



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Schůtová	Jméno: Petra	Osobní číslo: 426317
Zadávací katedra: Katedra materiálového inženýrství a chemie		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Tepelně izolační materiály a jejich využití ve stavebních konstrukcích	
Název bakalářské práce anglicky: Thermal insulation materials and their utilization in building constructions	
Pokyny pro vypracování: V úvodních kapitolách velmi stručně popište legislativní požadavky kladené na stavbu, zejména se zaměřte na energetickou náročnost budov, hlavně pak na součinitel prostupu tepla. Udělejte průzkum trhu a vypracujte rešerši o tepelně izolačních materiálech. Vyberte si 4 různé tepelně izolační materiály a změřte na nich základní fyzikální vlastnosti, tepelné a vlhkostní parametry.	
Seznam doporučené literatury: J. Chybký, Přírodní stavební materiály a publikace podobného charakteru.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Miloš Jerman, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 16.2.2017	Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<i>16.2.2017</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



Bakalářská práce



Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Miloše Jermana, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Tímto bych chtěla velmi poděkovat především vedoucímu bakalářské práce Ing. Miloši Jermanovi Ph.D. za ochotu a pomoc při zpracování práce. Dále děkuji firmě EKOPANELY SERVIS s.r.o. za poskytnutí stavební desky z lisované slámy pro účely této práce.

Tepelně izolační materiály a jejich využití ve  
stavebních konstrukcích

Thermal insulation materials and their  
utilization in building constructions

## **Anotace:**

Tématem této bakalářské práce jsou „Tepelně izolační materiály a jejich využití v konstrukcích.“ Hlavním cílem bylo vyhodnocení vlastností a chování čtyř různých tepelných izolací. Za tímto účelem byla v první části práce nastudována a zpracována problematika energetické náročnosti budov, energetická bilance tepelně izolačních materiálů a byl zpracován přehled materiálů dostupných na trhu.

Následně se tato práce zabývá především přírodními tepelnými izolacemi. Pro zkoumání byly vybrány tři přírodní tepelné izolace a jedna syntetická pro zjištění rozdílnosti chování. Na vzorcích těchto izolací byly měřeny základní fyzikální vlastnosti, tepelné a vlhkostní parametry. Naměřená data jsou číselně a graficky vyhodnocena a porovnána.

**Klíčová slova:** *přírodní tepelné izolace, energetická bilance, životní prostředí, tepelné vlastnosti, vlhkostní parametry*

## **Abstract:**

The theme of this bachelor's thesis is “Thermal insulation materials and their use in building construction.” The main objective was to evaluate properties and behavior of four different thermal insulation. For this purpose, it has been studied and processed the issue of energy efficiency of buildings, energy balance of thermal insulation materials and the summary of materials available on the market has been processed in the first part of the thesis.

Subsequently, the thesis has primarily focused on nature thermal insulation. Three natural thermal insulation and one synthetic thermal insulation for determine differences of behavior were chosen for the research. Basic physical properties, parameters of thermal and moisture features were measured on the samples of the insulation. The obtained data are evaluated and compared numerically and graphically.

**Keywords:** *natural thermal insulation, energy balance, environmental, thermal properties, moisture parameters*

## Obsah

Seznam použitých symbolů .....	3
<b>1 Úvod.....</b>	<b>4</b>
<b>2 Cíl práce .....</b>	<b>5</b>
<b>3 Přehled o současném stavu problematiky .....</b>	<b>5</b>
3.1 Legislativa .....	5
3.2 Energetická bilance a životní prostředí .....	7
3.2.1 Energetická náročnost budov .....	8
3.2.2 Environmentální kritéria stavebních materiálů .....	8
3.2.3 Produkce emisí CO <sub>2</sub> a primární vázaná energie.....	9
3.2.3.1 Produkce emisí CO <sub>2</sub> .....	10
3.2.3.2 Primární vázaná energie .....	10
3.2.3.3 Situace v ČR a ve světě .....	10
3.2.3.4 Bilance tepelně izolačních materiálů.....	12
3.3 Tepelně izolační materiály .....	15
3.3.1 Tepelně technické vlastnosti a bilance vlhkosti .....	15
3.3.1.1 Součinitel prostupu tepla .....	16
3.3.1.2 Bilance vlhkosti.....	18
3.3.2 Průzkum trhu .....	18
3.3.2.1 Rozdělení.....	19
3.3.2.2 Přírodní materiály pro tepelné izolace .....	21
3.3.2.3 Syntetické materiály pro tepelné izolace.....	24
3.3.3 Vybrané tepelné izolace .....	29
3.3.3.1 Sláma.....	29
3.3.3.2 Technické konopí .....	30
3.3.3.3 Ovčí vlna .....	32
3.3.3.4 Kalcium-silikát .....	33
3.3.4 Použití tepelných izolací v konstrukcích.....	35
3.3.4.1 Zateplení obvodových stěn.....	35
3.3.4.2 Zateplení střech .....	36
3.3.4.3 Zateplení podlahy a stropu .....	36
<b>4 Experimentální část.....</b>	<b>38</b>
4.1 Měřené vlastnosti a použité metody měření.....	38
4.1.1 Základní fyzikální vlastnosti .....	38
4.1.2 Vlhkostní vlastnosti.....	40
4.1.2.1 Transport vodní páry .....	40
4.1.2.2 Transport kapalně vody.....	42
4.1.3 Tepelné vlastnosti.....	44
4.2 Výsledky měření a diskuze .....	46
4.2.1 Základní fyzikální vlastnosti .....	46
4.2.2 Vlhkostní vlastnosti.....	47
4.2.2.1 Transport vodní páry .....	47

4.2.2.2	Transport kapalné vody .....	50
4.2.3	Tepelné vlastnosti.....	56
4.3	Souhrn .....	58
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>Citace .....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>67</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>69</b>



## Seznam použitých symbolů

$a$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	součinitel teplotní vodivosti
$A$	$[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}]$	absorpční koeficient vody
$c$	$[\text{J}/\text{kg K}]$	měrná tepelná kapacita
$d$	$[\text{m}]$	tloušťka
$D$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	součinitel difúze vodní páry
$D_a$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	součinitel difúze vodní páry ve vzduchu
$\varphi$	$[-]$	relativní vlhkost
$\Theta$	$[\text{°C}]$	teplota
$\kappa$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	součinitel vlhkostní vodivosti
$\lambda$	$[\text{W}/\text{m K}]$	součinitel tepelné vodivosti
$\mu$	$[-]$	faktor difúzního odporu
$m_w$	$[\text{kg}]$	hmotnost vodou nasyceného vzorku
$m_d$	$[\text{kg}]$	hmotnost suchého vzorku
$m_a$	$[\text{kg}]$	Archimédova hmotnost vzorku
$\rho_v$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	objemová hmotnost materiálu
$\rho_{\text{mat}}$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	hustota matrice materiálu
$\psi$	$[\%]$	pórovitost
$\psi_0$	$[\%]$	otevřená pórovitost
$S$	$[\text{m}^2]$	plocha
$U_N$	$[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$	požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla neprůsvitné výplně
$U_c$	$[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$	celkový součinitel prostupu tepla
$u$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$	objemová vlhkost
$T$	$[\text{K}]$	teplota
$V$	$[\text{m}^3]$	objem
$w$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$	objemová vlhkost
$\theta$	$[-]$	stupeň nasycení
$t$	$[\text{s}]$	čas
$\Delta p_p$	$[\text{Pa}]$	rozdíl parciálních tlaků

# 1 Úvod

V současné době je stále aktuálnější otázka snižování spotřeby energií a úspora energetických surovinových zdrojů. Tato skutečnost se odráží také při zateplování budov a obecně ve stavebnictví, které patří k energeticky nejnáročnějšímu odvětví průmyslu.

Výrobci se snaží co nejvíce zlepšit vlastnosti výrobků v důsledku zákona, podle kterého dnes musí být všechny novostavby označeny energetickým štítkem prokazujícím energetickou náročnost stavby. O energetické účinnosti budov a o spotřebě provozní energie domu na vytápění rozhoduje především tepelná izolace. V našich klimatických podmínkách se téměř žádná novostavba vzhledem k požadovaným součinitelům prostupu tepla, které s energetickou účinností budov úzce souvisí, již neobejde bez zateplení. Aktuálně se postupně zvyšují energetické standardy pro novostavby až do roku 2020, kdy bude povoleno stavět už jen budovy s téměř nulovou spotřebou energie. [1]

Na trhu se dnes objevuje velké množství variant zateplení pro různé účely a konstrukce. Každý tepelný izolant je vhodný pro jiné využití, a proto je pro efektivní návrh důležité mít přehled o dostupných materiálech a znát jejich vlastnosti.

V úvodu teoretické části se tato práce věnuje obecně energetické náročnosti budov a legislativě. Dále se práce zaměřuje na spotřebu primární energie, energetickou bilanci tepelných izolací a míru vlivu produktů na kvalitu životního prostředí. Motivací pro zpracování této části je alarmující stav spotřeby primární energie a produkce emisí CO<sub>2</sub> v České republice. Z pohledu trvale udržitelného rozvoje by měla být snaha prosazovat při výrobě obnovitelné zdroje surovin, snížit energetickou náročnost při jejich získávání a zpracování a přispívat tím k lepší kvalitě života. Následně je proveden průzkum trhu a rozdělení tepelně izolačních materiálů.

Experimentální část je zaměřena na splnění hlavního cíle práce, tedy změření vlastností různých tepelně izolačních materiálů a jejich porovnání pro využití v konstrukcích.

Výrobci udávají vlastnosti materiálů pouze v suchém stavu, což je nedostačující informace, protože chování především tepelných izolací se velmi liší v závislosti na vlhkosti. Čím vyšší vlhkost, tím se tepelněizolační vlastnosti zhoršují. Proto byl měřen součinitel tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti. Dále pak základní fyzikální vlastnosti a z vlhkostních parametrů byl změřen vlhkostní profil, difúze vodní páry, součinitel vlhkostní vodivosti, absorpční koeficient a křivka nasákavosti. Naměřená data byla pro názorné porovnání numericky a graficky zpracována.

## 2 Cíl práce

Cílem teoretické části této práce je vytvořit přehled tepelně izolačních materiálů na trhu, zpracovat dostupné informace o jejich vlastnostech a využití v konstrukcích a porovnat přírodní a syntetické materiály především z hlediska dopadu na životní prostředí.

Hlavním cílem experimentální části práce je změřit základní fyzikální vlastnosti, tepelné a vlhkostní parametry na 4 různých tepelně izolačních materiálech a porovnat chování konkrétních měřených materiálů.

## 3 Přehled o současném stavu problematiky

*„Budovy jsou jednou z oblastí s nejvyšším potenciálem pro dosažení energetických úspor a pro podstatné snížení negativního dopadu lidské aktivity na životní prostředí. K využití tohoto potenciálu je nezbytný integrovaný přístup ke všem fázím životního cyklu budov, a to jak stávajících, tak nových.“*

*prof. Zdeněk Bittnar [2]*

Podle zákona 318/2012 Sb. musí být v dnešní době již všechny novostavby označeny energetickým štítkem prokazujícím energetickou náročnost stavby, což v praxi znamená potřebu zateplení téměř každé novostavby.

Použitím tepelně izolačních materiálů ve stavebních konstrukcích můžeme dosáhnout výrazných úspor energie a tak i snížení energetické náročnosti budov, což přispívá k ochraně životního prostředí a trvale udržitelnému rozvoji.

Každou stavbu je třeba posoudit individuálně a nalézt navzájem se doplňující energeticky úsporná řešení. Míra dosaženého efektu je závislá na volbě vhodného izolačního materiálu pro specifické požadavky konkrétní konstrukce, na provedení a na dimenzi izolační vrstvy. [3]

### 3.1 Legislativa

Tímto odvětvím stavebnictví se zabývá celá řada norem, vyhlášek a zákonů. Následuje výpis nejdůležitějších z nich.

Všechny termíny a definice používané v oboru stavební tepelné techniky pro potřeby technické praxe sjednocuje a zpřesňuje norma ČSN 73 0540-1 Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie. Vymezuje také definice veličin, jejich značky a jednotky, které popisují

šíření tepla, vlhkosti a vzduchu stavebními materiály a konstrukcemi a stav vnitřního a venkovního prostředí. Tyto termíny se používají v dalších částech zmíněné normy. [4]

Tepelně technické požadavky pro navrhování a ověřování budov s požadovaným stavem vnitřního prostředí při jejich užívání stanovuje norma ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky. Tyto požadavky zajišťují plnění základních požadavků na stavby, zejména hospodárné splnění základního požadavku na úsporu energie a tepelnou ochranu budov podle zvláštního předpisu a zajištění ochrany zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí. [5]

Normové, charakteristické a návrhové hodnoty fyzikálních veličin (dále návrhové hodnoty veličin) stavebních materiálů, výrobků, výplní otvorů, zdicích prvků a zdiva, návrhové hodnoty veličin venkovního a vnitřního prostředí a vzduchu pro navrhování a ověřování stavebních konstrukcí z hlediska šíření vlhkosti a budov z hlediska jejich tepelné ochrany určuje ČSN 73 0540-3 Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Tato norma také stanovuje návrhové hodnoty fyzikálních veličin pro výpočty tepelných ztrát budov. [6]

ČSN 73 0540-4 Tepelná ochrana budov. Část 4: Výpočtové metody - stanovuje a upřesňuje výpočtové metody pro navrhování a ověřování konstrukcí a budov podle požadavků z části 2 této normy. [7]

Posuzováním vlivů na životní prostředí a veřejné zdraví se zabývá zákon č. 38/2012 Sb., který mění zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí.

Zákon č. 318/2012 Sb., který mění zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, mimo jiné ukládá povinnost energetického štítku u každé novostavby. [8]

Norma poskytující nástroje pro posouzení přínosu stavebních prvků a technických systémů k úsporám energie a celkové energetické náročnosti budov, kterými se tato práce také zabývá, je norma ČSN EN ISO 13790 Energetická náročnost budov. Uvádí výpočtové metody pro hodnocení roční spotřeby energie na vytápění a chlazení budov. Kromě jiného může být tato norma použita pro posouzení vlivu možných energeticky úsporných opatření na stávající budově a předpověď budoucí potřeby energetických zdrojů na regionální, národní, nebo mezinárodní úrovni. [9]

Mezinárodní norma ČSN EN ISO 10456 Stavební materiály a výrobky uvádí způsoby pro stanovení přínosu, kterým stavební výrobky a provoz budov přispívají k úspoře energie a k celkovému energetickému chování budov. [10]

Touto problematikou se rovněž zabývá Vyhláška o energetické náročnosti budov – vyhláška č. 78/2013 Sb. Stanovuje např. nákladově optimální úroveň požadavků na energetickou

náročnost budovy kromě jiných také pro nové budovy, metodu výpočtu energetické náročnosti budov a doporučená opatření pro snížení energetické náročnosti budov. [11]

Tepelnými izolacemi se zabývá řada mezinárodních norem. Řada obsahuje normy ČSN EN:

- ISO 7345 Tepelná izolace – Fyzikální veličiny a definice
- ISO 9251 Tepelná izolace – Podmínky šíření tepla a vlastnosti materiálů - Slovník
- ISO 9346 Tepelná izolace – Přenos látky – Fyzikální veličiny a definice
- ISO 9229 Tepelná izolace – Tepelně izolační materiály a výrobky – Slovník
- ISO 9288 Tepelná izolace – Šíření tepla sáláním – Fyzikální veličiny a definice.

S energetickou účinností budov úzce souvisí součinitel prostupu tepla stavebních prvků a stavebních konstrukcí. Metodu výpočtu určuje norma ČSN EN ISO 6946 Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda. [12]

### **3.2 Energetická bilance a životní prostředí**

Téměř veškerá energie, kterou spotřebováváme, je až na výjimky získávána z přírodních zdrojů. Se vzrůstajícím počtem obyvatel má lidstvo čím dál vyšší nároky na množství vytěžených energetických surovin. Způsob získávání těchto surovin však mnohdy nemění jen krajinu, ale váže na sebe další spotřebu energie a při následné přeměně této energie na elektřinu a teplo je produkováno velké množství látek znečišťujících ovzduší.

Z pohledu dopadů na životní prostředí se mohou zdroje energie rozdělit na dva základní druhy: obnovitelné a neobnovitelné (fosilní) zdroje.

Nadměrné čerpání a využívání neobnovitelných přírodních zdrojů může vést také k mnoha dalším problémům, jako například k nežádoucím změnám některých vlastností jednotlivých složek životního prostředí – změny teploty vzduchu či vody, změny v oceánských proudech, změny pH půdy a vody, zhutňování půdy, snížení druhové rozmanitosti apod.

Až v několika posledních desetiletích, kdy prudce vzrostla průmyslová výroba a spotřeba energie, si lidé začali uvědomovat závažnost situace. Díky tomu se toto téma o ochraně životního prostředí a snižování spotřeby energie postupně stává stále aktuálnější.

Kromě zmíněných problémů životního prostředí je pro lidstvo omezující také vyčerpání a neobnovitelnost fosilních zdrojů. Jistým faktem je, že fosilní paliva budou v budoucnu vytěžena, otázkou je jen, kdy k vyčerpání zásob dojde. Ze současných prognóz vyplývá, že přibližně za 120 let bude svět muset pokrýt svou energetickou potřebu alternativními zdroji. [13]

### 3.2.1 Energetická náročnost budov

Z veškeré sekundární energie se v Evropě spotřebuje nejvíce právě v budovách a to 40%. [2]

Energetickou náročností budovy je vypočtené množství energie nutné pro pokrytí potřeby energie spojené s užíváním budovy. V našich klimatických podmínkách zejména energie potřebné na vytápění, ale také chlazení, větrání, úpravu vlhkosti vzduchu, přípravu teplé vody a osvětlení.

Ukazatele energetické náročnosti budovy jsou:

- a) celková primární energie za rok,
- b) neobnovitelná primární energie za rok,
- c) celková dodaná energie za rok,
- d) dílčí dodané energie pro technické systémy vytápění, chlazení, větrání, úpravu vlhkosti vzduchu, přípravu teplé vody a osvětlení za rok,
- e) průměrný součinitel prostupu tepla,
- f) součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí na systémové hranici,
- g) účinnost technických systémů. [11]

Energetická náročnost budov se dokládá pomocí průkazu energetické náročnosti budovy, což je dokument, který obsahuje stanovené informace o energetické náročnosti budovy nebo ucelené části budovy. [14]

Většinu ukazatelů energetické náročnosti budov lze ovlivnit výběrem vhodných materiálů.

### 3.2.2 Environmentální kritéria stavebních materiálů

Snižování provozní energie je kompenzováno zvýšením zabudované energie v podobě použitých materiálů. Hodnocení proto zahrnuje i environmentální stopu materiálů, ze kterých je stavba postavena.

Environmentální kvalitu stavebních materiálů, konstrukcí, skladeb, ale i celých budov lze vyhodnotit podle několika kritérií:

**environmentální parametry** – obecná kritéria environmentální kvality stavebních materiálů:

- svázaná spotřeba energie;
- svázané emise CO<sub>2</sub>;



- svázané emise SO<sub>2</sub>;
- vlastní hmotnost.

**materiály na vstupu (výstavba)** – využívané zdroje pro výrobu materiálů a konstrukcí:

- obnovitelné materiály;
- recyklované materiály;
- neobnovitelné přírodní zdroje.

**materiály na výstupu (demolice)** – možnost dalšího využití po dožití konstrukce:

- plnohodnotně recyklovatelné;
- částečně recyklovatelné;
- nerecyklovatelné (odpad).

Při tvorbě koncepce budovy by měla být snaha navrhnout spolu s konstrukčním řešením i materiálové řešení objektu tak, aby byly dodrženy základní principy:

- použití materiálů s minimálními hodnotami svázané potřeby energie a svázaných emisí CO<sub>2</sub> a SO<sub>2</sub>, ev. materiálů s nižší vlastní hmotností snižujících nároky na dopravu;
- maximální využití obnovitelných zdrojů a recyklovaných materiálů;
- návrh konstrukcí umožňujících separovatelnost jednotlivých materiálů a jejich plnohodnotnou recyklaci.

Snižování provozDnes již existuje celá řada alternativních stavebních materiálů, které mohou vylepšit environmentální profil stavby. [15]

### **3.2.3 Produkce emisí CO<sub>2</sub> a primární vázaná energie**

Jednou z nejdůležitějších složek životního prostředí je pro člověka již zmíněné ovzduší, které přímo působí především na lidské zdraví, ale také na vegetaci, celé ekosystémy i materiály. V důsledku lidské činnosti a nadměrného zvyšování antropogenních emisí skleníkových plynů dochází k zesilování přirozeného skleníkového efektu atmosféry a tím pravděpodobně ke změnám klimatu, což představuje závažný environmentální, ekonomický a společenský problém. Proto je kvalitě ovzduší věnována velká pozornost jak na národní a evropské, tak na mezinárodní úrovni. [16]

### **3.2.3.1 Produkce emisí CO<sub>2</sub>**

Emise CO<sub>2</sub> ekv. (GWP - Global Warming Potential - potenciál globálního oteplování) zahrnuje emise látek přispívajících ke vzniku skleníkovému efektu. Nejedná se pouze o emise CO<sub>2</sub>, ale vzhledem k velkému množství, které se v atmosféře vyskytuje, se používá jako srovnávací ekvivalent. Kromě emisí zmíněného oxidu uhličitého se jedná také o další skleníkové plyny např. methan a oxid dusný.

### **3.2.3.2 Primární vázaná energie**

Pro porovnání ekologických dopadů z hlediska energie se zavádí parametr tzv. vázaná primární energie (PEI = Primary Energy Intensity), někdy označována jako šedá energie, udávaná v MJ/kg. Vypovídá o množství energie vynaložené na získání surovin, výrobu a dopravu materiálu. [17]

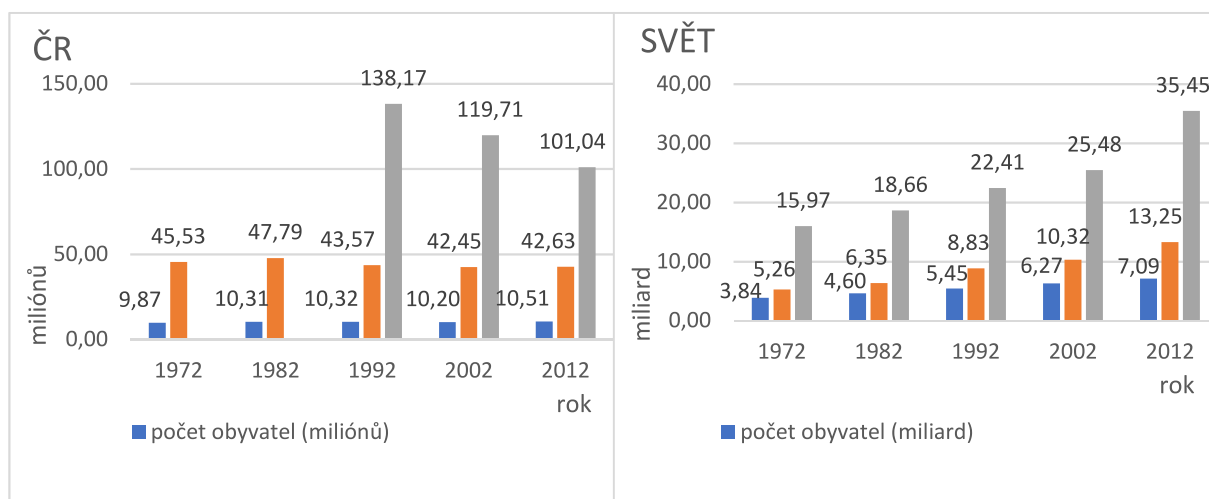
### **3.2.3.3 Situace v ČR a ve světě**

V České republice představuje znečištění ovzduší dlouhodobý problém. Za posledních 50 let minulého století se s rozvojem civilizace v ČR situace výrazně zhoršila. Některé regiony patřily do 90. let minulého století svými emisemi k nejhorším na světě, a i když se díky technologiím na snížení emisí stav výrazně zlepšil (viz Obr. 1), i dnes se ČR řadí mezi čtyřicetku největších producentů CO<sub>2</sub> na světě a třicetku států s největším podílem emisí CO<sub>2</sub> na osobu celkově z více než 200 států světa. [16]

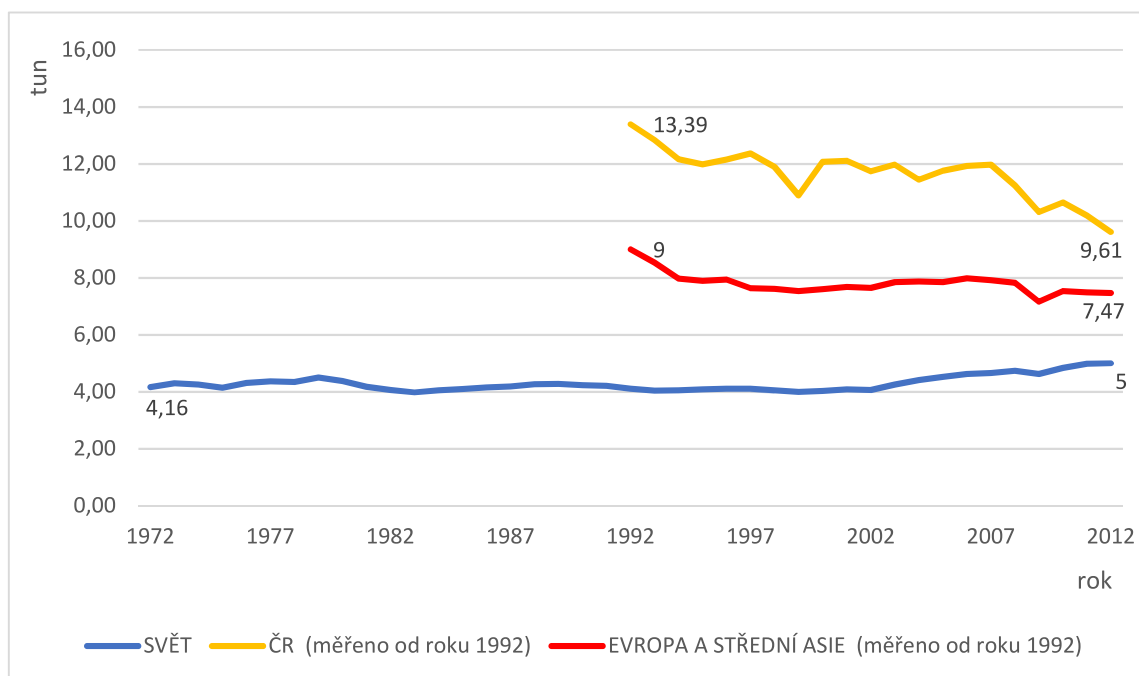
Na Obr. 1 je vidět graf vývoje počtu obyvatel, spotřeby energie a emisivity CO<sub>2</sub> u nás a na světě od roku 1972 do roku 2012, přičemž emise CO<sub>2</sub> se v ČR začala měřit až od roku 1992. Se vzrůstajícím počtem obyvatel naší planety se zvyšuje také spotřeba energie a produkce emisí. Hodnoty ve světě jsou udány v miliardách, v ČR v miliónech. Z grafu je názorně vidět na poměru počtu obyvatel k ostatním sledovaným hodnotám zmíněný velice zneklidňující stav v České republice. Ač má produkce emisí CO<sub>2</sub> prudce klesající tendenci, oproti světové bilanci, která naopak stále narůstá, jsou tyto hodnoty opravdu vysoké. V roce 1992 byl poměr produkce emisí CO<sub>2</sub> ku počtu obyvatel ve světě 4,11 tun CO<sub>2</sub> na obyvatele, což není ani 31% poměru v České republice, který byl 13,39 tun CO<sub>2</sub> na obyvatele. Ještě horší situace byla ve spotřebě energie v roce 1972. Poměr ku počtu obyvatel v ČR byl 4,62 tun spotřebované energie na obyvatele a ve světě 1,37 tun spotřebované energie na obyvatele, což je 29,7%.

Pro větší názornost je na Obr. 2 graficky porovnána produkce emisí CO<sub>2</sub> v tunách na obyvatele v ČR, v Evropě a střední Asii a ve světě, přičemž se emisivita v ČR, v Evropě a střední Asii měřila až od roku 1992. Na Obr. 3 je stejným způsobem porovnána spotřeba primární energie (před přeměnou na jiná konečná paliva) v tunách ropného ekvivalentu na obyvatele, přičemž v Evropě a střední Asii byla spotřeba energie měřena až od roku 1990.

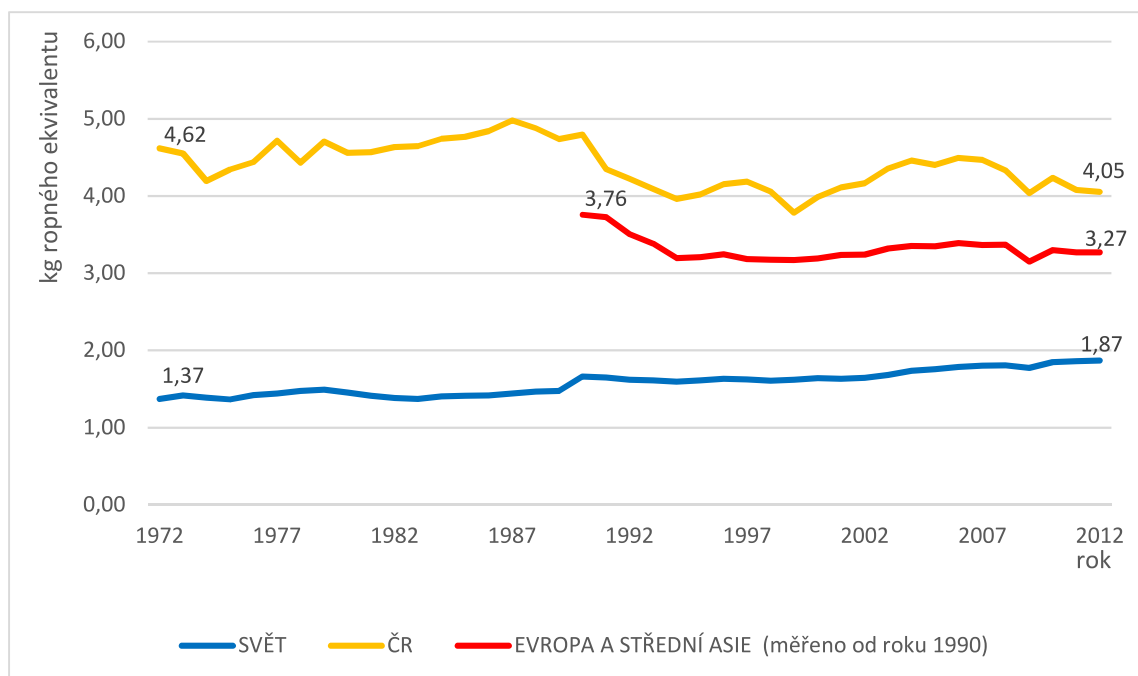
Pravdou je, že ve světě je spotřeba a emisivita velmi snižována například rozvojovými zeměmi, proto byly záměrně v těchto grafech zaznamenány hodnoty i v Evropě a střední Asii.



Obr. 1: Grafický přehled demografického vývoje, spotřeby energie a produkce emisí CO<sub>2</sub> v ČR a ve světě. Zpracováno podle [18]



Obr. 2: Grafické porovnání produkce emisí CO<sub>2</sub> v tunách na obyvatele. Zpracováno podle [18]



Obr. 3: Grafické porovnání spotřeby primární energie. Zpracováno podle [18]

### 3.2.3.4 Bilance tepelně izolačních materiálů

Ve vyspělých zemích se provoz budov podílí na potřebě energie a tomu odpovídajícímu množství emisí CO<sub>2</sub> více než 40%.

Emise a primární energie se významně produkují i při výrobě některých, hlavně syntetických tepelně izolačních materiálů. Uvádí se, kolik MJ energie bylo vynaloženo a kolik kilogramů CO<sub>2</sub> bylo uvolněno ve všech stádiích výrobních procesů materiálu. Jak je vidět z tabulky (Tab. 1) některé materiály mají bilanci emisí CO<sub>2</sub> zápornou. Jedná se o přírodní rostoucí suroviny, které absorbují CO<sub>2</sub> během svého růstu a je v nich akumulováno, dokud nejdojde k jejich spálení nebo rozkladu. Hodnoty uvolněných emisí při jejich přípravě a zabudování ve stavbě jsou nižší a celkově tak použití těchto materiálů ve stavebnictví momentálně nezatěžuje životní prostředí. Zátěž se sice pouze odkládá na pozdější dobu, ale k její produkci může dojít až budoucí technologie umožní zpracování této hmoty šetrnějším způsobem.

Problémy syntetických materiálů jsou však mnohem hlubší. Další důkaz o vhodnosti využití přírodních organických materiálů před materiály syntetickými vyplývá i z vlastností např. pěnového polystyrénu, který má výborné tepelně izolační vlastnosti a nízkou cenu, ale během jeho výroby vznikají kromě CO<sub>2</sub> také styrenové a pentanové emise. [17] [19] [20]

Pro objektivní porovnání vlastností hmot a jejich dopadu na životní prostředí byly vybrány různé materiály použitelné jako tepelné izolace.

Tabulka (Tab. 1) je seřazena podle hodnot vázané primární energie v MJ/kg. Nejvyšších hodnot dosahují látky ropného původu. Expandovaný polystyrén (EPS) dosahuje PEI = 98,5 MJ/kg, což je téměř 2x více, než u taktéž energeticky náročné skleněné vaty s PEI = 49,8 MJ/kg. Avšak u skleněné vaty je příznivé využívání skleněného odpadu pro její výrobu. Rohože ze lnu a konopí jsou vzhledem k využití přírodních materiálů, také poměrně energeticky náročné. Rohože ze lnu dosahují PEI = 34,0 MJ/kg a rohože z konopí PEI = 27,1 MJ/kg, což je více než dosahuje vlna z minerálních vláken s PEI = 23,3 MJ/kg. Nejmenšími hodnotami z vybraných materiálů se vyznačuje korek s PEI = 7,1 MJ/kg. Také obecně výrobky ze dřeva dosahují relativně nízkých hodnot - PEI < 20 MJ/kg a u dřevovláknitých desek PEI = 13,7 MJ/kg.

Pouze takovéto porovnávání materiálů je však vhodné spíše u výrobků s podobnou objemovou hmotností. Tepelná izolace právě z dřevovláknitých desek, která má takto nízkou spotřebu primární energie v MJ/kg, ale poměrně velkou objemovou hmotnost  $\rho = 260,0 \text{ kg/m}^3$ , nabývá při ploše  $1 \text{ m}^2$  a tloušťce 300 mm hodnot:  $\text{PEI} = 260 \cdot 0,3 \cdot 13,7 = 1068,6 \text{ MJ}$ . Naproti tomu expandovaný polystyren, který má cca 7x větší spotřebu primární energie v MJ/kg, spotřebovává díky své malé objemové hmotnosti  $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$  při stejných parametrech téměř poloviční PEI = 591,0 MJ.

Proto je v tabulce uvedeno a v grafu (Obr. 4) znázorněno také kolik energie v MJ je třeba vynaložit na výrobu tepelných izolací o ploše  $1 \text{ m}^2$  a tloušťce 300 mm.

Obdobně je provedeno posouzení, jak se při zabudování do stavební konstrukce projeví vliv materiálu z pohledu produkce ekvivalentního množství  $\text{CO}_2$ .

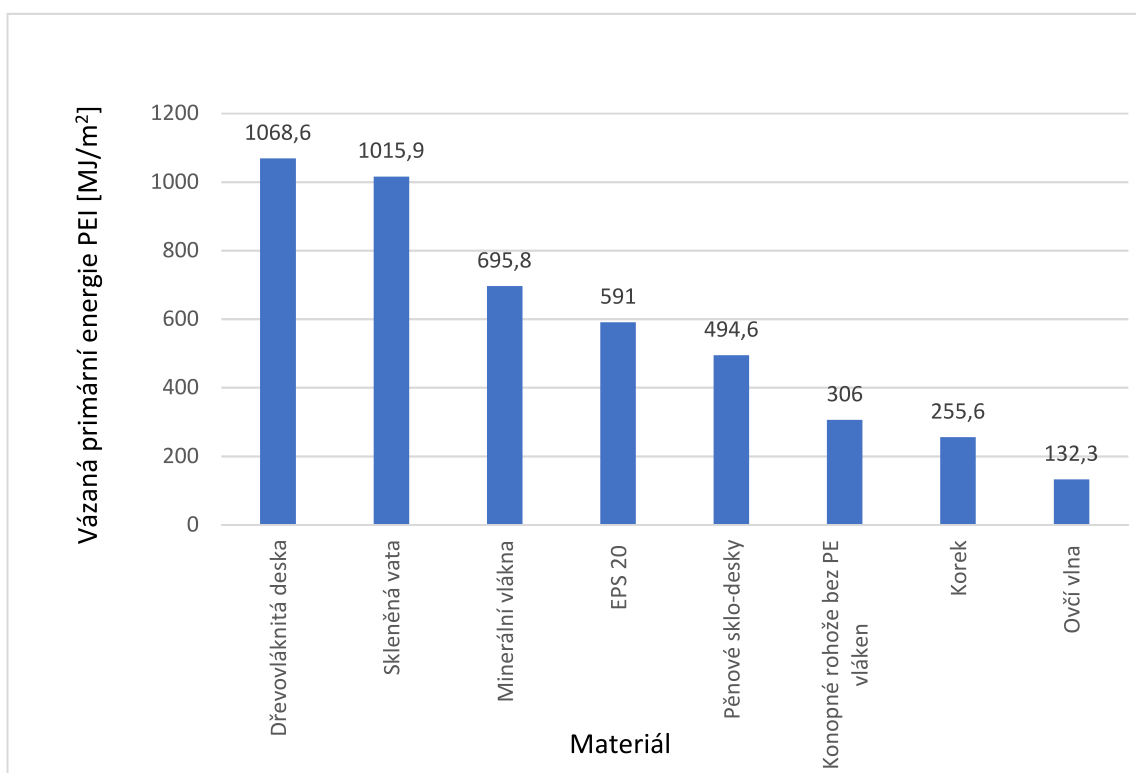
Nejpříznivějších hodnot dosahují minerální vlákna s GWP = 51,17 kg  $\text{CO}_2$  ekv a skleněná vlákna s GWP = 46,1 kg  $\text{CO}_2$  ekv. Expandovaný polystyrén se opět díky své malé objemové hmotnosti podílí na zatížení životního prostředí množstvím GWP = 20,1 kg  $\text{CO}_2$  ekv. Jak už bylo zmíněno a vysvětleno, nejpříznivější hodnoty jsou zaznamenány u přírodních materiálů. Nejméně zatěžuje životní prostředí především korek s GWP = -44,28 kg  $\text{CO}_2$  ekv a v záporných hodnotách jsou také tepelné izolace na bázi dřeva a konopné rohože.

Souhrn je patrný z následující tabulky a grafů (Tab. 1 a Obr. 4, 5). Tyto hodnoty jsou ale pouze orientační, protože každý produkt má odlišnou objemovou hmotnost a např. zmíněné dřevovláknité desky mají velký rozsah objemové hmotnosti  $\rho = 45 - 260 \text{ kg/m}^3$  podle konkrétního použití a výrobce.

Tab. 1: Primární energie a emise CO<sub>2</sub> tepelných izolací o ploše 1 m<sup>2</sup> a tloušťce 300 mm.

Zpracováno podle [19]

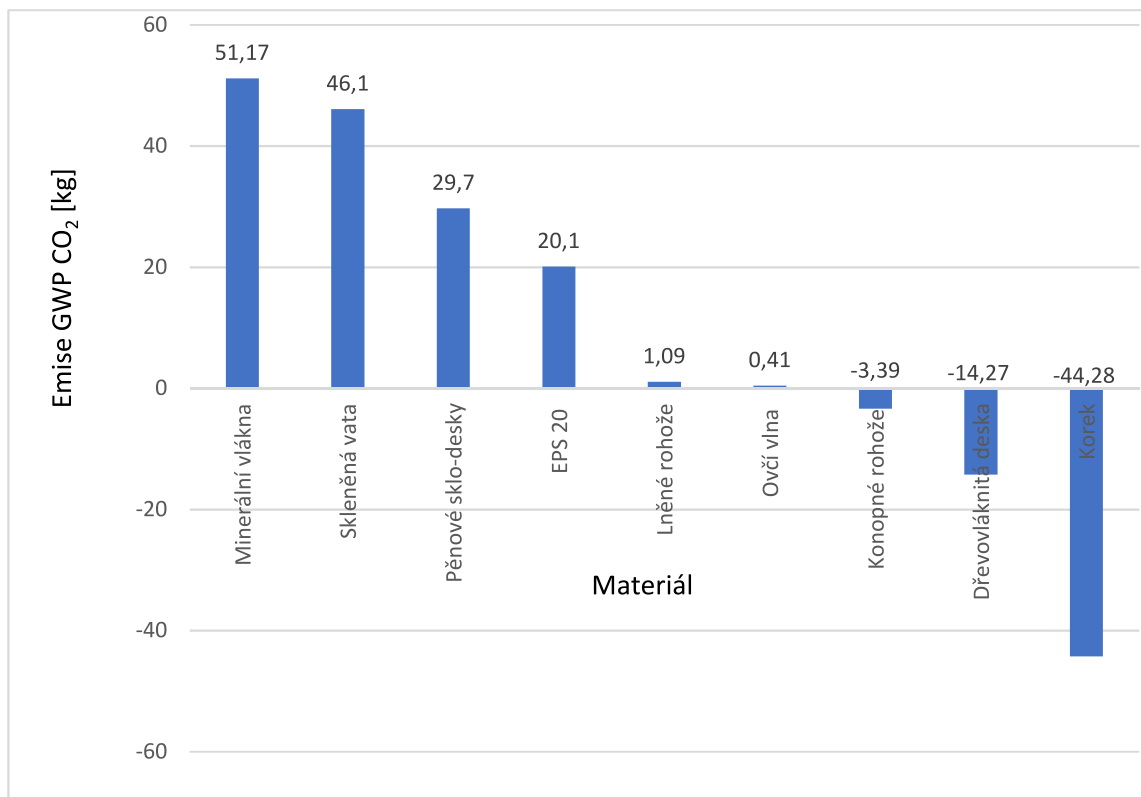
Č.	Název	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	m [kg/m <sup>2</sup> ]	PEI [MJ/kg]	PEI [MJ]	GWP [kg CO <sub>2</sub> ekv /kg]	GWP [kg CO <sub>2</sub> ekv]
1	EPS 20	20,0	6,0	98,5	591,0	3,350	20,10
2	Skleněná vata	68,0	20,4	49,8	1015,9	2,260	46,10
3	Lněné rohože bez PE vláken	30,0	9,0	34,0	306,0	0,121	1,09
4	Konopné rohože bez PE vláken	30,0	9,0	27,1	243,9	-0,377	-3,39
5	Minerální vlákna	104,0	31,2	22,3	695,8	1,640	51,17
6	Pěnové sklo-desky	105,0	31,5	15,7	494,6	0,943	29,70
7	Ovčí vlna	30,0	9,0	14,7	132,3	0,045	0,41
8	Dřevovláknitá deska	260,0	78,0	13,7	1068,6	-0,183	-14,27
9	Korek	1200,0	36,0	7,1	255,6	-1,230	-44,28



Obr. 4: Primární energie vybraných stavebních materiálů o ploše 1m<sup>2</sup> a tloušťce 300 mm

Zpracováno podle [19]





Obr. 5: Množství emisí CO<sub>2</sub> připadajících na stavební materiál o ploše 1 m<sup>2</sup> a tloušťce 300 mm Zpracováno podle [19]

### 3.3 Tepelně izolační materiály

Z fyzikálního hlediska je tepelná izolace látka, která špatně vede teplo, tzn. izoluje. Dle normy ČSN 73 0540-1 [4] je tepelně izolační materiál definován jako materiál výrazně omezující šíření tepla, vykazující charakteristickou hodnotu součinitele tepelné vodivosti maximálně  $\lambda = 0,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  při referenčních teplotních a vlhkostních podmínkách.

Úkolem tepelných izolací je v zimě udržet v budovách teplo a v létě jejich prostřednictvím zamezit přehřívání interiérů.

#### 3.3.1 Tepelně technické vlastnosti a bilance vlhkosti

Na celkovou energetickou náročnost budov mají zásadní vliv tepelně technické vlastnosti materiálů tvořících obvodový plášť budovy.

Pro vytvoření tepelné pohody uživatelů uvnitř objektu je třeba dodržet tepelně technické požadavky a zamezit vzniku tepelně technických vad a poruch budov.

Tepelně technické požadavky pro navrhování a ověřování budov stanovuje norma ČSN 73 0540-2.

Hodnocení šíření tepla konstrukcí a obálkou budovy:

- Nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce,
- Součinitel prostupu tepla,
- Průměrný součinitel prostupu tepla,
- Lineární a bodový součinitel prostupu tepla,
- Pokles dotykové teploty podlahy.

Šíření vlhkosti konstrukcí:

- Zkondenzovaná vodní pára uvnitř konstrukce,
- Roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry uvnitř konstrukce. [5]

### **3.3.1.1 Součinitel prostupu tepla**

Součinitel prostupu tepla je základní veličinou charakterizující tepelně izolační vlastnosti stavebních konstrukcí. Udává se ve  $W/(m^2 \cdot K)$ , což vyjadřuje, kolik tepla unikne konstrukcí o ploše  $1 m^2$  při rozdílu teplot jejích povrchů  $1 K$ .

Norma ČSN EN ISO 6946 uvádí, že součinitel prostupu tepla se hodnotí současně dvěma způsoby: pro jednotlivé konstrukce a pro budovu jako celek pomocí průměrného součinitele prostupu tepla  $U_{em}$ . Oba požadavky musí být splněny současně, pokud není výjimečně připuštěno jinak.

Všechny stavební konstrukce musí splňovat podmínku, že součinitel prostupu tepla dané konstrukce  $U$  musí být menší, než normou požadovaná hodnota  $U_N$ . Všude tam, kde tomu nebrání technické, ekonomické nebo legislativní překážky, se doporučuje pro součinitel prostupu tepla využít doporučených hodnot. Hodnoty doporučené pro pasivní budovy se použijí zejména pro předběžný návrh konstrukcí pasivních budov. [21]

Tento parametr závisí na tloušťce materiálu  $d$  [m] a součiniteli tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $W/m \cdot K$ ], který vyjadřuje tepelně izolační schopnost daného materiálu.

Součinitel prostupu tepla se stanovuje pro podmínky ustáleného šíření tepla při zimních návrhových okrajových podmínkách. Vyjadřuje prostup tepla celou konstrukcí, proto musí jeho hodnota zahrnovat vliv očekávaných lokálních zhoršení v důsledku nehomogenit, přítomnosti spojovacích prvků apod. Vliv systematických tepelných mostů je možné orientačně zohlednit pomocí náhradního součinitele tepelné vodivosti nehomogenní vrstvy, vypočítané jako vážený

průměr součinitelů tepelné vodivosti jednotlivých materiálů podle jejich objemového zastoupení ve vrstvě. [22]

Požadavky na součinitel prostupu tepla uvádí ČSN 730540-2.

Pro konstrukce v běžných objektech s převažující návrhovou vnitřní teplotou  $\theta_{im}$  od 18 do 22 °C a s relativní vlhkostí  $\varphi_i$  do maximálně 60% se pro stanovení velikosti  $U_N$  používají tabulkové hodnoty, což je nejběžnější způsob. V Tab. 2 jsou uvedeny hodnoty součinitele prostupu tepla pouze pro vybrané konstrukce.

Tab. 2: Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla podle ČSN 730540-2 [5]

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla [W/(m <sup>2</sup> ·K)]		
	Požadované hodnoty $U_{N,20}$	Doporučené hodnoty $U_{rec,20}$	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy $U_{pas,20}$
Stěna vnější	0,30 <sup>1)</sup>	těžká: 0,25 lehká: 0,20	0,18 až 0,12
Střecha strmá se sklonem nad 45°	0,30	0,20	0,18 až 0,12
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop s podlahou nad venkovním prostorem	0,24	0,16	0,15 až 0,10

Pokud jsou splněny požadavky z hlediska součinitele prostupu tepla, je dosaženo i dostatečné teploty na vnitřním povrchu konstrukce i při nejnižších návrhových teplotách v exteriéru. Kritickými místy, kterým je potřeba věnovat pozornost, jsou tepelné mosty v souvislosti se spojovacími prvky s větší vodivostí a v souvislosti s napojením konstrukcí mezi sebou. [22]

Tepelně izolační vlastnost obecně stavebních materiálů, jak už bylo řečeno, vyjadřuje součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/(m·K)] a především u tepelných izolací je jeden z nejméně sledovaných parametrů. Hodnota součinitele tepelné vodivosti není pro žádný materiál stálá, protože závisí na struktuře látky, pórovitosti materiálu, objemové hmotnosti, vlhkosti a také na teplotě a tlaku.

Čím je hodnota součinitele tepelné vodivosti menší, tím je menší schopnost materiálu vést teplo a zpomaluje tak tepelný tok, což je hlavním úkolem tepelně izolačních vrstev. Většina tepelně izolačních materiálů využívá nízké tepelné vodivosti vzduchu, který zaujímá většinu

objemu izolace. Zabraňuje jeho konvekci uzavřením do malých dutin, mezi tenká vlákna, nebo částice. Matrice materiálu, tzn. tuhá část pěny, minerální nebo rostlinná vlákna, je dobrým tepelným izolantem sama o sobě, ale navíc v kombinaci se vzduchem jsou hodnoty tepelné vodivosti běžně okolo  $\lambda=0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , což se blíží tepelné vodivosti vzduchu, která je při běžném tlaku ( $p=0,10 \text{ Mpa}$ ) a teplotě  $t=20^\circ\text{C}$   $\lambda=0,0257 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Tím tepelné izolace, respektive celé konstrukce, omezují nežádoucí tepelné ztráty či zisky a zabezpečují příznivý stav vnitřního prostředí pro život, činnost člověka apod.

### 3.3.1.2 Bilance vlhkosti

Konstrukce vyhovuje požadavkům, pokud v žádné části skladby nedochází ke kondenzaci vodní páry, která se zjišťuje výpočtovým postupem pro zimní návrhové okrajové podmínky, který uvádí norma ČSN 73 0540-4.

Pokud ke kondenzaci dochází, lze konstrukci považovat za vyhovující, jestliže:

- Kondenzace vodní páry neohrozí funkci konstrukce.
- Roční množství kondenzátu bude nižší než roční kapacita odparu.
- Roční množství kondenzátu  $M_{c,a}$  bude nižší než  $0,1 \text{ kg}/\text{m}^2\cdot\text{rok}$ , nebo 3-6% plošné hmotnosti materiálu (nižší z hodnot) [23]

Za ohrožení funkce konstrukce se považuje např.: zkrácení předpokládané životnosti konstrukce, zvýšení hmotnostní vlhkosti materiálu na limitní mez degradace, vznik plísní v důsledku snížení vnitřní povrchové teploty konstrukce apod. [7]

Komplexní posouzení skladby stavební konstrukce z hlediska šíření tepla a vodní páry, lze provést v programu Teplo, který pracuje podle EN ISO 13788, EN ISO 6946, ČSN 73 0540 a STN 73 0540. [23]

### 3.3.2 Průzkum trhu

V dnešní době je známo mnoho typů izolací, jak materiálově běžně používaných, tak celá řada alternativních materiálů. Každý materiál se vyznačuje jinou strukturou a tím i odlišnými vlastnostmi od tepelné a vlhkostní vodivosti po požární odolnost, dopad na životní prostředí při výrobě, cenu apod. Každý tepelný izolant se proto hodí pro jiné typy konstrukce, jiné umístění v konstrukci, různé účely a využití a nelze jeden izolant označit za ten nejlepší. Proto je pro efektivní návrh a dosažení co nejlepšího celkového výsledku důležité nalézt vhodnou

kombinaci navzájem se doplňujících materiálů ve skladbě konstrukce a to se neobejde bez znalosti vlastností a přehledu o dostupných materiálech na trhu.

### 3.3.2.1 Rozdělení

Tepelně izolační materiály se mohou použít ve formě desek, rohoží nebo volně sypané či foukané, přičemž každý výrobek má specifické využití.

Podle umístění tepelně izolační vrstvy v konstrukci můžeme rozlišit izolaci na vnější a vnitřní nebo izolaci uvnitř konstrukce (tzv. jádrová izolace).

Dále rozdělujeme tepelně izolační materiály podle použití pro různé stavební konstrukce, např. pro vnější a vnitřní zateplení fasády, zateplení ploché nebo šikmé střechy, zateplení vodorovných konstrukcí atd., což bude shrnuto dále v tabulce č. 5.

Tepelné izolace lze dělit také podle materiálu, ze kterého byly vyrobeny, např. na přírodní rostlinné a živočišné, syntetické pěnové, minerální, vláknité apod. – viz následující tabulky č. 3 a 4.

Tab. 3: Rozdělení přírodních tepelných izolací a jejich součinitel tepelné vodivosti

TEPELNÁ IZOLACE		MATERIÁL	$\lambda$ [W/(m·K)]
PŘÍRODNÍ	ROSTLINNÉ	<b>NA BÁZI DŘEVA</b>	
		Dřevovláknité desky	0,036-0,047
		Dřevotřískové a dřevoštěpkové desky	0,092
		Korek	0,039-0,06
		Kokosová vlákna	0,043-0,045
		Rákosové rohože	0,050
		Piliny a mineralizované hobliny	0,060
		<b>OSTATNÍ VLÁKNITÉ</b>	
		Celulóza	0,036-0,04
		Sláma	0,050-0,100
		Konopí	0,040-0,045
		Len	0,035-0,075
		Bavlna	0,040 - 0,042
		Juta	0,038-0,040
	ŽIVOČIŠNÉ	Ovčí vlna	0,034-0,042

Tab. 4: Rozdělení syntetických tepelně izolačních materiálů a jejich součinitel tepelné vodivosti

TEPELNÁ IZOLACE		MATERIÁL	$\lambda$ [W/(m·K)]
SYNTECKÉ	PĚNOVÉ	Expandovaný polystyren - EPS	0,037-0,039
		Šedý polystyren - EPS s příměsí grafitu	0,031
		Extrudovaný polystyren -XPS	0,032-0,037
		Pěnový polyuretan - PUR pěna	0,028-0,037
		Pěnový polyizokyanurát -PIR pěna	0,022
		Pěnové fenolické a rezolové pryskyřice	0,021-0,024
		Pěnový polyetylen - PE	0,033-0,040
		Pěnový polyvinylchlorid - PVC	0,043-0,051
		Pěnové sklo	0,041-0,080
		Pěnový kaučuk	0,037-0,050
	MINERÁLNÍ	Expandovaný perlit	0,040-0,050
		Keramzit	0,09-0,1
	VLÁKNITÉ	Minerální vlna – skelná, kamenná	0,035-0,05
		Syntetická (textilní) vlákna	0,065
		Keramická vlákna	0,09-0,1
	TRANSPARENTNÍ IZOLACE A MATERIÁLY NOVÉ GENERACE	Voštinové panely	0,038
		Aerogel	0,015-0,020
		Kalciumsilikátové desky	0,05-0,07
		Vakuové (VIP) desky	0,004 – 0,019
	KOMBINACE S PŘÍRODNÍMI MATERIÁLY	Celulóza	0,036-0,04
		Dřevocementové desky	0,04-0,09
		Vlnité desky z asfaltového papíru	0,065

Hodnoty v tabulkách 3 a 4 jsou pouze orientační, hodnoty u konkrétních produktů se často hodně liší.



S ohledem na rozsah této práce jsou dále popsány pouze některé tepelné izolace. V experimentální části se tato práce zabývá čtyřmi vybranými tepelně izolačními materiály, které budou popsány detailněji.

### **3.3.2.2 Přírodní materiály pro tepelné izolace**

Člověk odedávna využíval k výstavbě suroviny nalezitelné v přírodě, kterých je velké množství, např. kámen, hlína, dřevo apod.

K odklonění od starých postupů využívajících přírodní materiály u nás došlo na počátku 19. století s nástupem průmyslové revoluce. Až současné vývojové trendy se opět vrátily k využívání přírodních surovin a to i pro tepelné izolace. Stále jsou vnímány jako alternativní materiály a jsou ekonomicky nevýhodné, ale za pár let může být jejich využívání nutností.

Přírodní materiály mají příznivý vliv nejen na životní prostředí, ale také na lidské smysly. Mají charakteristickou vůni a vizuální působení blahodárně ovlivňující lidské vědomí. Použitím těchto materiálů podle zásad zdravotní nezávadnosti se může předejít mnohým chorobám a alergiím. [17] [24]

Mezi přírodní izolační materiály patří např. výrobky z dřevěných vláken, sláma, ovčí vlna, konopí, bavlna, celulóza apod. (viz Tab. 3)

#### **Dřevovláknité desky**

Tento materiál má nejen velmi dobré tepelně technické vlastnosti, nízký difúzní odpor, dobré akumulační vlastnosti, ale díky své struktuře má v porovnání s ostatními běžně používanými tepelně izolačními hmotami současně také dobré mechanické vlastnosti, především pevnost a tuhost.

Dřevovláknité desky se hodí pro dodatečné zateplení budov, pro obvodové pláště dřevostaveb, zateplení půdních prostor, ale i pro tepelné nebo akustické izolace do podlah. Kromě toho jsou některé druhy dřevovláknitých desek vhodné i pro interiérové zateplení, což potvrdil Paul Wegerer v roce 2015 experimentálním měřením, které proběhlo na vídeňské univerzitě Vienna University of Technology. [25]

Tvoří se z nich především difúzně otevřené konstrukce a jsou doplňovány dalšími přírodními, difúzně otevřenými materiály, např. ovčí vlnou.

V Rakousku v roce 2015 potvrdili experimentálním měřením také vhodnost využití dřevovláknitých desek pro interiérové zateplení.

Na trhu je velké množství výrobců dřevovláknitých desek, s odlišnou technologií výroby, čímž dosahují různých vlastností.

Zmínit lze např. desky Hofatex, které jsou vyráběny za současného působení páry a vysoké teploty z krátkých jemných vláken měkkého dřeva pojena ligninem, který je obsažen v rostlém dřevě, takže je výrobek zcela ekologicky nezávadný. Tento výrobce vyrábí množství druhů desek pro různé využití, např. Hofafest UD pro zateplení střech jako nadkroevní izolace, Hofatex Therm jako výplňová izolace do obvodových a střešních plášťů staveb, Hofatex Therm NK pro konstrukce tepelně a akusticky izolačních podlah se zvýšenou kročejovou neprůzvučností a jiné. [17] [26] [27]

Dalšími výrobci jsou např. STEICO, CIUR, Pavatex, Heraklith, Hobra a další.



*Obr. 5: Tepelně izolační dřevovláknité desky*

## **Korek**

Korek je další přírodní surovina získávána loupáním odumřelé kůry z korkového dubu, který má schopnost ji neustále obnovovat, takže se celý cyklus sklizně může opakovat průměrně každých 10 let.

Korek pochází ze západního Středomoří a vyskytuje se především v Portugalsku, odkud pochází více než polovina světové produkce, ale i ve Španělsku, Francii, Itálii, Alžíru a Maroku.

Je obnovitelným, stálým a recyklovatelným zdrojem splňujícím současné náročné požadavky na ochranu životního prostředí, ale jeho příznivé environmentální vlastnosti do jisté míry znehodnocují dlouhé dopravní trasy mezi místem výskytu a lokalitou zpracování.

Korek má dobré tepelně izolační a tepelně akumulační vlastnosti, je difúzně propustný a zároveň má schopnost regulovat relativní vlhkost vzduchu v interiéru budov. Dobře pohlcuje kročejový hluk a účinky vibrací. Je tvarově stálý a elastický, odolává vůči opotřebení, chemickým vlivům a bakteriím.

Pro jeho jedinečné vlastnosti lze korek využít k mnoha účelům, ale především se používá jako tepelná izolace kontaktně izolovaných i větraných fasád, případně plochých a šikmých střech a také jako akustická izolace podlah, stěn a příček. Využívá se nejčastěji ve formě tzv. expandovaných aglomerátů vyrobených z korkové drti, která je pojena pryskyřicí obsaženou v korku a vytěsněnou za působení vysokého tlaku a teploty. Další formou je homogenní korek. [17] [27]

U nás jsou výrobci korkových izolací Korek Jelínek a Korkovy.cz.



*Obr. 6: Tepelně izolační desky z korku [28]*

## **Len**

Len setý je obnovitelná užitková rostlina, která se v našem klimatickém pásmu pěstuje především v horských a podhorských oblastech. Rozlišuje se několik typů lnu. Nejrozšířenější je len přadný, který se pěstuje pro lněné vlákno a len olejný pěstovaný pro olejnaté semeno. Při pěstování se neošetřuje žádnými umělými hnojivy ani chemickými přípravky a i při zpracování na tepelně izolační materiály se životní prostředí zatěžuje jen mírně.

Vlákna se zplstňují na textilních strojích, při čemž vznikají tenké pásy rouna, které se pojí bez použití syntetických prostředků pouze pomocí bramborového škrobu. Tak vzniká tvarově stálá a pružná deska s dobrými tepelněizolačními vlastnostmi, s potřebnou pevností a

požadovanou ochranou proti působení požáru a plísní. Dalšími příznivými vlastnostmi jsou využitelnost všech částí rostliny, recyklovatelnost, snadná kompostovatelnost, odolnost vůči hnilobě a škůdcům a spalnost bez vedlejších škodlivých produktů.

Len je ve stavebnictví využíván volně sypaný, jako plst' nebo v deskách pro tepelné izolování všech běžných stavebních konstrukcí, které jsou trvale odděleny od zemní vlhkosti. Při mechanickém zpevnění ve stroji na jehlovou plst' získávají vlákna požadovanou pevnost a potřebné akusticky izolační vlastnosti pro použití do podlah také jako izolace proti kročejovému hluku.

Na trhu v České republice jsou nejznámější výrobky Termolen, ale také Heraflax, Isoflachs a další. [17] [27] [29]



*Obr. 7: Lněné tepelně izolační desky*

### **3.3.2.3 Syntetické materiály pro tepelné izolace**

Syntetické materiály se začaly ve stavebnictví uplatňovat hlavně od začátku průmyslové revoluce. Od poloviny 60. let minulého století se začaly využívat také plasty, které se široce uplatnily mimo jiné při zateplování a to především pro izolaci spodních částí budov. Dnes patří mezi nejpoužívanější materiál pro tepelné izolace obecně.

U využívání syntetických materiálů se však objevuje řada rizik a problémů, jako například obsah toxických poživ (např. formaldehyd) a jejich sublimace, vznik škodlivin během výrobního procesu (např. již zmíněný styren a pentan při výrobě EPS, izokyanáty, sloučeniny fosforu a mnoho dalších), uvolňování mikročastic vnikajících do plic apod. Z toho vyplývají rizika různých onemocnění a problémy životního prostředí.

Na druhou stranu použití malého množství syntetických materiálů například u některých detailů, zvláště u nízkoenergetických a pasivních staveb, může na provozních nákladech životní prostředí naopak šetřit, protože přírodní materiály lze u těchto detailů použít jen s neadekvátní námahou, nižší kvalitou a životností. [30] [24]

### **Pěnové tepelné izolace - EPS, šedý EPS a XPS**

Díky nízké ceně je jedna z nejpoužívanějších tepelných izolací stále ještě expandovaný pěnový polystyren označovaný EPS, který se vyrábí polymerizací styrenu a následně zpěněním vzniklých polystyrenových perlí. Pro zajištění samozhášení se přidávají retardéry hoření. Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí  $\lambda = 0,038 - 0,050 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

Využívá se především pro kontaktní zateplovací systémy fasády a nepochozí ploché střechy s klasickým pořadím vrstev. [26] [29]



*Obr. 8: Tepelně izolační desky expandovaného polystyrenu*

Nevýhodou expandovaného polystyrenu je jeho nízká paropropustnost, ale vývoj jde neustále dopředu a jeho vlastnosti se stále zlepšují. Dříve byl difúzní odpor  $\mu = 60$  a dnes již lze dosáhnout pouze  $\mu = 21$ . Kromě toho se na trhu objevil tzv. šedý polystyren, do kterého se přidávají mikročástice grafitu, které odrážejí teplo zpět k jeho zdroji, čímž zlepšují tepelněizolační schopnosti materiálu - součinitel tepelné vodivosti dosahuje hodnot  $\lambda = 0,031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . [29]



Nejběžnější formou pěnových expandovaných polystyrenů jsou desky. Jejich recyklací (drcením) se vyrábí pěnové polystyreny foukané, které mají ve výsledku ještě lepší tepelně izolační vlastnosti a lze je foukat do dutin stropů a podlah, obvodových stěn, mezi krokve šikmých střech apod. Konstrukce se díky vzduchovým dutinám mezi kuličkami stává difúzně otevřená. [27]



*Obr. 9: Deska expandovaného polystyrenu s příměsí grafitu – „šedý polystyren“ [31]*

Expandovaný polystyren nelze dlouhodobě vystavit vlhku a je omezená i jeho pevnost, proto se pro zateplování konstrukcí vystavených tlaku nebo konstrukcí v kontaktu s vodou a vlhkostí používá extrudovaný polystyren označovaný XPS, který má na rozdíl od EPS uzavřenou strukturu bez mezer, což zaručuje téměř nulovou nasákavost za stálé hodnoty součinitele tepelné vodivosti  $\lambda = 0,030 - 0,038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Zateplují se tak například inverzní ploché střechy, zelené střechy, základy, suterén a sokl. [27] [29]

Mezi nejznámější výrobce pěnových polystyrenů patří Isover, Styrodur, Stavebniny Dek a mnoho dalších. Výrobci šedého polystyrenu jsou například Neopor a Lamdapor.



*Obr. 10: Barevně odlišená tepelněizolační deska extrudovaného polystyrenu XPS [32]*

### **Minerální vlna**

Mezi nejrozšířenější tepelné izolace u nás se řadí minerální vlna, díky poměru ceny, vlastností a výsledného efektu. Rozděluje se na kamennou a skelnou vlnu podle hornin, ze kterých je průmyslově vyráběna tavením. Tento proces značně zatěžuje životní prostředí emisemi a je energeticky velmi náročný. Nejčastěji se jedná o čedič, nebo křemen a další sklotvorné příměsi, mezi kterými se značně využívá také skleněný recyklát, což bilanci dopadu na životní prostředí lehce vylepšuje. Příznivé je také, že někteří výrobci již nahrazují fenol-formaldehydové pryskyřice šetrnějšími a zdravotně nezávadnými pojivy.

Součinitel tepelné vodivosti běžně dosahuje  $\lambda = 0,035 - 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , ale tepelněizolační vlastnosti se stále zlepšují a na trhu se již objevují produkty s hodnotami až  $\lambda = 0,030 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Minerální vlna má vysokou paropropustnost, díky čemuž je využívána pro izolaci provětrávaných konstrukcí – nekontaktní zateplení fasád nebo zateplení dvouplášťových střeš.

Díky vlastnostem výchozích materiálů má vlna odolnost vůči vysokým teplotám a využívá se také například pro dodatečné kontaktní zateplení panelových domů ve výšce nad 22,5 m, kde kvůli požární ochraně již nemůže být použit polystyren, nebo pro vytvoření požárních pásů. [26] [29]

Vedle klasických hydrofobizovaných minerálních vln, jsou vyráběny také minerální vlny hydrofilní, které nachází uplatnění při zateplování interiérů, při odsolování vlhkého zdiva, nebo jako tepelné izolace zelených střeš.

Čedičová i skelná minerální vlna se dodává v rolích, ve formě desek nebo foukaná od mnoha výrobců, např. mezi přední světové výrobce, kteří působí i v České republice patří firmy Isover a Rockwool.



*Obr. 11: Teplená izolace z minerální vlny*

### **Aerogel**

Aerogel je pevná látka s nejnižší známou hustotou a spolu s vakuovou izolací zatím jediná tepelná izolace, která má výrazně lepší tepelně izolační schopnosti, než naprosto klidný a suchý vzduch – součinitel tepelné vodivosti aerogelu je  $\lambda = 0,015 - 0,020 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , kdežto suchý, nehybný vzduch nabývá hodnot  $\lambda = 0,026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Je to způsobeno jeho jemnou strukturou, která omezuje přenos tepla mezi póry vzájemnými kolizemi molekul vzduchu.

Aerogel je vyroben nejčastěji z gelu oxidu křemičitého, ale i z dalších chemických prvků, při působení vysokých teplot a tlaků s přidávkem katalyzátorů pro dosažení požadované hustoty a minimalizace smršťování gelu. Celý proces výroby se nazývá superkritické vysoušení.

Cena aerogelu je zatím velmi vysoká, což jeho využívání ve stavebnictví velmi omezuje – používá se například pro řešení detailů, nebo tam, kde je nezbytné použít minimální tloušťky materiálu. V současné době ale probíhá výzkum a vývoj výrobních procesů, které by investičně náročnou produkci zlevnily a zároveň zlepšily fyzikální vlastnosti materiálu – křehkost apod. Studií aerogelu, vytvořením teoretických modelů a měřením tepelné vodivosti se například v Číně zabýval Gaosheng Wei. [33]



Izolační rohože na bázi aerogelu vyztužené textilními vlákny vyrábí například americká firma Espen Aerogels a německá firma VARIOTEC. [20] [27] [29]



*Obr. 12: Izolační rohože na bázi aerogelu vyztužené textilními vlákny*

### **3.3.3 Vybrané tepelné izolace**

#### **3.3.3.1 Sláma**

Jako sláma se označují suché stonky a stébla vymláčeného obilí nebo přadných rostlin. Většinou se získává jako odpadní produkt zemědělství a její produkce je větší než spotřeba. Kromě toho se sláma zpracovává pouze mechanicky, tudíž je energetická náročnost na její výrobu oproti jiným tepelně izolačním materiálům nesrovnatelně nižší a stejně jako ostatní rostliny do sebe absorbuje během svého růstu poměrně velké množství CO<sub>2</sub>, které převažuje produkci emisí během výroby. Navíc je v suchém stavu inertní a neobsahuje žádné alergeny ani škodliviny a je snadno recyklovatelná. Díky tomu je její použití vhodné z důvodu zachování zdravého životního prostředí a vytvoření zdravotně nezávadného vnitřního prostředí v budovách. [17]

Sláma se obvykle lisuje do balíků nebo desek, čímž je zajištěna vyšší objemová hmotnost, která je optimálně  $\rho = 90 - 180 \text{ kg/m}^3$ . Právě na kvalitě slisování, ale také na vlhkosti, objemové hmotnosti a uspořádání stébel závisí tepelná vodivost, která se kvůli těmto činitelům nedá jednoznačně určit. Různé prameny udávají velmi odlišné hodnoty. Podle Minkeho byla v roce 2003 výzkumným ústavem pro tepelnou ochranu v Mnichově u balíků slámy kolmo ke směru

vláken naměřena hodnota  $\lambda = 0,037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  při hustotě  $\rho = 90 - 110 \text{ kg}/\text{m}^3$  v suchém stavu a průměrné teplotě  $\theta = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . S bezpečnostní přírůzkou ve výši 20% podle normy DIN 4108-4 tak vyplývá tepelná vodivost  $\lambda = 0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Naproti tomu český výrobce Ekopanelů uvádí hodnoty dvakrát horší  $\lambda = 0,099 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  při objemové hmotnosti  $\rho = 379 \text{ kg}/\text{m}^3$ . [34]

Stěny z oboustranně omítnutých balíků dobře zvukově izolují a oproti obdobně těžkým konstrukcím z jiných materiálů vykazují vyšší vzduchovou neprůzvučnost. Je to díky schopnosti slámy pohlcovat zvuk a její elasticitě.

Přesto, že se sláma na vnějším povrchu vyznačuje vodu odpuzující vrstvou, je vysoce citlivá na působení vlhkosti, podléhá degradaci a dochází k vývoji plísní. Proto se musí před vlhkostí dobře chránit povrchovou úpravou, například omítkou nebo obkladem.

Slaměná izolace má po zabudování do konstrukce ve spojení s hliněnou nebo vápennou omítkou překvapivě vysokou požární odolnost až 90 minut. [17] [26] [27] [34]

Sláma se využívá v balících nebo v deskách a rozemletá a rozvlákněná s přídatnými látkami vzniká i sláma foukaná. V České republice se od roku 1999 vyrábějí nenosné panely z lisované slámy pod názvem Ekopanely, které jsou použity pro měření vlastností v experimentální části této práce.



*Obr. 13: Tepelná izolace Ekopanel z lisované slámy*

### **3.3.3.2 Technické konopí**

Konopí seté, tzv. technické konopí, je klasická obnovitelná dorůstající rostlina původem z Asie nesoucí minimální ekologickou stopu. Téměř všechny části rostliny mají velice široké využití v nejrůznějších oblastech. Semeno se zpracovává na olej pro využití v chemickém,

lékařském a kosmetickém průmyslu, květy a listy jsou využívány především v lékařství a farmacii a vlákna se používají pro technické účely, hlavně pro netkaný textil, papírenský a automobilový průmysl a v neposlední řadě také ve stavebnictví. Při zpracování rostliny na vlákna vzniká odpadní materiál, tzv. pazdeří, které se dále lisuje a lze využít mimo jiné také jako surovina pro výrobu izolačních desek.

Hlavní výhodou této plodiny je její rychlá obnovitelnost. Roste mnohem rychleji než dřevo - během 120 dnů může dosahovat výšky až 4,5 m a každoročně vyprodukuje až 4 krát více vlákniny.

Konopí může být svými vlastnostmi dobrou alternativou dřeva i jako stavební surovina. Z jednoho hektaru osetého konopí lze sklídit až 12 tun suché suroviny, které stačí na výrobu 8 tun stavebního materiálu. Má srovnatelné akustické a tepelné vlastnosti – výpočtová hodnota součinitele tepelné vodivosti  $\lambda = 0,040 - 0,060 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  a měrná tepelná kapacita  $c = 1600 - 1700 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ). Oproti dřevovláknitým deskám je hodnota měrné tepelné kapacity nižší, ale ve srovnání například s minerálními izolacemi pojmu konopné izolace téměř dvojnásobné množství tepla. Konopí je difúzně velmi propustné, faktor difúzního odporu  $\mu = 1 - 2$ . Kromě toho má schopnost redistribuovat vlhkost a objemová vlhkost může narůst až na 20% bez snížení tepelněizolačních schopností – pro srovnání u minerálních izolací k tomu dochází již při 2% objemové vlhkosti. [35]

Konopné vlákno je velmi houževnaté a obsahuje velké množství dřevité hmoty, čímž jsou izolace z něj pružné, tvarově stálé, mají dobrou stabilitu a pevnost.

Jsou odolné vůči škůdcům a nepodléhají hnilobě a vytvářejí přirozené a v zdravé vnitřní prostředí.

Nevýhodou konopných izolací je jejich hořlavost v kontaktu s plamenem, která se ale dá řešit vhodnou úpravou konstrukce.

Produkty z konopí se ve formě rohoží, plstí, desek, panelů nebo drti využívají jako tepelné i zvukové izolace vnějších i vnitřních stavebních konstrukcí, na izolaci střech, stěn a podlah u novostaveb i rekonstrukcí. Ideální požití je ve dřevostavbách, kde se běžně uplatňuje difúzně otevřená skladba konstrukcí. [17] [26] [27] [36]

V České republice jsou známy konopné izolace pod názvem TERMO-KONOPIÍ nebo CANABEST.



*Obr. 14: Konopné izolační desky TERMO-KONOPIÍ PREMIUM*

### 3.3.3.3 Ovčí vlna

Jediným zástupcem přírodních živočišných izolačních materiálů je ovčí vlna. Patří mezi obnovitelné a recyklovatelné zdroje, při jejím získávání a zpracování se spotřebovává jen malé množství primární energie a navíc se nesnižuje stav žádného přírodního zdroje, čímž značně šetří životní prostředí. Je výchozím materiálem pro výrobu vláken, které se používají v textilním průmyslu a ve stavebnictví.

Součinitel tepelné vodivosti ovčí vlny dosahuje hodnot  $\lambda = 0,038 - 0,050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , což ji řadí mezi velmi dobré tepelné izolanty. Voda, kterou na sebe ovčí vlna dokáže vázat až do jedné třetiny vlastní hmotnosti, má na tepelně izolační schopnosti jen minimální vliv. Uvolňováním této vlhkosti do interiéru podle aktuální vlhkosti prostředí stabilizuje ovčí vlna vlhkostní klima. Díky těmto vlastnostem jsou izolace z ovčí vlny oproti ostatním izolacím unikátní a jsou vhodné do difúzně otevřených konstrukcí.

Objemovou hmotnost má ovčí vlna velmi nízkou -  $\rho = 12,5 - 25 \text{ kg/m}^3$ , takže manipulace při zabudování je velmi snadná. Má dlouhou životnost, je stabilní, trvale zachovává pružnost, je samozhášecí a zdravotně nezávadná. Využívá se také pro čištění ovzduší od některých škodlivých látek, které do sebe adsorbuje. Například se jedná o organická ředidla, ozon a vysoce

toxický formaldehyd, který se odpařuje například ze stavebního materiálu, dřevotřískového nábytku, koberec a hraček.

Při zateplování budov je nutné ovčí vlnu umístit do nosných roštů a provést její ochranné opláštění. Před jejím použitím v konstrukci je ale potřeba zbavit ji nečistot a provést opatření proti poškození hmyzem a pro snížení hořlavosti, což se provádí pomocí zdravotně nezávadných přísad.

Izolace z ovčí vlny se vyrábějí bez použití jakýchkoliv pojiv ve formě rohoží nebo elastických desek. Jsou určeny především pro tepelné a akustické izolování příček, podhledů, akustických stropů a stěn, případně se dají použít i na izolaci rozvodů technického zařízení budov. Nejsou ale vhodné například pro izolaci plovoucích podlah a pochůzných střech, protože ovčí vlna neobsahuje žádná plnidla, a proto není odolná proti tlaku.

Výrobci jsou například Isolena a Insoflece. [17] [26] [27]



*Obr. 15: Tepelná izolace z ovčí vlny ISOLENA – Block*

#### **3.3.3.4 Kalcium-silikát**

Kalcium-silikátové neboli také vápeno-silikátové desky jsou bezvláknité a bezazbestové izolační desky. Vyznačují se výbornými tepelněizolačními vlastnostmi, jsou nehořlavé a kapilárně aktivní. Využívají se především jako zadní izolace při vyzdívání termických zařízení a pro vnitřní zateplení.



Součinitel tepelné vodivosti kalcia-silikátu je v rozmezí  $\lambda = 0,05 - 0,07 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Měrnou tepelnou kapacitu má  $c = 1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  a faktor difúzního odporu  $\mu = 5 - 20$ . Tento materiál má velmi různou objemovou hmotnost  $\rho = 200 - 1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

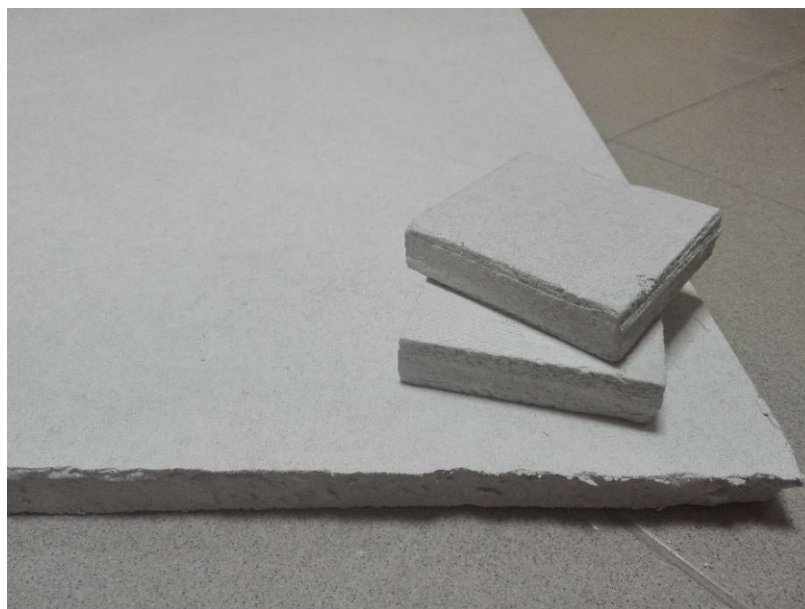
Desky s objemovou hmotností do  $\rho = 500 \text{ kg}/\text{m}^3$ , tzv. „lehké kalcium-silikátové desky“, se pro vysoký součinitel vlhkostní vodivosti materiálu využívají hlavně k izolaci interiérů. Vnitřní zateplení je z mnoha důvodů velmi rizikový způsob zateplování, ale mnohdy je jediným vhodným řešením, například u historických staveb s výzdobou fasády nebo z režného zdiva.

Jedná se o složitou problematiku a je nutné důsledně posoudit tepelně vlhkostní chování a klást důraz na řešení detailů. Díky vysoké vlhkostní vodivosti kalcium-silikátových desek je možné zabránit kumulaci zkondenzované vody mezi tepelným izolantem a nosnou konstrukcí dokonce bez použití parozábrany. Kromě toho mohou být díky vynikajícím hodnotám tepelné vodivosti použity malé tloušťky desek, což je z energetického a ekonomického hlediska důležité. Z těchto důvodů je kalcium-silikát pro tuto variantu zateplování vhodným materiálem.

Díky své odolnosti vůči vysokým teplotám, pevnosti a samonosnosti se desky s objemovou hmotností vyšší než  $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$  využívají jako izolační materiál pro stavbu krbů a kamen.

Jsou nehořlavé, neobsahují žádné nebezpečné látky, jsou odolné proti plísním a nemají negativní dopad na okolí. [37]

Výrobce kalcium silikátových desek je například firma Promat a CALSITHERM, jejíž produkty u nás dodává firma EBK ERET BERNARD s.r.o.



Obr. 16: Kalcium silikátové izolační desky CALSITHERM KLIMAPLATTE

### **3.3.4 Použití tepelných izolací v konstrukcích**

Jak už bylo zmíněno, každá tepelná izolace se díky svým specifickým vlastnostem hodí pro rozdílné materiály, typy konstrukcí a umístění v nich. Následuje stručný popis nejběžnějších konstrukcí, ve kterých se používá zabudovaná tepelná izolace.

U všech těchto konstrukcí je obecně důležité dodržení všech technologických postupů výrobce.

#### **3.3.4.1 Zateplení obvodových stěn**

Obvodové stěny se mohou zateplovat z vnější nebo vnitřní strany, přičemž vhodnější a ve většině případů realizované je zateplení z exteriéru, které lze dále rozdělit na kontaktní a bezkontaktní, neboli provětrávané.

Zateplení z venkovní strany je oproti vnitřnímu zateplení výhodnější kvůli průběhu vlhkosti skladbou konstrukce a menšímu riziku kondenzace vodní páry v konstrukci, lepší akumulaci schopnosti konstrukce a snazšímu řešení detailů. Mimoto chrání nosnou část konstrukce před povětrnostními vlivy, tzn. před deštěm, vlhkostí, sněhem, mrazem, slunečním zářením apod.

Tloušťka tepelně izolační vrstvy se vypočítává podle požadavků normy ČSN 73 0540-2 na součinitel prostupu tepla a podle konkrétních požadavků investora. Kromě požadavků na tepelnou ochranu budovy musí zateplení z vnější strany splňovat také požadavky na mechanickou odolnost a stabilitu, požární bezpečnost, akustickou ochranu, životnost aj.

Pro eliminaci kondenzace vodní páry v konstrukci s vnějším zateplením je vhodné navrhovat vrstvy skladby konstrukce s klesajícím difúzním odporem směrem od interiéru, tzn. na vnější straně obvodového pláště by měla být nejvíce difúzně otevřená vrstva, díky čemuž konstrukce „může dýchat“.

Kontaktní způsob vnějšího zateplení, mezinárodně označovaný zkratkou ETICS (External thermal insulation composite system), je v dnešní době nejčastěji využívaným řešením především u zděných novostaveb i rekonstrukcí, kdy jsou jednotlivé vrstvy skladby systému navzájem celoplošně spojeny.

U provětrávané fasády je mezi tepelnou izolací a vnější obklad vložena vzduchová mezera, ve které dochází k proudění vzduchu, což umožňuje odvod vlhkosti. Skladba s předsazeným opláštěním má další nesporné výhody, například zabraňuje přehřívání fasády, zlepšuje akustické vlastnosti konstrukce atd.

Podle materiálu nosné konstrukce, způsobu zateplení a požadavků se volí materiál tepelného izolantu. [38]

### **3.3.4.2 Zateplení střech**

Střecha je ze všech konstrukcí nejvíce vystavena povětrnostním vlivům v každém ročním období, a proto je správné provedení zateplení střechy jedním z důležitých faktorů pro minimalizaci tepelných ztrát.

Základní rozdělení je na střechy ploché a šikmé a dále se dělí na jednoplášťové a víceplášťové. Podobně jako u obvodových stěn je jednoplášťová konstrukce střechy bez větrané mezery, což bývá zejména u plochých střech. Vícevrstvá střecha obsahuje jednu, nebo více obvykle provětrávaných mezer, sloužících k odvodu vodní páry, která proniká difúzí skrz spodní plášť střechy a eliminuje tak kondenzaci v konstrukci.

Jednoplášťové ploché střechy se dále rozdělují na střechy klasické, inverzní, zelené a DUO střechy, což určuje umístění tepelné izolace a ostatních vrstev a výběr vhodného tepelně izolačního materiálu. Každý typ konstrukce umožňuje rozdílné šíření tepla a vlhkosti v konstrukci a výběr závisí na požadavcích na vnitřní prostředí pod střechou.

Zateplení šikmých střech lze rozdělit dle umístění tepelné izolace na podkrokevní, mezikrokevní a nadkrokevní, přičemž nejvhodnější z hlediska tepelných mostů, tloušťky konstrukce a využití prostoru pod střechou je kombinace nadkrokevní a mezikrokevní izolace.

Tloušťka tepelně izolační vrstvy se také vypočítává podle požadavků normy a investora, ale oproti tloušťce u ostatních konstrukcí bývá větší – obvykle 180 – 300 mm. [39]

### **3.3.4.3 Zateplení podlahy a stropu**

Zateplení podlah a stropů je nutné pouze u konstrukcí oddělující prostředí s rozdílem teplot, což jsou například podlahy na terénu a podlahy a stropy vytápěných interiérů nad, či pod nevytápěným, nebo částečně vytápěným prostorem. U podlah je kromě požadavků na tepelnou ochranu důležitá i schopnost přenášet zatížení podle provozu interiéru, což zužuje výběr vhodného materiálu pro zateplení.

U vodorovných konstrukcí rozdělujících prostory bez rozdílu teplot je důležitá akustická izolace. Pro zamezení kročejového hluku i hluku šířeného vzduchem je nejvhodnější konstrukce těžké plovoucí podlahy, u které se roznášecí a nášlapná vrstva pružně odděluje od podkladních vrstev a svislých konstrukcí. K akustické izolaci zpravidla stačí několik centimetrů izolační vrstvy z většiny materiálů pro tepelné izolace.



V tabulce (Tab. 5) je patrné použití jednotlivých popsaných tepelných izolací v konkrétních konstrukcích.

Vysvětlivky:

- vhodný materiál
- méně vhodný materiál/využitelný materiál s omezením

Tab. 5: Využití vybraných tepelných izolací

<b>Materiál /použití</b>	Dřevovláknité desky	Korek	Len	Sláma	Technické konopí	Ovčí vlna	EPS	EPS s grafitem	XPS	Minerální vlna	Aerogel	Kalciumsilikát
Vnější zateplení fasády	●	●	●	●	●	●	●	●		●		
Zateplení suterénu, soklu									●			
Zateplení ploché střechy		●	○		○	○	●	●	●	●		
Zateplení zelené ploché střechy							○	○	○	●		
Zateplení šikmé střechy	●	●			●	●	●	●	○	●		
Zateplení podlahy a stropu	●	●	●		●	●	●	●	●	●		
Vnitřní izolace stěny	●	○	○	○	○	○			○	○	○	●
Akustická izolace	●	●	●	●	●	●	●	●		●		
TI pro požární ochranu										●		●
Zateplení technických rozvodů						●				●		
Zateplení termických zařízení												●

## 4 Experimentální část

V praktické části této práce byly měřeny vlastnosti na třech vybraných přírodních tepelných izolacích a na jedné syntetické pro porovnání rozdílného chování. Jednalo se o stavební desku z lisované slámy Ekopanel od firmy EKOPANELY SERVIS s.r.o., technické konopí TERMO-KONOPI PREMIUM od firmy IZOLACE KONOPI CZ, s.r.o., ovčí vlnu ISOLENA – Block od společnosti ISOLENA WOLLE a kalcium-silikátové izolační desky CALSITHERM KLIMAPLATTE od EBK ERET BERNARD, s.r.o. Tyto tepelně izolační materiály byly již popsány v teoretické části práce.

Měření se provádělo za stabilních podmínek v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze na Katedře materiálového inženýrství a chemie.

### 4.1 Měřené vlastnosti a použité metody měření

Na vzorcích zmíněných tepelných izolacích proběhla měření základních fyzikálních vlastností, tzn. objemová hmotnost, hustota matrice a otevřená pórovitost, dále vlhkostních parametrů – transport vodní páry a kapalné vody materiálem a také tepelných vlastností – součinitel tepelné a teplotní vodivosti a měrná objemová tepelná kapacita.

#### 4.1.1 Základní fyzikální vlastnosti

Základní fyzikální vlastnosti zahrnují všechny vlastnosti materiálu, které lze určit pomocí hmotnosti, rozměrů a objemu vzorku. Jedná se o objemovou hmotnost  $\rho_v$ , hustotu matrice  $\rho_{mat}$ , které se udávají v  $\text{kg/m}^3$  a otevřenou pórovitost  $\psi$  udávanou v %. Na těchto parametrech zřejmě závisí všechny ostatní materiálové vlastnosti, které je tedy možné podle hodnot základních materiálových charakteristik odhadnout, např. tepelně-vlhkostní funkce nebo mechanické vlastnosti materiálu.

Nejjednodušší metodou pro určení objemové hmotnosti vzorků o pravidelném tvaru je metoda gravimetrická. Objemovou hmotnost materiálu lze vypočítat ze změřených rozměrů a hmotnosti vzorku  $m_d$  rovnicí:

$$\rho_v = \frac{m_d}{V} \quad [\text{kg/m}^3]. \quad (1)$$

U nepravidelných materiálů je ale stanovení objemu nepřesné, proto se při měření objemové hmotnosti využívalo také Archimédova vážení a byla použita rovnice pro vypočítání objemu vzorků z hmotnosti suchého vzorku  $m_d$ , hmotnosti vzorku nasyceného vodou  $m_w$  a

Archimédovy hmotnosti vzorku  $m_a$ , tzn. hmotnosti vodou nasyceného vzorku ponořeného do kapaliny o hustotě  $\rho_l$ :

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_l} \quad [\text{m}^3]. \quad (2)$$

### Vakuová saturace

Pro stanovení obsahu nasycené vlhkosti  $w_c$  a hustoty matrice  $\rho_{mat}$  vzorků se měřila vakuová nasákavost. Vzorky tepelných izolací se umístily do sušárny pro odstranění fyzikálně vázané vody a poté se zvažila jejich hmotnost v suchém stavu  $m_d$ . Vysušený materiál se vložil do exsikátoru (obr. 17). Tato speciální nádoba se pod vakuem naplnila destilovanou vodou. Vzorky se ponechaly opět vakuovat, dokud nebyly všechny póry zcela naplněny vodou a poté byla zaznamenána jejich hmotnost na suchu při maximální saturaci  $m_w$  a hmotnost pod vodou pomocí Archimédovy váhy  $m_a$ . [40] [41]

Obsah nasycené vlhkosti  $w_c$  a hustota matrice  $\rho_{mat}$  se určily z rovnic:

$$w_c = \psi_0 \cdot \rho_v = \frac{m_w - m_d}{V} \quad [\text{kg}/\text{m}^3], \quad (3)$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V(1 - \psi_0)} \quad [\text{kg}/\text{m}^3], \quad (4)$$

kde  $\psi_0$  je otevřená pórovitost, definována jako poměr objemu otevřených pórů v materiálu ku celkovému objemu tohoto materiálu a z naměřených hodnot byla stanovena ze vzorce:

$$\psi_0 = \frac{m_w - m_d}{V \cdot \rho_l} \quad [-]. \quad (5)$$



Obr. 17: Exsikátor pro měření vakuové nasákavosti

#### 4.1.2 Vlhkostní vlastnosti

Vlhkostní vlastnosti jsou u stavebních materiálů velmi zásadními parametry, protože vlhkost je obsažena v podstatě ve všech stavebních pórovitých materiálech a ovlivňuje mnoho dalších charakteristik materiálu, jako např. tepelnou vodivost, akumulaci schopnosti, pevnost, objemovou hmotnost, deformace atd.

Nadměrná vlhkost v konstrukcích bývá zdrojem poruch – může ohrozit funkci konstrukce např.: zkrátit předpokládanou životnost a trvanlivost konstrukce, snížit vnitřní povrchovou teplotu, může docházet k růstu plísní a bakterií v materiálech apod.

Obsah vlhkosti v materiálu lze vyjádřit nejčastěji pomocí hmotnostní vlhkosti  $u$  [kg/kg], objemové vlhkosti  $w$  [ $m^3/m^3$ ], nebo stupněm nasycení  $\theta$  [-].

Strukturu stavebních materiálů běžně tvoří kombinace matrice materiálu a otevřené či uzavřené póry. Pronikání vlhkosti do stavební konstrukce ať už v kapalném stavu, nebo ve formě vodní páry zapříčiňuje přítomnost pórů otevřených, které kromě průběhu vlhkostních procesů ovlivňují i fyzikálně mechanické vlastnosti materiálu. Zásadní jsou také rozměry těchto pórů, protože právě jejich velikost ovlivňuje zaplňování materiálu vodou, nebo plynem. Posoudit v jakém skupenství se voda v jednotlivých pórech vyskytuje, lze pomocí Knudsenova čísla  $Kn$  [-]. [42]

##### 4.1.2.1 Transport vodní páry

###### Miskové metody bez teplotního spádu

Měření součinitele difúze vodní páry proběhlo vždy na třech vzorcích všech vybraných tepelných izolací miskovými metodami bez teplotního spádu dvěma způsoby – metodou WET-CUP a metodou DRY-CUP. Tyto metody jsou založeny na šíření vodní páry vzorkem pouze v jednom směru a na znalosti parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu nad a pod měrným povrchem vzorku.

Pro každý materiál byly vždy tři vzorky o ploše podstavy 10x10 cm a změřené tloušťce po obvodě vzduchotěsně a parotěsně izolovány, aby byl zajištěn pouze jednorozměrný tok vodní páry, byly plastickou hmotou neprodyšně upevněny v miskách a při každé metodě byly vystaveny rozdílným okrajovým podmínkám. V případě metody DRY-CUP byly misky naplněny vysušeným silikagelem, čímž byla zajištěna hodnota relativní vlhkosti vzduchu téměř 0 %. U metody WET-CUP byla relativní vlhkost vzduchu pod měrným povrchem vzorků cca 95% díky částečnému naplnění misek vodou. Misky se vzorky byly umístěny do klimatické

komory, která zajistila stálou relativní vlhkost vzduchu okolního prostředí 50% a konstantní teplotu 25°C - vzhledem ke stejné teplotě a rozdílné relativní vlhkosti vzduchu, tedy rozdílným parciálním tlakům vodní páry došlo k difundaci vodních par skrz měřené vzorky z prostředí s vyšší relativní vlhkostí vzduchu tj. z prostředí s vyšším parciálním tlakem vodních par. U metody DRY-CUP tedy došlo k přírůstku hmotnosti v čase a u metody WET-CUP naopak k úbytku. Přesné hodnoty byly pravidelně měřeny a na jejich základě byly určeny parametry transportu vodní páry. [40]

Z naměřených hodnot byla spočítána difúzní permeabilita vodní páry  $\delta$  podle vztahu:

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_p} \quad [\text{s}], \quad (6)$$

kde  $\Delta m$  je hmotnost vodní páry prošlé vzorkem [kg],  $d$  je tloušťka vzorku [m],  $S$  je plocha [m<sup>2</sup>], kterou může vodní pára vzorkem prostupovat,  $\tau$  je čas odpovídající hmotnosti [s] a  $\Delta p_p$  je rozdíl parciálních tlaků nad a pod měrným povrchem vzorku [Pa].

Dále byl vypočítán součinitel difúze vodní páry v porézních materiálech  $D$ :

$$D = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{M \cdot \psi} \quad [\text{m}^2/\text{s}], \quad (7)$$

kde  $R$  je univerzální plynová konstanta [J/K·mol],  $T$  je termodynamická teplota [K],  $M$  je molární hmotnost vodní páry [kg/mol] a  $\psi$  je pórovitost.

Jeden z dalších pro stavební praxi nejpoužívanějších parametrů je faktor difúzního odporu vodní páry stanovující, kolikrát je transport vodní páry materiálem pomalejší oproti transportu vodní páry vzduchem, který je  $D_a = 2,3 \cdot 10^{-5}$ . [40] Faktor difúzního odporu byl stanoven ze vztahu:

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad [-]. \quad (8)$$



Obr. 18: Misková metoda – vážení vzorku kalcia-silikátu

#### 4.1.2.2 Transport kapalné vody

Porézní stavební materiál v kontaktu s kapalnou vodou je vystaven kapilární vztlakovosti, což je vzestup kapalné vody soustavou pórů materiálu nad úroveň volné hladiny vody.

Transport kapalné vody porézním materiálem vyjadřuje následující diferenciální rovnice:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(\kappa \text{gradu}), \quad (9)$$

kde  $u$  je obsah vlhkosti a  $\kappa$  součinitel vlhkostní vodivosti. [40]

V rámci měření této práce byl zjišťován transportní parametr charakterizující vedení kapalné vlhkosti v materiálu  $\kappa$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] pomocí Boltzman – Matanovy metody.

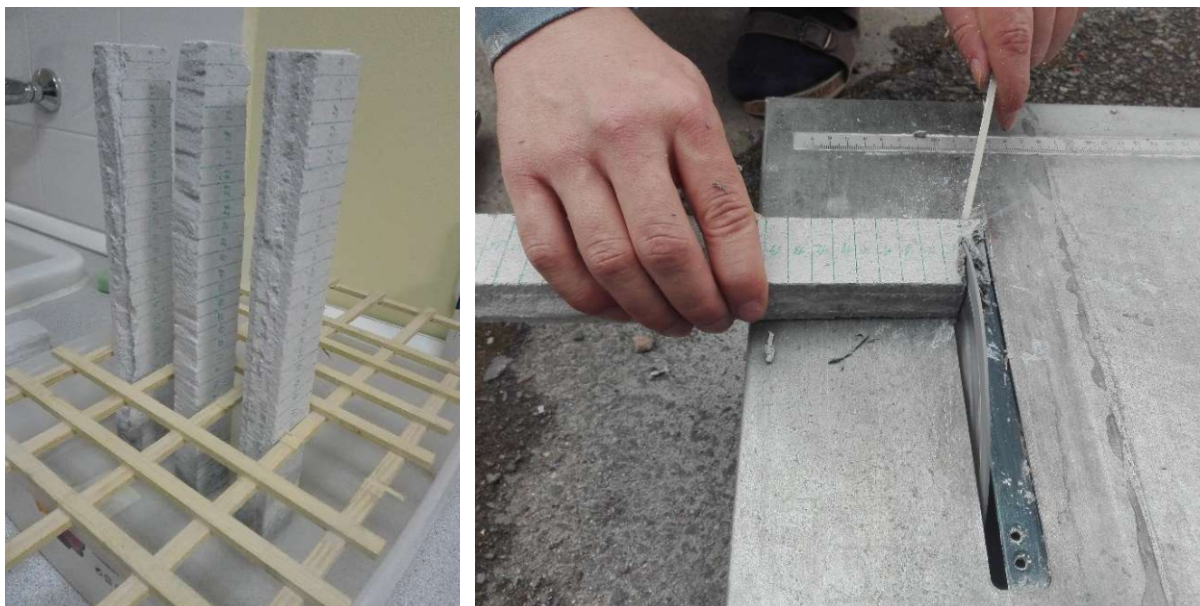
#### Součinitel vlhkostní vodivosti v závislosti na vlhkosti

Pro každý typ tepelné izolace byly zkoušeny opět tři vzorky, měly pro měření tvar trámečků o rozměrech 20 x 40 x 300 mm a byly po obvodu zaizolovány pro zajištění jednorozměrného transportu kapalné vody – v případě ovčí vlny a konopí byly materiálem vyplněny formy. Trámečky byly vertikálně umístěny do nádoby naplněné asi jedním centimetrem vody (viz obr. 19), v různých časových intervalech byly jednotlivé vzorky rozřezány/rozstříhány po jednom centimetru (viz obr. 19) a gravimetrickou metodou byly určeny přesné hodnoty hmotnostní vlhkosti jednotlivých částí vzorku podle vztahu:

$$u = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad [-], \quad (10)$$

kde  $m_w$  je hmotnost vlhkého vzorku a  $m_d$  hmotnost suchého vzorku. [40]

Vlhkostní profily pro jednotlivé časy byly získány vynesemím vlhkostí a příslušných poloh do grafu a následně byly přepočítány na průměrnou hodnotu součinitele vlhkostní vodivosti  $\kappa$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] pomocí zmíněné Boltzman- Matanovy metody programem K-Spline 1.1, který byl vyvinut na Katedře materiálového inženýrství a chemie.



Obr. 19: Průběh měření vlhkostní vodivosti kalcia-silikátu

### **Absorpční koeficient vody**

Dále byl z vlhkostních parametrů určován absorpční koeficient vody  $A$  [ $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{s}}$ ] z naměřené křivky nasákavosti daných materiálů.

Pět vzorků každého vybraného tepelně izolačního materiálu bylo pro toto měření zaizolováno po obvodu jako v předchozích popisovaných metodách. Takto připravené vzorky byly ponořeny čelní stranou do vody zhruba 5 mm. Měření hmotnostních přírůstků vody v závislosti na čase probíhalo automatickým způsobem, tzn. na digitální váze byly zaznamenávány hmotnosti vzorků automaticky pomocí programu v nastavených časových intervalech (viz obr. 20).

Křivka nasákavosti se vykresluje z přírůstků vlhkosti vztažených na plochu neizolované strany vzorku v přímém kontaktu s vodou v závislosti na odmocnině z času. Absorpční koeficient vody  $A$  je tangenta počátečního nárůstu kumulovaného obsahu vody v závislosti na odmocnině z času. Křivky nasákavosti s absorpčními koeficienty jednotlivých tepelných izolací jsou patrné v kapitole výsledky měření. [40]





Obr. 20: Metoda vertikální nasákavosti – automatické vážení kalcia-silikátu

#### 4.1.3 Tepelné vlastnosti

Teplo se podle fyzikální podstaty dějů přenáší vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) nebo zářením (radiací). Tato práce se zabývá pouze přenosem tepla vedením, protože takto se teplo šíří nejen v kapalinách a plynech, ale i v látkách pevných, které byly měřeny. Stavební částice látky si při tomto šíření předávají kinetickou energii neuspořádanými tepelnými pohyby a tím se přenáší z míst o vyšší teplotě do míst s teplotou nižší.

Proces vedení tepla charakterizuje součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/(m·K)], který byl již popsán v tepelně technických vlastnostech v teoretické části této práce. Číselná hodnota tohoto součinitele je vyjádřena jako hustota tepelného toku při gradientu teploty 1 K/m v dané látce.

Jak už bylo řečeno, tepelně izolační vlastnosti materiálů se zhoršují s narůstající vlhkostí, protože součinitel tepelné vodivosti vody je přibližně 25krát větší, než součinitel tepelné vodivosti vzduchu, a tedy mnohem lépe vede teplo. Z tohoto důvodu proběhlo měření v závislosti na vlhkosti.

Jaké množství tepelné energie je potřeba dodat látce o hmotnosti jeden kilogram, aby se ohřála o 1 K, popisuje měrná tepelná kapacita  $c$  [J/kg.K]. V praxi tento parametr u materiálů v obvodových pláštích ovlivňuje stabilitu vnitřního prostředí budovy v závislosti na změnách venkovního prostředí. [27] Pomocí tohoto parametru, součinitele tepelné vodivosti a objemovou hmotností je definován součinitel teplotní vodivosti  $a$  [ $m^2/s$ ], který vyjadřuje schopnost stejnorodého materiálu o dané vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla - čím vyšší je jeho hodnota, tím probíhá vyrovnání teplot rychleji. [41]



## Měření přístrojem ISOMET 2104

Výše uvedené tepelné parametry byly měřeny přístrojem ISOMET 2104 (obr. 21), který měří termo-fyzikální vlastnosti materiálů přímou nestacionární metodou. Tento přístroj je pro měření pevných materiálů vybaven plošnými sondami, které při měření musí být v přímém kontaktu s testovaným vzorkem, na který vyvolávají impulsy tepelného toku a přístroj provádí analýzu časové závislosti teplotní odezvy materiálu. [40]

Vždy tři vzorky každé testované tepelné izolace byly nejdříve změřeny v suchém stavu, poté byly ponořené do vody až do stavu úplného nasycení a následně byly průběžně měřeny za postupného vysoušení.



Měření tepelných parametrů kalcia-silikátu pomocí přístroje ISOMET 2104

## 4.2 Výsledky měření a diskuze

V následující kapitole jsou výsledky všech výše zmíněných vlastností měřených materiálů zpracovány do tabulek a grafů zjištěné na základě popsaných metod. Pro návaznost jsou naměřené výsledky okomentovány a porovnány u každé podkapitoly.

### 4.2.1 Základní fyzikální vlastnosti

Pomocí gravitační metody byla zjištěna objemová hmotnost  $\rho_v$  slámy, ovčí vlny a konopí. Ostatní charakteristiky ovčí vlny, konopí a kalcia-silikátu byly získány pomocí vakuové saturace. Všechny vlastnosti byly měřeny vždy na třech vzorcích a byly vypočítány průměrné hodnoty, které jsou vidět v tabulce 6.

Tab. 6: Základní fyzikální vlastnosti vybraných tepelných izolací

Veličina/ materiál	Objemová hmotnost $\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota matrice $\rho_{mat}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Otevřená pórovitost $\psi_0$ [%]
Sláma - Ekopanel	362,47	-	-
Konopí	38,06	1036,73	96,33
Ovčí vlna	14,79	1155,74	98,80
Kalcium-silikát	264,49	2508,83	89,46

#### 4.2.1.1.1. Diskuze k výsledkům základních fyzikálních vlastností

U obou použitých metod je hodnota objemové hmotnosti pro stlačitelné materiály proměnná veličina v závislosti na míře stažení, proto mohou být výsledky u ovčí vlny a konopí nepřesné.

Z tabulky je patrné, že oba tyto materiály mají objemovou hmotnost velmi nízkou a oproti této hodnotě je v případě ovčí vlny hustotu matrice skoro 80krát větší, což je dáno velkou otevřenou pórovitostí, která dosahuje téměř 99 %. Naměřené hodnoty objemových hmotností se přibližně shodují s hodnotami deklarovanými výrobcem.

U slámy byla změřena pouze objemová hmotnost, a to  $\rho_v = 362,47 \text{ kg/m}^3$ . Tato hodnota je nižší, než objemová hmotnost zjištěná od výrobce Ekopanelů, který udává  $\rho_v = 379 \text{ kg/m}^3$ . To je způsobené uvolněním tlaku při rozřezání stavební desky na vzorky pro měření.

Objemová hmotnost slaměných desek od českého výrobce se oproti zahraničním výrobcům, kteří udávají hodnotu v rozmezí  $\rho_v = 90 - 180 \text{ kg/m}^3$ , značně liší. Je to dáno technologií výroby, respektive tlakem při lisování. Tato veličina ovlivňuje pórovitost (mezerovitost), která nebyla naměřena, ale vzhledem k míře stlačení se v celistvé desce předpokládá nízká hodnota, a tím ovlivňuje také kromě dalších vlastností i součinitel tepelné vodivosti a schopnost akumulace.

Ostatní měřené veličiny u slámy nebylo možné s přesností stanovit, protože sláma v přímém kontaktu s kapalnou vodou značně změnila svůj objem a tím i ostatní vlastnosti (viz obr. 35).

Naměřená pórovitost na vzorcích kalcium-silikátu odpovídá hodnotě výrobce, objemová hmotnost byla naměřena mírně vyšší.

Tyto měřené vlastnosti prokazatelně ovlivňují ostatní materiálové parametry, což bude patrné i z dalších naměřených výsledků.

#### 4.2.2 Vlhkostní vlastnosti

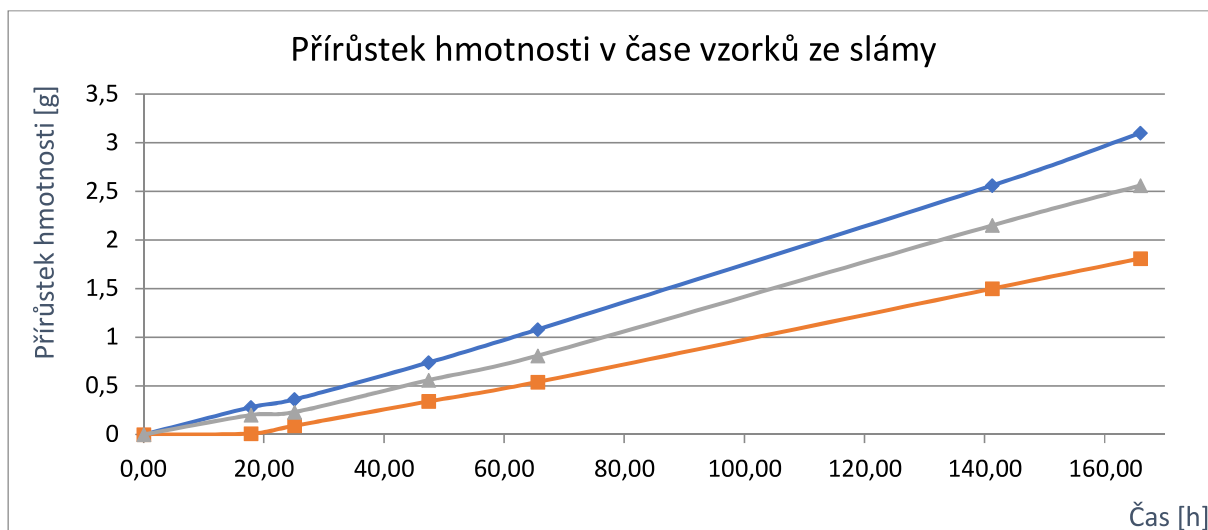
Z vlhkostních parametrů byl u vybraných vzorků měřen transport vodní páry a transport kapalně vody.

##### 4.2.2.1 Transport vodní páry

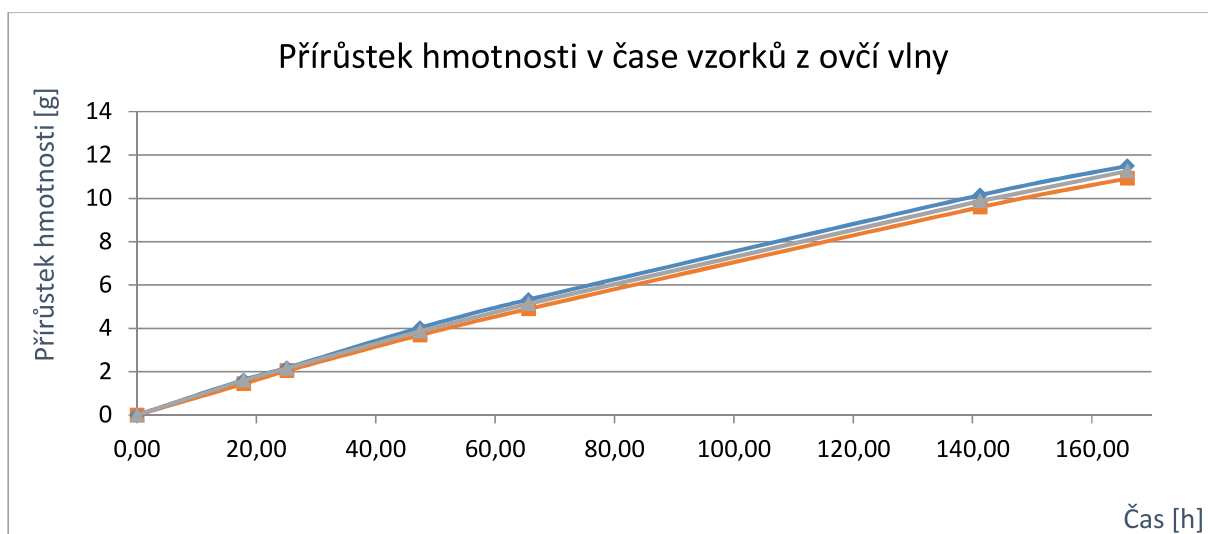
Transportní veličiny pro vodní páru byly miskovou metodou DRY-CUP i WET-CUP stanoveny vždy na 3 vzorcích všech vybraných tepelných izolací. Vzorky z Ekopanelu byly tímto způsobem měřeny v celku - slisovaná sláma s ochrannou papírovou lepenkou a navíc byly měřeny jednotlivé vrstvy samostatně – samotná slisovaná sláma a zvlášť ochranná lepenka. Všechny naměřené výsledky jsou srovnány v tabulce 7. Na následujících grafech je vidět, jak v čase stoupala/klesala hmotnost vzorků z Ekopanelu (tzn, i s ochrannou lepenkou) v porovnání s ovčí vlnou. Průběhy změny hmotnosti v čase konopí a kalcia-silikátu nejsou v této práci s ohledem na rozsah zobrazeny.

*Tab. 7: Parametry transportu vodní páry difúzí zjištěné metodou DRY CUP a WET CUP u vybraných tepelných izolací*

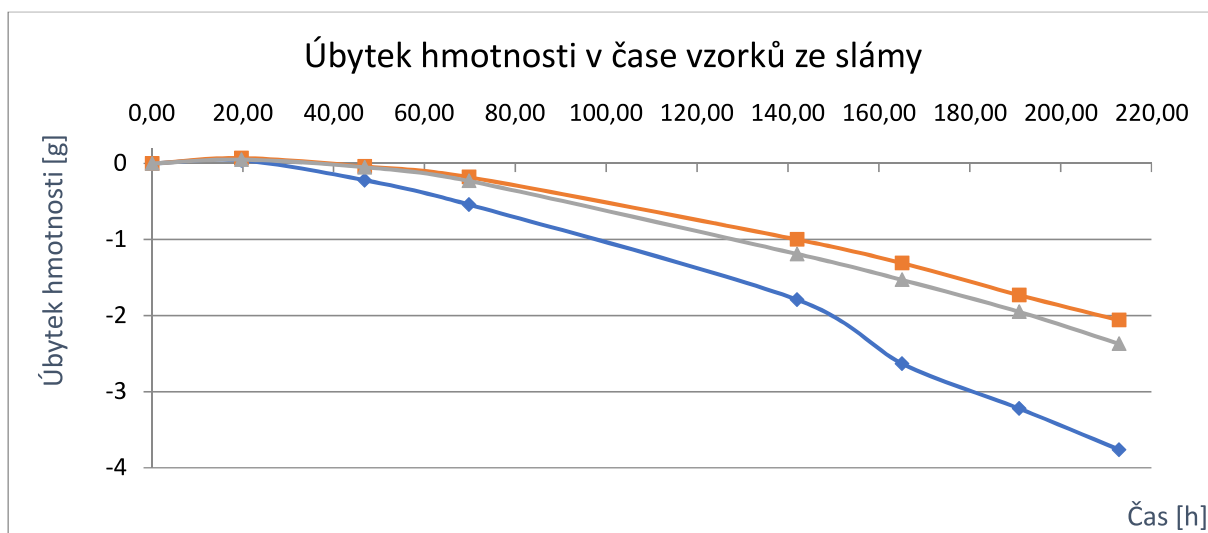
Veličina/ materiál		DRY-CUP			WET-CUP		
		$\delta$ [s]	D [m <sup>2</sup> /s]	$\mu$ [-]	$\delta$ [s]	D [m <sup>2</sup> /s]	$\mu$ [-]
Sláma	Ekopanel	$1,540 \cdot 10^{-11}$	$2,118 \cdot 10^{-6}$	10,68	$1,022 \cdot 10^{-11}$	$1,405 \cdot 10^{-6}$	36,44
	Sláma samostatně	$4,663 \cdot 10^{-11}$	$6,414 \cdot 10^{-6}$	4,01	$3,176 \cdot 10^{-11}$	$4,369 \cdot 10^{-6}$	16,72
	Ochranná lepenka	$1,755 \cdot 10^{-12}$	$2,414 \cdot 10^{-7}$	99,74	$2,336 \cdot 10^{-12}$	$3,214 \cdot 10^{-7}$	72,46
Konopí		$1,300 \cdot 10^{-10}$	$1,430 \cdot 10^{-5}$	1,80	$1,140 \cdot 10^{-10}$	$1,700 \cdot 10^{-5}$	1,40
Ovčí vlna		$4,900 \cdot 10^{-11}$	$6,741 \cdot 10^{-6}$	3,43	$6,068 \cdot 10^{-11}$	$8,348 \cdot 10^{-6}$	2,79
Kalcium-silikát		$6,159 \cdot 10^{-11}$	$8,473 \cdot 10^{-6}$	2,83	$7,247 \cdot 10^{-11}$	$9,97 \cdot 10^{-6}$	2,36



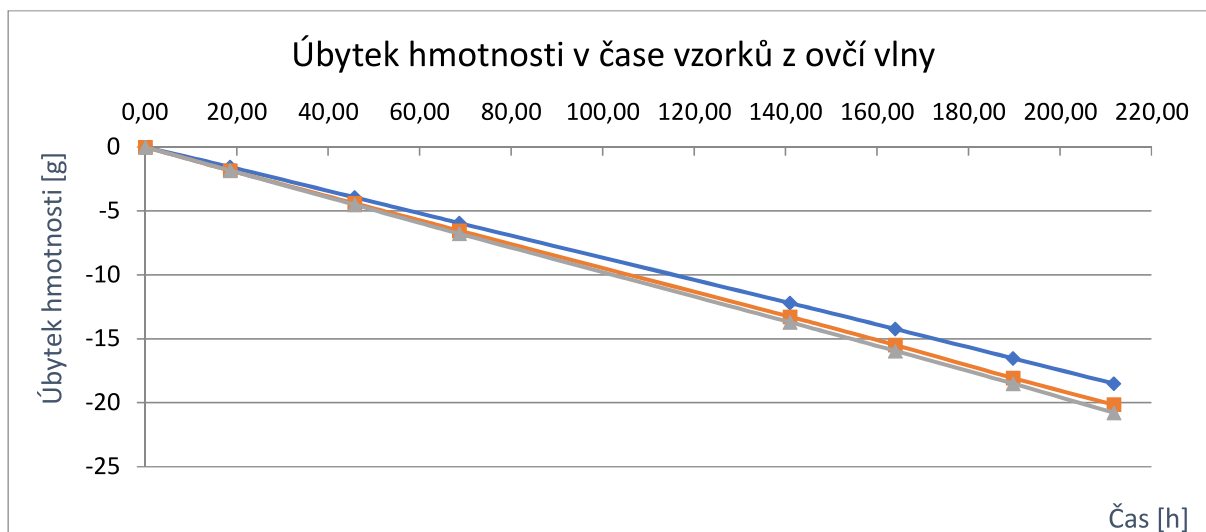
Obr. 21: Přírůstek hmotnosti v čase vzorků Ekopanelu zjištěný metodou DRY-CUP



Obr. 22: Přírůstek hmotnosti v čase vzorků z ovčí vlny zjištěný metodou DRY-CUP



Obr. 23: Úbytek hmotnosti v čase vzorků ze slámy zjištěný metodou WET-CUP



Obr. 24: Úbytek hmotnosti v čase vzorků z ovčí vlny zjištěný metodou WET CUP

#### 4.2.2.1.1. Diskuze k výsledkům transportu vodní páry

Z hlediska kondenzace v konstrukci je nutné, aby tok par v konstrukci byl co nejmenší – z tohoto důvodu je doporučeno, jak už bylo zmíněno u zateplení obvodových stěn, navrhovat vrstvy skladby konstrukce s klesajícím difúzním odporem směrem ven od interiéru, tzn. na vnitřní povrchy stěn použít vrstvu s velkým difúzním odporem, zatímco vnější strana obvodového pláště by měla být nejvíce difúzně otevřená. [38]

Dle zjištěných výsledků vykazuje nejmenší difúzní odpor konopí a následně kalcium-silikát, který je ale oproti ostatním měřeným materiálům velmi citlivý na vedení kapalné vlhkosti (viz obr. 29), a proto se nehodí na zateplení fasád z vnější strany.

Ovčí vlna má rovněž velmi nízký difúzní odpor, díky čemuž se, stejně jako konopí, hodí do difúzně otevřených konstrukcí, které se často uplatňují u dřevostaveb.

U všech těchto materiálů byla naměřená vysoká otevřená pórovitost, která ovlivňuje mimo jiné právě schopnost materiálu vést vodní páru, což výsledky dokazují.

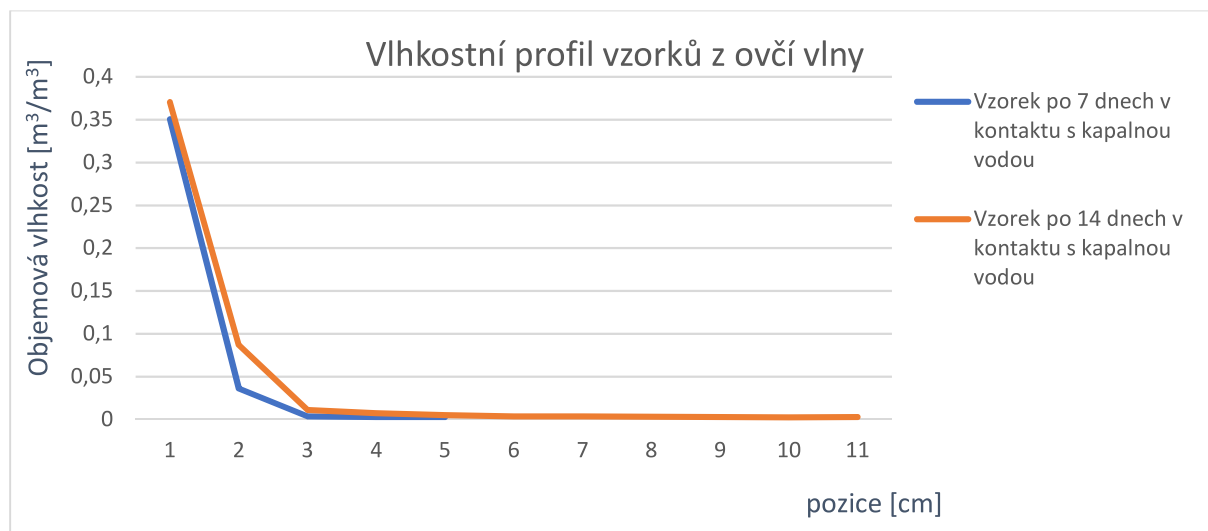
Sláma měřená samostatně vykazuje také poměrně nízký difúzní odpor, ale kvůli její senzitivě na kontakt s kapalnou vodou musí být chráněná. V tomto případě je ochrannou vrstvou papírová, podle výsledků evidentně impregnovaná lepenka, která vede v případě metody DRY-CUP vodní páru téměř 100krát pomaleji, než vzduch, což značně ovlivňuje hodnoty panelu. Na grafech je ale patrné, že výsledky jednotlivých vzorků z Ekopanelu jsou, oproti výsledkům vzorků z ovčí vlny (i vzorků z kalcia-silikátu a konopí), značně rozdílné. Je to dáno nerovnoměrným uspořádáním stébel ve vzorku, což je do značné míry způsobeno rozřezáním panelu na vzorky pro měření a následným uvolněním tlaku, ale také kvalitou slisování.

#### 4.2.2.2 Transport kapalné vody

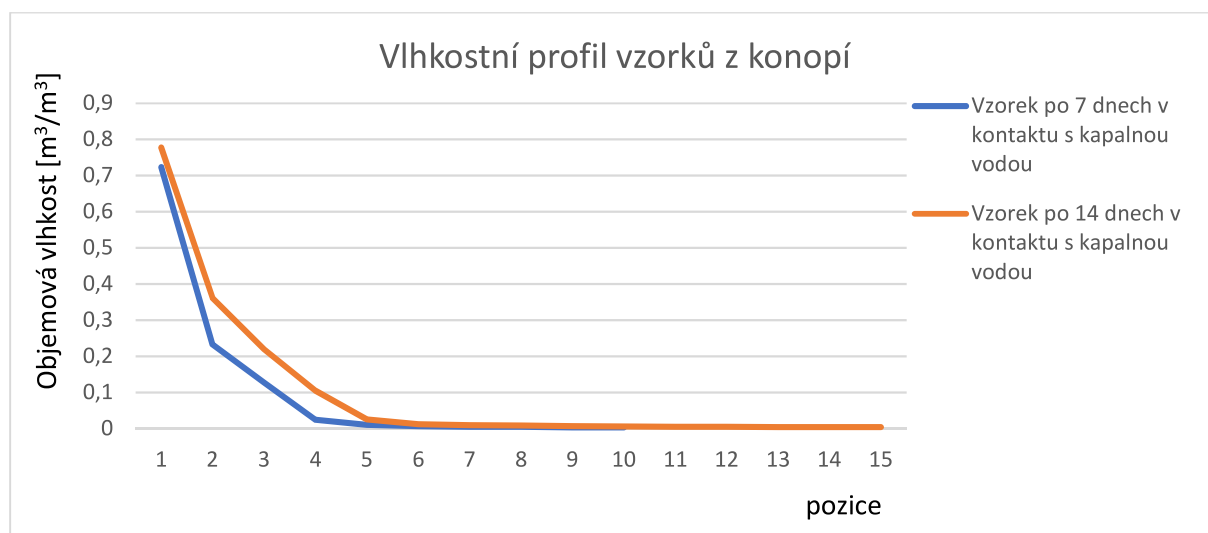
Transportní veličiny kapalné vody byly stanoveny na vzorcích všech vybraných tepelných izolací dvěma metodami.

##### Součinitel vlhkostní vodivosti v závislosti na vlhkosti

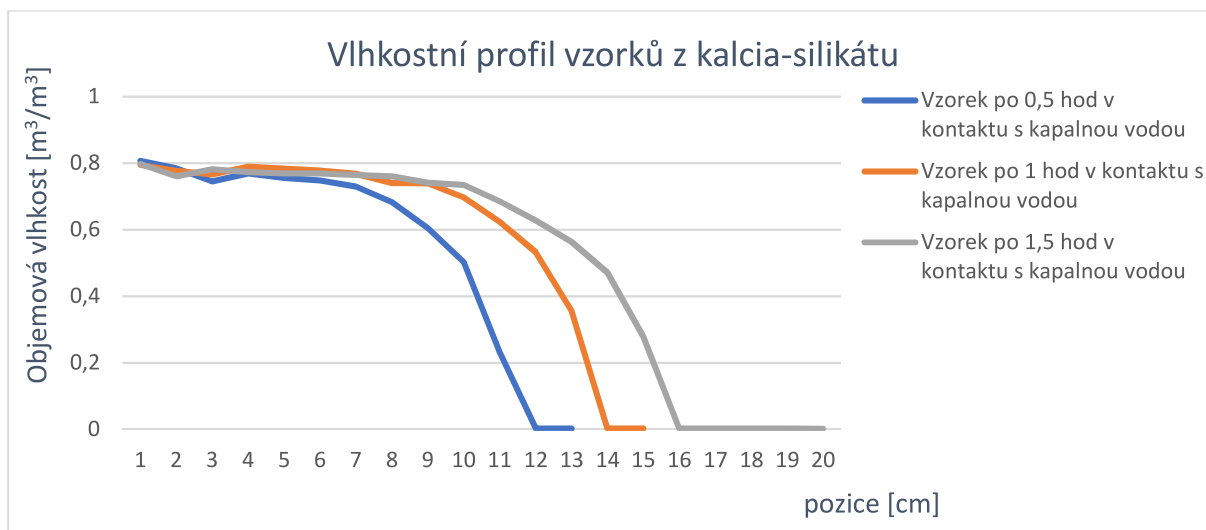
Součinitel vlhkostní vodivosti byl stanoven z vlhkostních profilů. U vzorků ze slámy nebylo tento součinitel opět možné s přesností naměřit, proto byly hodnoty zpracovány pouze u vzorků z ovčí vlny, konopí a kalcia-silikátu na dvou nebo třech vzorcích. Následující grafy (Obr. 26 – 28) znázorňují množství vlhkosti ve vzorcích v závislosti na čase, ve kterém byly v kontaktu s kapalnou vodou.



Obr. 25: Vlhkostní profil vzorků z ovčí vlny

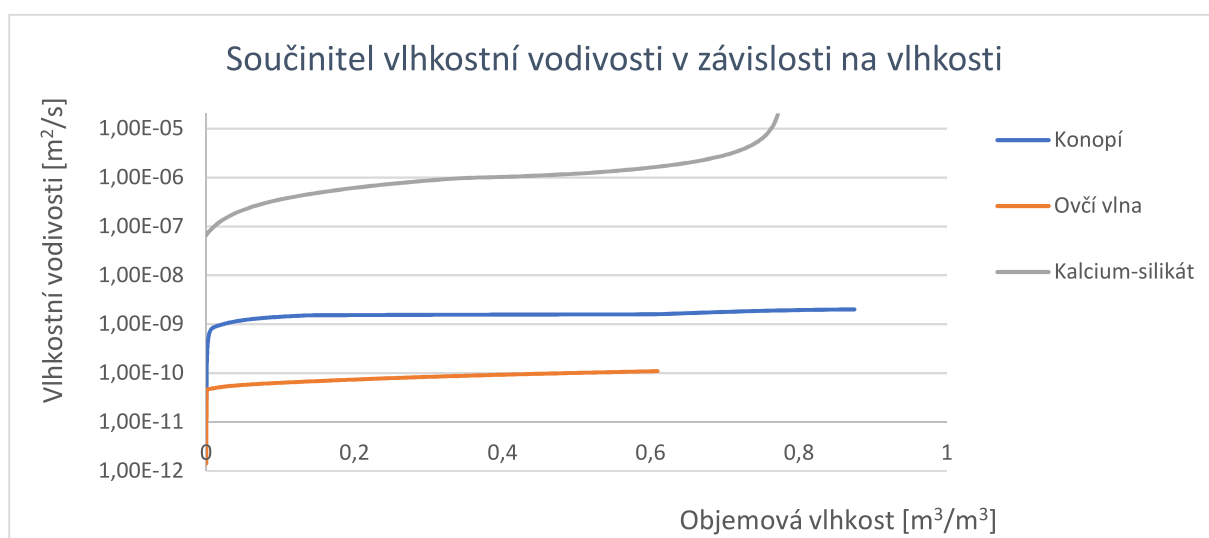


Obr. 26: Vlhkostní profil vzorků z konopí



Obr. 27: Vlhkostní profil vzorků z kalcia-silikátu

Graf (Obr. 29) byl získán z hodnot spočítaných pomocí programu K-Spline 1.1 a porovnává vedení kapalné vlhkosti jednotlivých materiálů – ovčí vlny, konopí a kalcia-silikátu.

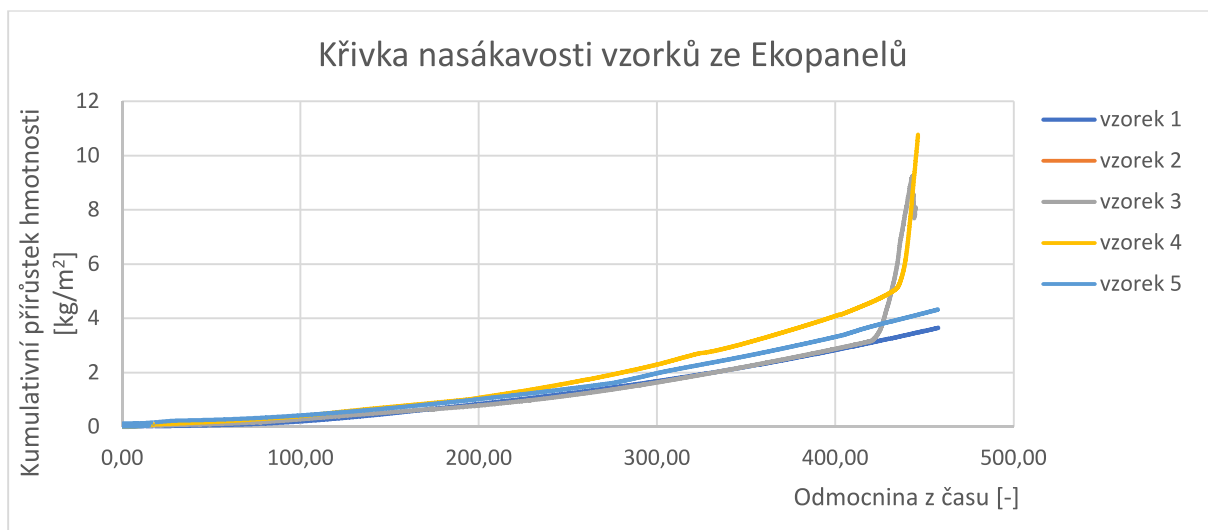


Obr. 28: Součinitel vlhkostní vodivosti v závislosti na vlhkosti vzorků z ovčí vlny, konopí a kalcia-silikátu

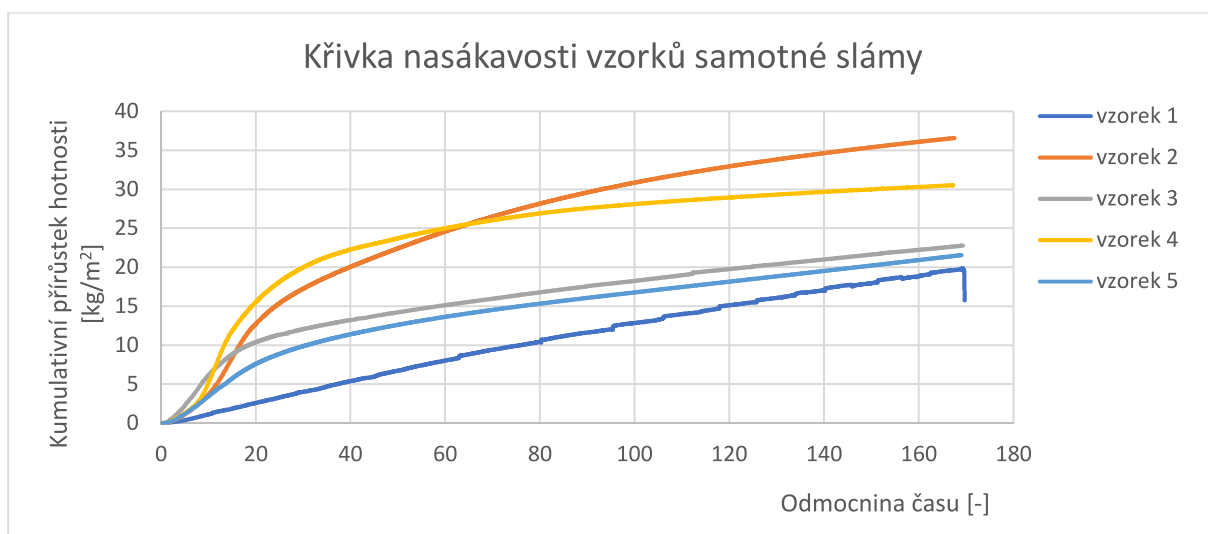
### Absorpční koeficient vody

Křivka nasákavosti a následně absorpční koeficient vody byly stanoveny vždy na 5 vzorcích všech vybraných tepelných izolací. Vzorky z Ekopanelu byly měřeny v celku - slisovaná sláma s ochrannou papírovou lepenkou a samotná slisovaná sláma.

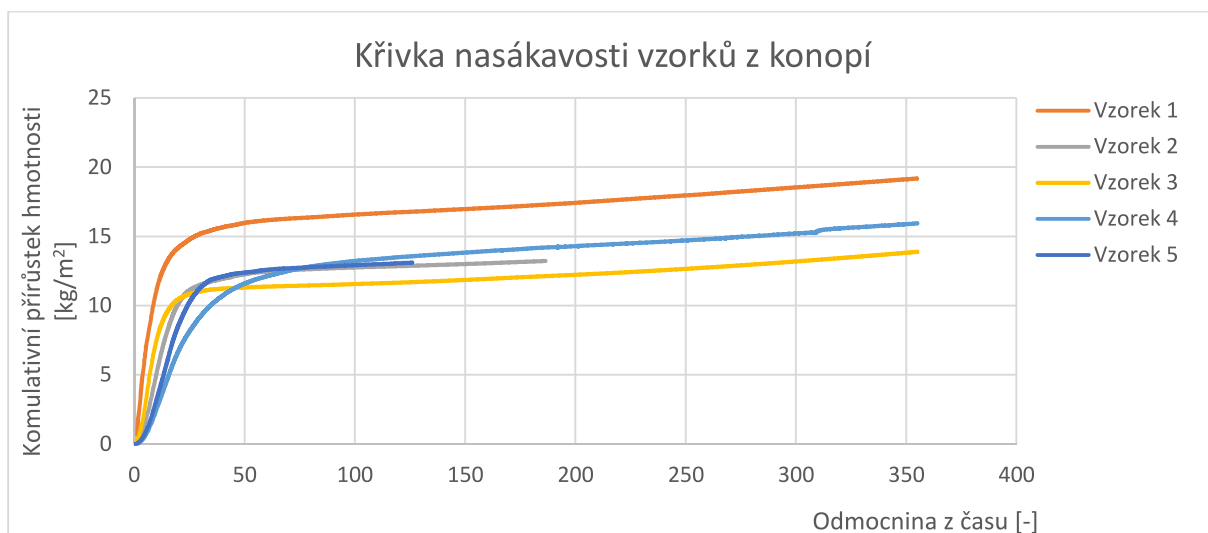
Následující grafy zobrazují křivku nasákavosti jednotlivých vzorků tepelných izolací.



Obr. 29: Křivka nasákavosti vzorků ze slámy s ochrannou papírovou lepenkou

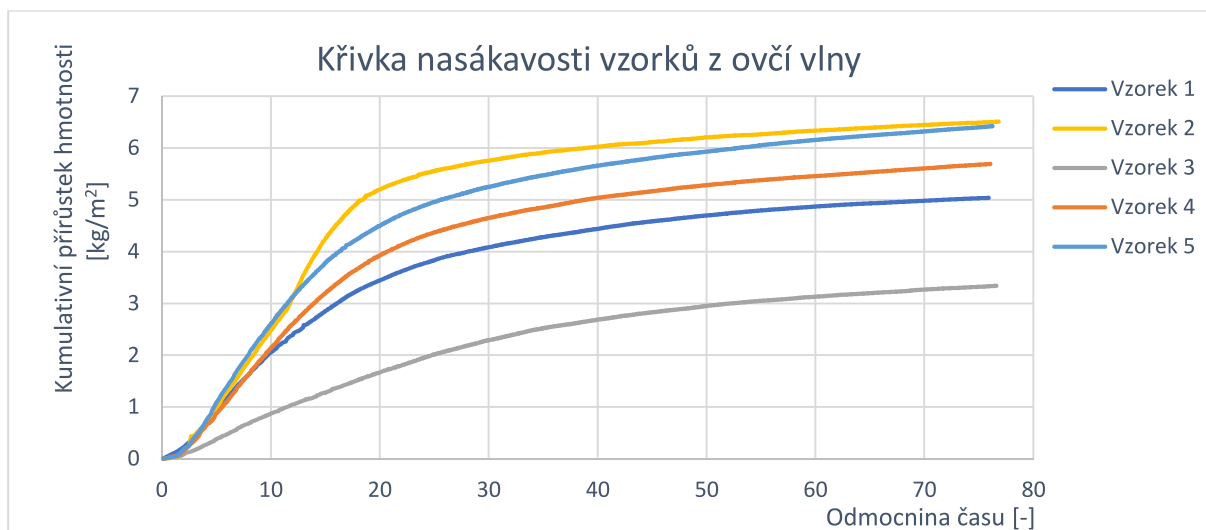


Obr. 30: Křivka nasákavosti vzorků ze slámy bez papírové lepenky

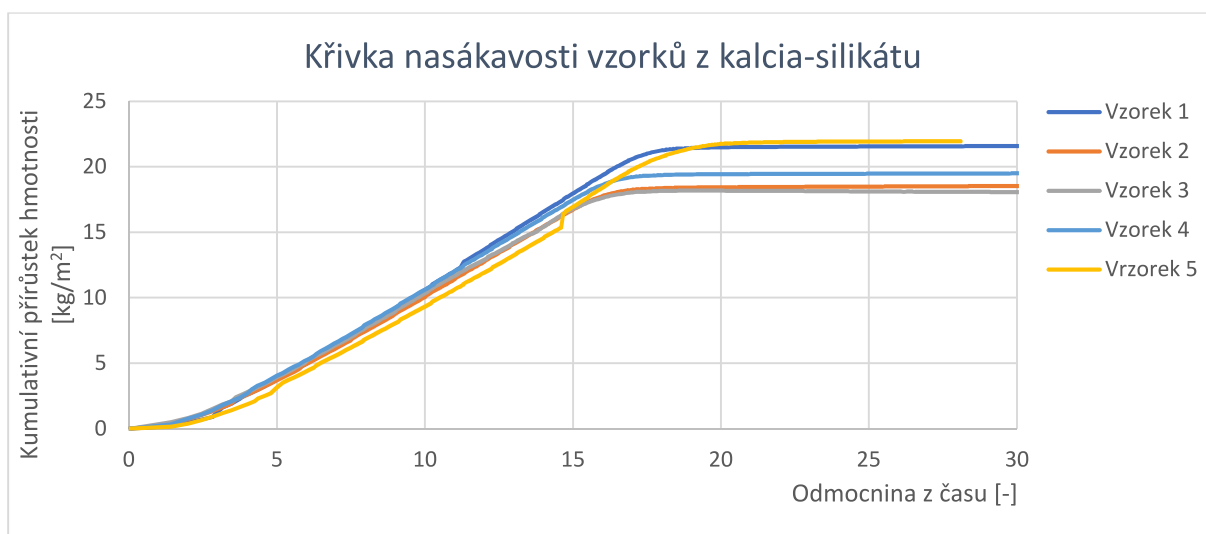


Obr. 31: Křivka nasákavosti vzorků z konopí





Obr. 32: Křivka nasákavosti vzorků z konopí



Obr. 33: Křivka nasákavosti vzorků z kalcia-silikátu

V tabulce 8 jsou srovnány absorpční koeficienty vody A a hodnoty spolehlivosti R vzorků všech měřených tepelných izolací.

Tab. 8: Absorpční koeficienty a hodnoty spolehlivosti vzorků vybraných tepelných izolací

OZN.	Absorpční koeficient vody A [kg/(m <sup>2</sup> ·√s)]	Hodnota spolehlivosti R
<b>Sláma - Ekopanel - A<sub>1</sub></b>		
1	0,0098	R <sup>2</sup> = 0,9729
2	0,0075	R <sup>2</sup> = 0,9294
3	0,0106	R <sup>2</sup> = 0,9585
4	0,0089	R <sup>2</sup> =0,9596
5	0,0136	R <sup>2</sup> = 0,948

<b>Sláma bez ochranné lepenky- A<sub>1</sub></b>		
<b>1</b>	0,113	R <sup>2</sup> = 0,9942
<b>2</b>	0,1442	R <sup>2</sup> = 0,8994
<b>3</b>	0,0882	R <sup>2</sup> = 0,9375
<b>4</b>	0,0805	R <sup>2</sup> =0,7344
<b>5</b>	0,0841	R <sup>2</sup> = 0,951
<b>Konopí – A<sub>1</sub></b>		
<b>1</b>	0,5685	R <sup>2</sup> = 0,8882
<b>2</b>	0,592	R <sup>2</sup> = 0,9896
<b>3</b>	0,5186	R <sup>2</sup> = 0,9098
<b>4</b>	0,4062	R <sup>2</sup> =0,9918
<b>5</b>	0,5216	R <sup>2</sup> =0,9909
<b>Konopí - A<sub>2</sub></b>		
<b>1</b>	0,0101	R <sup>2</sup> = 0,9945
<b>2</b>	0,0059	R <sup>2</sup> = 0,9775
<b>3</b>	0,0085	R <sup>2</sup> = 0,9783
<b>4</b>	0,011	R <sup>2</sup> = 0,9666
<b>5</b>	0,0085	R <sup>2</sup> = 0,9655
<b>Ovčí vlna - A<sub>1</sub></b>		
<b>1</b>	0,1653	R <sup>2</sup> = 0,9771
<b>2</b>	0,2916	R <sup>2</sup> = 0,9861
<b>4</b>	0,2056	R <sup>2</sup> = 0,9856
<b>5</b>	0,2239	R <sup>2</sup> =0,9689
<b>Ovčí vlna - A<sub>2</sub></b>		
<b>1</b>	0,0237	R <sup>2</sup> = 0,9101
<b>2</b>	0,0259	R <sup>2</sup> = 0,9089
<b>4</b>	0,0281	R <sup>2</sup> = 0,9313
<b>5</b>	0,0185	R <sup>2</sup> = 0,9052
<b>Kalcium-silikát - A<sub>1</sub></b>		
<b>1</b>	1,3527	R <sup>2</sup> = 0,9902
<b>2</b>	1,2605	R <sup>2</sup> = 0,9925
<b>3</b>	1,3831	R <sup>2</sup> = 0,9968
<b>4</b>	1,2079	R <sup>2</sup> =0,9911
<b>5</b>	1,0767	R <sup>2</sup> = 0,9652

#### 4.2.2.2.1. Diskuze k výsledkům transportu kapalné vody

Z grafu (Obr. 29) je patrné, že z měřených materiálů nejnáze probíhá transport kapalné vody ve vzorcích kalcia-silikátu, a to oproti vzorkům z ovčí vlny přibližně 10 000krát.

Rychlost nasáknutí kapalné vody je vidět i z vlhkostních profilů - během již půl hodiny, kdy byly vzorky v kontaktu s kapalnou vodou, se kapalná voda dostala kapilárními silami do výšky

11 cm nad čáru ponoru a ve výšce 10 cm byl po rozřezání ve vzorku zjištěn stupeň nasycení více než 55%.

Kdežto u vzorků z ovčí vlny se i po 14 dnech kapalná voda dostala kapilárami téměř jen lehce nad výšku čáry ponoru. Po rozstříhání vzorku byla ve výšce 2 cm zjištěna objemová vlhkost pouze 23% z objemové vlhkosti ve výšce 1 cm.

Z grafů křivek nasákavosti je evidentní rozdílný průběh vlhkosti v čase jednotlivých materiálů. U vzorků z Ekopanelů je průběh křivky výrazně odlišný, protože nejdříve odolává působení kapalné vody impregnovaná lepenka. Po promočení této ochranné vrstvy a vniknutí kapalné vody ke slámě je zřejmý náhlý kumulativní přírůstek hmotnosti, protože samotná sláma absorpuje kapalnou vodu velice rychle, což je dobře vidět z grafu samotné slámy bez ochranné lepenky. Výsledky jsou ale zatíženy velkou chybou – jednotlivé vzorky vykazují velmi rozdílné výsledné hodnoty, stejně jako u většiny výsledků měřených na vzorcích ze slámy, kvůli uvolnění tlaku způsobené rozřezáním panelu. Na obrázku č. 35 je vidět značná objemová změna vzorku, který při tomto experimentu přišel celý do kontaktu s vodou. Dokazuje to nutnost chránit slámu před působením vlhkosti. Síla při nabytí objemu roztrhala dvojsložkový silikonový kaučuk, kterým byl vzorek z bočních stran zaizolovaný.



Obr. 34: Vzorky z Ekopanelu – vzorek A<sub>12</sub> po kontaktu s kapalnou vodou

U kalcia-silikátu byl oproti všem ostatním materiálům transport kapalné vody podle předpokladů opět velmi rychlý. Téměř úplné nasáknutí vzorků o tloušťce 25 mm vodou proběhlo během 4 – 6 minut.

U vzorků z ovčí vlny a konopí jsou zřetelně vidět dvě fáze vedení kapalné vody, a to vedení do výškové úrovně čáry ponoru a následně nad tuto úroveň.

V první fázi se voda do vzorku dostala velice snadno, protože materiál byl do vody ponořen a ponořená část vzorku nekladla téměř žádný odpor proti vniknutí vody - do této doby se voda dostává do vzorku pod tlakem. Tato fáze trvala u obou materiálů přibližně 5 minut. Jakmile jsou tlaky vyrovnány, kapilární síly vedou vodu nad čáru ponoru. Proto jsou v tabulce 8 u vzorků z konopí a ovčí vlny zaznamenány hodnoty absorpčního koeficientu  $A_1$  a  $A_2$  a jim odpovídající hodnoty spolehlivosti  $R$ .

Tento experiment je značně ovlivněn počátečními podmínkami, mírou ponoření apod.

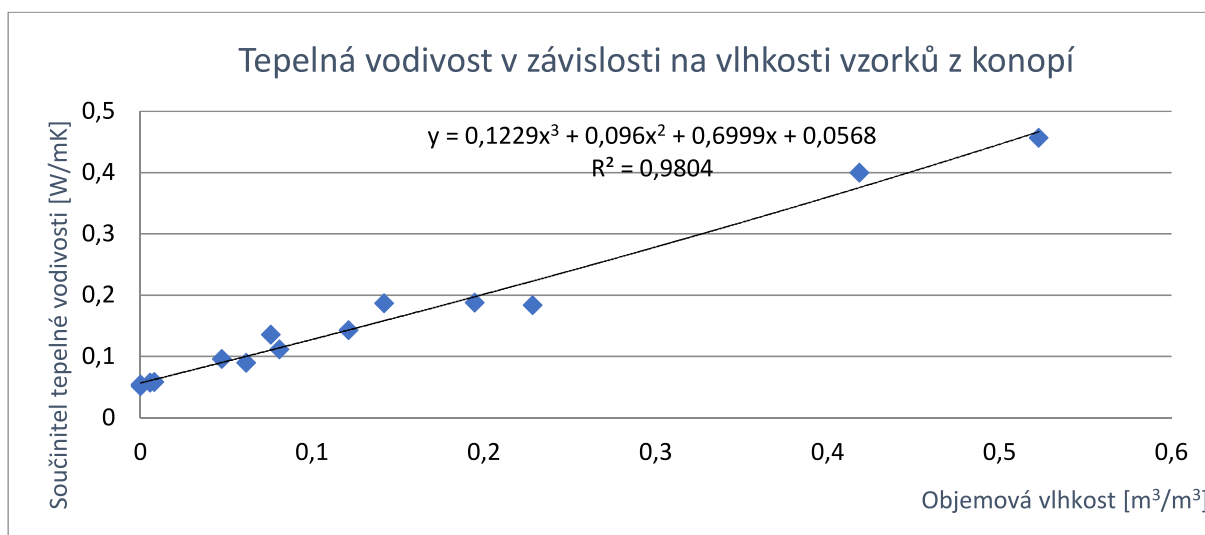
#### 4.2.3 Tepelné vlastnosti

Pomocí přístroje ISOMET 2104 byly změřeny hodnoty měrné tepelné kapacity a tepelné a teplotní vodivosti. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9. Grafy znázorňují schopnost vzorků z konopí a kalcia-silikátu vést teplo v závislosti na vlhkosti.

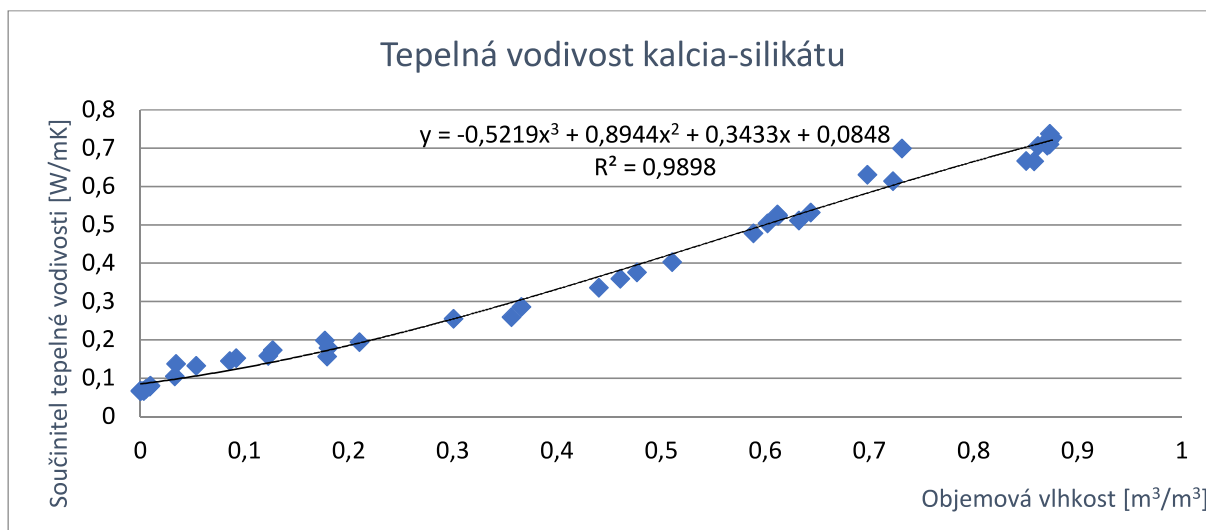
Tab. 9: Tepelné vlastnosti vysušených vzorků vybraných tepelných izolací

Veličina/ materiál	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W/(m·K)]	Měrná tepelná kapacita $c$ [J/kg·K]	Součinitel teplotní vodivosti $a$ [m <sup>2</sup> /s]
Sláma	0,10800	1800-2100*	$0,20867 \cdot 10^{-6}$
Konopí	0,05450	1600*	$0,381 \cdot 10^{-6}$
Ovčí vlna	0,04213	1700*	$0,45967 \cdot 10^{-6}$
Kalcium-silikát	0,06730	972	$0,261 \cdot 10^{-6}$

\*převzaté hodnoty



Obr. 35: Tepelná vodivost v závislosti na vlhkosti vzorků z konopí



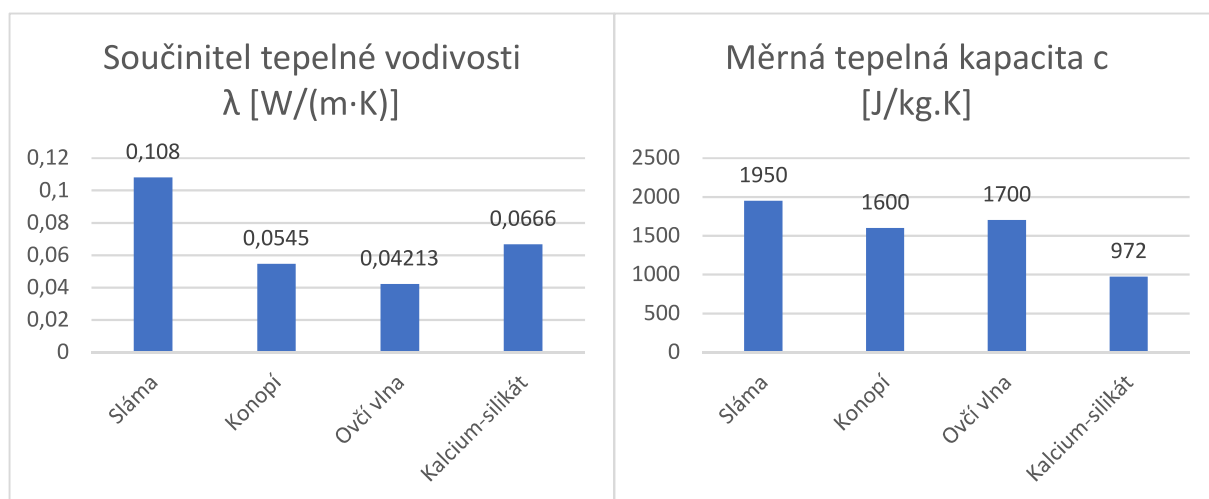
Obr. 36: Tepelná vodivost kalcia-silikátu v závislosti na vlhkosti

#### 4.2.3.1.1. Diskuze k výsledkům tepelných vlastností

Naměřené výsledky měrné tepelné kapacity přírodních materiálů přístrojem ISOMET 2104 a 2114 se výrazně lišily od očekávaných hodnot a nebylo je možné touto metodou správně stanovit, proto jsou v tabulce tyto hodnoty převzaty. Hodnoty ovčí vlny a konopí jsou uvedeny podle prof. Ing. Josefa Chybíka, CSc. [17] V případě Ekopanelů probíhá v současné době přezkoušení produktu výrobcem a pro účely této práce byly poskytnuty prozatimní výsledky.

Podle naměřených a převzatých hodnot, které jsou porovnané v následujícím grafu, nejlépe z měřených materiálů izoluje ovčí vlna a nejhůře sláma, která má ale díky velké objemové hmotnosti oproti ostatním měřeným materiálům velmi vysokou schopnost akumulace tepla.

Akumulační schopnost je u tepelných izolací z lisované slámy nejpodstatnější výhodou a je vhodné využít jí především u dřevostaveb v kombinaci s dřevovláknitými deskami, nebo jinou přírodní tepelnou izolací.



Obr. 37: Porovnání průměrných hodnot tepelných vlastností měřených materiálů

Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti jsou u všech měřených materiálů mírně horší, než hodnoty udávané výrobcí (viz tab. 10)

U vzorků z ovčí vlny a ze slaměných Ekopanelů nebylo možné tepelné parametry měřit v závislosti na vlhkosti, protože se při ponoření pod vodu pro plné nasycení vodou značně zdeformovaly. Tento stav v konstrukci nikdy nesmí nastat, a je proto nutné je chránit.

U grafů (obr. 36 a 37) je vidět, jak velký vliv má vlhkost na izolační schopnost materiálů. Konopí nasycené vede teplo více než 8krát lépe, než v suchém stavu, tzn. 8x hůře izoluje. Průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti  $\lambda = 0,0545 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  se vlivem vody ve vzorku změnila na hodnotu  $\lambda = 0,457 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

V případě kalcia-silikátu se průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti dokonce změnila z  $\lambda = 0,0673 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  u suchého vzorku na  $\lambda = 0,7277 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  u vzorku nasyceného vodou, z čehož vyplývá, že voda nasycená v tepelné izolaci z kalcia-silikátu téměř 11krát zhoršuje tepelně izolační schopnosti.

### 4.3 Souhrn

Výběr vhodného materiálu pro zeteplení konstrukcí je velmi individuální záležitost nejen z hlediska vlastností jednotlivých vrstev konstrukce, ale především z hlediska požadavků investora.

Lze udělat vícekritériální optimalizaci vhodného materiálu – například minimalizaci primárních nákladů, maximalizaci životnosti stavby, maximalizaci tepelných vlastností a úspory nákladů na vytápění apod. – podle preferencí investora.

Následuje výpis několika základních kritérií, ze kterých lze izolace posuzovat, a podle kterých je možné se při výběru rozhodovat.

- konstrukční hledisko (umístění v konstrukci, typ a materiál izolované konstrukce apod.)
- hledisko tepelně izolačních vlastností materiálu a úspory energie
- hledisko dalších vlastností materiálu (odolnost vůči vlhkosti, povětrnostním a mechanickým vlivům, požáru apod.)
- ekologické hledisko a zdravotní nezávadnost
- finanční hledisko

Prvními čtyřmi kritérii se tato práce již zabývala. Při výběru konkrétního typu tepelné izolace je ale významným kritériem také cena. Je vhodné provést cenový průzkum trhu a porovnat

nabídku jednotlivých variant vhodných dle předchozích kritérií. Často nabízejí různí výrobci stejnou nebo materiálově stejnou tepelnou izolaci za rozdílnou cenu.

Následuje cenové porovnání konkrétních výrobků měřených v experimentální části práce. Cena je udána v korunách za metr čtvereční a 60 mm tloušťky u slámy, konopí a ovčí vlny. V případě kalcia-silikátu se tepelně izolační desky dodávají v tloušťce 50 mm. V tabulce je kromě ceny vidět rozdíl mezi výrobcem udávanou a naměřenou hodnotou součinitele tepelné vodivosti a hodnota součinitele prostupu tepla U samotné izolační vrstvy, která je vypočítána z dané tloušťky a z naměřeného součinitele tepelné vodivosti.

Podle této tabulky vychází nejlevněji tepelný izolant z konopí, který při tloušťce 60 mm stojí 174,00 Kč za metr čtvereční. Ceny uvedené v tabulce vychází ze současných cenových nabídek již zmíněných výrobců.

*Tab. 10: Cenové porovnání měřených tepelných izolací 1 m<sup>2</sup> při tloušťce 60 (50) mm*

<b>Materiál</b>	<b>Konkrétní produkt</b>	<b>Výrobcem udávaný součinitel tepelné vodivosti <math>\lambda</math> [W/(m·K)]</b>	<b>Naměřený součinitel tepelné vodivosti <math>\lambda</math> [W/(m·K)]</b>	<b>Tloušťka [mm]</b>	<b>Součinitel prostupu tepla U [W/(m<sup>2</sup>·K)]</b>	<b>Cena [Kč/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Sláma</b>	Ekopanel	0,1020	0,1080	60	1,800	338,00
<b>Konopí</b>	TERMO - KONOPI PREMIUM	0,0400	0,0545	60	0,908	174,00
<b>Ovčí vlna</b>	SOLENA Block	0,0420	0,04213	60	0,702	244,23
<b>Kalcium-silikát</b>	CALSITHERM KLIMAPLATTE	0,0600	0,0666	50	1,332	1305,74

## 5 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vyhodnocení vlastností a chování čtyř různých tepelných izolací. Pro přehled o materiálech a o jejich chování pro využití ve stavebnictví byla nastudována legislativa, literatura týkající se dané problematiky a nabídka výrobců a dle získaných informací byl zpracován průzkum tepelných izolací dostupných na trhu. Dále byly popsány některé tepelné izolace, jejich vlastnosti a použití v typických stavebních konstrukcích.

Práce se zaměřila především na přírodní tepelné izolace a byla řešena také problematika energetické bilance tepelně izolačních materiálů a celkově energetická náročnost budov. Podstatná část práce se věnovala spotřebě primární energie, produkci emisí CO<sub>2</sub> a celkově míře vlivu produktů na kvalitu životního prostředí.

V rámci experimentální části byly vybrány tři přírodní tepelné izolace – slaměné panely, ovčí vlna a konopí a jeden zástupce syntetických tepelně izolačních materiálů – kalcium-silikát. Tyto tepelně izolační materiály byly taktéž popsány a byly zjištěny hodnoty charakterizující jejich vlastnosti dle dostupných informací od výrobců a následně na nich byly naměřeny skutečné základní fyzikální vlastnosti, tepelné a vlhkostní parametry, čímž byl splněn hlavní cíl práce.

Kromě vlastností udávaných výrobcí byly měřeny i další parametry. Jedná se zejména o jedno z nejsledovanějších kritérií u tepelných izolací – schopnost vést teplo, respektive schopnost zamezit vedení tepla, což charakterizuje součinitel tepelné vodivosti. Jeho hodnotu výrobci udávají pouze u výrobků v suchém stavu, ale tato hodnota je velmi závislá na vlhkosti, což bylo při měření v této práci zohledněno.

Měření bylo umožněno provádět v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze na Katedře materiálového inženýrství a chemie a byly poskytnuty vzorky tepelných izolací z ovčí vlny, konopí a kalcia-silikátu. Od firmy EKOPANELY SERVIS s.r.o. byla pro účely práce získána stavební deska z lisované slámy.

Na vzorcích uvedených tepelných izolací byly měřeny základní fyzikální vlastnosti vakuovou saturací a gravitační metodou, transport vodní páry byl zjišťován miskovou metodou bez teplotního spádu, transport kapalné vody byl stanoven dvěma metodami a byl tak zjištěn vlhkostní součinitel v závislosti na vlhkosti a absorpční koeficient vody a tepelné parametry byly měřeny v závislosti na vlhkosti pomocí přístroje ISOMET 2104. Veškeré použité postupy experimentálních metod byly v práci popsány a výsledky měření jsou uvedeny v tabulkách a zpracovány v grafech.



Naměřené hodnoty v této práci budou dále použity katedrou jako vstupní parametry pro počítačové simulace, které se mohou dále využít v praxi.

Závěrem této práce je, že přírodní materiály dosahují svými vlastnostmi kvalit syntetických materiálů a mají oproti nim mnoho nesporných výhod. Především jsou to obnovitelné zdroje surovin a mnohem méně zatěžují životní prostředí během výroby, zpracování i likvidace materiálu a přispívají tak k trvale udržitelnému rozvoji. Dále mají pozitivní vliv na lidské vjemy a zdraví a při použití v konstrukcích vytvářejí příjemné mikroklima.

Z těchto a dalších důvodů je vhodné a jistě i důležité, aby se přírodní obnovitelné zdroje čím dál více využívaly pro získávání energie, výrobu nejrůznějších produktů apod. a dostávaly se do podvědomí lidí nejen jako alternativní zdroj surovin.

## 6 Citace

- [1] Zvyšování energetických standardů budov. *Vše, co potřebujete vědět o nových průkazech energetické náročnosti: Informační web pro majitele nemovitostí shrnující požadavky vyplývající z novely zákona o hospodaření energií* [online]. Praha: Šance pro budovy, 2012 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.prukaznadum.cz/novostavby>
- [2] *UCEEB: UNIVERZITNÍ CENTRUM ENERGETICKY EFEKTIVNÍCH BUDOV* [online]. Buštěhrad: UCEEB, ČVUT v Praze, 2014 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.uceeb.cz/>
- [3] KOVERDYNSKÝ, PH.D., Ing. Vít. Technické izolace detailně (II): potenciál úspor energií v oblasti technických izolací. *TZB-info* [online]. Praha: ČTK, 2016, **2016**, 2 [cit. 2017-04-01]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/izolace/13828-technicke-izolace-detailne-ii-potencial-uspor-energie-v-oblasti-technickyh-izolaci>
- [4] 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.
- [5] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Nahrazení předchozích norem. ČSN 73 0540-2 z dubna 2007. Praha: Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 56 s. ISC 91.120.10.
- [6] 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.
- [7] ČSN 73 0540-4. *Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody*. Nahrazení předchozích norem. ČSN 73 0540-4 z května 1994. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005, 60 s.
- [8] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon: Posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí). In: *Sbírka zákonů ČR*. Praha 6, 2001, ročník 2001, 40/2001, číslo 100. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-100#cast1>

- [9] ČSN EN ISO 13790. *Energetická náročnost budov - Výpočet spotřeby energie na vytápění a chlazení*. Česká verze evropské normy EN ISO 13790:2008. Nahrazení předchozích norem. ČSN EN ISO 13790 z listop. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 140 s.
- [10] ČSN EN ISO 10456. *Stavební materiály a výrobky - Tepelně vlhkostní vlastnosti - Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových tepelných hodnot*. Česká verze evropské normy EN ISO 10456:2007. Nahrazení předchozích norem. ČSN EN ISO 10456 z června. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 32 s.
- [11] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 78/2013 Sb.: Vyhláška o energetické náročnosti budov. In: *Sbírka zákonů ČR*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2013, Ročník 2013, 36/2013, číslo 78. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2013-78>
- [12] ČSN EN ISO 7345. *Tepelná izolace - Fyzikální veličiny a definice*. Česká verze evropské normy EN ISO 7345:1987. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1997, 16 s.
- [13] Energie a životní prostředí. *Vítejte na Zemi...: multimediální ročenka životního prostředí* [online]. Praha: CENIA, česká informační agentura životního prostředí, 2013 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=index&site=default>
- [14] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 318/2012 Sb.: kterým se mění zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra, 2012, ročník 2012, částka 117, číslo 318. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-318>
- [15] RŮŽIČKA, Jan. Stavební materiály na bázi obnovitelných zdrojů surovin. *Časopis Stavebnictví* [online]. 2008, **2007**(11-12), 7 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: [http://www.casopisstavebnictvi.cz/stavebni-materialy-na-bazi-obnovitelnych-zdroju-surovin\\_N498](http://www.casopisstavebnictvi.cz/stavebni-materialy-na-bazi-obnovitelnych-zdroju-surovin_N498)
- [16] Ochrana ovzduší. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2008-2015 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/cz/ovzdusi>

- [17] CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2009, 272 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [18] *World Bank Open Data: Free and open access to global development data* [online]. Washington, DC USA: The World Bank Group, b.r., 2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: [https://www.google.com/publicdata/explore?ds=d5bncppjof8f9\\_](https://www.google.com/publicdata/explore?ds=d5bncppjof8f9_)
- [19] CHYBÍK, Josef. *Dřevěné konstrukce a přírodní izolační materiály* [online]. 2010 [cit. 2017-03-26]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/6791-drevene-konstrukce-a-prirodni-izolacni-materialy>
- [20] HLAVSA, Tomáš. *Tepelné izolace z hlediska svázané primární energie* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta architektury, 2011, 23-29 s. [cit. 2017-05-01]. ISBN 978-80-214-4266-5. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/56667>
- [21] ČSN EN ISO 6946. *Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda*. Česká verze evropské normy EN ISO 6946:2007. Nahrazení předchozích norem ČSN EN ISO 6946 z května 20. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008, 28 s.
- [22] TYWONIAK, Jan. *Nízkoenergetické domy: Principy a příklady*. 1. Praha: Grada Publishing, 2007, 200 s. ISBN 80-247-1101-X.
- [23] SVOBODA, Zbyněk. *Teplo 2014 EDU: Freeware*. 2014.
- [24] KREJČÍK, Adam. *Přírodní izolace ve stavebnictví. Můj dům* [online]. Praha: Business Media CZ, 2014 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: [https://mujdum.dumabyt.cz/rubriky/stavba/prirodni-izolace-ve-stavebnictvi\\_238.html](https://mujdum.dumabyt.cz/rubriky/stavba/prirodni-izolace-ve-stavebnictvi_238.html)
- [25] WEGERER, Paul. Measuring the Hygrothermal Performance of an Interior Insulation Made of Woodfibre Boards. *Energy Procedia*. Elsevier, 2015, **2015**(78), 1478-1483. ISSN 1876-6102. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.173>
- [26] HAMERNÍK, Ivo. *Pasivní domy* [online]. 2016. Praha: Code Creator, 2016 [cit. 2017-05-01]. ISBN 978-80-88058-11-3. Dostupné z: <https://publi.cz/books/92/04.html>
- [27] ŠÍPKOVÁ, Veronika, Šárka KORBELOVÁ a Jiří LABUDEK. *Stavební tepelné izolace pro svislé konstrukce* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 2017-05-06]. ISBN 978-80-248-3661-4. Dostupné z: <http://mladivyzkumnici.cz/cz/>

- [28] ALTER, Lloyd. Put a cork in it: Natural renewable cork makes a comeback as home insulation. *TreeHugger: FINDING A GREENER FUTURE* [online]. 2013 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://www.treehugger.com/green-architecture/put-cork-it-natural-renewable-cork-makes-comeback-home-insulation.html>
- [29] DAŇKOVÁ, Dana Dalmatika a Jiří HEJHÁLEK. Tepelné izolace: přehled, materiály, druhy, způsoby použití. *Stavebnictví3000: Nejvíce informací o stavebnictví v ČR* [online]. VEGA, 2009 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/tepelne-izolace-prehled-materialy-druhy-zpusoby-po/>
- [30] MÁRTON, Jan. AKTUALITY: Zásady použití tepelných izolací. *Izolace-info: Informace o izolacích a zateplování* [online]. 2016 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.izolace-info.cz/aktuality/?nid=20876-zasady-pouziti-tepelnych-izolaci.html#.WQd6ZoiLREZ>
- [31] *REVITALIZACE PANELOVÝCH A BYTOVÝCH DOMŮ: Zateplení fasád* [online]. Ostrava: RSSTAVBY, 2009 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.rsstavby.cz/sluzby/zatepleni-fasad/>
- [32] *DEK STAVEBNINY: Extrudovaný polystyren fasádní* [online]. Praha: DEK, 2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://www.dek.cz/>
- [33] WEI, Gaosheng. Thermal conductivities study on silica aerogel and its composite insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier, 2011, **2011**(54), 2355–2366. ISSN 0017-9310. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.026>
- [34] MINKE, Gernot a Friedemann MAHLKE, Marta MYŠKOVÁ. *Stavby ze slámy: Jak pořídit z balíků slámy standardní dům*. 1. české vydání. Ostrava: HEL, 2009. ISBN 978-80-86167-31-2.
- [35] ŠKOPEK, Jan. Tepelná izolace z technického konopí. *Konopa: Občanské sdružení* [online]. Praha, b.r. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.konopa.cz/stavebnictvi/tepelna-izolace-z-technickeho-konopi.html>
- [36] KYMÄLÄINEN, Hanna-Riitta. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*. Elsevier, 2008, **2008**(43), 1261–1269. ISSN 0360-1323. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>

- [37] Vnitřní izolace staveb: izolační desky CALSITHERM KLIMAPLATTE. *EBK ERET BERNARD* [online]. b.r. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.ebk.cz/vnitri-izolace-staveb/izolacni-desky>
- [38] KNAUF, INSULATION. Pod povrch kontaktních a provětrávaných fasád. *TZB-info* [online]. Praha: ČTK, 2015, **2001-2017**(2015) [cit. 2017-05-07]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/13451-pod-povrch-kontaktnich-a-provetravanych-fasad>
- [39] SMUTNÝ, Martin. *KRYTINY-STŘECHY: Základní informace o střechách* [online]. Krytiny-Střechy, 2008-2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [http://www.krytiny-strechy.cz/technicke\\_info-k-navrhovani-strech/](http://www.krytiny-strechy.cz/technicke_info-k-navrhovani-strech/)
- [40] ČERNÝ, Robert. *Počítačové a experimentální metody pro stanovení vlivu proměnlivého prostředí na degradaci historického zdiva*. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013, 191 s. ISBN 978-80-01-05385-0.
- [41] SVOBODA, Luboš a kolektiv. *STAVEBNÍ HMOTY* [online]. 3. Praha: Jaga Group, 2013, 950 s. [cit. 2017-05-12]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>
- [42] BALÍK, Michael. *Odvhlčování staveb*. 2. přeprac. vyd. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2693-9.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Grafický přehled demografického vývoje, spotřeby energie a produkce emisí CO <sub>2</sub> v ČR a ve světě. Zpracováno podle [18] .....	11
Obr. 2: Grafické porovnání produkce emisí CO <sub>2</sub> v tunách na obyvatele. Zpracováno podle [18] .....	11
Obr. 3: Grafické porovnání spotřeby primární energie. Zpracováno podle [18].....	12
Obr. 4: Primární energie vybraných stavebních materiálů o ploše 1m <sup>2</sup> a tloušťce 300 mm Zpracováno podle [19] .....	14
Obr. 5: Množství emisí CO <sub>2</sub> připadajících na stavební materiál o ploše 1 m <sup>2</sup> a tloušťce 300 mm Zpracováno podle [19].....	15
Obr. 5: Tepelně izolační dřevovláknité desky .....	22
Obr. 6: Tepelně izolační desky z korku [27] .....	23
Obr. 7: Lněné tepelně izolační desky .....	24
Obr. 8: Tepelně izolační desky expandovaného polystyrenu .....	25
Obr. 9: Deska expandovaného polystyrenu s příměsí grafitu – „šedý polystyren“ [30] .....	26
Obr. 10: Barevně odlišená tepelněizolační deska extrudovaného polystyrenu XPS [31] ...	27
Obr. 11: Teplená izolace z minerální vlny .....	28
Obr. 12: Izolační rohože na bázi aerogelu vyztužené textilními vlákny .....	29
Obr. 13: Tepelná izolace Ekopanel z lisované slámy .....	30
Obr. 14: Konopné izolační desky TERMO-KONOPI PREMIUM .....	32
Obr. 15: Tepelná izolace z ovčí vlny ISOLENA – Optimal.....	33
Obr. 16: Kalcium silikátové izolační desky CALSITHERM KLIMAPLATTE .....	34
Obr. 17: Exsikátor pro měření vakuové nasákavosti .....	39
Obr. 18: Misková metoda – vážení vzorku kalcia-silikátu .....	41
Obr. 19: Průběh měření vlhkostní vodivosti kalcia-silikátu .....	43
Obr. 20: Metoda vertikální nasákavosti – automatické vážení kalcia-silikátu .....	44
Obr. 21: Měření tepelných parametrů kalcia-silikátu pomocí přístroje ISOMET 2104.....	45
Obr. 22: Přírůstek hmotnosti v čase vzorků Ekopanelu zjištěný metodou DRY-CUP .....	48
Obr. 23: Přírůstek hmotnosti v čase vzorků z ovčí vlny zjištěný metodou DRY-CUP.....	48
Obr. 24: Úbytek hmotnosti v čase vzorků ze slámy zjištěný metodou WET-CUP.....	48
Obr. 25: Úbytek hmotnosti v čase vzorků z ovčí vlny zjištěný metodou WET CUP .....	49
Obr. 26: Vlhkostní profil vzorků z ovčí vlny .....	50

Obr. 27: Vlhkostní profil vzorků z konopí .....	50
Obr. 28: Vlhkostní profil vzorků z kalcia-silikátu.....	51
Obr. 29: Součinitel vlhkostní vodivosti v závislosti na vlhosti vzorků z ovčí vlny, konopí a kalcia-silikátu .....	51
Obr. 30: Křivka nasákavosti vzorků ze slámy s ochrannou papírovou lepenkou.....	52
Obr. 31: Křivka nasákavosti vzorků ze slámy bez papírové lepenky.....	52
Obr. 32: Křivka nasákavosti vzorků z konopí .....	52
Obr. 33: Křivka nasákavosti vzorků z konopí .....	53
Obr. 34: Křivka nasákavosti vzorků z kalcia-silikátu.....	53
Obr. 35: Vzorky z Ekopanelu – vzorek A <sub>s12</sub> po kontaktu s kapalnou vodou.....	55
Obr. 36: Tepelná vodivost v závislosti na vlhkosti vzorků z konopí .....	56
Obr. 37: Tepelná vodivost kalcia-silikátu v závislosti na vlhkosti.....	57
Obr. 38: Porovnání průměrných hodnot tepelných vlastností měřených materiálů .....	57



## Seznam tabulek

Tab. 1: Primární energie a emise CO <sub>2</sub> tepelných izolací o ploše 1 m <sup>2</sup> a tloušťce 300 mm. Zpracováno podle [19] .....	14
Tab. 2: Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla podle ČSN 730540-2 [5] .....	17
Tab. 3: Rozdělení přírodních tepelných izolací a jejich součinitel tepelné vodivosti .....	19
Tab. 4: Rozdělení syntetických tepelně izolačních materiálů a jejich součinitel tepelné vodivosti .....	20
Tab. 5: Využití vybraných tepelných izolací .....	37
Tab. 6: Základní fyzikální vlastnosti vybraných tepelných izolací .....	46
Tab. 7: Parametry transportu vodní páry difúzí zjištěné metodou DRY CUP a WET CUP u vybraných tepelných izolací .....	47
Tab. 8: Absorpční koeficienty a hodnoty spolehlivosti vzorků vybraných tepelných izolací .....	53
Tab. 9: Tepelné vlastnosti vysušených vzorků vybraných tepelných izolací .....	56
Tab. 10: Cenové porovnání měřených tepelných izolací 1 m <sup>2</sup> při tloušťce 60 (50) mm .....	59