

# Přírodní materiály jako tepelná izolace: sláma a nejen ta

## Úvod

Na přírodní materiály coby stavební izolace se dosud mnozí dívají s nedůvěrou. Na druhé straně, pro izolování svých těl je odjakživa používáme běžně, před den oblečení, v noci víceméně vysvěcení v postelích. O tom, že tlustá peřina izoluje velmi dobře, stěží kdo pochybuje. Natož o tom, že teplokrevné živočichy chrání před chladem jejich srst či peří. Vždycky jde o vrstvy vláken, a převážnou část jejich objemu tvoří vzduch.

I záměrné tepelné izolování obydlí má v některých regionech svou tradici. Největší asi tam, kde se domy v našem slova smyslu vůbec nestaví. Vůbec nejlépe tepelně izolovaná tradiční obydlí bývají jurty kryté filcem. Filc bývá z ovčí vlny, ale může být i z jaků a snad i jiných zvířat. Pro samotnou konstrukci jurty by stačila jen jedna filcová vrstva, ale v zimě se jich používá až osm, v celkové tloušťce kolem dvaceti centimetrů (a tedy hodnotou  $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Takovou tepelnou izolaci má jen mizivé procento českých obydlí...

Jinou tepelnou izolaci používali dále na severu: sníh, navršený na konstrukci z kamení, hlíny, velrybích kostí a mrožích kůží, nebo (na západě Grónska a v Kanadě) rovnou jako konstrukční materiál. Kompaktní sníh izoluje alespoň dvakrát lépe než plné cihly, třiceticentimetrová vrstva propouští tedy asi  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  (iglú může mít jen poloviční tloušťku stěn, ale také půlmetrovou). Někdy může sníh izolovat i lépe než dřevo, není-li příliš hutný. Samozřejmě, teplota stěn uvnitř nemůže převýšit bod mrazu, a tak se v některých případech dovnitř zavěšovala vrstva kožešin. Takové iglú už jeho obyvatelé vlastními těly a lampami na tulení olej vyhřáli na teploty i přes deset stupňů.

Jinde se dočasné příbytky se izolovaly také rašelinou.

V našich zemích tepelné izolace nebyvaly základní součástí domů, jakžtakž izolující byly jen sruby z hodně tlustých kmenů (dřevo izoluje aspoň čtyřikrát lépe než cihly). Dost dobrou tepelnou izolaci ale mívaly venkovské domy přes zimu: totiž půdu zaplněnou slámou a senem. Teplo tak utíkalo jen skrze zdi a podlahu, strop býval krásně teplý. Vykližené půdy dnešních domů znamenají ohromnou ztrátu někdejšího komfortu.

## Čím vlákna, vločky a stébla izolují

Zamysleme se nad tím, jak vlastně různé izolační vrstvy snižují únik tepla z těl či domů nebo naopak přítok tepla z horkého prostředí. Dělaží to dvěma způsoby. Jednak brání proudění vzduchu kolem plochy, která nemá být ochlazována či ohřívána, a jednak brání průchodu záření. Někdy je podstatnější to, jindy ono.

Ohřev zářením je zásadní v případě přímého oslunění. Zářivé ochlazování je dominantní v noci za jasného nebe a bezvětří. Taková obloha je totiž asi o dvacet stupňů chladnější než pozemské okolí: je-li venku v noci na nule a je jasno, temeno bezvlasé hlavy s pokožkou teplou 25 stupňů do nebe vydává měrný výkon dvě stě wattů na metr čtvereční (naštěstí je temeno hlavy menší a kromě toho nechá náš organismus pokožku dle potřeby vystydnout na nižší teplotu, navíc kdo nemá vlasy, vezme si čepici).

Prostupu slunečního záření brání lépe tmavé vrstvy, vůči dlouhovlnnému záření, které vyzařujeme my sami, se ale jako velmi tmavá (pohltivá) chovají veškerá přírodní vlákna.

V izolační vrstvě, kterou se záření těžko prodírá, se v optimálním případě vzduch nepohybuje a většina tepelného toku pak probíhá srážkami molekul vzduchu, padá tedy na vrub tepelné vodivosti vzduchu. K tomu se přidává vedení vláknů (ta jsou tak pětikrát vodivější) a záření od vlákna ke vláknu. K vodivosti samotného vzduchu oba jevy přidají třetinu až polovinu.

Tok tepla je nepřímo úměrný tloušťce izolační vrstvy. A ovšem přímo úměrný rozdílu teplot, velikosti izolované plochy a vlastní tepelné vodivosti materiálu, která se označuje většinou písmenem lambda. Pro všechny izolační materiály, přírodní i tovární, přibližně platí  $\lambda =$

0,04 W/(m.K); odchylky nepřevyšují dvacet procent (jen nanočásticové velmi drahé materiály izolují dvakrát lépe, ve vakuových panelech dokonce pětkrát lépe).

Jinak je to ovšem, když izolační vrstvou vzduch proudí, ať již samovolně (konvekcí, teplejší směrem vzhůru, chladnější dolů) nebo vlivem proudění okolního vzduchu. Proto ve větru nebo na kole ohromně pomůže, když na svetr přidáme sebetenčí, ale hodně neprodyšnou větrovku. A proto mají zvířata vnější vrstvu srsti či peří co možná hustou a spojitou (pod bývají vlákna co možná drobná, aby skuliny mezi nimi byly malinké a proudění vzduchu hodně brzděno).

U vláknitých, prodyšných stavebních izolací je také zásadní, aby do nich vůbec nepronikaly poryvy větru. Vezmeme-li klasický případ slámy či sena na půdě, pomáhá malá prodyšnost střechy, dále lze pomoci, když přes vrstvu slámy přetáhneme málo prodyšnou textilii. Ještě méně prodyšný, a přitom pro páru výborně propustný je papír.

I za bezvětrí ale vzduch izolační vrstvou na půdě proudí, je-li dostatečně tlustá, zesponu vyhřívána a venku je mráz. Metrová vrstva slámy, tak nakonec ve velkém mraze neizoluje lépe než patnáct centimetrů pilin... To proto, že sláma je z izolačních materiálů ten nejprodyšnější, složený z nejtlustších vláken (stébel) s podobně širokými skulinami mezi vlákny. Konvekce se dá přibrzdit výše uvedeným zakrytím izolační vrstvy shora, aby proudění nemělo nahoře „zkřakat“ – volnou cestu bez nutnosti se prodírat mezi vlákny. Jde-li o velmi tenkou vrstvu, jen tak dvanáct centimetrů silnou, dokáže takové zakrytí úplně zabránit proudění uvnitř vrstvy. U tlustších vrstev mu ale nezabrání, a proto u nich izolační vlastnosti nerostou úměrně tloušťce, jak by měly. Alespoň ne za mrazů, kdy se v nich konvekce určitě rozvine.

Naštěstí existuje velmi snadné řešení: tlustou vrstvu rozdělit málo prodyšnými přepážkami na několik vrstev tenčích. Na každé je pak jen zlomkový spád teplot a konvekce se ani v mraze nerozběhne. U slaměné vrstvy celkové tloušťky čtyři decimetry stačí dělení na dvě poloviční vrstvy, u tloušťky 1,2 m stačí vrstvy tři. Pokud není jisté, že se podaří všechny stejně silné, je lépe jedno dělení přidat. Není to drahé, stačí na to libovolný papír, např. rozložené staré noviny s mírnými přesahy.

## Na podlaze půdy

Máte-li půdu hodně vysokou, můžete použít tři vrstvy balíků slámy (po 0,4 m) oddělené papírem a shora překryté lepenkou. Tu lze přitížit např. deskami, ale i hlínou nebo pískem, aby ji nepozvedával vítr. Táž vrstva zvýší ohnivzdornost izolace. Je možné použít i dlaždice nebo původní cihly půdní podlahy, které místo pod slámou můžou být na ní. Pod takovou důkladnou vrstvu tepelné izolace je nutné dát novou souvislou polyetylenovou fólii, jako vzduchotěsnou vrstvu i parozábranu. Měrná tepelná propustnost stropu pak bude menší než čtyři setiny wattu na metr čtvereční. Bude-li venku mínus dvacet, strop vychladne nejvýše o tři desetiny stupně oproti vzduchu v místnosti...

Nemáte-li slámy nebo místa tak moc, dobrý komfort poskytne i vrstva půlmetrová. Tu lze snadno vyskládat z rozebraných balíků – dají se z nich odlupovat vrstvy, které zůstávají poměrně dobře stlačené. Má to i výhodu, že bude stejnorodější – původní balíky jsou totiž velmi nedokonalé hranoly a důkladné docpávání škvír mezi nimi zabere dost času (výše uvedené úvahy o počtu vrstev rozdělených papírem jsou založené na tom, že vzduch nemá nikde cestu, kudy by se mu proudilo snadněji). Půlmetrovou vrstvu doporučuji sestavit ze tří částí, starých novin či jiného papíru nebo odpadní lepenky určitě není škoda. Nakonec bude vrstva mít nějakých osm setin wattu na metr čtvereční a kelvin, též uspokojivý výsledek. Výhoda takové rozprostřené slámy je i v tom, že stačí odskládat tvrdé zakrytí, prostříit, a získáme pohodlné lože třeba pro letní hosty...

Co se samotné tepelné izolace týká, jsou veškeré přírodní materiály pro instalaci v několika konvektivně oddělených vodorovných vrstvách rovnocenné. Sláma se na půdě dobře uplatní tím, že její vrstva může být dost tuhá, pochůzná. Je možné ji použít jen na poslední vrstvu nebo dvě a pod ní mít např. hobliny.

## Izolace zdí

Balíky slámy se stále častěji používají do zdí jako materiál výplňový, ale i konstrukční. Zejména ty obří, s minimálním rozměrem asi 0,8 m, jsou dostatečně tuhé a staví se z nich velmi pevné zdi. Z jižní strany takové domy mají velkorysý prosklení (viz např. <http://www.strohhaus.com>). Ze slámy se staví pěkně a rychle. Jen s omítáním je potřeba při použití malých balíků počkat, až se po zatížení krovem a střechou zdi sesednou (balíky musí být pro tento účel hodně slisované, s objemovou hmotností alespoň devadesát kilogramů na metr krychlový). Užívají-li se balíky jako výplň dřevěné konstrukce nebo izolační „přizdívka“, stačí, když mají jen 70 kg/m<sup>3</sup>. Balíky se většinou kladou tak, že provazy, kterými jsou svázány, zůstávají uvnitř zdi a stébla jsou orientována kolmo ke zdi. Ve směru podél stébel jsou totiž balíky nejpevnější a mají stále rozměry. Zeď se pak dá pěkně srovnat (mechanicky, např. palicí, a následně dle potřeby řetězovou pilou) a omítnout. Takové masivní slaměné stavby fungují výborně a jsou prakticky nekonečně trvanlivé (řada jich stojí už sto let). Izolují lépe než iglú a jurty. A nesrovnatelně lépe než běžné stavby z cihel či kamene.

Přesto, při vědomí že skutečně dobré domy má člověk po většinu roku vytopit svým vlastním metabolismem, stavbám ze slaměných balíků chybí něco k dokonalosti. Problém je v onom v samovolném tepelném proudění vzduchu, konvekci. Na rozdíl od vodorovných izolací na půdě, kdy se při malém spádu teploty a malé izolační tloušťce konvekce vůbec nerozběhne, ve svislých nebo šikmých izolacích (ve krovech) probíhá vždy. Je-li venku mínus deset, zhorší konvekce izolační vlastnosti slaměné izolace na polovinu.

Dokonalá náprava neexistuje, ale uspokojivá ano: rozdělit izolaci na více vrstev. Je-li izolace tlustá 0,4 m, stačí její rozdělení na tři vrstvy, lepší je ale rozdělení na čtyři vrstvy. Ve zdech je to obtížnější než na půdě, nelze tam prostě cokoli rozvrstvovat a občas překrýt papírem. Na druhé straně, z obřích balíků se dobře oddělují čtverce tloušťky tak jeden decimetr, které lze ke zdi přikládat a prokládat papírem. I malé balíky tak lze „loupat“, jen ty pláty mívají proměnlivější tloušťku. Tak jsme nainstalovali tři až čtyři slaměné vrstvy na jednu zeď budovy seminárního centra v Hostětíně, do připravených svislých laťových roštů v rozteči 80 cm. Alternativou by mohlo být postupovat ve vodorovných řadách, přičemž by se každá hotová řada silně přitlačila ke zdi dvěma vodorovnými latěmi s drátěnými táhly (jedno táhlo šikmo nahoru, druhé šikmo dolů, v rozteči odpovídající šířce plátů odlupovaných z balíků).

Vytváření kvalitní slaměné vrstvy na svislé zdi je dost pracné. To proto, že vrstva má být stejnorodá, bez málo stlačených míst. Kdekoli jsou mezi stébly velké mezery, tam vzduch proudí mnohem snáze, a taky se už velmi uplatňuje zářivý tepelný tok (už při sedmimilimetrových mezerách je stejně velký jako vedení tepla vzduchem). Vytvořit kvalitní vícevrstvou izolaci prokládanou papírem nedá méně práce než vytvořit jakžtakž homogenní, ale fyzikálně přesto nedokonalou přizdívku z malých balíků (ty totiž nejsou pravoúhlé, ale spíš válcovité, a vznikající dutiny nezbyvá než docpávat volnou slámou – tak jsme v Hostětíně izolovali o několik let dříve zeď skladu moštárny, při kladení balíků stébly na výšku).

Alternativou umožňující pohodlné vytvoření homogenních vrstev je instalovat slámu do dřevěných ráků na zemi a teprve ty vztyčit ke zdi. Zvláště snadné je to tehdy, když se na podlaze v montážní hale sestavují celé zdi budoucího domu. Tak to bylo v případě slavného domu firmy Natur und Lehm, který stojí v Tattendorfu jižně od Vídně – v jejich případě ale do konstrukce našlapali celé balíky a ne vrstvy slámy prokládané papírem (o problému s konvekci nevěděli; kdyby ano, snadno mohli postup upravit, protože sláma je beztak schovaná za šikmým deskovým bedněním, tuhost balíků nebyla podstatná). V hale na dřevoslaměné zdi nanесли i tlusté hliněné omítky a po jejich vyschnutí je po železnici přivezli na staveniště. Dům byl pak sestaven velmi rychle.

Pokud je dům už hotový a zeď se má izolovat dodatečně, je možné moduly s dřevěnou konstrukcí použít také. Konstrukce stačí subtilní, laťová, a jednotlivé moduly mohou být malé, řekněme o šířce necelého metru a výšce dva metry, s tloušťkou dle možností od tří do šesti decimetrů. Zadní strana modulů může být nejsnáze tvořena polyetylenovou fólií, čímž vznikne

pružná, mírně vypouklá plocha, která dobře přilehne ke zdi. Takové moduly nemusejí vážit více než šedesát kilogramů, takže s nimi mohou manipulovat dva lidé. Na zeď se modul připevní dvěma šikmými táhly z drátu vedoucího od spodní vnější hrany modulu ke hmoždinkám, které jsou o kus výše. Aby byl blok dobře přitlačený ke zdi v celé své výšce, hodí se přidat ještě další šikmá táhla v horní polovině modulu. Sklon táhel volíme podle toho, jak je modul těžký – má-li přes šedesát kilogramů, mohou být táhla odkloněná ode zdi jen o třicet stupňů (modul je pak na zeď tlačěn polovinou své váhy), u lehkých modulů může být vhodný sklon 45 stupňů. U takových, nebudou-li dost zatíženy omítkou, se navíc hodí použít i táhla opačná, směřující šikmo dolů (jednak pro důkladné přitlačení modulu ke zdi, aby za ním nebyly skuliny, a jednak aby jej nenadzvedl vítr svým sáním).

I když zadní strana bloků bude tvořena polyetylenovou fólií, je vhodné jinou, třeba jen tenkou fólií zavěsit předem na zeď. Ta vytvoří řádově vyšší bariéru pro průnik páry z interiéru do izolační vrstvy mezi bloky, než bude bariéra tvořená omítkou. Fólie zavěšená na zdi a přitlačená izolací není ale vzduchotěsná, protože je v ní mnoho otvorů v místě kotvení drátěných táhel. Vzduchotěsnost musí zajišťovat omítka nebo jiné vrstvy v interiéru (např. OSB desky s lepenými spoji a ještě přelepované trvale lepivými páskami).

Pro pohodlné připevňování bloků na zeď je vhodné ponechávat mezi nimi mezery široké jeden decimetr. Ty se pak vyplní třemi či více vrstvami slámy rovnou na zdi (je to jednodušší než vyplňování širokých polí, protože šířka jednotlivých vrstev nepřesahuje jejich hloubku, a ony tak během instalace nemají tendenci odpadávat). Místo papíru lze slámu v mezerách rozdělovat pruhy lepenky, které se zapřou o oba moduly.

Do takových laťových dřevěných rámců není nutné klást zrovna slámu. Stejně dobré je seno, hobliny, piliny, peří – jakékoliv lehké přírodní materiály. Jejich jediným účelem je pohlcovat záření a brzdit proudění vzduchu. U peří, sena i pilin by mělo vždycky stačit dělit čtyřdecimetrovou vrstvu na tři díly: jemnější vlákna a jemnější skuliny mezi nimi kladou proudění vzduchu větší odpor než hrubá textura slámy. Při užití sypkých materiálů se mezery mezi moduly vyplňují tak, že se lepenkou ohradí patřičné dutiny a pak se zasypou.

Výhoda slámy oproti ostatním materiálům je v tom, že i když má stébla podél zdi, dá se nahazovat omítkou. Pak je vhodné mít přední část modulu hodně rovinnou a stlačenou, toho lze docílit instalováním alespoň osmi vodorovných latí (po dvou decimetrech), které slámu přitlačují a udržují zhruba v rovině. Čelní latě, jsou-li dost široké, mohou být tlusté pouhý jeden centimetr, ušetří se tak na objemu omítky. Nevychází-li hodně slaměných stébel svými konci směrem ven, bude ale asi potřeba i obvyklá rákosová nebo drátěná rohož.

Pokud se má izolace obkládat, přední vodorovné latě nejsou potřeba. Stačí celou izolační soustavu překrýt spojitě papírem (proti větru a konvekci) a přitlačit obkladem, čímž se i zatlačí vypouklé polštáře izolační vrstvy v každém modulu. Obklad může být různě složitý: v Hostětíně na papírovou vrstvu přišlo šikmé bednění ob desku, pak mírně prodyšná textilie proti rozstříku dešťových kapek i poryvům větru (proudění vzduchu klade velmi vysoký odpor) a teprve pak vodorovný obklad z nenapuštěných modřínových desek. Není-li pod izolační vrstvou dosti souvislá polyetylenová fólie, nesmí být obklad ani mírně vzduchotěsný (coulová dřevěná vrstva je totiž větší bariérou pro vodní páru než cihlová zeď).

## Sláma ve zdech má tradici

Sláma jako stavební materiál se ve skutečnosti užívá už dlouho. Ve stěnách ve formě provazců omazaných hlínou nebo jako přídavek do hliněných cihel, na střeše coby krytina. Příležitostně lze u nás na venkově najít sto let staré vnější slaměné izolační vrstvy např. na chlévech (všimneme si jich jen tam, kde je opadaná omítka).

Ve formě balíků se sláma začala používat coby nosný materiál (na nosnosti se podílí omítka) v devatenáctém krátce po zavedení lisů v Nebrasce a jinde v USA. Nezávisle se z balíků stavěly domy coby východisko z nouze na Ukrajině a nejspíš i jinde. Dnes je ve vyspělé Evropě nových domů se slaměnou izolací už stovky. Nekladou-li se na ně nejvyšší nároky (tj. standardu

pasivního domu s  $U \leq 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), je taková technologie uspokojivá, poskytuje i při teplotách kolem nuly (letos vlastně nejnižších...)  $U$  kolem  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### ... ale zejména budoucnost

Na druhé straně, když už sláma může izolovat stejně dobře jako polystyrén téže tloušťky, pokud v ní je nulová nebo zanedbatelná konvekce, proč to nevyužít? Pak může půlmetrové souvrství ze tří až čtyř vrstev oddělených papírem propouštět méně než  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , nezávisle na tom, je li deset nad nulou nebo dvacet pod nulou. Dům, který o víkendu vytopíte, do toho dalšího nestačí vystydnout...

Vrstvené izolace z přírodních materiálů, pokud se aplikují šikovým způsobem, mají jednu velkou přednost: nemá smysl šetřit na jejich tloušťce. Už proto, že jsou levné – krychlový metr by neměl stát více než sto dvě stě korun, nepřírodní materiály stojí alespoň pětkrát víc. Slámy či přebytečného sena (stačí, ba lepší je seno nekvalitní, žluté, jen ne plesnivé) rozhodně není škoda, naopak: v budově je pak na desítky či stovky let uskladněn uhlík, místo aby zoxidovaný unikl do ovzduší. A pracnost izolování zdi nebo instalování izolační výplně do dřevěné konstrukce jen málo roste s tloušťkou izolace. Ve vhodně konstruovaných souvrstvích lze uplatnit i materiály sypké, typicky hobliny a piliny – opět je to lepší použití než s nimi zatopit, natož je nechat zetlít. Vrstvené izolace mají proti kompaktním balíkům slámy samozřejmě i nevýhody, a to malou vlastní pevnost, přinejmenším v tahu, a malou vlastní odolnost proti požáru. Pevnost v tahu musí poskytovat dřevěná konstrukce, odolnost proti šíření ohně pak souvislý dřevěný obklad nebo minerální vrstva. Na rozdíl od konstrukcí z omítnutých balíků, která prošly na výbornou důkladnými rakouskými a americkými požárními testy, pro vrstvené izolace testy ještě nebyly provedeny – nastává čas to napravit. Bát se ale vrstvených izolací určitě nemusíme, porovnáme-li to s praxí, když na půdě ležela sláma či seno volně... ostatně nějaká opuštěná hospodářství, kde nespotřebované seno leží na půdě už celá desetiletí, znáte možná i sami.

Oproti balíkům aplikovaným na staveništi mají moduly s dřevěnou konstrukcí ještě jednu výhodu: lze je připravit rychle a kvalitně ve vodorovné poloze v suchu pod střechou. Na stavbě se pak dají rychle instalovat i v proměnlivém počasí, aniž izolační materiál promokne. Udržet jej v objemu suchý je naprostá nezbytnost (orosení nebo milimetr strážek na povrchu nevádí, pokud má povrch možnost zase na větru či na slunci uschnout, vzpomeňme ostatně na stohy slámy venku – zaparí se a rozkládají nejprve uvnitř).

Jedinou hrozbou pro přírodní izolační materiály je totiž vlhkost. Zopakujme proto, že do izolační vrstvy nesmí pronikat žádný vzduch z interiéru, v zimě by z něj v chladné části izolace kondenzovala vodní pára. Dalším zdrojem páry je difuze přes vzduchotěsnou vrstvu; tam platí známé pravidlo, že na exteriérové straně izolace musí být odpor proti difuzi o řád menší než na interiérové straně. U dodatečně izolovaných zdí je to snadné, stačí běžné polyetylenová fólie pod izolací. Náročným případem je izolace neprovětrávané vodorovné střechy, na které stává voda (třeba ve vrstvě hlíny). Pod tepelnou izolací musí být zvláště důkladná bariéra proti difuzi, s kovovou vrstvou a tzv. ekvivalentní difúzní tloušťkou alespoň několika set metrů. Tlustá izolační vrstva musí být na boku difúzně otevřená do venkovního vzduchu. Tak jsme to provedli na ubytovací části hostětínského centra (izolace střechy má dvě vrstvy slámy oddělené papírem v celkové tloušťce čtyři decimetry, sláma nese celé zatížení hlínou a sněhem). Kovová parozábrana a boční difúzní otevřenost je také potřeba, když sláma tvoří podlahu budovy – tak to lze provést, když je podlaha umístěna nad terénem a má pod sebou provívaný prostor. Pro takovou dolní izolaci stačí užít nerozdělené balíky, protože nedochází ke konvekci (teplý vzduch se drží nahoře, chladný dole).

Ještě k obvyklému dotazu: „a co myši“? Ty umí bydlet ve všech izolačních materiálech, ale lépe se jim daří v polystyrénu a minerální vatě, protože vyhloubené chodbičky v nich vydrží. V přírodních pružných materiálech ne, okolní stébla či vlákna každý průlez zase zaplní. A slámou ani nekvalitním senem, tedy vlastně celulózou, se žádná zvířátka živit neumějí. Je-li takový materiál celou dobu suchý a po instalování do stavby je uzavřen minerální vrstvou či

obkladem, vydrží tam navěky. Materiály, které by mohly být poškozeny, jsou jen bílkovinné zvířecí produkty, vlna a peří. Pokud v nich ale nejsou larvy molů (ty lze zničit tepelnou sterilizací umístěním na hodinu do sauny, na rošt nebo v textilním pytli, aby se materiál prohrál konvekcí) a pokud se zabudují do vzduchotěsného systému, také mohou vydržet neomezeně. (Jinak se pro stavební účely vlna doplňuje pyrethroidy tak, že v ní larvy nepřežívají, pak už ale nestojí krychlový metr dvě stě korun... vhodné použití má v malých tloušťkách na interiérové straně konstrukce.)

## Konvekce kvantitativně

Vliv proudění na tepelný tok se vyjadřuje tzv. Nusseltovým číslem. Je-li rovno jedné, je to případ, kdy se proudění nijak tepelně neprojevuje, tepelný tok se realizuje jen zářením a vedením ve vzduchu a vedením ve vláknech. Je-li rovno dvěma, pak to znamená, že proudění snížilo tepelný odpor izolační vrstvy na polovinu. Jak ukazují americká a dánská měření, a jak také vyplývá z teorie, to je právě případ slaměných balíků v situaci, kdy je venku mráz.

Porézní izolační materiály proudění potlačují, kladou mu odpor. Odpor kladený prouděním lze charakterizovat jediným geometrickým parametrem, permeabilitou, která má rozměr plochy a značí se obvykle  $K$ . Porézní tepelně izolační materiály ji mají v rozmezí  $10^{-7}$  až  $10^{-10}$  metru čtverečního, lépe se to pamatuje v milimetrech čtverečních, kdy je to od jedné desetiny do jedné desetitisíciny. Nebo ještě lépe, jako odmocnina z této hodnoty, lze si ji představit jako jakýsi průměr kanálků, to je pak od tří desetin milimetru (balíky slámy) do setiny milimetru.

Abychom získali Nusseltovo číslo  $Nu$ , vyjdeme z modifikovaného *Rayleighova čísla*  $Ra_m$  pro porézní vrstvy.  $Ra_m$  je úměrné výšce porézní dutiny  $H$ , teplotnímu rozdílu  $T$  a permeabilitě  $K$ . Pro obvyklou zimní teplotu v dutině a obvyklé materiály s  $\lambda = 0,04$  W/(m.K) je to kolem

$$Ra_m = 0,7 (H / 1 \text{ dm}) (T / 10 \text{ K}) (K / 0,01 \text{ mm}^2).$$

Vodorovné homogenní vrstvy, i když v nich teplota klesá směrem vzhůru, zůstávají bez konvekce, pokud platí, že  $Ra_m < 40$  (nebo  $< 25$ , je-li vrstva nahoře otevřená, což by ale být neměla už kvůli možným poryvům větru). Nad tímto limitem platí  $Nu = 1 + 0,04 (Ra_m - 40)$ .

Ve svislých vrstvách, jimiž jde tepelný tok příčně, se konvekce odehrává vždy. Ale Nusseltovo číslo zůstává pod 1,1 je-li  $Ra_m$  nižší než 10.

Má-li konvektivní buňka čtvercový průřez (to může být případ stěn z balíků slámy, vlivem nehomogenity na rozhraní balíků) pak zhruba platí, že

$$\begin{aligned} Nu &= 1 + Ra_m/100 & \text{pro} & \quad Ra_m < 15, \\ Nu &= 0,8 + Ra_m/36 & \text{pro} & \quad 15 < Ra_m < 40, \\ Nu &= 1 + Ra_m/45 & \text{pro} & \quad 40 < Ra_m < 100. \end{aligned}$$

Jinými slovy,  $Ra_m=20$  zhoršuje izolační vlastnosti o třetinu,  $Ra_m=90$  třikrát.

Jak řečeno, sláma má  $K = 0,1$  mm<sup>2</sup> – to je hodně. Taková hodnota vyplývá z publikovaných měření i z měření, která jsem prováděl pomocí dlouhého polyetylenového vaku, dávajícího přetlak asi 1 Pa (měřené balíky měly objemovou hmotnost kolem 75 kg/m<sup>2</sup>). K tomu, že musí být řádově takto velká, lze k ní dojít ale i úvahou: reprezentuje totiž průřez typického póru. Kdyby byl čtvercový, pak by jeho hrana byla asi třetina milimetru, což je hodnota, která odpovídá stlačené vrstvě málo uspořádaných slaměných stébel. Sláma je ze všech izolačních materiálů nejhrubší, až na dřevěné štěpky (které už izolují zřetelně hůře), u všech ostatních vláknitých či vločkových materiálů, nemají-li objemové hmotnosti zvláště nízké, jsou póry tenčí.

Snížit modifikované Rayleighovo číslo lze buď snížením permeability, tedy přidáním dostatečně jemnozrnné frakce, nebo rozdělením vrstvy na menší buňky.

U vodorovné vrstvy nad vytápěnými prostory stačí rozdělení na dvě poloviny (např. papírem, lepenkou nebo jakoukoliv starou fólií se spoustou dírek).  $Ra_m$  se sníží čtyřikrát. Dvě vrstvy balíků (celkové výšky 80 cm) by měly bez rozdělení  $Ra_m$  kolem 175, je-li teplotní spád 30 K. Po oddělení vrstev přepážkou, která proudění klade velký odpor, se  $Ra_m$  zmenší na 45. Tak lze dosáhnout hodnoty  $U$  kolem 0,06 W/m<sup>2</sup>K.

Oproti tomu, pouhá jedna vodorovná vrstva standardních balíků má v takových podmínkách  $U$  velkou až  $0,3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ , a dvě neoddělené vrstvy asi stěží méně než  $0,2!$

Ve zdi to není tak jednoduché. Vodorovné oddělení balíků nemůže pomoci (možná může i vadit). 80cm dvojitá vrstva se svislou bariérou proti konvekci uprostřed dává sice hodnotu  $U$  pod  $0,1$  (tak je izolovaný tepelný zásobník moštárny a seminárního centra v Hostětíně), ale většina lidí dává přednost tenčím stěnám.

Při užití nasypávané izolace lze dutinu dělit vodorovně do vrstviček, jejichž výška činí nejvýše pětinu tloušťky dutiny, pak zůstává konvektivní příspěvek k vodivosti pod deseti procenty i při materiálu s permeabilitou  $0,1\text{ mm}^2$ .

Svislé bariéry proti konvekci jsou ale tepelně účinnější, ve vrstvě tloušťky 40 cm stačí vždy pouhé dvě.  $Ra_m$  (počítané z vodorovné tloušťky vzniklých komor místo z jejich svislého rozměru) klesá totiž devětkrát, z mrzutých 90 na velmi přijatelných 10.