

Vzduchotěsnost dřevěných konstrukcí a její tepelně vlhkostní souvislosti

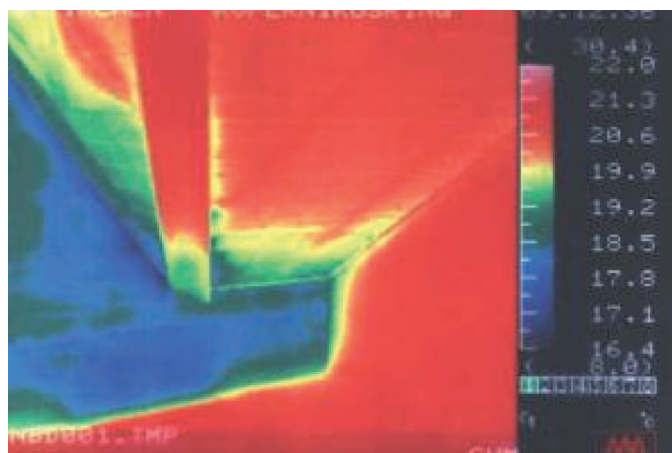
Zbyněk Svoboda, ČVUT v Praze

O tepelně vlhkostních efektech pronikání vzduchu stavebními konstrukcemi se až do 70. let minulého století prakticky vůbec nediskutovalo, a to nejen v tehdejší Československu. První významnější zmínky o citlivosti stavebních konstrukcí na pronikání větru začaly přicházet teprve v následujícím desetiletí ze Skandinávie, která je již tradičně v řadě oblastí tepelné ochrany budov na čele světového vývoje. Od té doby se kdysi poněkud s rezervou přijímaný severský požadavek na ochranu minerálních vláken protivětrnou vrstvou již nepovažuje ani u nás za něco mimořádného; výrobci zcela běžně zdůrazňují ve svých firemních materiálech nezbytnost zajištění vzduchotěsnosti konstrukcí, frekvence článků a příspěvků na konferencích o této problematice se výrazně zvyšuje.

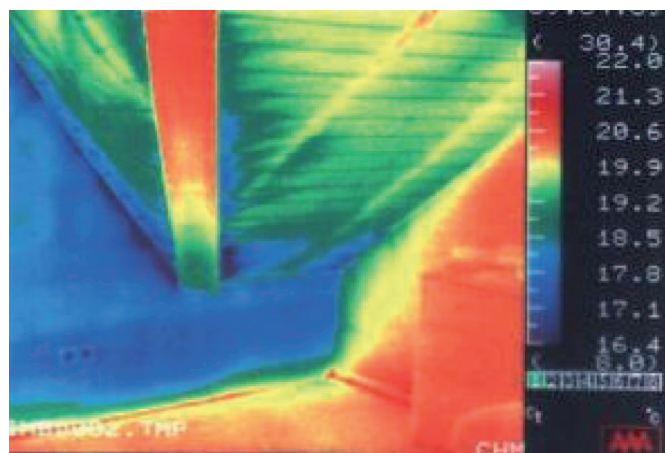
Uvedme úvodem alespoň několik důvodů, které způsobují zvýšený zájem o pronikání tepla a vodní páry prouděním skrze stavební konstrukce – a to především skrze dřevěné konstrukce. Prvním z nich je skutečnost, že dřevěné konstrukce obsahují ve velké míře **materiály s vysokou vzduchovou propustností**. Typickým příkladem jsou rohože a desky z minerálních vláken, které mají bez speciálních úprav velmi vysokou permeabilitu. Druhým z důvodů je jen zdánlivě paradoxně to, že soudobé dřevěné konstrukce mají většinou výrazně nižší součinitel prostupu tepla než tradičnější konstruk-

ce. U konstrukcí s vysokými součiniteli prostupu tepla nemá totiž konvektivní přenos tepla velký vliv – tepelná ztráta prostupem je u nich podstatně vyšší a případné zvýšení tepelné ztráty o konvektivní složku není podstatné. U modernějších konstrukcí, pro které je typická velmi malá tepelná ztráta vedením, však může konvektivní přenos tepla netěsnostmi **zvýšit tepelnou ztrátu** za určitých podmínek až o jeden řád oproti těsné konstrukci, jak dokládají i publikované výsledky experimentů, např. [2]. Třetím z důvodů, proč se více hovoří o proudění vzduchu přes konstrukce, je vzrůstající počet závažných vlhkostních poruch, způsobených právě šířením vodní páry prouděním skrze stavební konstrukce. Konvektivní složka transportu není zanedbatelná ani u šíření tepla, ale u šíření vodní páry může být již zcela zásadní. Vzduch totiž podstatně lépe přenáší vodní páru než teplo – a to především, je-li teplý. Velmi nepříznivě se tak u netěsných konstrukcí může projevit zvláště exfiltrace vnitřního vlhkého vzduchu konstrukcí z interiéru do exteriéru. Značné zvýšení hustoty toku vodní páry do konstrukce způsobuje v takových případech obvykle **vlhkostní poruchy** zcela mimo meze původního návrhu konstrukce (tedy takové, o kterých projektant ani neuvažoval, protože dimenzoval zcela jinak propustnou konstrukci).

Velice ilustrativní snímek dokumentující vliv netěsností je vidět na *obr. 1*. Na záznamu po-

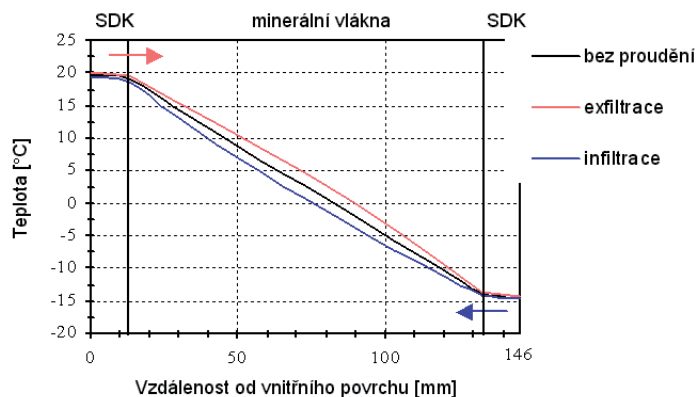


Tlakový rozdíl 0 Pa

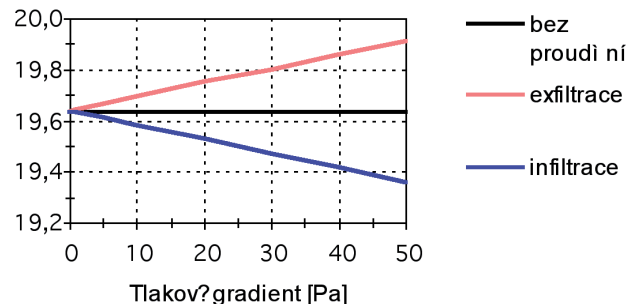


Tlakový rozdíl 50 Pa

Obr. 1 Záznam pohledu infrakamery na střešní konstrukci z interiéru (www.blower-door.de)



Obr. 2 Průběh teplot v lehké stěně s tepelnou izolací tl. 120 mm opláštované SDK deskami při tlakovém rozdílu 50 Pa



Obr. 3 Závislost vnitřní povrchové teploty na tlakovém gradientu pro lehkou stěnu

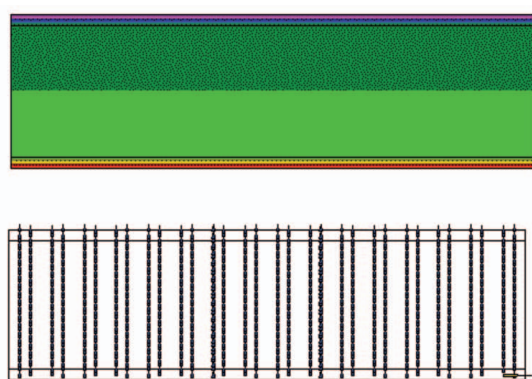
hledu infrakamery na zateplenou šikmou střechu je zcela zřetelně vidět pronikání chladného vzduchu směrem k interiéru při tlakovém gradientu 50 Pa (prokreslení latí a krokví). Pokles povrchových teplot činí až 2 °C, a to jde přitom o dosti kvalitně provedenou stavební konstrukci, protože tlakový gradient 50 Pa je poměrně vysoký. U skutečně netěsných konstrukcí lze zaznamenat mnohem výraznější poklesy povrchových teplot.

Není ovšem třeba začínat rovnou u poruch. I pokud budeme uvažovat zcela těsnou konstrukci, v níž ovšem není umístěna žádná speciální vzdu-

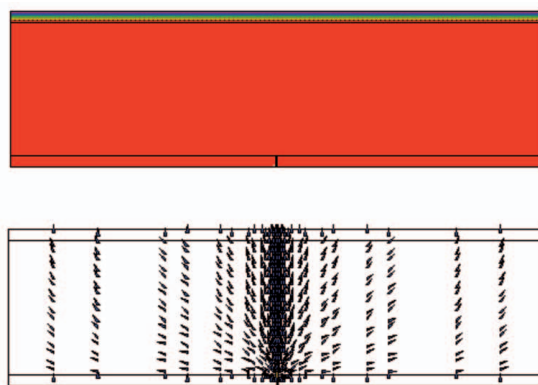
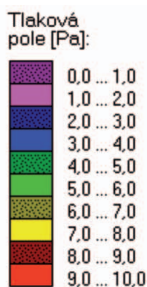
chotěsní vrstva, dostaneme zajímavé výsledky. Na obr. 2 je vidět deformace průběhu teplot v lehké stěně s tepelnou izolací z minerálních vláken tl. 120 mm s opláštováním sádrokartonovými deskami při infiltraci a exfiltraci, způsobené tlakovým gradientem 50 Pa. Za pozornost stojí i to, jak proudění vzduchu ovlivňuje **povrchové teploty** konstrukce. Na obr. 3 je uvedena závislost vnitřní povrchové teploty diskutované lehké konstrukce na působícím tlakovém gradientu. Zřetelně je vidět, jak při tlakovém gradientu 50 Pa snižuje infiltrace u hodnotené konstrukce vnitřní povrchovou teplotu o téměř 0,3 °C. Exfiltrace naproti

tomu vnitřní povrchovou teplotu zvyšuje – a to o zhruba stejnou hodnotu.

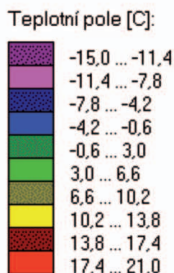
Změny v povrchových teplotách vlivem proudění vzduchu nejsou, jak je vidět, u určitých typů konstrukcí nijak zanedbatelné. Výsledky jsou zajímavé i proto, že hodnocená konstrukce byla uvažována jako celistvá, tzn. bez jakýchkoli netěsností a trhlin. Přesto se při vyšších tlakových gradientech vnitřní povrchová teplota změnila v řádu desetin °C. U méně vzduchově prodyšných konstrukcí (např. u konstrukce s parozábranou) by ovšem vliv proudění nebyl samozřejmě zdaleka tak výrazný. Na druhou stranu u konstrukce s netěsnost-



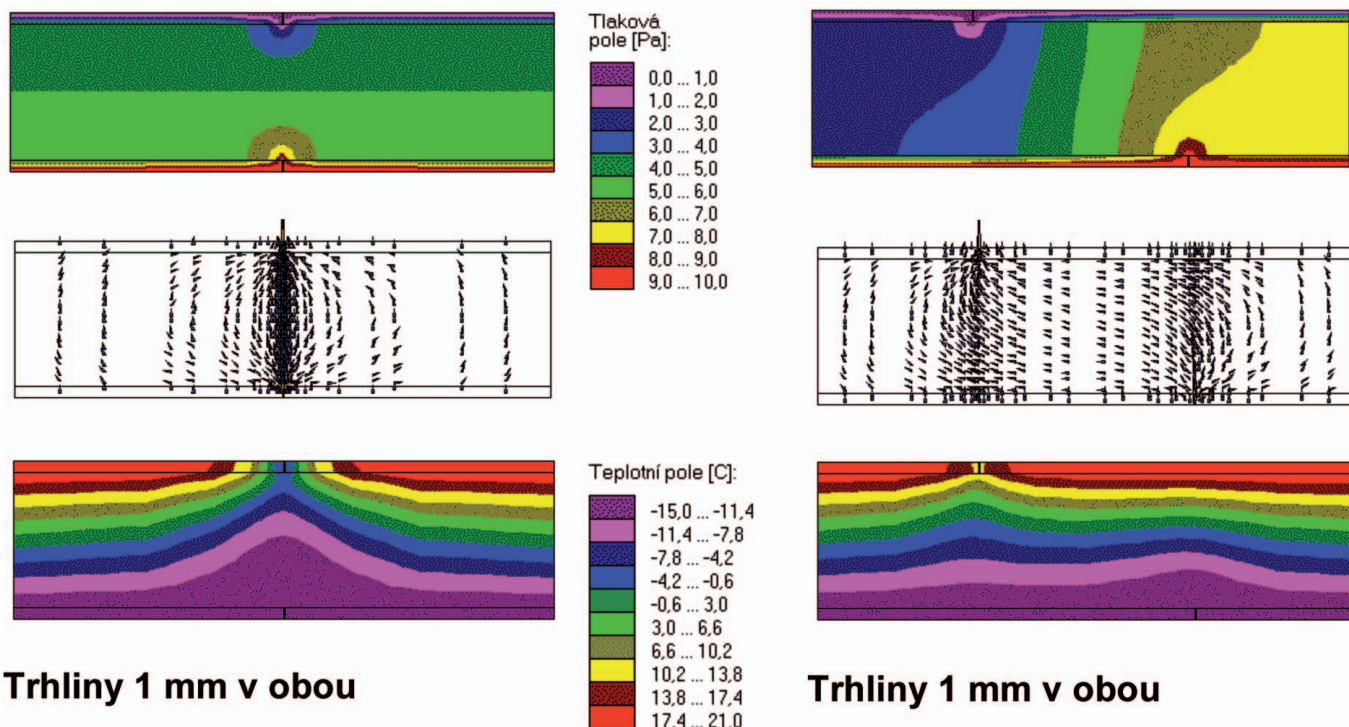
Konstrukce bez trhlin



Trhlina 1 mm ve vnějším sádrokartonu



Obr. 4 Rozložení tlaků, rychlostí proudění a teplot v těsné a jednostranně netěsné lehké stěně



**Trhliny 1 mm v obou
sádrokartonových deskách
umístěné proti sobě**

**Trhliny 1 mm v obou
sádrokartonových deskách ve
vzdálenosti 200 mm**

Obr. 5 Rozložení tlaků, rychlostí proudění a teplot v oboustranně netěsné lehké stěně

mi by tomu bylo přesně naopak, jak se lze snadno přesvědčit, pokud modelově porušíme vnější opláštění diskutované konstrukce trhlinou o zdánlivě zanedbatelné šířce 1 mm. Na obr. 4 je uvedeno rozložení tlaků vzduchu, rychlostí proudění a teplotních polí v těsné konstrukci a v takto porušené konstrukci. Grafické výstupy z programu Wind2D ukazují chování hodnocené konstrukce při infiltraci způsobené poměrně mírným tlakovým gradientem 10 Pa. Teplota vnějšího vzduchu byla ve výpočtech uvažována -15 °C, teplota vnitřního vzduchu 21 °C. Výsledky ukazují proudění vzduchu i skrze těsnou konstrukci – je ovšem natolik malé, že jeho vliv na teplotní pole se v uvedeném zobrazení nijak zřetelně neprojeví. Jakmile je ovšem vnější sádrokartonová deska porušena trhlinou, okamžitě se proudění vzduchu do konstrukce výrazně zvyšuje a způsobí již zřetelnou deformaci teplotního pole.

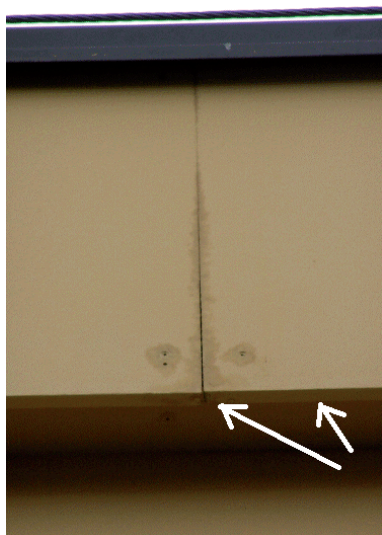
Ještě výraznější efekty lze očekávat, pokud bude netěsná i deska vnitřního opláštění. Na obr. 5 jsou zobrazena pole tlaků, rychlostí proudění a teplot v oboustranně netěsném opláštění minerálních vláken. V obou uvedených případech je již vidět značná deforma-

ce teplotního pole, která je způsobena snadným pronikáním vnějšího chladného vzduchu skrze prodyšnou tepelnou izolaci. Často se v souvislosti s těmito jevy hovoří o „prochlazování“ tepelné izolace; řada výrobců dnes doporučuje před tímto vlivem tepelné izolace z minerálních vláken chránit vhodnou „větrnou zábranou“, např. z difuzních fólií. Ti nejnáročnější dokonce začínají doporučovat i slepování jednotlivých pásů difuzní fólie, aby nemohlo docházet k pronikání vnějšího vzduchu do tepelné izolace v místě jejich překrytí. Obavy z „prochlazování“ tepelných izolací není sice třeba dramatizovat, ale rozhodně je nutné na ochranu proti pronikání vzduchu do konstrukcí pamatovat. Zcela neutěsněný obvodový plášť lehkých objektů či obytných podkroví se může totiž velmi negativně projevit ve značně zvýšených tepelných ztrátách místnosti, kvůli nimž pak může být i velmi obtížné za větrného počasí místnosti vytopit na požadovanou teplotu.

Pronikání vzduchu stavební konstrukcí může mít ale ještě závažnější důsledky než „jen“ velkou spotřebu energie na vytápění. Nezřídka totiž vede i k hygienickým či provozním závadám, způso-

beným masivní kondenzací vodní páry. Velice rizikové jsou z tohoto hlediska především dvouplášťové konstrukce s lehkými spodními pláště, jejichž těsnost zcela závisí na kvalitě provedení parozábrany. Typická realizace parozábrany mívá ale k dokonalosti dosti daleko. Velmi často může pak netěsnostmi pronikat do větrané vrstvy vnitřní vzduch a přinášet s sebou překvapivě vysoká množství vodní páry¹⁾. Důsledky si jistě umí každý zkušenější projektant představit sám – vzduch proudící ve větrané vrstvě není obvykle schopen zvýšené množství vodní páry odvětrat, ta kondenzuje v zimním období na vnitřním povrchu vnějšího pláště, často tam i namrzá a vytváří krápníky, z nichž zas odkapává dolů, vytváří vodní vrstvičku na parozábraně a netěsnostmi odkapává dolů do interiéru. Celý tento děj, kterého si rychle všimne i stavební fyzikou nijak nepoznamenaný laik, lze obvykle zaznamenat u chybně navržených či realizovaných střech hned první zimu – jde tedy o opravdu bleskový stavební fyzikální proces.

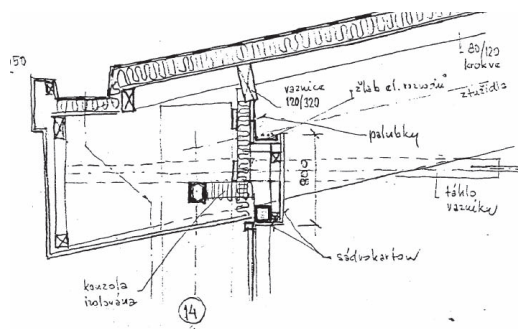
¹⁾ Přisávání vnitřního vzduchu přes netěsnosti je navíc podporováno větráním vzduchové vrstvy.



Stopy po kondenzátu



Pohled do dutiny



Řez obkladem římsy a detail

Obr. 6 Nevětraný obklad římsy bazénové haly

Poruchy způsobené zvýšenou kondenzací vodní páry v konstrukci se však nemusí objevovat jen u dvouplášťových střech. Stejně tak nebezpečně se může konvektivní složka transportu vodní páry projevit při exfiltraci i u jednoplášťových konstrukcí, které mají u vnějšího líce málo prodyšné vrstvy, zatímco z vnitřní strany mají vrstvy plošně propustné pro vzduch či – ještě hůře – porušené spárami nebo trhlinami. Výsledkem je opět masivní kondenzace vodní páry poblíž vnějšího povrchu konstrukce, přičemž množství kondenzující vodní páry může být při vyšších tlakových gradientech i řádově vyšší než u konstrukce s těsnými vnitřními vrstvami. Ilustrativní záběry jedné takové vlhkostní poruchy jsou uvedeny na obr. 6. Jednalo se o obklad římsy bazénové haly, který byl proveden z desek Cetris. Vzduchová dutina za obkladem nebyla nijak větrána a samotný obklad byl dosti těsný. Vnitřní vrstvy obsahovaly sice parozábranu, ale vzhledem k dosti komplikovanému tvaru římsy nebyla parozábrana ve všech místech zcela utěsněna. Během zimního období docházelo k poměrně značnému transportu vnitřního vlhkého vzduchu netěsnostmi ve vnitřním plášti do vzduchové dutiny pod obkladem, kde pak vodní pára velmi intenzivně kondenzovala na vnitřním líci obložení římsy. Kuriózní byla indikace této poruchy – kondenzát stékal po obkladu dolů, netěsnostmi vytékal ven a odkapával na chodník kolem celého objektu bazénové haly. I když se u uvedené poruchy jistě projevila i zvý-

šená difuze vodní páry skrze netěsnosti, konvekce zcela jistě svou významnou úlohu sehrála také. Stavební konstrukce jsou totiž prakticky stále vystaveny tlakovému rozdílu v řádu jednotek Pa, ať už vlivem tlaku či sání větru, nebo vlivem nuceného či přirozeného proudění vnitřního vzduchu (v prostoru diskutované haly byl například udržován mírný přetlak). Výjimkou však nejsou ani tlakové gradienty desítek Pa při citelnějším větru. Každá netěsnost je tak vždy nejen „difuzním mostem“, ale i mostem konvektivním.

Závažné vlhkostní poruchy způsobené pronikáním vzduchu mohou nastat ovšem nejen ve stavbách s vlhkým vnitřním mikroklimatem. Podívejme se pro ilustraci, jak poznamená konvekce zcela běžnou stavební konstrukci – zateplenou šikmou střechu s tepelnou izolací z minerálních vláken tl. 160 mm mezi krokvy, s parozábranou a pojistnou hydroizolací a s přídatnou tepelně izolační vrstvou tl. 40 mm pod krokvemi (mezi roštem pro sádkokarton). V takto navržené a pečlivě zrealizované konstrukci ke kondenzaci vodní páry v podmínkách běžné bytové zástavby buď vůbec nedochází, nebo jen velmi omezeně na spodním líci parozábrany pod krokvemi. Situace se může ale dosti dramaticky změnit, pokud-li vnitřní vrstvy konstrukce těsné. Předpokládejme například, že jak v sádkokartonu, tak v parozábraně se bude vyskytovat relativně malá netěsnost o šířce 1 mm, přičemž vzdálenost spár od sebe bude

500 mm – aby byl model konstrukce realističtější. Pojistnou hydroizolaci uvažujeme naopak beze spár, s volně přeloženými dílčími pásy. Vypočtenou oblast kondenzace vodní páry uvnitř popsané konstrukce ukazuje pro exfiltraci vzduchu způsobenou různě velkými tlakovými gradienty obr. 7. Výsledky platí pro běžné okrajové podmínky v zimním období, tj. pro vnější vzduch o teplotě -15°C a relativní vlhkosti 84 % a pro vnitřní vzduch o teplotě 21°C a relativní vlhkosti 50 %.

Z grafických výstupů programu Wind2D je zřetelně vidět zvětšující se oblast kondenzace vodní páry pod pojistnou hydroizolací poblíž pravé krokve – tedy v místě, které je prakticky přímo nad spárou v parozábraně. Ke kondenzaci vodní páry ovšem postupně – tak, jak se tlakový gradient zvyšuje – dochází pod pojistnou hydroizolací i ve zbylých částech mezikrokevního pole. Současně ke kondenzaci vodní páry v omezené míře dochází i na spodním líci parozábrany pod krokvemi – tato kondenzační zóna se s tlakovým gradientem nemění a objevuje se i ve zcela těsné konstrukci²⁾.

Pozoruhodné je i chování modelové konstrukce při infiltraci vnějšího vzduchu do interiéru, které je zaznamenáno na obr. 8. Výsledky výpočtu dokumentují, že oblast kondenzace se při infiltraci

2) Kondenzace v tomto místě je způsobena nepříznivým poměrem mezi malým tepelným odporem krokve nad parozábranou a vyšším tepelným odporem spodní přídatné tepelné izolace pod parozábranou.

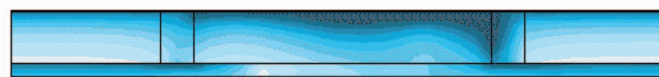

Těsná konstrukce, $\Delta P = 0 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 0 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 1 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 5 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 10 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 20 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 40 \text{ Pa}$

Obr. 7 Pole relativních vlhkostí při exfiltraci netěsnou šikmou střešou

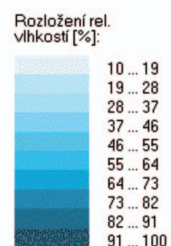

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 0 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 1 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 5 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 10 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 20 \text{ Pa}$

Netěsná konstrukce, $\Delta P = 40 \text{ Pa}$


Obr. 8 Pole relativních vlhkostí při infiltraci netěsnou šikmou střešou

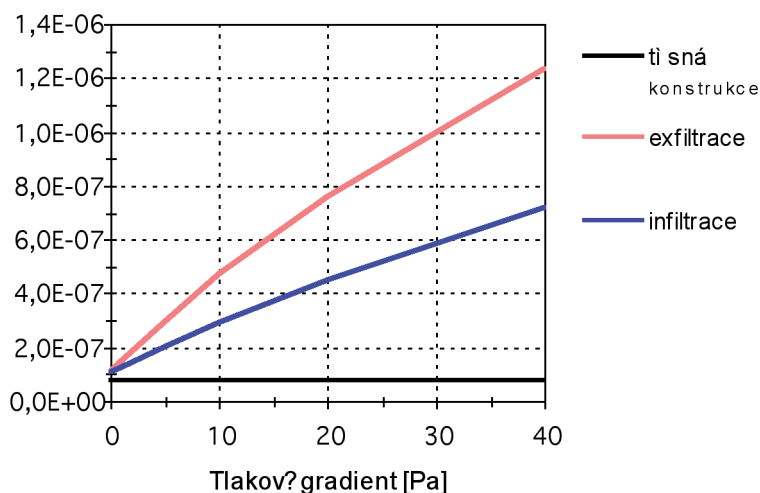
ani zdaleka nezvětšuje tolik jako při exfiltraci, i když množství vodní páry kondenzující v konstrukci s tlakovým rozdílem také stoupá. Při infiltraci se totiž odehrávají dva děje, které jsou orientovány z hlediska vlivu na kondenzaci opačně. Vnější chladný vzduch, který vstupuje ne zcela utěsněnou pojistnou hydroizolací do konstrukce, je totiž dosti suchý a sám o sobě přispívá spíše ke snižování vlhkosti v konstrukci. Navíc vzduch proudící konstrukcí do interiéru působí proti směru difuze vodní páry a tím ji omezuje. Na druhou stranu zas vnější vzduch ochlazuje tepelnou izolaci čímž způsobuje zvýšení míry kondenzace vodní páry na spodním líci parozábrany.

Na obr. 9 je názorně vidět, jakým způsobem zvyšuje proudění vzduchu skrze netěsnou šikmou střešou množství kondenzující vodní páry. Velmi výrazné je toto zvýšení především u exfiltrace, kvůli níž se při tlakovém gradientu 40 Pa množství kondenzující vodní páry

zvětší asi 15 x oproti těsné konstrukci. Infiltrace zvyšuje množství kondenzátu sice méně, ale zdaleka ne zanedbatelně – zhruba 9 x. Uvedené efekty jsou přitom způsobeny prakticky výhradně konvekcí, protože samotná zvýšená difuze netěsnostmi vyvolá nárůst

množství kondenzující vodní páry „jen“ o zhruba 30 %.

Výše uvedené analýzy tedy přesvědčivě dokumentují, že zajištění vzduchotěsnosti je pro moderní, silně tepelně izolované dřevěné konstrukce zcela zásadní. U dřevěných konstrukcí je



Obr. 9 Množství kondenzující vodní páry v netěsné šikmé střeše



Obr. 10 Vzduchotěsný prostup šikmou střešní konstrukcí (foto Ing. Jiří Novák, PhD.)

obvykle nejspolehlivější cestou návrh vzduchotěsných vrstev do skladby – v tomto směru dobře poslouží kvalitně provedené parozábrany a pojistné difuzní fólie. Jako alternativa mohou být v určitých skladbách použity i OSB či jiné desky s pečlivě přelepenými spoji. V každém případě je ale třeba dobře promyslet všechny detaily a především kontrolovat kvalitu provedení během realizace (obr. 10).

Tento článek byl podpořen grantem GAČR 103/07/514 „Dřevěné vícepodlažní budovy“.

Literatura

- [1] NOVÁK, J., *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*, Grada Publishing, Praha 2008.
- [2] WAGNER, H., Luftdichtigkeit und Feuchteschutz beim Steildach mit Dämmung zwischen den Sparren. In: *Zeitschrift für Wärmeschutz-Kälteschutz-Schallschutz-Brandschutz*, Grünzweig + Hartmann AG, Ludwigshafen am Rhein 1989, str. 27 – 31.