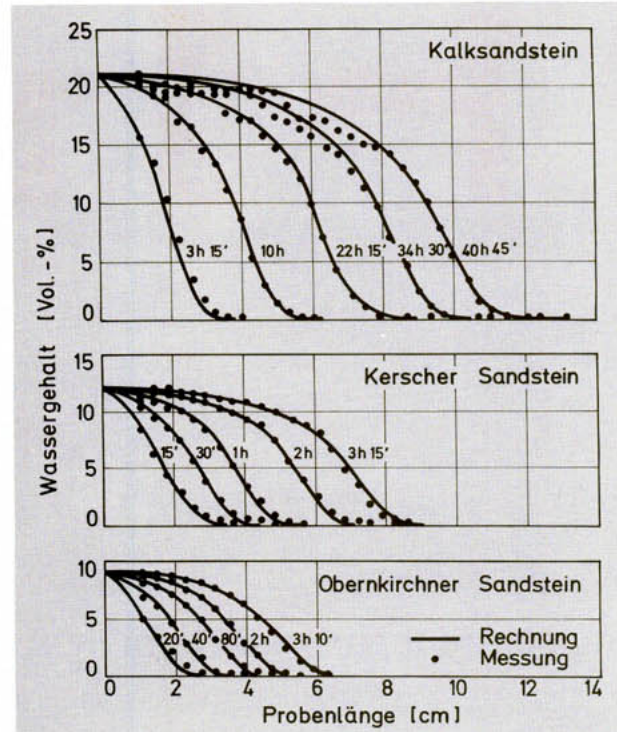


Bild 1: Gemessene und mit den Koeffizienten gemäß Bild 2 berechnete Wassergehaltsverteilungen zu verschiedenen Zeitpunkten während der kapillaren Wasseraufnahme von Proben aus Kalksandstein, Kerscher und Obernkirchner Sandstein. Der Ordinatenwert für die Probenstirnfläche mit Wasserkontakt entspricht jeweils der freien Wassersättigung u_f .

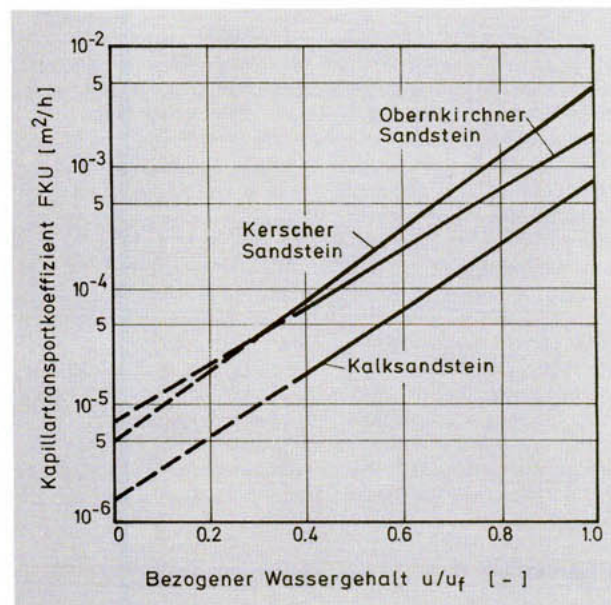


Bild 2: Kapillartransportkoeffizienten für Kalksandstein, Kerscher und Obernkirchner Sandstein in Abhängigkeit vom bezogenen Wassergehalt. Die gestrichelten Bereiche dienen nur der Extrapolation auf den Ordinatenwert für $u = 0$.

Die Untersuchungen sind mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie durchgeführt worden.



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

7000 Stuttgart 80, Nobelstraße 12, Tel. (0711) 6866-00
8150 Holzkirchen (OBB), Postf. 1180, Tel. (08024) 643-0

Herstellung und Druck:
IRB Verlag, Informationszentrum RAUM und BAU
der Fraunhofer-Gesellschaft, Stuttgart

Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung des
Fraunhofer-Instituts für Bauphysik