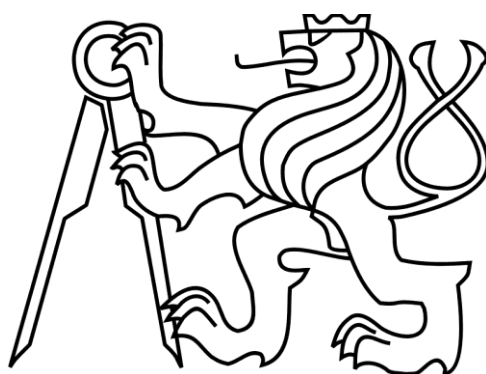


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



Využití přírodních materiálů ve stavebnictví

Habilitační práce

Prohlašuji, že jsem tuto habilitační práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Tímto bych rád poděkoval panu prof. Ing. R. Černému, DrSc., že mi umožnil spolupracovat na několika projektech, kde jsem získal velké množství poznatků a dovedností, které jsem využil při psaní této práce.

Využití přírodních materiálů ve stavebnictví

Utilization of natural materials in building
engineering

Anotace:

Cílem této práce je představit co nejširší spektrum přírodních materiálů a možnosti jejich využití ve stavebnictví. Přírodní obnovitelné materiály jsou stále brány spíše jako alternativa ke konvenčním uměle vyrobeným hmotám, přesto jejich využití může výrazně přispět ke snížení uhlíkové stopy a zároveň uchovat vysoký standard kvality bydlení. V úvodních kapitolách je popsána energetická náročnost životního cyklu stavební konstrukce a dále následuje popis a využití jednotlivých přírodních stavebních hmot. Byly vybrány především materiály vyskytující se v České republice a okolí. Dále se práce věnuje problematice ochrany stavebních památek. Právě historické stavby jsou z hlediska vytápění nevhodné kvůli únikům tepla. Je zde řešena problematika dodatečného vnitřního zateplení. Je vybráno několik přírodních materiálů jako tepelných izolantů. Jsou změřeny jejich materiálové charakteristiky a na jejich základě jsou vybrány 2 varianty pro ověření funkčnosti navrženého systému v podmínkách semi-scale.

Klíčová slova: *přírodní materiály, udržitelnost, vnitřní tepelná izolace, uhlíková stopa*

Abstract:

The aim of this work is to present the wide range of natural materials and their utilization in the building engineering. Natural renewable materials are still considered as an alternative to conventional synthetic materials, yet their use can significantly contribute to reducing the carbon footprint while maintaining a high standard of quality housing. The introduction chapter describes the energy consumption of the life cycle of the building construction, followed by the description and use of individual natural-based building materials. The materials occurring in the Czech Republic and its surroundings were mainly selected. The thesis also deals with issue of protection of building heritage. Historical buildings are uneconomical in terms of heating due to heat leaks. Work also discuss the issue of additional internal insulation. Several natural materials are selected as thermal insulators. Their material characteristics are measured, and on their basis are selected 2 variants to verify the functionality of the designed system in semi-scale conditions.

Keywords: *Natural materials, Sustainability, Interior thermal insulation, carbon footprint*

Obsah

Seznam použitých symbolů	3
1 Úvod.....	4
2 Cíl práce	8
3 Přírodní materiály a jejich využití pro stavební konstrukce	9
3.1 Dřevo ve stavebnictví.....	9
3.1.1 Masivní dřevo.....	13
3.1.2 Nejběžnější dřeva používaná ve stavebnictví.....	14
3.1.3 Materiály na bázi dřeva	16
3.1.3.1 Lepené lamelové dřevo	16
3.1.3.2 CLT Panely	16
3.1.3.3 Překližované desky.....	17
3.1.3.4 Laťovky	19
3.1.3.5 Dřevovláknité desky.....	19
3.1.3.6 OSB desky.....	20
3.1.3.7 Kombinované materiály	22
3.1.3.8 Desky spojené cementem.....	23
3.1.3.9 Zhuštěné dřevo	23
3.1.3.10 Dřevoplasty	24
3.2 Další celulózové materiály	25
3.2.1 Korek.....	25
3.2.2 Konopí.....	26
3.2.3 Juta	28
3.2.4 Celulózová izolace a foukaná izolace	28
3.2.5 Lněná izolace.....	29
3.2.6 Ovčí vlna	30
3.2.7 Sláma.....	32
4 Přírodní materiály pro vnitřní tepelně izolační systémy	34
4.1 Problematika vnitřního zateplení historických budov.....	34
4.1.1 Omítky.....	36
4.1.2 Výběr systému vnitřní tepelné izolace	41
4.1.2.1 Difúzně uzavřené systémy	41
4.1.3 Materiály pro difúzně otevřené vnitřní tepelné izolace.....	42
4.1.3.1 Dřevovláknité desky.....	42
4.1.3.2 Konopné desky.....	45
4.1.3.3 Ovčí vlna	45
4.1.3.4 Lněná izolace.....	45
4.1.3.5 Juta	46
5 Experimentální metody.....	47
5.1 Základní fyzikální vlastnosti	47
5.2 Difúzní vlastnosti	47

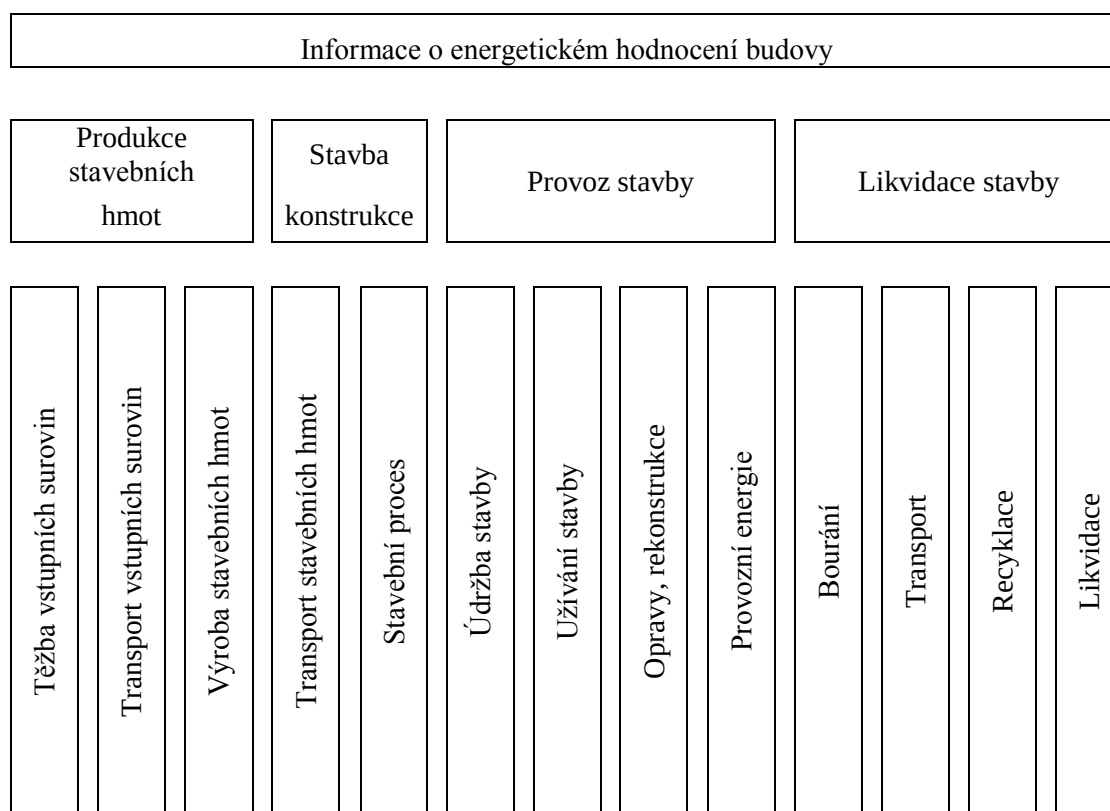
5.3	Transport kapalné vody	49
5.4	Sorpční izotermy	49
5.5	Tepelné vlastnosti.....	50
6	Vybrané materiály.....	51
7	Experimentální výsledky	53
7.1	Základní fyzikální výsledky	53
7.2	Difúzní vlastnosti	54
7.3	Sorpční izotermy	55
7.4	Absorpční koeficient vody	57
7.5	Tepelné vlastnosti.....	59
7.6	Mechanické vlastnosti	62
7.7	Analýza povrchu vláken studovaných materiálů pomocí elektronového mikroskopu.....	63
7.8	Experiment Semi-scale.....	65
7.9	Výsledky experimentu semi-scale.....	69
8	Využití dosažených poznatků pro návrh dodatečného vnitřního zateplovacího systému	73
9	Závěr.....	76
	Literatura	78
	Seznam obrázků	85
	Seznam tabulek.....	87

Seznam použitých symbolů

A	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}]$	absorpční koeficient vody
c	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
δ_a	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}]$	permeabilita vodní páry
δ_m	$[\text{s}]$	součinitel difúzní vodivosti
$\delta_{m,\text{corr}}$	$[\text{s}]$	opravený součinitel difúzní vodivosti
Δm	$[\text{kg}]$	přírůstek hmotnosti
Δp_v	$[\text{Pa}]$	rozdíl parciálních tlaků
d	$[\text{m}]$	tloušťka vzorku
d_a	$[\text{m}]$	šířka vzduchové mezery
D	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	součinitel difúze vodní páry
D_a	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	součinitel difúze vodní páry ve vzduchu
H	$[\text{J}]$	hustota entalpie
φ	$[\%]$	relativní vlhkost
κ	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	součinitel vlhkostní vodivosti
λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
μ	$[-]$	faktor difúzního odporu vodní páry
r	$[\text{mm}]$	poloměr pórů
R_g	$[\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$	molární plynová konstanta
S	$[\text{m}^2]$	plocha vzorku
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota materiálu
ρ_v	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	objemová hmotnost materiálu
σ	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$	povrchové napětí kapaliny uvnitř pórového prostoru
t	$[\text{s}]$	čas
T	$[\text{K}]$	teplota
ψ	$[\%]$	pórovitost
w_{cap}	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	kapilární obsah vlhkosti
w_{max}	$[\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$	maximální nasákavost

1 Úvod

Stále častěji se mluví o zhoršujícím se životním prostředí, globálním oteplení, změně klimatu. V důsledku lidské činnosti neustále stoupá produkce skleníkových plynů. Stavební průmysl se významně podílí na celkovém znečišťování životního prostředí, ať už je to těžením a spotřebou primárních zdrojů, produkcí skleníkových plynů při výrobě stavebních materiálů, transportem a převážením jednotlivých komponent na staveniště, stavebním procesem, ale i energiemi vynaloženými na provoz budovy, její údržbu, vytápění, ohřev vody, svícení. Dále pak likvidací stavby, uložením jednotlivých materiálů na skládku a podobně. Jak je vidět, je zde velký prostor pro dosažení energetických úspor a to ve všech fázích životního cyklu stavby. Všechny fáze jsou znázorněny na obrázku č. 1. Každá fáze je spojena s produkcí odpadu a spotřebou energie podílející se na znečišťování životního prostředí. Tyto úspory lze rozdělit do několika kategorií, jak popisuje norma BS EN 15978:2011 [1].



Obr. 1: Energetická náročnost jednotlivých etap stavby

Při výrobě stavebních hmot se velké množství energie spotřebuje při těžbě surovin, jejich transportu do zpracovatelského podniku a při výrobě.

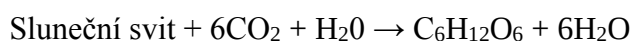
V současném stavebním průmyslu se hledí především na provozní náklady budovy a ty samozřejmě nejsou zanedbatelné. Důležité požadavky, definice ohledně energetické náročnosti

jsou uvedeny v normě ČSN 73 0540 1-4 [2-5]. Jedná se o energie uvolněné při užívání, údržby, provozní energie, energie na vyhřívání, chlazení, svícení, úprava vlhkosti vzduchu atp. Náklady na vytápění ovlivňuje hned několik faktorů najednou. Záleží na způsobu vytápění, zda je etážové, podlahové, stěnové, elektrické odporové, plynové, v mnoha případech pomůže nasazení tepelných čerpadel. Nemělo by se ani podceňovat pasivní využívání sluneční energie vhodnou orientací stavby ke světovým stranám. Výše uvedené parametry se snadno počítají a na jejich základě se stanovuje energetický štítek budovy. Asi největší potenciál pro energetickou úsporu představuje snížení součinitele prostupu tepla. Je velice účelné minimalizovat výše uvedené provozní energie, protože na základě jejich množství se vydává energetický štítek budovy.

Provozní náklady asi nejvíce ovlivňují náklady na vytápění. Ty jsou závislé především na součiniteli prostupu tepla obvodového pláště. Při snaze co nejvíce snížit součinitel prostupu tepla je nutné použít tepelně izolační materiály. Jelikož existuje málo konstrukčních materiálů s nízkým součinitelem tepelné vodivosti a dochází k neustálému zpříšňování norem ohledně součinitele prostupu tepla, je ve většině případů nutné novostavbu vybavit tepelně izolačním systémem. Zkrátka, tepelně izolační materiály se stávají nedílnou součástí obvodových plášťů pro neustále se zvyšující požadavky na tepelnou ochranu budov [6,7]. Běžně se používají ETICS (exterior thermal insulation composition system). V současné době existuje mnoho velice účinných syntetických materiálů s nízkou tepelnou vodivostí. Jedním z nich je polystyren mající nízký součinitel tepelné vodivosti a jeho velkou výhodou je jeho nízká cena. Minerální vlna je časem ověřená, účinná tepelná izolace, sice dražší než polystyren, ale oblíbená pro svoji delší životnost. Minerální vlna a polystyren jsou dva nejčastěji používané tepelně-izolační materiály[8,9]. Vedle těchto běžných izolací na se na trhu začínají prosazovat vysoce účinné izolace jako je vakuový izolační panel [10,11], aerogel [12,13]. Syntetických tepelně izolačních materiálů je mnohem více například fenolické pěny, polyuretanové izolace atp. Pomocí těchto syntetických izolací lze zkonstruovat budovu v nízkoenergetickém nebo pasivním standardu.

Moderní pasivní dům sice může mít velice nízké provozní náklady a nízkou spotřebu CO₂, ovšem z hlediska svázané primární energie může být velmi náročný. Energetický štítek budovy bere v úvahu pouze energie uvolněné při užívání stavby. Energie uvolněné při produkci stavebních hmot a následné likvidaci zde již zahrnuty nejsou. Samozřejmě stavebník se řídí finančními ukazateli, ovšem ty jsou značně zkresleny dotacemi. Pokud bychom jako hlavní ukazatel energetické náročnosti budovy brali uhlíkovou stopu, včetně výroby stavebních hmot a následné likvidace budovy, mnohé pasivní budovy by dopadly poměrně špatně. Právě uhlíkovou stopu konstrukce je možné snížit využitím bio-materiálů.

S výjimkou dřeva se většina současných stavebních materiálů vyrobí z neobnovitelných zdrojů, což představuje značnou zátěž pro životní prostředí. Jak již bylo zmíněno, negativní dopad začíná těžbou neobnovitelných surovin, přepravou ze vzdálených lomů a dolů, pokračuje energeticky náročnými výrobními procesy. Většina materiálů se po ukončení životnosti velice obtížně recykluje. Velké množství syntetických materiálů je možné nahradit přírodními organickými materiály. Ty jsou stále brány spíše jako alternativní materiály, přesto je možné je použít pro mnoho účelů, jako konstrukční materiály, akustické izolace, tepelné izolace nebo jako střešní krytinu. Velkou výhodou dorůstajících materiálů je jejich nízká ekologická zátěž a především obnovitelnost [14]. Během svého růstu do sebe rostlinné materiály díky fotosyntéze absorbují velké množství CO₂ a u mnoha bio-materiálů může převážet emise CO₂ během zpracování, předělání a výroby.



U rostlinných materiálů je vidět velký potenciál pro snížení uhlíkové stopy a k celkovému snížení emisí oxidu uhličitého. Důležitým faktorem při volbě materiálu by měla být celková spotřebovaná energie na výrobu materiálu (GWP – Global Warming Potential). GWP udává množství uvolněného CO₂ na výrobu jednotkové hmotnosti materiálu. Podobný údaj PEI Primary Energy Input - podává informaci o množství vázané primární energie v MJ/kg, který vypovídá o primární energii v daném materiálu. Jde o energii vynaloženou na získání suroviny, výrobu a dopravu materiálu. Přehlednou tabulku o bilanci materiálů uvádí J. Chybík v knížce Přírodní stavební materiály. Mnoho dorůstajících materiálů má zápornou hodnotu GWP [15,16].

Přírodní dorůstající materiály si v tomto ohledu vedou velice dobře, např. množství uhlíku emitované za účelem výroby tuny betonu je asi osmkrát vyšší než emise uvolněné při produkci tuny rámovacího řeziva. Podobné srovnání pro ocel ukazuje, že její výroba emituje asi 21krát více uhlíku než stejná hmotnost rámovacího řeziva [17].

Uhlíková stopa se sice stala důležitým tématem, ale rozhodně není jedinou otázkou k řešení. Jelikož lidé většinu svého života stráví uvnitř budov, Rath by mohl vyprávět, je důležité zabývat se také kvalitou vnitřního ovzduší. V samotném vnitřním prostředí se z materiálů mohou, ale třeba i z tiskáren, kopírek, počítačů[18], nábytku, uvolňovat chemické látky, které škodí lidskému zdraví, jde o tzv. syndrom SBS, Sick Building Syndrome. Ke špatné kvalitě vnitřního vzduchu přispívá také formaldehyd, který je vázán ve stopovém množství i ve dřevě [19]. Ve větším množství se může vyskytovat například v syntetických pryskyřicích a následně

v překližkách nebo v lisovaném dřevě [20]. Ve vnitřním prostředí se ale mohou vyskytovat další chemické látky, jako jsou dusičnany uvolněné při vaření na plynových sporácích [21], sulfidy, ozon, aldehydy, uhlovodíky atp. [22]. Kvalitu vnitřního ovzduší lze vylepšit vhodnou volbou materiálů. Například 1 kg ovčí vlny absorbuje do sebe 49,80 g formaldehydu [23].

Postavit novostavbu v pasivním standardu a dejme tomu i s nízkou uhlíkovou stopou nemusí být neřešitelný problém, ale stále mnoho stávajících budov má vysoké provozní náklady, díky nevyhovujícímu součiniteli prostupu tepla obvodové konstrukce. Jedná se především o historické, památkově chráněné budovy, jejichž vnější plášť nesmí být změněn. Počet takových budov tvoří 10-40% z celkového stavebního fondu [24].

Například v Praze začátkem 20. století byly velmi často stavěny cihlové konstrukce se železobetonovým nebo dřevěným stropem. Tloušťka obvodového pláště budovy byla většinou 30 cm a žádná tepelná izolace nebyla použita. Hodnota součinitele prostupu tepla U (W/m^2K) těchto budov je zjevně nedostatečná z hlediska současných standardů a požadavků. Je tedy velice účelné dovybavit tyto konstrukce dodatečnou tepelnou izolací, aby součinitel prostupu tepla odpovídal současným trendům úspory energie [25].

U většiny starších budov je možné použít exteriérové zateplení. Problém může nastat u památkově chráněných budov. Tam zkrátka nelze změnit vnější vzhled pláště budovy. V tomto případě je možné přistoupit k vnitřní tepelné izolaci. Vnitřní tepelné izolační systémy mají hned několik slabých bodů. Hlavním problémem je zvýšená úroveň vlhkosti a riziko kondenzace na studené straně stavby, často mezi konstrukcí a tepelnou izolací. Kondenzovaná voda podporuje růst plísní v budovách, může mít také negativní vliv na zdraví, pohodlí a trvanlivost stavby. Proto by měl být tento druh systémů vždy pečlivě analyzován.

Existují dvě hlavní možnosti, jak vybudovat vnitřní izolační systém, buď může být difúzně uzavřený, nebo otevřený za využití kapilárně aktivního materiálu. V kapilárně aktivní tepelné izolaci může být zkondenzovaná voda transportována zpět do interiéru. Materiály pro kapilární aktivní systémy vykazují vysoký koeficient absorpce vody. Jako kapilární aktivní materiál lze použít například křemičitan vápenatý [26,27], hydrofilní minerální vlnu [28,29]. Tedy syntetické materiály. Cílem této práce bude najít přírodní materiály pro difúzně otevřené vnitřní tepelné izolační systémy.

2 Cíl práce

Cílem této práce je poukázat na možnosti využití přírodních materiálů pro stavební konstrukce, kde mohou nahradit část stávajících syntetických hmot. Samozřejmě přírodní materiály nemohou zcela nahradit synteticky vyrobené materiály i nadále se výškové budovy budou stavět z betonu, oceli atp., ale přírodní materiály si mohou najít své místo v podobě tepelných, akustických izolací atp. V další kapitole je uveden přehled přírodních dorůstajících hmot a možnosti jejich využití.

Stěžejní část práce je věnována využití přírodních materiálů pro dodatečné vnitřní zateplení historických budov. Nejprve jsou vytipovány vhodné materiály pro vnitřní tepelné izolace. V experimentální části práce jsou změřeny jejich vlastnosti. Jedná se o základní fyzikální vlastnosti, transportní a akumulací parametry. Naměřené veličiny pak slouží jako vstupní parametry pro počítačové simulace. Na základě naměřených parametrů budou vybrány neperspektivnější materiály a na nich bude proveden laboratorní experiment semi-scale, na jehož základě lze potvrdit, nebo vyvrátit správnou funkci vnitřního tepelně izolačního systému. Cíle práce jsou tedy:

- Rešerše přírodních materiálů
- Problematika vnitřního tepelného systému
- Vytipování vhodných přírodních materiálů pro systém vnitřního zateplení
- Posouzení využití přírodních materiálů pro dodatečný vnitřní tepelný systém
- Naměření materiálových charakteristik vybraných materiálů
- Ověření funkčnosti dvou vybraných materiálů v podmínkách semi-scale

3 Přírodní materiály a jejich využití pro stavební konstrukce

Prívěťivost materiálu k životnímu prostředí by se měla stát neopomenutelným výběrovým faktorem. Přírodní materiály jsou zatím stále chápány jako alternativa k tradičním syntetickým hmotám. Moderním syntetickým materiálům, jak již úvodu bylo napsáno, se věnuje velká pozornost. Vyvíjejí se hmoty s velmi nízkou tepelnou vodivostí, betony s vysokou pevností atp. Vyvíjejí se chytré materiály, které mění své vlastnosti v závislosti na teplotě nebo vlhkosti. Například oxid vanadičitý v okenních tabulkách mění svoji strukturu v závislosti na teplotě a v oknech optimalizuje světelnou propustnost a tím reguluje teplotu v interiéru [30]. To je na ukázkou jen jeden příklad. Další příklad: interiér moderních domácností je vybaven technikou a řízen na dálku. Pokud vlhkost klesne, spustí se zvlhčovače vzduchu a naopak. Přitom tento konkrétní případ lze velice jednoduše vyřešit pomocí hliněné omítky. Hliněná omítka je čistě přírodní naprosto jednoduchý materiál mající vlastnosti sofistikovaných smart materiálů. Přírodních materiálů s minimální zabudovanou energií může být docela dost. V této práci se budu věnovat především dorůstajícím, tedy organickým materiálům. Nejprve budou popsány přírodní materiály a jejich možné využití ve stavebnictví. Dále je práce věnována využití přírodních materiálů pro vnitřní tepelně izolační systémy.

3.1 Dřevo ve stavebnictví

Dřevo je významná rostlinná obnovitelná surovina a jako stavební materiál se používá snad od pravěku. V porovnání se jinými běžnými konstrukčními materiály jako je cihla nebo beton má výborný poměr mezi hmotností a pevností [31]. Dřevo je možné různě zpracovat, technologicky upravit a zformovat do různých výrobků. Ze dřeva lze zkonstruovat stavbu od podlahy až po střechu. Je možné postavit nosnou konstrukci, podlahy, okna, krokve, latě, střešní šindele, jak je vidět na obrázku č. 2.



Obr. 2: Konstrukce dřevostavby

Obecně jsou dřevostavby považovány za komfortní, ekologické bydlení, vždyť na přípravu dřeva jako stavebního materiálu se spotřebuje mnohonásobně méně energie než na ostatní materiály [32]. Co se týče tepelných vlastností, nejsou na tom dřevěné konstrukce špatně, ale je nutné je kombinovat s tepelně izolačními materiály. To platí především pro roubenky z masivního dřeva. Pokud vezmeme v úvahu doporučenou hodnotu součinitele prostupu tepla dle normy ČSN EN 73 0540-2:2011 pro obvodový plášť rodinného domu $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ [2], hodnotu součinitele tepelné vodivosti smrkového dřeva $0,1 - 0,14 \text{ W/mK}$ [17], pak by srub z masivního dřeva bez tepelné izolace musel mít širokou stěnu více než půl metru, aby vyhověl současným normám a požadavkům na prostup tepla. Aby bylo dosaženo současným požadavkům a standardům je nutné masivní dřevo kombinovat s tepelnou izolací. Nutno podotknout, že současné dřevostavby se neskládají pouze ze dřeva. Současné nízkoenergetické nebo pasivní dřevostavby se proto staví spíše z kompozitů na bázi dřeva a od starých roubenek se svými vlastnostmi značně liší. V poslední době se klade velký důraz na energetickou úspornost, většinou se staví vzduchotěsné a difúzně uzavřené konstrukce. Velice oblíbené jsou dřevěné panely, respektive prefabrikované panelové konstrukce. Taková stavba pak postupuje velice rychle, jednotlivé panely se montují na sebe jako stavebnice. Stačí připravit základovou desku. Po omítnutí jsou pak tyto dřevostavby k nerozeznání od zděných domů. Podle Českého statistického úřadu počet dřevostaveb neustále roste, v roce 2017 bylo dokončeno 2159 domů s dřevěnou nosnou konstrukcí. Nejvíce staveb bylo postaveno technologií lehkého rámového skeletu. V roce 2018 bylo v ČR postaveno 18 287 rodinných domů a z toho 2 945 dřevostaveb

[33]. Energetická náročnost nově postavených dřevostaveb spadá podle energetického štítku do kategorie C – úsporná 32%, B – velmi úsporná 62 % a A – mimořádně úsporná 6%.

V současné době je na trhu opravdu široké portfolio dřevěných panelů složených z materiálů na bázi dřeva přenášejících mechanické namáhání a tepelně izolačním materiálem. Stavby z dřevěných panelů v nízkoenergetickém nebo pasivním standardu jsou velmi často neprůvzdušné. Vzduchotěsnost budov se měří pomocí Blower Door testu nebo jednoduššího Wincon testu. Metody jsou založeny na měření rozdílů tlaků mezi interiérem a exteriérem konstrukce. Podtlak o hodnotě 50 Pa v interiéru vznikne pomocí výkonného ventilátoru instalovaného do dveří nebo okna. Netěsnosti se pak poznají podle vzduchu proudícího dovnitř budovy. Tím, že je budova difúzně uzavřená vyvstává mnoho otázek ohledně zdravotní nezávadnosti vnitřního prostředí takové budovy. Větrání nemusí být vždy dostatečné, z toho vyplývá zvýšená vlhkost v interiéru a určitá místa mohou být mikrobiologicky kontaminována. Určitě by stálo za to tento problém podrobně prozkoumat, ovšem toto téma je mimo rámec této práce.

Na obrázcích 3 – 5 je zachycena stavba moderní dřevostavby pomocí technologie lehkého rámového skeletu.



Obr. 3: Konstrukce moderní dřevostavby

Na obrázku 3 je vidět nosná konstrukce dřevostavby zhotovená z dřevěných sloupků a fošen. Mezi jednotlivými dřevěnými prvky vzniknou dutiny, které jsou vyplněny tepelně izolačním materiálem.



Obr. 4: Konstrukce moderní dřevostavby



Obr. 5: Konstrukce moderní dřevostavby

Moderní stavba po omítnutí je k nerozeznání od zděných staveb. Vnitřní povrchy dřevostaveb jsou tvořeny většinou ze sádrokartonů. Samozřejmě je nutné přihlédnout ke křehkosti sádrokartonů a délkovým změnám dřeva. Z hlediska mechanických vlastností a křehkosti sádrokartonu je lepší použít dřevovláknité, případně sádrovláknité desky.

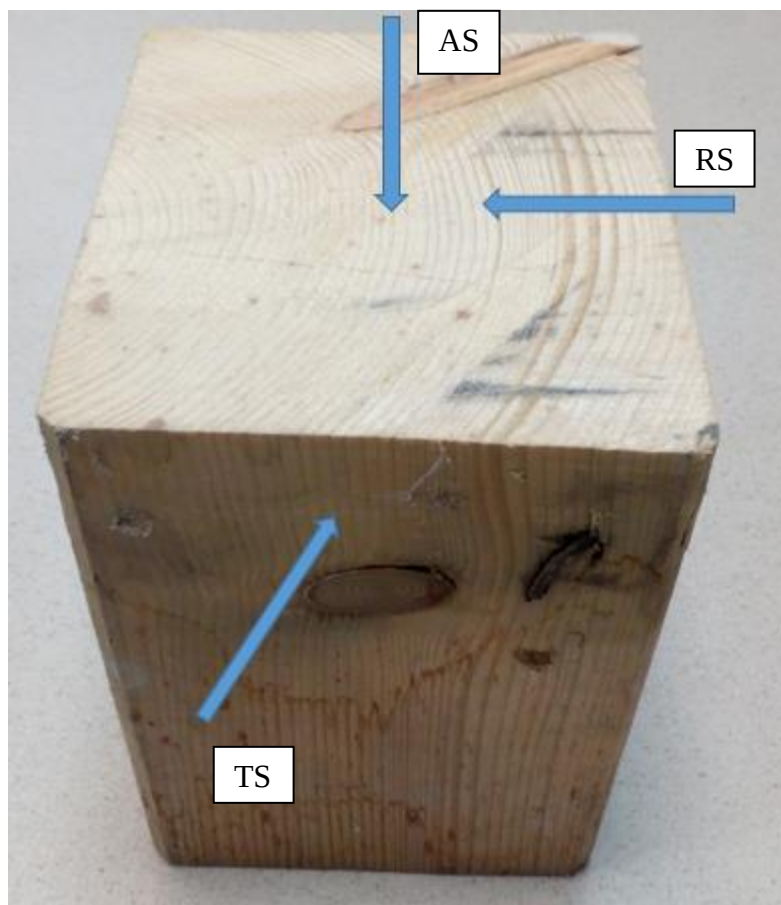
Jako střešní krytina se používaly dřevěné šindele, na současné dřevostavby je možné použít širokou škálu kvalitních střešních krytin.

3.1.1 Masivní dřevo

Masivní dřevo se získává především z mohutných stromů. Ty se relativně snadno opracovávají do formy kuláčů nebo hraněných trámů. V rozích pak jsou spojovány pomocí tesařských spojů. Masivní dřevo v interiéru vytváří příjemné prostředí. Jedná se o ekologický obnovitelný materiál, ale to netřeba dodávat. Dřevěné konstrukce je však nutné chránit před nepříznivými vlivy prostředí, protože dřevo může velice snadno degradovat. Na dřevo negativně působí UV záření, cyklické změny vlhkosti, zmrazovací cykly, dřevokazné houby, hmyz. Masivní dřevo může obsahovat i různé růstové vady, jako jsou suky, trhliny, nepravidelná struktura, nenormální zbarvení, deformace, poškození cizopasníky. Ochrana dřeva je tedy nutné věnovat velkou pozornost.

U staveb z masivního dřeva je nutné brát ohled na značné objemové změny. Ty se dějí ve třech směrech, přičemž největší jsou v tangenciálním směru. Paradoxně dřeviny s vyšší objemovou hmotností bobtnají více než dřeviny s nižší hustotou. Konstrukce z masivního dřeva může během jednoho roku nabobtnat nebo seschnout o několik centimetrů, je proto nutné pečlivě vyřešit všechny detaily, především napojení oken, dveří, příček. Orientační poměr mezi tangenciální, radiální a axiální změnou je přibližně 20:10:1 [17]. Záleží na druhu a hustotě dřeviny.

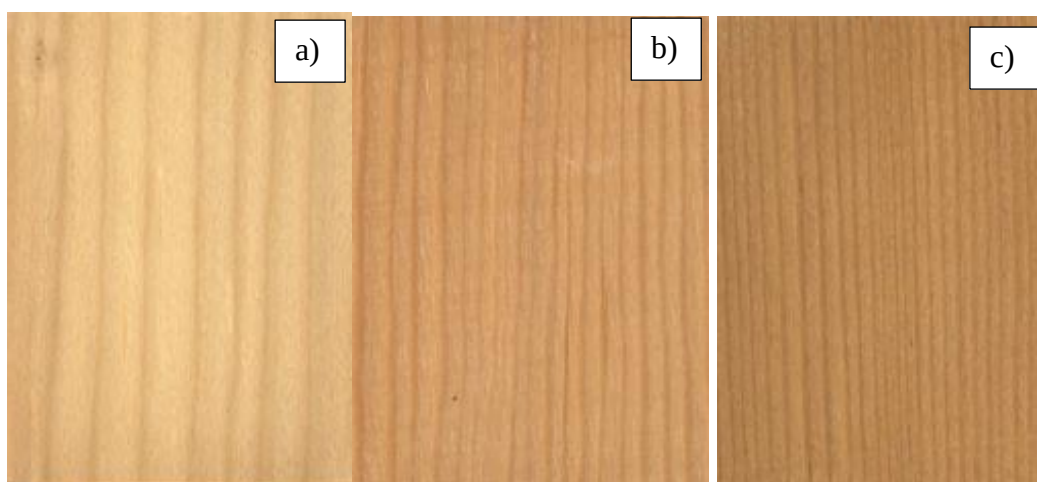
Deformace při navlhání lze redukovat. Samozřejmě nejlepší je omezit přístup vlhkosti do dřeva. Další možností je masivní dřevo rozřezat na několik kousků, které se slepí sobě. To se používá například u okenních rámců. Kvalitní okenní rám by měl být slepen nejméně ze tří kusů.

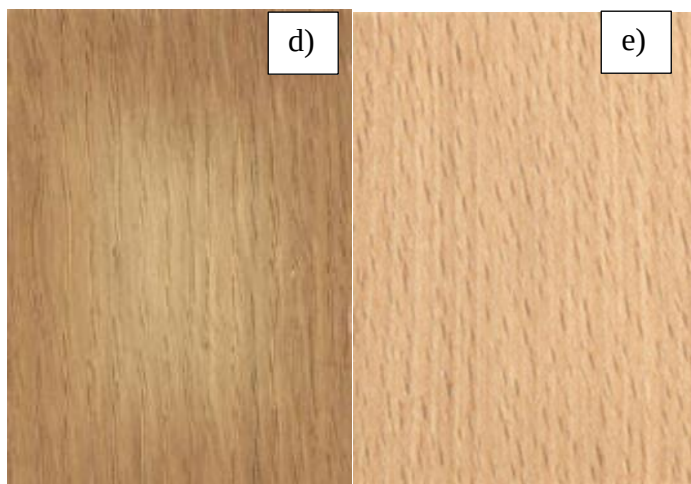


Obr. 6: Základní směry (AS – axiální směr, TS – tangenciální, RS – radiální)

3.1.2 Nejběžnější dřeva používaná ve stavebnictví

Mezi nejběžnější dřeviny rostoucí na našem území patří smrk, borovice, modřín, dub a buk. Tyto dřeviny se rovněž používají ve stavebnictví.





Obr. 7: Textura jednotlivých dřev a) smrk, b) borovice, c) modřín, d) dub e) buk

Smrk je na našem území velmi frekventovaná dřevina a velice často se používá ve stavebnictví. Jeho barva je bílá až lehce nažloutlá, jak je vidět na obrázku 7a. Jedná se o poměrně měkké dřevo s objemovou hmotností přibližně od 400 do 500 kg·m⁻³. Je snadno zpracovatelné, dobře štípatelné. Použitelné především v interiéru jako konstrukční materiál, pro výrobu nosníků, dobře se loupe, hodí se také pro výrobu dýh a následně překližek.

Borovice obsahuje oproti smrku více pryskyřice, tím pádem barva borovicového dřeva je o něco tmavší, je pevnější ale křehčí než dřevo smrkové. Pro vyšší obsah pryskyřic se borové dřevo špatně lakuje a moří. Ve stavebnictví se používá na výrobu dveří, oken, případně trámů a podlah. Díky vyššímu obsahu pryskyřice je oproti smrku trvanlivější.

Modřín je opadavá dřevina. Jeho dřevo je oproti smrkovému nebo borovicovému odolnější vůči exteriérovým podmínkám. Používá se proto na výrobu šindelů a obkladového dřeva. Vyrábí se z něho rovněž palubky a podlahy. Jeho barva je zpočátku žlutá, později přechází do tmavě červené. Oproti borovici je pevnější, používá se při vyšších nárocích na mechanické vlastnosti.

Dub: jedná se o listnatou dřevinu s vysokou objemovou hmotností. Dubové dřevo je pevné, tvrdé a houževnaté, proto se používá se při vysokých nárocích na pevnost a životnost. Vyráběly se z něj například mlýnská kola. Velmi vysokou, téměř neomezenou životnost má dubové dřevo pod vodou, čehož lze využít při zakládání na dubových pilotách pod hladinou podzemní vody.

Buk: oproti dubu má nižší pevnost a houževnatost, špatně se opracovává. Má načervenalou barvu. Špatně odolává střídavým vlivům vlhkosti, na suchu hodně sesychá. Používá se na výrobu dýh a překližek.

3.1.3 Materiály na bázi dřeva

Jedná se o materiály získané rozdělením masivní dřevní hmoty na menší části, které jsou opět spojeny. Tím dojde k eliminaci negativních jevů, jako jsou růstové vady a objemové změny. Dále k upotřebení menších částí stromů a rovněž dřeva nižší kvality. V některých případech lze zvýšit požární odolnost a odolnost proti biologickým škůdcům. U lepeného lamelového dřeva se oproti masivnímu dřevu zvýší mechanické vlastnosti, u překližek dojde ke snížení rozměrových změn a omezení anizotropie. Z materiálů na bázi dřeva je možné získat štíhlé konstrukční prvky jako je I nosník, kde stojinu tvoří např. OSB deska a pásnice mohou být z lepeného dřeva. Současné dřevostavby jsou konstruovány především z materiálů na bázi dřeva. Jednotlivé materiály na bázi dřeva jsou popsány v této kapitole.

3.1.3.1 Lepené lamelové dřevo

Lamelové dřevo je vhodné především pro velkorozponové konstrukce, jako jsou sportovní haly, divadla atp. Lamelové dřevo vznikne délkovým nastavením jednotlivých fošen pomocí zubovitého spoje do lamel a následným slepením několika lamel k sobě. Pro dodržení rozměrové stálosti je nutné, aby vstupní dřevo bylo suché. Lepení probíhá za zvýšeného tlaku.

3.1.3.2 CLT Panely

Zkratka CLT je z angličtiny a znamená Cross Laminated Timber, tedy křížem lepené dřevo. Jednotlivé vrstvy prken nebo masivního dřeva jsou lepeny kolmo na sebe. Používá se měkké dřevo, především smrkové. Jednotlivé vrstvy se lepí pomocí melamin-močovino formaldehydového lepidla, nebo polymerního izokyanátového lepidla. Může se použít i polyuretanové lepidlo, to je ovšem dražší. Lepení je nutné provést za zvýšeného tlaku. Toho může být docíleno pomocí hydraulického lisu, za využití vakuového lisu nebo pomocí utažení šroubů v lisu. Lepicí tlak by měl být minimálně 0,1 MPa. Výše spojovacího tlaku závisí na druhu dřeva, technologii nanášení lepidla, množství a druhu lepidla, drsnosti a přilnavosti povrchu [35]. Z CLT panelů je možné postavit i vícepodlažní budovy. Tato výstavba je v okolních zemích běžná, na našem území se teprve vyvíjí. V Miláně stojí sedmi podlažní budova z CLT, u nás by však nemohla být zkolaudována kvůli požárními normám.

Odolnost vícepodlažní konstrukce proti zemětřesení zkoušel A. Ceccotti a kol.[37]. Na stráscím stolku pro simulaci seismického namáhání postavil sedmipodlažní budovu z CLT panelů. Budova prokázala vysokou odolnost vůči zemětřesení, především díky dostatečné

tažnosti dřeva a nově vyvinutým tvárným spojům došlo k rozptýlení kinetické energie po celé budově a nedošlo k vážnější havárii. Vícepodlažní budovy z CLT se tak stávají velice zajímavou alternativou ke zděným nebo betonovým konstrukcím.

3.1.3.3 Překližované desky



Obr. 8: a) Překližka s kořenovou dýhou b) zhuštěná překližka, c) překližka pojená cementem 2, d) stavební překližka

Překližka se vyrábí z kvalitních dolních částí kmenů - oddenků, kde je co nejmenší počet suků. Na našem území se vyrábí z březového, bukového nebo borovicového dřeva, ve Španělsku z eukalyptu, v Číně z rychle rostoucího topolu.

Nejprve je kmen zbaven kůry, následně se musí plastifikovat. Plastifikace se provádí pomocí páry nebo vody při teplotě cca 60 °C. Při této teplotě dojde ke změkčení ligninu ve střední lamelě a zároveň nedojde k poškození celulózy. Plastifikací se sníží modul pružnosti, a zvýší se houževnatost dřeva a tím pádem se minimalizuje riziko poškození dýh při loupání nebo

krájení. Dýhy se speciální výraznou texturou Obr. 8a vzniknou excentrickým loupáním kmenů s vadou růstu a textury.

Loupáním vzniknou dýhy o tloušťce 2 až 4 mm. Krájením vzniknou dýhy tenčí a kvalitnější, obvykle používané pro povrchovou úpravu a okrasné účely. Dýhy je pak nutné vysušit, zastříhnout na požadovanou velikost. Z dýh se následně lepí překližky. Překližka vznikne slepením tří nebo více vrstev loupáných nebo krájených dýh (počet je vždy lichý). Typická tloušťka překližek je 3 – 18 mm. Jednotlivé vrstvy jsou na sebe kladeny tak, aby směr vláken na sobě ležících vrstev byl kolmý.

Pro voděodolné překližky pro stavební použití se nejčastěji používá lepicí směs na bázi fenolformaldehydu. Překližky určené pro truhlářské použití se lepí směsí na bázi močovinoformaldehydu. Tato pojiva se používají v praxi nejčastěji, je ovšem možné použít lepidla jiná, např. kličová. Fenolová lepidla mohou být různě modifikována [37].

Lepidla se modifikují zejména plnivý, úpravou viskosity, přidáním parafinu zvyšujícího odolnost proti vlhkosti, nebo v malém množství přídavkem bukové moučky [38].

Používají se k výrobě nábytku, například posluchárny Fakulty stavební ČVUT jsou vybaveny lavicemi a židlemi převážně z překližky. Vlhkostní vlastnosti překližky udává především povrchová úprava. Povrch překližek může být broušený, nebroušený, opláštěný nebo foliovaný. Pokud je povrch foliovaný, je pak překližka voděodolná, může být použita například pro bednění. Překližka obecně má vysoký faktor difúzního odporu vodní páry.

Překližka se používá na bednění. U výstavby, především u betonování výškových budov je žádoucí, aby bednění mělo dobré mechanické vlastnosti, především vysoký modul pružnosti, aby nedocházelo pod tíhou čerstvého betonu k nadměrnému průhybu [39]. Mechanické vlastnosti lze ovlivnit výběrem dřeva ale i technologií výroby, druhem lepidla. Vrstvy mezi jednotlivými dýhami lze vyztužit i uhlíkovými vlákny [40].

Technologií výroby překližky se zabýval D.H. Li a kol. [41], který provedl optimalizaci procesu lisování za tepla. K lepení použil chitosanem modifikovaný škrobový adhezivní film. Výsledky ukázaly, že spotřeba lepidla a teplota lisování za horka měly významný vliv na pevnost výsledné překližky. Interakce mezi teplotou, časem a spotřebou lepidla byla také významná. Optimální parametry procesu lisování za horka pro chitosanem modifikovaný škrobový adhezivní film byly: teplota lisování za tepla 145,2 °C, doba lisování za tepla 182,7 s a spotřeba adheziva 239,3 g / m².

3.1.3.4 Laťovky

Jádrovou vrstvu tvoří latě, jež mohou, ale nemusí být vzájemně slepené a jsou oboustranně pokryty dýhou. Laťovky se používají pro výrobu nábytku, parket a tenkých příček. Středová vrstva je vyrobena především ze smrkového dřeva. Laťovky s exkluzivním vzhledem jsou většinou pětivrstvé. Laťové jádro je oboustranně pokryto loupanou dýhou o tloušťce 2 až 4 mm, tzv. poddýžkou. Poddýžka může být z břízy, buku, topolu. Povrchovou vrstvu tvoří kvalitní tenká krájená dýha z drahé dřeviny, většinou o tloušťce 0,6 mm. Takové laťovky jsou vhodné pro výrobu nábytku, dveří, parket. Pětivrstvá laťovka a parkety z ní jsou vidět na obrázku č. 9.



Obr. 9: A) Pětivrstvá zdvojená laťovka, b) pětivrstvá laťovka

3.1.3.5 Dřevovláknité desky

Vlákna pro výrobu dřevovláknitých desek se vyrábí termomechanickým rozvlákněním dřevěných štěpek. Dřevovláknité desky s nižší hustotou mohou být vyráběny bez přídavku lepidla, jejich soudržnost je zajištěna přirozeným plstnatěním vláken a ligninem uvolněným při termické úpravě. Častěji se však využívá přídavku několika hmotnostních procent lepidla. Desky se lisují pod tlakem, čím vyšší tlak tím vyšší objemová hmotnost desek. Dřevovláknité desky se nejčastěji ve stavebnictví používají jako tepelně izolační materiál. Existuje široké spektrum dřevovláknitých desek, vyrábí se s různými objemovými hmotnostmi od velmi lehkých desek $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ až do objemové hmotnosti $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Desky s vyšší objemovou hmotností jsou schopny přenést mechanické namáhání. Jejich výhodou oproti ostatním tepelně izolačním materiálům je jejich vysoká tepelná kapacita dosahující hodnoty $2 \text{ } 100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Tyto desky se v různých modifikacích vyrábějí pro různé účely. Většinou se používají na

zateplení stěn a stropů, desky s vyšší objemovou hustotou dokáží přenést mechanické namáhání. Pevnost některých dřevovláknitých desek dosáhne až 8 MPa v tahu za ohybu. Jejich součinitel tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí $0.048 - 0.055 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Objemová hmotnost se obvykle pohybuje v rozmezí $110\text{-}160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Výsledné vlastnosti dřevovláknitých desek bez přidání lepidel jsou ovlivněny dobou lisování, teplotou, velikostí vláken a jejich úpravou [34].

Vlastnosti dřevovláknitých desek lze upravit pomocí přísad, ve většině případů se hydrofobizují pomocí parafínu. Nenasákavé dřevovláknité desky je pak možné použít pro zateplení podkrovní, do podlah jako izolace kročejového hluku. V mnoha případech mohou nahradit syntetické materiály s velkou energetickou náročností, jako jsou izolace z minerální vlny. Přestože se jedná o materiál na bázi dřeva, desky vykazují dobrou požární odolnost, ačkoliv reakce na oheň je E.



Obr. 10: Dřevovláknité izolační desky

3.1.3.6 OSB desky

Používají se záměrně rychle rostoucí dřeva o nižších hustotách. V ČR OSB desky vyrábí jediná firma Kronospan Jihlava. Ta používá z 80% smrkové dřevo a z 20% borovici. V Itálii rovněž vysadili celou plantáž rychle rostoucích topolů speciálně pro výrobu OSB desek [44].

OSB desky se vyrábí z orientovaných třísek, jak sám název napovídá: O – oriented S – strand B – board. Jedná se o plošný konstrukční materiál získaný slepením dřevěných třísek ve třech vrstvách, přičemž třísky v prostřední vrstvě jsou orientovány kolmo na třísky vnějších vrstev. Jako lepidlo se používá fenolformaldehydová pryskyřice, případně polyuretanové lepidlo. Lepidlová směs se dá různě upravit.



Obr. 11: Propojení svislých a vodorovných prvků



Obr. 12: Příklad využití OSB desek

Tyto desky se používají v současných dřevostavbách, kde kvůli vyšší produktivitě při výrobě a nižším cenám postupně nahrazují překližku. OSB desky se podobně jako překližky lepí při

170 °C až 190 °C. Lepení při 190 °C po dobu dvou hodin vede ke snížení bobtnání, povrch desky se stane hydrofobní, ovšem barva povrchu ztmavne.

3.1.3.7 Kombinované materiály

Kombinací dřeva, respektive jeho částí s dalšími materiály, třeba plasty, cementem nebo jinými pojivy vznikne kompozitní materiál. Jednotlivé kompozitní materiály se mohou mezi sebou kombinovat. Příkladem může být I nosník.

Pásnice I nosníku může být vyrobená z vysušeného ohoblovaného řeziva, ale i z vrstveného nebo lamelového dřeva. Stojina může být z OSB, jak je vidět na obrázku č. 13, jedná se o nejlevnější variantu. Lepší mechanické vlastnosti budou dosaženy s překližkou. Pásnice i stojina mohou být spojeny zubovitým spojem pro nekonečné nastavení.

Dřevěné nosníky se stávají běžným konstrukčním prvkem pro výstavbu rodinných domů. Mohou se použít v lehkých rámových konstrukcích. Mezi jejich výhody patří nízká hmotnost, vysoká tuhost a nižší náklady ve srovnání s masivním dřevem. Jejich výška umožňuje využití větší vrstvy tepelné izolace.

Mechanické vlastnosti na I nosnících byly zkoumány např. M. S. Islamem nebo Md. Shahnewazem (rok?). Aby byly zachovány mechanické vlastnosti, není možné řezat do příruby (pásnice). Do stojiny je možné vyříznout kruhové otvory, čtvercové nejsou vhodné pro koncentraci napětí v rozích podrobněji [45]. Při čtyřbodovém ohybu dochází k lineární deformaci až do porušení struktury. Pracovní diagramy jsou uvedeny v práci M. S. Islama [46].

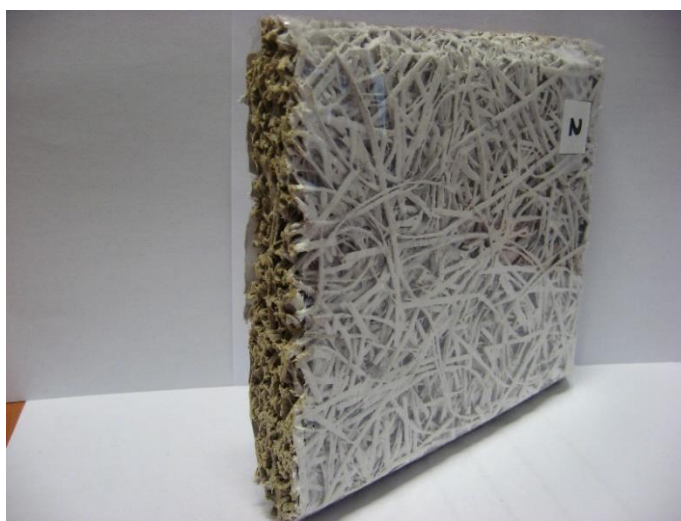
Oproti masivním trámům je I nosník výrazně lehčí, snadněji se s ním manipuluje. Je tvarově stabilnější a jsou minimalizovány vady dřeva. Nosník je schopen přenést značné zatížení.



Obr. 13: I nosník z materiálů na bázi dřeva

3.1.3.8 Desky pojené cementem

Desky pojené cementem vznikají smíšením dřevěných částic s minerálním pojivem, nejčastěji cementem. Kromě štěpek lze použít také třísky, vlákna, nebo dřevitou vlnu. Dřevo obsahuje látky, které zpomalují tuhnutí cementu, proto je vhodné dřevo před výrobou desek ošetřit. Velice efektivní je vyluhování dřevěných částic ve vodě, dále je pak možné dřevo mineralizovat pomocí vodního skla, velice účinné je alkalické ošetření dřeva [47]. Štěpko-cementové desky a desky z dřevěné vlny vykazují nízkou objemovou hmotnost v porovnání s cementovláknitými i cementotřískovými deskami. Je možné je použít jako ztracené bednění, případně jako tepelně izolační obklady.



Obr. 14: Deska z dřevité vlny pojená cementem

3.1.3.9 Zhuštěné dřevo

Zhuštěné dřevo je charakteristické vyšší objemovou hmotností. Té se dosáhne pomocí lisování při teplotách 140 – 160 °C při tlaku 10 až 15 MPa v prostředí nasyceném vodní parou, tedy v autoklávu. Tímto ošetřením dojde k odbourání hemicelulóz. Hemicelulózy jsou živinami pro dřevokazné organizmy, pro které se zhuštěné dřevo stane absolutně nezajímavé.



Obr. 15: Zhuštěné dřevo

3.1.3.10 Dřevoplasty

Dřevo je materiál poměrně náročný na údržbu, zejména v exteriérových podmínkách. Na výstavbu teras, plotů je možné dřevo nahradit dřevo-plastovým kompozitem (WPC – Wood Plastic/Polymer Composite) a výrazně tak snížit náklady na údržbu. Samozřejmě na úkor pořizovacích nákladů. Dřevoplast je na rozdíl od dřeva nenasákavý, s tím souvisí jeho dlouhá životnost a minimální náklady na jeho údržbu.

Hlavní složky tohoto kompozitního materiálu tvoří polymerní matrice, která obklopuje, spojuje dřevěnou složku. Polymerní část je tvořena termoplastem. Ten po zahřátí sníží svoji konzistenci a stane se tekutým, čímž je umožněna jeho zpracovatelnost a následné obalení a slepení dřevní moučky.

Vlastnosti čtyř různých dřevoplastových kompozitů testoval pod mým vedením ve své diplomové práci Bc. Tomáš Čermoch. Objemová hmotnost všech testovaných materiálů se pohybuje okolo $1300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, hustota matrice kolem $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Dále byl změřen faktor difúzního odporu vodní páry, jehož hodnoty všechny testované vzorky vykazaly vyšší než 120. Absorpční koeficient vody vyšel řádově v tisícinách $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}$. Při zkouškách mrazuvzdornosti všechny testované dřevoplastové kompozitní materiály odolaly 75 zmrazovacím cyklům [48].

Dřevo-plast je vhodné použít na fasádní pláště, terasy a všude kde je materiál vystaven náročným exteriérovým podmínkám.



Obr. 16: Dřevoplast

Funkci pojiva ve WPC plní plasty, jak bylo uvedeno výše. Z hlediska ekologie je tento materiál kontroverzní. Náhradou polymerní složky biologicky rozložitelným polyesterem získaným z čistě rostlinným materiálů by byl získán ekologičtější materiál. Jako biologicky rozložitelný polymer může sloužit například PLA – polymléčná kyselina [49].

3.2 Další celulózové materiály

Přírodní celulózové materiály byly poslední dobou vytlačeny umělými syntetickými materiály. Přitom celulózové materiály, jako je korek, konopí, len, juta mají velmi široké uplatnění. Například linoleum se vyrábí ze směsi lněného oleje, přírodních pryskyřic, korkové nebo dřevěné moučky, jutové tkaniny, mletého vápence a pigmentů. Tedy z čistě přírodních látek, ze kterých se neuvolňují jedovaté plyny. Přírodní materiály oproti syntetickým hmotám mají mnoho výhodných vlastností. Současný vývojový trend nasvědčuje tomu, že potřeba materiálů získaných z obnovitelných zdrojů bude neustále narůstat.

3.2.1 Korek

Korek jako stavební materiál se dá využít jako tepelná nebo akustická, především kročejová izolace. Získává se loupáním a následným zpracováním kůry z korkového dubu viz obr. 17. Kůra se na dubu cca po deseti letech obnoví a sklizeň může pokračovat. Korkový dub v Evropě roste v oblastech poblíž Středozemního moře. Kůra se dále namele a autoklávuje. Při autokláfování se uvolní pryskyřice, dojde ke slepení korku. Upravený korek je pak neprodyšný a proto se může použít jako uzavírací špunt pro vinné lahve. Ve stavebnictví je možné korek použít ve formě drti nebo lisovaných desek. Desky lze využít pro tepelné izolace fasád, dále pro ploché a šikmé střechy. Desky mají rovněž dobré akustické vlastnosti, je možné je použít pro izolaci podlah, kde slouží jako kročejová i tepelná izolace.



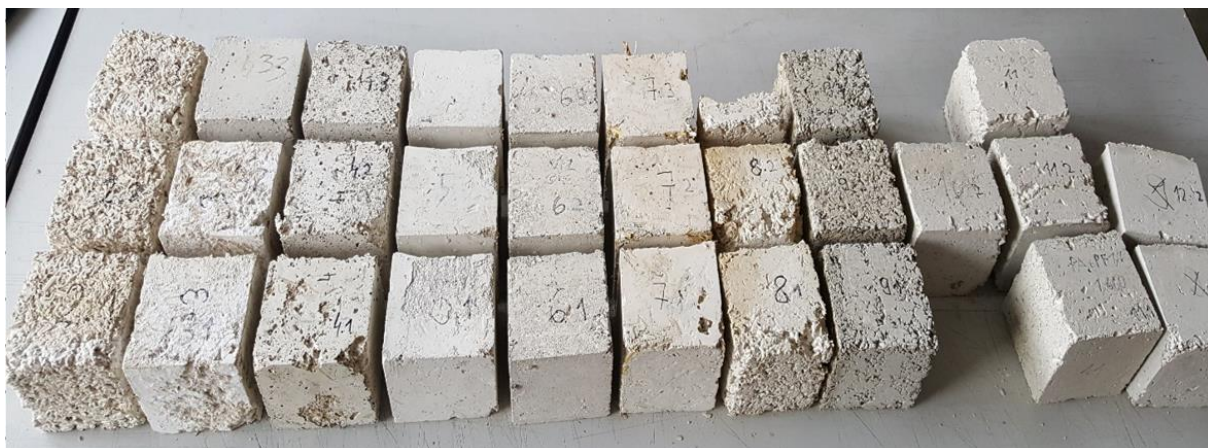
Obr. 17: Korkový dub ve Francii v oblasti Provence

3.2.2 Konopí

Konopí bylo v minulosti využíváno pro mnoho účelů. Vyráběly se z něho např. provazy, oleje, paliva, papír, látky pro oblečení. Samozřejmě nelze pominout léčivé účinky konopí, jako lék proti malárii, revmatizmu a jiným chorobám se používalo již několik tisíc let před naším letopočtem. V nedávné době bylo jeho pěstování zakázáno. Dnes je povoleno pěstovat konopí, které neobsahuje návykové látky. Rostlina konopí se skládá z kořene, stonku a z plodonosných vrcholů, v nichž u samičích rostlin po opylení dozrávají konopná semena. Pro stavební účely se používá především stonek rostliny. Vlákna stonku se používají na výrobu lan a provazů nebo se z nich dá utkat poměrně kvalitní plátno [50, 51]. Z konopných vláken se rovněž vyrábí tepelná izolace, která je svými vlastnostmi podobná minerální vlně, slouží k zateplení podkroví a alternativně by se mohla využít jako vnitřní tepelná izolace.

Ze stonku rostliny se získává konopné pazdeří. To se může použít při výrobě konopného betonu. Jako pojivo pro konopný beton se nejčastěji používá vzdušné vápno s pucolánovými příměsemi. Konopné pazdeří slouží jako plnivo. Vzhledem k tomu, že klasický beton na bázi cementu nese s sebou značnou ekologickou zátěž, je konopný beton hojně studován. Mezi výhody konopného betonu patří nízký faktor difúzního odporu vodní páry. Dále dobré tepelné izolační vlastnosti [84], schopnost regulovat vlhkost [85]. Naproti tomu velkou nevýhodou je dlouhá doba tuhnutí a tvrdnutí. Asi největší nevýhodou je nízká pevnost. Ve většině prací věnujících se konopnému betonu pevnost v tlaku nepřesáhla 1 MPa [43, 50]. Konopný beton je

vhodný pouze jako výplňový materiál. Je tedy otázka, zda se vůbec jedná o ekologicky šetrný materiál, zda by nebylo lepší vápno smíchat s kamenivem, získat tak konstrukci s delší životností a zateplit ji tepelně izolačním materiálem. Na obrázku č. 18 jsou vidět vzorky různých směsí konopného betonu. Jejich vlastnostmi se podrobně zabýval J. Vrzáň ve své bakalářské práci [50], kterou tvořil pod mým dohledem.



Obr. 18: Vzorky konopného betonu

Pro stavební účely se z konopí vyrábí tepelně izolační vlna pro izolace vnějších stěn pro novostavby i pro starší zástavbu. Konopnou vlnu lze použít jako izolaci podlah, stropů i jako nadkroevní a mezikroevní izolaci. Má svůj potenciál i pro vnitřní zateplení svislých stěn. Za účelem výroby vnitřní tepelné izolace se konopí začalo znovu pěstovat i v ČR. V roce 1996 bylo v Německu opět povoleno pěstování konopí, které neobsahuje návykové látky. V roce 2001 byly Francie a Německo největšími producenty konopí v Evropě, kdy přibližně 1500 hektarů konopí bylo pěstováno za účelem výroby konopné tepelné izolace [51]. Konopná izolace má měrnou tepelnou kapacitu $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$, součinitel tepelné vodivosti $0,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$, objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí $30 \text{ až } 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Výhodou této izolace je její malá objemová hmotnost a snadná a rychlá montáž. Součinitel tepelné vodivosti je přibližně stejný jako u polystyrenu. Další výhodou je čistě přírodní původ materiálu. Oproti polystyrenu má výrazně nižší faktor difúzního odporu, což může být výhodou při dodatečném zateplování starší zástavby.



Obr. 19: Konopná izolace

3.2.3 Juta

Jutovník (*Corchorus*) roste ve vlhkých tropických podmínkách. Hlavní pěstitelské oblasti jsou Indie, Bangladéž. Z juty se vyrábí příze, tkaniny, koudelky. Rostlina dosahuje výšky až 3 metry a obsahuje vysoký podíl ligninu.

Jutu je možné použít pro výrobu geotextilií, koberečářský průmysl či jako armovací materiál do omítkových vrstev. Juta se používá třeba i na výrobu linolea. Směs ze lněného oleje, dřevité nebo korkové moučky, pryskyřice, mletého vápence a pigmentů se za tepla lisuje na jutovou tkaninu. Po vysušení se linoleum povrchově upraví voskováním nebo naolejováním.

Tepelně izolační jutové desky se vyrábí recyklací jutových výrobků, například pytlů. Vzhledem k faktu, že jde o recyklovaný materiál je cena o něco nižší než u ostatních přírodních materiálů, ovšem vlastnosti jsou více než zajímavé. Např., mezikrokevní izolace Thermo Jute 100 má podle technických listů objemovou hmotnost $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, součinitel tepelné vodivosti $0,036 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a měrnou tepelnou kapacitu $2350 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [68].

V minulosti se dělaly i hliněné omítky vyztužené jutovou tkaninou.

3.2.4 Celulózová izolace a foukaná izolace

Celulóza je základní stavební složkou rostlin. Celulózová tepelná izolace se vyrábí z recyklovaného papíru. Výroba probíhá při teplotách 70 až 80 °C. K rozvlákněnému papíru se během výrobního procesu přidávají chemické látky pro zvýšení požární odolnosti, ve většině případů se jedná o kyselinu boritou (4% hmotnostní) a dále magnézium sulfát nebo síran hořečnatý (12 – 14 % hmotnostní) pro zlepšení odolnosti proti biodegradaci. Finální celulózový

materiál se používá jako tepelná i akustická izolace vnějších i vnitřních konstrukcí, především pro izolaci dutin, dvouplášťových střeš. Při volném foukání na vodorovné plochy se objemová hmotnost pohybuje v rozmezí $30 - 50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, při objemovém plnění dutin je to přibližně $34 - 70 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Dle technických listů firmy CIUR a.s. je možné provést i nástřik, kdy je celulóza smíchána s vodou a lepidlem. Nástřik lze aplikovat do tloušťky až 15 cm a lze jej využít pro vnitřní i vnější zateplení. Materiál je především určen jako výplňová tepelná izolace, pro vyplnění mezer mezi trámy, izolace podkroví, stropů, dvouplášťových střeš atp. Objemová hmotnost nástřiku s lepidlem je $45 - 90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, při nástřiku pouze s vodou $38 - 50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Tepelná vodivost je podle technických listů $0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, měrná tepelná kapacita $2020 \pm 6\% \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [65].



Obr. 20: Celulózová izolace

3.2.5 Lněná izolace

Len setý je jednoletá bylina mající na našem území velkou tradici. Pěstoval se především pro lněné vlákno pro oděvní průmysl a semena pro olej. Na rozdíl od konopí se pěstuje v horských a podhorských oblastech. Nepotřebuje žádné ošetření umělými hnojivy.

Ve stavebnictví se lněná vlákna dají využít pro tepelné izolace, olej pak pro nátěrové hmoty jako jsou fermeže. Z lněných vláken je možné vyrobit tepelně izolační materiál. Ke lněným vláknům lze přidat i vlákna další, například z recyklovaných materiálů, lýková vlákna atp., Výslednou vláknitou tepelnou izolaci je nutné ošetřit protipožárními a protiplísňovými látkami.

Používá se impregnace přírodní sodou. Výslednou lněnou vlnu je možné použít jako mezikrokevní izolaci případně, izolaci podlah.

Lněná izolace se v porovnání s ostatními materiály používá poměrně málo. Hlavním důvodem je přibližně dvojnásobná cena oproti minerální vlně. Na druhou stranu se jedná o ekologický materiál, snadno recyklovatelný, který přispívá k příznivému mikroklimatu v interiéru. Vědecká komunita se zabývá především využitím lněných vláken v kompozitních materiálech, ale jako tepelně izolační materiál stojí len stranou. O vlastnostech lněných izolací referuje např. Hanna-Riitta Kymäläinen. Lněnou izolaci lze vyrobit s objemovou hmotností od 5 do 100 kg·m⁻³ se součinitelem tepelné vodivosti od 0,035 do 0,075 W·m⁻¹·K⁻¹ v suchém stavu [51]. Lněná izolace je oblíbená hlavně v Nizozemí, kde se využívá pro systém dodatečného vnitřního zateplení. Součinitel tepelné vodivosti přibližně odpovídá dřevovláknitým deskám, měrná tepelná kapacita je 1550 J·kg⁻¹·K⁻¹, je tedy nižší než u dřevovláknitých desek, ale na druhou stranu je vyšší než u minerální vlny. Samotné lněné vlákno poměrně dobře hoří, proto je nutno jej ošetřit. Většinou se používá borová sůl nebo vodní sklo. Lněná izolace není schopna přenášet mechanické namáhání, používá se čistě jako výplňový materiál. Izolaci je možné použít pro vnější a teoreticky i pro vnitřní systém, pro izolování šikmých větraných střech za použití parobrzdné fólie.



Obr. 21: Lněná izolace

3.2.6 Ovčí vlna

Na rozdíl od výše uvedených materiálů je ovčí vlna živočišného původu. Jedná se o obnovitelný recyklovatelný materiál. Při jeho zpracování se spotřebuje velice málo primární energie. V současné době se především používá v textilním průmyslu, ve stavebnictví se

používá především jako tepelná izolace. Vyrábí se v objemových hmotnostech od $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje okolo $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Nižší tepelné vodivosti jsou zaznamenány především u izolace s vyšší objemovou hmotností. Firma Isolenwoole uvádí velice příznivou hodnotu 0,0339 u ovčí vlny s komerčním názvem Isolena Klemfilz s objemovou hmotností $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [71]. Obecně, ovčí vlna je hygroskopický materiál, je schopna pojmout až 35% hmotnostní vzdušné vlhkosti.

Ovčí vlna má charakteristickou vůni a příznivě ovlivňuje lidskou psychiku. Další její výhodou je, že reguluje vnitřní vlhkost v interiéru díky své vysoké hygroskopičnosti. Dokáže do sebe absorbovat vlhkost ze vzduchu nebo naopak, pokud dojde ke snížení vlhkosti vzduchu, dokáže ji uvolnit do okolí. Jedná se o přírodní, ekologický, obnovitelný a snadno recyklovatelný materiál. Při výrobě tepelně izolačních desek je ovčí vlna nejprve omyta vodou a mýdlem, aby byla zbavena tuku, povolené množství je 1%. Dále je vlna mechanicky kotvena na výztužnou tkaninu do požadované tloušťky [15]. Poté se přidají prostředky pro změkčování vláken a retardéry hoření. Součinitel tepelné vodivosti ovčí vlny byl měřen například na VUT v Brně za různých podmínek, respektive při různé teplotě, při různých objemových hmotnostech a vlhkostech. V suchém stavu, při objemové hmotnosti $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ při teplotě 40°C vyšel součinitel tepelné vodivosti $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, při teplotě 10°C vyšel $0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Sorpční izotermy byly měřeny při teplotě 23°C , v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 95 % dosáhne vlhkost v ovčí vlně 30% [52].

Ovčí vlnu lze použít také jako ochranu proti kročejovému hluku v podobě stlačených filcových pásů. Objemová hmotnost pásů je $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a vyrábí se v tloušťce 9 mm. Třída hořlavosti B. [71].

Ovčí vlna se v minulosti hojně využívala ve dřevostavbách. Pro upevnění oken a ucpání spár se užívalo provazců spletených z pramenů vlny omotaných nití. Objemová hmotnost provazců činí $196 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [71].



Obr. 22: Ovčí vlna

3.2.7 Sláma

Jedná s o suché stonky vymláčeného obilí. V zemědělství se používá jako podestýlka, každopádně její produkce převyšuje její spotřebu v zemědělství, a přebytky se stávají zajímavou komoditou. Vyrábí se z ní peletky na topení, ovšem může se využít i ve stavebnictví. Obilná sláma má sice dobrý potenciál pro stavební využití ovšem její uplatnění je poměrně nízké. Je možné ji bez pojiv slisovat do balíků o objemové hmotnosti 90 až 400 kg·m⁻³. Případně do panelů o objemové hmotnosti 340 – 440 kg·m⁻³. Dá se zpracovat čistě mechanicky bez použití pojiv slisováním do balíků. Energetická náročnost výroby je výrazně nižší oproti jiným materiálům. Do sebe absorbuje během svého růstu velké množství CO₂.

Slaměné panely je možné použít pro opláštění dřevěné kostry, jako příčky, podhledy, a obklady stěn.



Obr. 23: Slaměný panel

Pakliže je sláma slisována pod velkým tlakem v kombinaci s hliněnou nebo vápennou omítkou má překvapivě vysokou požární odolnost, někteří autoři uvádí až 90 minut. [15,16].

Slaměné panely jsou velice citlivé na působení vlhkosti. Je velmi důležité, aby lepenka tvořící povrch slaměného panelu byla dobře naimpregnována a nepropustila kapalnou vodu dovnitř. Vnikající voda uvolní vnitřní napětí v panelu a dojde tak k jeho nenávratnému poškození.

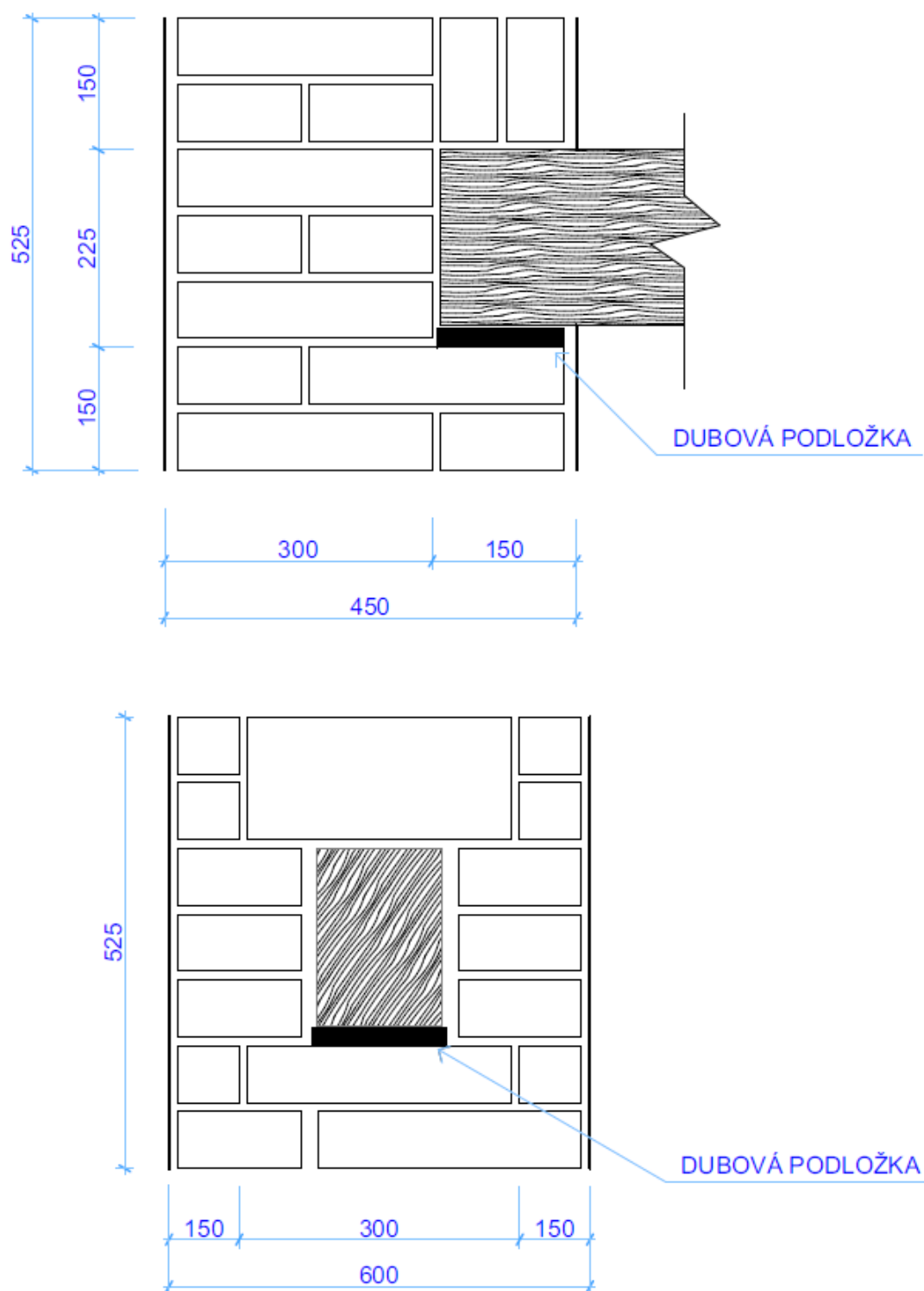
V Německu a Rakousku bylo postaveno několik pokusných domů, ale i administrativních budov ze stlačené slámy. U nás na tento typ budov nejsou normy a tyto budovy nemohou být zkolaudovány [15].

4 Přírodní materiály pro vnitřní tepelně izolační systémy

Vnitřní tepelně izolační systémy se začaly řešit nedávno v souvislosti s energetickými úsporami. Jsou značně problematické a vyžadují komplexní přístup včetně tepelně vlhkostní diagnostiky zateplovaneho objektu. Známa jsou zatím 2 řešení a to difúzně otevřený systém, nebo uzavřený systém. Oba systémy jsou vybaveny synteticky vyrobenými tepelnými izolacemi. Cílem práce je prozkoumat možnosti využití přírodních materiálů pro difúzně otevřený systém dodatečné vnitřní tepelné izolace. V první části kapitoly je popsána problematika a současný stav poznání ohledně vnitřních izolací. Vnitřní tepelně izolační systém představuje komplexní problém, proto je část této kapitoly věnována i omítkám, protože rovněž mají vliv na funkčnost celého systému.

4.1 Problematika vnitřního zateplení historických budov

Systém vnitřního zateplení s sebou přináší řadu rizik, a proto je nutné při jeho návrhu postupovat velice pečlivě. Stejně jako v případě exteriérového zateplení je nutné nejprve zabránit pronikání vody do konstrukce kapilárním vztlínáním z podzákladí stavby. Historické stavby byly chráněny proti vztlínající vlhkosti různými způsoby, např. jílovými izolacemi základů, či odvodem srážkových vod pomocí drenáží. V mnoha případech však nebyly stavby ve styku s terénem izolovány vůbec. Zvláštní důraz je nutné dát na řešení detailů, což je v případě vnitřního zateplení mnohem složitější než u exteriérového. Rizika mohou vznikat u napojení okenních, dveřních konstrukcí, u železobetonových věnců a v místech napojení stropních konstrukcí. Zejména dřevěné stropní nosníky ve zděných budovách představují zvýšené riziko kvůli kondenzaci vodní páry, a tím pádem vzniku plísní nebo dřevokazných hub. K inicializaci biokoroze dřevěných nosníků může dojít při teplotách kolem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $\text{RH} > 95\%$ [53]. Model pro biokorozi dřeva popsal ve svém článku např. M. Guizzardi [54]. Riziko vzniku plísní a růstu dřevokazných hub lze predikovat např. pomocí počítačového programu WUFI-bio. Příklad detailu, který by se měl při návrhu vnitřní tepelné izolace řešit velice pečlivě je vidět na obrázku č. 24, kde je napojen dřevěný trám na cihlovou zídku.



Obr. 24: Příklad detailu

Dále je nutné si uvědomit, že vnitřní tepelná izolace výrazně změní tepelně vlhkostní chování celé konstrukce. Během topné sezóny teplota ve zdi výrazně klesne. Jestliže teplota

klesne pod rosný bod, může dojít ke kondenzaci vodní páry mezi tepelným izolantem a nosnou konstrukcí. Kumulaci zkondenzované vody lze zabránit dvěma způsoby, použitím parozábrany, nebo použitím kapilárně aktivního tepelně izolačního materiálu, případně kombinací kapilárně aktivního materiálu společně s parobrzdou. Na trhu se vyskytuje několik kapilárně aktivních materiálů, které podle výrobců dokážou redistribuovat vlhkost po celém objemu tepelné izolace. V příhodném období tato vlhkost poté opouští konstrukci, aniž by došlo k porušení funkčnosti daného systému. Mezi takové materiály patří hydrofilní minerální vlna, kalcium silikát. Tyto dva materiály byly podrobně zkoumány na našem pracovišti v minulých letech. Na trhu se ovšem objevuje mnoho nových systémů. Zejména v Německu a Švýcarsku jsou oblíbené dřevovláknité desky vybavené parobrzdou. Jako další přírodní materiál mohou sloužit konopné desky, které jsou rovněž schopny rozprostřít vlhkost po celém svém objemu.

Velký vliv na chování celého systému mají i vnější omítky. Po aplikaci vnitřního systému se změní průběh teploty ve zdivu. Největší gradient teploty bude v tepelné izolaci, díky tomu bude v konstrukci nižší teplota, zdivo bude v zimním období více promrzat a tím může dojít ke snížení životnosti. Exteriérová omítka by měla zamezit transportu kapalné vody z exteriéru do interiéru, na druhou stranu by měla umožnit průnik vodní páry z interiéru do exteriéru. M. Guzzardi dokonce v závěru své studie uvádí, že exteriérová omítka má velký vliv na celkové chování systému vnitřního zateplení, dokonce vyšší než výběr tepelného izolantu [54]. Vhodnost impregnace vnější omítky potvrzuje i článek G. H. Finkena [55]. Na chování celého systému má vliv i vnitřní omítkový systém i spojovací vrstvy mezi konstrukcí a tepelně izolačním systémem. Omítkám je tedy nutné věnovat velkou pozornost nejen při návrhu dodatečného vnitřního zateplení.

4.1.1 Omítky

Omítka určuje celkový dojem vzhledu domu a ovlivňuje rovněž funkční vlastnosti konstrukce. První omítka vznikla již v neolitické době a v průběhu tisíciletí se neustále měnila, přijímala různé formy. Omítky stejně jako všechny materiály prošly několika tisíciletým vývojem. V hluboké minulosti se používaly hliněné omítky. Hlína z místních zdrojů rozdělaná s vodou sloužila k vyplňování proutěných konstrukcí pravěkých chat a následně i omítání. Hliněné omítky se používaly v hluboké minulosti, ale v současné době dochází k jejich renesanci a objevují se i na trhu v podobě suchých směsí. Mezi jejich přednosti patří schopnost pohlcovat vodní páry a vytvářet zdravé mikroklima, pohlcovat pachy a jsou vhodné pro alergiky. Používají se při rekonstrukcích i v novostavbách, nanášet jdou téměř na jakýkoliv

povrch. Štuková vrstva se prodává v několika barevných odstínech, pomocí kterých lze docílit poměrně luxusního vzhledu. Další výhodou hliněných omítek je jejich nízká cena, na druhou stranu, oproti cementovápenným omítkám mají kratší životnost.

Do hliněných omítek byly postupem času přidávány další materiály pro zlepšení jejich vlastností, jako je sláma, kamenivo, zvířecí chlupy, později vápno. Vápenné omítky jsou známy již od 2 tisíciletí př. nl. Od té doby se pozvolně měnily a vylepšovaly. Postupem času do nich byly přidávány různé příměsi pro zlepšení jejich vlastností, známé jsou například pucolánové příměsi, jako například sopečný písek [56]. Vzdušné vápno se postupně měnilo na hydraulické, zlepšovaly se technologické postupy výroby vápna [57]. Vyvíjela se i technologie omítání. Začaly se používat trojvrstvé omítkové systémy. Roku 1824 byl J. Aspdinem patentován cement a od té doby se začaly používat vápenocementové omítkové směsi. Na začátku 20. století byl velice oblíbený břizolit. Až do této chvíle byla kontinuita vývoje omítek postupná, ale v posledních letech nastal prudký vývoj. Tento vývoj byl zpočátku veden snahou o snížení provozních nákladů na vytápění budov. Vápenocementové omítky byly postupně vylehčovány náhradou drobného kameniva za tepelně izolační materiál. Tím vznikaly tepelně izolační omítky se součinitelem tepelné vodivosti $0,08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a tuto hranici se již prostou záměnou písku za kamenivo nedařilo dále překonat [83]. Snaha o snížení součinitele tepelné vodivosti tím ovšem neskončila. Do omítek se začaly přidávat materiály doposud používané v kosmickém odvětví sloužící pro izolaci kosmických lodí. Nedávno se začaly vyrábět omítky na bázi aerogelu. Tím se podařilo dosáhnout hodnoty $0,028 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ což je lepší výsledek než u mnoha tepelně izolačních materiálů. Ovšem vývoj se nezaměřil pouze na tepelné vlastnosti. Začaly se vyvíjet omítky se samočisticím efektem, který zajišťuje oxid titaničitý na povrchu šlechtěných omítek.

Tepelné vlastnosti jsou sice důležité, ale pro správné fungování konstrukce je nutné počítat s komplexním souborem vlastností. Omítka musí splňovat další kritéria. Především šlechtěné omítky by měly být paropropustné, a je nutné podotknout, že ne všechny toto kritérium splňují.

Tato práce se zabývá dodatečným zateplením historických budov, jak bylo naznačeno výše, nové moderní omítkové směsi se svým složením, technologií výroby značně liší od historických materiálů. Například vápenné omítky jsou sice stále na trhu, ale je nutné podotknout, že vápno se vyrábí jiným technologickým postupem než dříve. Při rekonstrukci je nutné postupovat pečlivě, aby byla zajištěna kompatibilita mezi jednotlivými materiály konstrukce. Především tam, kde dojde ke střetu původních historických materiálů s materiály novými, moderně vyrobenými. Záleží přitom na všech parametrech, ať už to jsou tepelné, vlhkostní nebo mechanické. Především při interakci dvou materiálů s rozdílnými difúzními parametry může

dojít k nežádoucí kumulaci vodní páry, která může v zimním období zkondenzovat. Na obrázku č. 25 tento případ pravděpodobně nastal. Vodní pára se během zimního období transportuje směrem od interiéru k exteriéru, velice snadno procházela přes difúzně otevřené materiály, až narazila na difúzně uzavřenou finální omítku. V tomto místě došlo tedy k její kumulaci, následně ke kondenzaci. Voda v kapalném stavu byla vystavena v zimním období cyklickému působení mrazu. Při přechodu z kapalného na pevné skupenství voda zvýší svůj objem o zhruba 9 %, tím vytváří tlak na vnitřní strukturu materiálu a následně dochází k poškození konstrukce, jak je vidět na obrázku č. 25.



Obr. 25: Příklad fasády poškozené

Další důležitou roli hraje i součinitel tepelné a vlhkostní roztažnosti. Pokud dva materiály pevně spolu spojené budou vykazovat odlišný součinitel délkové teplotní a vlhkostní roztažnosti, může dojít k popraskání konstrukce. Délkovým tepelným a vlhkostním součinitelem u historického zdiva a omítek se zabýval např. Bilge Alp Güney [58]. Pokud budou mít materiály rozdílné difúzní a tepelné vlastnosti, může dojít na jejich rozhraní ke

kumulaci vlhkosti a následně k biologické korozi. Poškození fasády vlivem vysoké vlhkosti je ukázána na obrázku č. 26.

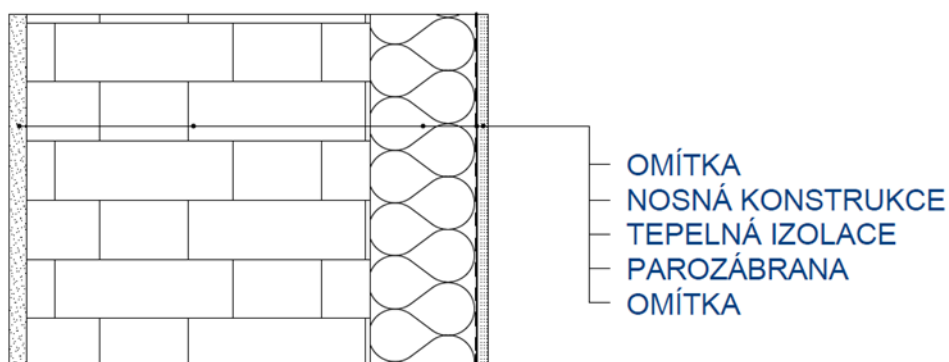


Obr. 26: Historická omítka ve městě Brašov poškozená vysokou vlhkostí

Omítky však v systému vnitřního zateplení mohou plnit i jinou roli. Poměrně dost kapilárně aktivních materiálů nemá dostatečný absorpční koeficient vody, proto musí být v systému instalována parobrzda. Parobzdových fólií je na trhu k dostání poměrně mnoho, liší se od sebe mírou schopnosti propouštět vodní páry. Vyskytují se parobrzdy s faktorem difúzního odporu vodní páry od 5 do 125 až po naprosto neprodyšné parozábrany. Systém vnitřního zateplení s parozábranou je na obrázku č. 27.

EXTERIÉR

INTERIÉR

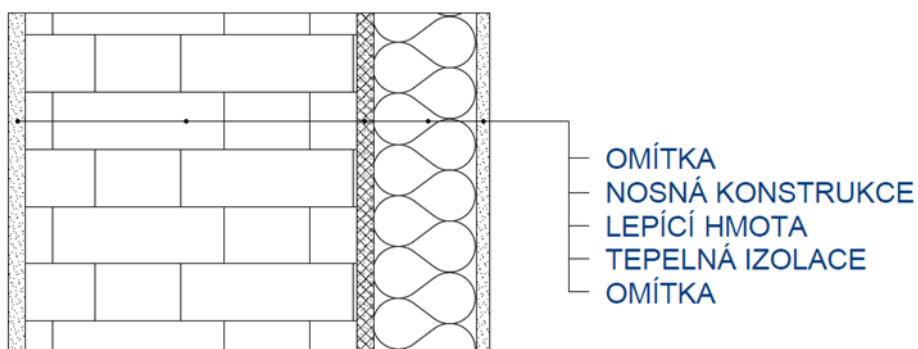


Obr. 27: Návrh tepelně izolačního systému s parozábrdou

Omítky v některých případech mohou parozábrdu zcela nahradit. Tento systém je zachycen na obrázku č. 28. Jako regulátor vlhkosti místo parozábrany slouží omítka nebo spíše lepicí hmota mezi nosnou konstrukcí a tepelnou izolací. Tato hmota část vodní páry propustí dále do konstrukce, část absorbuje sama do sebe a část ponechá v tepelně izolačním materiálu. Zpomalí tedy transport vodní páry takovým způsobem, že v kritickém zimním období nedojde k nebezpečné kumulaci vodní páry a v příznivém letním období vodní pára opustí systém. Stěžejním parametrem lepicí hmoty neboli retardéru vodní páry je faktor difúzního odporu, jehož výše se určí pomocí počítačových simulací pro jednotlivé typy konstrukcí a tepelně izolačních materiálů.

EXTERIÉR

INTERIÉR



Obr. 28: Návrh tepelně izolačního systému s lepicí hmotou plnící funkci retardéru vodní páry

4.1.2 Výběr systému vnitřní tepelné izolace

Výběr systému vnitřní izolace je silně ovlivněn vlastnostmi celé nosné konstrukce včetně omítek, konkrétně schopností konstrukce vést kapalnou vodu, propouštět vodní páru, vést teplo. Velké množství historických budov ve skandinávských zemích, jako je Švédsko, Norsko, je postaveno z plných pálených cihel. Řadu těchto konstrukcí není možné tepelně izolovat z exteriéru a dodatečné interiérové zateplení je jedinou možností jak snížit součinitel prostupu tepla. P. Johansson provedl laboratorní pokus large-scale, kde postavil pokusnou cihelnou zeď, na kterou aplikoval vnitřní izolační systém z VIP panelů. Zjistil zvýšenou vlhkost ve zdivu i dřevěných nosnících [59]. Na cihelné konstrukce jsou vhodné spíše systémy s kapilárně aktivními materiály. Endrik Arumägia prokázal nevhodnost systému s parozábranou u dřevěných konstrukcí [60]. Podstatně složitější situace nastává u kamenných konstrukcí, kde jednotlivé kameny mohou mít výrazně jiné vlastnosti oproti spojovací maltě. Záleží i na tloušťce nosné konstrukce, která ovlivňuje vlhkost v kapilárně aktivním materiálu, ta pak zvyšuje tepelnou vodivost izolantů [26].

4.1.2.1 Difúzně uzavřené systémy

Jak již bylo v úvodu naznačeno, hlavní problém systému vnitřního zateplení představuje posun kondenzační zóny ke vnitřnímu povrchu zdiva a následná kondenzace vodních par mezi nosnou konstrukcí a tepelnou izolací. Pokud ke kondenzaci vodní páry dojde, pak kapilárně aktivní materiál je schopen kondenzát rozprostřít po celém svém objemu, takže nepředstavuje žádné nebezpečí z hlediska růstu plísní. V příznivém období pak dojde k vypaření vlhkosti směrem do interiéru. Oproti tomu systémy s parozábranou sice zamezí transportu vodních par z interiéru do exteriéru, ale na druhou stranu brání vysychání konstrukce v příznivém letním období. Porovnáním kapilárně aktivního systému se systémem s parozábranou se zabývala například Evy Vereecken, která zkoumala transport tepla a vlhkosti pomocí počítačového programu HAMFEM. Porovnávala kapilárně aktivní kalcium silikát s difúzně uzavřeným systémem, kde byl jako tepelný izolant použit extrudovaný polystyren. Oba dva systémy byly použity na cihelnou konstrukci. Ověření proběhlo pomocí počítačových simulací. Simulace byla provedena na severozápadně orientovanou zeď, byla použita klimatická data pro Essen v Německu. Interiérové podmínky byly konstantní, teplota byla nastavena na 18°C RH od 23:00 do 7:00 produkce vlhkosti 70g/h, 7:00 do 23:00 10g/h. Plocha zateplené místnosti byla 12 m² výška 2,5 m. Při vyhodnocování bylo zjištěno, že relativní vlhkost mezi zdí a tepelnou izolací

dosahuje 100% během celého roku u difúzně uzavřeného systému. Velká vlhkost ovšem byla naměřena i v kalcium silikátu, což vede ke zvýšení tepelné vodivosti [26]. J. Zagorskas porovnával minerální vlnu, celulózovou izolaci, aerogel a VIP panely na cihelné konstrukci typické pro Litvu. Jako nejlepší materiál vyšla minerální vlna [62].

Co se týče ověřování funkčnosti vnitřního tepelně-izolačního systému, nejčennější výsledky poskytuje experiment full-scale, kdy je celý systém aplikován na skutečnou konstrukci a je vystaven reálným podmínkám. Data, jako je vlhkost a teplota v různých místech systému, jsou kontinuálně monitorována. Takto bylo provedeno několik experimentů. P. Klošeiko, aplikoval v reálné cihelné konstrukci celkem 4 typy tepelně izolačních systémů, kapilárně aktivní kalcium silikát, tepelnou izolaci na bázi pórobetonu, desku IQ Therm, PIR desku s uzavřenou pórovitostí. Tloušťka cihelné stěny byla 75 cm. V interiéru byla během roku nastavena teplota na 21 °C a vlhkost byla držena od 2,3 do 4,3 g/m³. Mezi stěnou a tepelnou izolací byla měřena relativní vlhkost, hustota tepelného toku byla měřena na vnitřní straně. V uvedeném experimentu byla nejmenší relativní vlhkost během celého období mezi cihelnou konstrukcí a tepelnou izolací naměřena u systému s kalcium silikátem. Na druhou stranu, v kalcium silikátu byla vlhkost rozprostřena v celém jeho objemu, takže došlo k nárůstu tepelné vodivosti [27].

4.1.3 Materiály pro difúzně otevřené vnitřní tepelné izolace

4.1.3.1 Dřevovláknité desky

Jedná se o ekologické materiály, které jsou velmi oblíbené hlavně v Německu, Švýcarsku a Francii. Výhodou dřevovláknitých desek oproti jiným materiálům je poměrně vysoká měrná tepelná kapacita. Dřevovláknité vlny vyrábí mnoho firem po celé Evropě. Obecně mají přibližně stejné vlastnosti. Objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí od 55 do 250 kg·m⁻³, s tím koresponduje součinitel tepelné vodivosti, který se pohybuje v intervalu od 0,038 do 0,048 W·m⁻¹·K⁻¹. Je zajímavé, že všichni výrobci uvádějí naprosto shodnou měrnou tepelnou kapacitu 2100 J·kg⁻¹·K⁻¹, faktor difúzního odporu se pohybuje v rozmezí 1-5 [-].

Dřevovláknité desky se staly předmětem zájmu na mnoha vědeckých pracovištích. Tepelně izolační systém firmy Pavadentro testoval P. Wegerer pomocí pokusu full-scale experimentu jehož výsledky byly prezentovány formou vědeckého článku. Desky byly aplikovány na cihelné zdivo existující konstrukce. Tepelně vlhkostní chování celého systému bylo vyhodnoceno za jedno zimní období. V konstrukci se ustálila relativní vlhkost na 60 % [9]. Je ovšem nutné podotknout, že zima, během které testování proběhlo, byla poměrně mírná.

Dále následuje seznam firem vyrábějících dřevovláknité desky pro dodatečné vnitřní zateplení:

CIUR a.s. – (Climatizer Insulation Urbánek) Jedná se o českou firmu založenou v roce 1991. Firma má sídlo v Praze 1 a výrobní závod v Brandýse nad Labem. Ve výrobním závodě má čtyři linky pro zpracování celulózy, minerálních vláken a moderní skladovací prostory. Zabývá se primárně prodejem tepelných, zvukových a protipožárních izolačních materiálů. Své výrobky dodává firma téměř do celého světa a má své pobočky v mnoha evropských zemích.

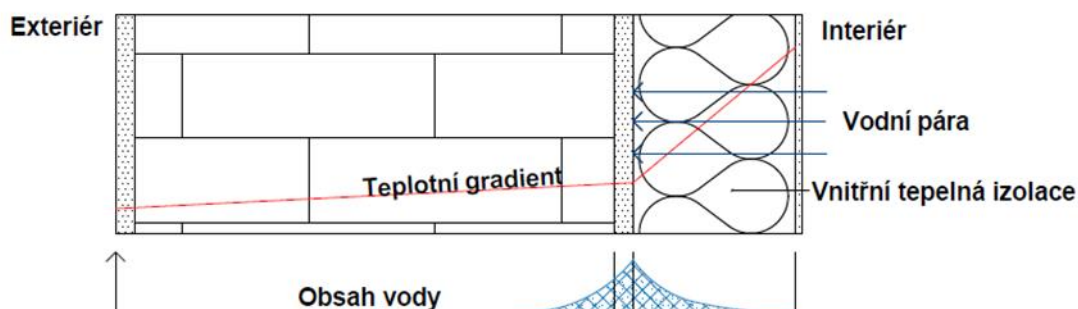
Pro systém vnitřního zateplení dodává firma CIUR, a.s. dřevovláknité desky pod obchodním názvem UdiRECO.

Základní skladbu desek UdiRECO tvoří spojení 40 mm silné izolační desky jako nosiče omítky s flexibilní dřevovláknitou izolační deskou doléhající na podklad. Prostřednictvím speciálně vyvinutého upevňovacího systému je možné nastavení v rozsahu ± 20 mm. Systémy lze upevnit na veškeré minerální podklady a masivní dřevo s patřičnou únosností. Inteligentní skladba vrstev zajistí difúzně propustnou, akusticky tlumící a klimaticky regulující konstrukci stěn. Podle výrobců se jedná o systém vhodný pro všechny budovy, které nemohou být zatepleny z vnější strany, zejména pak pro hrázdné a široké kamenné stavby. Pomocí tohoto systému byly zatepleny cihelné konstrukce v Plzni a ve Zbraslavi. Tyto 2 domy jsou na firemních stránkách uvedeny jako referenční. Obě konstrukce jsou postaveny z plných pálených cihel [65].

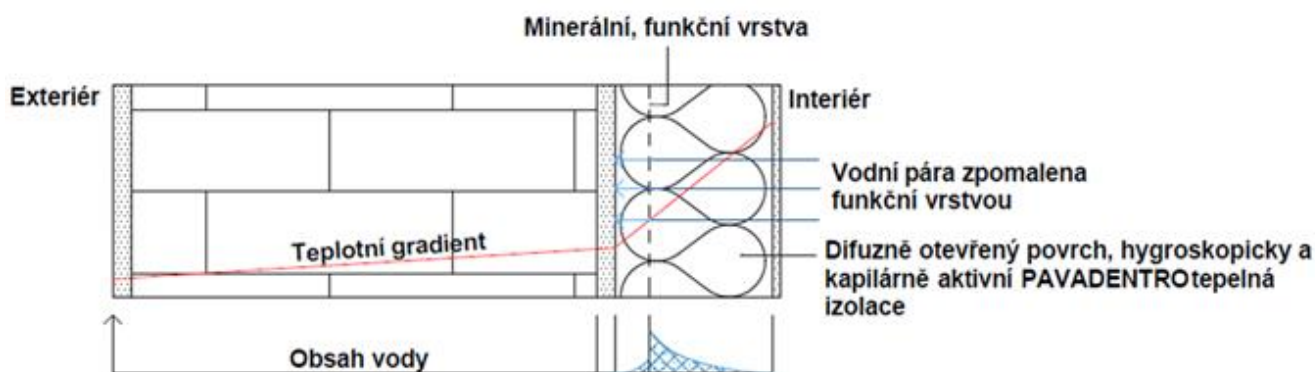
Dále firma Ciur, a.s. nabízí zajímavou variantu pro stěnové vytápění. Hlavní výhodou tohoto řešení je posun kondenzační zóny směrem k exteriéru. Pokud topení bude zapnuto, vyloučí se tím transport vodní páry z interiéru do tepelné izolace, naopak dojde k vysoušení zdiva a zvýšení životnosti konstrukce. Na druhou stranu účinnost vytápění může být oproti jiným vytápěcím systémům nižší. Z hlediska stavební fyziky se stěnové vytápění výrazně liší od zbylých systémů. To bude ověřeno pomocí PC simulací. Každopádně se jedná o velice zajímavou variantu, která stojí za prověření.

Zajímavou variantu dřevovláknité desky nabízí firma Pavatex. Jedná se o švýcarskou firmu. Parobrzda je zabudovaná uvnitř desky. Průběh vlhkosti u systému bez parozábrany je vidět na obrázku 30. Vodní pára dojde skrz tepelně izolační materiál až k nosné konstrukci, kde může vlivem nízké teploty v zimním období dojít ke kondenzaci. Kapalná voda je pak kapilárně aktivním materiálem distribuována po celém objemu tepelně izolačního materiálu. U dřevovláknité desky firmy Pavatex je průběh vlhkosti díky parobrzdě odlišný. Část vodní páry projde skrz parobrzdu dále do konstrukce, část vodní páry bude zastavena. Hlavní výhodou tohoto systému je, že vodní pára bude zastavena v tepelné izolaci mimo kondenzační zónu a

tím dojde k značnému omezení výskytu kapalné vody v systému (Obr. 30) [66]. Systémy ostatních firem mají parobrzdu na povrchu systému, kde hrozí její porušení spojovacími prostředky (hřebíkem).



Obr. 29: Průběh vlhkostikapilárně aktivní izolace bez parobrzdy, upraveno autorem dle zdroje [66]



Obr. 30: Průběh vlhkosti kapilárně aktivní izolace se zabudovanou parobrzdou, upraveno autorem dle zdroje [66]

Dalším výrobcem dřevovláknitých desek pro vnitřní tepelně izolační systémy je firma Schneider se sídlem v Německu a pobočkou ve Švýcarsku. Sortiment je podobný jako u ostatních firem. Pro vnitřní tepelně izolační systém nabízí dřevovláknitou desku s obchodním názvem ROOM 140 s objemovou hmotností $140 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, se součinitelem tepelné vodivosti $0,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. [67]

Francouzská firma ISONAT se zabývá výrobou dřevovláknitých desek, sortiment jejich výrobků je podobný jako u výše zmíněných firem. Pro systém vnitřní izolace nabízí tato firma dřevovláknité desky s komerčním názvem Flex H 55 a Isonat flex 40, ovšem oproti ostatním nabízí navíc ještě celulózovou desku. Deska je vytvořena z recyklovaného novinového papíru, její objemová hmotnost je $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, součinitel tepelné vodivosti je $0,039 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, měrná tepelná kapacita poměrně vysoká, $2000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Na tyto desky nejde aplikovat omítka, jako vrchní část se použije sádkartonová deska, případně OSB deska [67].

4.1.3.2 Konopné desky

Tepelná izolace z konopí se v ČR nevyrábí. Technické konopí se u nás pěstuje, levně se vyváží do Německa, kde se zpracuje do formy izolačních desek a následně se k nám draze dováží. Dovozem konopí se zabývá firma IZOLACE KONOPÍ CZ, s.r.o. Výrobcem je německá firma Hock GmbH & Co. KG se sídlem a výrobním závodem v Nördlingenu (Bavorsko). Firma Hock GmbH & Co. KG se od roku 1997 začala zabývat výzkumem a vývojem tepelné izolace z technického konopí a od roku 1999 začala vyrábět a uvádět na trh tuto izolaci pod značkou TERMO-KONOPÍ® [68]. Vlastnostmi konopné izolace a jiných celulózových výrobků, tedy dřevovláken, lněných vláken a papírových vláken se zabýval např. Hurtado [69]. E. Latif [70] testoval nutnost použití parozábrany v dřevěné trámové konstrukci. V konstrukci bez parozábrany byla změřena vyšší vlhkost.

4.1.3.3 Ovčí vlna

Ovčí vlna reguluje vnitřní vlhkost v interiéru, díky své vysoké hygroskopičnosti se stává potenciálním kandidátem pro využití v systému dodatečné vnitřní izolace. Vlastnosti ovčí vlny byly popsány v kapitole 3.2.6. Výrobou a prodejem ovčí materiálů z ovčí vlny se zabývá např. rakouská firma Isolenawolle.

4.1.3.4 Lněná izolace

Lněnou izolaci speciálně pro vnitřní zateplení dřevostaveb dodává firma Naturizol. V technických listech dodává tyto informace: objemová hmotnost $32 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, součinitel tepelné vodivosti $0,039 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, měrná tepelná kapacita $1550 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, krátkodobá nasákavost je menší než $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

4.1.3.5 Juta

Izolaci z juty se vyrábí recyklací jutových pytlů užívaných k přepravě kakaových bobů. Tyto pytle jsou rozmělněny na vlákno a zpracovány na tepelnou izolaci. Odolnost proti požáru se zvyšuje impregnací přírodní sodou. Vyrábí se o objemové hmotnosti $30 - 45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a v této práci bude posouzeno její možné použití pro vnitřní tepelně izolační systém.

5 Experimentální metody

Jedná se o známé metody, proto budou popsány velice stručně. Podrobnější popis je uveden v příložených člancích.

5.1 Základní fyzikální vlastnosti

Mezi základní fyzikální vlastnosti patří objemová hmotnost ρ_v [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], hustota matrice, ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] a otevřená pórovitost ψ (%). Objemová hmotnost byla stanovena podle normy EN 1602 [87]. Pro každý materiál bylo vyrobeno 5 zkušebních vzorků s rozměry ($\sim 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$), což je v souladu s normami EN 822 [88], EN 823 [89] a EN 12085 [90]. Z rozměrů a hmotnosti byla určena objemová hmotnost podle všeobecně známého vztahu. Hustota matrice byla určena pomocí héliového pyknometru. Mezerovitost, respektive pórovitost byla stanovena podle vztahu:

$$\psi = \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

5.2 Difúzní vlastnosti

Pro měření difúzní vodivosti a faktoru difúzního odporu vodní páry byla použita misková metoda podle normy EN ISO 12572 [91]. Vzorky měly čtvercový průřez o hraně 100 mm nebo kruhový průřez o poloměru 100 mm. Z každého materiálu byly připraveny 3 vzorky. Vzorky byly nejprve umístěny do klimatické komory při teplotě $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \text{ } \%$.



Obr. 31: Měření difúzních vlastností miskovou metodou

Poté byly vzorky umístěny do kovových misek. V prvním případě byl pod vzorky vypálený silikagel, v případě wet cup se jednalo o roztok síranu draselného představující relativní vlhkost

97,5%. Aby bylo dosaženo jednodimenzionálního přenosu vodní páry, byly vzorky na bočních stranách zaizolovány pomocí silikonové pryskyřice viz obr. 31. Misky se vzorky byly poté umístěny do klimatické komory nastavené na 25 °C a 50% relativní vlhkost.

$$\delta_m = \frac{\Delta m \cdot d}{t \cdot S \cdot \Delta p_v}, \quad (2)$$

kde Δm je množství páry difundující vzorkem [kg], d je tloušťka vzorku [m] S je plocha vzorku ve styku s daným prostředím [m²], t je časové období korespondující s transportem hmotnosti vodní páry Δm [s] a Δp je rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu nad a pod měrným povrchem vzorku [Pa].

Za izotermních podmínek platí následující vztah mezi součinitelem difúze vodní páry D a součinitelem difúzní propustnosti δ_m :

$$D = \frac{\delta_m \cdot R \cdot T}{M}. \quad (3)$$

kde R je univerzální plynová konstanta, T je absolutní teplota a M je molární hmotnost vody.

Ve stavební praxi se nejčastěji používá faktor difúzního odporu

$$\mu = \frac{D_a}{D}, \quad (4)$$

kde D_a je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu (m² · s⁻¹).

Výše uvedené rovnice platí především pro materiály s vyšší difúzním odporem, kde je možné zanedbat odpor povrchové vrstvy. Vzhledem k faktu, že studované materiály jsou paropropustné, je nutné počítat s odporem vzduchu na spodní i horní ploše vzorku podle vzorce 5.

$$\delta_{m,corr} = \frac{d}{\frac{t \cdot S \cdot \Delta p_v}{\Delta m} - \frac{d_a}{\delta_a}} \quad (5)$$

Kde d_a (m) je tloušťka vzduchové vrstvy a $\delta_a = 1.993 \times 10^{-10}$ kg · m⁻¹ · s⁻¹ · Pa⁻¹ je permeabilita vodní páry při teplotě vzduchu 25 °C. Odpor vrstvy vzduchu nad vzorkem mohl být zanedbán, protože v klimatické komoře bylo udržováno proudění vzduchu rychlostí minimálně 2 m · s⁻¹ což je v souladu s požadavky normy EN ISO 12572 [72].

5.3 Transport kapaln  vody

Ačkoliv p rodn  materiály prezentovan  v této p aci by neměly přijít do styku s kapalnou vodou, byl měřen absorpční koeficient vody a p r m rn  vlhkostní vodivost, jelikož jsou tyto vlastnosti d le it  pro PC simulace.

Zkoušky proběhly podle normy EN ISO 12572. Pro ka d y materiál bylo vyhotoveno 5 vzorků o  tvercov m p r ezu s plochou 95 – 190 cm² a v  skou 60 – 140 mm. Na bočních stranách byly vzorky zaizolovány, aby byl zajištěn jednodimenzion ln  transport kapaln  vlhkosti. Před testováním byly vzorky týden umístěny v klimatick  komoře při teplotě (22 ± 2 °C) a relativn  vlhkosti 50 ± 5 %.  eln  strana vzorku byla ponořena do vody (5 ± 2 mm) a byly měřeny přírůstky hmotnosti v závislosti na čase. Absorpční koeficient vody byl určen podle vzorce:

$$A = \frac{C_t}{\sqrt{t}} \quad (6)$$

kde C_t je kumulativn  přírůstek hmotnosti vody přes jednotkovou plochu

$$C_t = \frac{\Delta m}{S} \quad (7)$$

P r m rn  součinitel vlhkostní vodivosti byl vypočítán podle vzorce:

$$\kappa_{app} = \left(\frac{A}{w_{cap}} \right)^2 \quad (9)$$

Kde w_{cap} je maxim ln  mo n  obsah vlhkosti.

5.4 Sorpční izotermy

Sorpční izotermy byly měřeny pomocí exsik torov  metody při teplotě 25 °C. Pro ka d y materiál bylo připraveno minim ln  třicet vzorků (do každého exsikátoru minim ln  5) o minimálních rozměrech 2×2×2 cm. Testovan  vzorky byly nejprve vysušeny při teplotě 50 °C. Su en  probíhalo poměrně dlouho, do ust len  hmotnosti, což trvalo dva měsíce. Poté byly vzorky přemístěny do exsikátorů se solnými roztoky, nad kterými se vytv  r  zn m  konstantní vlhkost vzduchu. Vlhkosti k jednotliv m stav m relativn  vlhkosti byly určeny minim ln  na pěti vzorcích. Hmotnost jednotlivých vzorků byla sledována do ust len  hmotnosti a poté byla vypočtena hodnota vlhkosti ve vzorcích podle rovnice:

$$w = \frac{m_s - m_0}{V \cdot \rho_w} \quad (10)$$

Kde m_s je hmotnost nasyceného vzorku, m_0 je hmotnost suchého vzorku, V je objem vzorku a ρ_w je hustota vody



Obr. 32: Testované vzorky v exsikátorech

5.5 Tepelné vlastnosti

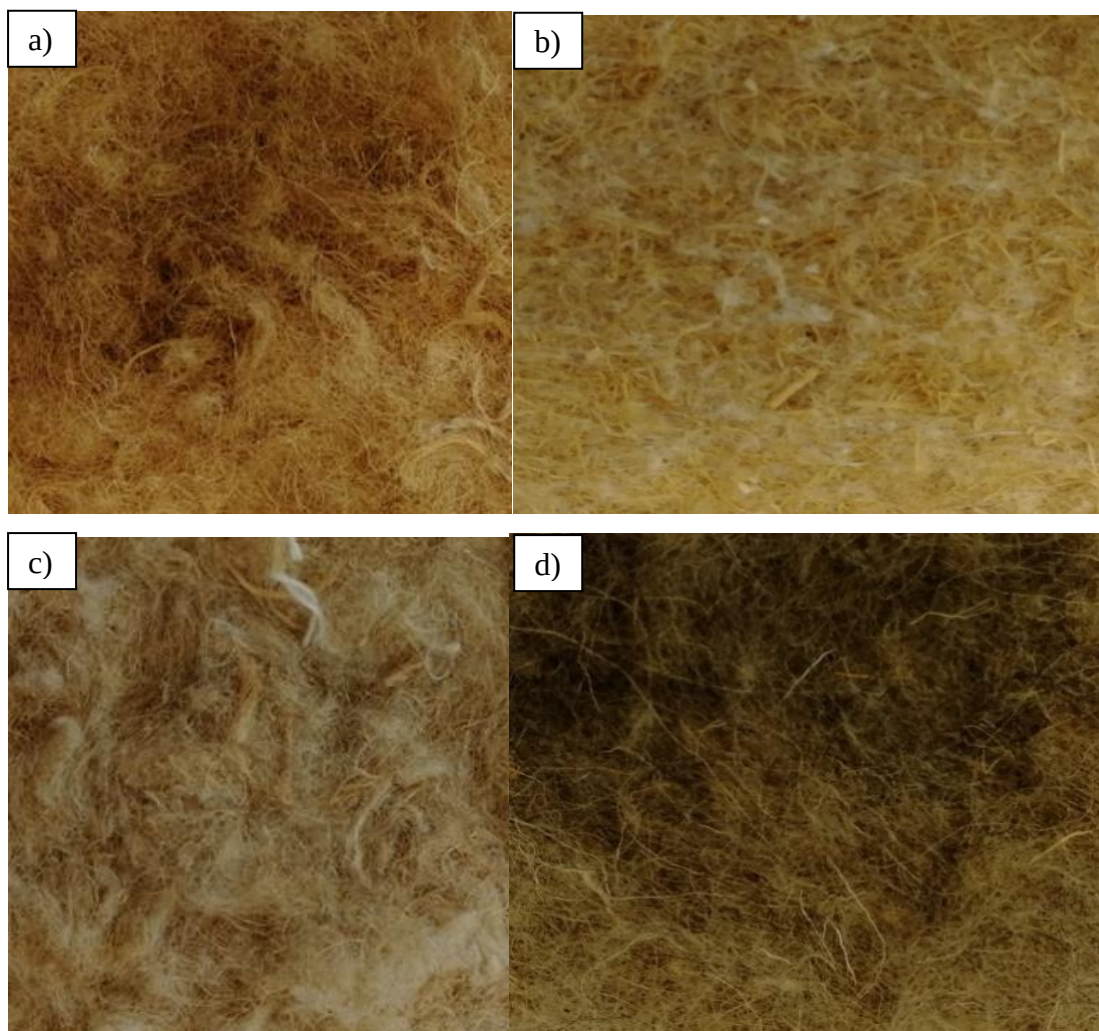
Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita byla měřena pomocí přístroje Isomet 2104. Měření je založené na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu. Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v rezistoru sondy, která je tepelně vodivě spojená s analyzovaným materiálem. Teplota je vzorkována a jako funkce času přímo vyhodnocena pomocí polynomiální regrese. Koeficienty získané touto regresí jsou použity k výpočtu měřených veličin.

Měření bylo provedeno v závislosti na vlhkosti vzorku a také v závislosti na teplotě.

Veškeré metody byly uvedeny v článcích, které autor přikládá jako přílohu habilitační práce [63].

6 Vybrané materiály

Pro měření materiálových charakteristik byly vybrány následující přírodní materiály: Dřevovláknitá konopná vlna (HF), juta (JF) a ovčí vlna. Dále byly testovány 2 systémy složené z dřevovláknitých desek: systém Pavatex a CIUR.



Obr. 33: Přírodní materiály a) Juta, b) konopná vlna, c) Lněná izolace, d) ovčí vlna

Výše uvedené materiály nemají prostorovou tuhost a pro jejich využití musí být sestrojena podpůrná konstrukce. Dále budou studovány systémy složené z dřevovláknitých desek: systém CIUR a Pavatex, obr. 33.



Obr. 34: Dřevovláknité tepelně izolační desky a) systém CIUR b) Pavatex

Zateplovací systém CIUR se skládá ze dvou desek. Deska o nižší objemové hmotnosti “Soft vrstva“ má lepší tepelné vlastnosti, deska Hard je schopna přenést mechanické namáhání.

Systém Pavatex se skládá z několika hydrofilních dřevovláknitých desek slepených k sobě minerálním pojivem, které slouží jako parozábrana.

7 Experimentální výsledky

7.1 Základní fyzikální výsledky

Vybrané přírodní tepelné izolace slouží v konstrukci především jako výplňový materiál pro obvodové pláště a střešní konstrukce. Většinou je nutné umístit je do nosných roštů a provést jejich ochranné opláštění, případně je doplnit parobrzdou. Nedokáží přenést mechanické namáhání a tomu se musí přizpůsobit i metodika měření. Veškeré jejich póry sice mohou být naplněny vodou, nicméně tato voda z nich volně odtéká. Proto byla stanovena nasákavost, která je výrazně nižší než pórovitost. Hustota matrice byla měřena héliovým pyknometrem. Objemová hmotnost byla stanovena z rozměrů a hmotnosti, pórovitost byla dopočítána z objemové hmotnosti a hustoty. Nasákavost byla stanovena ponořením tělesa do kapaliny. Základní fyzikální výsledky jsou uvedeny v tabulce 1. Všechny testované materiály vykazují vysokou pórovitost přes 95%. Rostlinné izolace vykázaly přibližně stejnou hustotu matrice, u ovčí vlny vyšla cca o $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ vyšší. Ovčí vlna není schopna udržet téměř žádnou kapalnou vodu.

Tab. 1: Základní fyzikální vlastnosti přírodních izolací

	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pórovitost [%]	Hustota matrice [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Nasákavost [%]
Len	25	97,5	1017,13	28,9
Juta	33	96,9	1080,8	49,2
Konopí	38	96,33	1036,37	40,0
Ovčí vlna	25	97,8	1155,7	0,03

Základní fyzikální vlastnosti u dřevovláknitých materiálů byly změřeny pomocí vakuové saturace a výsledky jsou uvedeny v tabulce č.2. Hustota jednotlivých materiálů odpovídá hustotě dřeva. Nejnížší objemovou hmotnost má soft deska systému Ciur. Ta není určená k přenášení mechanického namáhání. Tato deska je naopak stlačitelná a dokáže se snadno vyrovnat s nerovnostmi podkladu, dále má mít co nejlepší tepelně-izolační vlastnosti. Mechanické namáhání přenáší vrstva Hard, proto také dosáhla vysoké objemové hmotnosti.

Deska Pavatex dosáhla objemové hmotnosti $147 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tato deska poměrně dobře přenesla mechanické namáhání, ovšem měla by být aplikována na vyrovnaný podklad.

Tab. 2: Základní fyzikální vlastnosti dřevovláknitých materiálů

	Objemová hmotnost $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Pórovitost [%]	Hustota matrice $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Nasákavost [%]
Pavatex	147	90,1	1474,4	80,5
CIUR H	178	87,95	1480	47,0
CIUR S	54	96,37	1479,87	80,5

7.2 Difúzní vlastnosti

Difúzní vlastnosti jednotlivých materiálů jsou uvedeny v tabulce č. 3.

Tab. 3: Difúzní vlastnosti

Označení materiálu	Součinitel difúzní vodivosti [s]	Součinitel difúze vodní páry $[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	Faktor difúzního odporu [-]	Součinitel difúzní vodivosti [s]	Součinitel difúze vodní páry $[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	Faktor difúzního odporu [-]
	Dry cup			Wet cup		
Konopí	1,18E-10	1,61 E-5	1,61	1,43 E-10	1,95 E-5	1,46
Len	1,59E-10	2,17 E-5	1,31	2,04 E-10	2,77 0E-5	1,05
Juta	1,185E-10	1,44 E-5	1,72	2,73 E-10	2,35 E-5	1,46
Ovčí vlna 1	1.085E-10	1,47 E-5	1,93	1,29E-10	1,76 E-5	1,62

Tab. 4: Difúzní vlastnosti pro dřevovláknité systémy

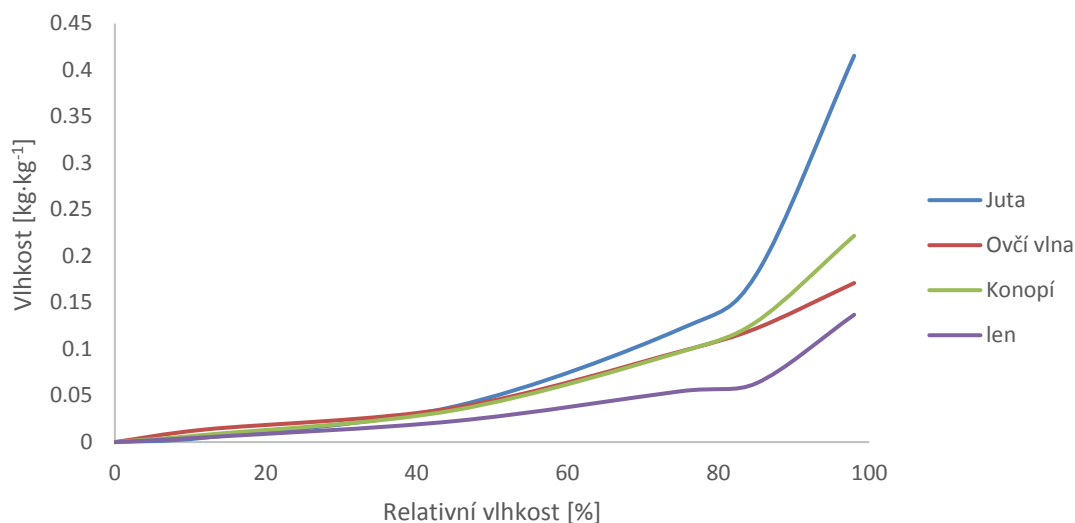
Označení materiálu	Součinitel difúzní vodivosti [s]	Součinitel difúze vodní páry [m ² s ⁻¹]	Faktor difúzního odporu [-]	Součinitel difúzní vodivosti [s]	Součinitel difúze vodní páry [m ² s ⁻¹]	Faktor difúzního odporu [-]
	Dry cup			Wet cup		
Pavatex	3,309 E-11	4,552 E-6	5,12	4,109 E-11	5,653 E-6	4,11
Pavatex Lepidlo	4,602 E-12	6,33 E-7	36,52	7,424 E-12	1,021 E-6	22,59
CIUR – H	3,585 E-11	4,932 E-6	4,70	1,12 E-10	1,549 E-5	1,51
CIUR – S	4,768 E-11	9,839 E-6	2,38	1,55 E-10	2,133 E-5	1,08
CIUR - L	2,053 E-12	3,53E-7	73,48	7,43 E-12	7,023E-6	25,61

Jak je z tabulky patrné, hodnoty faktoru difúzního odporu vodní páry se pohybují v rozmezí 1,10 až 2,74. Palumbo a spol. [73] došli k podobným výsledkům u konopné izolace a dřevovláknité vlny, jejich výsledky byly v intervalu 2,3 – 3,0 u konopí a 2,1 – 2,4 u dřevovláknů. Podle předpokladů všechny studované materiály prokázaly nízký faktor difúzního odporu μ . To je důležitý předpoklad pro difúzně otevřené systémy. U syntetických tepelně izolačních materiálů jako je kalcium silikát nebo minerální vlna, vyšly difúzní vlastnosti podobně. U kalcia silikátu se faktor difúzního odporu pohybuje v rozmezí od 2 do 6 [74] a u hydrofilní minerální vlny od 1,2 do 2,7 [75].

7.3 Sorpční izotermy

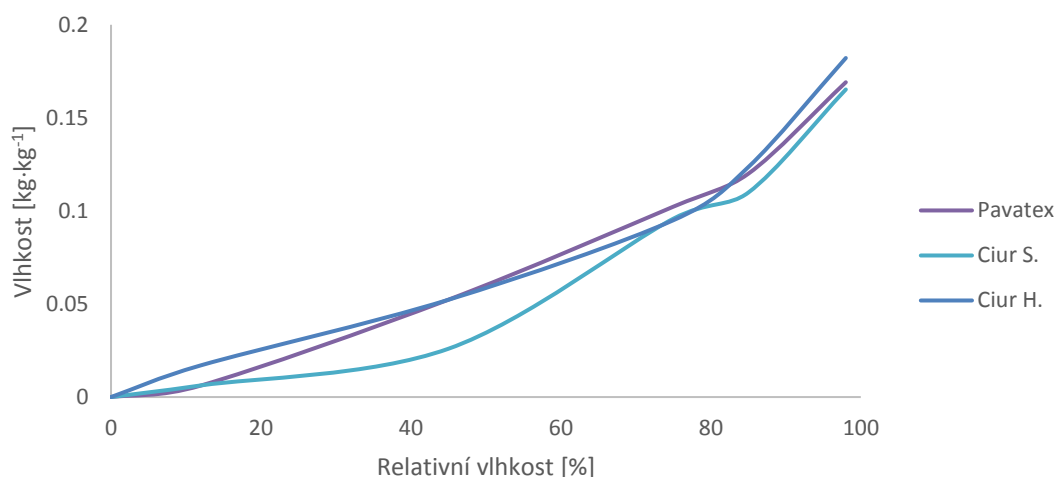
Sorpční izotermy studovaných materiálů jsou zobrazeny na obrázku č. 35 a 36. Všechny materiály jsou hygroskopické. Nejvyšší vlhkost ze vzduchu je schopna přijmout juta, při vlhkosti 98% pojme 37,8% hmotnostní vlhkosti. To jsou velmi dobré předpoklady pro řízení vlhkosti ve vnitřním prostředí. Výsledky získané v této práci jsou srovnatelné s výsledky prezentovanými ve vědeckých člancích a publikacích. Až na malé rozdíly. Zach naměřil u ovčí vlny 35% hmotnostní vlhkost při RH 98%. Hygroskopicitu neupravené konopné izolace byla uvedena 41% a po přidání hydrofobních aditiv se pohybovala v intervalu 31 až 34% [76]. Na druhou stranu, Bourdot a kol. [75] naměřili hygroskopickou vlhkost u konopných tepelně

izolačních materiálů pouze 17 až 19%. Troppová a kol. [19] uvádí obsah vlhkosti u komerčně vyrobené dřevovláknité desky 22% při relativní vlhkosti 98%. Konečně, vlhkost u juty a lněné izolace lehce nad 20% při relativní vlhkosti 90% uvádí Korjenic a kol.[79].



Obr. 35: Sorpční izotermy

Na obrázku 36 jsou sorpční izotermy pro dřevovláknité desky. Jak je vidět, dřevovláknité desky jsou schopny rovněž pojmout značné množství vzdušné vlhkosti. Při 97% relativní vlhkosti vzduchu jsou schopny pojmout téměř 20% hmotnostní vlhkosti. Ve srovnání s kalcem silikátem nebo hydrofilní minerální vlnou se jedná o vysokou hodnotu.



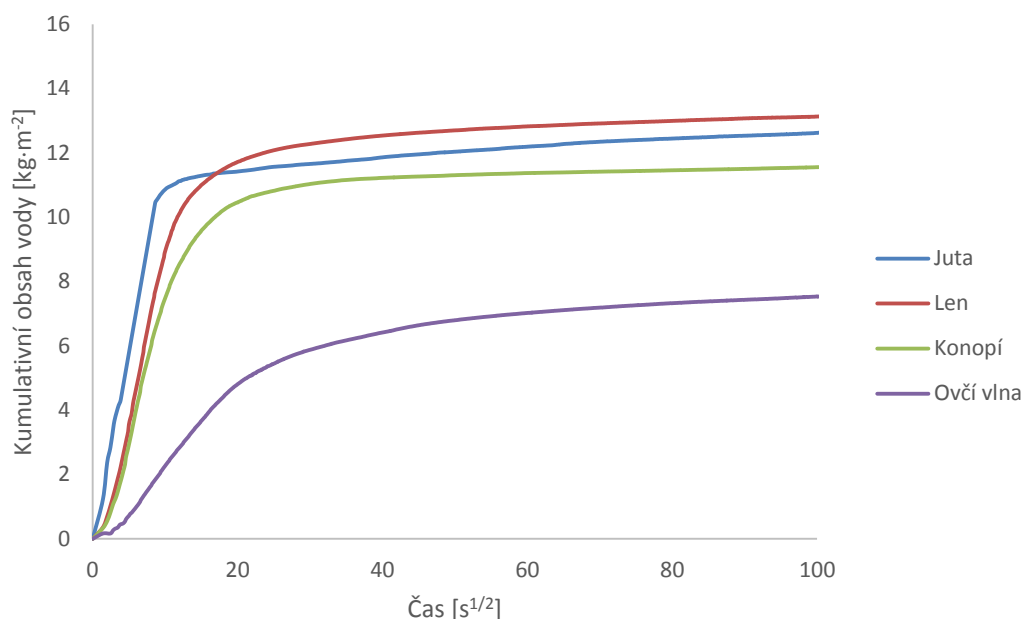
Obr. 36: Sorpční izotermy dřevovláknitých desek

7.4 Absorpční koeficient vody

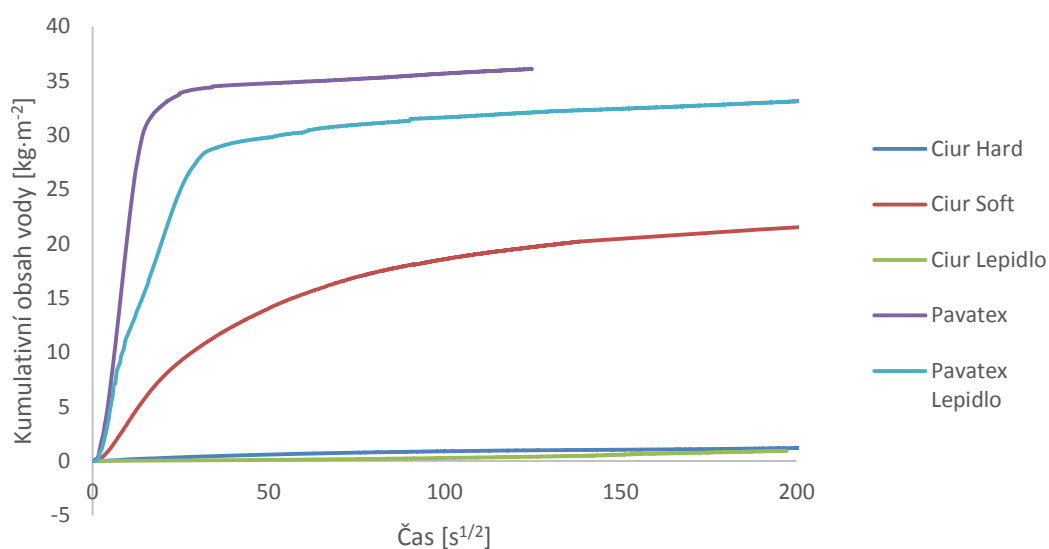
Průběh absorpčního koeficientu vody je vidět na obrázku č. 37. U vybraných přírodních materiálů je zřetelně vidět dvě fáze vedení kapalné vody, a to vedení do výškové úrovně čáry ponoru a následně nad tuto úroveň. V první fázi, kdy byl materiál ponořen do vody, ponořená část vzorku nekladla téměř žádný odpor průniku vody. Tato fáze trvala pouze několik minut. Jakmile byly tlaky vyrovnány, kapilární síly začaly vést vodu nad čáru ponoru. Proto jsou v tabulce 5. zaznamenány hodnoty absorpčního koeficientu A1 a A2. Jak je z tabulky vidět, rozdíl mezi hodnotami absorpčního koeficientu A1 a A2 se liší až o 3 řády. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že vybrané přírodní materiály vedou kapalnou vodu nad čáru ponoru poměrně špatně.

Tab. 5: Parametry určující transport kapalné vody

Označení materiálu	Absorpční koeficient vody [kg·m ⁻² ·s ^{-1/2}]	Průměrný součinitel vlhkostní vodivosti [m ² ·s ⁻¹]	Absorpční koeficient vody [kg·m ⁻² ·s ^{-1/2}]	Průměrný součinitel vlhkostní vodivosti [m ² ·s ⁻¹]
Len	0,8	1,81 E-7	0,02	4,30 E-10
Juta	0,85	7,6 E-7	0,01	1,05 E-10
Konopí	0,68	4,98 E-7	0,01	1,07 E-10
Ovčí vlna 1	0,2	4,18 E-8	0,01	1,04 E-10



Obr. 37: Průběh absorpčního experimentu



Obr. 38: Průběh absorpčního experimentu

U dřevovláknitých materiálů probíhal transport kapalné vody nejrychleji u materiálu Pavatex a to i tehdy, pokud byla styčná plocha opatřena minerálním pojivem sloužícím jako parobrzda. Cítelně pomaleji probíhal transport u dřevovláknatého CIUR. To nebylo na rozdíl od Pavatexu ošetřeno hydrofilní přísadou. Nejpomaleji probíhal transport u tuhé desky CIUR, ta kapalnou vodu téměř nevede, jak je vidět na obrázku.

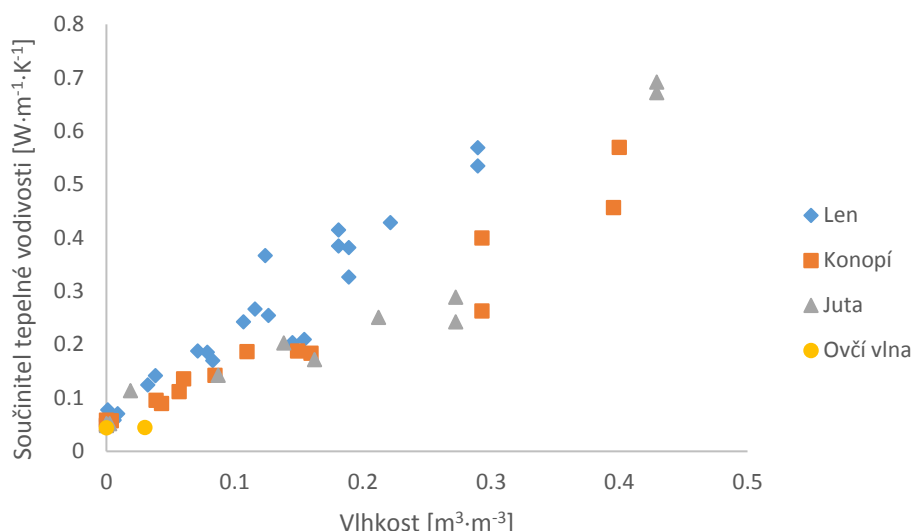
Tab. 6: Absorpční koeficient vody a součinitel vlhkostní vodivosti

Označení materiálu	Absorpční koeficient vody [kg·m ⁻² ·s ^{-0.5}]	Průměrný součinitel vlhkostní vodivosti [m ² ·s ⁻¹]
Pavatex	2,12	5,53 E-6
Pavatex Lepidlo	1,8	-
CIUR - H	0,0103	1,37E-10
CIUR - S	0,41	1,81 E-7
CIUR - L	0,0054	-

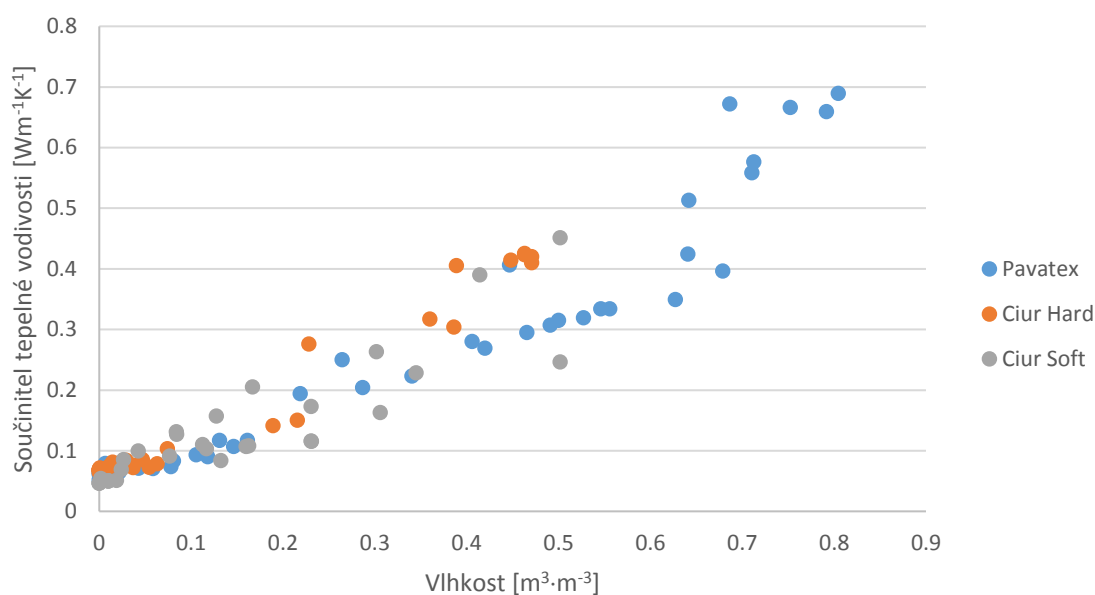
Pokud porovnáme dřevovláknité desky s kalcium silikátem nebo minerální vlnou, to jsou materiály, které se na vnitřní zateplení používají, zjistíme, že Pavatex má velmi příznivou hodnotu absorpčního koeficientu a že je vhodný kandidát pro vnitřní izolace. Roels a kol. [74], Feng a Janssen [80,82], Feng a kol. [82] stanovili absorpční koeficient vody u kalcia silikátu v rozmezí 1,01 – 1,30 m⁻²·s^{-0,5}, což je dokonce nižší hodnota než u Pavatexu. U materiálu CIUR soft je tato hodnota nižší, přesto by mohla být dostačující pro rychlou redistribuci kapalně vody.

7.5 Tepelné vlastnosti

Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita představují důležité parametry pro tepelně izolační systémy a hrají jednu z rozhodujících rolí při výběru materiálu. Tepelné vlastnosti v závislosti na vlhkosti jsou uvedeny na obrázcích 39 a 40.



Obr. 39: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti



Obr. 40: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti

Součinitel tepelné vodivosti v hygroskopické vlhkosti byl měřen na několika pracovištích. Palumbo a kol. [73] uvádí nárůst z 0,035 do 0,057 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pro konopnou vlnu a 0,035 do 0,047 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pro ovčí vlnu. Tyto hodnoty jsou nepatrně nižší v porovnání s materiály uvedenými v této práci. Kymäläinen a Sjöberg [51] měřili součinitel tepelné vodivosti materiálu na bázi lnu s výsledkem 0.035 až 0.075 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, dále konou izolaci s výsledkem 0.040 až 0.094 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a vlny vzniklé kombinací lnu a konopí (0.033–0.060) $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ v závislosti na objemové hmotnosti. Lehce vyšší hodnoty než u materiálů prezentovaných v této práci

naměřil Korjenic a kol. u konopí v suchém stavu $0,062 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, u lnu $0,065 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a u juty $0,058 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

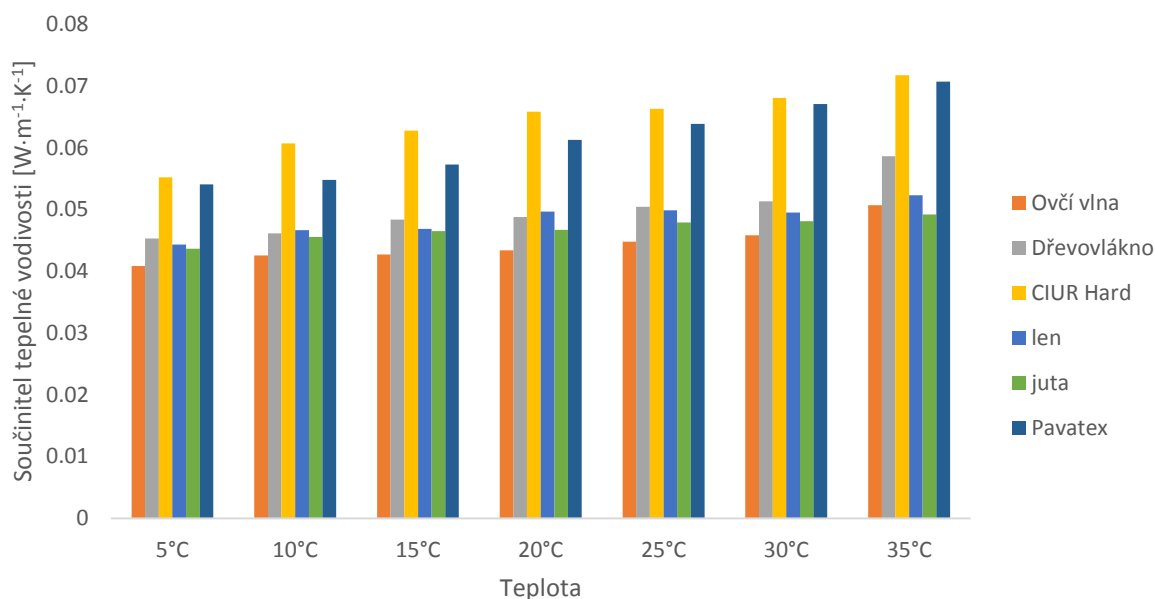
Tepelné vlastnosti v závislosti na teplotě uvedené v této práci se shodují s výsledky uvedenými Zachem a kol. [52], kde byla měřena ovčí vlna. Při $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšel součinitel tepelné vodivosti $0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a při $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ stoupl na $0,049 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Hodnoty tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity všech materiálů pro suchý stav jsou uvedeny v tabulce č. 7. Ve srovnání s běžně používanými tepelně izolačními materiály, jako je polystyren nebo minerální vlna, přírodní materiály vykázaly tepelnou vodivost přibližně o 10 až 35% vyšší, přesto lze považovat tyto materiály za velmi dobré tepelné izolanty.

Tab. 7: Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
WFB	0.0466 ± 0.0034	2130 ± 338
FF	0.0545 ± 0.0093	1443 ± 260
HF	0.0543 ± 0.0088	1906 ± 312
JF	0.0518 ± 0.0050	1819 ± 303
SW	0.0446 ± 0.0032	1940 ± 331

Součinitel tepelné vodivosti byl měřen také v závislosti na teplotě a to v rozmezí od $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku č. 41. Podle očekávání tepelná vodivost stoupá s rostoucí teplotou.



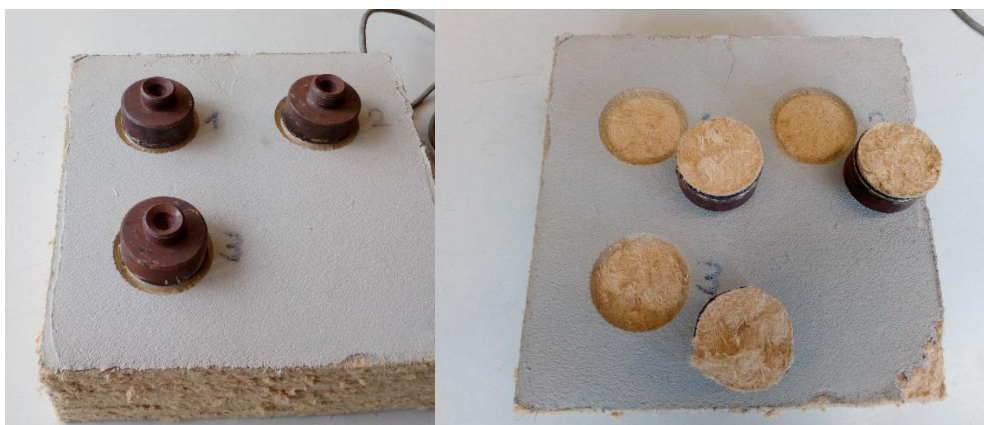
Obr. 41: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na teplotě

7.6 Mechanické vlastnosti

Tepelné izolace nejsou určeny k přenášení mechanického namáhání. To dokáží částečně přenést pouze dřevovláknité desky, zbylé materiály studované v této práci představují výplňový materiál. U dřevovláknitých desek byla měřena přídržnost malty k podkladu, což je z hlediska uživatele nejdůležitější parametr. Omítka byla korunkovým vrtákem proříznuta až na podklad. Epoxidovým lepidlem byl k omítce přilepen zkušební terč z oceli (Obr. 42). Po vytvrzení lepidla byl ke zkušebnímu terči připojen odtrhový přístroj Coming OP3. Otáčením zatěžovacího ramene byl terč zatěžován tahovou silou až do odtržení. Na displeji přístroje pak byla odečtena maximální síla v kN. Síla byla následně přepočítána na napětí, zatěžovací plocha byla kruhová o průměru 5 cm. Pro obě desky byly připraveny celkem 3 terče, v tabulce č. 8 je uvedena průměrná hodnota.



Obr. 42: Odtrhová zkouška u systému CIUR



Obr. 43: Odtřihová zkouška u systému Pavatex

Tab. 8: Přídržnost malty k podkladu

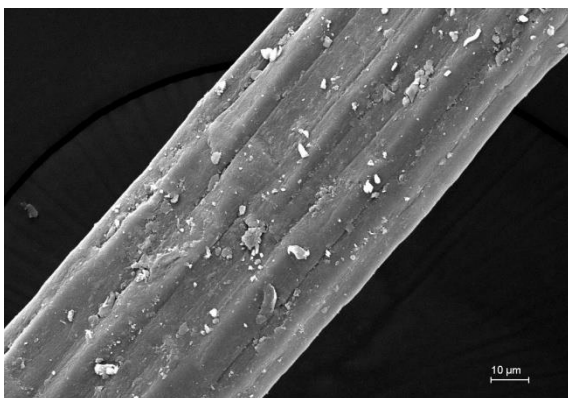
Materiál	Napětí [MPa]	Místo porušení
CIUR	0,053	V podkladu
Pavatex	0,05	V podkladu

V tabulce 8 jsou uvedeny výsledky přídržnosti malty k podkladu. U dřevovláknitých desek došlo k odtržení uvnitř desky, jedná se tedy o kohezi, tedy vnitřní soudržnost materiálu a výsledek lze považovat jako pevnost v tahu desky. Tato pevnost vyšla u obou desek přibližně stejně.

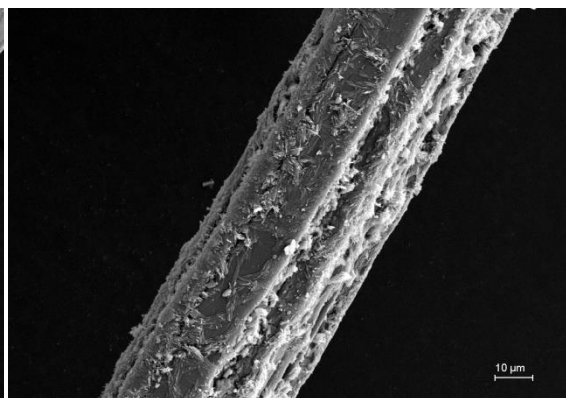
7.7 Analýza povrchu vláken studovaných materiálů pomocí elektronového mikroskopu

Jak je z výše uvedených výsledků vidět, každý materiál má jiné vlastnosti. Nejmarkantnější rozdíl je mezi dřevovláknitými deskami CIUR a Pavatex. Zatímco Pavatex vede kapalnou vodu velice snadno, deska CIUR Hard se chová naprosto opačně, tedy hydrofóbně. To pravděpodobně souvisí s povrchem vláken jednotlivých materiálů.

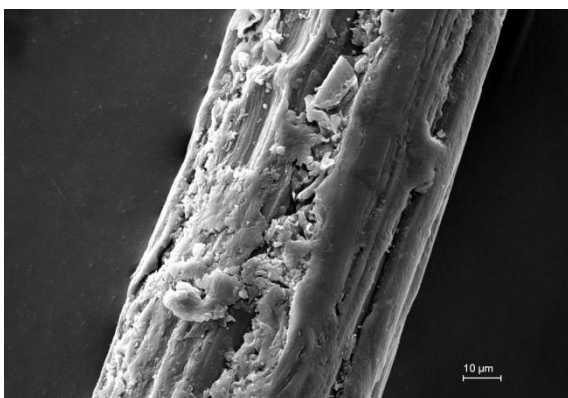
Rozdílný průměr a povrch jednotlivých druhů přírodních vláken dokumentují následující obrázky:



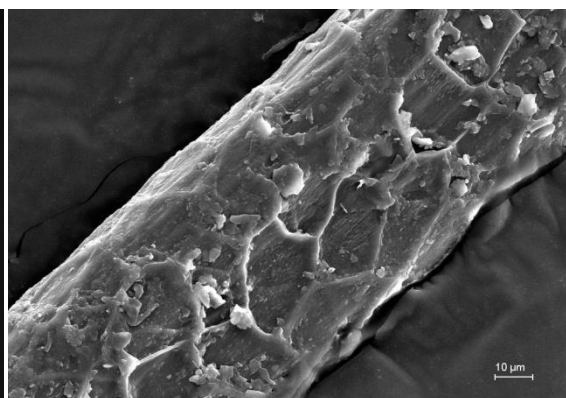
Vlákno Inu



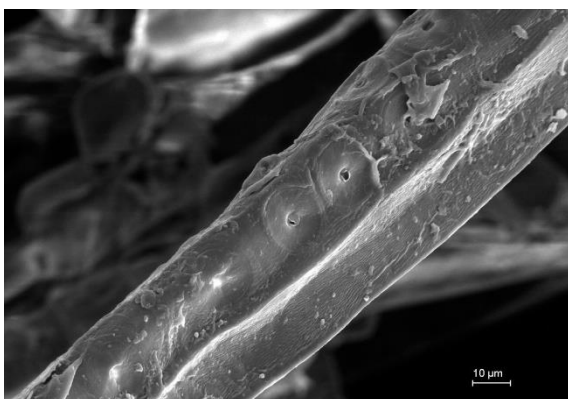
Jutové vlákno



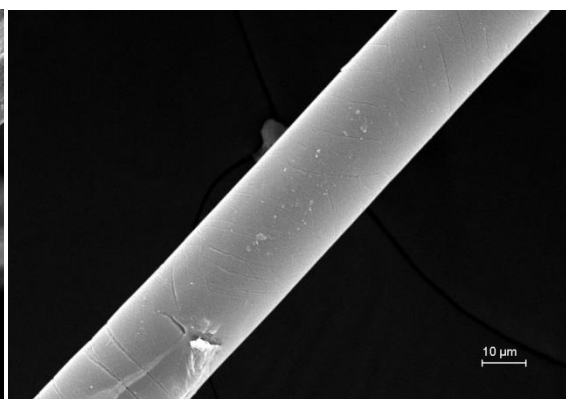
Konopné vlákno



Ovčí vlna



Dřevěné vlákno – CIUR



Dřevěné vlákno - PAVATEX

Obr. 44: Mikroskopické snímky

Snímky byly vytvořeny pomocí elektronového mikroskopu Merlin – Zeiss, kdy byl použit rastrovací mód a detektor sekundárních elektronů, urychlovací napětí 15 kV a pracovní vzdálenost 18 mm. Bylo použito shodné zvětšení 2 000x, vložené měřítko představuje délku 10 mikrometrů. Snímky byly pořízeny na Univerzitním centru energeticky efektivních budov UCEEB.

Z obrázků je patrný rozdíl mezi vláknem u Pavatexu a vlákny ostatních materiálů. Vláknem Pavatexu je naprosto čisté, na povrchu zbylých vláken jsou vidět voskové vrstvy. Podobné voskové vrstvy u neošetřeného lnu byly zaznamenány v článku L. Boulose [86].

7.8 Experiment Semi-scale

V minulých kapitolách byly určeny materiálové charakteristiky vytipovaných materiálů a systémů. Tyto charakteristiky slouží jako parametry pro počítačové simulace. Existuje několik počítačových modelů schopných hodnotit funkčnost vnitřního zateplení. Každopádně PC simulace mohou být zatíženy chybou. Nejspolehlivější ověření funkčnosti nového systému tepelné izolace poskytuje experiment full-scale, kdy se vybuduje celá konstrukce, aplikuje se na ni tepelně izolační systém a pomocí sond se sledují tepelná a vlhkostní pole. Takovýto experiment je samozřejmě možné provést u stávající konstrukce a sledovat průběhy teplot a vlhkosti během celého roku. Experiment full-scale provedl např. P. Wegerer ve Vídni, kde na cihelnou historickou budovu aplikoval vnitřní izolační systém Pavatex. Během experimentu nebyla zaznamenána žádná kondenzace vodní páry, relativní vlhkost vyšla příznivě v celém systému [64], ovšem nutno podotknout, že během testovacího období byla velice mírná zima a systém tak nebyl dostatečně prověřen. K prověření za předem daných náročných podmínek může dojít během experimentu semi-scale. Pro experiment semi-scale se postaví pouze fragment zdiva, na který se aplikuje studovaný systém. Ve fragmentu i dodatečné izolaci jsou umístěny sondy pro měření vlhkosti a teploty. Fragment zdiva se umístí mezi 2 komory, kde jedna simuluje exteriérové a druhá interiérové podmínky. Dojde tak k reálnému zatížení konstrukce, ale experiment si stále zachovává laboratorní charakter. Pomocí takového experimentu lze řešit i detaily viz obr. 46.

Systém NONSTAT se skládá ze dvou klimatických komor spojených tunelem o rozměrech 0,72 x 0,72 x 0,60 m pro umístění testované konstrukce (viz Obr. 45).



Obr. 45: Systém nonstat

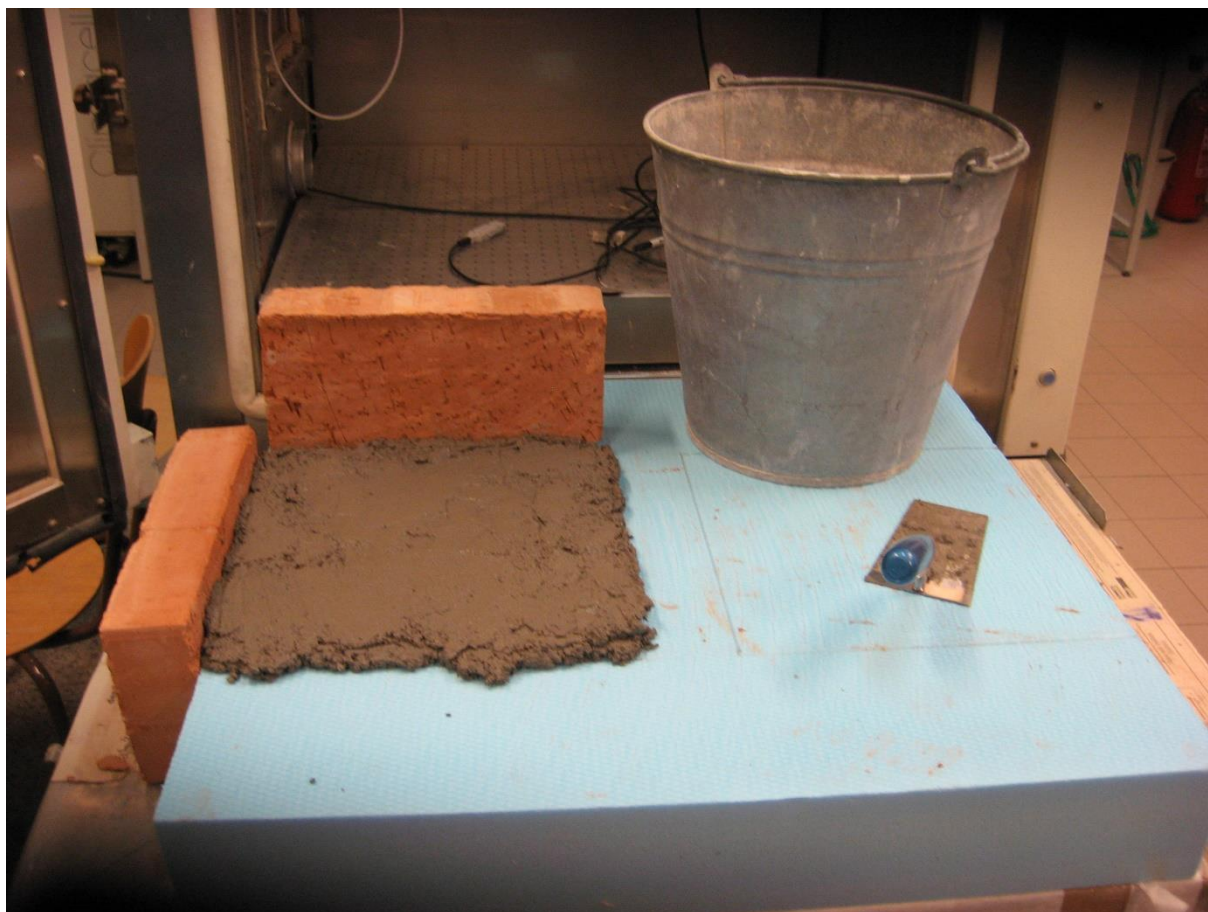
V testované cihle jsou umístěny kombinované sondy firmy Ahlborn pro monitorování relativní vlhkosti a teploty. Přesnost senzorů je následující: kapacitní senzory relativní vlhkosti jsou aplikovatelné v rozsahu vlhkostí 5-98% s přesností $\pm 2\%$, teplotní odporové senzory mají přesnost $\pm 0.4^\circ\text{C}$ v rozsahu teplot -20°C až 0°C , v rozsahu teplot 0°C až 70°C je přesnost měření teploty $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Samotnému sledování tepelných a vlhkostních změn v testované cihle předchází kalibrace senzorů pro měření obsahu vlhkosti pro jednotlivé materiály tvořící skladbu analyzované konstrukce [28]. Funkčnost senzorů pro monitorování relativní vlhkosti byla ověřena pomocí měření v exsikátorech, ve kterých byly umístěny nasycené roztoky solí odpovídající specifickým hodnotám relativní vlhkosti. Jednotlivé senzory byly přilepeny do sledované konstrukce.

Hlavní výhodou experimentu je možnost vytvoření poměrně objemného vzorku konstrukce. Tento vzorek je pak možné zatížit klimatickými podmínkami blízkými realitě, tedy teplotou, relativní a kapalnou vlhkostí, a sledovat jeho tepelně vlhkostní chování. Tento experiment si zachovává laboratorní charakter, což podstatně snižuje finanční náklady v porovnání s měřením na testovacích budovách [28].

Pro testování systému vnitřní tepelné izolace založenému na dřevovláknité izolační desce byla postavena zkušební zídka z plných pálených cihel viz obr 46-49. Na ni byl následně aplikován vnitřní tepelně izolační systém. Na jedné zídce byl systém s dřevovláknitou deskou Pavatex, na druhé byla dřevovláknitá deska dodaná firmou CIUR. Obě desky byly představeny a popsány v předcházejících kapitolách, zde pouze připomenu pár důležitých věcí. Deska Pavatex je speciálně určena pro vnitřní izolace. Je slepená ze dvou kusů, přičemž lepidlo slouží jako parobrzda. Díky parobrzdě by měla být převážná část vzdušné vlhkosti zůstat mimo kondenzační zónu. Desky Pavatex jsou hydrofilní, mají vysoký absorpční koeficient vody a vysokou vlhkostní vodivost, která se zvyšuje s rostoucí vlhkostí. Na vedlejší zídce byl aplikován systém CIUR založený na běžných dřevovláknitých deskách. Systém CIUR se skládá z 8 cm široké soft vrstvy a 4 cm široké hard vrstvy. Soft vrstva má dobré tepelně izolační vlastnosti, hard vrstva dokáže přenést mechanické namáhání.

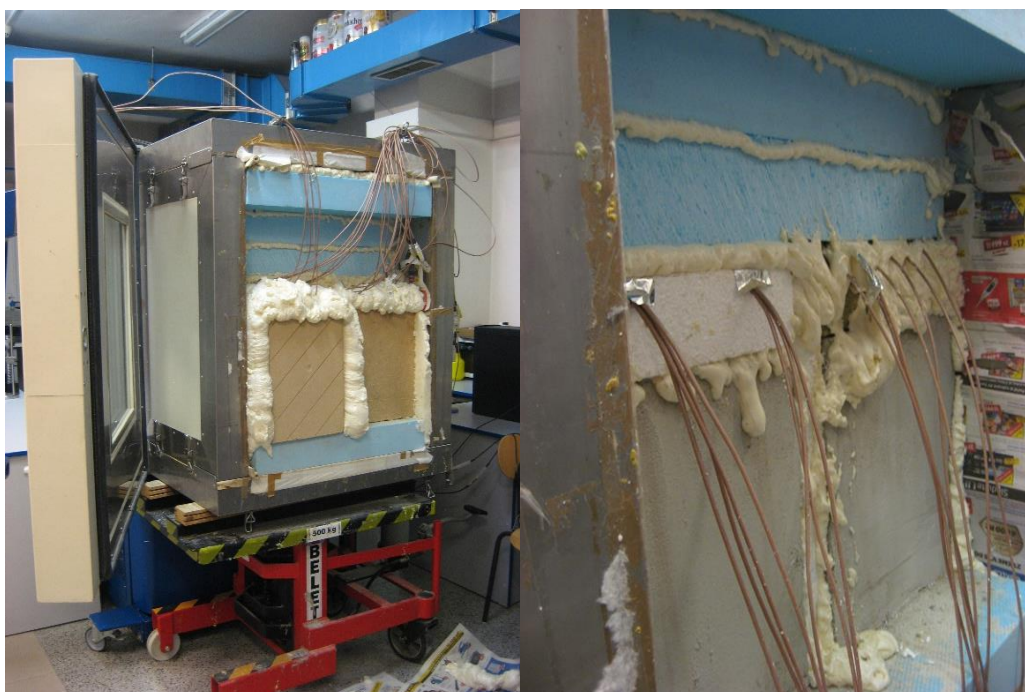
Obě testované konstrukce byla zatíženy klimatickými daty pro zimní období pro město Olomouc.



Obr. 46: Podklad pro cihelnou konstrukci



Obr. 47: Cihelné zídky se senzory



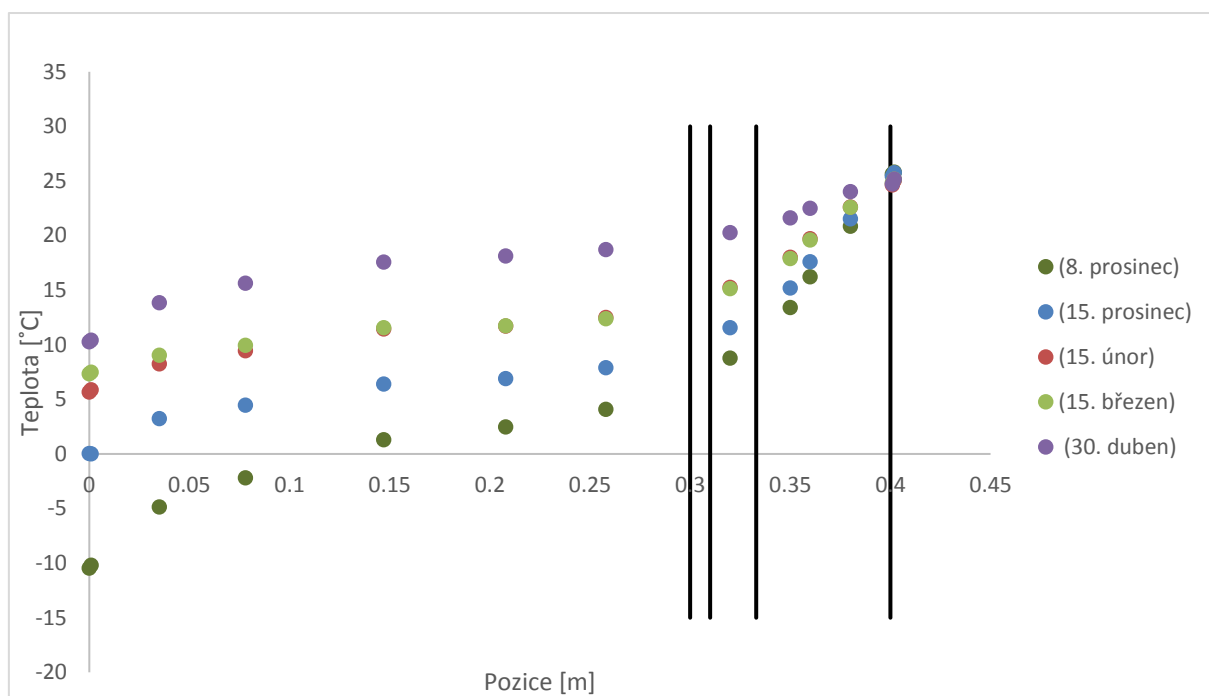
Obr. 48: Cihelné zídky opatřené tepelně izolačními systémy



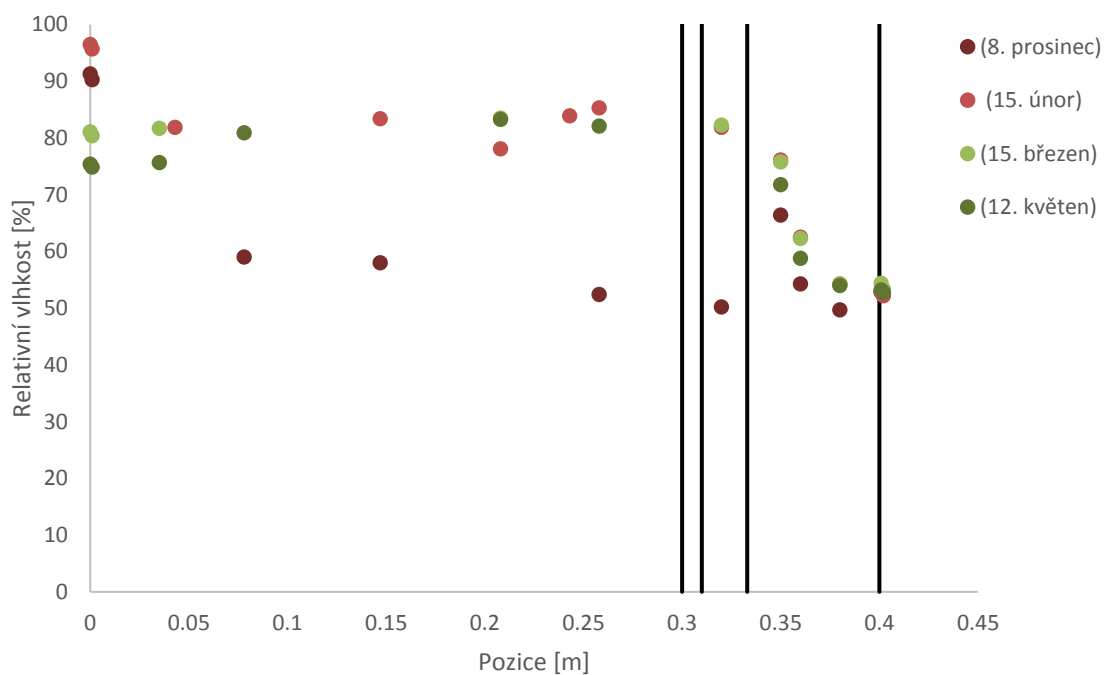
Obr. 49: Cihelné zidky opatrené tepelně izolačními systémy

7.9 Výsledky experimentu semi-scale

Průběhy teplot a relativní vlhkosti pro cihelnou zidku zateplenou dřevovláknitou deskou Pavatex jsou zachyceny na obrázku č. 50 respektive 51. Největší gradient teploty je dle očekávání v tepelné izolaci. Nejvyšší účinnost tepelné izolace je ve směru od parobrzdy k interiéru. Za parobrzdou, směrem k exteriéru, již vlivem nižší teploty dojde k nárůstu relativní vlhkosti, následnému navýšení tepelné vodivosti a tím pádem ke snížení gradientu teploty. Každopádně RH v dřevovláknité desce překročí hranici 80 % jenom pár dní v roce, což se dá považovat za příznivý výsledek. V cihelném zdivu se relativní vlhkost drží pod kondenzační zónou. V jarních měsících a v létě dojde k vysušení konstrukce. Na základě uvedených výsledků lze považovat desku Pavatex se zabudovanou parobrzdou za vhodný materiál pro vnitřní tepelné izolace.

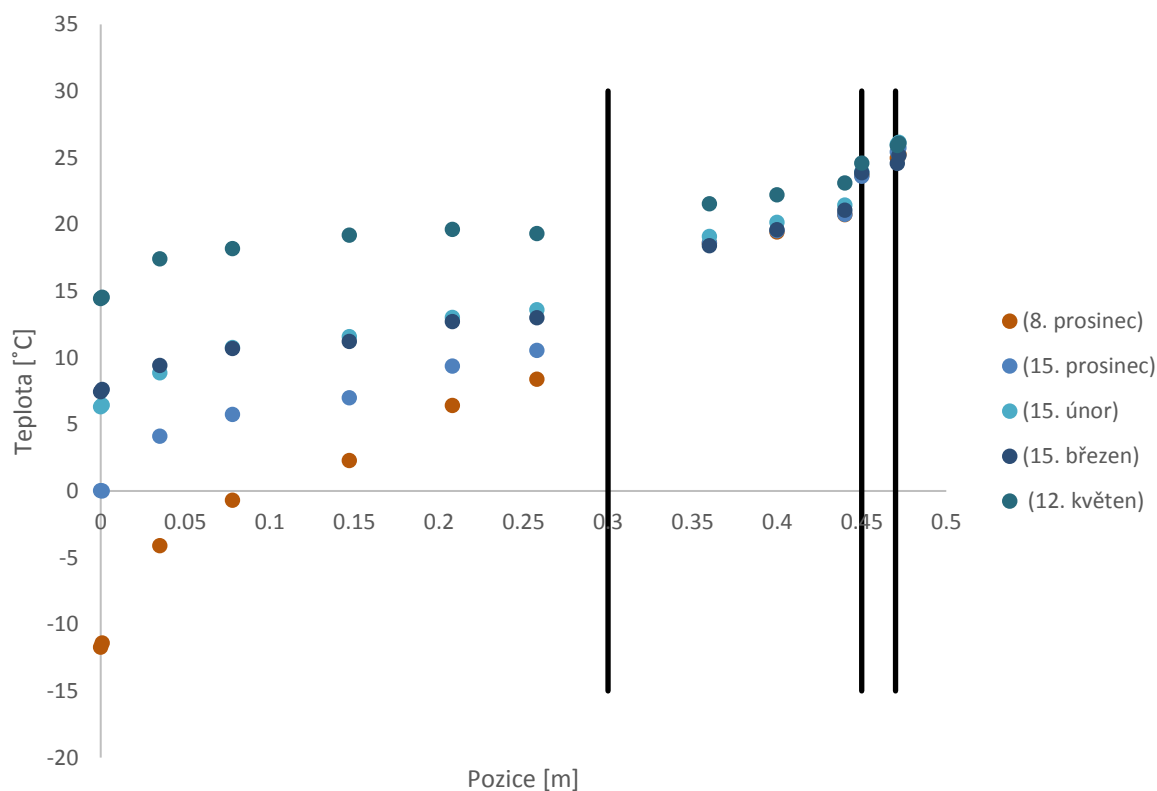


Obr. 50: Průběh teploty v cihelné zídce s tepelnou izolací Pavatex

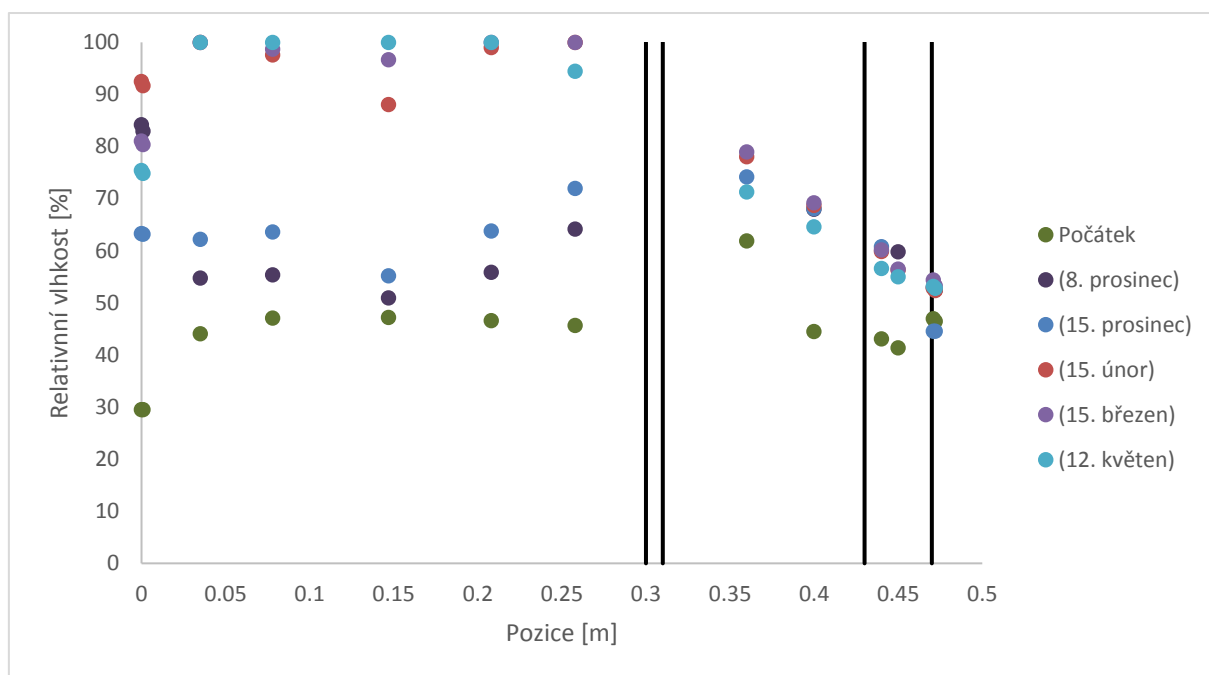


Obr. 51: Průběh relativní vlhkosti v cihelné zídce s tepelnou izolací Pavatex

Průběhy teplot pro systém CIUR jsou zachyceny na obrázku č. 52. V tomto případě nedochází k tak velké teplotní změně v tepelné izolaci jako u systému Pavatex. To je způsobeno navýšením součinitele tepelné vodivosti v důsledku zvýšené vlhkosti. Průběhy vlhkosti jsou znázorněny na obrázku č. 53. Jak je vidět, relativní vlhkost v cihelném zdivu dosahuje 98%, v takovém případě dochází ke kondenzaci vodní páry a následnému razantnímu navýšení součinitele tepelné vodivosti. Vysoká vlhkost zdiva je pravděpodobně zapříčiněna díky difúzně otevřené desce CIUR. Vlhkost tedy pronikne až na chladnou cihelnou konstrukci, kde dochází k nárůstu její koncentrace. Tento systém s paropropustnou omítkou je tedy nevhodný. Dřevovláknitá deska bez hydrofilních úprav by mohla fungovat pouze s parozábranou. Tato deska je doporučována k užití vnitřní tepelné izolace pouze s omítkou mající faktor difúzního odporu vodní páry vyšší než 100. Pak už se ale nejedná o difúzně otevřený systém. Deska CIUR by však na rozdíl od desky Pavatex mohla být využita pro exteriérové zateplovací systémy.



Obr. 52: Průběh teploty ve fragmentu zdiva se systémem CIUR



Obr. 53: Průběh relativní vlhkosti ve fragmentu zdiva se systémem s dřevovláknitou deskou bez úprav

8 Využití dosažených poznatků pro návrh dodatečného vnitřního zateplovacího systému

Při dodatečném vnitřním zateplení je nutné postupovat velice pečlivě a zároveň i s nadhledem. Především je nutné vyřešit detaily, zejména napojení dřevěných trámů na nosné zdivo, protože zde je velké riziko degradace dřevěného materiálu. V takovémto případě se používají 2-dimenzionální počítačové simulace. K tomu je potřeba znát materiálové charakteristiky v závislosti na teplotě a vlhkosti. Ovšem dřevo je ortotropní materiál, zde je nutné uvažovat parametry v závislosti na směru. Znalost všech materiálových charakteristik je nutnou podmínkou pro použití počítačových simulací.

Numerické simulace přenosu tepla a vlhkosti představují velmi účinný nástroj pro tepelně vlhkostní posouzení funkčnosti dodatečné vnitřní tepelné izolace v historických budovách. Je ovšem nutné brát ohled na velké množství nejistot v historické konstrukci. Poměrně velká nejistota spočívá v široké variabilitě vlastností některých materiálů, které byly používány nepřetržitě od starověku do současnosti, jako jsou malty nebo cihly. Samozřejmě je možné najít si v databázích materiálové charakteristiky, případně si je naměřit. Pokud se podíváme na obrázek č. 54, je vidět nedostatečné vypálení u jedné z cihel a to jsou výrobky z jedné jediné cihelny. Otázka pak je, jaké materiálové charakteristiky bude mít cihelná konstrukce, kde ani nevíme, v jaké cihelně a kdy byly cihly vyrobeny. A to je pouze jediný příklad, další mohou následovat, malty, omítky z různého období atp. Z výše uvedených faktů vyplývá, že výpočtové modely by měly být používány s určitým nadhledem, protože tepelně-vlhkostní analýza každé historické budovy může zahrnovat několik nejistot, a ty mohou negativně ovlivnit přesnost získaných výsledků.



Obr. 54: Řez cihlou plnou pálenou

Další důležitou roli hraje historie stavby. Během existence starobylého objektu mohlo dojít k několika postupným rekonstrukcím. V průběhu staletí se měnilo složení materiálů, měnila se i technologie výroby. Původní malta se svými vlastnostmi se může odlišovat od malty použité při rekonstrukci. Další nejistoty lze nalézt v možných nehomogenitách starých plášťů budov. V průběhu staletí mohly být některé stavby zcela nebo na některých místech přestavěny, jak ukazuje obrázek 55, kde bylo okno při rekonstrukci vyplněno kamenným zdivem.

Pokud by došlo k aplikaci vnitřního tepelného systému, v zimním období by teplota v místě vyplněného okna byla nižší, než v jiných částech konstrukce. Tím pádem by v inkriminovaném místě bylo riziko kondenzace vyšší, než by se dalo předvídat jednoduchou počítačovou simulací, pokud by se tato anomálie nebrala v úvahu. Podobnou anomálii je vidět na dalším obrázku (obr. č. 56), kde cihelné zdivo bylo vyspraveno pomocí pórobetonových tvárnic. Zde by však situace byla opačná, protože pórobeton má nižší součinitel tepelné vodivosti než cihla.



Obr. 55: Historická konstrukce se zazděným okenním otvorem



Obr. 56: Cihelná konstrukce vyspravená pórobetonovými tvárnicemi

Je tedy zřejmé, že u stávajících budov musí před aplikací vnitřního systému zateplení být proveden pečlivý stavební průzkum, který odhalí možná rizika.

9 Závěr

V práci byly představeny a popsány přírodní materiály a jejich využití ve stavebním průmyslu. Přírodní materiály respektive dřevo a materiály na bázi dřeva je možné použít na vybudování nosné konstrukce. Ostatní přírodní materiály jsou vhodné především jako tepelné, případně akustické izolace. Ovšem existují i další možnosti, z přírodních dorůstajících materiálů lze získat materiály pro podlahové krytiny, nosné konstrukce až po střešní krytinu. Speciální pozornost byla věnována studiu vlastností bio-materiálů potenciálně použitelných pro vnitřní tepelně izolační systémy.

Bylo vytipováno několik materiálů, konkrétně 2 druhy dřevovláknitých desek, dále lněná, konopná, jutová izolace a ovčí vlna. Obecně pro tepelně izolační materiály je velice důležitý součinitel tepelné vodivosti. Ten vyšel podle předpokladů nejvyšší u dřevovláknitých desek CIUR Hard, a Pavatex, přibližně $0,06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. To je způsobeno jejich vyšší objemovou hmotností. U ostatních materiálů vyšel součinitel vlhkostní vodivosti $\sim 0,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což je sice vyšší hodnota než u konvenčních tepelně izolačních materiálů, přesto je možné studované materiály stále považovat za kvalitní tepelné izolace. Co se týče difúzních vlastností, je možné všechny přírodní materiály považovat za paropropustné, faktor difúzního odporu vodní páry nebyl u žádného materiálu vyšší než 5.

Dále byl měřen transport kapalné vody. Nejvyšší absorpční koeficient kapalné vody byl zjištěn u dřevovláknité desky Pavatex. U Pavatexu vyšly podobné materiálové parametry jako u kalcium silikátu. Schopnost transportovat kapalnou vodu je pro vnitřní zateplovací systémy velice důležitá, ovšem biomateriály zřejmě ve vnitřních systémech zateplení fungují na jiném principu. Všechny materiály dokáží pojmout velké množství vodní páry. Na rozdíl od hydrofilní minerální vlny jsou přírodní materiály schopny pojmout velké množství vzdušné vlhkosti, což může být v určitých případech výhodou. Může dojít k rozprostření vzdušné vlhkosti v celém objemu vzorku, což může snížit riziko kondenzace.

Pro testování v podmínkách blízkých realitě byly vybrány dřevovláknité desky. Jak je uvedeno výše, deska Pavatex má podobné vlastnosti jako kalcium silikát, proto se jeví jako vhodný kandidát pro vnitřní zateplovací systém. Deska CIUR je schopná pojmout velké množství vzdušné vlhkosti, proto byla vybrána pro další testování, přestože nedosahuje takové schopnosti transportu kapalné vody jako deska Pavatex.

Pokusem semi-scale byla potvrzena správná funkce desky Pavatex. Relativní vlhkost v samotné desce během kritického zimního období nepřesáhla kondenzační mez, jenom pár dní

v roce se pohybovala nad kritickými 80%. V nosném zdivu pak RH vyšla rovněž relativně příznivě pod kondenzační zónou.

U desky CIUR vyšly vlhkostní pole méně příznivě. Pravděpodobně lepší výsledky by vyšly, pokud by z vnitřní strany byla použita paronepropustná omítka. Tyto výsledky jsou v souladu s poznatky uvedenými autorkou E. Vereecken [26]

Přírodní materiály představují velice zajímavou skupinu stavebních hmot, snadno se recyklují, jsou zdravotně nezávadné. Jejich hlavní předností je nízká ekologická zátěž. Přestože mají velkou perspektivu snížit negativní environmentální dopady stavebnictví, jsou využívány jen okrajově. K jejich rozšíření ve stavebnictví je nutné podniknout několik kroků:

- K tomu, aby jakýkoliv materiál mohl být použit ve stavební konstrukci, musí splnit především legislativní požadavky. To se týká především CLT panelů pro výstavbu výškových budov. Využití CLT panelů pro výškové budovy v ČR zatím není možné, jelikož podle normy musí nosná konstrukce mít reakci na oheň A1. Ovšem vedle této normy je zde norma požární odolnost ČSN 73 0802, podle které by pravděpodobně CLT panely ale i další přírodní materiály použity být mohly. Pomohl by zde výzkum požárních vlastností.
- Pro návrh konstrukce je nutné znát veškeré materiálové charakteristiky jednotlivých komponent konstrukce. U přírodních materiálů jsou uváděny tyto charakteristiky pouze jako konstanty. Bylo by tedy vhodné zaměřit se na tento bod a změřit veškeré charakteristiky v závislosti na vlhkosti a na teplotě.
- Dále by mohla být testována životnost jednotlivých materiálů, odolnost vůči různým podmínkám, test biodegradace. Tyto analýzy doplnit studií LCA, aby byl prokázán jejich příznivý přínos pro životní prostředí.
- Další překážkou pro širší použití přírodních materiálů je jejich vyšší cena oproti syntetickým hmotám. V pořizovací ceně nejsou zahrnuty náklady na recyklaci materiálu. Zde by pomohlo provést ekonomické studie, které by vzaly v potaz veškeré náklady během životního cyklu materiálu.
- Využití přírodních vláken, především lněných, ale i konopných jako rozptýlené výztuže do betonu. Zde by se muselo ověřit, zda tato vlákna jsou schopna odolat alkalickému prostředí.
- Další výzkum by mohl být zaměřen na vylepšení dřevoplastu WPC, kde by polymery jako je PE, PP, PVC mohly být nahrazeny ekologičtějšími polymery, např. PLA.

Literatura

- [1] BS EN 15978:2011 Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method, BSI 2011, ISBN 978 0 580 77403 4
- [2] ČSN 73 0540-1, Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie, Nahrazení předchozích norem. ČSN 73 0540-1 z května 1994. Praha: Český Normalizační Institut, 2005, 68 s.
- [3] ČSN 73 0540-1, Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky, Nahrazení předchozích norem. ČSN 73 0540-2 z dubna 2007. Praha: Úřad pro technickou normalizaci metrologií a státní zkušebnictví, 2011, 56 s. ISC 91.120.10
- [4] ČSN 73 0540-3, Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Nahrazení předchozích norem. ČSN 73 0540-3 z května 1994. Praha: Český Normalizační Institut, 2005, 96 s.
- [5] ČSN 73 0540-4, Tepelná ochrana budov – Část 4: Terminologie, Nahrazení předchozích norem. ČSN 73 0540-4 z května 1994. Praha: Český Normalizační Institut, 2005, 60 s.
- [6] J.T. Kim, C.W.F. Yu, Sustainable development and requirements for energy efficiency in buildings - the Korean perspectives, Indoor Built Environ. 27 (6) (2018) 734–751 <https://doi.org/10.1177/1420326x18764618>
- [7] R. Escandon, S. Silvester, T. Konstantinou, Evaluating the environmental adaptability of a nearly zero energy retrofitting strategy designed for Dutch housing stock to a Mediterranean climate, Energy Build. 169 (2018) 366–378 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.079>.
- [8] I. Cetiner, A.D. Shea, Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings, Energy & Buildings, 168 (2018) 374–384 doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.019
- [9] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S. Schiavoni, A review of unconventional sustainable building insulation materials, Sustainable Materials and Technologies 4 (2015) 1–17 <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- [10] F. Gubbels, D. D. Santi, V. Baily, Durability of vacuum insulation panels of an insulating glass unit, Journal of Building Physics, 38 (6) (2015) 485–499 [doi.org/ 10.1177/1744259114522118](https://doi.org/10.1177/1744259114522118)
- [11] H. Simmler, S. Brunner, Vacuum insulation panels for building application Basic properties, aging mechanisms and service life, Energy and Buildings 37 (2005) 1122–1131 [doi:10.1016/j.enbuild.2005.06.015](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.015)
- [12] J. Laskowski, B. Milow, L. Ratke, Aerogel-aerogel composites for normal temperature range thermal insulations, Journal of Non-Crystalline Solids (441) (2016) 42–48 [http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.03.020](https://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.03.020)
- [13] A. Lakatos, A. Trník, Thermal characterization of fibrous aerogel blanket, MATEC Web of Conferences 282, 0,001 (2019) CESBP 2019
- [14] F. Pittau, F. Krause, G. Lumia, G. Habert, Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. Building and Environment, Vol. 129, 2018, 117–129. doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006
- [15] J. Chybík: Přírodní stavební materiály. Grada 2009, ISBN 978-80-247-2532-1

- [16] P. Schůtová, Tepelně izolační materiály a jejich využití ve stavebních konstrukcích, bakalářská práce, ČVUT FSV 2017
- [17] R.J. Ross, Wood Handbook, Wood as an Engineering Material, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL- GTR-190, 2010: 509
- [18] E.D. Vicente, J. P. Riberio, D. Custódio, C. A. Alves, Assessment of the indoor air quality in copy centres at Aveiro, Portugal, Air Qual Atmos Health (2017) 10:117–127, [DOI 10.1007/s11869-016-0401-8](https://doi.org/10.1007/s11869-016-0401-8)
- [19] L. Trézl, A. Csiba, S. Juhaász, M. Szentgyörgyi G. Lombai, L. Hullán, Endogenous formaldehyde level of foods and its biological significance, Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A, 205 (1997) 300-304
- [20] D.E. Hun, R.L. Corsi, M.T. Morandi, J.A. Siegel, Formaldehyde in residences: long-term indoor concentrations and influencing factors. Indoor Air (20) (2010), 196–203, <http://dx.doi.org/10.1111/j.0905-6947.2010.00644.x>.
- [21] B. C. Singer, R. Z. Pass, W. W. Delp, D. M. Lorenzetti, R. L. Maddalena, Pollutant concentrations and emission rates from natural gas cooking burners without and with range hood exhaust in nine California homes, Building and Environment 122 (2017) 215e229, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.021>
- [22] E.D. Vicente, J. P. Riberio, D. Custódio, C. A. Alves, Assessment of the indoor air quality in copy centres at Aveiro, Portugal, Air Qual Atmos Health (2017) 10:117–127, [DOI 10.1007/s11869-016-0401-8](https://doi.org/10.1007/s11869-016-0401-8)
- [23] B.K.Stefanowski, S.F.Curling, G.A.Ormondroy, Assessment of lignocellulosic nut wastes as an absorbent for gaseous formaldehyde, Industrial Crops and Products 98 (2017) 25-28 <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.012>
- [24] A.L. Webb, Energy retrofits in historic and traditional buildings: a review of problems and methods, Renew. Sustain. Energy Rev. 77 (2017) 748–759 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>.
- [25] M. Jerman, M. Solař, R. Černý, Interior thermal insulation systems for historical building envelopes, Proceedings of the International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2017. New York: AIP Conference Proceedings, 2017. ISSN 1551-7616. ISBN 978-0-7354-1596-6. [doi: 10.1063/1.5012415](https://doi.org/10.1063/1.5012415)
- [26] E. Vereecken, S. Roels, Capillary active interior insulation: do the advantages really offset potential disadvantages? Materials and Structures 48, 3009–3021 (2015). [DOI 10.1617/s11527-014-0373-9](https://doi.org/10.1617/s11527-014-0373-9)
- [27] P. Klůšeiko, E. Arumägi, T. Kalamees, Hygrothermal performance of internally insulated brick wall in cold climate: A case study in a historical school building, Journal of Building Physics 2015, Vol. 38(5) p. 444–464 doi.org/10.1177/1744259114532609
- [28] Z. Pavlík, R. Černý, Hygrothermal performance of an innovative interior thermal insulation system, Applied Thermal Engineering 29, 1941-1946 (2009). doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.09.013
- [29] M. Jerman, J. Maděra, R. Černý, Computational Modeling of Heat and Moisture Transport in a Building Envelope with Hydrophilic Mineral Wool Insulation. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Lyngby: Technical University of Denmark, 2008, pp. 449-456.

- [30] J. Schläefer, Ch. Sol, T. Lia, D. Malarde, M. Portnoi, T. J. Macdonald, S. K. Laney, M. J. Powell, I. Top, I. P. Parkin, I. Papakonstantinou, Thermochromic VO₂ – SiO₂ nanocomposite smart window coatings with narrow phase transition hysteresis and transition gradient width, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 200 (2019) 109944, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109944>
- [31] H.J. Blaß, P. Schädle, Ductility aspects of reinforced and non-reinforced timber joints, *Engineering Structures* 33 (2011) 3018-3026 [dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.001](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.001)
- [32] G. Pajchrowski, A. Noskowiak, A. Lewandowska, W. Strykowski, Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings, *Construction and Building Materials* 52 (2014) 428-436
- [33] Dřevostavby, dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/doporujeme/5515-statistika-vystavby-drevostaveb-2018-pocet-novych-drevostaveb-v-cr-neustale-roste>) říjen 2019
- [34] M. Nasir, D.P. Khali, M. Jawaaid, P.M. Tahir, R. Siakeng, M. Asim, T.A. Khan, Recent development in binderless fiber-board fabrication from agricultural residues: A review, *Construction and Building Materials* 211 (2019) 502-516, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.279>
- [35] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, A. Thiel, Cross laminated timber (CLT): overview and development, *European Journal of Wood Products*, 2016, 74, pp. 331-351 DOI 10.1007/s00107-015-0999-5
- [36] A. Ceccotti, C. Sandhaas, M. Okabe, M. Yasumura, C. Minowa, N. Kawai, SOFIE project-3D shaking table test on seven-storey full-scale cross-laminated timber building, *Earthquake Engineering & structural Dynamics*, 2013, 42, pp. 2003-2021 DOI: 10.1002/eqe.2309
- [37] S. Kalami, N. Chen, H. Borazjani, M. Nejad, Comparative analysis of different lignins as phenol replacement in phenolic adhesive formulations, *Industrial Crops & Products* 125 (2018) 520-528, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.09.037>
- [38] R. Réh, R. Igaz, L. Křišťák, I. Ružiak, M. Gajtanska, M. Božíková, M. Kučerka, Functionality of Beech Bark in Adhesive Mixtures in Plywood and Its Effect on the Stability Associated with Material Systems, *Materials* 2019, 12, [doi:10.3390/ma12081298](https://doi.org/10.3390/ma12081298)
- [39] L. Lim, T. Kim, H. Cho, KI Kang, Simulation-based planing model for table formwork operation in tall building construction, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2017, 17, pp. 115-122 doi.org/10.3130/jaabe.16.115
- [40] Liu, Flexural properties evaluation of carbon-fiber reinforced eucalyptus composite plywood formwork, *Composites Structures*, 2019, 224 111073 doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111073
- [41] DH. Li, JL Sheng, BR Zhuang, ZZ Wu, JT Aladejana, JH Liu, Study on Hot-pressing Technology of Chitosan-modified Starch Adhesive Film, *Bioresources*, 2019, 14, pp. 4316-4328 DOI: 10.15376/biores.14.2.4316-4328
- [42] H. Kallakas, M. Närep, A. Närep, T. Poltimäe, J. Kers, Mechanical and physical properties of industrial hemp-based insulation materials, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2018, 67, 2, 183–192 <https://doi.org/10.3176/proc.2018.2.10>, Available online at www.eap.ee/proceedings

- [43] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancrét, Y. Scudeller, L. Goudet, Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 2116–2123, [doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016)
- [44] P. Cetera, F. Negro, C. Cremonini, L. Todaro, Physico-Mechanical Properties of Thermally Treated Poplar OSB, *Forests* 2019, 9, 345 <https://doi.org/10.3390/f9060345>
- [45] Md. Shahnewaz, M.S. Islam, T. Tannert, M.S. Alam, Flange-notched wood I-joints reinforced with OSB collars: Experimental investigation and sensitivity analysis, *Structures* 19, 2019, pp. 490-498 <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.02.009>
- [46]] M.S. Islam, Md. Shahnewaz, M. S. Alam, Structural capacity of timber I-joist with flange notch: Experimental evaluation, *Construction and Building Materials*, 79, 2015, pp. 290 – 300 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.017>
- [47] A. Quiroga, V. Marzocchi, I. Rintoul, Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and *Populus Euroamericana* wood fibers, *Composites Part B* 84, 2016, pp.25-32 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.069>
- [48] T. Čermoch, WPC (Wood plastic composite) – Dřevo-plastový kompozit, Diplomová práce, (2017), FSV ČVUT
- [49] K. Kamau-Devers, Z. Kortum, S. A. Miller, Hydrothermal aging of bio-based poly(lactic acid)(PLA) composites: Studies on sorption behavior, morphology, and heat conductance, *Construction and Building Materials* 214, 2019, pp. 290-302 doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.098
- [50] J. Vrzáň, Beton s přírodními plnivý, Bakalářská práce, (2018) FSV ČVUT
- [51] H.-R. Kymäläinen, A.-M. Sjöberg, Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations, *Building and Environment* 43 (2008) 1261–1269 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
- [52] J. Zach, A. Korjenic, V. Petránek, J. Hroudová, T. Bednar, Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool, *Energy and Buildings* 49 (2012) p. 246–253 [doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.014](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.014)
- [53] H. Viitanen, J. Vinha, K. Salminen, T. Ojanen, R. Peuhkuri, L. Paajanen, K. Lähdensmäki, Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures, *Journal of Building Physics*, 33 (2010) p. 201-224 [DOI: 10.1177/1744259109343511](https://doi.org/10.1177/1744259109343511)
- [54] M. Guizzardi, M., Carmeliet, J., Derome, D., Risk analysis of biodeterioration of wooden beams embedded in internally insulated masonry walls, *Construction and Building Materials* 99, (2015) pp. 159-168. [http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.022](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.022)
- [55] G. R. Finken, S.P. Bjarlöv, R.-H. Peuhkuri, Effect of façade impregnation on feasibility of capillary active thermal internal insulation for a historic dormitory – A hygrothermal simulation study *Construction and Building Materials* 113 (2016) p. 202–214 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.019>
- [56] F. Izzo, A. Arizzi, P. Cappelletti, G. Cultrone, A.D. Bonis, Ch. Germinario, S.F. Graziano, C. Grifa, V. Guarino, M. Mercurio, V. Morra, A. Langella, The art of building in the Roman period (89 B.C. – 79 A.D.): Mortars, plasters and mosaic floors from ancient Stabiae (Naples, Italy), *Construction and Building Materials* 117 (2016) 129–143 [http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.101](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.101)

- [57] J. Hošek, L. Losos, Historické omítky průzkumy, sanace, typologie, Grada (2007) ISBN 978-80-247-1395-3
- [58] B. A. Güney, E. Caner, Thermal and hygric expansion characteristics of mortars and bricks used in the dome structures of Turkish Baths from 14th and 15th centuries, Construction and Building Materials 95 (2015) 757–761, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.176>
- [59] Johansson, P., Geving, S., Hagetoft, C.-E., Jelle, B. P., Rognvik, E., Kalagasidis, A. S., Time, B., Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vakuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations, Building and Environment 79 (2014) 31-45 <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.014>
- [60] Arumăgia, E., Pihlakb, M., Kalameesa, T., Reliability of interior thermal insulation as a retrofit measure in historic wooden apartment buildings in cold climate. 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 Energy Procedia 78 (2015) 871 – 876 [doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.010](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.010)
- [61] P. Peschel, Dřevařská příručka, Sobotáles nakladatelství, 2002, ISBN: 80-85920-84-0
- [62] Zagorskas, J., Zavadskas, E.K., Turskis, Z., Burinskiene, M., Blumberga, A., Blumberga, D., Thermal insulation alternatives of historic brick buildings in Baltic Sea Region, Energy and Buildings 78 (2014) p. 35-42, doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.010
- [63] M. Jerman, I. Palomar, V. Kočí, R. Černý, Thermal and hygric properties of biomaterials suitable for interior thermal insulation systems in historical and traditional buildings, Building and Environment 154 (2019) 81–88, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.020>
- [64] Wegerer, P., Nackler, J.N., Bednar T., Measuring the Hygrothermal Performance of an Interior Insulation made of Woodfibre Boards, Energy Procedia 78 (2015) p. 1478 – 1483 [https://doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.173](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.173)
- [65] katalog firmy Ciur a.s., dostupné z: www.ciur.cz , duben 2016
- [66] katalog firmy Pavatex, dostupné z: www.pavatex.ch, květen 2016
- [67] technické listy firmy Isonat, dostupné z www.isonat.com , duben 2016
- [68] Technické listy firmy izolace-konopí, dostupné z <http://www.konopi-izolace.cz/>, duben 2016
- [69] Hurtado, P.L., Rouilly A., Vandenbossche, V., Raynaud Ch., A review on the properties of cellulose fibre insulation, Building and Environment 96 (2016) 170e177
- [70] E., Latif, MA. Ciapala, S. Tucker, DC. Wijeyesekera, Hygrothermal insulation in timber frame wall panels with and without a vapour barrier, Building and Environment 92 (2015) p. 122-134, DOI: [10.1016/j.buildenv.2015.04.025](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.025)
- [71] technické listy firmy Isolena, dostupné z www.isolena.at, duben 2016
- [72] ČSN EN ISO 12572, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague, 2017.
- [73] M. Palumbo, A.M. Lacasta, N. Holcroft, A. Shea, P. Walker, Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials, Construction and Building Materials 124 (2016) 269-275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106>

- [74] S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, O. Adan, H. Brocken, R. Cerny, Z. Pavlik, C. Hall, K. Kumaran, L. Pel, R. Plagge, Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials, *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 27(4) (2004) 307-325. <https://doi.org/10.1177/1097196304042119>.
- [75] M. Jerman, R. Cerny, Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials, *Energy and Buildings* 53 (2012) 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.002>.
- [76] J. Zach, J. Hroudova, J. Brozovsky, Z. Krejza, A. Gailius, Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems, *Modern Building Materials, Structures and Techniques* 57 (2013) 1288-1294. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.162>.
- [77] A. Bourdot, T. Moussa, A. Gacoin, C. Maalouf, P. Vazquez, C. Thomachot-Schneider, C. Bliard, A. Merabtine, M. Lachi, O. Douzane, H. Karaky, G. Polidori, Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties, *Energy and Buildings* 153 (2017) 501-512. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.022>.
- [78] E. Troppova, M. Svehlik, J. Tippner, R. Wimmer, Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards, *Materials and Structures* 48(12) (2015) 4077-4083. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0467-4>.
- [79] A. Korjenic, V. Petranek, J. Zach, J. Hroudova, Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy and Buildings* 43(9) (2011) 2518-2523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>.
- [80] C. Feng, H. Janssen, Hygric properties of porous building materials (II): Analysis of temperature influence, *Building and Environment* 99 (2016) 107-118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.016>.
- [81] A.A. Hamid, P. Wallenten, Hygrothermal assessment of internally added thermal insulation on external brick walls in Swedish multifamily buildings, *Building and Environment* 123 (2017) 351-362. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.019>.
- [82] C. Feng, H. Janssen, Y. Feng, Q.L. Meng, Hygric properties of porous building materials: Analysis of measurement repeatability and reproducibility, *Building and Environment* 85 (2015) 160-172. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.036>.
- [83] M. Jerman, J. Žumár, M. Benáková, J. Nováček, R. Černý, Vliv lehčených plniv na materiálové charakteristiky omítkových směsí, *Stavební obzor, ČVUT – FSv*, 23 (2014) 20-25, ISSN: 1805-2576
- [84] F. Collet, S. Pretot, Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, *Construction and Building Materials* 65 (2014) 612–619, [dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039)
- [85] Y. A. Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, C. Lanos, Influence of temperature on sorption process in hemp concrete, *Construction and Building Materials* 106 (2016) 600–607, [dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.117](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.117)
- [86] L. Boulos, M. R. Foruzanmehr, A. Tagnit-Hamou, S. Elkoun, M. Robert, Wetting analysis and surface characterization of flax fibers modified with zirconia by sol-gel method, *Surface & Coatings Technology* 313 (2017) 407-416, [dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.008](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.008)

- [87] ČSN EN 1602, Thermal insulating products for building applications - Determination of the apparent density, Czech Institute for Standards, Metrology and Testing, Prague, 2013.
- [88] ČSN EN 822, Thermal insulating products for building applications – Determination of length and width, Czech Institute for Standards, Metrology and Testing, Prague, 2013.
- [89] ČSN EN 823, Thermal insulating products for building applications – Determination of thickness, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague, 2013.
- [90] ČSN EN 12085, Thermal insulating products for building applications – Determination of linear dimensions of test specimens, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague, 2013.
- [91] ČSN EN ISO 12572, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague, 2017.

Seznam obrázků

Obr. 1: Energetická náročnost jednotlivých etap stavby	4
Obr. 2: Konstrukce dřevostavby	10
Obr. 3: Konstrukce moderní dřevostavby.....	11
Obr. 4: Konstrukce moderní dřevostavby.....	12
Obr. 5: Konstrukce moderní dřevostavby.....	12
Obr. 6: Základní směry (AS – axiální směr, TS – tangenciální, RS – radiální)	14
Obr. 7: Textura jednotlivých dřev a) smrk, b) borovice, c) modřín, d) dub e) buk.....	15
Obr. 8: a) Překližka s kořenovou dýhou b) zhuštěná překližka, c) překližka pojená cementem 2, d) stavební překližka	17
Obr. 9: A)Pětivrstvá zdvojená laťovka, b) pětivrstvá laťovka	19
Obr. 10: Dřevovláknité izolační desky	20
Obr. 11: Propojení svislých a vodorovných prvků	21
Obr. 12: Příklad využití OSB desek	21
Obr. 13: I nosník z materiálů na bázi dřeva.....	22
Obr. 14: Deska z dřevité vlny pojená cementem.....	23
Obr. 15: Zhuštěné dřevo	24
Obr. 16: Dřevoplast	25
Obr. 17: Korkový dub ve Francii v oblasti Provance	26
Obr. 18: Vzorky konopného betonu	27
Obr. 19: Konopná izolace.....	28
Obr. 20: Celulósová izolace	29
Obr. 21: Lněná izolace.....	30
Obr. 22: Ovčí vlna	32
Obr. 23: Slaměný panel	33
Obr. 24: Příklad detailu	35
Obr. 25: Příklad fasády poškozené	38
Obr. 26: Historická omítka ve městě Brašov poškozená vysokou vlhkostí	39
Obr. 27: Návrh tepelně izolačního systému s parobrzdou.....	40
Obr. 28: Návrh tepelně izolačního systému s lepicí hmotou plnící funkci retardéru vodní páry	40

Obr. 29: Průběh vlhkostikapilárně aktivní izolace bez parobrzdy, upraveno autorem dle zdroje [66]	44
Obr. 30: Průběh vlhkosti kapilárně aktivní izolace se zabudovanou parobrzdou, upraveno autorem dle zdroje [66]	44
Obr. 31: Měření difúzních vlastností miskovou metodou	47
Obr. 32: Testované vzorky v exsikátorech	50
Obr. 33: Přírodní materiály a) Juta, b) konopná vlna, c) Lněná izolace, d) ovčí vlna.....	51
Obr. 34: Dřevovláknité tepelně izolační desky a) systém CIUR b) Pavatex	52
Obr. 35: Sorpční izotermy	56
Obr. 36: Sorpční izotermy dřevovláknitých desek	56
Obr. 37: Průběh absorpčního experimentu	58
Obr. 38: Průběh absorpčního experimentu	58
Obr. 39: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti	60
Obr. 40: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti	60
Obr. 41: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na teplotě	62
Obr. 42: Odtrhová zkouška u systému CIUR	62
Obr. 43: Odtrhová zkouška u systému Pavatex	63
Obr. 44: Mikroskopické snímky	64
Obr. 45: Systém nonstat.....	66
Obr. 46: Podklad pro cihelnou konstrukci.....	67
Obr. 47: Cihelné zídky se senzory	68
Obr. 48: Cihelné zídky opatřené tepelně izolačními systémy	68
Obr. 49: Cihelné zídky opatřené tepelně izolačními systémy	69
Obr. 50: Průběh teploty v cihelné zídce s tepelnou izolací Pavatex.....	70
Obr. 51: Průběh relativní vlhkosti v cihelné zídce s tepelnou izolací Pavatex.....	70
Obr. 52: Průběh teploty ve fragmentu zdiva se systémem CIUR.....	71
Obr. 53: Průběh relativní vlhkosti ve fragmentu zdiva se systémem s dřevovláknitou deskou bez úprav	72
Obr. 54: Řez cihlou plnou pálenou	74
Obr. 55: Historická konstrukce se zazděným okenním otvorem	75
Obr. 56: Cihelná konstrukce vyspravená pórobetonovými tvárnicemi	75
Je tedy zřejmé, že u stávajících budov musí před aplikací vnitřního systému zateplení být proveden pečlivý stavební průzkum, který odhalí možná rizika.....	75

Seznam tabulek

Tab. 1: Základní fyzikální vlastnosti přírodních izolací.....	53
Tab. 2: Základní fyzikální vlastnosti dřevovláknitých materiálů	54
Tab. 3: Difúzní vlastnosti	54
Tab. 4: Difúzní vlastnosti pro dřevovláknité systémy	55
Tab. 5: Parametry určující transport kapalné vody.....	57
Tab. 6: Absorpční koeficient vody a součinitel vlhkostní vodivosti	59
Tab. 7: Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita.....	61
Tab. 8: Přídržnost malty k podkladu	63