

Moisture transfers in perforated bricks

Feuchtetransport in Lochziegeln

The transfers of moisture through the walls are critical for the energy consumption of the building, the comfort and health of the inhabitants, the aesthetics and the durability of the construction. The data available from the CE marking can be used to compute the moisture transfer through perforated bricks. Through measurements and finite element calculations, it was shown that it is possible to calculate the moisture-related properties of perforated bricks when the properties of the ceramic material are known. This will reduce test time and improve measurement quality.

1 Introduction

The calculation of the static energy transfer through the brick walls of a building has become state of the art. From the thermal conductivity of the ceramic material, the equivalent thermal conductivity of the perforated brick can be estimated according to EN 1745 for exemple and the heat losses through the wall are computed. Usually, the calculation required by the standards assumes that the wall has a uniform constant low moisture content corresponding to the moisture in equilibrium with the external atmosphere. Often a humidity of the external atmosphere of 80% is selected. In reality, the moisture content in a wall is not uniform nor low and it changes with **position** and time

› In winter, water vapour diffuses through the wall from the internal hot part towards the cold part; in an air-conditioned building, the opposite is observed in summer. Some parts of the wall can become so wet that they become saturated › The external part of the wall can be exposed to rain. The thermal computation assumes that the wall is always fully protected against rain, which is not true and, again, water saturation can sometimes be observed on exposed walls

The water saturation of bricks is observed in practice and is taken into account in some standards. For instance, facing bricks, which are exposed to rain, can suffer freezing damage and a given durability is required by the standards. It is then assumed that the wall can be saturated by water then frozen several times per year.

The transfers of moisture through the walls of a building are then critical for the energy consumption of the building, the comfort and health of the inhabitants, the aesthetics and the durability of the construction. However, the calculation of the moisture transfer is seldom carried out. The first reason is the higher complexity of the calculations. Moisture is transmitted through two different mechanisms: liquid phase transport through capillarity and vapour phase diffusion. These mechanisms are not linear and much more complex than the heat transfer. In »Table 1, the heat and moisture transfers are compared.

Der Feuchtetransport durch Wände (Wandbauteile) wirkt sich entscheidend auf den Energieverbrauch eines Gebäudes, den Komfort und die Gesundheit seiner Bewohner sowie die Ästhetik und Beständigkeit einer Konstruktion aus. Verfügbare (Kenn-)werte aus der CE-Kennzeichnung können zur Berechnung des Feuchtetransports in Lochziegeln genutzt werden. Über Messungen und Berechnungen nach der Finiten-Elemente-Methode wird eine Möglichkeit aufgezeigt, die feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften von Lochziegeln aus verfügbaren Kennwerten des keramischen Materials (Scherben) zu berechnen. Dadurch lässt sich die Prüfdauer reduzieren sowie die Messqualität verbessern.

1 Einleitung

Die Berechnung des stationären Energietransports durch die Ziegelwände eines Gebäudes ist mittlerweile Stand der Technik. Ausgehend von der Wärmeleitfähigkeit des keramischen Materials (Scherben) kann die äquivalente Wärmeleitfähigkeit eines Lochziegels z.B. nach EN 1745 bestimmt und der Wärmeverlust durch die Wand (Mauerwerk) berechnet werden. Für gewöhnlich wird bei der genormten Kalkulation angenommen, dass die Wand im Gleichgewicht mit der Feuchte der umgebenden Atmosphäre einen einheitlichen und konstant geringen Wassergehalt aufweist. Häufig wird für diese Umgebung ein Wassergehalt von 80 % gewählt. In der Praxis ist der Wassergehalt in einer Wand weder einheitlich noch niedrig und ändert sich abhängig von deren Lage und der Zeit: › Im Winter diffundiert Dampf durch die Wand – von därmeren warmen Abschnitten zum kalten Teil. In Gebäuden mit Klimaanlage wird der umgekehrte Effekt im Sommer beobachtet. Dabei werden einige Wandabschnitte so feucht, dass eine Sättigung erreicht wird › Die Außenwand kann Regen ausgesetzt sein. Bei der Wärmerechnung wird angenommen, dass die Wand stets vollständig gegen Regen geschützt ist. Dies entspricht nicht der Realität – auch hier kann an exponierten Wänden manchmal eine Wassersättigung beobachtet werden

Die Wassersättigung von Ziegeln wurde in der Praxis beobachtet und in einigen Normen berücksichtigt. So könnten zum Beispiel Verblendziegel, die dem Regen ausgesetzt sind, Frostschäden erleiden – dementsprechend wird in den Normen eine definierte Frostbeständigkeit gefordert. Darin wird angenommen, dass die Wand wassergetränkt und außerdem mehrere Male im Jahr gefroren sein kann.

Obwohl sich der Feuchtetransport durch die Gebäudewände auf den Energieverbrauch des Gebäudes, den Komfort und die Gesundheit seiner Bewohner sowie auf Ästhetik und Beständigkeit der Konstruktion auswirkt, wird er nur selten berechnet. Ein Grund dafür ist die erhöhte Komplexität dieser Berechnungen. Feuchte wird über zwei unterschied

Formatiert: Position: Horizontal: 1.45 cm, Gemessen von: Seite, Vertikal: 11.3 cm, Gemessen von: Seite

Formatiert: Position: Horizontal: 1.44 cm, Gemessen von: Seite, Vertikal: 11.77 cm, Gemessen von: Seite

Kommentar [AQ1]: Quelle position?

Formatiert: Hervorheben

	Heat	Moisture
Process	Conduction	Gas phase diffusion Liquid phase transport through capillarity
Transfer constant	Thermal conductivity (linear change with temperature)	Resistance factor to vapour transport Liquid capillarity diffusivities in wetting and in drying (exponential change with water content)
Capacity constant	Thermal capacity	Absorption isotherm
Equation	Heat equation	Fick diffusion equation Richards capillary equation Vaporization of liquid and condensation of vapour

	Wärme	Feuchte
Prozess	Leitung	Gasphasendiffusion, Flüssigphasentransport über Kapillarität
Transportkonstante	Wärmeleitfähigkeit (linear mit der Temperatur veränderlich)	Dampfdiffusionswiderstandsfaktor, kapillare Wasserleitfähigkeit bei Anfeuchtung oder Trocknung (exponential mit Wassergehalt veränderlich)
Kapazitätskonstante	Wärmekapazität	Absorptionsisotherme
Gleichung	Wärmeleitungsgleichung	Zweites Fick'sches Gesetz (Diffusionsgleichung), Richards-Gleichung, Verdampfung von Flüssigkeiten und Kondensation von Dampf

Another reason is related to the lack of data and the lack of agreed standard test procedures.

In principle, all the data necessary for calculation are included in the CE marking (resistance factor to vapour diffusion and the initial absorption coefficient) and should be made available by the brick suppliers. However, the measurement of these data is not really performed and the values are often taken from tables. In addition, in the tables of the standards, there is often a mix-up between the properties of the ceramic material and the properties of the perforated brick itself. Finally, it is easy and fast to measure the moisture-related properties of ceramic specimens; it is much longer and complex to measure them on perforated bricks.

In this paper, it is shown that it is possible to estimate the hydric properties of the perforated bricks from the properties of the ceramic materials. This should help to supply valid data for the CE marking and allow more realistic and easy moisture transfer calculations.

2 Technical approach

Three different bricks were studied. The moisture-related properties of the ceramic material and of the perforated bricks were measured parallel. With an adapted finite element calculation, it was shown that it was possible to deduce the moisture-related values of the perforated brick from the values of the ceramic materials.

2.1 Tests conducted

The various moisture-related properties were measured (see »Table 2). In each case, three specimens were examined.

The tests were conducted mostly at IBP, Holzkirchen (D) and partly at CTMNC, Clamart (F).

The ceramic specimens were taken from the related bricks. As the ceramic material is not isotropic, measurements were conducted with two orientations (perpendicular to fibre/extrusion direction or parallel to fibre/extrusion direction) in most cases. In the other cases, the orientations of the specimens were selected to simulate the heat and moisture transfers in bricks as far as possible.

2.2 Bricks

The three bricks are described in »Table 3.

liche Mechanismen übertragen: der Transport der Flüssigphase durch Kapillarität und die Diffusion der Dampfphase. Diese Mechanismen sind keine linearen und laufen weit komplexer ab als der Wärmeübergang. In »Tabelle 1 werden Wärme- und Feuchtetransport miteinander verglichen. Ein zweiter Grund liegt im Datenmangel und einem Fehlen von anerkannten und genormten Untersuchungsverfahren.

Grundsätzlich sind alle für die Berechnung benötigten Werte (Dampfdiffusionswiderstandsfaktor und anfänglicher Wasseraufnahmekoeffizient) ein Bestandteil der CE-Kennzeichnung und sollten als solche bei den Ziegelherstellern abrufbar sein. Diese Werte werden in der Praxis aber nicht gemessen, sondern Tabellen entnommen. Hinzu kommt, dass die Tabellen innerhalb der Normen häufig ein Durcheinander der Eigenschaften des keramischen Materials und des Lochziegels selbst enthalten. Und schließlich kann man die feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften einer keramischen Probe einfach und schnell messen, während deren Messung an Lochziegeln eine viel zeitaufwändigere und komplexe Aufgabe bedeutet.

In dieser Arbeit wird die Möglichkeit aufgezeigt, die hygrischen Eigenschaften von Lochziegeln aus den Eigenschaften der keramischen Materialien abzuleiten. Dies soll dazu beitragen, stichhaltige Daten für die CE-Kennzeichnung zu liefern und realistischere und vereinfachte Berechnungen zum Feuchtetransport zu ermöglichen.

2 Technische Umsetzung

Es wurden drei unterschiedliche Ziegel untersucht. Die feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften des keramischen Materials und der Lochziegel wurden parallel gemessen. Über eine angepasste Berechnung nach der Finiten-Elemente-Methode wurde bewiesen, dass man die feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften von Lochziegeln aus den Messwerten des keramischen Materials ableiten kann.

2.1 Durchgeführte Untersuchungen

Gemessen wurden die verschiedenen feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften (»Tabelle 2). Für jeden Sachverhalt wurden drei Proben untersucht.

Die meisten Messungen wurden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen (Deutschland) sowie einige am Technologiezentrum für natürliche Baustoffe (CTMNC) in Clamart (Frankreich) durchgeführt.

»Table 2 Description of the tests conducted and procedures

Property	Procedure	Ceramic material	Brick
Dry density of masonry unit	EN 772-13 (2000)		X
True density of ceramic material	Helium pycnometer	X	
Water vapour transmission	EN ISO 12572 (dry cup 23° C, RH 3–50%, absorbers: silica gel)	X	X
Water initial absorption coefficient	EN ISO 15148 (2003)	X	X
Hygroscopic absorption properties, absorption isotherm	EN ISO 12571 (2000)	X	
Water absorption and saturation coefficient	DIN 52 103 (1988)	X	
Thermal conductivity (dry and wet)	CTMNC	X	X (calculation)
Determination of transport coefficient in water uptake (liquid capillarity diffusivity in wetting)	M. Krus, A. Holm, T. Schmidt, Bauinstandsetzen 3 (1997), H1, pp. 219–234	X	X
Determination of the transport coefficient for drying (liquid capillarity diffusivity in drying)	M. Krus, A. Holm, T. Schmidt, Bauinstandsetzen 4 (1998) H1, deren Verfahren pp. 33–52	X	X

Eigenschaft	Verfahrensweise	Keramisches Material	Ziegel
Trockenrohddichte von Mauersteinen	EN 772-13 (2000)		X
Reindichte keramischer Materialien	Helium-Pycnometer	X	
Wasserdampfdurchlässigkeit	EN ISO 12572 (Trockenmittel 23 °C, RH-Wert 3–50 %, Absorber: Silicagel)	X	X
anfänglicher Wasseraufnahmekoeffizient	EN ISO 15148 (2003)	X	X
hygroskopische Sorptionseigenschaften, Absorptionsisotherme	EN ISO 12571 (2000)	X	
Wasseraufnahme und Sättigungswert	DIN 52 103 (1988)	X	
Wärmeleitfähigkeit (trocken und nass)	CTMNC	X	X (Berechnung)
Bestimmung des Transportkoeffizienten bei Wasseraufnahme (kapillare Wasserleitfähigkeit bei Anfeuchtung)	M. Krus, A. Holm, T. Schmidt, Bauinstandsetzen 3 (1997), H1, S. 219–234	X	X
Bestimmung des Transportkoeffizienten bei Trocknung (kapillare Wasserleitfähigkeit bei Trocknung)	M. Krus, A. Holm, T. Schmidt, Bauinstandsetzen 4 (1998) H1, S. 33–052	X	X

2.3 Software

Calculations of the moisture transfer were performed with a Heat and Moisture transfer software (HAM software). Most HAM software is one-dimensional and describes walls as an assembly of flat layers with a thickness (one dimension). In this case, a 2-dimension finite element software was selected: Wufi-2d, version 3.3, developed by IBP (D) [1]. This software is an extension of Wufi-1d, which is probably the most widely used HAM software in the world.

2.4 Properties of air layers

The properties of the perforated bricks were computed from the properties of the ceramic materials and of the air layers. The first ones were measured, and the second ones were taken from the standard values according to ISO 6496. In »Table 3 of the standard, values of equivalent thermal resistance (horizontal flow) are given for thin perforations with a thickness in the direction of flow of less than 0.1 times each of the two other dimensions, not greater than 0.3 m and with an emissivity higher than 0.8. This is acceptable for most of the perforations of the Monomur bricks. From these




Die keramischen Proben wurden den entsprechenden Ziegeln entnommen. Da sich das keramische Material nicht isotrop verhält, wurden die Messungen in den meisten Fällen in zwei Richtungen durchgeführt, sowohl senkrecht als auch parallel zur Faser-bzw. Extrusionsrichtung. In den übrigen Fällen wurde die Ausrichtung der Proben zur bestmöglichen Simulation des Wärme-und Feuchtetransports in den Ziegeln frei gewählt.

2.2 Ziegel

Die drei verwendeten Ziegel werden in »Tabelle 3 charakterisiert.

2.3 Software

Der Feuchtetransport wurde mit einer speziellen Software für Wärme-und Feuchtetransport berechnet. In den meisten Fällen ist eine solche Software eindimensional, dann beschreibt sie Wände als eine Anordnung flacher Schichten mit einer bestimmten Dicke (eine Dimension). In diesem Fall jedoch wurde eine zweidimensionale Finite-Elemente-Software gewählt: Wufi 2D, Version 3.3, entwickelt am IBP [1]. Diese

Brick/Ziegel	Dimensions/Maße [m]	Thermal resistance (with 2 rendered faces) Wärmewiderstand (mit 2 verputzten Flächen) [m ² K/W]	Number of internal layers Zahl der inneren Schichten	Picture/Foto
Brick NF 24 holes NF-Ziegel mit 24 Löchern	0.20 x 0.3 x 0.57	0.74	3	
Monomur 1	0.27 x 0.3 x 0.22	2.46	24	
Monomur 2	0.36 x 0.29 x 0.25	2.57	24	

thermal resistances, the equivalent conductivities were deduced easily. In the brick NF 24 holes, the perforations were not thin enough; the appendix B of the standard explained how to estimate the resistance and equivalent conductivities were calculated.

The vapour diffusion resistance factor of air slits was taken from the software Wufi, based on the thermal conductivity. In »Table 4, the selected air properties are given.

3 Experimental results

The experimental results of the various tests are given below.

3.1 Absorption isotherm and saturation

The absorption isotherms of the ceramic materials are shown in »1. The brick materials remain dry in most conditions and

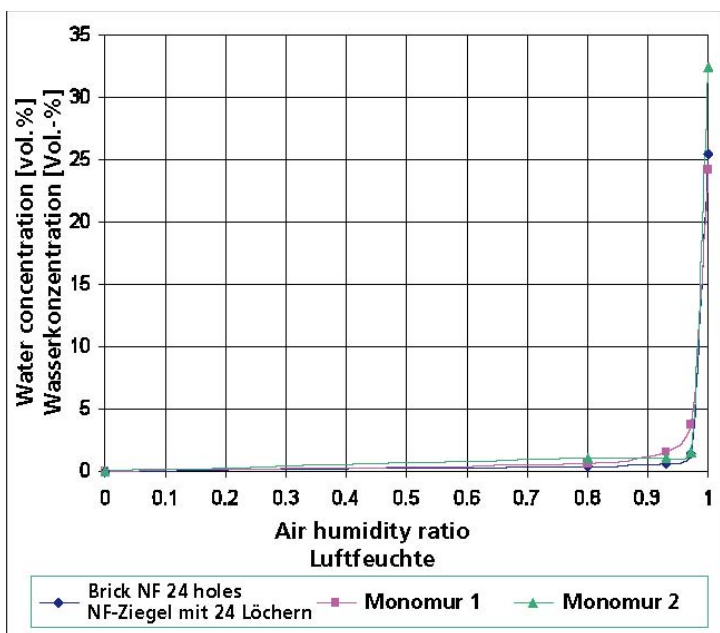
Software ist eine Erweiterung von Wufi 1D, der wahrscheinlich weltweit meistgenutzten Software zur Berechnung von Wärme- und Feuchtetransport.

2.4 Eigenschaften der Luftschichten

Die Eigenschaften der Lochziegel wurden aus den Eigenschaften der keramischen Materialien und der Luftschichten berechnet. Während erstere gemessen wurden, sind letztere den Normwerten entsprechend der ISO 6496 entnommen. In »Tabelle 3 der Norm werden Werte des äquivalenten Wärmewiderstands (Horizontalströmung) für folgende Bedingungen angegeben: dünne Lochungen mit einer Dicke in Flussrichtung von weniger als 10 % der beiden anderen Abmessungen, höchstens jedoch 30 cm und mit einem Emissionsgrad von mehr als 0,8. Dies trifft für die meisten Lochungen der Monomur-Ziegel zu. Von diesen Wärmewi-

»Table 4 Properties of air layers according to ISO 6496 and Wufi »Tabelle 4 Eigenschaften der Luftschichten entsprechend ISO 6496 und Wufi

	Perforation size (thickness, width) Lochgröße (Höhe, Breite) [mm]	^{equi-} from » Table 2 (thin perforated) ^{equi-} aus » Tabelle 2 (dünne Lochung) [W/mK]	^{equi-} from Appendix B (thick perforated) ^{equi-} aus Appendix B (dicke Lochung) [W/mK]	Vapour transfer resistance from Wufi Dampfdiffusionswiderstandsfaktor von Wufi
Brick NF	49 x 63	0.266	0.221	0.4
24 holes NF-Ziegel mit 24 Löchern	31 x 31	0.168	0.135	0.56
Monomur 1	7.5 x 98	0.056	0.055	0.75
	7.5 x 45	0.056	0.054	0.75
Monomur 2	6.5 x 51	0.052	0.050	0.78
	6.5 x 21	0.052	0.049	0.78



»1 Absorption isotherms of three ceramic materials
 »1 Absorptionsisotherme der drei keramischen Materialien

the water absorption becomes noticeable (volume content >1%) only above RH = 95%, even for the porous low-density material.

On the other hand, the water content becomes very high near RH = 100% because the materials are very porous and most of the pores are open and can be filled with liquid water. The water contents at saturation are given in »Table 5.

3.2 Vapour diffusion

When the water content of the brick is limited, the transfer is mostly made through diffusion in the vapour phase. The transfer is described by the "resistance factor to vapour transfer" μ . Usually the resistance factor remains constant at low water content (RH < 50%) and increases above. When RH becomes > 80%, the transfer becomes limited by the condensed water in the pores.

The measurements of the resistances to vapour diffusion, densities and thermal conductivities are given in »Table 6. Water diffusion was measured only perpendicular to fibre. The thermal conductivities of the ceramic materials in the table are the mean values (between parallel and perpendicular directions), the resistance against vapour diffusion is significantly lower in the brick than in the ceramic material. The two bricks Monomur are rather similar in terms of thermal behaviour but are very different with regard to their vapour resistance.

3.3 Liquid water absorption

When the ceramic material is wet but not saturated, the liquid water transfer by capillarity is linked to a property called the moisture capillary diffusivity (m^2/s). This diffusivity is not a constant but it changes strongly with the water content.

»Table 5 Saturation water content of ceramic materials
 »Tabelle 5 Sättigungswert der keramischen Materialien

Ceramic material cut from Keramisches Material aus	Saturation water content Sättigungswert [kg/m ³]
Brick NF 24 holes NF-Ziegel mit 24 Löchern	255 +/-3
Monomur 1	242
Monomur 2	320

derstandswerten konnten die Werte der äquivalenten Leitfähigkeit leicht abgeleitet werden.

Beim Normalformatziegel mit 24 Löchern waren die Lochungen nicht dünn genug. Appendix B stellt den Schätzwert des Wärmewiderstands dar. Die Werte der äquivalenten Leitfähigkeit wurden berechnet.

Der auf der Wärmeleitfähigkeit basierende Dampfdiffusionswiderstandsfaktor von Luftspalten wurde der Software Wufi entnommen.

In »Tabelle 4 sind ausgewählte Eigenschaften der Luftschichten aufgelistet.

3 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen dargestellt.

3.1 Absorptionsisotherme und Sättigung

Die Absorptionsisothermen der keramischen Materialien sind in »1 abgebildet. Die Materialien bleiben unter den meisten Bedingungen trocken. Selbst bei dem porösen Material von geringer Dichte wird die Wasseraufnahme (Volumenanteil >1%) erst oberhalb einer relativen Luftfeuchte (RH) von 95% wahrnehmbar.

Andererseits wird der Wassergehalt nahe RH = 100% sehr hoch, weil die Materialien sehr porös und die Poren größtenteils offen sind und somit mit Wasser gefüllt werden können. Der jeweilige Wassergehalt bei Sättigung ist in »Tabelle 5 angegeben.

3.2 Dampfdiffusion

Wenn der Wassergehalt des Ziegels begrenzt ist, findet der Transport größtenteils als Diffusion in der Dampfphase statt. Der Transport wird durch den Dampfdiffusionswiderstandsfaktor μ beschrieben. Im Allgemeinen bleibt dieser Faktor bei geringem Wassergehalt (RH < 50%) konstant, um bei höheren RH-Werten anzusteigen. Bei RH > 80% wird der Transport durch das kondensierte Porenwasser begrenzt.

Die Ergebnisse der Messungen von Dampfdiffusionswiderstandsfaktor, Dichte und Wärmeleitfähigkeit sind in »Tabelle 6 dargestellt. Die Wasserdiffusion wurde ausschließlich senkrecht zur Faser gemessen. Die in der Tabelle genannten Wärmeleitfähigkeiten der keramischen Materialien sind Mittelwerte aus den parallel und senkrecht gemessenen Werten.

Aufgrund der Lochungen ist der Dampfdiffusionswiderstandsfaktor im Ziegel bedeutend geringer als im keramischen Material. Die beiden Monomur-Ziegel verhalten sich eher ähnlich hinsichtlich der thermischen Eigenschaften, jedoch sehr verschieden unter dem Aspekt des Dampfwiderstandes.

3.3 Wasseraufnahme

Wenn das keramische Material feucht, jedoch nicht gesättigt ist, steht der Transport flüssigen Wassers durch Kapillarität im Zusammenhang mit der kapillaren Wasserleitfähigkeit (m^2/s). Diese Wasserleitfähigkeit ist keine konstante, sondern eine mit dem Wassergehalt stark veränderliche Größe. Häufig schwanken die Werte fast wie bei einer Exponentialfunktion. Während die Wasserleitfähigkeit eines trockenen Materials eingeschränkt ist, erhöht sie sich nahe der Sättigung beträchtlich. Die Messung einer kompletten Kurve der kapillaren Leitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehalts ist möglich,

Brick reference	Ceramic material				Brick			
	Density [kg/m ³]	Porosity [%]	Thermal conductivity [W/mK]	μ	Density [kg/m ³]	Perforation [%]	Equivalent thermal conductivity y** [W/mK]	μ
Brick NF 24 holes	1767 +/-20	34	0.6	43 +/-3	683 +/-6	61	0.27	9,6 +/-0.2
Monomur 1	1718 +/-90	35,8	0.5	61 +/-11	881 +/-2	48.7	0.13	19,2 +/-3.5
Monomur 2	1484 +/-23	46,1	0.38*	19,2 +/-3.5	733 +/-8	48	0.12	7 +/-0.7

»Tabelle 6 Dichten, Dampfdiffusionswiderstandsfaktoren und Wärmeleitzahlen der keramischen Materialien und der entsprechenden Ziegel

Prüfkörper	Keramisches Material				Ziegel			
	Dichte [kg/m ³]	Porosität [%]	Wärmeleitzahl [W/mK]	Dampfdiffusionswiderstandsfaktor μ	Dichte [kg/m ³]	Lochanteil [%]	Äquivalente Wärmeleitzahl** [W/mK]	Dampfdiffusionswiderstandsfaktor
NF-Ziegel mit 24 Löchern	1767 +/-20	34	0,6	43 +/-3	683 +/-6	61	0,27	9,6 +/-0,2

Often the variations are close to an exponential function. The diffusivity is limited when the material is dry but it increases extensively close to saturation. The measurement of the full curve of the capillary diffusivity versus the water content is possible when water content gradients across the specimen are known very accurately at various times during wetting. It is possible to cut thin slices of the specimens during water uptake and measure moisture content by weighing; however, the moisture gradients are usually very steep and the accuracy of slicing is too low. In order to measure the moisture gradient accurately, it is necessary to use complex and expensive technologies (such as NMR [2], microfocus X rays [3] or scanning neutron radiography [4]). In the latter case, it was shown that the liquid water capillary diffusivity near saturation is linked to the initial water absorption coefficient based on Equation 1 [5]:

$$D_{ws}(w) = 3.8 (A/w_f)^2 \times 1000^{(w/w_f-1)} \quad (1)$$

D_{ws}(w)... capillary diffusivity [m²/s]
A... initial water absorption coefficient [kg/m³ s^{-0.5}]
w... water content [kg/m³]
w_f... free water saturation [kg/m³]

If only an approximation of the diffusivity curve is required, a simple measurement of the initial absorption coefficient can supply the maximum value of the capillary diffusivity. The lower values are then extrapolated from the assumed exponential equation. Plain specimens (200 mm x 100 mm) were cut from the external shell of the bricks and dipped vertically in water. The external side of the bricks were also dipped in water. The

wenn dessen Gradient in der Probe während des Wässerns jederzeit genau bekannt ist. Man kann die Proben in dünne Scheiben schneiden und den Wassergehalt während des Anfeuchtens durch Wägung bestimmen. Jedoch schwanken die Feuchtegradienten üblicherweise sehr stark, und die Schnittgenauigkeit ist zu gering. Um den Feuchtegradienten genau zu bestimmen, müssen komplexe und teure Techniken eingesetzt werden – wie zum Beispiel die Kernspinresonanzspektroskopie [2], das Mikrofokus-Röntgen-Verfahren [3] oder die Neutronenradiographie [4].

Andererseits wurde nachgewiesen, dass die kapillare Wasserleitfähigkeit im Sättigungsbereich mit dem anfänglichen Wasseraufnahmekoeffizienten über die folgende Gleichung 1 in Verbindung steht [5]:

$$D_{ws}(w) = 3,8 (A/w_f)^2 \times 1000^{(w/w_f-1)} \quad (1)$$

D_{ws}(w)... kapillare Wasserleitfähigkeit [m²/s]
A... anfänglicher Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³ s^{-0.5}]
w... Wassergehalt [kg/m³]
w_f... Kaltwassersättigung [kg/m³]

Wenn für den Verlauf der Wasserleitfähigkeit lediglich Näherungswerte erforderlich sind, kann über eine einfache Messung des anfänglichen Wasseraufnahmekoeffizienten der Maximalwert der kapillaren Wasserleitfähigkeit ermittelt werden. Die niedrigeren Werte werden danach über eine Exponentialgleichung extrapoliert. Für die Messungen wurden aus der äußeren Hülle der Ziegel Proben ohne Lochanteil (200 mm x 100 mm) herausgeschnitten und senkrecht in Wasser getaucht. Außerdem wurde die Außenseite von Ziegeln in Wasser getaucht. Die Massezunahme der Untersuchungsobjekte wurde gemessen. In »2 ist die Wasserauf

weight gains were measured. The water gain was plotted versus the square root of the time. The absorption coefficient is the slope of the plot (»2).

In a thick plain material, the absorption coefficient remains constant with time. A significant difference is noted according to the orientation (parallel to fibre/extrusion, perpendicular to fibre/extrusion).

In a perforated brick, the absorption coefficient changes with time; initially water is absorbed in the external shell of the brick. Later on, the absorption is reduced by the perforations.

A break in the curves at 0.5 h ($0.3 \text{ h}^{0.5}$) was seen corresponding to saturation of the external shell in contact with water.

Then, two absorption coefficients were measured, one corresponding to the initial absorption after 10 min and another one after 24 h. The initial absorption coefficients of bricks and ceramic materials were equal. With time, the absorption coefficient of bricks decreased, but then became constant again. In the long term, the perforated brick behaved as a plain homogeneous material.

The diffusivities in wetting were deduced from the initial absorption coefficients with equation 1. The results are given in »Table 7.

4 Results of calculation

The aim of the present calculations is the determination of the moisture-related properties of the perforated brick from the properties of the ceramic material.

4.1 Vapour diffusion in a perforated brick

The vapour transport of the bricks was estimated according to three different hypotheses: › Mixture Ia: This is a very crude estimation which takes into

account the perforation ratio and the properties of the air layers but does not take into account the geometry of the perforations › Sheets assembly: In this case, the brick is assumed to be an

assembly of alternate sheets (ceramic sheets and equivalent air sheets). The equivalent air sheet takes into account the presence of the perpendicular ceramic ribs in the sheet › Finite elements calculation with the Heat and Moisture

nahme als Funktion der Quadratwurzel der Zeit dargestellt. Der Anstieg der Geraden entspricht dabei dem Wasseraufnahmekoeffizienten.

In einem dicken Material ohne Lochanteil bleibt der Wasseraufnahmekoeffizient über die Zeit konstant. Je nach der Ausrichtung (senkrecht bzw. parallel zur Faser-/Extrusionsrichtung) waren deutliche Unterschiede zu verzeichnen.

In einem Lochziegel ist der Wasseraufnahmekoeffizient mit der Zeit veränderlich. Anfänglich wird Wasser in der Außenhülle des Ziegels aufgenommen. Später wird durch die Lochungen die Absorption reduziert. Infolge der beim Wasserkontakt eintretenden Sättigung der Außenhülle war in den Kurven bei 0,5 h ($0,3 \text{ h}^{0.5}$) ein Absatz zu sehen.

Danach wurden zwei Wasseraufnahmekoeffizienten gemessen: einer zur Bestimmung der anfänglichen Wasseraufnahme nach 10 min und ein zweiter nach Ablauf von 24 h. Die anfänglichen Wasseraufnahmekoeffizienten waren für die Ziegel und die keramischen Materialien gleich. Mit der Zeit verringerte sich der Wert bei den Ziegeln, blieb danach aber auf konstantem Niveau. Auf lange Sicht verhielten sich die Lochziegel genauso wie das homogene Material ohne Lochung.

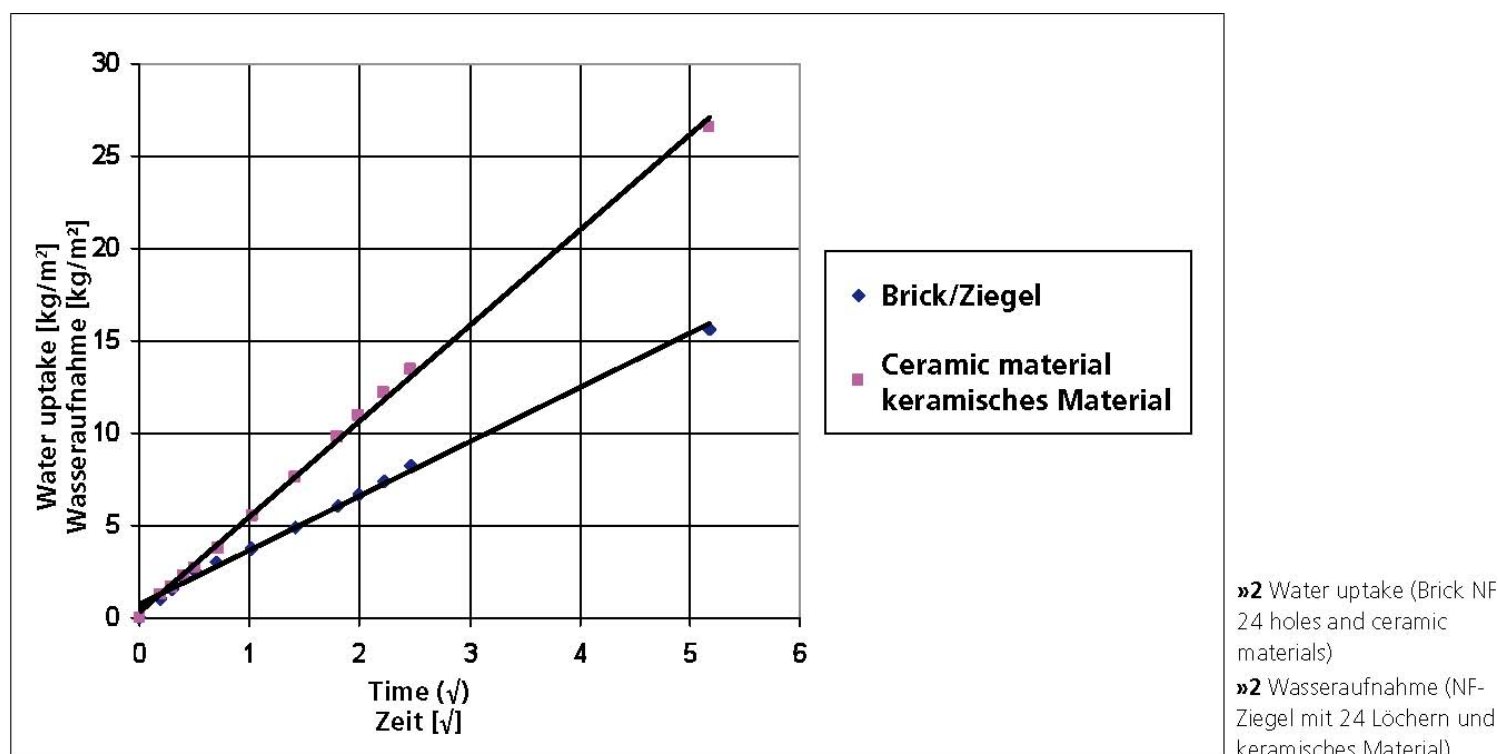
Die Werte für die Wasserleitfähigkeit beim Anfeuchten wurden mittels Gleichung 1 aus den anfänglichen Wasseraufnahmekoeffizienten abgeleitet. Die Ergebnisse sind in »Tabelle 7 dargestellt.

4 Berechnungsergebnisse

Die vorliegenden Berechnungen dienen der Bestimmung der feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften der Lochziegel aus den Eigenschaften des keramischen Materials.

4.1 Dampfdiffusion im Lochziegel

Erste Schätzungen des Dampftransports in Lochziegeln wurden auf Grundlage von drei Hypothesen angestellt: › Ziegelzusammensetzung Ia: Diese sehr grobe Schätzung berücksichtigt den Lochanteil und die Eigenschaften der Luftschichten, nicht jedoch die Geometrie der Löcher › Schichtmodell: In diesem Fall wird der Ziegel als eine Zusammenstellung einander abwechselnder Schichten (kera-



	Ceramic material		Initial absorption coefficient [kg/m ² h ^{0.5}] (0.2h)	Brick	
	Initial absorption coefficient [kg/m ² h ^{0.5}] (0.2h)	Max. diffusivity [m ² /s]		Absorption coefficient [kg/m ² h ^{0.5}] (24h)	Max. diffusivity Dw [m ² /s]
Brick NF 24 holes (perpendicular to fibre)	5.4 +/-0.1	4.9E-7	5.4 +/-0.3	2.7	4.0E-7
Brick NF 24 holes (extrusion fibre orientation)	13.0	2.7E-6			
Monomur 1 (perpendicular to fibre)	4.3 +/-0.4	3.18E-7	3.9 +/-0.4	1.8 +/-0.2	1.5E-7
Monomur 1 (extrusion fibre orientation)	10.7	2.1E-6	5.5		
Monomur 2 (perpendicular to fibre)	10.4 +/-3	1.3E-6	11.1 +/-0.1	5.6	5E-7

»Table 8 Diffusionskoeffizienten und maximale kapillare Wasserleitfähigkeit der keramischen Materialien und Ziegel (beim Anfeuchten)

	Keramisches Material		anfänglicher Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² h ^{0.5}] (0,2h)	Ziegel	
	anfänglicher Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² h ^{0.5}] (0,2h)	maximale Wasserleitfähigkeit [m ² /s]		anfänglicher Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² h ^{0.5}] (0,2h)	Absorptionskoeffizient [kg/m ² h ^{0.5}] (24h)
NF-Ziegel mit 24 Löchern (senkrecht zu den Fasern)	5,4 +/-0,1	4,9E-7	5,4 +/-0,3	2,7	4,0E-7
NF-Ziegel mit 24 Löchern (parallel zu den Fasern)	13,0	2,7E-6			
Monomur 1 (senkrecht zu den Fasern)	4,3 +/-0,4	3,18E-7	3,9 +/-0,4	1,8 +/-0,2	1,5E-7
Monomur 1 (parallel zu den Fasern)	10,7	2,1E-6	5,5		
Monomur 2 (senkrecht zu den Fasern)	10,4 +/-3	1,3E-6	11,1 +/-0,1	5,6	5E-7

software (HAM). In this case, Wufi-2d was used

The results are given in »Table 8 where the calculations are compared to the experimental results. It is clear that the mixture rule, which does not take into account the geometry, is not accurate. The geometrical description, in which the brick is a sandwich of different layers is simple and produces a preliminary estimation (differences < 20%).

The use of a HAM software such as Wufi-2d is the most accurate (differences < 5%). In addition, a part of the difference should be related to the limited meshing capabilities available in Wufi-2d (only 100 000 elements available). In fact, the result seems even too good when it is known that the materials are anisotropic and the calculations were based on the property in one direction only. It probably means

mischer sowie äquivalenter Luftschichten) betrachtet. Die äquivalente Luftschicht berücksichtigt die Anwesenheit senkrechter keramischer Stege » Berechnung nach der Finiten-Elemente-Methode mit Wufi 2D, einer Software für Wärme-und Feuchtetransport

In »Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Berechnungen und der Messungen vergleichend dargestellt. Natürlich fehlt dem Ansatz über die Ziegelzusammensetzung, der die Geometrie der Löcher nicht in Betracht zieht, die Genauigkeit.

Die geometrische Beschreibung des Ziegels als ein Verbund verschiedener Lagen ist einfach und liefert einen vorläufigen Schätzwert, mit Ungenauigkeiten unter 20 %.

Mit Ungenauigkeiten von weniger als 5 % ist der Einsatz von Software für Wärme-und Feuchtetransport – zum Beispiel Wufi 2D – der genaueste Weg. Hinzu kommt, dass ein Teil der

»Table 8 Resistance factor to vapour transport μ (RH < 50%)

»Tabelle 8 Dampfdiffusionswiderstandsfaktor μ (RH < 50 %)

Brick Ziegel	Perforation Lochgehalt [%]	(measured/gemessen)		brick/Ziegel (computed/berechnet)		
		ceramic mat. Keram. Material	brick/Ziegel	Mixture rule Mischungsregel	Geometry Geometrie	Wufi-2d Wufi 2D
Brick NF 24 holes	61	43 +/-3	9.6 +/-0.2	17	8.8	9.7
Monomur 1	48.7	61 +/-11	19.2 +/-3.5	32	23.3	20.2
Monomur 2	48	18.2	7 +/-0.7	10.2	7.9	7.3

»3	»3	»3
1h	5h	9h
Water penetration in a brick NF 24 holes (various times up to 24h)		
Wassereindringtiepen im NF-Ziegel mit 24 Löchern (verschiedene Zeiten bis 24 h)		

that the vapour diffuses from one perforation to the next one across the ceramic web mostly in the through-fibre orientation, and there is no significant vapour diffusion in the parallel orientation. Then it seems that it is not necessary to measure the vapour resistance factor with the parallel orientation.

4.2 Liquid water absorption in a perforated brick

From the wetting experiments on ceramic materials, the diffusivities in wetting of the ceramic materials were obtained. They were used in the HAM software Wufi-2d in order to compute the water absorption of the brick in 24 h.

In »3 and »4, the computed penetrations of water are shown at various times in two different bricks. The strong blue colour corresponds to a water content of 240 kg/m^3 and the very light blue to 40 kg/m^3 . The front of moisture is then very steep and the width of the gradient zone is short.

The water penetrates the first external web with an orientation perpendicular to fibres. Afterwards it creeps in the ribs and turns around the various perforations. The flow is then parallel to fibres.

In »5, the weight gains (measured and computed) of the brick NF 24 holes are plotted versus the square root of the time up to 24 hours ($4.9\sqrt{h}$). The shapes and values are rather similar.

It should be noted, however, that this result was obtained only when the absorption coefficient in the parallel orientation was used. Weight gain was too low when the absorption coefficient in the perpendicular orientation was used. This fits well with the assumption that the water flows in the ribs mostly in the parallel orientation.

In »6, a similar comparison is performed for the brick Monomur 1. The water uptakes of the various bricks after 24 hours are compared in »Table 9.

For the three bricks, the difference between measurements and calculations was lower than 20%.

From the simple initial adsorption coefficient of the ceramic material, it was possible to calculate the water weight gain of the perforated brick. The differences noted between measurements and computations were due to several reasons: › The dimensions of the tested bricks were not related, or were made from drawing dimensions and some differences in rib thicknesses between drawings and specimens are possible › It was noted that the surface layer and the core layer of the

bricks had slightly different densities and hydric properties. These variations are not taken into account in the calculation › The calculation assumed that the material was isotropic. Just

Ungenauigkeiten auf die in Wufi 2D begrenzt vorhandenen Eingriffskapazitäten (nur 100 000 Elemente sind verfügbar) zurückzuführen ist.

»4	»4	»4
4h	8h	12h
Water penetration in a brick Monomur 1 (various times up to 24 h)		
Wassereindringtiepen im Monomur-Ziegel 1 (verschiedene Zeiten bis 24 h)		

Ungenauigkeiten auf die in Wufi 2D begrenzt vorhandenen Eingriffskapazitäten (nur 100 000 Elemente sind verfügbar) zurückzuführen ist.

Wenn man bedenkt, dass die Materialien anisotrop sind und die Berechnungen auf den Eigenschaften in lediglich einer Richtung basieren, erscheint das Ergebnis sogar zu genau. Das bedeutet vermutlich, dass im keramischen Gefüge der Dampf von dem einen zum benachbarten Loch vorwiegend quer und fast gar nicht parallel zur Faserrichtung diffundiert. Daher scheint eine Messung des Dampfdiffusionswiderstandsfaktors parallel zur Faserrichtung nicht notwendig zu sein.

4.2 Wasseraufnahme im Lochziegel

Aus den Wasseraufnahmeuntersuchungen an keramischen Materialien wurden die Werte der Wasserleitfähigkeit dieser Materialien gewonnen. Diese wurden für die Berechnung der 24-h-Wasseraufnahme der Ziegel mit der Software Wufi 2D eingesetzt.

In »3 und »4 sind für zwei verschiedene Ziegel die errechneten Wassereindringtiepen zu unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Dunkelblau ist ein Wassergehalt von 240 kg/m^3 und hellblau einer von unter 40 kg/m^3 dargestellt. Die Front der Durchfeuchtung verläuft dann sehr steil, wogegen der Gradientenbereich schmal ist.

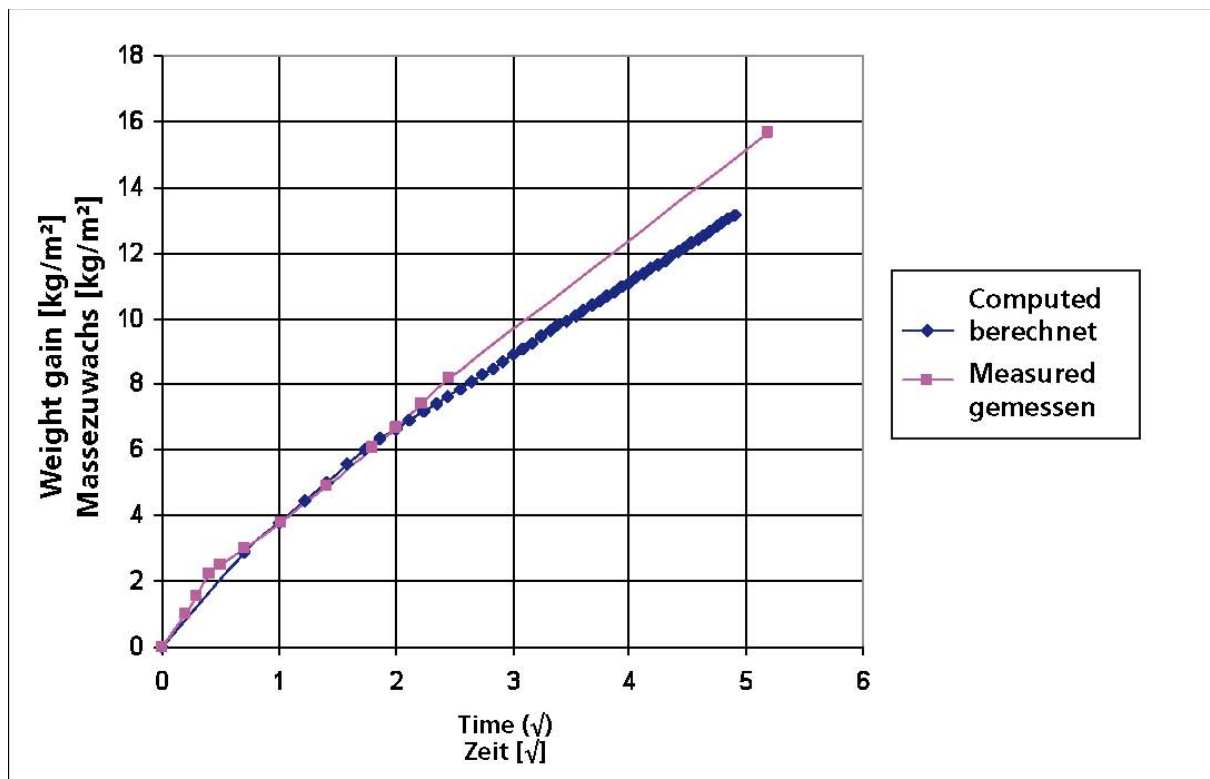
Das Wasser durchdringt das erste äußere Gefüge senkrecht zu den Fasern. Danach kriecht es in die Stege und dreht sich um die verschiedenen Lochungen. Nunmehr verläuft die Fließrichtung parallel zu den Fasern.

In »5 sind die gemessenen sowie die berechneten Massezuwächse des Normalformatziegels mit 24 Löchern gegen die Quadratwurzel der Zeit über 24 h (dies entspricht dem Endpunkt $4.9\sqrt{h}$) aufgetragen. Sowohl die Formen als auch die Werte ähneln sich weitgehend.

Jedoch sollte erwähnt werden, dass das Ergebnis nur unter Verwendung des für die parallel zur Faserrichtung geltenden Wasseraufnahmekoeffizienten erzielt wurde. Bei Einsatz des senkrecht zu den Fasern geltenden Wasseraufnahmekoeffizienten war der Massezuwachs zu gering. Das deckt sich mit der Annahme, dass das Wasser in den Stegen größtenteils in der Parallelrichtung fließt.

In »6 wird für den Ziegel Monomur 1 ein ähnlicher Vergleich angestellt. Die Werte der 24-h-Wasseraufnahme für die verschiedenen Ziegel sind in »Tabelle 9 gegenübergestellt. Bei den drei Ziegeln lag die Abweichung zwischen den Messungen und den Berechnungen unter 20 %.

Es war möglich, aus dem einfachen anfänglichen Wasseraufnahmekoeffizienten des keramischen Materials den was



»5 Water uptake in dipping, brick NF 24 holes (measured and computed)
 »5 Wasseraufnahme beim Eintauchen des NF-Ziegels mit 24 Löchern (gemessen und berechnet)

as the thermal conductivity is not isotropic, the capillarity diffusivity is also not isotropic. The calculations were performed with only one value of diffusivity

- › The full diffusivity curves were not known and the calculations were made with the rough assumption that the variation of the diffusivity is exponential with the water concentration

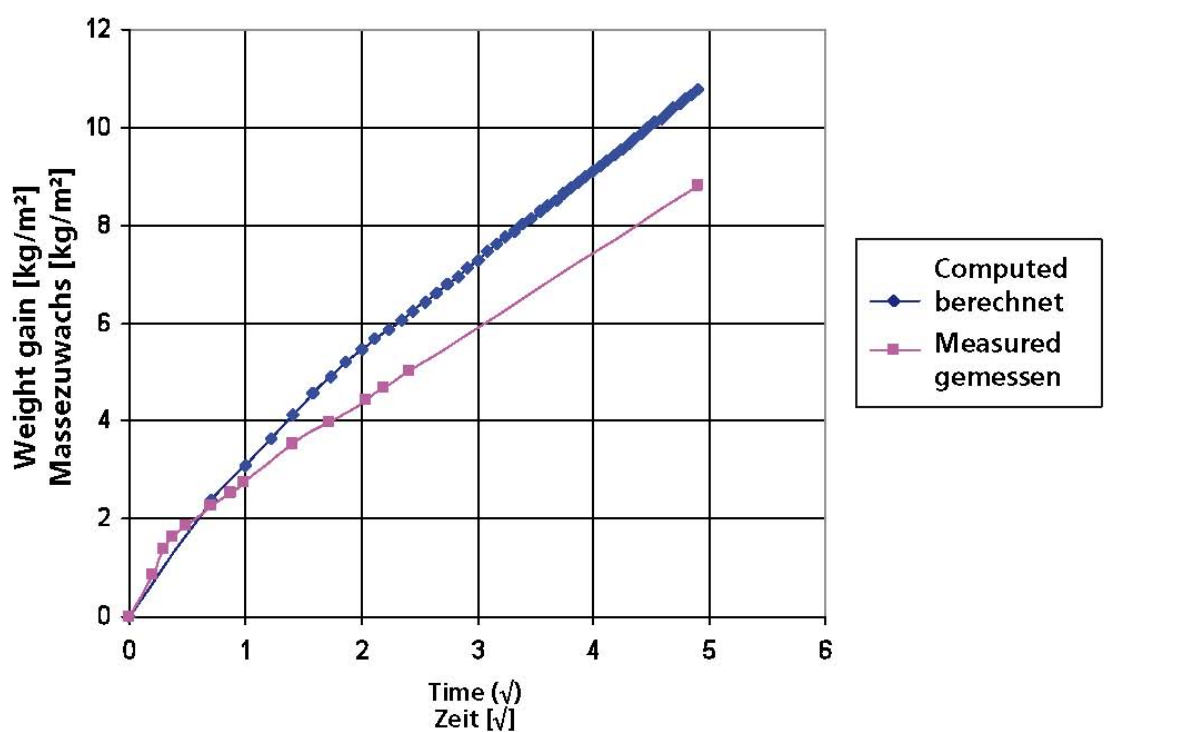
5 Conclusions

- › Water-related properties of three ceramic materials and of the corresponding perforated bricks were measured
- › Moisture transfer calculations were performed with a finite element Heat and Moisture transfer software Wufi-2d.
- › Based on measurements and calculations, it was possible to evaluate the moisture-related properties of a perforated brick, knowing the properties of the ceramic material

serbasierten Massezuwachs des Lochziegels zu berechnen.

Die hier beobachteten Abweichungen zwischen den Messungen und den Berechnungen hatten folgende Ursachen:

- › Die Größe der Ziegel wurde nicht gemessen. Die Maße für die Berechnungen wurden der Zeichnung entnommen, sodass Differenzen zwischen den Stegdicken in der Zeichnung und denjenigen der Proben nicht auszuschließen sind
- › Zwischen der Oberflächen- und der Kernschicht der Ziegel gibt es geringe Unterschiede der Dichten und der hygri-schen Eigenschaften, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurden
- › Für die Berechnung wurde angenommen, dass das Material isotrop sei. Die kapillare Wasserleitfähigkeit wie auch die Wärmeleitfähigkeit sind aber nicht isotrop. Die Berech-



»6 Weight gains in dipping Monomur 1 (measured and computed)
 »6 Wasseraufnahme beim Eintauchen des Monomur-Ziegels 1 (gemessen und berechnet)

»Table 9 Measured and computed water uptake of various perforated bricks (after 24 hours) »Tabelle 9 24-h-Wasseraufnahme verschiedener Lochziegel – gemessen und berechnet

	Measured gain gemessene Zunahme [kg/m ²]	Computed gain berechnete Zunahme [kg/m ²]
Brick NF 24 holes / NF-Ziegel mit 24 Löchern	14.8	13.1
Monomur 1	8.8 +/-1	10.8
Monomur 2	24	20

› It was possible to compute the resistance factor to vapour transport of a perforated brick from the resistance factor of the ceramic material. This can save extensive time in measurement. In this case the resistance factor of the ceramic specimen should be measured in the perpendicular orientation. It is possible to compute the water uptake of a brick dipped in water from the property of the ceramic specimen. In this case, the parallel capillary diffusivity should be measured and used

› When CE marking data are required for a family of products and accessories, it should be possible to measure the moisture properties of the ceramic materials and compute the properties of the various members of the family (bricks of various dimensions, accessories)

› As it is possible to individually model the various moisture transfer phenomena of perforated bricks, it should be possible to model the behaviour of a perforated brick wall exposed to climatic conditions with good confidence

› After a short time (shorter than one hour), the perforated brick behaves as a uniform material. In numerous cases, especially when changes are slow, and after a preliminary validation, it seems possible to model a brick wall as an assembly of various homogeneous layers and use a 1d-HAM software instead of 2d. This will make the computation easier and faster with a limited loss of accuracy

References/Literatur

[1] www.wufi.de

[2] Hall, Ch.; Hoff, W. D.: Water transport in brick, stone and concrete, Spon press London (2002), ISBN 0-419-22890-X

[3] Roels, S.; Carmeliet, J.; Hens, H.; Hall, P. and alii: Comparison of different techniques to quantify moisture content profiles in porous building materials, Journal of thermal envelopes and building sciences 27 (4), (2003), pp. 261–275

[4] Ketelaars, AAJ; Pel, L.; Coumans, W.J.; Ferkhof, PJAM: Drying kinetics: a comparison of diffusion coefficients from moisture concentration profiles and drying curves, Chemical Engineering Science 50, 7, pp. 1187–1191 (1995)

Krus, M.; Schmidt, T.: Determination of the liquid transport coefficient for water uptake, Bauinstandsetzen 3 (1997), H.1, 219–234

nungen wurden aber mit nur einem Wert der Wasserleitfähigkeit ausgeführt

› Der jeweils komplette Verlauf der Wasserleitfähigkeit war nicht bekannt. Somit basieren die Berechnungen auf der groben Schätzung, dass die Wasserleitfähigkeit exponential mit der Wasserkonzentration steigt

5 Zusammenfassung

› Die feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften von drei keramischen Materialien und von den dazugehörigen Lochziegeln wurden gemessen

› Mit der Finiten-Elemente-Software für Wärme-und Feuchtetransport Wufi 2D wurden die Berechnungen des Feuchtetransports durchgeführt

› Auf der Grundlage bekannter Eigenschaften der keramischen Materialien war es möglich, die feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften des Lochziegels sowohl durch Messungen als auch durch Berechnungen zu bestimmen

› Aus dem Dampfdiffusionswiderstandsfaktor des keramischen Materials konnte derjenige des Lochziegels berechnet werden. Über diesen Weg lassen sich Messzeiten erheblich verringern. Im vorliegenden Fall sollte der Dampfdiffusionswiderstandsfaktor der keramischen Proben in senkrechter Richtung gemessen werden

› Aus der entsprechenden Eigenschaft einer keramischen Probe kann die Wasseraufnahme eines in Wasser eingetauchten Ziegels berechnet werden. In diesem Fall sollte die parallele kapillare Wasserleitfähigkeit gemessen und nur diese für die Untersuchungen verwendet werden

› Wird für eine Produktfamilie mitsamt Zubehör eine CE-Kennzeichnung gefordert, sollte es möglich sein, die feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften der keramischen Materialien zu messen und die Eigenschaften der unterschiedlichen Bestandteile dieser Produktfamilie (Ziegel verschiedener Maße, Zubehörziegel) zu berechnen

› Entsprechend der Möglichkeit, die verschiedenen Phänomene des Feuchtetransports eines einzelnen Lochziegels zu modellieren, sollte eine Modellierung auch bezüglich des Verhaltens einer den herrschenden klimatischen Bedingungen unterworfenen Wand aus Lochziegeln mit guter Ergebnisgenauigkeit möglich sein

› Nach weniger als einer Stunde verhält sich der Lochziegel wie ein einheitliches Material. In vielen Fällen, besonders bei langsamen Einwirkungen und im Anschluss an eine Voruntersuchung scheint es möglich zu sein, eine Ziegelwand als Zusammenschluss verschiedener homogener Schichten zu betrachten und die Software Wufi 1D anstelle von Wufi 2D einzusetzen. Das würde die Berechnung bei einer nur geringen Genauigkeitseinbuße einfacher und schneller machen.

¹ Michel Kornmann
31 chemin des Palettes I 1212 Grand Lancy I Switzerland T +41 78 635 89 55 m.kornmann@bluewin.ch I www.tuiles-briques.com

² CTMNC
av. du General de Gaulle I 92100 Clamart I France (CTMNC Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction)