



PARAMETRY TRANSPORTU VLHKOSTI

- pro popis transportu vlhkosti v porézních stavebních materiálech se používají dva materiálové parametry – jeden pro popis transportu vodní páry a druhý pro popis transportu kapalné vody
- základním kritériem pro posouzení zda se voda v jednotlivém póru vyskytuje ve formě vodní páry nebo samostatné izolované molekuly, je Knudsenovo číslo K_n (-) definované vztahem

$$Kn = \frac{\lambda}{d}$$

- kde λ (m) je střední volná cesta molekul vodní páry a d (m) průměr póru

Pozn.: molekula vody cca 1nm – cca 5x větší než molekula vodní páry.



- pro střední volnou cestu molekul vodní páry můžeme zapsat následující rovnici

$$\lambda = \frac{k_B \cdot T}{2^{5/2} \pi R_m^2 p}$$

- kde $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K je Boltzmannova konstanta, πR_m^2 kolizní průřez molekuly (pro vodní páru je $2Rm = 4,6 \cdot 10^{-10}$ m), p tlak
- pro vodní páru za normálních atmosférických podmínek při teplotě $T = 293$ K dostáváme

$$\lambda = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2^{5/2} \pi (2,3 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 10^5} = 4,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$



- pro Knudsenovo číslo $Kn \gg 1$ nemůžeme s určitostí hovořit o jednotlivé fázi vody v pórech, ale transport vlhkosti je realizován ve formě izolovaných molekul vody - tento typ transportu je nazýván jako efúze či Knudsenova difúze
- nabývá-li Knudsenovo číslo hodnot $\ll 1$, způsob transportu vodní páry v pórech je podobný toku vodní páry v kruhových kapilárách a může být popsán Hagen-Poiseuilleovým zákonem

$$j = \frac{Q_v \cdot \rho}{S} = -\frac{R^2}{8\eta} \cdot \frac{pM}{R_g T} \cdot \frac{dp}{dx}$$

- kde Q_v (m^3/s) je objemový tok vodní páry, S (m^2) průřezová plocha póru, R (m) poloměr póru, p (Pa) parciální tlak vodní páry, η viskozita ($\text{kg}/\text{m s}$), M ($M = 0.018 \text{ kg}/\text{mol}$) molární hmotnost vodní páry a R_g ($R = 8,3145 \text{ J}/\text{mol K}$) univerzální plynová konstanta



- předpokládáme-li, že vodní pára je ideální plyn, můžeme napsat stavovou rovnici

$$p_v = \frac{\rho_c RT}{M}$$

- T (K) – teplota, R (J/mol K) univerzální plynová konstanta, M molární hmotnost vodní páry (kg/mol)
- za izotermních podmínek získáme pomocí předchozích vztahů vztah definující závislost difúzního koeficientu na propustnosti pro vodní páru

$$D = \delta \cdot \frac{RT}{M}$$



- zejména pro hodnocení těsnosti stavebních materiálů z pohledu difúze vodní páry se používá také stanovení **faktoru difúzního odporu** $\mu (-)$, který v podstatě stanovuje, kolikrát je transport vodní páry materiálem pomalejší v porovnání s transportem vodní páry ve vzduchu ($D_{vzduch} = 2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

$$\mu = \frac{D_{vzduch}}{D}$$

- pro vyjádření difúzních vlastností povrchových úprav, například sanačních omítek, nátěrových systémů apod., se často zavádí také veličina **ekvivalentní difúzní tloušťka materiálu** r_d (m), která je závislá na geometrii (tloušťce d) materiálu $r_d = \mu \cdot d$
- číselně tato veličina popisuje, jakou tloušťku by musela mít vrstva vzduchu, aby měla stejný difúzní odpor jako definovaný stavební materiál.



- předcházející rovnice představuje zjednodušení obecného vztahu pro kumulativní hmotnost vody vyjádřenou pomocí principu odmocniny času, který se běžně používá v teorii difúze
- tuto rovnici jsme dostali vydělením následujícího vztahu objemovou hmotností vody při specifické teplotě měření $\rho_w(T)$

$$i = A \cdot t^{1/2}$$

- i (kg m^{-2}) kumulativní hmotnost vody a A ($\text{kg m}^2\text{s}^{-1/2}$) absorpční koeficient pro kapalnou vodu
- vztah mezi sorptivitou a absorpčním koeficientem pro kapalnou vodu udává rovnice

$$A = S \cdot \rho_w(T)$$



- v současné době se používají v zásadě dva principy měření, manuální a automatický
- měřené vzorky jsou ve formě krychlí či trámečků a na obvodových stranách se vodotěsně a parotěsně izolují z důvodu zajištění jednorozměrného transportu vlhkosti (vzorky jsou předem vysušeny do konstantní hmotnosti)
- vzorky se poté dají do kontaktu s vodou, přičemž je nezbytné zajistit udržení stálé vodní hladiny - za tímto účelem se nejčastěji používá Mariottova láhev
- hladina vody by neměla být více než 5 mm nad kontaktem vzorku s vodou
- v případě manuálního měření je ve zvolených časových intervalech provedeno vážení vzorků, díky čemuž se stanoví přírůstek vlhkosti v materiálu jako funkce času

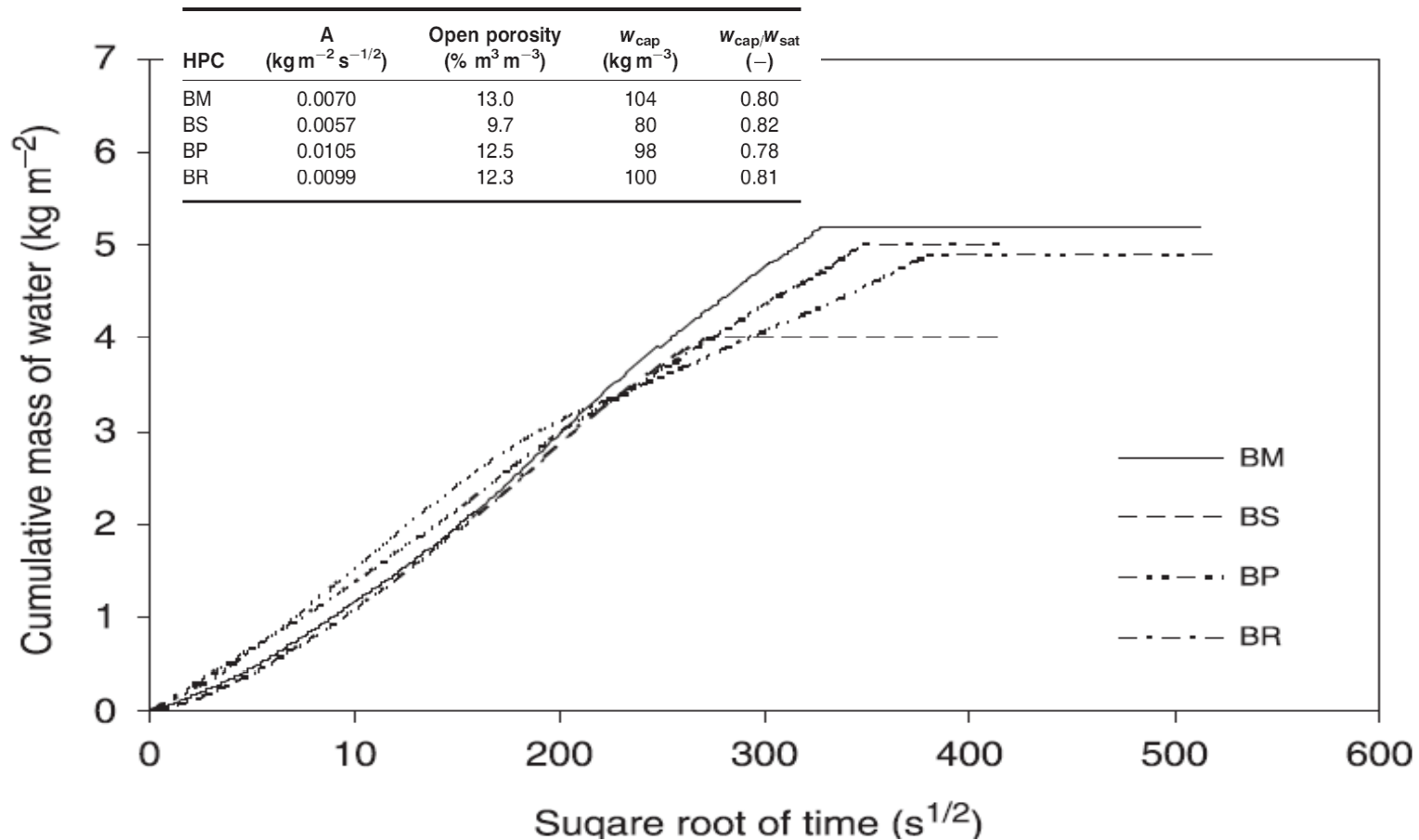


- každé manuální vážení by mělo být dokončeno přibližně do 30s
- autoři uvádějí, že minimální počet vážení při manuálním měření je pět, přičemž doporučují provést více měření
- při automatickém měření je základní uspořádání stejné s tím rozdílem, že je měřený vzorek zavěšen na automatické digitální váhy a nárůst jeho hmotnosti vlivem absorpce vody je zaznamenáván automaticky
- manuální měření může v některých případech, především u materiálů s vyšší a rychlejší nasákavostí, vést k hodnotám sorptivity či absorpčního koeficientu podstatně menším než v případě měření automatického - příčinou je přerušení kontaktu vzorku s vodou během vážení či příliš dlouhá doba vážení



- během druhé fáze dosáhla úroveň vlhkosti druhého konce vzorku a jakýkoli nárůst vlhkosti může být připsán pouze rozpuštění či difúzi uzavřeného vzduchu ve vodě
- na základě dosažení druhé fáze absorpce definujeme poté kapilární obsah vlhkosti w_{kap} (kg m^{-3}), který je roven obsahu vlhkosti při přechodu z první do druhé fáze absorpce
- první fáze experimentu se vyhodnocuje dle konceptu počátečního času – **Bomberg 2005**
- popsaný absorpční experiment dává informace o porézní struktuře materiálu, o schopnosti transportovat kapalnou vlhkost
- může být také použit při identifikaci a hodnocení porušení materiálu – například v případě mikrotrhlin v důsledku zatížení vysokými teplotami
- stanovení účinnosti povrchových úprav (hydrofobizace, omítky, nátěry apod.)

Component	BR	BM	BS	BP
CEM I 42.5 Mokrá	484	440	440	440
Aggregates 0–4 mm	812	812	812	812
Aggregates 8–16 mm	910	910	910	910
Plasticizer Mapei Dynamon SX	5.3	5.3	5.3	5.3
Metakaolin MEFISTO	–	44	–	–
Ground granulated blast furnace slag Štramberk	–	–	44	–
Fly ash Dětmarovice	–	–	–	44
Water	188	188	188	188



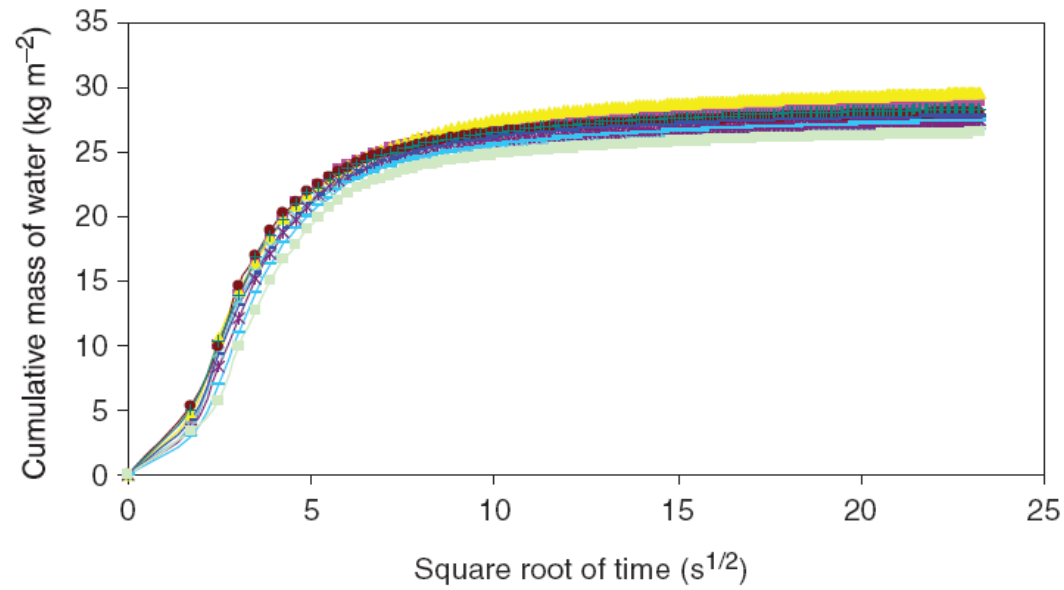


Figure 2. Sorptivity plots for hydrophilic mineral wool.

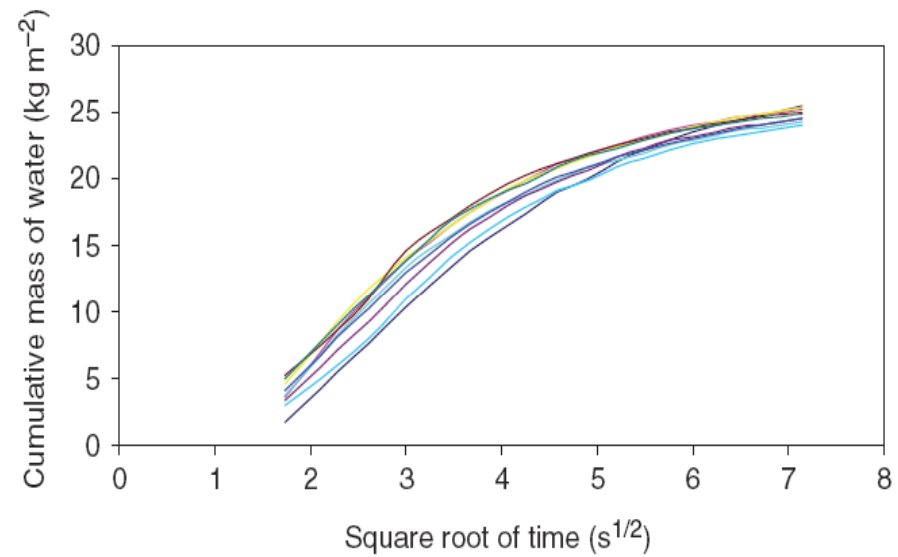


Figure 3. Sorptivity plots for hydrophilic mineral wool: detail of the initial phase.



Table 3. Composition of the studied composite material in mass-%.

Component	Quantity
Cement CEM I 52.5	36.0
Siliceous aggregates	17.0
Microsilica	4.0
Wollastonite	39.0
Aramid fiber 1.5 mm	2.0
Aramid fiber 6 mm	2.0

Table 4. Basic material characteristics of aramid fiber reinforced composites.

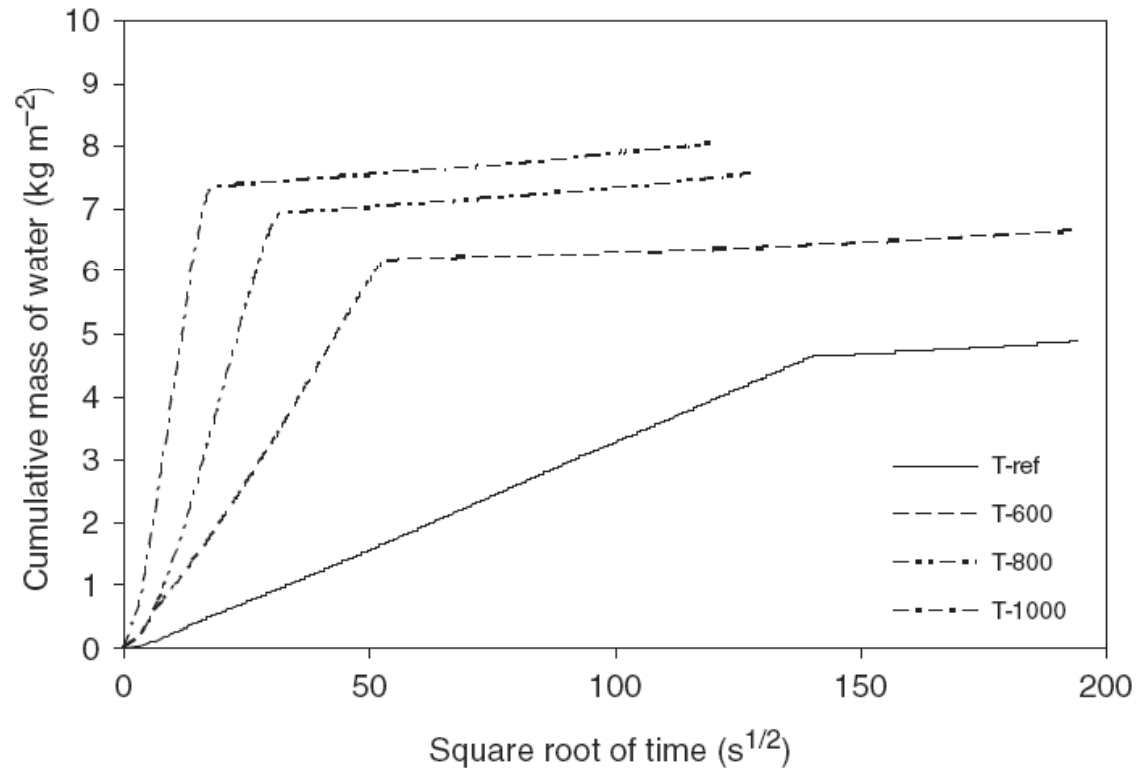
Material	Bulk density (kg m^{-3})	Matrix density (kg m^{-3})	Open porosity (% $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
T-ref	1405	2414	41.8
T-600	1309	2802	53.3
T-800	1366	2814	51.3
T-1000	1387	2797	50.4



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

■ FAKULTA STAVEBNÍ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ A CHEMIE

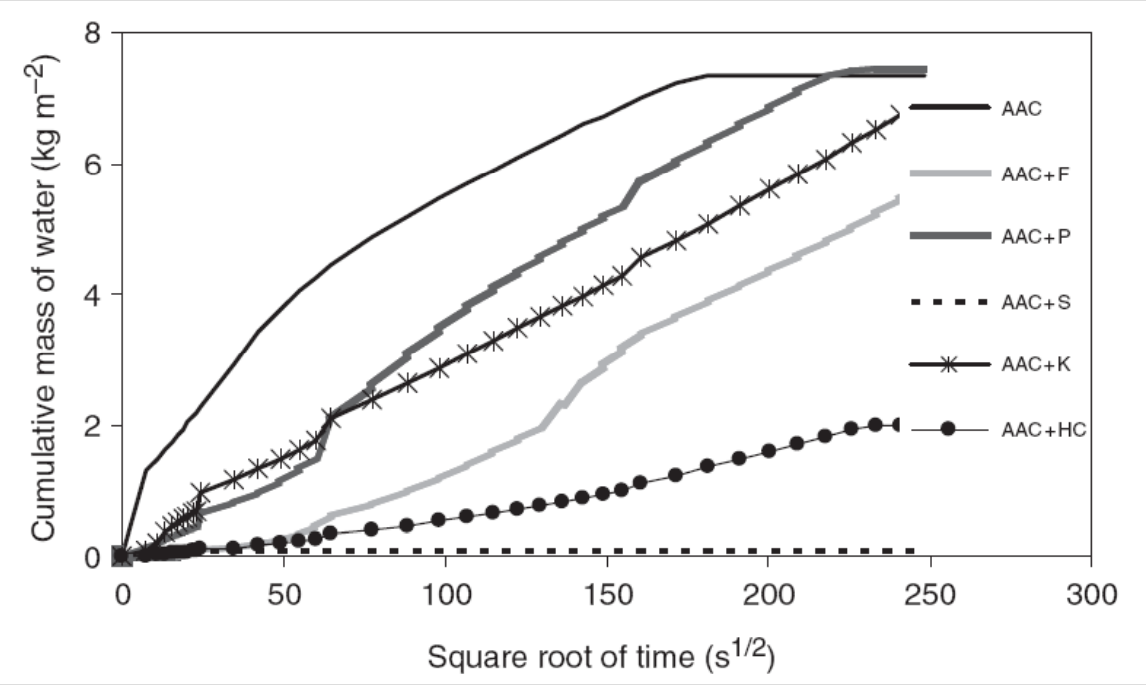
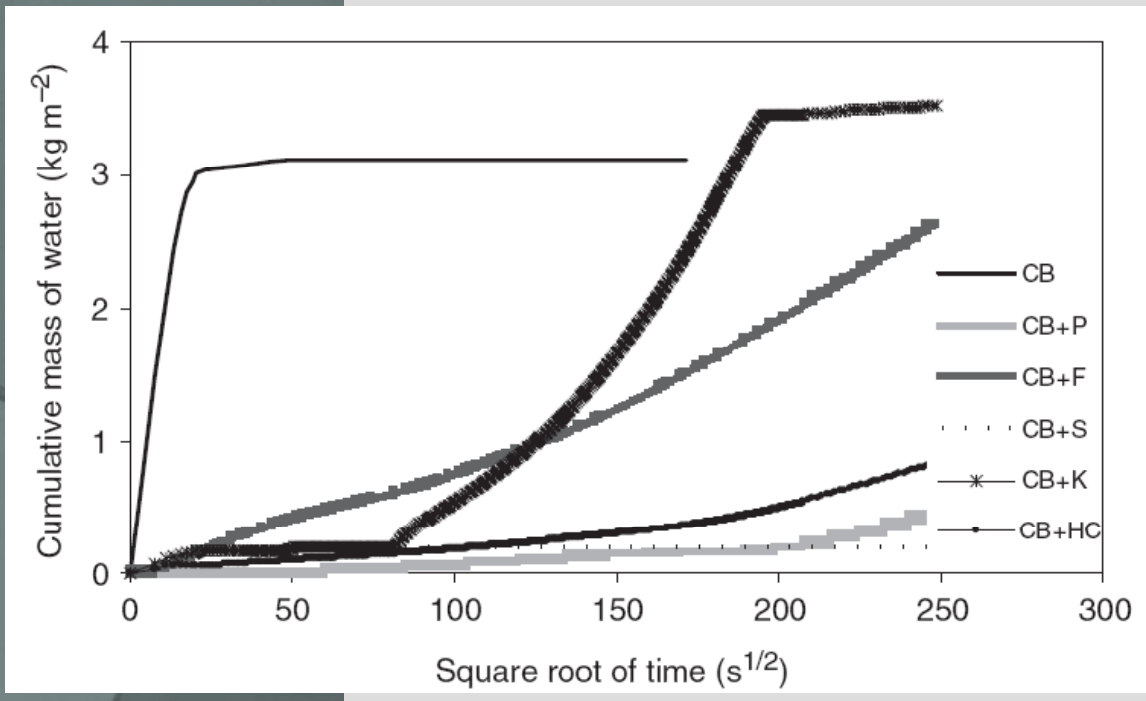


Material	A (kg m ⁻² s ^{-1/2})	w _{cap} (kg m ⁻³)	w _{cap} /w _{sat} (-)
T-ref	0.032	190	0.45
T-600	0.110	250	0.47
T-800	0.298	280	0.55
T-1000	0.505	290	0.57



Coating base	Abbreviation	Coating thickness (mm)	
		Ceramic brick	Autoclaved aerated concrete
Polyvinyl acetate dispersion	P	0.50 ± 0.05	0.45 ± 0.05
Resin dispersion with filler	F	0.50 ± 0.05	0.50 ± 0.05
Organic silicate face painting	S	0.40 ± 0.05	0.60 ± 0.05
Silicate-modified painting	K	0.65 ± 0.05	0.65 ± 0.05
Flexible acrylate painting	HC	0.75 ± 0.05	0.80 ± 0.05

Substrate	Bulk density (kg m^{-3})	Matrix density (kg m^{-3})	Open porosity ($\% \text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
CB	1776	2467	31.8
AAC	463	1859	74.6





POPIS TRANSPORTU KAPALNÉ VLHKOSTI

- rovnice pro vyjádření vlhkostního toku jsou analogické vyjádření Fickova zákona

$$\vec{j}_w = -\kappa(\rho_m) \operatorname{grad} \rho_m = -\rho_s \kappa(u) \operatorname{grad} u = -\rho_w \kappa(w) \operatorname{grad} w$$

- κ (m²/s) je vlhkostní vodivost, u (-) hmotnostní vlhkost $u = \frac{\rho_m}{\rho_s}$

- w (-) objemová vlhkost $w = \frac{\rho_m}{\rho_w}$

Parciální hustota porézní matrice ρ_s

$\rho_s = \frac{m_s}{V}$, m_s je hmotnost matrice a V objem celého porézního tělesa

Parciální hustota vody ρ_m $\rho_m = \frac{m_m}{V}$, m_m je hmotnost vody



POPIS TRANSPORTU KAPALNÉ VLHKOSTI II

- dle vztahu odvozeného Kumaranem (Kumaran, 1994) může z absorpčního experimentu stanovit průměrný součinitel vlhkostní vodivosti dle rovnice

$$\kappa = \left(\frac{A}{W_{kap}} \right)^2$$

- kromě součinitele vlhkostní vodivosti se pro popis transportu vlhkosti používá také hydraulická vodivosti k (m/s)

$$\vec{j}_w = \rho_w k(h) \operatorname{grad} h \quad h \text{ (m) je hydraulická výška}$$

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (p_a - p_b)}$$



POPIS TRANSPORTU KAPALNÉ VLHKOSTI III

- odvození závislosti vlhkoštní vodivosti na hydraulické vodivosti

$$\kappa(u) = k(h) \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \frac{\partial h}{\partial u}$$

$$\kappa(w) = k(h) \frac{\partial h}{\partial w}$$

Popis transportu kapaln  vlhkosti pomocí gradientu tlaku vody p_w

$$\vec{j}_w = \rho_w \frac{K}{\eta_w} k_{rw}(w) \text{grad} p_w$$

- K (m^2) je propustnost materiálu pro vodu – hodnota materiálu nezávislá na jeho saturaci, η_w dynamická viskozita vody, k_{rw} (-) relativní propustnost materiálu – funkce nasycení (obsahu vlhkosti)



POPIS TRANSPORTU KAPALNÉ VLHKOSTI IV

$$v = \frac{K}{\eta_w} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad K = v \frac{\eta_w \Delta x}{\Delta P}$$

-v (m/s) rychlost proudění kapaliny, ΔP rozdíl aplikovaného tlaku

Vztah mezi hydraulickou vodivostí a propustností

$$k(h) = \rho_w g \frac{K}{\eta_w} k_{rw}(w)$$

$$K = v \frac{\eta_w \cdot Q \cdot L}{\rho \cdot g \cdot A \cdot \Delta h}$$

- Q (m³/s) je tok kapalin, ρ (kg/m³) její hustota, Δh pokles hydraulické hladiny (m) při průchodu kapaliny vzorkem, L (m) tloušťka vzorku, A (m²) plocha vzorku, g (m²/s) gravitační zrychlení



STANOVENÍ SOUČiniteLE VLHKOSTNÍ VODIVOSTI

- transport vlhkosti popíšeme difúzní rovnicí

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \operatorname{div}(\kappa(u) \operatorname{grad}(u))$$

- vlhkostní vodivost zavedena jako funkce obsahu vlhkosti což vede k nelinearitě výše uvedené rovnice

- pokud stanovíme funkci $\kappa(u)$ můžeme v materiálu simulovat vlhkostní pole a jeho distribuci v čase při zohlednění vhodných počátečních a okrajových podmínek

- vyjádříme vlhkostní tok pomocí Fickova zákona

$$\vec{j}_w = -\rho_s \kappa(u) \operatorname{grad}u \text{ a kombinací s rovnicí kontinuity}$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{j}) = 0 \text{ dostaneme výše uvedenou rovnici}$$



STANOVENÍ SOUČINITELE VLHKOSTNÍ VODIVOSTI II

- součinitel vlhkostní vodivosti je obvykle měřen v jednorozměrném uspořádání (Lykov, 1958)
- používají se vzorky tvaru hranolu, kde jeden konec vzorku ($x=0$) je vlhčen (v kontaktu s vodou) a druhý konec ($x=L$) je ponechán volný
- obvodové strany vzorku jsou parotěsně odizolovány
- zjednodušení difúzní rovnice na tvar
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$
- v čase poté měříme distribuci vlhkosti $u(x, t)$ a vlhkostní tok j
- pro výpočet součinitele vlhkostní vodivosti se v praxi používá celá řada metod: stacionární (steady-state) metody, transientní - nestacionární



STANOVENÍ SOUČINITELE VLHKOSTNÍ VODIVOSTI III

Stacionární metoda navržená Lykovem

- při stacionární metodě je $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, tudíž $u(x, t) = u(x)$ – vlhkostní tok j_0 není časově závislý

$$\kappa(u(x)) = - \frac{j_0}{\rho_s \frac{\partial u(x)}{\partial x}} = 0$$

Tato metoda má řadu nedostatků:

- měření je zdlouhavé – pro některé typy materiálů může trvat i několik měsíců
- použito je pouze finální stacionární měření – ostatní data jsou nepoužitelná
- ustálený stav může pro některé materiály znamenat dosažení saturovaného stavu – není možné aplikovat



STANOVENÍ SOUČINITELE VLHKOSTNÍ VODIVOSTI IV

Aplikace nestacionárních metod – Matanova metoda

- předpokládá, že $\lim_{x \rightarrow \infty} u(x, t) = u_2$ pro všechny časy t

- využití Boltzmannovy transformace pro převedení parciální diferenciální rovnice na obyčejnou

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{t}} \quad \Rightarrow \quad \omega(\eta) = u(x, t)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{du}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{du}{d\eta} \frac{1}{2\sqrt{t}} \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{dC}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{dC}{d\eta} \cdot \left(-\frac{x}{4t\sqrt{t}} \right) = \frac{dC}{d\eta} \cdot \left(-\frac{\eta}{2t} \right)$$

$$\frac{d}{d\eta} \left(\kappa \frac{d\omega}{d\eta} \right) + 2\eta \frac{d\omega}{d\eta} = 0 \quad \kappa(u) = \frac{1}{2t_0 \left(\frac{du}{dz} \right)_{z=z_0}} \int_{z_0}^{\infty} z \frac{du}{dz} dz$$



FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TRANSPORT VLHKOSTI I

- vnitřní faktory – struktura skeletu, tvar, rozměr a distribuce pórů v materiálu, charakter transportované tekutiny (kontaktní úhel – smáčivost)
- vnější faktory – vlivy, které působí na celé kapilárně porézní těleso – teplota, gradient teploty, koncentrace látek rozpuštěných ve vodě, gradient jejich koncentrace, objemové síly působící na těleso – gravitační síla, vnější přetlak (hydrostatický tlak), gradient tlaku, intenzita vnějšího elektrického a magnetického pole – často můžeme řadu z nich zanedbat, na druhé straně často působí více vnějších faktorů najednou



FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TRANSPORT VLHKOSTI II

- vliv tepla na transport vlhkosti

$$\vec{j} = -\rho_s \kappa(u, T) \text{gradu} - \rho_s \kappa_T(u, T) \text{grad}T$$

← součinitel termodifúze

-problém fázové přeměny vody na vodní páru – zavedení fenomenologického koeficientu vypařování ψ dle vztahu

$$\psi(u, T, \varphi) = \frac{\delta u_i(T, t, \varphi)}{\delta t}$$

- kde $u_i(T, t, \varphi)$ je soustava křivek závislosti vlhkosti na teplotě a čase, φ je relativní vlhkost vzduchu



FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TRANSPORT VLHKOSTI

- matematické modely transportu tepla a vlhkosti

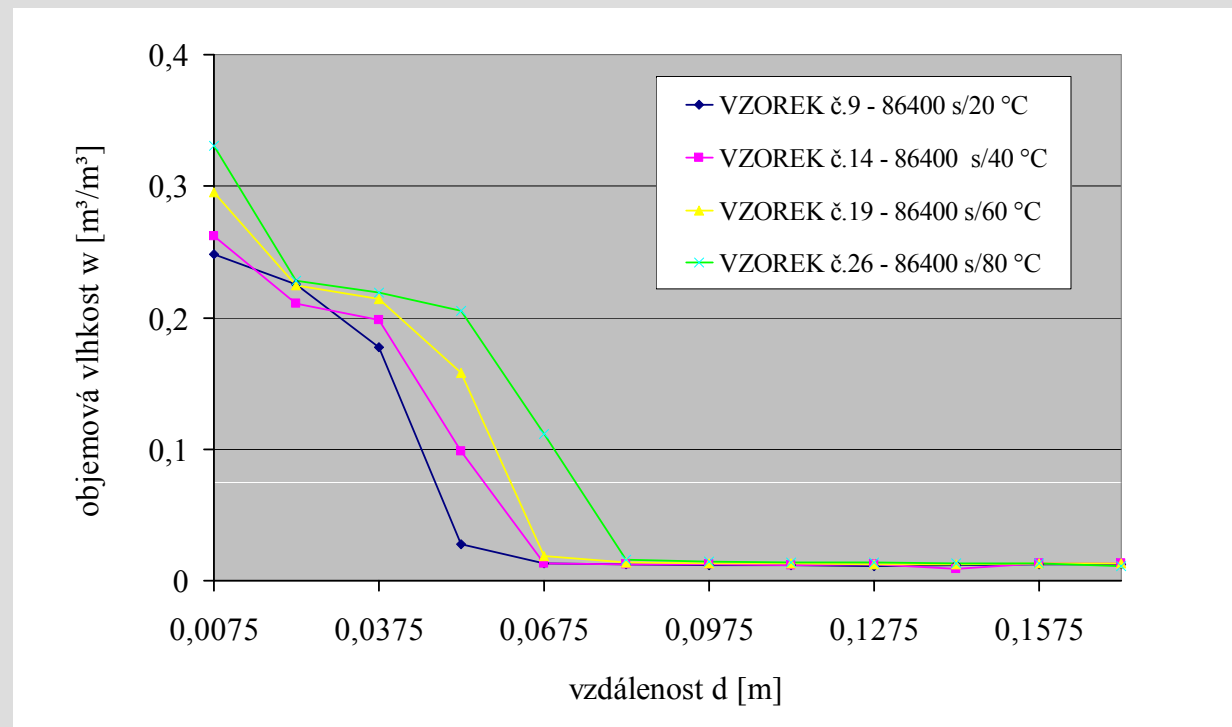
$$\frac{\delta u}{\delta t} = \operatorname{div}(\kappa \operatorname{grad} u) + \operatorname{div}(\kappa_T \operatorname{grad} u T) + \psi(u, T, \varphi)$$

$$\rho_s c \frac{\delta T}{\delta t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \rho_s r_{12} \psi \operatorname{grad}(u, T, \varphi)$$

←
měrné skupenské teplo výparné



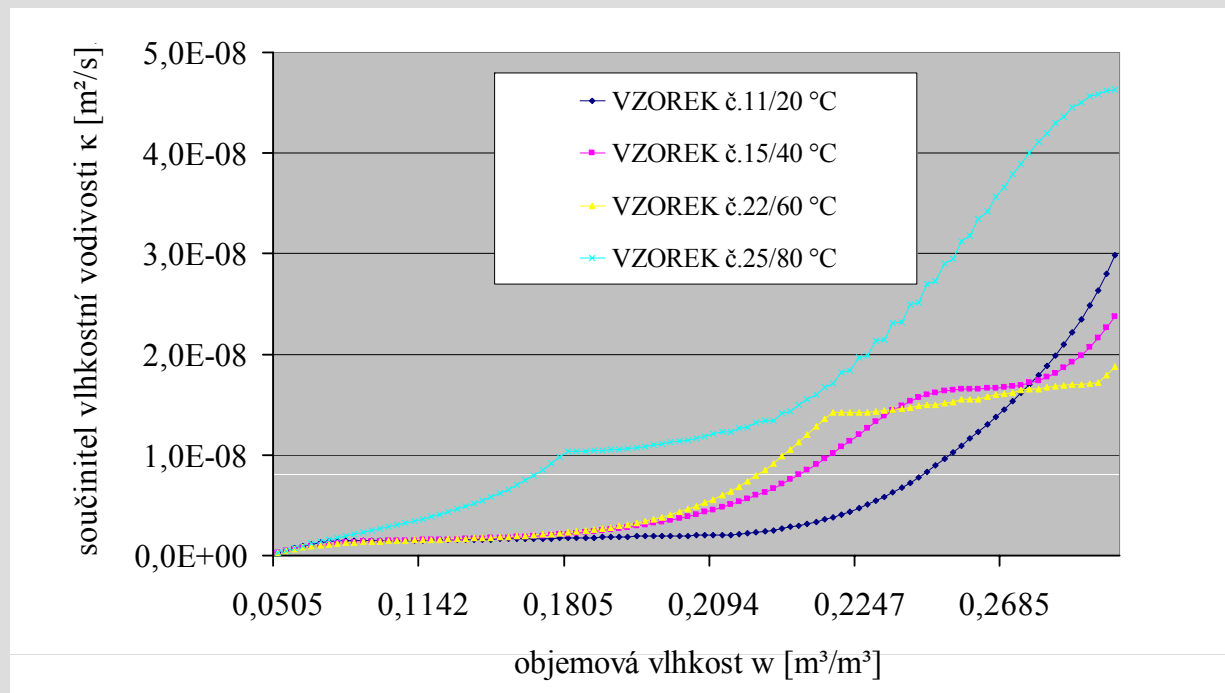
FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TRANSPORT VLHKOSTI IV



Měření vlhkostních profilů na vzorcích pórobetonu



FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TRANSPORT VLHKOSTI V



Součinitel vlhkostní vodivosti pórobetonu v závislosti na teplotě



FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TRANSPORT VLHKOSTI VI

- vliv gravitace na transport vlhkosti

- vliv gravitace lze vyjádřit z vlhkostního toku, který byl způsoben gravitační silou

- tento vlhkostní tok pak označujeme \vec{j}_g [kg/m² s]

$$\vec{j}_g = L \frac{1}{T_A} (-\vec{E}_1 + \vec{E}_2)$$

- T_A je absolutní teplota (K), L je fenomenologický koeficient, E_i je intenzita vnějších objemových sil, které působí na i -tou složku (m²/s), $i = 1$ – skelet, $i = 2$ – tekutina

- předpokládáme nehybný skelet a působení pouze gravitačního pole Země $\rightarrow \vec{E}_1 = 0$

$$\vec{E}_2 = g$$

$$\rightarrow \vec{j}_g = L \frac{1}{T_A} g$$



FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TRANSPORT VLHKOSTI VI

- vliv gravitace na transport vlhkosti II
- pro vyjádření vlivu gravitace na transport vlhkosti můžeme použít také gravitační koeficient vlhkostní vodivosti κ_g (m^2/s)

$$\vec{j}_g = -\kappa_g \text{grad} \rho_m$$

- $\text{grad} \rho_m$ je gradient parciální hustoty vody - $\rho_w = \frac{dm_w}{dV}$