

STAVEBNÍ OBZOR

ROČNÍK 21 ČÍSLO 07/2013

Navigace v dokumentu

- PAVLÍK, Z. – FOŘT, J. – ŽUMÁR, J. – PAVLÍKOVÁ, M. – MEDVEĎ, I. – ČERNÝ, R.
Sekundární vlivy na materiálové parametry charakterizující transport vodní páry stanovené miskovou metodou 178
- KOČÍ, J. – MADĚRA, J. – PAVLÍK, Z. – FOŘT, J. – ČERNÝ, R.
Určení součinitele vlhkostní vodivosti cementové malty pomocí genetického programování 183
- MATYŠČÁK, O. – OTTOSEN, Lisbeth M. – RÖRIG-DALGAARD, I.
Vysoušení cihel pomocí elektrického pole 187
- MAJSNIAR, M. – HINDRÁKOVÁ, K. – ŠŤASTNÍK, S. – ŠKRAMLÍK, J.
Druhy rostlin pro vegetační střechy 192

Sekundární vlivy na materiálové parametry charakterizující transport vodní páry stanovené miskovou metodou

doc. Ing. Zbyšek PAVLÍK, Ph.D.

Ing. Jan FOŘT

Ing. Jaromír ŽUMÁR

doc. Ing. Milena PAVLÍKOVÁ, Ph.D.

doc. RNDr. Igor MEDVEĎ, Ph.D.

prof. Ing. Robert ČERNÝ, DrSc.

ČVUT v Praze – Fakulta stavební

Článek se zabývá vlivem teploty a tloušťky použitého vzorku na materiálové parametry porézního média charakterizující transport vodní páry stanovené miskovou metodou.

Secondary effects on material properties characterising water vapour transport assessed by the cup method

The effect of temperature and sample thickness on the water vapour transport properties of porous media assessed by the cup method is researched in the paper.

Úvod

Transport a akumulace molekul vodní páry v porézních stavebních materiálech významně ovlivňuje technické parametry stejně jako trvanlivost a životnost stavebních konstrukcí a budov. Zkondenzovaná vodní pára představuje nebezpečí například pro tepelně izolované vícevrstvé obvodové konstrukce, střechy apod. Vnitřní prostředí budov s vysokou vlhkostí je spojováno také se zdravotními problémy uživatelů, především v důsledku výskytu plísní. Příliš suché prostředí budov však není pro uživatele také příjemné a vede k respiračním problémům. Z tohoto důvodu se materiáloví a stavební inženýři zabývají studiem transportu vodní páry porézní strukturou stavebních materiálů a stanovují materiálové parametry, které tento transport charakterizují.

Difúze molekul vodní páry ve vzduchu je jev dostatečně prozkoumaný a popsáný, v porézních stavebních materiálech však jde o komplexní problém. V porézním prostoru materiálů je vodní pára transportována ve vzduchu, resp. v porézním prostoru, její transport je však omezen průřezem pórů, adsorpčními jevy probíhajícími na stěnách pórů a v neposlední řadě zakřivením pórových cest [1],[2].

Při popisu transportu vodní páry stavebními materiály pomocí matematicko-fyzikálních modelů se vychází obvykle z teorie nevratné lineární termodynamiky a teorie směsí. Nejjednodušší model, aplikovaný v praxi, zjednodušuje n -složkový systém na systém tvořený pouze dvěma složkami, konkrétně vodní párou a porézním skeletem pevné fáze. Model uvažuje také jedinou celkovou termodynamickou veličinu, kterou je buď gradient parciálního tlaku vodní páry, nebo gradient koncentrace vodní páry v porézním prostoru materiálu [3]. Tok vodní páry j_v [kg/m²s] je tedy možné popsat rovnicemi

$$j_v = -D \cdot \text{grad} \rho_{v, \text{mat}}, \quad (1)$$

$$j_v = -\delta \cdot \text{grad} p_v, \quad (2)$$

kde ρ_v [kg/m³] je parciální hustota vodní páry, D [m²/s] difúzní koeficient vodní páry v porézním materiálu, p_v [Pa]

parciální tlak vodní páry, δ [s] permeabilita pro vodní páru [4]. Předpokládáme-li, že vodní pára má stejné vlastnosti jako ideální plyn, můžeme zapsat stavovou rovnici

$$p_v = \frac{\rho_v RT}{M}, \quad (3)$$

kde T [K] je teplota, R [8,314 J/kmol] univerzální plynová konstanta, M [18,020 g/mol] molární hmotnost vodní páry. Za izotermických podmínek získáme kombinací rovnic (1) až (3) vztah mezi součinitelem difúze pro vodní páru a permeabilitou

$$D = \delta \frac{RT}{Mn}. \quad (4)$$

Kromě D a δ je možné pro charakterizování transportu vodní páry ve zkoumaném materiálu použít další parametry, jejichž definice je pro stavební praxi srozumitelnější. Výrobcí stavebních materiálů velmi často popisují difúzní vlastnosti materiálů faktorem difúzního odporu μ [5]

$$\mu = \frac{D_a}{D}, \quad (5)$$

kde D_a [m²/s] je difúzní koeficient vodní páry ve vzduchu.

Ze změřené hodnoty permeability δ , kterou běžně měříme miskovou metodou [3], můžeme tedy za předpokladu izotermických podmínek dopočítat další parametry transportu vodní páry. Obvodové konstrukce budov jsou však velmi často vystaveny působení nepříznivých klimatických podmínek, které způsobují změny teploty aplikovaných materiálů v rozsahu +40 °C až -30 °C. V extrémních klimatických podmínkách mohou být změny teploty i vyšší. Teplota a její gradient jsou jedny z hlavních faktorů, které zásadně ovlivňují transport vlhkosti a její akumulaci jak u organických, tak u anorganických materiálů [6], [7]. Nárůst teploty způsobuje vyšší pohyblivost molekul vody ve všech jejích fázích a je obecně přijímána skutečnost, že rychlost a míra transportu vodní páry přes jakýkoli porézní materiál je funkcí

teploty [8], [9]. Za neizotermických podmínek, které převládají v reálných podmínkách budov, tedy dochází ve vazbě na teplotu materiálu k nárůstu či poklesu transportu vodní páry [10], [11]. Urychlení transportu vodní páry s růstem teploty popsali Philip a deVries [12], kteří tento jev zdůvodnili dvěma základními principy.

Difúzní transport vodní páry je za obvyklých podmínek brzděn přítomností kapalných „ostrůvků“ v ústí pórů a difúze je značně zpomalena při vysokém stupni nasycení materiálů. Dojde-li však ke vzniku teplotního gradientu, dojde zároveň ke generování gradientu tlaku vodní páry v plynné fázi a dochází k vypařování vody z jedné strany kapalného „ostrůvku“ a následně k její difúzi ve formě vodní páry do oblasti s nižší teplotou, kde kondenzuje. Zde se tvoří další kapalně „ostrůvku“, nebo zde již byly vytvořeny, a dochází pouze k nárůstu jejich velikosti, a tím k nárůstu vlhkosti materiálu. Procesy evaporace/kondenzace se opakují opět na dalších stranách kondenzačních zón či kapalných „ostrůvků“, čímž je způsoben celkový nárůst difúzního toku v porézním médiu. Toto urychlení transportu vodní páry je schematicky popsáno v práci [12].

Druhý mechanismus zvyšující difúzní tok popsany Philipem a deVriesem vychází ze zavedení průměrného teplotního gradientu ve Fickově zákoně. Součinitel tepelné vodivosti pevné fáze je vyšší než u fáze kapalně. Fáze plynná má tepelnou vodivost nižší než fáze kapalná. Z tohoto důvodu je teplotní gradient zprůměrovaný přes všechny tři fáze nižší než teplotní gradient v pórech vyplněných pouze vodní párou. Vodní pára se pohybuje primárně vzduchem porézního prostoru, kde vyšší lokální teplotní gradient představuje hnací sílu pro difúzi vodní páry.

Na základě teoretických vysvětlení je možné formulovat rovnici zohledňující vliv teploty a relativní vlhkosti na tok vodní páry j_v [kg/m²s] ve tvaru

$$j_v = \delta (RH, T) \frac{\delta p_v}{\delta x}, \quad (6)$$

kde p_v [Pa] je parciální tlak vodní páry, x [m] vzdálenost, $\delta (RH, T)$ je permeabilita materiálu pro vodní páru, definovaná jako funkce teploty a relativní vlhkosti v (3). Závislost permeability pro vodní páru na relativní vlhkosti se věnovala řada autorů; tento vztah je popsán například v pracích [13], [14], [15]. Pro nehygroskopické materiály vykazují hodnoty permeability velmi malé nebo žádné změny v závislosti na relativní vlhkosti. U hygroskopických materiálů však hodnoty permeability narůstají s relativní vlhkostí.

Závislost transportu vodní páry na teplotě je pro většinu materiálů neznámá, proto je nutné se touto problematikou v materiálovém výzkumu zabývat. V literatuře najdeme pokusy o vysvětlení závislosti permeability na teplotě pomocí aktivací energie vody, což je koncept vytvořený na základě kinetické teorie chemických reakcí [16]. Vztah mezi aktivací energií a permeabilitou pro vodní páru popisuje rovnice

$$\delta = \delta_0 e^{(-E/RT)}, \quad (7)$$

kde δ_0 je permeabilita pro teplotu $T = \infty$, E [J/mol] aktivací energie vody. Teoreticky je možné koncept aktivací energie [17] použít, a to především při modelování a počítačových simulacích transportu vodní páry a tepla. Je však nutné mít experimentální data, která slouží jako vstupní parametry matematicko-fyzikálních modelů.

Přestože byla misková metoda původně navržena k měření materiálových transportních parametrů pro vodní páru za izotermických podmínek, při vhodné úpravě experimentálního uspořádání ji můžeme použít také k měření transport-

ních difúzních parametrů v závislosti na teplotě. V práci [6] autoři informovali o využití modifikované miskové metody k měření tepelně závislých transportních parametrů pro vodní páru požárně odolných sádrových desek. Pro tyto materiály má termodifúze zásadní vliv na jejich životnost a použitelnost při ochraně proti působení požáru. Výsledky měření závislosti difúzních parametrů ve zkoumaném teplotním intervalu 7-43 °C prokázaly exponenciální nárůst transportu vodní páry studovaných sádrových desek s teplotou. Jelikož byla zároveň prokázána použitelnost modifikované miskové metody pro takovéto typy měření, vycházeli jsme při experimentech prezentovaných v tomto článku z obdobného experimentálního uspořádání.

Experiment

Měření byla provedena na vzorcích pórobetonu firmy H+H Česká republika. Oficiální název testované tvárnice je P2-350.

Základní fyzikální vlastnosti

Pro základní charakterizování materiálu byla měřena objemová hmotnost ρ_b [kg/m³], hustota matrice ρ_{mat} [kg/m³] a celková otevřená pórovitost ψ [-]. Experimenty byly provedeny na deseti vzorcích tvaru krychle o straně 50 mm. Výsledné hodnoty byly po vyloučení výsledků vykazujících hrubé chyby zprůměrovány. Vzorky byly vysušeny, následně změřeny jejich rozměry a zváženy. Tímto gravimetrickým způsobem byla stanovena hodnota ρ_b . Hustota matrice byla změřena héliovým pyknometrem Pycnomatic ATC [18]. Na základě znalosti objemové hmotnosti a hustoty matrice pak byla vypočtena celková otevřená pórovitost studovaného materiálu [19], [20], [21].

Měření sorpčních a desorpčních izoterm

K měření sorpčních izoterm jsme použili dynamické sorpční zařízení DVS-Advantage (Surface Measurement Systems Ltd.) umožňující kontinuálně sledovat nárůst či pokles hmotnosti vzorku v důsledku změn relativní vlhkosti, které odpovídají jednotlivým bodům sorpční či desorpční izoterm. Vzorek je během experimentu zavěšen na vysoce přesnou analytickou váhu s rozlišením 0,1 µg. Požadovaného tlaku vodní páry je dosaženo smícháním specifického množství suchého a plně nasyceného vzduchu, přičemž tok z jednotlivých vzduchových komor řídí elektronické snímače [22].

Před měřením byly vzorky vysušeny za teploty 60 °C a během chladičí fáze uloženy v exsikátorech se silikagelem. Poté byly postupně uloženy do klimatické komory zařízení DVS a zavěšeny ve speciální ocelové misce na automatické váhy. Experimenty byly realizovány za teploty 25 °C, zařízení DVS pracovalo v modu dm/dt (rozdíl hmotnosti za čas), přičemž byla nastavena fixní hodnota $dm/dt = 0,00004$ %/min. Po ustálení hmotnosti na požadovanou hodnotu byl generován další krok relativní vlhkosti. Měřený profil relativní vlhkosti by následující: 0; 10; 20; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 98 % [23].

Misková metoda

K měření transportních difúzních parametrů byly použity vzorky o průřezové ploše 100/100 mm, jejichž tloušťka byla 20 mm, 30 mm a 50 mm. Jednotlivá měření byla realizována za izotermických podmínek při teplotách 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C a 50 °C. Stejně jako u standardní miskové metody byl i tento experiment založen na jednorozměrném difúzním transportu vodní páry a měření difúzního toku vzorkem.

Zároveň byly kontinuálně monitorovány hodnoty parciálního tlaku nad povrchem měřeného vzorku a pod ním.

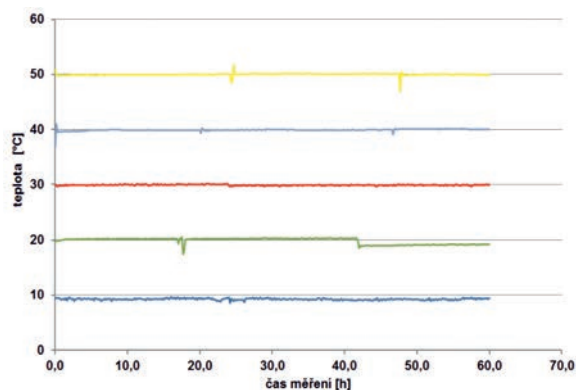
Při měření byly vzorky umístěny do vnitřní zárubně nerezových misek, kde byly parotěsně zaizolovány technickou plastelinou. Miska obsahovala materiál pro sorbování plyné vlhkosti prodifundované měřeným vzorkem z místa vyššího parciálního tlaku vodní páry. V tomto případě jsme použili silikagel. Izolované misky byly poté umístěny do klimatické komory a periodicky váženy. Po ustálení vlhkosního toku vodní páry byly stanoveny hledané difúzní materiálové parametry. Po skončení měření pro jednu zvolenou teplotu byly vzorky vyjmuty z misek, vysušeny a celý měřicí proces byl opakován při jiné teplotě.

Pro kontinuální sledování teploty a parciálních tlaků vodní páry ve vzduchové vrstvě nad silikagelem a v prostředí klimatické komory v kontaktu s vrchním povrchem vzorku byly použity kombinované minisenzory relativní vlhkosti a teploty. Měření relativní vlhkosti bylo založeno na kapacitním principu, teplota byla měřena termistory NTC. V klimatické komoře byla udržována konstantní relativní vlhkost 50 % (konstantní parciální tlak vodní páry). Uspořádání experimentu je patrné z obr. 1.



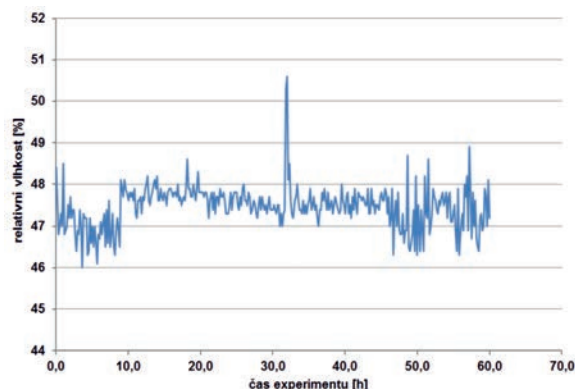
Obr. 1. Měření parametrů transportu vodní páry v závislosti na teplotě

Teploty naměřené během jednotlivých experimentů a jejich odchylky od požadovaných hodnot jsou patrné z obr. 2. Vidíme, že rozdíly mezi nastavenými a změřenými hodnotami jsou téměř zanedbatelné, uvážíme-li přesnost použitých senzorů, která je v teplotním intervalu 0-70 °C s reprodukovatelností měření 0,1 °C. Pro vyšší teploty se přesnost senzorů snižuje.



Obr. 2. Teplota během jednotlivých experimentů

Také průběh relativní vlhkosti vykazoval stacionární stav experimentu. Nejvyšší odchylky od naměřených hodnot byly sledovány při 10 °C. Toto zjištění souvisí s výkonností klimatické komory, která při nižších teplotách udržuje relativní vlhkost problematicky. Nicméně tyto odchylky byly při výpočtech transportních difúzních parametrů zohledněny.



Obr. 3. Relativní vlhkost v klimatické komoře při 10 °C

Vyhodnocení experimentů

Permeabilita materiálu pro vodní páru byla vypočtena na základě dat stanovených miskovou metodou pro různou teplotu a tloušťku studovaných vzorků dle rovnice

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_p}, \quad (8)$$

kde Δm [kg] je změna hmotnosti misky se vzorkem, d [m] tloušťka vzorku, S [m²] plocha vzorku vystavená diferencii parciálních tlaků vodní páry, τ [s] čas odpovídající prodifundovanému množství vodní páry Δm , Δp_p [Pa] rozdíl parciálních tlaků vodní páry v klimatické komoře a v misce pod vzorkem.

Difúzní koeficient vodní páry D a faktor difúzního odporu μ byly pro specifické teploty experimentů a tloušťky vzorků spočteny dle vztahů (4) a (5). V těchto výpočtech jsme zohlednili teplotní závislost difúzního koeficientu vodní páry ve vzduchu D_a , který byl uvažován dle vztahu formulovaného Schirmerem [24]

$$D_a = 2,306 \cdot 10^{-5} \frac{p_0}{p} \cdot \left(\frac{T}{273,15} \right), \quad (9)$$

kde p_0 [Pa] je standardní atmosférický tlak (101 325 Pa = = 760 mm Hg), p [Pa] měřený tlak v okolí vzorku v klimatické komoře, T [K] teplota. Tlak v klimatické komoře byl během experimentů kontinuálně monitorován vysoce přesnými kombinovanými senzory pro měření relativní vlhkosti, teploty a atmosférického tlaku. Přesnost měření atmosférického tlaku v rozsahu 700-1100 hPa byla $\pm 2,5$ hPa.

Ze zjištěné teplotní závislosti součinitele difúze jsme také stanovili aktivační energii pro difúzi vodní páry. Pro tyto výpočty jsme použili Arrheniovu rovnici ve tvaru

$$D = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (10)$$

kde T [K] je teplota, při které je znám difúzní koeficient D , D_0 [m²/s] je předexponenciální faktor získaný fitováním nejlepší shody rovnice (9) a výsledků teplotní závislosti $D(T)$, E_a [kJ/mol] aktivační energie pro difúzi vodní páry, R [J/Kmol] univerzální plynová konstanta.

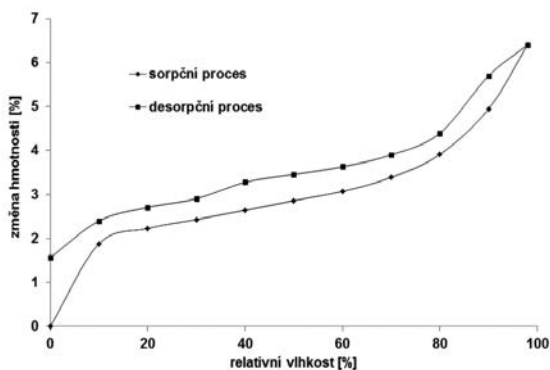
Výsledky a diskuze

Základní fyzikální vlastnosti studovaného materiálu jsou uvedeny v tab. 1. Můžeme vidět, že stanovená hodnota objemové hmotnosti odpovídá označení třídy pórobetonu výrobcem. Materiál vykazuje velkou celkovou otevřenou pórovitost, což je dobrým předpokladem pro jeho tepelně izolační vlastnosti. Také hustota matrice je vysoká.

Tab. 1. Základní vlastnosti materiálu

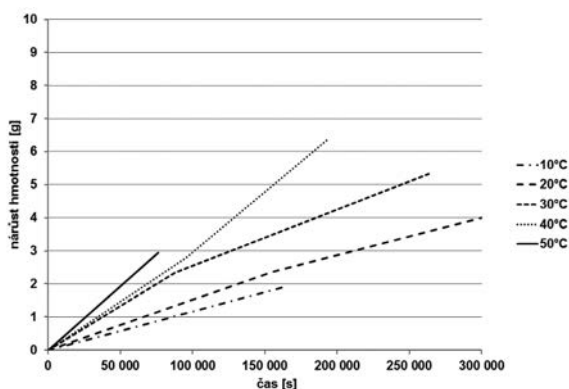
Objemová hmotnost [kg/m ³]	Hustota matrice [kg/m ³]	Otevřená pórovitost [%]
348	2 400	85

Sorpční a desorpční izotermie stanovené dynamickým sorpčním zařízením DVS znázorňuje obr. 4. Získané výsledky ukazují velkou sorpční kapacitu pórobetonu. Vysoká je také hystereze mezi sorpčním a desorpčním cyklem. Z praktického hlediska je nutné si uvědomit, že studovaný pórobeton, vystavený reálným klimatickým podmínkám, bude obsahovat vždy relativně vysoké množství akumulované plynné vlhkosti. To může následně způsobovat problémy při smrštění materiálu v důsledku ohřevu, např. slunečním zářením.



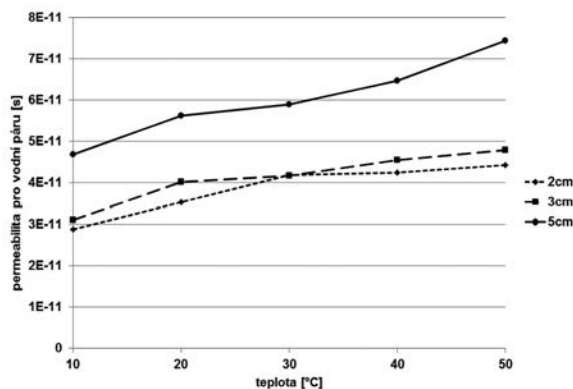
Obr. 4. Sorpční a desorpční izotermie pórobetonu

Typický nárůst hmotnosti vzorků (miska + vzorek) pro jednotlivé studované teploty je prezentován na obr. 5. Z výsledků je patrný vliv teploty na difúzi vodní páry, která s nárůstem teploty výrazně stoupá.



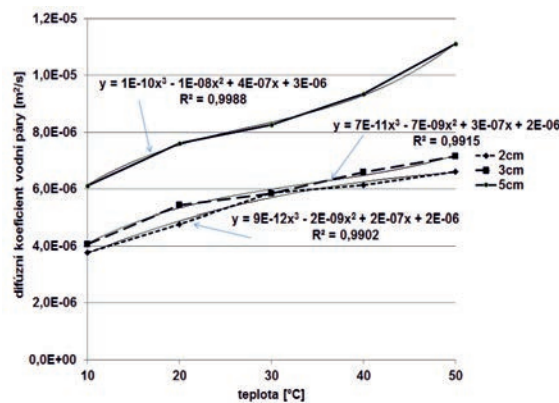
Obr. 5. Nárůst hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě

Permeabilita pro vodní páru, stanovená pro různou tloušťku vzorků, je jako funkce teploty vynesena na obr. 6. Tyto výsledky představují vždy aritmetický průměr z pěti měřených vzorků. Je možné pozorovat výraznou závislost permeability na teplotě, která v teplotním intervalu 10-50 °C narůstá někdy o více než 50 %. Výrazný je také vliv tloušťky vzorku na naměřené hodnoty. Dochází k nárůstu permeability se zvětšující se tloušťkou vzorku.



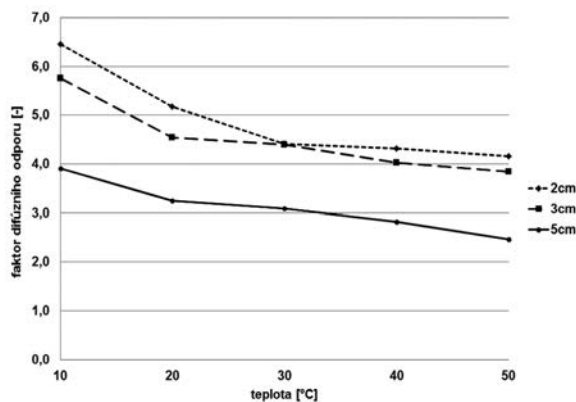
Obr. 6. Permeabilita pro vodní páru v závislosti na teplotě a tloušťce vzorku

Výsledky difúzního koeficientu jsou uvedeny na obr. 7. Tato data vykazují stejný trend jako hodnoty permeability na obr. 6. V tomto případě jsme také proložili experimentální data ideálními polynomickými křivkami třetího řádu, jejichž rovnice a přesnost aproximace jsou také prezentovány.



Obr. 7. Difúzní koeficient v závislosti na teplotě a tloušťce vzorku

Faktor difúzního odporu, stanovený dle rovnice (5) se zohledněním Schirmerova vztahu pro teplotní a tlakovou závislost difúzního koeficientu vodní páry ve vzduchu D_a , je jako funkce teploty uveden na obr. 8. V tomto případě byly nejvyšší hodnoty pozorovány pro nižší teploty, což je v souladu s výše prezentovanými daty.



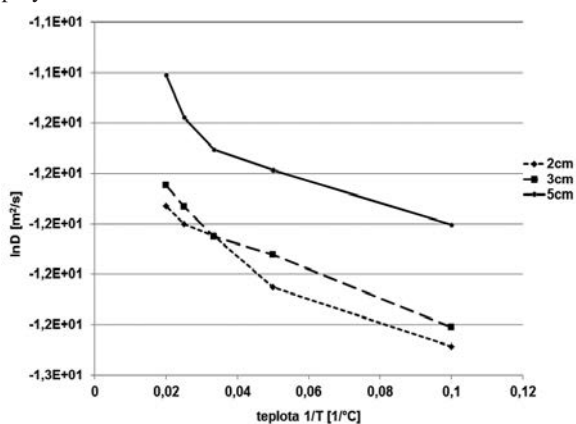
Obr. 8. Faktor difúzního odporu v závislosti na teplotě a tloušťce vzorku

Aktivační energie pro difúzi vodní páry, stanovená pomocí Arrheniovy rovnice, je uvedena v tab. 2. Uvádíme zde také předexponenciální faktor D_0 získaný fitováním nejlepší

Tab. 2. Aktivační energie difúze vodní páry

Parametr	2 cm	3 cm	5 cm
D_0 [10^{-14} m ² /s]	2,5	2,51	5,91
E_a [kJ/mol]	9,67 ± 1,67	9,51 ± 1,30	10,7 ± 0,9
R^2	0,9974	0,9984	0,9993

shody rovnice (9) a výsledků teplotní závislosti $D(T)$ včetně přesnosti aproximace. Arheniovo vykreslení závislosti difúzního koeficientu na teplotě popisuje obr. 9. Získané hodnoty aktivační energie jsou pro všechny tloušťky vzorků velmi podobné, zejména s ohledem na chybu určení tohoto parametru. Na základě stanovených hodnot aktivační energie není tedy možné jednoznačně stanovit, která tloušťka materiálu urychluje či zpomaluje transport molekul vodní páry. Výsledky stanovení difúzních transportních parametrů však jednoznačně vypovídají o urychlení transportu vodní páry u tlustších vzorků.



Obr. 9. Arheniova závislost difúzního koeficientu na teplotě

Závěr

V článku byl prezentován způsob stanovení materiálových parametrů charakterizujících transport vodní páry v pórobetonu v závislosti na teplotě. Představený postup měření, vycházející z modifikace standardní miskové metody, prokázal použitelnost pro takovéto analýzy difúzních vlastností porézních stavebních materiálů. Získaná data potvrdila teoreticky předpokládanou výraznou závislost transportu vodní páry na teplotě, přičemž je zřejmé, že obdobné chování budou vykazovat všechny typické porézní stavební materiály. S růstem teploty došlo k nárůstu permeability a součinitele pro vodní páru. Tento nárůst je v řešeném teplotním intervalu někdy o více než 50 %. V souladu s definicí faktoru difúzního odporu vykazuje tento parametr s nárůstem teploty výrazný pokles.

Výsledné materiálové parametry stejně jako další prezentovaná experimentální data představují cenné informace pro aplikaci studovaného pórobetonu v reálných klimatických podmínkách, kde dochází k výrazným změnám teploty a parciálních tlaků vodní páry, a to jak během ročních období, tak při střídání denních cyklů. Prezentované výsledky také poukázaly na podstatný vliv tloušťky vzorku na vypočtené transportní parametry pro vodní páru. Tato skutečnost by měla být uvažována při všech experimentech prováděných miskovou metodou, při evaluaci výsledků a aplikaci materiálů či jejich návrhu by tento jev měl být vždy zohledněn.

Článek vznikl v rámci řešení projektu GAP105/12/G059 GA ČR.

Literatura

- [1] Krus, M.: Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials. Theoretical principles and new test methods. Fraunhofer IRB Verlag 1996.
- [2] Pavlík, Z. – Medved, I. – Žumár, J. – Pavlíková, M. – Černý, R.: Analýza adsorpce plynné vlhkosti v porézních stavebních materiálech. Stavební obzor, **22**, 2013, č. 1, s. 1-5. ISSN 1805-2576 (Online)
- [3] Černý, R. (ed.): Complex system of methods for directed design and assessment of functional properties of building materials: Assessment and synthesis of analytical data and construction of the system. CTU in Prague, 2010.
- [4] Pavlík, Z. – Žumár, J. – Pavlíková, M. – Černý, R.: Využití Boltzmannovy transformace pro stanovení parametrů transportu vodní páry ve stavebních materiálech. Stavební obzor, **21**, 2012, č. 6, s. 173-176. ISSN 1805-2576 (Online)
- [5] Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin, Springer Verlag 1963.
- [6] Mukhopadhyaya, P. – Kumaran, M. K. – Lackey, J.: Use of the modified cup method to determine temperature dependency of water vapor transmission properties of building materials. Journal of Testing and Evaluation, **33**, 2005, pp. 316-322.
- [7] Tveit, A.: Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Norwegian Building Research Institute, Report 45, Oslo, 1966.
- [8] Pierviovanni, L. – Fava, P. – Siciliano, A.: A mathematical model for the prediction of water vapour transmission rate at different temperature and relative humidity combinations. Packaging Technology and Science, **8**, 1995, pp. 73-83.
- [9] Gibson, P. W.: Effect of temperature on water vapor transport through polymer membrane laminates. Polymer Testing, **19**, 2000, pp. 673-691.
- [10] Oscezevski, R. J.: Water vapor transfer through a hydrophilic film at subzero temperatures. Textile Research Journal, 1996, **66**, 1996, pp. 24-29.
- [11] Wildenschild, D. – Roberts, J. J.: Experimental tests of enhancement of vapor diffusion in topogah spring tuff. Journal of Porous Media, 2001, **4**, pp. 1-13.
- [12] Philip, J. R. – de Vries, D. A.: Moisture movement in porous materials under temperature gradients". Transactions – American Geophysical Union, **38**, 1957, pp. 222-232, 1957.
- [13] Tveit, A.: Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Norwegian Building Research Institute, Report 45, Oslo, 1966, p. 39.
- [14] Chang, S. C. – Hutcheon, N. B.: Dependence of water vapour permeability on temperature and humidity. Transactions American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), **62**, 1956, pp. 437-449.
- [15] Burch, D. M. – Thomas, W. C. – Fanney, A. H.: Water vapour permeability measurements of common building materials. ASHRAE Transactions: Symposia, 1992, pp. 486-494.
- [16] Barrer, R. M.: Diffusion in and through solids, Cambridge: London, The University Press 1951.
- [17] Seo, J. – Jeon, J. – Shul, Y. G. – Han, H.: Water sorption and activation energy in polyimide thin films. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, **38**, 2000, pp. 2714-2720.
- [18] Pavlíková, M. – Pavlík, Z. – Keppert, M. – Černý, R.: Salt transport and storage parameters of renovation plasters and their possible effects on restored buildings' walls. Construction and Building Materials, **25**, 2011, pp. 1205-1212.
- [19] Jiříčková, M.: Application of TDR microprobes, mini-tensiometry, and minihygrotermometry to the determination of moisture transport and moisture storage parameters of building materials. Prague, CTU Press 2004.
- [20] Pavlíková, M. – Keppert, M. – Fořt, J. – Žumár, J. – Pavlík, Z.: Využití podrošového popílku ze spalování komunálního odpadu jako alternativního kameniva pro cementovou maltu. Stavební obzor, **21**, 2012, č. 3, s. 85-90. ISSN 1805-2576 (Online)
- [21] Pavlík, Z. – Pavlíková, M. – Fiala, L. – Černý, R.: Parametry transportu kapalně vlhkosti a sírání mšenského pískovce. Stavební obzor, **17**, 2008, č. 4, s. 110-113. ISSN 1210-4027 (Print)
- [22] Burnett, D. – Garcia, A. R. – Naderi, M. – Acharya, M.: Vapour sorption properties of building materials using gravimetric sorption instrumentation – an overview. Application Note 104. Surface Measurement Systems, 2009.
- [23] Pavlík, Z. – Žumár, J. – Medved, I. – Černý, R.: Water vapor adsorption in porous building materials: experimental measurement and theoretical analysis. Transport in Porous Media, 2012, **91**, pp. 939-954.
- [24] Schirmer, R.: Die Diffusionszahl von wasserdampf-luft-gemischen und die verdampfungsgeschwindigkeit. Beiheft VDI Zeitschrift, Verfahrenstechnik, **6**, 1938, pp. 170-177.

Určení součinitele vlhkostní vodivosti cementové malty pomocí genetického programování

Ing. Jan KOČÍ
 Ing. Jiří MADĚRA, Ph.D.
 doc. Ing. Zbyšek PAVLÍK, Ph.D.
 Ing. Jan FOŘT
 prof. Ing. Robert ČERNÝ, DrSc.
 ČVUT v Praze – Fakulta stavební

V článku je představena nová metoda stanovení součinitele vlhkostní vodivosti stavebních materiálů, která využívá genetického programování v rámci inverzní analýzy přenosu vlhkosti.

Determination of Moisture Diffusivity of Cement Mortar Using Genetic Programming

A new method for the determination of moisture diffusivity of building materials is presented. This method is based on using genetic programming within the inverse analysis of moisture transport.

Úvod

Inverzní analýza patří mezi matematické metody, které se využívají při zpracování laboratorně naměřených dat. Principem je nalezení neznámých vstupních hodnot na základě známých výstupů. V inženýrské aplikaci jde nejčastěji o nalezení vstupních parametrů numerického modelu [1]. V případě stavebních materiálů je inverzní analýza využíváno k nalezení materiálových parametrů na základě experimentálních výsledků. V rámci inverzní analýzy existuje se používá celá škála metod, ať už jde o tradiční přístupy [2]-[6], či složité optimalizační techniky, jako např. genetické algoritmy (dále GA) či genetické programování (dále GP) [7]-[10]. Jedna z prvních úspěšných aplikací GA v oblasti materiálového inženýrství byla popsána v článcích [11], [12], kombinace GA se symbolickou regresí pomocí GP v [13]. Aplikace genetického programování jako samostatného nástroje inverzní analýzy v rámci stavebních materiálů nebyla dosud zaznamenána.

Genetické programování patří do skupiny evolučních výpočetních technik (dále EVT). Jejich počátky sahají až do padesátých let 20. století [14], [15], [16], nicméně největší rozvoj zaznamenaly o několik desetiletí později. Důvodem byly určité nedostatky původních teorií, které musely být odstraněny novými teoretickými pracemi, např. [17]. Hlavním hybatelem rozvoje genetického programování byl nástup a rozvoj výpočetní techniky přibližně na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let minulého století. Jde o zvláštní druh genetického algoritmu, který byl vyvinut s velmi ambiciózním cílem, a sice využít počítače k vytvoření artefaktu (běžně jde o počítačový program vytvořený v daném programovacím jazyce), který by splnil úkol definovaný pouze tím, čeho má být dosaženo. Cílem bylo nahradit lidského programátora, který specifikuje krok za krokem, co má program udělat, aby dosáhl daného cíle. Ačkoli se první pokusy, které by mohly GP připomínat, objevily přibližně před třiceti lety [18], tak jak ho známe dnes, vzniklo s prací Cramera [19]. Nicméně až práce Kozy [20] definovala a zpopularizovala metodu, která byla následně pojmenována "standardní GP".

Kandidátní řešení této podmnožiny evolučních algoritmů se označují jako „programy“, tj. víceúrovňové struktury schopné

reprezentovat širokou škálu počítačových artefaktů. „Programem“ se rozumí např. standardní počítačový program, numerická funkce nebo klasifikátor v symbolické formě.

V prezentovaném článku je GP využito k optimalizaci vstupního parametru numerického modelu. Cílem je nalezení součinitele vlhkostní vodivosti směsné cementové malty, která obsahuje pojivo na bázi portlandského cementu a křemelinu.

Během výrobního procesu portlandského cementu se uvolňuje do atmosféry množství oxidu uhličitého. Jelikož při výrobě 1 t portlandského cementu je emitována přibližně 1 t CO₂ do ovzduší, přispívají cementárny po celém světě roční produkcí přibližně 1,4 mld t CO₂, vypuštěným do atmosféry [21]. Výrobci se proto snaží nalézt takové alternativní materiály, které by dokázaly nahradit část portlandského cementu v betonu, a tak ušetřit životní prostředí. Jedním z možných řešení může být použití křemelinu [22].

Materiály a experiment

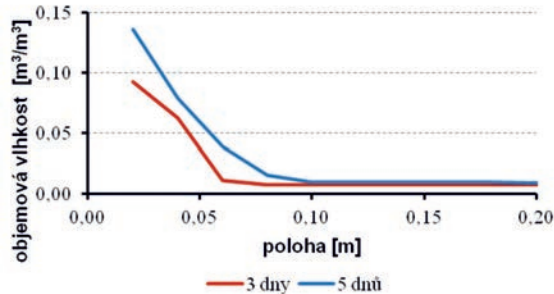
Vzorky byly vyrobeny z portlandského cementu (CEM I 42,5 R) přičemž 10 % cementu bylo nahrazeno křemelinou (tab. 1) a [22].

Tab. 1. Složení cementové malty

Složka	Množství
CEM I 42.5 R [kg]	4,05
křemelina [kg]	0,45
křemičitý písek, frakce 0/4 mm [kg]	13,5
voda [kg]	2,33
Dynamon SX [ml]	45,00

Ke stanovení součinitele vlhkostní vodivosti v závislosti na vlhkosti materiálu bylo potřeba změřit vlhkostní profily, tj. rozložení vlhkosti napříč vzorkem v různých časových krocích. Experimentální uspořádání je obvyklé jako u klasického sorpčního experimentu, tj. orientace ve svislé poloze [23]. K měření byly použity vzorky o rozměrech 20x40x300 mm, po stranách izolované epoxidovou pryskyřicí. Tím se zabránilo odpařování vody z bočních stěn a byl zajištěn jednoroz-

měrný transport vlhkosti. Vzorky byly dány do kontaktu s vodou, která sloužila jako zdroj vlhkosti. Na počátku experimentu byly vzorky plně vysušeny. Ve stanovených intervalech byly následně rozřezány a obsah vlhkosti určen standardní gravimetrickou metodou. Vlhkostní profily byly změřeny 3. a 5. den nasákání (obr. 1).



Obr. 1. Naměřené vlhkostní profily

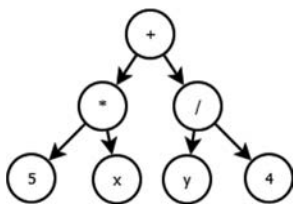
Inverzní analýza a genetické programování

Ke stanovení součinitele vlhkostní vodivosti byla použita inverzní analýza laboratorně získaných dat. V tomto experimentu byl uvažován přenos pouze kapalné vlhkosti na základě nelineární difúzní rovnice, která byla zjednodušena a upravena pro jednorozměrný transport,

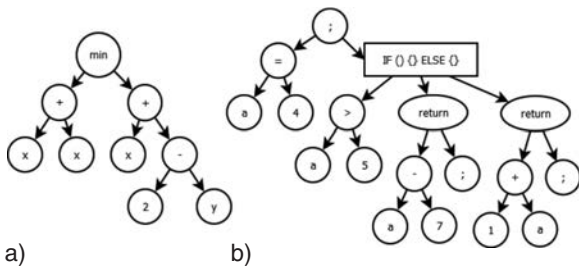
$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (1)$$

kde w [m^3/m^3] je obsah vlhkosti, x [m] vzdálenost od zdroje navlhání, κ [m^2/s] součinitel vlhkostní vodivosti, t [s] čas od počátku experimentu.

Pro optimalizaci součinitele vlhkostní vodivosti v rámci inverzní analýzy bylo využito stromově orientované GP. V tomto případě jsou kandidátní řešení, tj. jednotlivci v populaci, reprezentováni stromovými strukturami [19], [20]. Každý program nebo matematickou funkci lze zapsat pomocí stromového řešení: příklad funkce $f(x, y) = 5x + y/4$ je na obr. 2, příklad matematického výrazu počítačového programu na obr. 3. Populace kandidátních řešení se vyvíjí postupně v generacích podobně, jako je tomu u genetických algoritmů. V případě GP tedy můžeme říct, že se vyvíjejí programy (obr. 4).

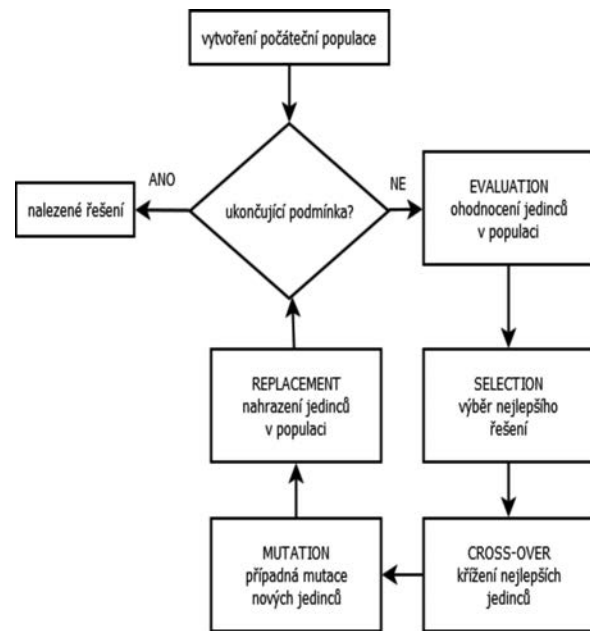


Obr. 2. Příklad matematické funkce $f(x, y) = 5x + y/4$



Obr. 3. Příklad

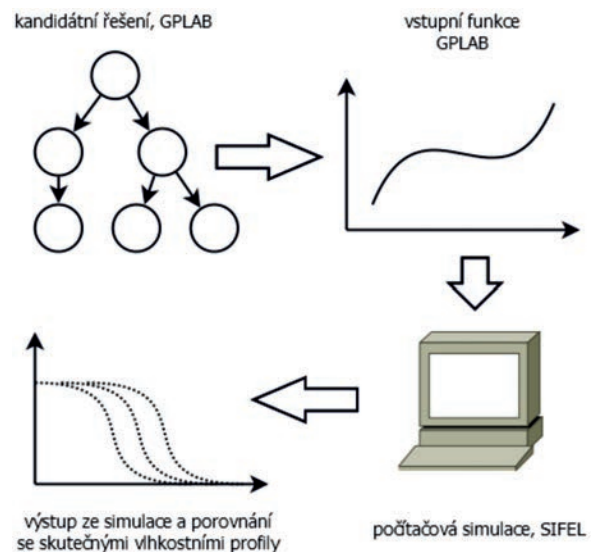
a – matematického výrazu $\min(x + x, x + 2 - y)$,
b – počítačového programu



Obr. 4. Schéma algoritmu genetického programování

Na rozdíl od inverzní analýzy pomocí GA, kde byly hledané křivky definovány pomocí n datových dvojic s předdefinovanou souřadnicí X (obvykle 9 až 10 dvojic) [11], [13], je genetické programování schopné produkovat nepoměrně hladší křivky v celém zkoumaném definičním oboru. Požadavky totiž rapidně narůstají s počtem proměnných v cílové funkci, což se negativně projevilo ve výše zmíněných aplikacích. Při využití v běžných úlohách materiálového inženýrství je tak reálně možné optimalizovat křivky proložené maximálně 10 body. Genetické programování však pracuje po celou dobu optimalizace s jedním stromem konkrétního řešení, které je následně převedeno na hledanou křivku proložením libovolného počtu bodů, aniž by toto mělo jakýkoli vliv na výkon algoritmu. Uživatel si sám definuje, zda požaduje výstup křivky např. v 10, nebo ve 100 bodech.

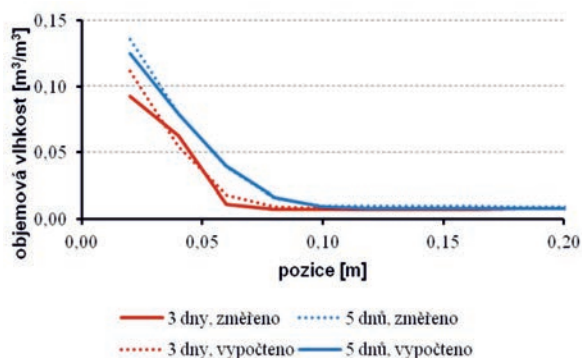
V této studii byl využit program GPLAB [24], což je volně dostupný toolbox využívající techniky GP. Byl modifikován tak, aby dokázal spolupracovat s programem SIFEL [25]. Schéma optimalizace při použití GPLABu a SIFELu je na obr. 5.



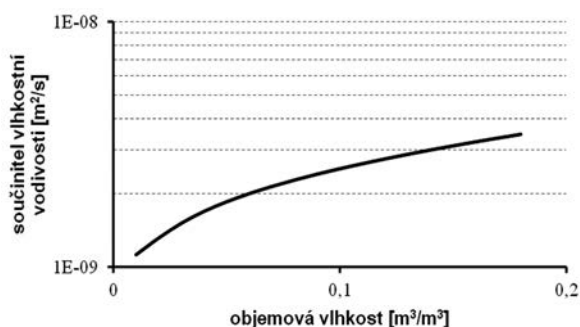
Obr. 5. Schéma optimalizace pomocí programů GPLAB a SIFEL

Výsledky a diskuze

Vstupním parametrem optimalizace bylo rozložení vlhkosti napříč vzorkem. Vlhkostní profily byly stanoveny v čase 3 a 5 dnů a tyto profily byly fitovány optimalizační součinitele vlhkostní vodivosti, který byl definován v závislosti na objemové vlhkosti materiálu. Celý optimalizační proces byl plně automatický. Nebylo tedy potřeba, aby na optimalizaci dohlížel člověk, případně ji jakkoli řídil. Z porovnání výsledků v podobě naměřených a simulovaných vlhkostních profilů na obr. 6 vyplývá shoda experimentálních a simulovaných dat. Ačkoli byly naměřené vlhkostní profily dodány s jistotou chybou (zejména vlhkostní profil ve 3. dnu), dokázalo si GP s touto chybou poradit. To je ostatně jeho velkou devizou, proto si získalo v posledních desetiletích tak velkou oblibu. Nalezený součinitel vlhkostní vodivosti je znázorněn na obr. 7. Stromové řešení této křivky obsahovalo 37 uzlů.



Obr. 6. Porovnání naměřených a vypočtených vlhkostních profilů



Obr. 7. Nalezený součinitel vlhkostní vodivosti

Během optimalizace pracovalo GP se základními aritmetickými operátory (+, -, *, /) a dále s goniometrickými, exponenciálními a logaritmickými funkcemi. Počáteční populace se skládala z 800 jedinců, kteří se postupně vyvíjeli ve 40 generacích. Každý jedinec představoval jedno konkrétní řešení hledané křivky v podobě stromu. Počáteční populace byla generována náhodně s omezením stromu na maximálně 8 uzlů. Postupně, jak se jedinci vyvíjeli, se stromové struktury rozrůstaly. Aby však nedocházelo ke generování zbytečně složitých a prakticky nesmyslných řešení (tzv. bloat), byla maximální velikost stromu omezena 50 uzly.

Výpočet jednoho konkrétního řešení trval přibližně 3 s, celá optimalizace v případě simulace všech generovaných jedinců by trvala přibližně 26 h. Proto bylo nezbytné prozkoumat každého kandidáta ještě před tím, než byl odeslán do počítačové simulace, a předem tak vyřadit taková řešení, která neměla šanci na úspěch. Z tohoto důvodu bylo nutné disponovat alespoň esenciálními znalostmi o tvaru a chování součinitele vlhkostní vodivosti stavebních materiálů. Obecně platí, že při jakékoli aplikaci GP je třeba mít alespoň základní znalosti o řešeném problému, aby mohla být

optimalizace správně nasměrována. Zásah člověka by však měl být minimální, jinak by se mohlo stát, že přílišná snaha o usměrnění GP bude působit kontraproduktivně.

Součinitel vlhkostní vodivosti cementových materiálů se obvykle pohybuje od 10^{-10} do 10^{-7} m²/s [22], [26]-[28], zároveň jde o funkce rostoucí (resp. neklesající). V tomto případě byly hledané křivky před samotnou simulací vyšetřovány, zda leží v požadovaném rozsahu a zda jde o křivky monotónní v celém definičním oboru. Pokud se objevil jedinec, který zmíněné podmínky nesplňoval, byla mu přiřazena vysoká hodnota fitness funkce a jedinec nebyl exekvován, tj. odeslán do programu SIFEL. Tímto způsobem se podařilo redukovat čas optimalizace přibližně o 50 %.

Z uvedených výsledků je patrné, že GP produkuje poměrně složité stromové struktury v případě aplikací v rámci materiálového inženýrství stavebních materiálů. Původním předpokladem byla skutečnost, že zkoumáním více materiálů se podaří nalézt obecný parametrický předpis pro skupinu materiálů podobných vlastností, který bude možné modifikovat změnou parametrů, a získávat tak škálu křivek vlhkostní vodivosti. Bohužel, tato skutečnost se nepotvrdila z důvodu složitých tvarů hledaných křivek.

Závěr

Výsledky prezentované v tomto článku ukázaly možnosti využití genetického programování v rámci inverzní analýzy transportu vlhkosti. Bylo použito ke stanovení součinitele vlhkostní vodivosti v závislosti na objemové vlhkosti materiálu, jímž byla směsná cementová malta s pojivem z portlandského cementu a křemeliny. Vstupní data pro inverzní analýzu byla získána laboratorním experimentem. Genetické programování ukázalo velký potenciál při využití v materiálovém inženýrství stavebních hmot, a proto bude výzkum v této oblasti pokračovat.

Článek vznikl za podpory projektu SGS12/104/OHK1/2T/11 MŠMT ČR.

Literatura

- [1] Kučerová, A.: Identification of nonlinear mechanical model parameters based on softcomputing methods. [PhD Thesis], Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2007.
- [2] Matano, C.: On the Relation between the diffusion coefficient and concentration of solid metals. Jap. J. Phys., Vol. 8, 2003, pp. 109-113.
- [3] Kašpar, I.: Moisture transport in building materials. [DSc. Thesis], CTU Prague, 1984.
- [4] Černý, R. – Toman, J.: A difference method for determining the thermal conductivity of porous materials in a wide temperature range. High Temp.-High Press 1997, Vol. 29, pp. 51-57
- [5] Drchalová, J.: A transient method for determination of moisture diffusivity. [PhD Thesis], CTU Prague, 1983.
- [6] Drchalová, J. – Černý, R.: Non-steady-state methods for determining the moisture diffusivity of porous materials. In: Int. Comm. In Heat and Mass Transfer, 1998, Vol. 25, pp. 109-116.
- [7] Holland, J. H.: Outline for a logical theory of adaptive systems. J. Assoc. Comput. Mach., Vol. 3, 1962, pp. 297-314.
- [8] De Jong, K. A.: An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems. [PhD Thesis], University of Michigan, Ann Arbor, 1975, Diss. Abstr. Int. 36(10), 5140B, University Microfilm No.76-9381.
- [9] Fogel, L. J.: Autonomous automata. Ind. Res., Vol. 4, 1962, pp. 14-19.
- [10] Burgin, G. H.: On playing two-person zero-sum games against non minimax players. IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern., Vol. SSC-5, No. 4, 1969, pp. 369-370.

- [11] Kočí, J. – Žumár, J. – Pavlík, Z. – Černý, R.: Application of genetic algorithm for determination of water vapour diffusion parameters of building materials. *Journal of Building Physics*, Vol. 35, No. 3, 2012, pp. 238-250.
- [12] Kočí, J. – Maděra, J. – Černý, R.: Stanovení součinitele vlhkostní vodivosti pomocí genetického algoritmu. *Stavební obzor*, **19**, 2010, č. 2, s. 45-48.
- [13] Kočí, J. – Maděra, J. – Pavlík, Z. – Černý, R.: Identification of water vapour transport properties of gypsum using evolutionary algorithms. *ICNAAM 2012*, Melville, New York, American Institute of Physics, 2012, pp. 2158-2161.
- [14] Bremermann, H. J.: Optimization through evolution and recombination. *Self-Organizing Systems* (Yovits, M. C. et al., Eds.), Washington, DC, Spartan 1962.
- [15] Friedberg, R. M.: A learning machine: Part I. *IBM J.*, Vol. 2, No. 1, 1958, pp. 2-13.
- [16] Friedberg, R. M. – Dunham, B. – North, J. H.: A learning machine: Part II. *IBM J.*, Vol. 3, No. 7, 1959, pp. 282-287.
- [17] Fogel, D. B.: *Evolutionary Computation: Toward a new philosophy of machine intelligence*. Piscataway, NJ: IEEE Press 1995.
- [18] Smith, F. C.: Flexible learning of problem solving heuristics through adaptive search. [Proceedings], 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1983.
- [19] Cramer, L. N.: A representation for the adaptive generation of simple sequential programs. [Proceedings], 1st International Conference on Genetic Algorithms, Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA, 1985, pp. 183-187.
- [20] Koza, J. R.: *Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection*. MIT Press 1992.
- [21] Malhotra, V. M.: Role of supplementary cementing materials reducing greenhouse gas emissions. [Proceedings], Int. Conference on Infrastructure Regeneration and Rehabilitation. Improving the Quality of Life Through Better Construction. A Vision for the Next Millenium (Swamy, R. N., Ed.), Sheffield, 1999, pp. 27-42.
- [22] Pavlík, Z. – Fořt, J. – Keppert, M. – Pavlíková, M. – Žumár, J. – Volfová, P. – Maděra, J. – Černý, R.: The use of diatomite in cement mortar. [Proceedings], 1st Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering ACE, 2013, pp. 100-104.
- [23] Pavlík, Z. – Pavlíková, M. – Fiala, L. – Černý, R.: Parametry transportu kapalné vlhkosti a síranů míšenského pískovce. *Stavební obzor*, **17**, 2008, č. 4, s.110-113.
- [24] GPLAB, A Genetic Programming Toolbox for MATLAB. <http://gplab.sourceforge.net>
- [25] Kruis, K. – Koudelka, T. – Krejčí, T.: Efficient computer implementation of coupled hydro-thermo-mechanical analysis. *Mathematics and Computer Simulations* 80, 2010, pp. 2503-2504.
- [26] Černý, R. – Rovnaníková, P. – Pavlík, Z.: Experimental analysis of coupled water and chloride transport in cement mortar. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26(6), 2004, pp. 705-715.
- [27] Pavlík, Z. – Jiříčková, M. – Černý, R. – Sobczuk, H. – Suchorab, Z.: Determination of moisture diffusivity using the time domain reflectometry (TDR) method. *Journal of Building Physics*, Vol. 30(1), 2006, pp. 59-70.
- [28] Pavlík, Z. – Pavlíková, M. – Fiala, L. – Benešová, H. – Miňhulka, J. – Černý, R.: Analysis of chloride transport and storage properties of high performance concrete modified by fly ash addition as an effective tool for assessment of its durability. [Proceedings], 5th International Conference on High Performance Structures and Materials, High Performance Structures and Materials V Book, Vol. 112, 2010, pp. 343-354.

Vysoušení cihel pomocí elektrického pole

Ing. Ondřej MATYŠČÁK

VUT v Brně – Fakulta stavební

doc. Lisbeth M. OTTOSEN

Inge RÖRIG-DALGAARD, Ph.D.

DTU Lyngby – Faculty of Civil Engineering

V laboratorních podmínkách byly testovány dva typy příložených prvků, do nichž byly vloženy elektrody. Kombinace příložených prvků, v níž byla použita cihlářská hlína na obou stranách, ukázala největší pokles hmotnostní vlhkosti z počátečních 13,9-14,7 % na 12,3-13,0 %.

Dewatering of bricks by means of an electric field

Dewatering of bricks was due to the influence of an electric field. An electric field was applied to electrodes which were placed in clay poultices. Two types of poultices were used and tested with their combinations. The combination of clay poultices where only brick clay was used showed the highest decreases in the water contents in bricks from the initial water contents (13.9 – 14.7 %) to the final water contents (12.3 – 13.0 %).

Úvod

Vysoušení materiálů různými metodami je ve stavebnictví aktuální téma, existuje mnoho typů, např. teplotné, kondenzační, mikrovlnné. A právě v mikrovlnném vysoušení je perspektiva. Tento typ se používá již řadu let, převážně v Německu a Rakousku. Práce [1] byla zaměřena na vysoušení různých stavebních materiálů, u nichž se technika mikrovlnného vysoušení prokázala jako velmi efektivní a rychlá. Avšak zdívko lze vysoušet i pomocí materiálů, které mají hydrofobní vlastnosti, jak bylo dokázáno ve studii [2]. Prezentované experimenty navazují na práci [3], ve které byl vyšetřován pohyb vody vlivem působení elektrického pole. Elektrické pole bylo aplikováno i do pórovitého materiálu v podobě cihel dánského formátu. V experimentech byl uplatněn uzavřený systém příložených prvků „obkladů“, které byly použity externě. Ve snižování vlhkosti z předem nasáklých cihel bylo dosaženo povzbudivých výsledků. Elektroosmotický pohyb vody byl prokázán, což byl hlavní cíl. U většiny pórovitých materiálů se pohyb molekul vody předpokládá ve směru od kladné elektrody k záporné. Existuje však mnoho faktorů, které mohou tento pohyb výrazně ovlivnit. Jedním z nich je hodnota pH, která má na elektroosmotický efekt výrazný vliv. V tomto případě byl použit uzavřený systém příložených obkladů, umístěných externě po obou stranách cihel. Rozdíl proti předchozím experimentům je v tom, že nyní se kombinují dva typy příložených obkladů, připojených ke zdroji proudu. Hlavním cílem je prokázání elektroosmotického efektu a porovnání kombinací typů příložených obkladů, zejména sledování poklesu hmotnostní vlhkosti u vysušovaných cihel a příložených obkladů (1). Předpoklad byl, že na straně anody bude příložený obklad po ukončení experimentu sušší než na straně katody, jelikož molekuly vody se budou pohybovat u pórovitých cihel k záporné elektrodě. Zjištění, která kombinace příložených obkladů bude na straně anody nejméně vysušená, může být užitečné především pro budoucí zkoušky.

Rozdělení vlhkosti ve stavebních materiálech

Stupně vlhkosti byly sledovány podle [2] a ČSN P 73 06 10 Hydroizolace staveb sanace vlhkého zdíva – základní ustanovení [4].

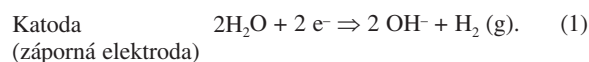
Tab. 1. Stupně vlhkosti

Stupně vlhkosti	Hmotnostní vlhkost w [%]
velmi nízká	$w < 3,0$
nízká	$3,0 \leq w < 5,0$
zvýšená	$5,0 \leq w < 7,5$
vysoká	$7,5 \leq w < 10,0$
velmi vysoká	$10,0 >$

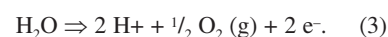
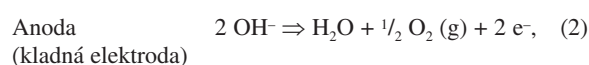
Elektrokineze

Procesy na elektrodách

Po aplikaci do vlhkého zdíva je elektrické pole v roztoku uvnitř pórů cihel přenášeno ionty. Tento efekt je nazýván elektromigrace. V kovových elektrodách je elektrický proud veden elektrony. Procesy, které transformují proud přenášený elektrony na proud přenášený ionty, a naopak, se nazývají elektrodové procesy. Tyto procesy jsou závislé na materiálu elektrody, aplikovaném potenciálu a na typu elektrolytického roztoku. Na anodě probíhají procesy oxidace, na katodě procesy redukce.



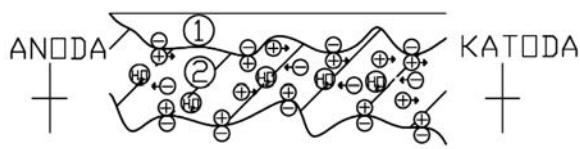
V případě inertních elektrod potažených platinou, které byly v experimentech použity, reakce (2) a (3) převládá na straně kladné elektrody. Reakce (1) a (3) vytváří změny pH v systému.



Elektroosmóza

Po aplikaci napětí do jemně zrnitého nebo pórovitého materiálu se ionty elektrického pole dají do pohybu důsled-

kem elektromigrace, která vyústí v pohyb vody směrem ke kladné nebo záporné elektrodě v závislosti na celkovém náboji povrchu jemně zrnitého nebo pórovitého materiálu. Vnitřní povrchy materiálů jsou tedy nabitě buď kladně, nebo záporně. Vnitřní povrch pórů použitých cihel má záporný náboj. Aby byla zajištěna chemická rovnováha systému, budou vnitřní povrchy přitahovat náboje s opačnou polaritou, které jsou v roztoku (elektrolytu). Pak dochází k vytvoření elektrické dvouvrstvy. Avšak roztok neobsahuje pouze náboje s opačnou polaritou (vůči náboji povrchu), ale také náboje se stejnou polaritou. Tyto ionty se však v elektrické dvouvrstvě vyskytují v mnohem menším počtu než ionty s opačnou polaritou. Obrázek 1 znázorňuje, jak je negativní náboj vnitřního povrchu pórů vyvažován kladnými ionty v roztoku uvnitř pórů. Aplikované napětí pak způsobí, že se ionty v roztoku (elektrolytu) začnou pohybovat směrem k elektrodám s opačnou polaritou. Jelikož v této elektrické dvouvrstvě jsou kladné ionty v převaze vůči iontům záporným, bude následovat tok iontů přes elektrody opačných polarit proti vnitřnímu povrchu materiálu a molekuly vody okolo kladných iontů jsou v případě materiálu cihel tlačeny směrem k záporné elektrodě společně s kladnými ionty, které jsou v převaze. Elektroosmotický efekt byl dokázán v mnoha různých pórovitých materiálech, jakými jsou např. jemnozrný popílek nebo různé typy usazenin. Studie byla zaměřena na prokázání elektroosmózy v příložených prvcích a cihlách.



Obr. 1. Schéma nábojů vnitřního povrchu pórů a roztoku v cihel
1 – vnitřní povrch pórů (záporně nabitý povrch cihel), 2 – roztok (šrafa), elektrolyt, kladné a záporné ionty

Experimentální část

Materiály

Při všech experimentech byly použity žluté cihly dánského formátu o rozměrech 22,8x10,8x5,4 cm z cihelny Wewers Rød. Pórovitost těchto cihel je udávána 28 %. Žlutá barva odpovídá použité hlíně (je-li množství CaCO_3 alespoň třikrát vyšší než Fe_2O_3 , mají toto zbarvení). Jako příložené prvky byla v laboratoři použita směs CaCO_3 , kaolinitu a vody. K namíchání byla použita pitná nebo destilovaná voda. Pouze u experimentů č. 2 a č. 8 byla do směsi příložného obkladu přimíchána pitná voda. Rozdíl mezi vodou destilovanou a pitnou je ve vodivosti – pitná voda obsahuje velké množství iontů. Díky obsahu „nečistot“ má tedy vyšší vodivost než voda destilovaná, která tyto volné ionty neobsahuje. Vodivost pitné vody se udává 0,7-0,8 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$. Druhým typem příložného obkladu byla cihlářská hlína, dodaná z továrny Wienerberger v Dánsku, která obsahovala 17,0 až 18,0 % CaCO_3 . Počáteční hmotnostní obsah vlhkosti byl z kontrolních vzorků vypočítán a pohyboval se mezi 21,0 až 25,6 %. Pro laboratorní nastavení byly dále použity pryžové ucpávky (zátky), pryžová lepicí páska, samolepicí páska, plastové válečky, podložky, plastové sáčky a elektrody jehlového tvaru, potažené platinou, z Permascandu.

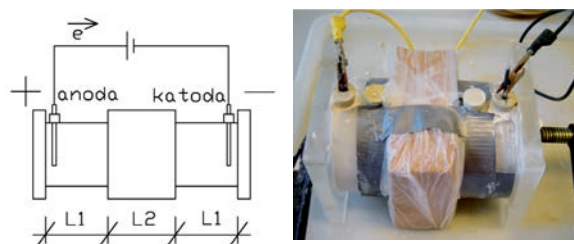
Analytická část

Před výpočtem hmotnostní vlhkosti byly půlky cihel rozděleny na čtyři části. Příložené obklady byly také rozděleny na čtyři pruhy na každé straně (obr. 3). V těchto částech byla

vypočítána hmotnostní vlhkost gravimetrickou metodou (vysušení částí po dobu 24 h na teplotu 105 °C) následovně: $\text{hmotnost vlhkého vzorku} / \text{hmotnost suchého vzorku} \cdot 100 \%$.

Laboratorní nastavení

Po počátečním vysušení byly cihly dlátem a kladívkem rozděleny na přibližně stejné půlky. Takto rozdělené vysušené a zvážené části byly ponořeny do pitné vody na 2 h k nasáknutí. Pak byly připraveny dva plastové duté válce $\varnothing 10$ cm, s tloušťkou stěny cca 1 cm, dlouhé 5 cm. Dva kruhové otvory každého válce $\varnothing 1$ cm byly uzavřeny pryžovými ucpávkami. Dna válců byla podložena plastovými podložkami, které do sebe přesně zapadly. Na horní stranu válce byla nalepena pryž tl. 0,5 cm pro utěsnění při utahování svěrákem. Do takto upravených válců byla po okraj těsnění vtačována směs nebo cihlářská hlína. V každém experimentu byla použita i kombinace směsi s cihlářskou hlínou. Mezi naplněné válce byly vloženy půlky cihel a postupně utahovány svěrákem. Jedna ucpávka na každé straně válce byla odstraněna, aby směs mohla otvorem vytékat, což znamenalo, že je směs nebo hlína ve válci plně stlačená. Následně byly do otevřených otvorů vloženy dvě jehlice potažené platinou, napíchnuté na pryžové zátky. Ty dále sloužily jako elektrody s průřikem 7 cm do směsi nebo cihlářské hlíny. Cihla byla dále zabalena do plastového sáčku, uzavřeného samolepicí páskou, aby se nevysušovala vzduchem. Následně byly elektrody připojeny ke generátoru proudu a napětí (Hewlett Packard E3612A, DC power supply) a nastaveny počáteční hodnoty napětí a proudu – bylo ponecháno konstantní napětí CV (obr. 2).

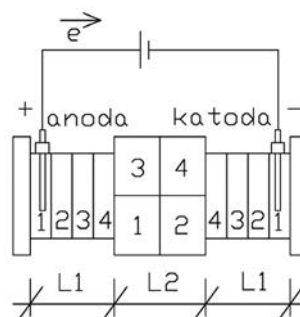


Obr. 2. Schéma laboratorního uzavřeného nastavení a připojení elektrod k napájení

L1 – příložený prvek (směs nebo cihlářská hlína); L2 – půlka cihel

Průběh experimentů

Celkem bylo provedeno 11 experimentů s konstantním napětím 30,1-30,4 V, každý se dvěma půlkami cihel (tab. 2). Změny proudu byly monitorovány denně mezi 9. až 17. hodinou. Dobrý kontakt elektrody se směsí nebylo možné zajistit po celou dobu, po třech až čtyřech dnech zpravidla začínaly problémy. Obnovení bylo možné pouze ruční oprava



Obr. 3. Laboratorní nastavení

L1 – příložený prvek (směs nebo cihlářská hlína); L2 – půlka cihel

vou elektrod. Na konci experimentů byly příložné obklady vyjmuty z plastových válců a rozděleny na čtyři části na každé straně. Půlky cihel byly rovněž rozděleny na čtyři části. V nich byla vypočítána konečná hmotnostní vlhkost (obr. 3).

Výsledky a diskuze

Referenční cihly

Je třeba vzít v úvahu několik faktorů, které mohly výsledky ovlivnit, přestože v experimentech byly použity cihly stejné výrobní série. Byla měřena rozdílná hmotnostní vlh-

kost po 2 h noření v pitné vodě. Jak se měnila hmotnostní vlhkost u dvou půlek cihel v závislosti na čase ukazuje tab. 2. Hmotnostní vlhkost byla počítána v rozmezí 13,7-17,2 %.

Elektroosmóza uvnitř cihel a příložných obkladů

V každém experimentu byl pohyb vody zřejmý ve směru od anody ke katodě, jelikož v příložných obkladech na straně anody byla hmotnostní vlhkost na konci experimentů ve všech případech nižší než na straně katody (tab. 4). Navíc pod plastovým válcem pouze na stranách katod byla viditelná voda (10-15 ml), což byl zřejmý důkaz jejího pohybu. Proto se předpokládalo, že na konci experimentů bude v čas-

Tab. 2. Počáteční nastavení experimentů*

Experiment	Příložný obklad		Trvání [h]	Proud [mA]	Napětí [V]
	anoda	katoda			
1	CaCO ₃ + DV + kaolinit	CaCO ₃ + DV + kaolinit	BR. 1 = 72 BR. 2 = 49	12,0; 9,0	30,2; 30,1
2	CaCO ₃ + PV + kaolinit	CaCO ₃ + PV + kaolinit	BR. 1 = 116 BR. 2 = 116	19,0; 18,0	30,4; 30,2
3	cihlářská hlína	cihlářská hlína	BR. 1 = 142 BR. 2 = 142	21,0; 23,0	30,4; 30,4
4	CaCO ₃ + DV + kaolinit	cihlářská hlína	BR. 1 = 142 BR. 2 = 142	23,0; 23,0	30,2; 30,2
5	cihlářská hlína	CaCO ₃ + DW + kaolinit	BR. 1 = 142 BR. 2 = 142	23,0; 23,0	30,3; 30,3
6	CaCO ₃ + DV + kaolinit	CaCO ₃ + DV + kaolinit	BR. 1 = 162 BR. 2 = 162	14,0; 14,0	30,3; 30,3
7	CaCO ₃ + DV + kaolinit	CaCO ₃ + DV + kaolinit	BR. 1 = 242 BR. 2 = 242	18,0; 15,0	30,3; 30,4
8	CaCO ₃ + PV + kaolinit	CaCO ₃ + PV + kaolinit	BR. 1 = 260 BR. 2 = 260	23,0; 22,0	30,3; 30,3
9	cihlářská hlína	cihlářská hlína	BR. 1 = 204 BR. 2 = 204	20,0; 20,0	30,3; 30,3
10	CaCO ₃ + DV + kaolinit	cihlářská hlína	BR. 1 = 214 BR. 2 = 214	21,0; 22,0	30,3; 30,3
11	cihlářská hlína	CaCO ₃ + DV + kaolinit	BR. 1 = 233 BR. 2 = 233	25,0; 15,0	30,4; 30,4

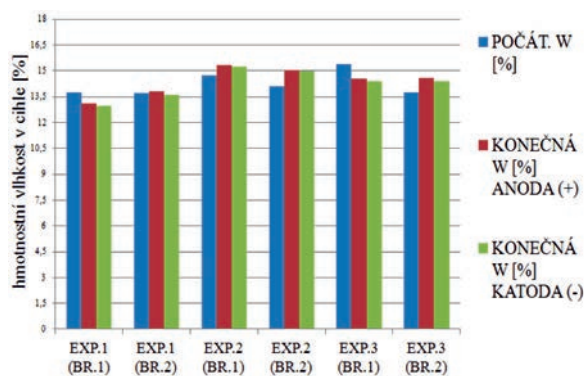
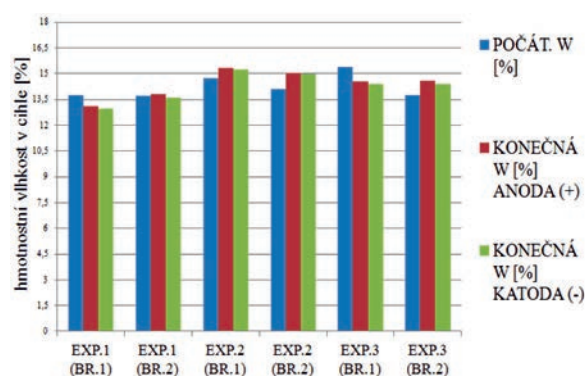
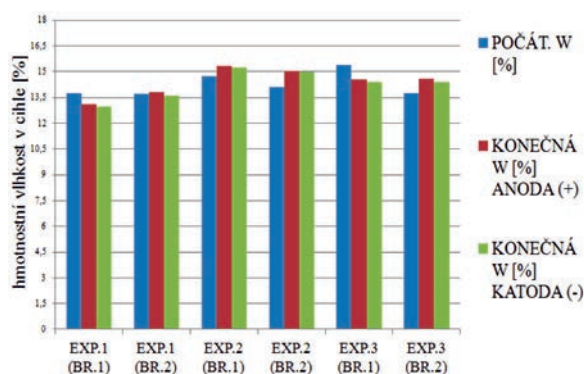
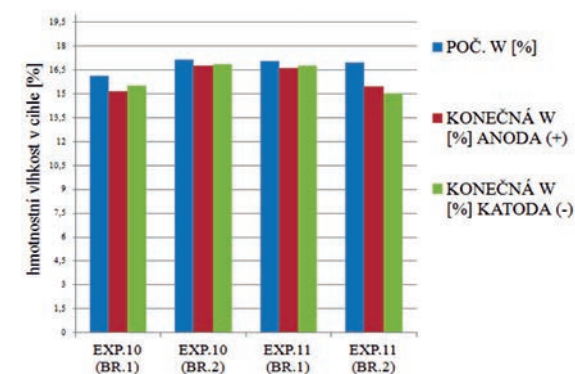
* BR 1 – půlka cihly 1, BR 2 – půlka cihly 2, DV – destilovaná voda, PV – pitná voda

Experiment	Hmotnost vysušených cihel [g]	Hmotnostní vlhkost w [%]
1	1 381,5; 853,9	13,7; 13,7
2	1 216,8; 1 001,1	14,7; 14,1
3	1 113,2; 1 090,6	15,4; 13,8
4	1 269,5; 1 266,3	16,1; 15,9
5	1 331,0; 1 232,3	16,0; 16,3
6	1 221,9; 978,0	15,4; 14,9
7	1 130,7; 1 068,3	16,6; 14,9
8	1 110,1; 1 070,1	16,2; 17,0
9	1 221,9; 978,0	13,9; 14,7
10	1 118,4; 1 095,1	16,1; 17,2
11	1 182,0; 1 000,4	17,1; 17,0

tech cihel na stranách katody více vody. Tato domněnka se nepotvrdila, jak je zřejmé z grafů, kde hmotnostní vlhkost uvnitř cihel je někdy vyšší na straně anody, jindy na straně katody (obr. 4, obr. 5). Proto bylo rozhodnuto opakovat a prodloužit experimenty 7 až 11 (obr. 6, obr. 7). Ani následně však nebylo dosaženo ve všech případech předpokládaného poklesu. Celkový pokles hmotnostní vlhkosti v cihlách byl však ve většině případů větší. Největší pokles byl zjištěn u kombinace, ve které byla cihlářská hlína použita jako náplň do plastových válců na obou stranách. Pokles počáteční hmotnostní vlhkosti 13,9-14,7 % byl na konci experimentů 12,3-13,0 %. Složení směsi mělo pravděpodobně za následek malý pokles, nebo dokonce nárůst hmotnostní vlhkosti, protože směsi obsahovaly velké množství vody. Hmotnostní vlhkost směsi byla kolem 40 % (tab. 4). To mohlo mít za následek nasáknutí cihly na rozhraní příložného obkladu a cihly dodatečnou vodou. Cihlářská hlína proti směsi měla počáteční hmotnostní vlhkost kolem 20 % (tab. 4).

Tab. 3. Změny v hmotnostní vlhkosti u půlek cihel během ponoření

Datum	Čas [h]	Půlka 1 [g]	Hmotnostní vlhkost 1 [%]	Půlka 2 [g]	Hmotnostní vlhkost 2 [%]	Rozdíl hmotnostní vlhkosti w [%]
	10:00	1 182,25	< počáteční >	1 000,69		
8. 12.	11:00	1 388,52	17,45	1 172,41	17,16	0,29
	12:00	1 389,25	17,51	1 172,57	17,18	0,33
	13:00	1 389,90	17,56	1 174,15	17,33	0,23
	15:00	1 390,83	17,64	1 174,86	17,40	0,24
9. 12.	9:00	1 392,93	17,82	1 176,65	17,58	0,24
11. 12.	14:30	1 398,85	18,32	1 182,05	18,12	0,20
12. 12.	10:00	1 400,54	18,46	1 183,79	18,30	0,17
	14:00	1 400,66	18,47	1 183,98	18,32	0,16
13. 12.	9:00	1 401,78	18,57	1 185,01	18,42	0,15
	11:00	1 182,25	18,58	1 185,25	18,44	0,14
	13:00	1 388,52	18,59	1 185,35	18,45	0,14
14. 12.	9:00	1 389,25	18,73	1 186,70	18,59	0,14
	13:00	1 389,90	18,83	1 187,76	18,69	0,13

Obr. 4. Hmotnostní vlhkost cihel po skončení experimentů 1, 2, 3 (dvě půlky byly ponořeny do pitné vody po dobu 2 h)
BR. 1 – půlka 1, BR.2 – půlka 2Obr. 6. Hmotnostní vlhkost cihel po skončení experimentů 7, 8, 9 (dvě půlky byly ponořeny do pitné vody po dobu 2 h)
BR. 1 – půlka 1, BR.2 – půlka 2Obr. 5. Hmotnostní vlhkost cihel po skončení experimentů 4, 5, 6 (dvě půlky byly ponořeny do pitné vody po dobu 2 h)
BR. 1 – půlka 1, BR.2 – půlka 2Obr. 7. Hmotnostní vlhkost cihel po skončení experimentů 10, 11 (dvě půlky byly ponořeny do pitné vody po dobu 2 h)
BR. 1 – půlka 1, BR.2 – půlka 2

Tab. 4. Změny v obsahu hmotnostní vlhkosti uvnitř příložených obkladů*
 * DV – destilovaná voda, PV – pitná voda

Typ	Počáteční hmotnostní vlhkost w [%]	Konečná hmotnostní vlhkost [%]	
		anoda	katoda
cihlářská hlína	21,0-24,9	14,6-19,0	17,1-21,3
CaCO ₃ + DV + kaolinit	42,9-45,0	32,6-36,7	35,2-40,0
CaCO ₃ + PV + kaolinit	42,3-46,3	33,1- 35,7	35,9-39,0

Závěr

Vzlínající vlhkost může na stavbách způsobit vážné problémy. K odstraňování je možné využít elektrické pole, díky kterému byl měřen v uzavřeném systému pohyb vody. Ve všech experimentech bylo dosaženo většího poklesu vody na straně anody u „příložených prvků“ než na straně katody, avšak v cihlách nebylo dosaženo ve většině případů snížení hmotnostní vlhkosti. Příčinou bylo pravděpodobně příliš krátké trvání experimentů, zabalení cihel do neprodyšného obalu (sáčku), špatný kontakt mezi elektrodami a směsí na

stranách anod, kde se podle předpokladu vysušovala více. U cihlářské hlíny jako náplně na obou stranách (experiment 9) bylo dosaženo největšího poklesu hmotnostní vlhkosti ze všech experimentů, a zároveň nejmenšího poklesu v příloženém obkladu na straně anody. Toto zjištění by mohlo být užitečné při budoucích zkouškách „in situ“. Jelikož u experimentu 9 bylo vysušování na straně anody nejmenší, výměna „cihlářské hlíny“ na straně anody by neměla být tak častá. Nebylo by nutné tak časté vyměňování „příložených prvků“ i cihlářské hlíny.

Literatura

- [1] Michálek, P. – Tydlitát, V. – Černý, R.: Možnosti použití hydrofilních minerálních vln pro vysušování a odsolování zdiva. *Stavební obzor*, **15**, 2006, s. 220-223. ISSN 1210-4027
- [2] Novotný, M. – Šuhajda, K. – Tomíček, O.: Sledování účinnosti mikrovlnného vysoušení pomocí tyčové antény. *Stavební obzor*, **16**, 2007, s. 121-125. ISSN 1210-4027
- [3] Ottosen, L. M. – Rørig-Dalgaard, I.: Desalination of a brick by application of an electric DC field. *Materials and Structures*, **42**, 2009, No. 7, pp. 961-971. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-008-9435-1
- [4] ČSN P 73 3610 Hydroizolace staveb sanace vlhkého zdiva, základní ustanovení. ČNI, 2000.

Druhy rostlin pro vegetační střechy

Ing. Michal MAJSNIAR
 Ing. Kateřina HINDRÁKOVÁ
 prof. RNDr. Ing. Stanislav ŠŤASTNÍK, CSc.
 doc. Ing. Jan ŠKRAMLÍK, Ph.D.
 VUT v Brně – Fakulta stavební

Obsahem článku je analýza možností zelených střech, s důrazem na optimalizaci vhodného složení vegetace.

Types of plants for green roofs

The aim of the article is to analyze the potential of green roof systems, with an emphasis on optimizing the composition of suitable vegetation for them.

Úvod

Vegetační, neboli zelená střecha, je typem střechy částečně nebo zcela pokryté vegetací a půdou ukládanou na hydroizolační membránu. Ve skladbě mohou být i další vrstvy, jako například kořenová bariéra, odvodnění a zavlažování. V posledních letech získávají tyto střechy oblibu, navrhuje se jak nejjednodušší formy zeleně, tak náročné zahrady, které lze uspořádat na střechách domů i ve velkoměstech (obr. 3). Pouze na ploché střechy však lze umístit střešní zahrady a místa, kde má člověk možnost relaxace. Díky různým stabilizačním prvkům lze ozelenění navrhovat i na šikmé střechy, avšak jen do určitého mezního sklonu.

Dělení zelených střech

Ve smyslu normy [8] se nejčastěji rozlišují typy extenzivní a intenzivní. Toto dělení lze rozšířit o dva další druhy, a to biotopní a polointenzivní zelené střechy.

Biotopní zeleň (samovolné ozelenění)

- tloušťka substrátu 6 (2)÷12 cm (2 cm je extrém, běžně se neprovádí);
- plošná hmotnost v plně nasyceném stavu 60÷200 kg/m²;
- jednou až dvakrát ročně kontrola a odstranění náletů;
- zpravidla nejsou pochozí;
- není automatická závlaha;
- vhodné zejména na ploché střechy, lze však i na šikmé;
- filtrační vrstvou je většinou geotextilie o plošné hmotnosti 100÷150 g/m².

U takové střechy se nepočítá se zakládáním zeleně, ponechává se pro přirozený nálet semen a volný růst rostlin. Biotopní zeleň je tak jednou z neekologičtějších variant vysazování vegetace. Rostliny si vytvářejí přirozené prostředí, jde o přirozenou symbiózu rostlinných společenstev schopných samostatného přežívání a samoobnovy. Biotopní rostlinný pokrov se skládá ze sukulentů, mechů a některých druhů trav a bylin, jimž vyhovují konkrétní stanovištní podmínky a jsou schopny přežít jak extrémní sucha, tak občasné přemokření [5].

Pro vytváření biotopní zeleně tedy stačí „substrát“ v podobě šterku, pro urychlení vývoje vegetace náletovými rostlinami se do šterku míchá zemina, písek, kůra, sláma, řezanka či jiné materiály. Ozelenění lze urychlit vysazením několika jedinců nenáročných rostlin (sukulentů, mechů, travin

aj.) [1]. Druhové složení biotopní zeleně se s různými podmínkami stanoviště mění bez zásahu člověka (obr. 1).



Obr. 1. Příklad biotopní střešní zeleně [1]

Extenzivní zeleň

- tloušťka substrátu 6(2)÷20 cm (2 cm je extrém, běžně se neprovádí);
- plošná hmotnost v plně nasyceném stavu 60÷300 kg/m²;
- údržba: jednou za 1 až 2 měsíce, jednou až dvakrát ročně kontrola a odstranění náletů;
- zpravidla nejsou pochozí;
- většinou není automatická závlaha;
- střechy ploché i šikmé;
- filtrační vrstvou je většinou geotextilie 100÷200 g/m².

Extenzivní zeleň plní funkci zejména estetickou, ekologickou a psychologickou. Rostliny jsou na střechy vysazovány a vyžadují určitou péči, byť minimální. Jde hlavně o doplňování živin malými dávkami hnojiva v době extrémního sucha, dosadbu do mezer, které vznikají uhytnutím rostlin, doplňování substrátu v určitých cyklech a občasné kosení. Dle mocnosti substrátu se rozlišuje zeleň:

- na tenké vrstvě 2-6 cm, tzv. nenáročná;
- na středně tlusté vrstvě 6-15 cm, tzv. středně náročná;
- na tlusté vrstvě 15-20 cm, tzv. náročná.

Na extenzivní střechy (obr. 2) se volí rostliny schopné snášet extrémní podmínky, jako je dlouhodobé sucho, ale i krátkodobé přemokření. Nejvhodnější jsou rostliny odolné větru, dobře regenerující, schopné plošného rozrůstání a roz-

množující se vegetativní i generativní cestou a rostliny vyžadující minimální péči. Většinou se sazejí na jaře, aby měly dostatek času na aklimatizaci, zakořenění a šanci přežít následnou zimu. Za nevhodnější lze považovat rostliny tučnolisté, suchomilné a skalničky, tedy rostliny nenáročné na vláhu. Lze se setkat i s polokeři a velmi nízkými keři. Z dřevin lze doporučit nízké kručinky a kaliny, vrbu zakrslou, poléhavé jalovce aj. Například v Německu mají vytipováno na 200 vhodných druhů, z nichž 120 je pěstováno ve školkách a zbylé rostou volně v přírodě [1].



Obr. 2. Příklad extenzivní vegetační střechy [3]

Sklon zelené střechy by měl být alespoň 2 %. Extenzivní zeleň na střechách s velmi malým sklonem (menším než 2 %) je vystavena dlouhodobě vlhkosti, takže původní suchomilné rostliny jsou postupně v těchto místech vytěšňovány mechem. Při sklonu nad 5° (8,8 %) se obvykle musí provést stabilizující opatření [7]. Při minimalistickém řešení extenzivního ozelenění může ve skladbě zcela chybět hydroakumulační či drenážní vrstva. Důvodem je malý sklon střechy (absence hydroakumulační vrstvy), nebo naopak její velký sklon (absence drenážní vrstvy), a tím i zpomalený či zrychlený odtok vody [1].

Tento typ střechy se často označuje jako bezúdržbový. To ovšem není pravda, protože zeleň, která nepotřebuje údržbu, neexistuje. Rostliny se liší hlavně její potřebou. Extenzivní střecha se frekvencí blíží obyčejné ploché střeše. Údržba se tedy provádí jednou až dvakrát ročně. Při kontrole je nutné odstranit nálet, který by mohl poškodit střechu rozrůstajícím se kořenovým systémem. Poté je potřeba odstranit uhynulé rostliny, nahradit je novými a provést klasickou kontrolu, která zahrnuje vyčištění okapových žlabů, střešních vtoků apod. Po osázení celé plochy musí následovat závlaha, kterou je třeba opakovat jednou až dvakrát týdně po dobu několika následujících měsíců až do doby, než rostliny řádně zakoření [1].

Polointenzivní zeleň

- tloušťka substrátu 15÷30 cm;
- plošná hmotnost v plně nasyceném stavu 120÷350 kg/m²;
- údržba na nízké úrovni;
- zpravidla pochozí;
- většinou není automatická závlaha;
- střechy ploché;
- filtrační vrstvou je většinou geotextilie 1 200÷300 g/m².

Polointenzivní zeleň tvoří přechod mezi zelení extenzivní a intenzivní. Při výsadbě jsou uplatňovány zejména trvalky a nízké keře jalovců, kručinek, brslenů, hlohyní, mochen aj. Proti extenzivní výsadbě má vyšší nároky na mocnost substrátu, vláhu a údržbu. Stále však jde o poměrně nenáročnou

zeleň. Při základním dělení je řazena buď do kategorie extenzivních střech jako „náročná extenzivní“, či do sekce intenzivní zeleň jako „jednoduchá“ neboli „primitivní intenzivní“ [1].

Intenzivní zeleň

- tloušťka substrátu 15÷30 cm a více;
- plošná hmotnost v plně nasyceném stavu 150÷300 kg/m² a více;
- údržba odpovídá běžné zahradě/veřejné zeleni na rostlém terénu;
- pochozí;
- automatická závlaha;
- střechy ploché;
- filtrační vrstvou je většinou geotextilie plošné hmotnosti >300 g/m².

Intenzivní zeleň je známa tím, že potřebuje stálou údržbu a péči, která je totožná s péčí o klasickou zahradu včetně pravidelné závlahy s živinami. Srážky většinou nestačí, proto se používá zavlažovací systém, který může být automatický, schopný zároveň dopravovat potřebné množství živin. Dle péče, kterou potřebuje, se rozlišuje intenzivní:

- jednoduchá (tzv. primitivní intenzivní = polointenzivní) s mocností substrátu 15÷30 cm – přechod mezi extenzivní a intenzivní zelení;
- nákladná s mocností substrátu 30 cm více.

Na střechách s intenzivním ozeleněním se předpokládá pracovní nebo rekreační pohyb osob. Používají se zpravidla pro rozšíření užitného nebo obytného prostoru (obr. 3). Mohou se zde pěstovat i náročnější rostliny, např. růže, nízké křovinaté rostliny, nízké keře, při odpovídajícím zvýšení vegetační vrstvy i střední a vyšší keře [2]. Projektant musí pro tento typ střechy uvažovat i s prostorem pro uskladnění zahradního nářadí, techniky a dalších pomůcek.



Obr. 3. Vzhled intenzivních vegetačních střech ve velkoměstech

Dělení lze chápat jen jako orientační, neboť není určena hranice mezi jednotlivými typy zelených střech. Ty se nerozlišují pouze dle mocnosti substrátu či zatížení střechy, ale i (a to především) dle využití plochy a péče, kterou bude vegetace vyžadovat. U všech typů ozelenění je nutno počítat se závlahou, hnojením, pletím, odstraňováním uhynulého rostlinného materiálu a zaplňováním mezer po odumřelých rostlinách. Rozdílů je pouze úroveň péče [1].

Na mnoha střechách se lze setkat s kombinací extenzivních a intenzivních porostů. Vyžaduje to lokální navýšení, či naopak snížení tloušťky substrátu, terén je modelován, vzniká dojem krajiny. Zatížení střechy je pak v různých jejích částech odlišné [1].

Rostliny pro zelené střechy

Pro extenzivní zelené střechy se hodí pouze rostliny, které se dokáží přizpůsobit extrémním teplotám a dobře snášejí sucho. Vegetaci můžeme dostat na střechu v různých formách – jako osivo, řízky (části rostlin), sazenice s plochým kořenovým balem nebo vegetační rohože. Podle situace je třeba vhodně zvolit. U ozeleněných šikmých střech je například nutné použít předpěstované vegetační rohože na pevném nosiči. Dle požadavku investora je možné za pomoci odborníka vybrat vhodnou vegetaci z připravených seznamů rostlin. Pro intenzivní zeleň připadají v úvahu různé druhy trvalek, keřů, půdopokryvných rostlin a dřevin, které jsou obvyklé i v zahradách na rostlém terénu. Podle podmínek stanoviště by však měly být použity nevymrzající druhy [3].

Kritéria výběru

Je známo, že hlavními faktory, ovlivňujícími volbu rostlin na zelených střechách, jsou teplotní odolnost, hloubka substrátu a požadavky na zavlažování. Nejdůležitějším se však ukazuje být faktor závlahy. Společně s velkou odolností rostlin je také vyžadována co nejmenší údržba. Základní požadavky:

- odolnost v suchém období, extenzivní střechy většinou nemají instalovanou závlahu;
- odolnost v extrémním horku a mrazu, typické podmínky na střechách;
- malá výška vzrůstu, odolnost rostlin vůči větru;
- velká schopnost akumulovat vodu, např. listy sukulentů;
- hustý a malý kořenový systém, maximální využití substrátu malé mocnosti;
- stálezelenost, kvůli plnění svých funkcí;
- malé nároky na údržbu, nízké nároky na péči a hnojení, dlouhá doba života.

Výběr vegetace, při daných klimatických podmínkách, je dán hlavně dvěma faktory:

- rozhodnutím, zda použijeme trvalý závlahový systém. Pokud se ho rozhodneme použít, máme mnohem větší možnosti při návrhu zeleně. Cenou jsou pak vyšší pořizovací náklady a náklady na údržbu;
- tloušťkou substrátu, tj. čím je větší, tím se vytváří větší volnost výběru druhu rostlin. Větší tloušťka substrátu poskytuje zvýšenou akumulační schopnost vody, nevýhodou může být větší plošné zatížení střešní konstrukce.

Doporučené rostliny

Uvádíme pouze rostliny vhodné pro střechy extenzivní nebo polointenzivní. Na intenzivních střechách nejsou pěstební možnosti omezeny. Rostliny se obvykle rozlišují dle vegetačního cyklu na jednoleté (letničky), dvouleté a trvalky.

- **Jednoleté** vyklíčí, vyrostou, vykvetou, vytvoří semena pro další sadbu a odumírají v průběhu jedné vegetační sezóny. Výhodou je, že kvetou v podstatě po celé vegetační období, tedy od jara až do podzimu, a při správné péči nás odmění bohatými a pestrými květy [6]. Na zelených střechách by neměly být zastoupeny dominantně. Jejich úloha v porostu je hlavně estetická. Výhodou je, že se mohou na střeše během roku bez pěstebního zásahu udržovat vysemeněním, aniž by se staly invazivními [4]. Doporučeny jsou např. *Phacelia campanula* nebo *Towsendia exomia*.

- **Dvouleté rostliny** v první sezóně vyklíčí a vytvoří vegetativní orgány. Druhým rokem se pak vysemení a uhynou.

- **Trvalky** jsou rostliny, které na zelené střeše mohou růst několik let. Bylinné trvalky jsou pro zelené střechy hlavně estetickým přínosem. Nabízejí největší variabilitu tvarů, rozmanitost barev a sezónní variabilitu. Je známo mnoho druhů, které potřebují hluboce zakořenit, proto je pro ně nezbytná tlustší vrstva substrátu i zvýšená závlaha. Vždy musí jít o druhy odolné suchu, mělce kořenicí s nižším vzrůstem, např. *Dianthus*, *Phlox*, *Campanula*, *Teucreum*, *Allium*, *Potentilla*, *Achillea*, *Prunella*, *Viola* a *Origanum*. Dále je třeba respektovat to, že pouze relativně malý počet druhů bylinných trvalek je stálezelených. Vždy je proto potřeba doplňovat je stálezelenými, aby střecha byla vizuálně atraktivní celoročně [4].

- **Sukulenty** jsou nejvhodnější pro střechy bez závlahového systému, se substráty do tl. 10 cm. Hlavní skupiny vhodných sukulentů jsou např. *Sedum*, *Sempervivum*, *Talium*, *Jovibarba* a *Delosperma* [4].

- **Trávy** potřebují více závlahy než sukulenty. Zpravidla vyžadují tlustší vrstvu substrátu, přibližně 15 cm a více. I když nekvetou a nejsou stále zelené, jsou velice zajímavé a jsou v oblibě. Pomáhají vytvořit estetické prostředí blízké se přirozenému ekosystému. Travnině porosty lépe zadržují vodu a lépe chladí, podle některých poznatků nabízejí lepší podmínky pro živočichy. Musíme však uvážit fakt, že v zimě není porost zelený. Obecně se doporučuje používat nižší trávy, např. *Festuca*, *Carex* a *Deschampsia* pro střechy s nižšími substráty. Pokud se použije tlustší vrstva substrátu, lze použít druhy *Andropogon*, *Boutelouna*, *Carex*, *Sesleria* a *Sporobolus* [4].

- Byliny bývají v dospělosti dostatečně odolné, kritická je pro ně první fáze usazení. Některé jsou schopny růstu na substrátech tl. 10 cm, na tenčích substrátech lze použít např. *Thymus*, *Origanum*, *Salvia* a *Allium* [4].

- **Geofity** jsou svým způsobem zvláštní rostliny, jejichž možnosti jsou omezeny díky menší odolnosti v horkých slunečných dnech. Mezi vyzkoušené cibuloviny patří některé *Iridaceae*, *Allium*, *Tulip*, *Daffodil*, *Muscari* a *Crocus*. Dále je uveden seznam nejodolnějších druhů, doporučených v publikaci [4], bez ohledu na lokalitu. Jde zřejmě o extenzivní střechy s tloušťkou substrátu do 10 cm. Nejnovější seznam z jara 2012 uvádí *Allium* 'Summer Beauty', *Allium cernuum*, *Alliumschoenoprasum*, *Allium senescens* ssp. *montanum* var. *glaucum*, *Delosperma* 'Lavender Ice', *Delosperma cooperi*, *Delosperma dyeri*, *Delosperma nubigenum* 'Basutoland', *Phedimus takesimensis* 'Golden Carpet', *Sedum album*, *Sedum album* f. *murale*, *Sedum ellacombianum*, *Sedum hybridum* 'Immergrüchen', *Sedum kamsch.* var. *flor.* 'Weihenstephaner Gold', *Sedum kamschaticum*, *Sedum middendorffianum* var. *diffusum*, *Sedum montanum* ssp. *orientale*, *Sedum reflexum* 'Blue Spruce', *Sedum rupeste* 'Angelina', *Sedum sexangulare*, *Sedum spurium* 'Album Superbum' aka. 'White form', *Sedum spurium* 'Fuldaglut', *Sedum spurium* 'John Creech', *Sedum spurium* 'Schorbuser Blut', *Sedum spurium* 'Summer Glory', *Sedum ternantum* a *Talinum calycinum* syn. *Phemeranthus calycinus*.

Rozdělení dle výšky substrátu

● Extenzivní vegetace 4-6 cm

cibulnaté	<i>Allium a Muscari</i>
traviny	<i>Carex, Corynephorus a Festuca</i>
trvalky	<i>Acaena, Acinos, Carlina, Chiastophyllum, Euphrobia, Fascicularia, Herniaria, Jovibarba, Mazus, Petro-graphia, Raoulia, Rosularia, Sagina, Saxifraga, Scutellaria, Sedum, Sempervivella a Sempervivum</i>

● Extenzivní vegetace 6-10 cm

cibulnaté	<i>Allium, Anemone, Crocus, Hyacinthoides, Ixia, Narcissus, Nerine, Scilla a Tulipa</i>
traviny	<i>Bouteloua, Buchloë, Carex, Festuca, Koeleria a Melica.</i>
trvalky	<i>Alyssum, Antennaria, Anthericum, Anthyllis, Armeria, Asplenium, Astragalus, Aubrieta, Babiana, Centaurium, Cerastium, Coronilla, Corydalis, Cymbalaria, Dianthus, Draba, Duchesnia, Echeveria, Erinus, Hieracium, Hypochaeris, Iris, Leontodon, Lep tinella, Lysimachia, Minuartia, Oxalis, Paronychia, Polypodium, Potentilla, Primula, Prunella, Saponaria, Serratula, Sisy rinchium, Teucrium, Thymus, Vancouveria a Verbascus</i>

● Polointenzivní vegetace 10-15 cm

traviny	<i>Briza, Carex, Festuca, Helictotrichon, Koeleria, Sesleria a Stipa</i>
trvalky	<i>Achillea, Aethionema, Ajuga, Alchemilla, Anacyclus, Anaphalis, Anthemis, Aquilegia, Arabis, Artemisia, Asarum, Aster, Ber genia, Billbergia, Calamintha, Campanula, Carlina, Centaurea, Centranthus, Cheilanthes, Daucus, Davallia, Delosperma, Dryas, Edraianthus, Epimedium, Erigeron, Eriophyllum, Erodium, Eryngium, Euphorbia, Filipendula, Fragaria, Galium, Gentiana, Geranium, Glechoma, Globularia, Gypsophila, Hedera, Helianthemum, Horminum, Hypericum, Inula, Iris, Jasione, Leucanthemum, Limonium, Linaria, Linum, Liriope a Ophiopogon, Lychis, Malva, Nepeta, Oenothera, Ononis, Onosma, Opuntia, Origanum, Pachysandra, Penstemon, Phlox, Pulsatilla, Ranunculus, Rhodiola, Sanguisorba, Saxifraga, Scabiosa, Sedum, Silene, Solidago, Tanacetum, Tiarella, Verbascum, Veronica, Vinca a Viola</i>

● Polointenzivní vegetace 15-20 cm

traviny	<i>Calamagrostis, Carex, Deschampsia, Festuca, Luzula, Sporobolus a Stipa</i>
trvalky	<i>Aloe, Betula, Brachyglottis, Buddhaja, Bupthalmum, Calluna, Ceanothus, Ceratostigma, Cichorium, Cistus, Cotoneaster, Cytisus, Echium, Eriogonum, Erysimum, Genista, Hebe, Heuchera, Jasminum, Juniperus, Knautia, Kniphofia, Lavandula, Li-</i>

bertia, Lonicera, Omphalodes, Perovskia, Phlomis, Pinus, Potentilla, Prunus, Rosa, Rosmarinus, Rumex, Salix, Salvia, Santolina, Sorbus, Spiraea, Stephanandra, Tellima, Tradescantia, Trifolium a Zauschneria

Rostliny pro malé střechy

Na zahradních domcích, garážích i autobusových zastávkách lze za méně extrémních podmínek očekávat snadnější adaptaci místních druhů. Rostliny doporučené pro použití na malých objektech jsou rozděleny pro substrát do tloušťky 10 cm a větší.

● Extenzivní vegetace 6-10 cm

Allium schoenoprasum, Alyssum maritimum, Anthoxanthum odoratum, Armeria maritima, Briza media, Campanula rotundifolia, clinopodium vulgare, Delosperma cooperi, Dianthus carthusianorum, Dianthus deltoides, Echium vulgare, Euphorbia cyparissias, Galium verum, Hieracium pilosella, Koeleria glauca, Koeleria macrantha, Linaria pilosocana, Lotus corniculatus, Orostachys boehmeri, Petrorrhagia saxifraga, Primulas veris, Prunella vulgaris, Saponaria ocyroides, Sedum acre, Sedum album, Sedum floriferum, Sedum hybridum 'Immergrünchen', sedum kamschaticum, Sedum reflexum, Sedum rupestre, Sedum sexangulare, Sedum spurium, Talium calycinum, Teucrium chamaedris, Thymus pulegioides a Thymus serpyllum

● Polointenzivní vegetace 10-20 cm

Achillea millefolium, Bupthalmum salicifolium, Calamintha nepeta, Campanula glomerata, Centaurea scabiosa, Coreopsis tinctoria, Lavandula angustifolia, Leontodon autumnalis, Origanum vulgare, Papaver rhoeas a Pulsatilla vulgaris

Závěr

Návrh skladebného uspořádání se odvíjí od volby typu zelené střechy, který musí respektovat statickou únosnost konstrukce. Projektant by měl investora seznámit s možnostmi výběru typu zelené střechy. Až poté je na řadě návrh vegetační vrstvy. Jelikož lze volit mnoho druhů rostlin, měl by se projektant s odborníky poradit, aby byla zajištěna funkčnost i komplexnost střechy. Výsledkem je funkční vegetační střecha jak po stránce architektonické, tak i estetické.

Článek vznikl za podpory projektů P104/10/P388 GA ČR a P104/10/1390 GA ČR „Analýza vlivu MW sušení při aplikaci chemických injektáží do vlhkého zdiva“

Literatura

- [1] Čermáková, B. – Mužíková, R.: Ozeleněné střechy. Praha, Grada Publishing 2009, 248 s. ISBN 978-80-247-1802-6
- [2] Extenzivní a intenzivní ozelenění střech [online]. [cit. 2013-03-29]. Liapor. www.liapor.cz/cz/extenzivni-intenzivni-ozeleneni-strech
- [3] Přednosti a význam zelených střech [online]. [cit. 2013-03-29]. Optigreen zelené střechy. www.optigreen.cz/News/1.html
- [4] Geprt, S.: Zelené střechy a střešní zahrady pro obytné budovy a stavby občanského vybavení, optimalizace skladby a použité vegetace. [Bakalářská práce]. Praha, ČZU 2012.
- [5] Teorie zelených střech [online]. [cit. 2013-03-29]. Gazda: Projektční a inženýrská činnost. www.gazda.webpark.cz/gr/theory.htm
- [6] Rozdělení rostlin [online]. [cit. 2013-05-22]. www.zive-rostliny.cz/rozdeleni-rostlin

- [7] [online]. [cit. 2013-03-29]. www.falcosystem.cz/files/Zelene-strechy.pdf
- [8] ČSN 73 1901 Navrhování střech. ČNI, 2011.
- [9] Štátník, S. – Vala, J.: K možnostem identifikace tepelných vlastností reflexních izolací se vzduchovými bublinami. Stavební obzor, **22**, 2013, č. 6, s. 157-161. ISSN 1805-2576 (Online)