



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A  
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

# STUDIUM TEPELNĚ VLHKOSTNÍHO CHOVÁNÍ TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN

STUDY OF HYGROTHERMA BEHAVIOR OF THERMAL INSULATING MATERIALS BASED ON  
NATURAL FIBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ANDREA KOSTUROVÁ



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Andrea Kosturová
<b>Název</b>	Studium tepelně vlhkostního chování tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Jiří Zach, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2015
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,  
MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,  
MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## Podklady a literatura

- [1] CHYBÍK, J. Přírodní stavební materiály. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009. 272 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [2] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [3] VAVERKA, J.; KOZEL, V.; LÁDYŠ, L.; LIBERKO, M.; CHYBÍK, J. Stavební fyzika 1, urbanistická stavební a prostorová akustika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. 343 s. ISBN 80-214-1283-6.
- [4] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 209 s. ISBN 80-214-2117-7.
- [5] KÜNZEL, H. M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [6] Slípková, A., Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken, Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2012.

## Zásady pro vypracování

Bakalářská práce bude věnována problematice přenosu tepla a vlhkosti ve struktuře přírodních tepelně izolačních materiálů. V rámci práce bude provedena literární rešerše, rekapitulace výpočtových modelů využívaných v současnosti. Cílem práce bude dále zmapování možných technologií úpravy přírodních vláken (izolantu) a výsledných změn v tepelně vlhkostním chování těchto materiálů po modifikaci, a to jednak na základě provedené literární rešerše, a také na základě výsledků výzkumných prací, které byly provedeny na VUT v předchozích letech. V praktické části bude provedeno měření tepelně vlhkostních parametrů na vybraných zkušebních vzorcích přírodních izolantů. Dále pak provedení výpočtové simulace chování těchto materiálů v reálné konstrukci. V závěru práce bude provedena verifikace výsledků na reálném fragmentu stavební konstrukce.

## Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....  
Ing. Jiří Zach, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

**Abstrakt**

Náplní práce je přiblížit transport tepla a vlhkosti v tepelně izolačních materiálech na bázi přírodních vláken. Nevýhodou v použití těchto materiálů při zabudování do konstrukce je právě jejich malá odolnost vůči vlhkosti, proto se práce dále zajímá o možné úpravy přírodních vláken, které by to mohly napravit. Provedená literární rešerše přibližuje trendy v použití dynamických simulací prostupu tepla a vlhkosti materiálem. Na základě poznatků z předchozích prací na VUT a teoretické části byly pak na vzorku tepelné izolace z technického konopí nanесeny různé druhy impregnačních přípravků a zhodnocen jejich vliv na vlastnosti izolantu.

**Klíčová slova**

tepelná izolace, přírodní vlákna, teplo a vlhkost, konopí, modifikace, dynamické simulace

**Abstract**

The content of this work is to describe the transport of heat and moisture in thermal insulation materials based on natural fibers. The disadvantage in using these materials when incorporated into the construction is their low resistance to moisture. Therefore this work is further interested on possible modifications of natural fibers, which could correct it. Implemented literature research is approaching trends in the usage of dynamic simulations of heat and moisture transfer through material. Based on the findings from previous works on the VUT and theoretical part there were applied various kinds of impregnating preparations on a sample of insulation from hemp and the evaluation of their effect on the properties of the insulator.

**Keywords**

thermal insulation, natural fibers , heat and moisture, hemp , modification , dynamic simulation

**Bibliografická citace VŠKP**

KOSTUROVÁ, Andrea. *Studium tepelně vlhkostního chování tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken*. Brno, 2016. 65 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....

podpis autora

### **Poděkování**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D. za ochotu, odborné vedení a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

.....

podpis autora

# OBSAH

ÚVOD.....	10
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1.1 Šíření tepla a vlhkosti ve stavební konstrukci a vláknitých materiálech .....	11
1.1.1 Základní způsoby šíření tepla v konstrukci .....	11
1.1.1.1 Šíření tepla vedením .....	11
1.1.1.2 Šíření tepla prouděním.....	12
1.1.1.3 Šíření tepla sáláním .....	12
1.1.2 Transport tepla v izolačních vláknitých materiálech.....	13
1.2 Vlhkost v konstrukci a vláknitých materiálech .....	13
1.2.1 Transport vlhkosti ve vláknitých materiálech.....	14
1.2.1.1 Difúzní vlhkost nesená vzduchem.....	14
1.2.1.2 Difúze ve válcových vláknech .....	15
1.3 Izolační materiály na bázi přírodních vláken.....	17
1.3.1 Rostlinná vlákna.....	17
1.3.1.1 Konopí seté ( <i>Cannabis sativa L.</i> ) .....	17
1.3.1.2 Juta .....	18
1.3.1.3 Len setý ( <i>Linum usitatissimum L.</i> ).....	18
1.3.2 Živočišná vlákna .....	20
1.3.2.1 Ovčí vlna .....	20
1.3.3 Možné modifikace přírodních vláken.....	21
1.3.3.1 Chemické úpravy.....	21
1.3.3.2 Alkalická úprava .....	21
1.3.3.3 Úprava silany .....	23
1.3.3.4 Acetylace.....	24
1.3.3.5 Benzoylace.....	25
1.3.3.6 Úprava peroxidem.....	25
1.3.3.7 Melainová reakční činidla .....	25
1.4 Rekapitulace výpočtových modelů pro transport tepla a vlhkosti.....	27
1.4.1 Výpočtové modely používané doposud .....	27
1.4.1.1 Glaser.....	27
1.4.1.2 Husseiní, Ricken, Kerestecioglu, Gu .....	27



1.4.1.3	Krischer .....	28
1.4.1.4	Graubel .....	28
1.4.1.5	Rode, Nicolas.....	30
1.4.1.6	Luik, de Vries .....	30
1.4.2	Současný numerický výpočet pro přenos tepla a vlhkosti.....	31
1.4.2.1	WUFI .....	32
1.4.2.2	Delphin .....	35
1.4.2.3	Match .....	36
1.4.2.4	Shrnutí numerických simulací .....	36
<b>2</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1</b>	<b>Metodika práce .....</b>	<b>38</b>
<b>2.2</b>	<b>Zkoušení vzorků .....</b>	<b>41</b>
2.2.1	Stanovení lineárních rozměrů a tloušťky.....	41
2.2.1.1	Stanovení délky a šířky .....	41
2.2.1.2	Stanovení tloušťky.....	42
2.2.2	Stanovení objemové hmotnosti.....	42
2.2.3	Stanovení krátkodobé nasákavosti .....	43
2.2.4	Stanovení rovnovážné sorpční vlhkosti.....	44
2.2.5	Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	45
<b>2.3</b>	<b>Provádění zkoušek a jejich výsledky.....</b>	<b>46</b>
2.3.1	Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti..	46
2.3.2	Stanovení krátkodobé nasákavosti .....	47
2.3.3	Stanovení rovnovážné sorpční vlhkosti.....	49
2.3.4	Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	50
<b>Závěr</b>	.....	<b>56</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	.....	<b>58</b>
<b>Seznam obrázků</b>	.....	<b>64</b>
<b>Seznam tabulek</b>	.....	<b>64</b>
<b>Seznam grafů</b>	.....	<b>65</b>

## ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je přiblížit problematiku šíření tepla a vlhkosti ve struktuře přírodních tepelně izolačních materiálů. Přírodní izolační materiály se dostaly v poslední době do podvědomí široké veřejnosti v rámci ekologického a zdravějšího bydlení. Pro Českou republiku to je, co se do použití ve stavebnictví týče, hlavně technické konopí a len. I přesto, že některé přírodní izolační materiály vykazují odolnost vůči hnilobě, je třeba tepelně izolační materiály na bázi přírodních vláken chránit proti působící vlhkosti. Proto je další část této práce zaměřena na možnou modifikaci přírodních vláken a tak zlepšení jejich vlastností a odolnosti.

Dále je provedena literární rešerše, ve které jsou popsány výpočtové modely pro určení transportu tepla a vlhkosti, a to jak používané do nedávné doby, kdy určitý důraz je kladen hlavně na Glaserovu metodu, ale také současné trendy v dynamických simulacích, kde se podle dostupných informací jeví jako nejvhodnější použít software Wufi.

Na základě výsledků z vědeckých prací na VUT se v praktické části posuzovalo, jak druh a množství použitého impregnačního přípravku na bázi aerosolu ovlivňuje nasákavost, a také součinitel tepelné vodivosti materiálu. Součástí praktické části je normově popsaná metodika vykonání zkoušek a následné zhodnocení výsledků ve formě grafů a komentářů k příslušným výsledkům.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Šíření tepla a vlhkosti ve stavební konstrukci a vláknitých materiálech

### 1.1.1 Základní způsoby šíření tepla v konstrukci

Principiálně teplo z míst o vyšší teplotě přechází do míst s nižší teplotou, a tak dochází v prostředí k vyrovnání teplot. Podle toho, v jakém prostředí se tento pohyb tepelné energie děje určujeme šíření tepla:

- vedením (kondukce)
- prouděním (konvence)
- sáláním (radiace) [1]

#### 1.1.1.1 Šíření tepla vedením

Teplo se šíří vedením v kapalinách, plynech a tuhých látkách. Jedná se o postupné odevzdávání kinetické energie molekulám tělesa při jejich vzájemném dotyku. K šíření tepla vedením dojde v případě, že je v různých místech tělesa určité rozdělení teplot. K charakterizaci schopnosti látek vést teplo slouží součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]. [1, 2] Jedná se o hlavní a také rozhodující charakteristiku, která vypovídá o tepelně izolační schopnosti materiálu. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo při dané střední teplotě. Abychom mohli hovořit o tepelné izolaci, musí být jeho hodnota menší 0,1 [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]. Nejedná se o stálou veličinu a její hodnota je závislá na mnoha faktorech jako jsou pórovitost, objemová hmotnost, chemické složení, vlhkost a teplota. [29] Jeho výpočet je dán vztahem:

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-\text{grad}\theta} \quad (1)$$

$q$  .... vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením, proudícího stejnorodým isotropním materiálem [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\text{grad } \theta$  ... gradient teploty [ $\text{K}/\text{m}$ ]

### 1.1.1.2 Šíření tepla prouděním

Prouděním se teplo šíří v kapalinách a plynech. Dochází k tomu, že částice látek se pohybují a přitom přenášejí teplo. Rozeznáváme dva druhy šíření tepla prouděním:

1. přirozené – pohyb tepla vzniká díky rozdílné hmotnosti teplých a studených částic vzduchu
2. vynucené – k pohybu dochází díky působení čerpadel a ventilátorů [1]

### 1.1.1.3 Šíření tepla sáláním

Jedná se o přenos ve formě elektromagnetických vln nebo hmotných částic, které se v prostoru šíří rychlostí světla, tj.  $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tepelné záření se po dopadu na těleso mění v teplo, kdy tepelné sálání různých těles je určováno jejich teplotním stavem, jelikož při stejné teplotě se schopnost sálat teplo u různých materiálů liší. Ideální, neboli černé těleso, má při dané teplotě maximální sálavou schopnost. V reálném prostředí se absolutně černé těleso nevyskytuje a skutečná tělesa nazýváme jako šedá tělesa. Šedé těleso vyzáří při stejné teplotě menší množství energie než je tomu u absolutně černého tělesa. [1]

#### *Součinitel prostupu tepla*

Ve stavebních konstrukcích se tepelně izolační vlastnosti z pohledu šíření tepla v dnešní době hodnotí nejčastěji pomocí součinitele prostupu tepla  $U$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ], který je definován jako celková výměna tepla v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími, které jsou odděleny stavební konstrukcí o tepelném odporu  $R$  [ $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ ]. Normově je dán vztahem: [28]

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2)$$

$U$  ... součinitel prostupu tepla [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]

$R_T$  ... odpor konstrukce při prostupu tepla [ $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ ]

### 1.1.2 Transport tepla v izolačních vláknitých materiálech

K výpočtu šíření tepla ve vláknitých izolačních materiálech nelze použít Furiérova zákonu v podobě viz vztah (3).

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad (3)$$

$q$  .... hustota tepelného toku [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$\lambda$  .... součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\nabla T$  ... teplotní gradient [ $K \cdot m^{-1}$ ]

Pro definování tepelné vodivosti je třeba užít vztah (4), jelikož na celkový objem materiálu připadá jen malé množství pevné fáze a zbytek vyplňuje tzv. intersticiální tekutina – ve většině případů vzduch.

$$\lambda_{eff} = \alpha \cdot \lambda_f + (1 - \alpha) \cdot \lambda_g \quad (4)$$

$\lambda_{eff}$  ... součinitel tepelné vodivosti pro vláknitý materiál [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\alpha$  .... objemový podíl pevné fáze

$\lambda_f$  .... součinitel tepelné vodivosti pevné fáze

$\lambda_g$  ..... součinitel tepelné vodivosti intersticiální tekutiny

Hodnota součinitele tepelné vodivosti je mimo jiné ve vláknitých materiálech také závislá na orientaci vláken, kdy dle struktury se dělí na jednosměrné, rovnoběžné a vrstevnaté. V posledním případě jsou vlákna rozmístěna náhodně v rovinách často kolmo ke směru tepelného toku. Směr vláken orientovaných kolmo k průchodu tepelné energie je nejvýhodnější, protože v případě uložení vláken rovnoběžně je větší pravděpodobnost pro snazší průchod tepelné energie. [26]

## 1.2 Vlhkost v konstrukci a vláknitých materiálech

Vlhkost charakterizuje přítomnost chemicky nevázané vody v látce a v praxi se látky téměř nikdy nevyskytují v suchém stavu. Mohou totiž obsahovat vlhkost jak v kapalném, plynném tak i tuhém stavu. V tuhém stavu mohou vlhkost obsahovat pouze v zimním období ve formě ledu. Vlhkost je buď hmotnostní, nebo objemová. Hmotnostní vlhkost určíme ze vztahu:

$$u_m = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

$u_m$  .... hmotnostní vlhkost [%]

$m_v$  .... hmotnost vlhké látky [kg]

$m_s$  .... hmotnost suché látky [kg]

V praxi objemovou vlhkost určíme ze vztahu:

$$u_v = \frac{\rho_s}{1000} \cdot u_m [\%] \quad (6)$$

$u_v$  .... objemová vlhkost [%]

$\rho_s$  .... objemová hmotnost suché látky [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

Vlhkost má velký vliv na tepelně-technické vlastnosti stavebních materiálů jako je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]. Obecně platí, že čím vyšší je obsah vlhkosti v materiálu, tím vyšší je i součinitel tepelné vodivosti. [1, 2]

### 1.2.1 Transport vlhkosti ve vláknitých materiálech

Azra Korjenic a Thomas Bednar se ve své práci věnovali právě transportu vlhkosti ve vláknitých materiálech, kdy vyvinuli model pro ukládání vlhkosti a její šíření, kdy naměřené výsledky zhodnotili s tímto modelem. [27]

Vlhkost se ve vláknitých materiálech šíří prostřednictvím difuze, která může být rozdělena do dvou částí – difúzní vlhkost nesená vzduchem a difuze ve válcově tvarovaných vláknech.

#### 1.2.1.1 Difúzní vlhkost nesená vzduchem

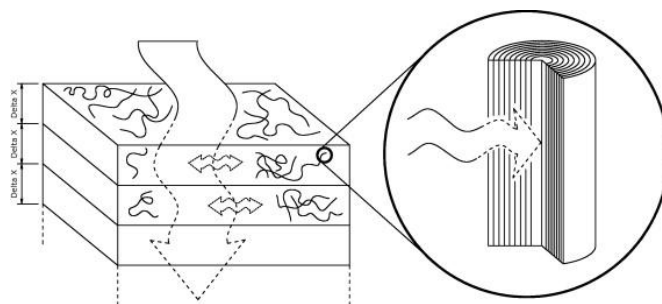
Izolační materiál je rozdělen do vrstev o zadané tloušťce, kdy vlhkost v buňkách se mění na difúzní tok, a buňky mezi sebou interagují. V tomto případě koncentrace vlhkosti  $c$  [ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ] závisí právě na tloušťce vrstvy materiálu. Fyzikálně lze transport vlhkosti popsat prvním Fickovým zákonem. [27]

$$j = -D\nabla c \quad (7)$$

$j$  ... hustota difuzního toku [ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\nabla c$  ... gradient koncentrace vlhkosti [ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$D$  ... difúzní koeficient difundujícího plynu (vodní pára) [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]



Obr. 1 Schéma toku vlhkosti mezi vrstvami vláknitého materiálu [27]

### 1.2.1.2 Difúze ve válcových vláknech

V tomto případě je koncentrace vlhkosti  $c$  závislá na vzdálenosti  $r$ , která je měřena od středu válce. Fickův zákon pak bude vypadat:

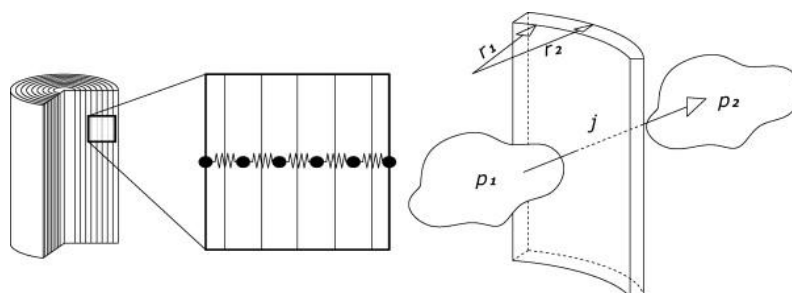
$$j = -D \frac{\partial c}{\partial r} \quad (8)$$

$j$  ... hustota difuzního toku [ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\partial c$  ... koncentrace vlhkosti [ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$\partial r$  ... radiální vzdálenost [ $\text{m}$ ]

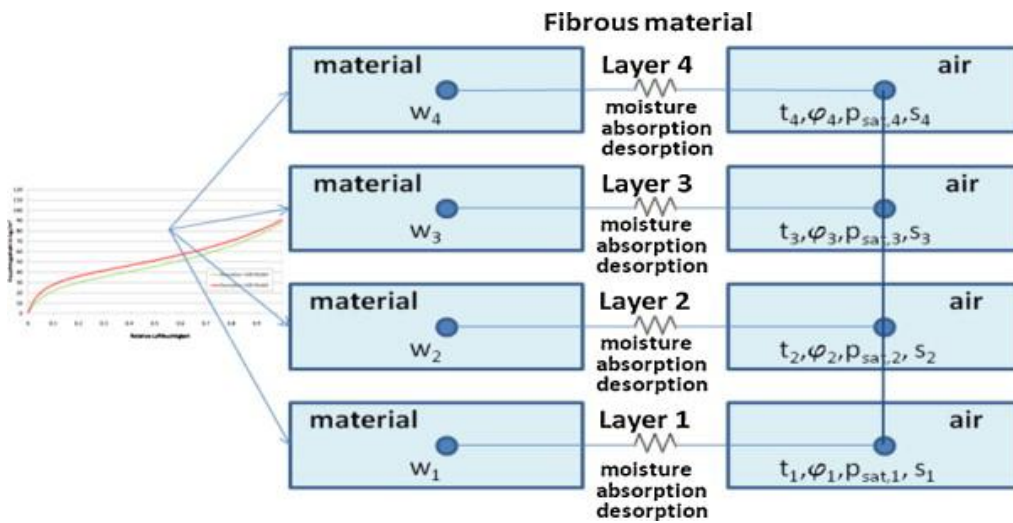
$D$  ... difúzní koeficient difundujícího plynu (vodní pára) [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]



Obr. 2 Schéma difuzního toku při průchodu válcovým vláknem [27]

Podle těchto poznatků a rozvinutí výpočtu například o zavedení proudění  $z$  a do buňky pak Korjnenic a Bednar představili rozvinutý model pro absorpci a desorpci vlhkosti ve vláknitém materiálu, kdy schéma výpočtu je na obrázku

3. Model uvažuje ve výpočtu vzduchové kapsy, které jsou uvnitř vláknitých materiálů, kdy materiálové vrstvy mohou být rozděleny na menší části. Dle autorů tato úprava není nutná, díky optimálně vysoké přesnosti výpočtu. [27]



Obr. 3 Schéma výpočtu transportu vlhkosti ve vláknitých materiálech [27]

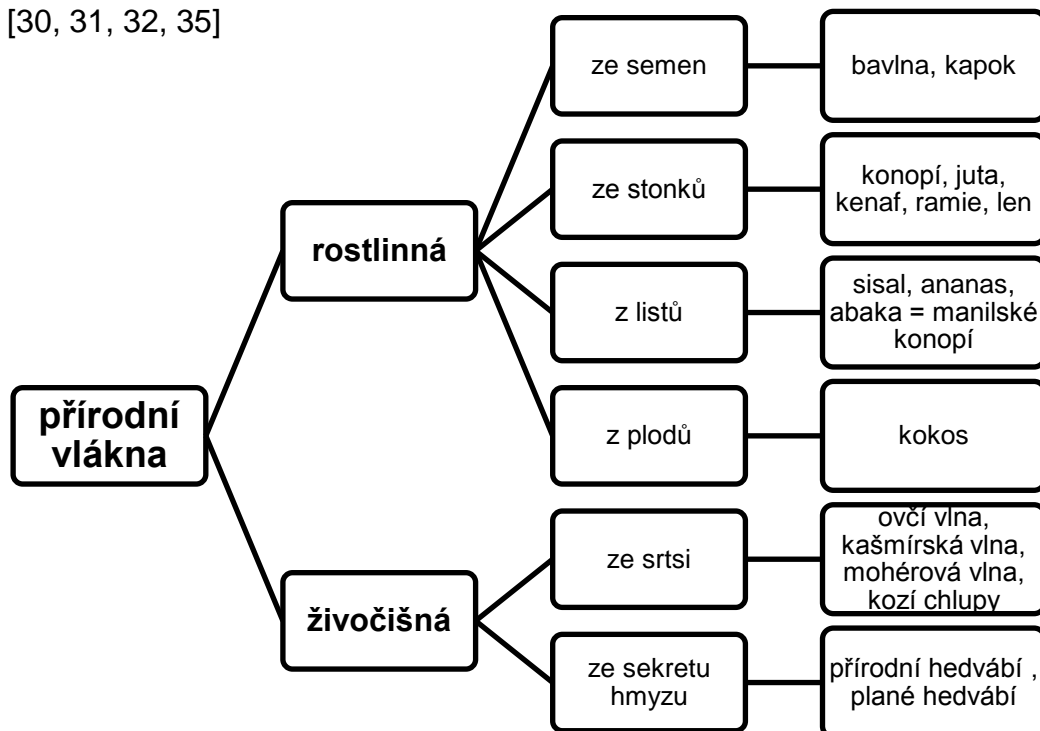


## 1.3 Izolační materiály na bázi přírodních vláken

Přírodní vlákna mohou být rozdělena na:

- rostlinná
- živočišná

Co se týče přírodních vláken použitých ve stavebnictví jakožto tepelně izolačních materiálů dostupných v České republice, tak z rostlinných vláken je to především konopí a len, kdy z dovozu juta. Z živočišných vláken to je ovčí vlna. [30, 31, 32, 35]



Obr. 4 Schéma rozdělení přírodních vláken

### 1.3.1 Rostlinná vlákna

#### 1.3.1.1 Konopí seté (*Cannabis sativa L.*)

Jedná se o teplomilnou rostlinu, je odolná a nenáročná. Řadí se do čeledi konopovitých (*Cannabaceae*), kde se řadí i chmel a další dva druhy konopí – konopí plané (*Cannabis ruderalis*) a konopí indické (*Cannabis indica*). V průmyslu nás však nejvíce zajímá konopí seté, tzv. technické konopí, které se dá zužitkovat na vlákno, papír, palivo a olej. Sklizeň probíhá nejméně dvakrát do roka. [33]

V České republice vyráběla firma Canabest konopné rohože, nicméně již zanikla. V Německu jsou vyráběné pod názvem Termo-Hanf. Výhody konopných rohoží jsou ty, že nezatěžují životní prostředí a díky dobrým difúzním vlastnostem umožňují prostup vlhkosti. Tímto zajistí zdravé klima v místnosti. Odolávají hnilobě a škůdcům. V tepelné izolaci z konopí je až 85 % konopných vláken, zbytek tvoří bikomponentní vlákna a uhličitán sodný, který zajišťuje ochranu proti ohni.

Objemová hmotnost konopných izolací je v rozmezí  $30 \text{ kg/m}^3$  až  $42 \text{ kg/m}^3$ . Součinitel tepelné vodivosti má hodnotu  $0,040 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ . Izolace z konopí se dodává buď ve formě izolačních rohoží, nebo jako izolace svinutá do role o různých tloušťkách a délkách. [34, 35]

### 1.3.1.2 Juta

Vlákno juty se získává z několika druhů jutovníku (*Corchorus*). Jedná se o jednoletou nebo víceletou rostlinu, která roste zásadně ve vlhkých tropických podmínkách v Indii, Číně, Thajsku a Vietnamu. Technické vlákno juty je až 4000 mm dlouhé a proto se stala nejlevnější plodinou v oblasti textilního průmyslu. Ve stavebnictví se použité jutové geotextilie rozdělují podle jejich plošné hmotnosti od  $140 \text{ g/m}^2$  do  $500 \text{ g/m}^2$ . [35]

### 1.3.1.3 Len setý (*Linum usitatissimum L.*)

Jedná se o jednoletou bylinu z čeledi *Linaceae* pocházející z Asie. Je odolná a dá se pěstovat i bez použití hnojiv a chemických přípravků. Všechny části rostliny se dají zužitkovat, kdy při výrobě izolací se lněná vlákna pojí bramborovým škrobem. V tuzemsku se len prodává jako volně sypaný, plst' nebo jako pružné desky. Do izolačních materiálů se kvůli křehkosti vláken přidává až 20 % polyesterových vláken. Kvůli snadné hořlavosti je třeba len ošetřit a to buď borovými solemi. Ošetření lze provést i sloučeninami amoniaku, nicméně toto ošetření není příliš vhodné ke vztahu k životnímu prostředí.

Při použití lněné izolace je třeba konstrukci nejprve výpočtem ověřit, jak se konstrukce bude chovat, co se týče možnosti výskytu kondenzace vodních

par. Hranice pro množství kondenzátu ve stanovení roční bilance kondenzace vodních par by měla být menší než  $0,1 \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{a)]}$ .

Součinitel tepelné vodivosti izolací ze lnu je  $0,037 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ , kdy objemová hmotnost se pohybuje v rozmezích  $30 - 150 \text{ kg/m}^3$  podle použití v konstrukci a druhu izolace. [34, 35]

Tab. 1 Chemické složení vybraných přírodních vláken

Typ vlákn	Celulóza	Lignin	Hemicelulóza	Pektiny	Vosky	Obsah vlhkosti
	[% hmotnosti]					
Konopí	70,2 – 74,4	3,7 – 5,7	17,9 – 22,4	0,9	0,8	10,8
Juta	61 – 71,5	12,0 – 13,0	13,6 – 20,4	0,2	0,5	12,6
Len	71	2,2	18,6 – 20,6	2,3	1,7	10,0

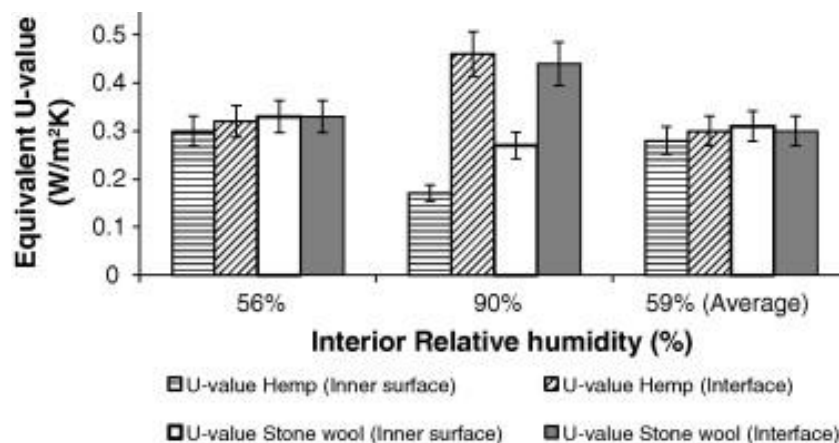
Eshar Latif a kol. se zaměřili na srovnání tepelně-vlhkostního chování konopí a kamenné vlny o stejné tepelné vodivosti, které zakomponovali do dřevěných panelů, uložených do zkušebního objektu.

Tab. 2 Vybrané vlastnosti včetně složení zkoušených materiálů [13]

Materiál	$\rho \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	d [mm]	$c \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}]$	Výčet složek	$\lambda \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
Konopí	50	50 × 2	1600	Konopná vlákna – 85 % Dvousložková vlákna – 10 – 12 % Soda – 3 – 5 %	0,038
Kamenná vlna	23	100	850	Amfibolit Vápenec – cca 6 %, Oxid vápenatý – cca 9 % Pryskyřice	0,038

Obě izolace byly před instalací podrobeny 50 % relativní vlhkosti  $\varphi$  a teplotě  $23 \text{ °C}$  ( $\pm 2 \text{ °C}$ ), aby byla simulována úroveň teploty a vlhkosti v expozici. Pro naměření teploty, relativní vlhkosti a tepelného toku byla na panely nainstalována čidla. Doba trvání testu činila 39 dní, kdy vnitřní teplota se udržovala na  $25 \pm 4 \text{ °C}$ . Co se týče vyhodnocení hodnoty součinitele prostupu

tepla  $U$  [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ], tak se vycházelo z aritmetického průměru. Průměrná relativní vlhkost činila 59 % a teplota 29,4 °C. Dále se posuzovalo pro relativní vlhkosti prostředí při 56 % a při 90 % vlhkosti. Výsledky měření lze vidět v grafu, kde hodnoty součinitele prostupu tepla se posuzovaly v rozhraních izolace-OSB a izolace-vnitřní povrch.



Obr. 5 Závislost součinitele prostupu tepla na relativní vlhkosti prostředí [13]

Největší nesrovnalosti nastaly při vystavení relativní vlhkosti 90 %. Hodnota součinitele prostupu tepla  $U$  v rozhraní kamenná vlna – OSB byla o 63 vyšší, než rozhraní kamenná vlna – vnitřní povrch. Při použití konopné izolace se tento rozdíl zvýšil až na 170 %. Tento rozdíl mohl vzniknout díky důsledku pohybu a změny fáze vlhkosti. Dále bylo u většiny případů měření dosaženo relativní hodnoty vlhkosti u rozhraní kamenná vlna – OSB 100 %, zatímco u konopné izolace tato skutečnost nikdy nenastala, hodnota se držela na přibližných 80 % vlhkosti. Z toho vyplývá, že s ohledem na pravděpodobnost výskytu kondenzace lépe vychází použití konopné izolace místo kamenné vlny. [13]

### 1.3.2 Živočišná vlákna

#### 1.3.2.1 Ovčí vlna

Ovčí vlna jako materiál pro použití jako izolační materiál má tu schopnost, že na sebe dokáže navázat až 35 % vlhkosti z vlastní hmotnosti, kterou pak uvolňuje podle vlhkosti v interiéru a stabilizuje vnitřní klima. Přestože

na sebe naváže takové množství vlhkosti, na tepelně izolační vlastnosti se to nepromítne.

Jako tepelná izolace je k dostání ve formě desky s kolmo orientovaným vláknem, vyráběných z prané ovčí vlny. Pro zajištění odolnosti proti molům, hmyzu a plísním je vlákno ošetřeno různými přísadami.

Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí  $0,038 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$  až  $0,05 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ . Objemová hmotnost podle druhu výrobky nabývá hodnot od 13 do  $30 \text{ kg/m}^3$ . [35]

### **1.3.3 Možné modifikace přírodních vláken**

V dnešní době je možné vhodnou realizací konstrukce docílit o nemalé snížení spotřeby tepla pro vytápění. Při navrhování se tak klade důraz na kvalitu a tloušťku tepelně izolační vrstvy. Ekologické smýšlení posledních let proto nahrává přírodním izolačním materiálům. V našich podmínkách je to například využití konopí a lnu.

Pozitivní je jistě to, že přírodní vlákna disponují nízkou hustotou a cenou, avšak problém je jejich malá odolnost vůči vlhkosti. Je to dáno obsahem hydroxylových skupin, které do vláken přitahují molekuly vody a vlákno tak nabude na objemu. Abychom tomuto jevu zamezili, je třeba vlákna pomocí různých úprav modifikovat. [4]

#### **1.3.3.1 Chemické úpravy**

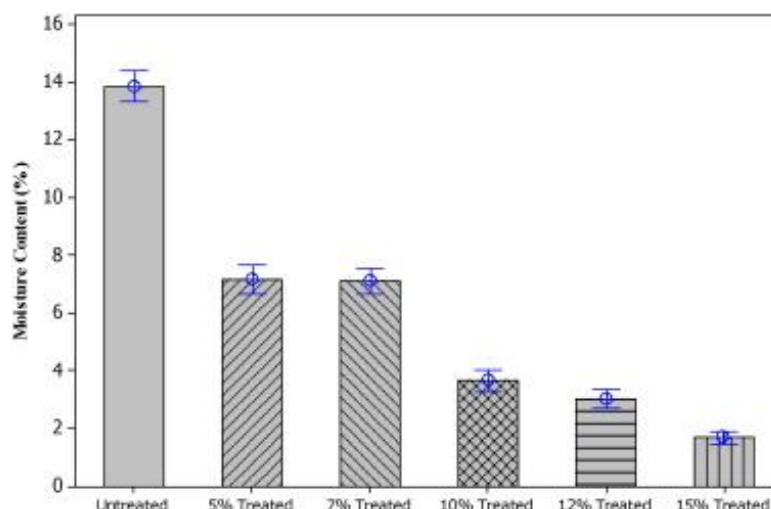
Jako největší problém přírodních vláken je hydrofilní povaha vláken a následná hydrofobní povaha matrice. Díky této skutečnosti dochází na rozhraní mezi těmito dvěma fázemi k oslabení vazby. Chemická úprava tak může snížit hydrofilní povahu vlákna a zvýšit tak slučitelnost s matricí. [4, 5]

#### **1.3.3.2 Alkalická úprava**

Úprava tímto způsobem je široce používaná pro modifikaci celulózové struktury vláken. Používá se roztok hydroxidu sodného (NaOH), kdy dojde ke

změně orientace krystalické struktury celulózy a následně se vytvoří amorfni oblast. V amorfni oblasti jsou pak molekuly ve větších vzdálenostech a tak se mezi molekuly celulózy dostane voda. Hydroxylové skupiny (OH), které jsou citlivé na zásadité prostředí, pak reagují s vodou a ta se dostává ven ze struktury vlákna. Zbývající molekuly vytvoří vazbu vlákno – O – Na. Sníží se tak počet hydrofilních hydroxylových skupin a dojde ke zvýšení odolnosti vláken vůči vlhkosti. Spolu s tím dojde i ke snížení obsahu hemicelulózy, ligninu a pektinu, kdy se tak vlákno stane na povrchu jednotnějším v důsledku eliminace mikropórů. Kromě toho však také dochází ke snížení průměru vlákna, tím se zvyšuje poměr stran a to má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti. [4, 5]

V roce 2015 Ridzuana a kol. zkoušeli vliv alkalického ošetření na vlákna dochanu červeného (*Pennisetum Purpureum*). Tato tráva se skládá ze 46 % celulózy, 34 % hemicelulózy a 20 % ligninu. Za použití alkálií se snažili z vláken odstranit hemicelulózu. Prameny vláken oddělili od stonku a očistili, poté rozdrtili na malé části a ponořili do vody. Nakonec byla očištěna destilovanou vodou. Hydroxid sodný použili v různých koncentracích – 2 %, 5 %, 7 %, 10 %, 15 % a nechali prameny vláken ponořeny při pokojové teplotě 24 hodin. Pro stanovení vlhkosti byla vlákna spojena dohromady a zvážena. Následně vysušena při 100°C po dobu 24 hodin a opět zvážena. Poté se umístila do komory s relativní vlhkostí prostředí 70 %, teplotě 21°C opět po dobu 24 hodin. Nakonec se vzorky zvažily a výpočtem se stanovilo množství vlhkosti. [25]



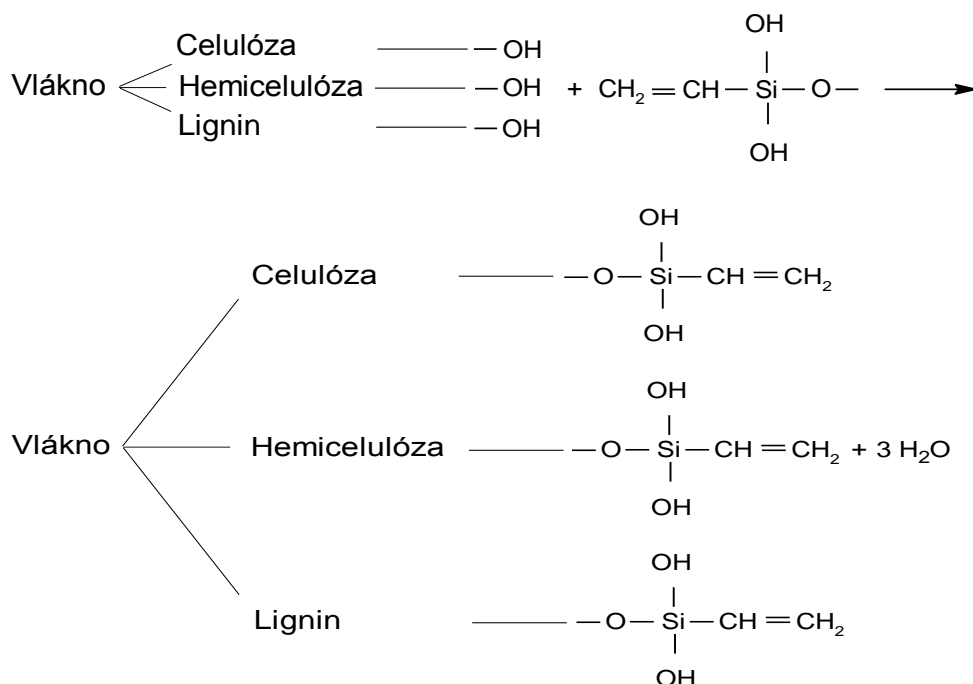
Obr. 6 Množství vlhkosti v ošetřených vzorcích podle koncentrace NaOH [25]

Z grafů je vidět závislost koncentrace hydroxidu sodného na množství vlhkosti ve vzorku. V neošetřeném vzorku činil obsah vlhkosti 48 %, přičemž nejméně vykazoval vzorek ošetřený 15 % roztokem NaOH a to 1,7 % vlhkosti, jakožto nejkoncentrovanější použitý roztok v experimentu. [25]

### 1.3.3.3 Úprava silany

Silany jsou multifunkční molekuly používané jako spojovací činidlo pro modifikaci povrchů přírodních vláken. Díky své stavbě jsou silany schopny vytvořit chemickou vazbu mezi povrchem vlákna matricí díky siloxanového můstku. Průběh zpracování vlákna je doprovázen hydrolyzou, kondenzací a následnou tvorbou vazeb. Při hydrolyze dochází díky přítomnosti alkoxy skupin a vlhkosti k tvorbě silanolů. Aby došlo ke zlepšení vlastností kompozitu, musí jeden konec silanolu při kondenzaci reagovat s hydroxylovou skupinou celulózy a druhý s matricí funkční soustavy. Díky tomuto dojde k vytvoření ochranného povlaku na povrchu vlákna a je tak poskytnuta ochrana proti pronikání vlhkosti do skladby vlákna. [5]

Při úpravě vláken pomocí silanů se často využívá alkalizace pomocí roztoku hydroxidu sodného, který zvyšuje účinnost silanu. [4]



Pradeep K. Kushwahaa a Rakesh Kumara se ve své práci zajímali o vliv ošetření silany na mercerovaná bambusová vlákna. Mercerace, jinak alkalické ošetření, je způsob úpravy, kdy vyčištěné a vysušené bambusové rohože byly ponořeny do 5 % roztoku hydroxidu sodného (NaOH) po dobu 30 minut při pokojové teplotě. Poté se promyly destilovanou vodou a neutralizovaly 2 % roztokem kyseliny chlorovodíkové (HCl). Tato léčba má za následek lepší odolnost vůči vlhkosti. Výsledky výzkumu prokázaly, že takto předem upravená vlákna s následnou léčbou silany dosáhla nejlepších výsledků při dlouhodobém ponoření ve vodě i při krátkodobém ponoření v destilované vroucí vodě. Při dlouhodobém ponoření absorpce vody pro neošetřená bambusová vlákna činila až 51 %, pro vlákna ošetřená 35 %. Neaktivní hydroxylové skupiny se aktivují díky alkalickému ošetření a tak dojde k silnému chemickému působení mezi vláknem a maticí. Po dvou hodinách ve vroucí destilované vodě se absorpce vody z 61 % pro neošetřená bambusová vlákna zredukovala na 26 % při ošetření NaOH a následně silany. [8]

#### 1.3.3.4 Acetylace

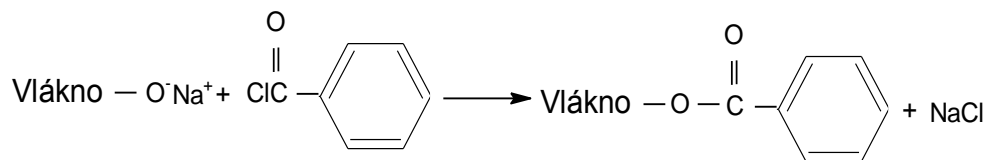
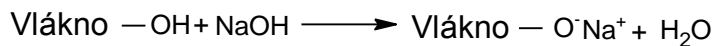
Metoda acetylace je také známá jako metoda esterifikace pro plastifikaci přírodních vláken. Tato metoda snižuje vlhkost a také zlepšuje rozměrovou stálost. Dosáhne se toho díky reakci acetylové skupiny  $\text{CH}_3\text{CO}$  s hydroxylovou skupinou OH. K urychlení reakce se vlákna nejdříve máčí v kyselině octové a poté se upravují anhydridem kyseliny octové. Princip je založen na náhradě hydroxylových skupin acetylovými a tím se sníží hydrofilní povaha vláken. [5]

Mishra a kol. použili metodu acetylace na sisalová vlákna. Vlákna nejprve byla namočena do kyseliny octové po dobu jedné hodiny a teplotě  $30^\circ\text{C}$  a následně namočena do 50 ml anhydridu kyseliny octové spolu s jednou kapkou kyseliny sírové. Vlákna se pak promyla vodou a nakonec vysušila na vzduchu. Nasákavost takto ošetřeného sisalu byla v průměru 5,5 %, zatímco u neošetřeného se pohybovala cca 10 %. [6]



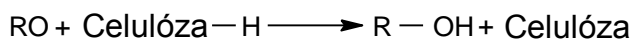
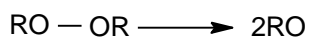
### 1.3.3.5 Benzoylace

Při benzoylaci se využívá benzoylchloridu, který napomáhá snižovat hydrofilní charakter vláken. Využívá se také alkalická předúprava, díky které se dojde k odkrytí reaktivních hydroxylových skupin OH na povrchu vlákna. Hydroxylové skupiny jsou následně nahrazena benzoylovou skupinou a snižuje se tak hydrofobní povaha vláken.



### 1.3.3.6 Úprava peroxidem

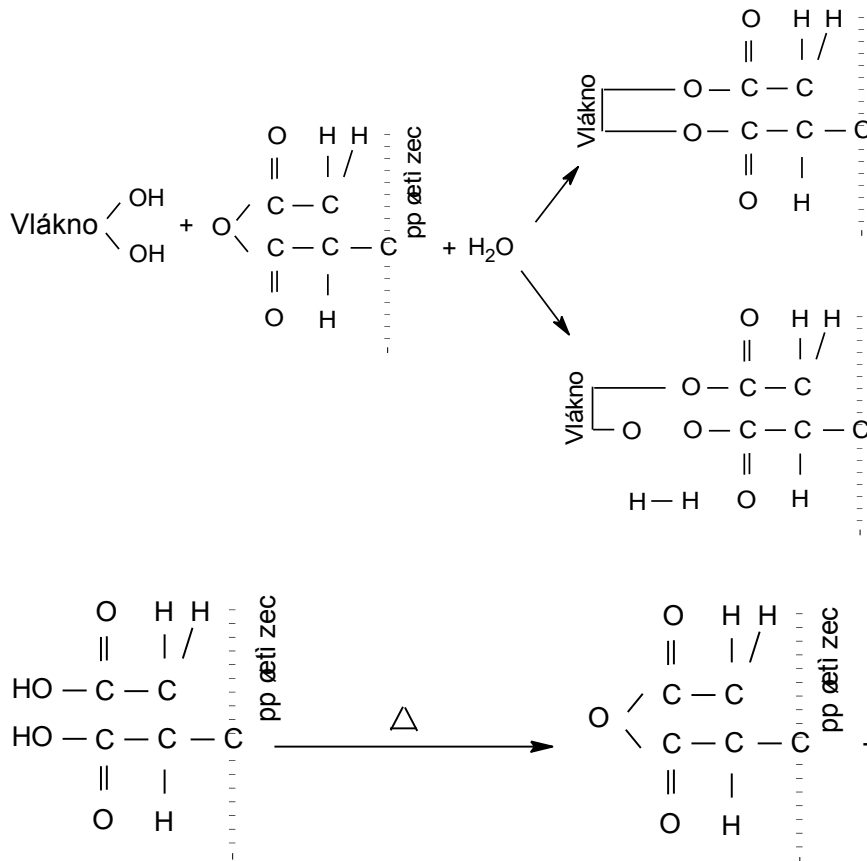
Metoda úpravy vláken pomocí peroxidu je postavena na reakci volných peroxidových radikálů s hydroxylovými skupinami. Tento proces snižuje tendenci vlákna absorbovat vlhkost a zlepšuje tepelnou stabilitu. [5]



R=peroxidová funkční skupina

### 1.3.3.7 Melainová reakční činidla

Úpravou pomocí anhydridu kyseliny maleinové dojde k její reakci spolu s hydroxylovými skupinami v amorfní celulózové struktuře. Dojde tak k odstranění hydroxylových OH skupin z buněčné stěny vlákna a tím snížení hydrofilní povahy vlákna. [5]



Výše byly sepsány nejběžnější možné modifikace přírodních vláken. Z provedeného výčtu se jako nejvhodnější pro použití jeví alkalická úprava a s tím spojená léčba silany, kdy poznatky takto nastaveného experimentu dosáhly nejlepšího výsledku.

Díky vědeckým pracím, které byly na VUT v minulých letech provedeny, byly jako ošetření přírodních vláken v praktické části zvoleny hydrofobizační přípravky na bázi silikonů – ty jsou z podstaty hydrofobní.

## 1.4 Rekapitulace výpočtových modelů pro transport tepla a vlhkosti

### 1.4.1 Výpočtové modely používané doposud

Vlhkost se v materiálech může pohybovat v kapalně či plynné formě s různými hnacími silami, kdy literatura předpokládá dvě nebo více možností pro transport vlhkosti.

#### 1.4.1.1 Glaser

Glaserova metoda například bere v úvahu transport vlhkosti pouze ve stavu páry. Celý výpočet je postaven na nalezení kondenzační oblasti uvnitř konstrukce a pro výpočet uvažují návrhové podmínky, jako jsou venkovní a vnitřní návrhová teplota a relativní vlhkost. Transportní parametry jsou zde konstantní jako tepelná vodivost či propustnost, přestože se jejich hodnota často mění s teplotou ale také obsahem vlhkosti. Výsledkem je pak zhodnocení, zda konstrukce nebude v zimním období ohrožena kondenzací, a pokud ano, tak tuto kondenzační zónu stanovit včetně míry kondenzace. Glaserova metoda však nestačí na určení, zda bude konstrukce zatěžována i jinými formami vlhkosti, jako jsou srážky, vzlínající vlhkost nebo stavební vlhkost, [11, 12, 22, 23]

Přestože tato metoda výpočtu trpí nedostatky popsány výše a nebere v úvahu hygroskopické materiály, kde se vlhkost hromadí v jejich porézním systému postupně v závislosti na vlhkosti okolního vzduchu, jedná se i tak o výpočetní metodu určenou pro všechny evropské země, včetně České republiky. [22]

#### 1.4.1.2 Hussein, Ricken, Kerestecioglu, Gu

Studie od Hussein a Rickena i metoda podle Kerestecioglu a Gu na rozdíl od Glaserovy metody je založena na výpočetní Crankeho metodě, využívají zjednodušené metody pro určení úložiště vlhkosti přes sorpční závislost vlhkosti na difuzním odporu páry. Tento výpočtový model uvažuje

kapilární vedení prostřednictvím algoritmu, který jakmile dosáhne kritického množství vlhkosti v číselné mřížce, rozděluje přebytečnou vodu do přilehlých prvků pomocí „kalkulativního odhazování“. Avšak vzhledem k tomu, že v tomto výpočtovém modelu není téměř vůbec brán v úvahu účinek transportu vlhkosti v kapalně formě, mají jen velice omezené možnosti využití.

#### 1.4.1.3 Krischer

Až Krischer teprve důkladně prostudoval vlhkostní pohyby v pórovitých materiálech. Zjistil, že existují dva mechanismy pro materiálovou vlhkost, které mohou působit proti sobě. Jedním je difuze páry a druhý nazval kapilární pohyb vody. Kapilární sání přisuzoval napětí, které se tvoří jako důsledek zakřivených vodních ploch v pórovitém systému vlhkého stavebního materiálu. Odvodil spojitost mezi obsahem vody a kapilárním tlakem, takže transport vlhkosti v kapalně oblasti může být popsán s obsahem vody jako hnací potenciál. Pro rozsah teplot, který je v zájmu stavební praxe použil Krischer Stefanovu difuzní rovnici, přičemž může být nahrazena Fickovou difuzní rovnicí, která slouží pro výpočet transportu vlhkosti v pórovitých materiálech. [22]

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (D_w \nabla w + \delta_p \nabla p) \quad (9)$$

$w$  ... množství vlhkosti [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$D_w$  ... koeficient kapilární vodivosti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$p$  ... parciální tlak vodní páry [ $\text{Pa}$ ]

$\delta_p$  ... propustnost vodní páry [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ ]

Na základě výpočtů z této rovnice byly vyvinuty počítačové programy pro výpočet přechodné teploty a vlhkostní toky ve stavebních prvcích.

#### 1.4.1.4 Graubel

Pro výpočet několikavrstvých částí, je nutné stanovit interakční konstanty. Používají se k odhadu účinků povlaků na absorpci vody nebo sušení na chování stavebních prvků. Graubel vypočítal a měřil experimentálně chování

dřevěných stavebních materiálů, které podrobil difuzi páry v teplotním gradientu.

Nevýhodou těchto modelů, které jsou založeny na rovnici (9), je nesouvislost obsahu vody ve vícevrstvých stavebních prvcích. Nastanou pak výrazné nesrovnalosti v množství vlhkosti na hranici mezi omítkou a zdivem a je tak nezbytné vypočítat transport vlhkosti přes přechodné funkce na hranicích materiálů. Dále také chybí přímá závislost mezi množstvím vody a hnací silou pro transport kapaliny – kapilární tlak. Z tohoto důvodu, použití obsahu vody jako vlhkostní potenciál vede k chybným odhadům. [22]

Kapilární sací napětí lze vypočítat pomocí Kelvinovy rovnice.

$$\varphi = \exp\left(-\frac{P_k}{\rho_w R_D T}\right) \quad (10)$$

$P_k$  ... kapilární tlak [Pa]

$\rho_w$  ... hustota vody [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$R_D$  ... obsah plynu pro vodní páru [ $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ]

$T$  ... teplota [K]

Většina izolačních materiálů nejsou kapilárně aktivní. Kapilární sací napětí tak nemůže být definováno. V takových materiálech také nedochází k transportu tekutin. Pokud se množství vody ve vztahu (10) nahradí kapilárním sacím napětím, dostaneme pak rovnici, která přihlíží k transportnímu koeficientu vztahující se ke kapilárnímu tlaku: [22]

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (\delta_p \nabla p + D_p \nabla P_k) \quad (11)$$

$w$  ... množství vlhkosti [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$p$  ... parciální tlak vodní páry [Pa]

$\delta_p$  ... propustnost vodní páry [ $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$ ]

#### 1.4.1.5 Rode, Nicolas

Jak Rodeho, tak Nicolasův model staví na této rovnici (11). Rode vztah rozděluje do samostatných rovnic pro páry a kapaliny, které jsou řešeny opakujícím se přizpůsobováním ve spojení s rovnicí pro vedení tepla. Nicolasův model už bere v úvahu i vliv pórů, přičemž ale jeho výpočty lze použít pouze na homogenní vzorky z písku nebo cementové malty. [22]

#### 1.4.1.6 Luik, de Vries

Další matematický model výpočtu Luika nebo Phillipa de Vriese je založen na jejich chápání pórovitého materiálu jako černou skříňku, ve které je vlhkost přepravována díky gradientu teploty a obsahu vlhkosti. Tato metoda výpočtu, která může být odvozena z termodynamických metod pro nevratné děje, vede k následujícímu popisu transportu vlhkosti.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (k_w \nabla w + k_\theta \nabla \theta) \quad (12)$$

*w...množství vody [kg/m<sup>3</sup>]*

*k<sub>w</sub>...transportní koeficient gradientu množství vody závislý na vlhkosti a teplotě [m<sup>2</sup>/s]*

*θ ... teplota [°C]*

*k<sub>θ</sub> ... transportní koeficient teplotního gradientu závislý na vlhkosti a teplotě [kg/(m·s·K)]*

Jak je vidět, tak každý ze dvou transportních koeficientů je závislý na obou potenciálech. Proto je prakticky nemožné určit tuto dvojí závislost přesně. Tato technika tedy byla používána pro výpočet pro homogenní materiály nebo písek, nikoliv pro vícevrstvé komponenty. [22]

V souhrnu lze říci, že pro výpočet transportu vlhkosti je třeba dvou nezávislých hnacích potenciálů, přičemž se nejčastěji jedná o teplotu, tlak par a sací napětí. Kapilární sací napětí však nemůže být definováno v suchých nebo kapilárně aktivních materiálech. Lze ho však nahradit relativní vlhkostí. Pokud tedy využijeme tlaku páry a relativní vlhkosti, dostaneme hnací potenciály, které se dají snadno změřit a usnadní to určení okrajových

podmínek. I přes tuto skutečnost však tento postup nebyl použit pro výpočet transportu vlhkosti. [22]

#### **1.4.2 Současný numerický výpočet pro přenos tepla a vlhkosti**

V roce 2002 Hartwig M. Künzeli, A. Holm a K. Sedlbauer vydali krátký článek o současných trendech v ochraně proti vlhkosti za použití tepelně vlhkostního modelování. Jako nejvíce vyhovující pro použití označili softwary WUFI, MATCH a Delphin. [20]

V České republice se nejčastěji využívá Glaserova metoda, popsána v normách ČSN 730540 – 4 Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody a ČSN EN ISO 13788 Tepelně-vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků - Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce - Výpočtové metody). Podle normy ČSN EN 15026 - Hodnocení šíření vlhkosti stavebními dílci pomocí numerické simulace, která ještě nebyla přeložena do českého jazyka, je však možné použití dynamické simulace pro výpočet šíření tepla a vlhkosti. Této normě vyhovuje software Wufi, který byl nedávno aktualizován ve verzi WUFI Pro 6.0. Všechny verze programu jsou přibližně v 8 jazycích, kdy rozšířeny byly i o češtinu. [21]

**1.4.2.1 WUFI**

Wufi neboli WUFIZ je zkratka v překladu pro přechodný jedno a dvourozměrný transport tepla a vlhkosti, navržený Hartwig M. Künzelem v roce 1995 v rámci jeho disertační práce. Jeho model vychází ze soustavy dvou diferenciálních rovnic:

$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (13)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat}))$$

$dH/dT$  ... akumulace tepla ve vlhkém materiálu [ $J/(m^3 \cdot K)$ ]

$dw/d\varphi$  ... akumulace vlhkosti v materiálu [ $kg/m^3$ ]

$\lambda$  ... součinitel tepelné vodivosti vlhkého materiálu [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$D_\varphi$  ... součinitel kapilárního transportu vlhkosti [ $kg/(m \cdot s)$ ]

$\delta_p$  ... součinitel difúzní propustnosti materiálu [ $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$ ]

$h_v$  ... měrné skupenské teplo [ $J/kg$ ]

$p_{sat}$  ... částečný tlak nasycené vodní páry [ $Pa$ ]

$T$  ... teplota [ $^{\circ}C$ ]

$\varphi$  ... relativní vlhkost [-]

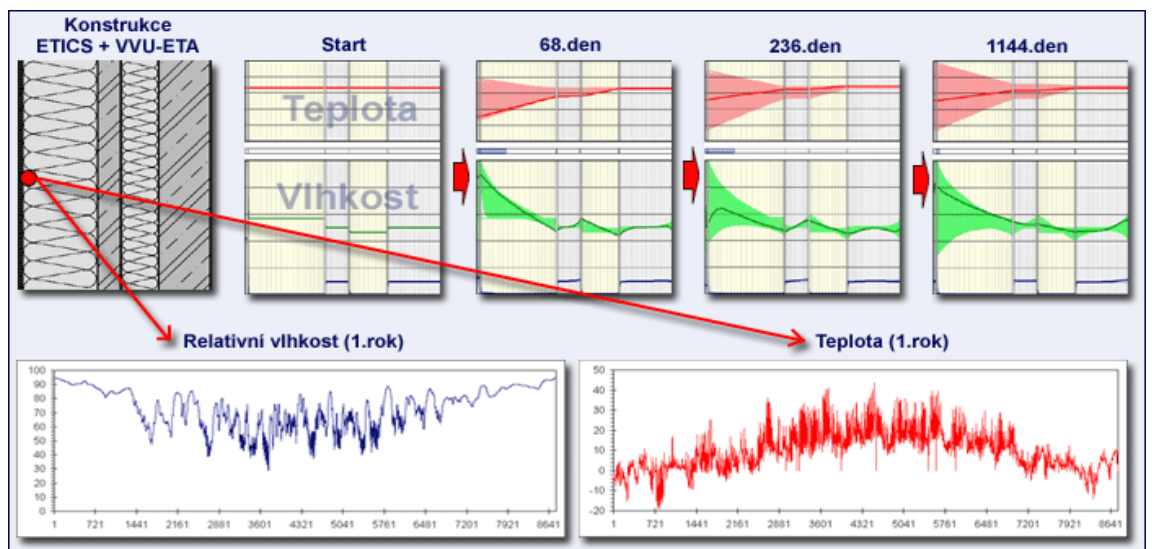
Neznámou v rovnicích zůstává pouze teplota, přesněji relativní vlhkost. Rovnice jsou i vzájemně svázány a to tak že:

- částečný tlak vodních par tak závisí na okamžité teplotě napříč konstrukcí
- součinitel tepelné vodivosti závisí na vlhkosti materiálu
- skupenské teplo závisí na množství vlhkosti



Hlavní výhody v použití Künzelova modelu jsou, že umožňuje:

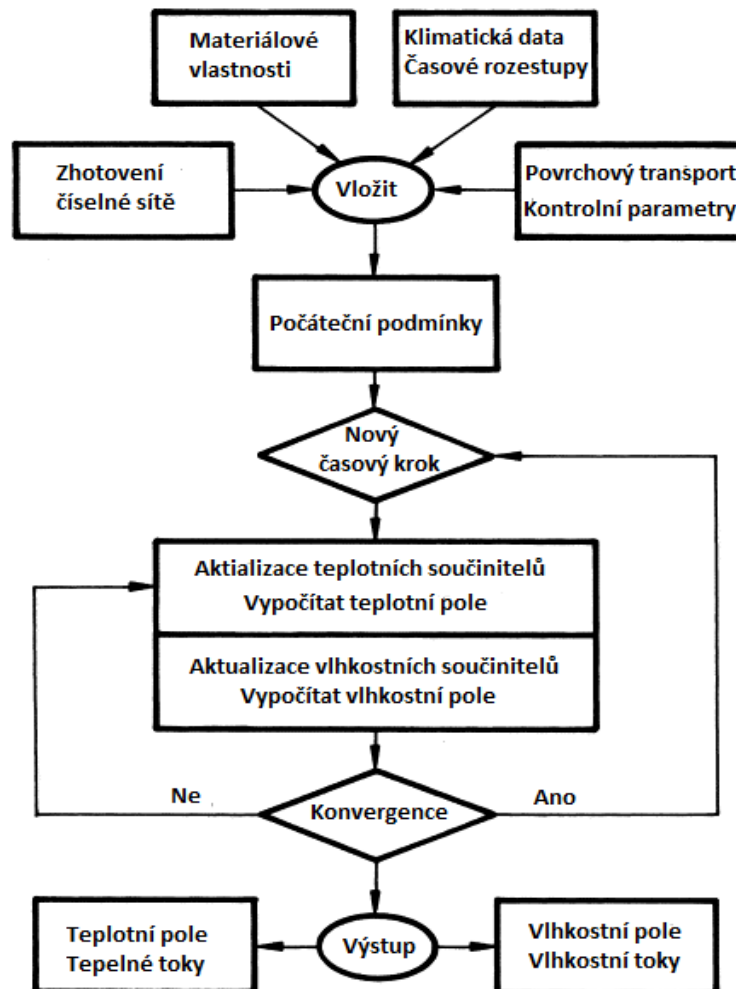
- simulaci šíření tepla a vlhkosti s jakýmkoliv časovým rozestupem, kdy běžně se volí 1 hodina
- do výpočtu lze zahrnout vliv slunečního záření a dlouhovlnného záření
- natočit konstrukci vůči světovým stranám
- uvažovat šířením vlhkosti porézním materiálem v kapalném stavu
- uvažovat závislost jak součinitele tepelné vodivosti, tak i faktoru difúzního odporu na množství vlhkosti [7, 19, 24]



Obr. 7 Příklad vyhodnocení výsledků pomocí softwaru WUFI [16]

### Vstupní data

Pro výpočet chování tepla a vlhkosti je třeba určit geometrii a složení stavební konstrukce a očekávané místní klimatické vlivy. Dále tepelně vlhkoštní vlastnosti daného stavebního materiálu, který je součástí konstrukce. Těmito vlastnostmi jsou například objemová hmotnost, pórovitost, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost a další. Musí se zvolit i klimatické okrajové podmínky jak vevnitř, tak venku a také časové rozestupy. Čím menší je budeme volit, tím blíže se výsledek bude blížit skutečnosti, ale za cenu zdlouhavějšího výpočtu. V úvahu můžeme brát i srážky a účinky záření. [9, 19]



Obr. 8 Metodika výpočtu při užití počítačového modelování [19]

Hartwig M. Künzel a Kurt Kiessl experimentálně ověřovali přesnost výpočtu podle softwaru WUFI s reálným vystavení materiálu slunečnímu záření a vlhkosti. Výsledky potvrdili platnost modelu, kdy nastavení správných okrajových podmínek zaručí opravdu přesné výsledky. Avšak autoři se shodují, že i ten nejlepší model není schopen plně nahradit test skutečnému vystavení vnějším podmínkám a vždy budou v praxi existovat účinky, se kterými model nebude schopen počítat. Proto je výsledek vždy pouze informativní a bez experimentálního ověření jím tedy jen odhadujeme, jak to v praxi bude vypadat. [9]

#### 1.4.2.2 Delphin

Jedná se opět o německý program pro transport vlhkosti a tepla v porézních materiálech. Historie samotného programu sahá do roku 1987 jako práce autora Johna Grunewalda. Tehdy se vyvinul jakýsi předchůdce nynějšího softwaru, kdy jako hlavní cíl byl přiblížit tuto problematiku studentům. Následně program prošel mnohými změnami, včetně různých programovacích jazyků. Jejich aktualizace byla důležitá pro urychlení výpočtu.

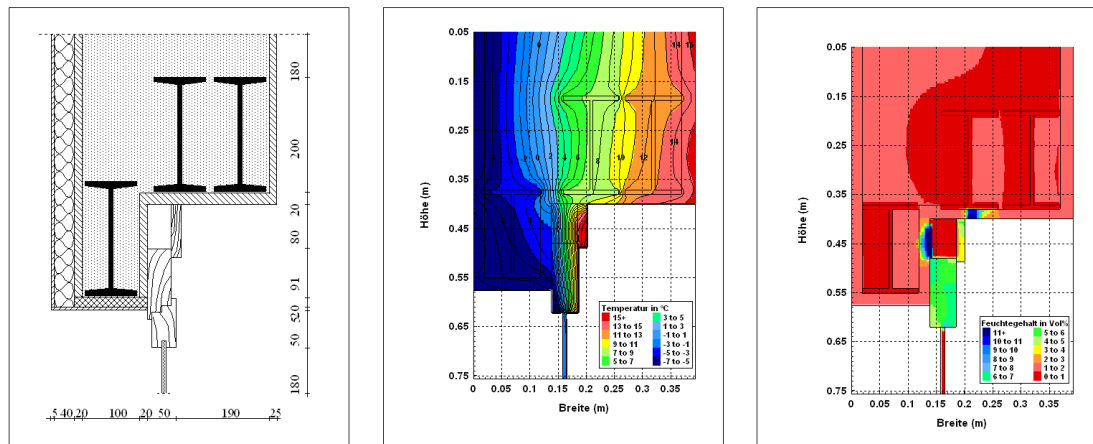
Program je založen na popisu vlhkosti prostřednictvím difuze par a kapilárních linií, na ukládání vlhkosti a tepelné vodivosti. Při transportu vlhkosti rozlišuje mezi kapalnou a plynnou fází.

Delphin se používá pro výpočet tepelných mostů a vyhodnocení vlhkosti v problémových oblastech, k výpočtu požadavků na vytápění se zohledněním vlhkosti a dále také k určení riziku vzniku plísní.

Program vyzdvihuje mezi své výhody jeho rychlost výpočtu, možnou změnou údajů materiálu, vlastní klimatické údaje, levné licence, přičemž pro studenty v rámci studia zdarma, možnost mít spuštěno několik výpočtů najednou a relativně jednoduché uživatelské rozhraní. Pro českého uživatele je nevýhoda absence výběru pracovat v českém jazyce, přičemž Delphin kromě německého jazyka obsahuje ještě jazyk anglický.

Vyhodnocení dostaneme v podobě 2-D nebo 3-D grafů a obrazů s širokým výčtem údajů o teplotě, vlhkosti, množství vody, stupni nasycení,

tvorbou ledu, kapilárním nasycením a podobně. Jak takový výstup z tohoto programu vypadá, vidíme na obrázku 9.[17, 18]



Obr. 9 Příklad vyhodnocení pomocí softwaru Delphin [17]

#### 1.4.2.3 Match

Samotný název je zkratkou pro *Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials* neboli Tepelně vlhkostní výpočty pro stavby z hygrokopických materiálů. Program vznikl v Dánsku v roce 1989 C. R. Pedersenem. Funguje na podobném principu jako WUFI, kdy volíme časové rozestupy, ve kterých se provádí vyhodnocení – standardně 1 hodina, kdy s tímto časovým rozestupem se udávají i meteorologické údaje venkovního prostředí. Do výpočtu je třeba vybrat ty průřezy, o kterých uvažujeme jako o kritických. Opět je nejdůležitější nastavit správné okrajové podmínky a materiálové charakteristiky. Výstupem je grafické vyhodnocení o množství vlhkosti, teplotě, tlaku páry a podobně.

Přestože je program stále ke koupi, od roku 2003 již nebyl aktualizován a v jeho výbavě chybí meteorologické údaje pro Českou republiku. [22, 23]

#### 1.4.2.4 Shrnutí numerických simulací

Výše byly představeny tři výpočetní modely, které se zdají být nejvhodnější pro použití. Avšak je patrné, že pro Českou republiku, kromě normou doporučené Glaserovy metody, je nejvhodnější použít software Wufi. Jako jediný byl rozšířen o český jazyk a obsahuje databázi vnitřních okrajových

podmínek a vnitřního vzduchu dle českých norem. Nicméně i počítačové simulace mají své výhody a nevýhody. [21]

### Výhody

- Naměřené výsledky se blíží skutečnosti – tato skutečnost umožní v případných rekonstrukcích již stávajících objektů pomoci s výběrem vhodných materiálů a tím také ušetřit jistou peněžní částku při provozu
- Programy umožňují simulovat děje, které by jinak bylo velmi obtížné ve skutečnosti naměřit, jako třeba zvolení okrajových podmínek pro jinou oblast. Díky těmto simulacím byla vyvinuta tzv. „chytrá parozábrana“ na českém trhu vystupující Isover Vario KM Duplex UV. Ta díky svému složení zaručí dynamické změny svých vlastností a propouští vlhkost podle toho, v jakém se nachází prostředí.
- Například u softwaru WUFI jsou jeho součástí i grafické výstupy jak v podobě čistého grafu, tak i videa. Na nich je zaznamenáno, jak se mění vlhkost a teplota ve stavební konstrukci v čase. [9, 10, 23]

### Nevýhody:

- Tím, jak se dynamické simulace tak výrazně blíží skutečnosti, jsou náročnější na vstupní údaje o vlastnostech daných materiálů v konstrukci. Běžně pro výpočet postačí součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/(m·K)] a faktor difúzního odporu  $\mu$  [ - ]. Avšak při použití určitých softwaru je už třeba dalších fyzikálních vlastností, jako tepelná kapacita, objemová hmotnost, nasákavost materiálu a další.
- Kladeny jsou i vyšší požadavky pro znalost okrajových podmínek, jako jsou vnější teplota vzduchu, relativní vlhkost prostředí, směr větru a jeho síla, dlouhovlnné záření, přímé sluneční záření.
- Podle toho, jaké máme vstupní data a požadavky, musíme počítat s určitou časovou periodou, kdy samotný výpočet potrvá. Výpočty pro simulaci transportu tepla a vlhkosti pro celou konstrukci mohou trvat i hodiny. [10, 23]

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 Metodika práce

Na základě vědeckých prací vykonaných na VUT v předchozích letech byl pro experimentální část zvolen vzorek tepelně izolačního pásu na bázi přírodních vláken z technického konopí. Jednalo se o vzorky izolačních rohoží firmy Izolace konopí CZ, s.r.o tloušťky 80 mm. Konkrétně se jednalo o vzorek Termo-konopí Premium, složený z 82 -85 % technického konopí, 10 – 15 % dvousložkového vlákna a 3 – 5 % sody, která složí jako protipožární ochrana. Objemová hmotnost uváděná výrobcem se pohybuje okolo 38 kg/m<sup>3</sup> a součinitel tepelné vodivosti 0,040 [W/(m·K)]. [40, 41]



*Obr. 10 Ilustrační foto použité izolační rohože z technického konopí [40]*

Dále byly vybrány 4 druhy impregnací dostupných na trhu. Přípravky se volily podle výsledků jak již zmíněných vědeckých prací, kde se nejlépe ověřila impregnace na textil.

Byly zvoleny tyto přípravky:

- Carbon Pro (dále jen CP) – tato impregnace na určená kůži a boty je vyráběná firmou Salzenbrodt GmbH & Co KG. Je extrémně hořlavá a při

vdechnutí zdraví škodlivá. Obsahuje alkany (25 – 50 %), butan (20 – 40 %), benzínovou ropnou frakci (10 – 25 %), propan (2,5 – 5 %), n-butyl-acetát (2,5 – 5 %) a dimethoxymethan (2,5 – 10 %). [42]

- Fabsil (dále jen FA) – impregnační přípravek na bázi silikonů, slouží k ochraně proti vodě na technické textilie jako stany či batohy. Je vyráběn anglickou firmou Grangers International Ltd. Jedná se o vysoce hořlavý výrobek, tudíž je se nesmí vystavovat slunečnímu záření a teplotám vyšším než 50 °C. Je zdraví škodlivý a vyžaduje použití ochranných rukavic při aplikaci. Hlavní složku tvoří butan a nafta. [43, 44]
- Cocciné Antiacqua (dále jen CO) – jedná se o přípravek na bázi izopropylalkoholu vyráběný polskou firmou Dakoma [45]
- Deichmann Protection (dále jen DE) – výrobek distribuuje firma Salzenbrodt GmbH & Co KG jako ochranný prostředek na boty proti vlhkosti. Výrobek je vysoce hořlavý a při styku s pokožkou může způsobit podráždění. Tato impregnace v podobě aerosolu obsahuje alkany, cykloalkany, isoalkany, benzen (všechny složky v 50 – 100 %), propan a butan (25 – 50 %) a n-butyl-acetát (< 2,5 %). [46]



Obr. 11 Použité hydrofobizační přípravky

Vzhledem k tomu, že se ve všech případech jednalo o přípravky na bázi aerosolu, byl pro aplikaci na tepelně izolační pás použit nástřík. Ten se prováděl ve dvou aplikačních množstvích – 1 % a 2 % z hmotnosti vzorku. Vzorky byly po nástříku ponechány ve standardním laboratorním prostředí (teplota  $20\pm 2^\circ\text{C}$ ; relativní vlhkost  $50\pm 3\%$ ) a následně byly dosušovány v sušárně při teplotě  $105^\circ\text{C}$  do konstantní hmotnosti. Na vzorcích bylo provedeno:

- stanovení tloušťky, lineárních rozměrů a stanovení objemové hmotnosti,
- stanovení rovnovážné sorpční vlhkosti,
- stanovení krátkodobé nasákavosti,
- stanovení součinitele tepelné vodivosti ve vysušeném stavu,
- stanovení součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti.

V poslední řadě byly shrnuty výsledky provedených zkoušek a také srovnání výsledků s referenčními vzorky.

Tab. 3 Rozdělení vzorků dle množství nanesené impregnace

Impregnace	Vzorek	Hmotnost [g]	Impregnace	Hmotnost po naimpregnování [g]
<b>REFERENČNÍ</b>	<b>1</b>	-	-	-
	<b>2</b>	-		-
<b>CARBON PRO</b>	<b>1</b>	231,92	1%	234,24
		236,74		239,11
	<b>2</b>	225,65	2%	230,16
		222,48		226,93
<b>FABSIL</b>	<b>1</b>	228,93	1%	231,22
		224,15		226,39
	<b>2</b>	235,46	2%	240,17
		225,33		229,84
<b>DEICHMANN</b>	<b>1</b>	222,98	1%	225,21
		225,01		227,26
	<b>2</b>	222,81	2%	227,27
		222,01		226,45
<b>COCCINÉ</b>	<b>1</b>	222,32	1%	224,54
		226,28		228,54
	<b>2</b>	227,09	2%	231,63
		232,95		237,61



## 2.2 Zkoušení vzorků

Zkoušky byly provedeny vždy dle příslušných norem a byl dodržen pracovní postup zkoušení. Provedla se tato měření:

- Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti (ČSN EN 822, ČSN EN 823, ČSN EN 1602),
- Stanovení krátkodobé nasákavosti (ČSN EN 1609),
- Stanovení rovnovážné sorpční vlhkosti (ČSN EN ISO 12571)
- Stanovení součinitele tepelné vodivosti (ČSN EN 12667, ČSN 72 701 – 3, ISO 8301).

### 2.2.1 Stanovení lineárních rozměrů a tloušťky

#### 2.2.1.1 Stanovení délky a šířky

Lineární rozměry byly stanoveny dle norem ČSN EN 822, Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení délky a šířky, kdy délka je charakterizována jako delší lineární rozměr plochy zkušebního tělesa a šířka jako kratší lineární rozměr. Šířka je měřena kolmo k délce. [36]

#### Zkušební pomůcky

- Kovové pravítko s přesností 0,5 mm
- Rovinný povrch

#### Postup stanovení

Vzorky se položí na rovinný povrch a změří se délka a šířka. Pro vzorky, které mají oba rozměry menší 1,5 metru, stačí provést jedno měření délky a šířky, oba rozměry zaokrouhleny na nejbližší 1 mm.

### 2.2.1.2 Stanovení tloušťky

Jedná se lineární rozměr měřený kolmo k délce a šířce. Tloušťka  $d$  se stanovuje dle normy ČSN EN 823, Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky. [39]

#### Zkušební pomůcky a postup stanovení

K vyhodnocení tloušťky vzorků je určen měřicí přístroj včetně úchylkoměru a přítlačné desky. Úchylkoměr je spojen se základní deskou. Deska by měla být přibližné velikosti, jako zkušební těleso. Dále je přístroj opatřen přítlačnou deskou, která na zkušební těleso působí tlakem  $(50 \pm 5)$  Pa, kdy se odečítá hodnota z úchylkoměru, který je umístěn uprostřed tělesa. Výsledná tloušťka se zaokrouhlí na 0,1 mm.

### 2.2.2 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost zkušebních vzorků byla stanovena dle normy ČSN EN 1602, Tepelně izolační výrobky – Stanovení objemové hmotnosti. [37]

#### Zkušební pomůcky

- váhy s přesností 0,5 %
- zařízení pro měření lineárních rozměrů (v našem případě kovové pravítko)

#### Postup stanovení

Na zkušebních tělesech se v první řadě stanovily lineární rozměry dle normy ČSN EN 822. Poté se z naměřených rozměrů vypočítá objem vzorku a vzorek se zváží v kilogramech s přesností 0,5 %. Objemová hmotnost se určí dle vztahu:

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad (14)$$

$\rho_a$  ... objemová hmotnost vzorku [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m$  ... hmotnost zkušebního vzorku [ $\text{kg}$ ]

$V$  ... objem zkušebního vzorku [ $\text{m}^3$ ]

### 2.2.3 Stanovení krátkodobé nasákavosti

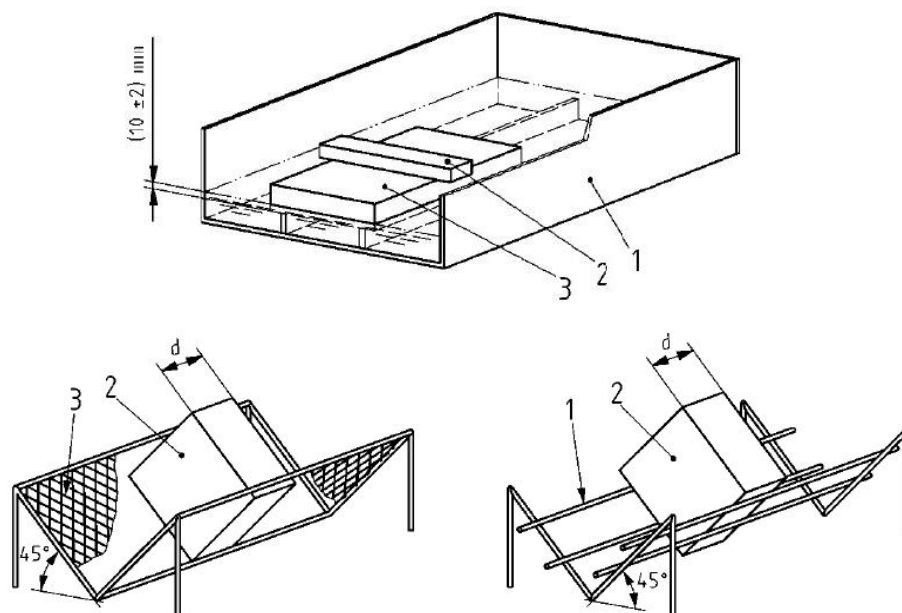
Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 1609: Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření. [15]

#### Zkušební pomůcky

- váhy s přesností na 0,1 g
- nádrž s vodou
- voda o teplotě  $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$
- zařízení pro odkapání přebytečné vody

#### Zkušební tělesa

Zkušební vzorky byly čtvercového průřezu o stranách  $(300 \pm 1)$  mm. Vzorky se poté zváží s přesností na 0,1 g a zaznamená se tak počáteční hmotnost  $m_0$ .



Obr. 12 Příklad způsobu uložení ve vodě a následný proces odkapání dle normy ČSN EN 1609

## Postup stanovení

Pro provádění měření existují dvě metody stanovení. Metoda A (odkapání) a metoda B (odečtení počátečního zvlhčení). Pro tuto praktickou část byla zvolena metoda A.

Polovina vzorků se položí největší plochou směrem nahoru, druhá polovina směrem dolů. Vzorky se vloží do prázdné nádrže a zatíží se, aby po zaplnění dna vodou zůstaly částečně ponořeny. Hladina vody by neměla vystoupat výše než  $(10 \pm 2)$  mm. V průběhu zkoušky musí být zajištěna stálost vodní hladiny. Vzorky se po 24 hodinách vyjmou z nádrže a nechají se  $(10 \pm 5)$  minut odkapat. Poté se vzorky zváží a stanoví se tak hmotnost  $m_{24}$ . Podle normově daného vzorce se vypočítá krátkodobá nasákavost  $W_p$ .

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší  $0,01 \text{ kg/m}^2$ .

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad (15)$$

$W_p$  .... krátkodobá nasákavost [ $\text{kg/m}^2$ ]

$m_{24}$  ... hmotnost po 24 hodinách částečného ponoření [g]

$m_0$  .... počáteční hmotnost vzorku [g]

$A_p$  ... plocha ponořené části vzorku [ $\text{m}^2$ ]

### 2.2.4 Stanovení rovnovážné sorpční vlhkosti

Rovnovážná sorpční vlhkost byla stanovena dle normy ČSN EN ISO 12571, Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hydroskopických sorpčních vlastností. [38]

### Zkušební pomůcky

- klimatizační komora
- váhy s přesností  $0,01 \%$  hmotnosti zkušebního vzorku

## Postup stanovení

Prostředí v klima komoře bylo nastaveno na 23 °C, 50 % a 80 % relativní vlhkosti vzduchu. Vzorky byly nejdříve vysušeny a zváženy a takto se vložili do klima komory. Opakovaně se převažují až do ustálení hmotnosti. Hmotností vlhkost zkušebního tělesa se určí dle vztahu:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (16)$$

*u ... hmotnostní vlhkost [kg/kg]*

*m<sub>0</sub> ... hmotnost vysušeného vzorku [kg]*

*m ... hmotnost vlhkého vzorku [kg]*

## 2.2.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

V praxi lze součinitel tepelné vodivosti stanovit různými způsoby, které se od sebe liší teplotním stavem vzorku v průběhu měření, ale i způsobem jeho stanovení a vyhodnocením.

V experimentální části byla pro stanovení součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/(m·K)] vybrána stacionární metoda v souladu s ČSN EN 12667 podle ISO 8301 tedy dle normy ČSN 72 7012 – 3: Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu - Metoda desky – část 3: Metoda měřidla tepelného toku.

Stacionární metody obecně vychází z principu ustáleného teplotního stavu měřeného vzorku. Při běžných podmínkách je ale tento stav stěží dostupný, proto se jako stacionární stav uvažuje takový, kdy je změna teploty za definovaný časový úsek menší, než smluvně definovaná teplotní změna.

Princip metody je založen na vyvolání ustáleného tepelného stavu a na základě průměrných hodnot:

- výstupního napětí měřidla tepelného toku,
- kalibrační konstanty měřidla tepelného toku,
- teploty vztažené plochy teplého povrchu zkušební vzorku,
- teploty vztažené plochy chladného povrchu zkušební vzorku
- tloušťky zkušební vzorku

Výpočtem pak lze stanovit součinitel tepelné vodivosti. Při měření musí být zajištěna konstantní teplota chladné a teplé desky. Pro praktické měření byl použit přístroj Lambda 2300 Holometrix Micromet a Lasercomp Fox 630. Ty automaticky na displeji stanoví hodnotu součinitele tepelné vodivosti. [14]

## 2.3 Provádění zkoušek a jejich výsledky

Veškeré zkoušky a stanovení byly provedeny v souladu s normami: ČSN EN 822, ČSN EN 823, ČSN EN 1602, ČSN EN 12667, ISO 8301, ČSN 72 7012 – 3, ČSN EN ISO 12571, ČSN EN 1609.

### 2.3.1 Stanovení lineárních rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti

Šířka a délka zkušebních vzorků byla vždy měřena na třech místech kovový pravítkem o přesnosti 0,5 mm. Z takto naměřených hodnot se poté stanovily průměry a zaokrouhleny byly na nejbližší 1 mm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.

V rámci provedené praktické části byla tloušťka vzorků určena dle vyhodnocení přístrojů pro stanovení součinitele tepelné vodivosti, kdy tato zařízení samy zkušební tělesa podrobí příslušnému tlaku a vyhodnotí tloušťku vzorku.

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno dle příslušného vztahu viz (14) z hmotností vysušených vzorků a lineárních rozměrů včetně tloušťky vzorku. Výsledné hodnoty objemových hmotností jsou uvedeny v následující tabulce. (viz Tab. 4)

Tab. 4 Hodnoty objemových hmotností stanovených na vysušených vzorcích

Vzorek	m [g]	l [mm]	b [mm]	d [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
REF	218,02	293	292	69,97	36
CP-1	218,52	301	296	70,92	35
CP-2	212,27	303	291	70,12	34
FA-1	215,26	305	286	70,27	35
FA-2	221,49	294	303	69,92	36
DE-1	209,69	295	287	70,06	35
DE-2	212,97	294	295	69,96	35
CO-1	209,37	300	284	69,99	35
CO-2	211,83	294	294	69,92	35

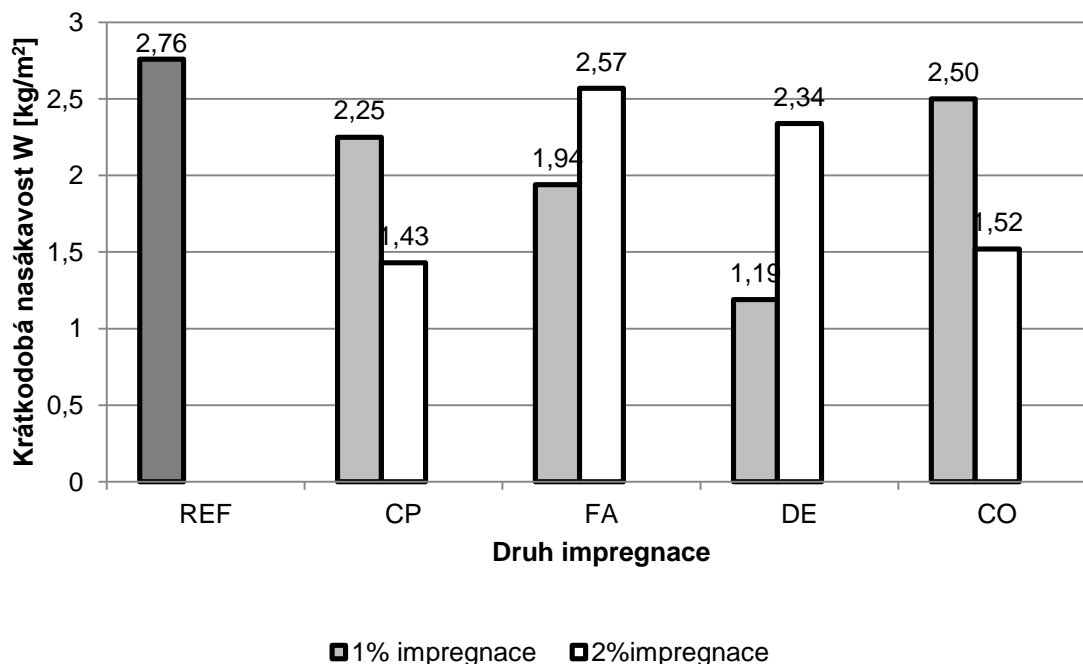
Výsledné objemové hmotnosti ve vysušeném stavu se pohybují vždy kolem 35 kg/m<sup>3</sup>, kdy výrobcem udaná objemová hmotnost je 38 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.3.2 Stanovení krátkodobé nasákavosti

Při stanovení krátkodobé nasákavosti byly vzorky uloženy do nádob s vodou, kdy hladina vody se udržovala ( $10 \pm 2$ ) mm od spodního okraje zkušební vzorku. Takto byly ponechány 24 hodin. Poté se 10 minut nechaly odkapat na roštu ve sklonu 45° a nakonec se vzorky zvažily. Výpočtem viz (15) se pak stanovila hodnota krátkodobá nasákavost  $W_p$  [kg/m<sup>2</sup>].

Tab. 5 Vstupní hodnoty včetně výsledné krátkodobé nasákavosti  $W$  [kg/m<sup>2</sup>]

Vzorek	$m_0$ [g]	l [mm]	b [mm]	$m_{24}$ [g]	$A_p$ [m <sup>2</sup> ]	$W$ [kg/m <sup>2</sup> ]
REF	234,1	293	292	470,1	0,08556	<b>2,76</b>
CP-1	232,7	301	296	433,3	0,08909	<b>2,25</b>
CP-2	228,0	303	291	353,9	0,08871	<b>1,43</b>
FA-1	230,5	305	286	400,1	0,08723	<b>1,94</b>
FA-2	238,1	294	303	467,3	0,08908	<b>2,57</b>
DE-1	224,4	295	287	324,9	0,08467	<b>1,19</b>
DE-2	228,8	294	295	431,6	0,08673	<b>2,34</b>
CO-1	225,5	300	284	438,3	0,08520	<b>2,50</b>
CO-2	226,5	294	294	357,5	0,08644	<b>1,52</b>



Graf 1 Srovnání hodnot krátkodobé nasákavosti dle druhu a množství použité impregnace

Z výsledků stanovení krátkodobé nasákavosti lze říci, že u všech vzorků s nanesenou hydrofobizační úpravou došlo ke snížení krátkodobé nasákavosti oproti referenčnímu vzorku. Referenční vzorek vykazoval hodnotu krátkodobé nasákavosti  $2,76 \text{ kg/m}^2$ , přičemž nejlepšího výsledku dosáhl vzorek DE-1 a to  $1,19 \text{ kg/m}^2$ , přestože na něj bylo nanášeno jen 1 % impregnačního prostředku.

Předpoklad byl, že větší množství impregnačního prostředku povede k výraznějšímu snížení krátkodobé nasákavosti. Nicméně to vyvracejí hned dva použité prostředky – FA-1 a již zmíněný DE-1. Tato anomálie mohla vzniknout špatným provedením zkoušky, kdy vodní hladina mohla být níže než požadovaných  $(10 \pm 2) \text{ mm}$ . Dle mého názoru by to ale platilo v případě, že by právě tyto dva vzorky byly uloženy v nádobě spolu. Lze tedy jen usuzovat, že vyšší množství těchto dvou prostředků nezaručuje ono snížení krátkodobé nasákavosti, ale má opačný efekt.

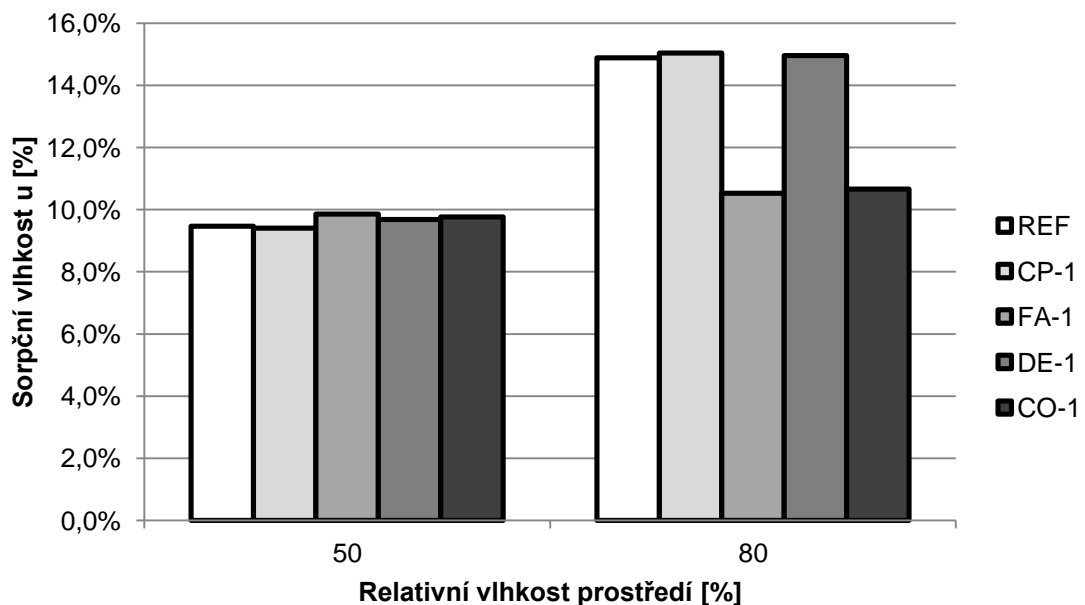


### 2.3.3 Stanovení rovnovážné sorpční vlhkosti

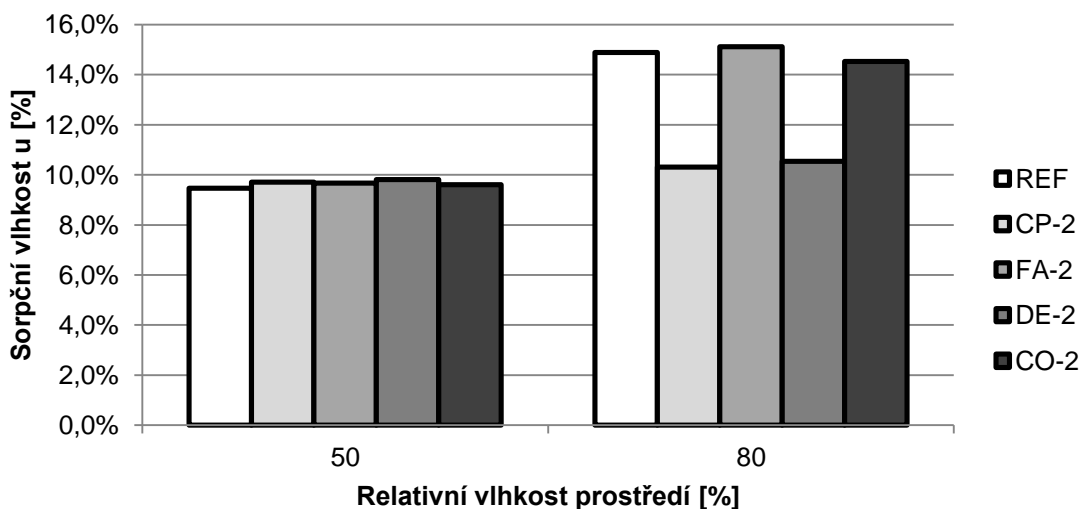
Stanovení bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 12571. Vzorky byly vždy uloženy v klimatické komoře o dané teplotě a relativní vlhkosti vzduchu a postupně váženy do ustálení hmotnosti. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti jsou uvedeny v následující tabulce. (viz Tab. 7)

Tab. 6 Vypočítané hodnoty rovnovážné sorpční vlhkosti podle relativní vlhkosti prostředí

Vzorek	Vysušený	Relativní vlhkost prostředí [%]	
		50	80
REF	0	9,5%	14,9%
CP-1	0	9,4%	15,0%
CP-2	0	9,7%	10,3%
FA-1	0	9,9%	10,5%
FA-2	0	9,7%	15,1%
DE-1	0	9,7%	15,0%
DE-2	0	9,8%	10,5%
CO-1	0	9,8%	10,7%
CO-2	0	9,6%	14,5%



Graf 2 Hodnoty sorpční vlhkosti dle relativní vlhkosti prostředí pro vzorky s použitým množstvím impregnace 1 %



Graf 3 Hodnoty sorpční vlhkosti dle relativní vlhkosti prostředí pro vzorky s použitým množstvím impregnace 2 %

Dle stanovených hmotnostních vlhkostí není v případě použitého množství impregnačního prostředku oproti referenčnímu vzorku vidět viditelný rozdíl při relativní vlhkosti prostředí 50 %. (viz Graf 2, Graf 3)

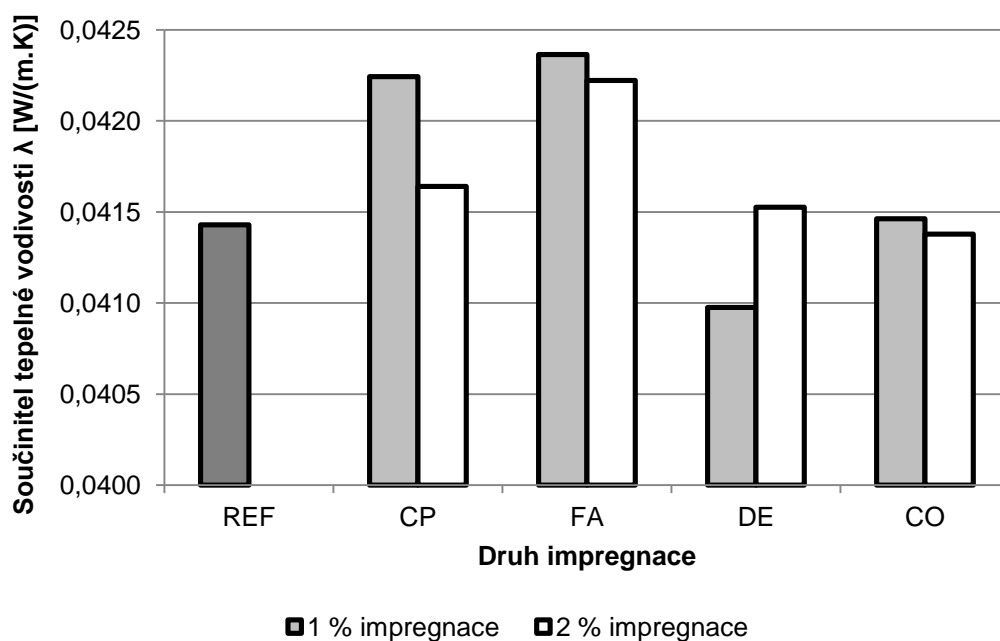
Při relativní vlhkosti prostředí 80 % a množství naneseného prostředku 1 %, tak nejmenší hmotnostní vlhkost vykazovaly vzorky FA-1 a CO-1 s 10,5% a 10,7 %. Při stejné vlhkosti prostředí, ale s 2 % naneseného impregnačního prostředku nejlépe vyšly vzorky CP-2 a DE-2 s 10,3 % a 10,5 %. U některých vzorků dokonce došlo ke zvýšení rovnovážné sorpční vlhkosti (CP-1, DE-1, FA-2, CO-2) oproti referenčnímu vzorku.

### 2.3.4 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

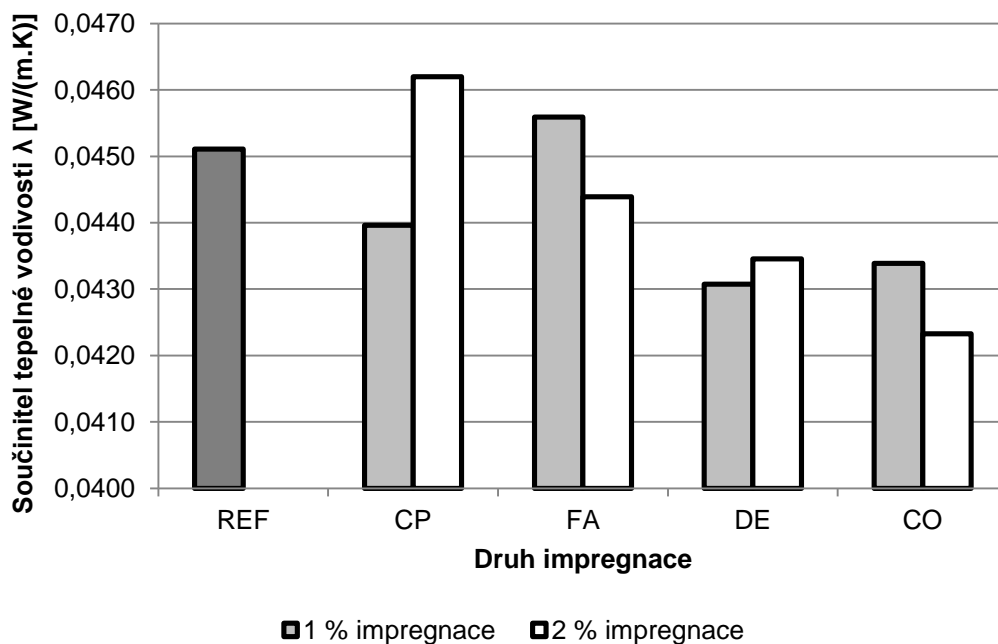
Součinitelé tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/(m·K)] zkušebních vzorků byly stanoveny dle ČSN EN 12667, ISO 8301 a ČSN 72 7012 – 3. Měření se prováděly na dvou přístrojích: Přístroj Lambda 2300 Holometrix Micromet a Lasercomp Fox 630. Měření byla provedena vždy při střední teplotě +10°C a teplotním spádu 10°C.

Tab. 7 Průměrné hodnoty součinitelů tepelné vodivosti stanovených na vzorcích ve vysušeném stavu a při 50 % a 80 % relativní vlhkosti vzduchu

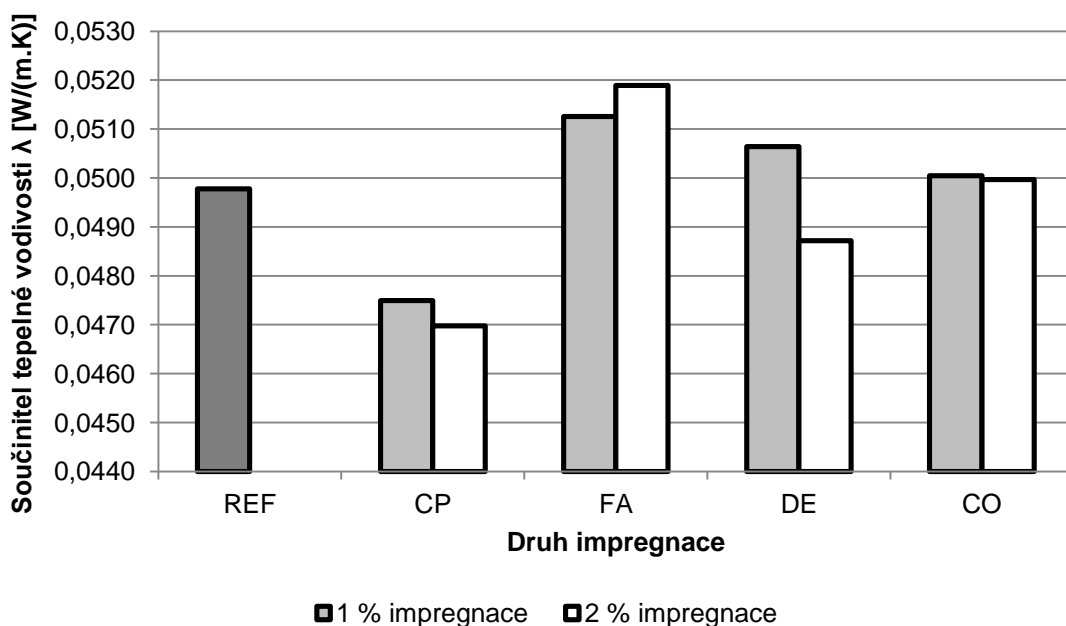
Vzorek	Relativní vlhkost vzduchu [%]		
	0	50	80
REF	0,0414	0,0451	0,0498
CP-1	0,0422	0,0440	0,0475
CP-2	0,0416	0,0462	0,0476
FA-1	0,0424	0,0456	0,0513
FA-2	0,0422	0,0444	0,0519
DE-1	0,0410	0,0431	0,0506
DE-2	0,0415	0,0435	0,0487
CO-1	0,0415	0,0434	0,0500
CO-2	0,0414	0,0423	0,0500



Graf 4 Přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti u vzorku o různém množství impregnace ve vysušeném stavu

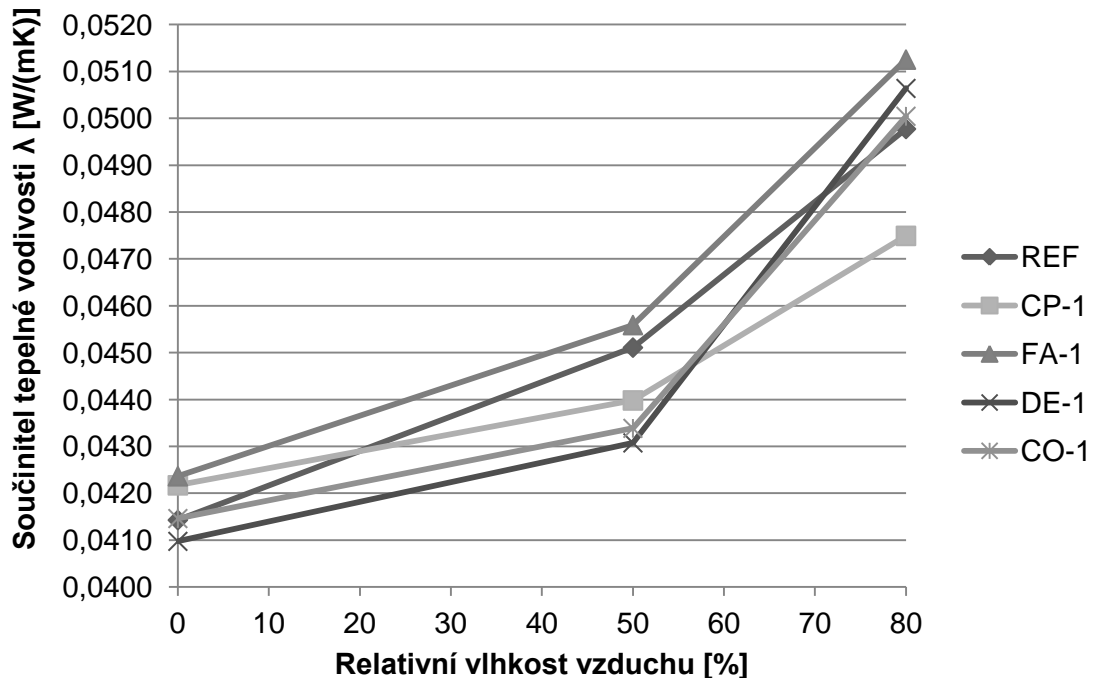


Graf 5 Přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti u vzorku o různém množství impregnace při relativní vlhkosti prostředí 50 %

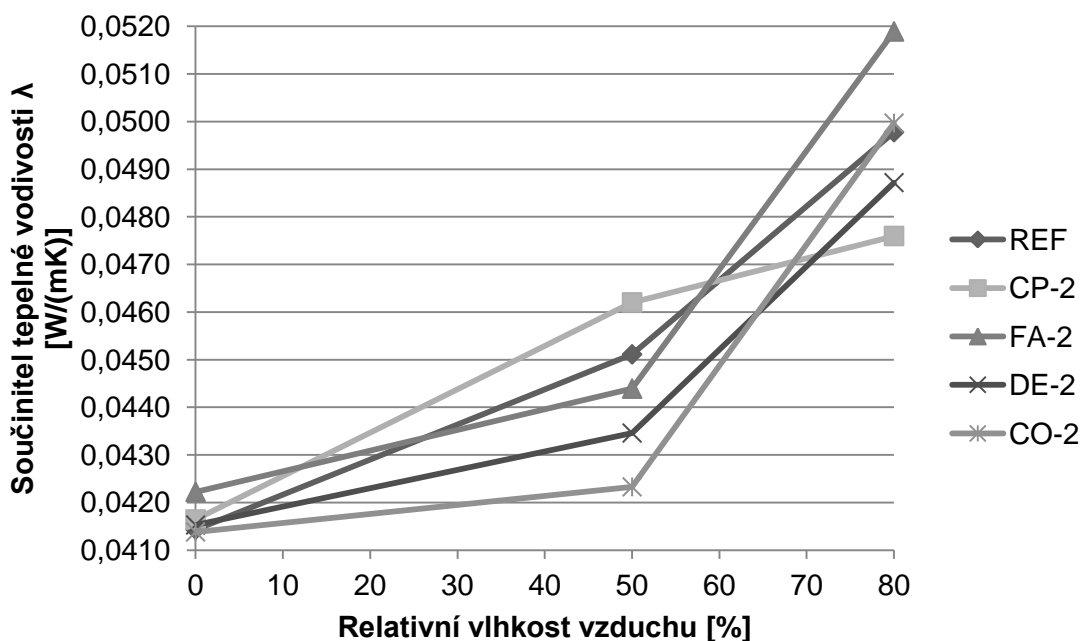


Graf 6 Přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti u vzorku o různém množství impregnace při relativní vlhkosti prostředí 80 %

Ve vyobrazených grafech 4 – 6 jde vidět, jak se měnila hodnota součinitelů tepelné vodivosti dle druhu použité impregnace a také dle jejího naneseného množství. Dále budou vyobrazeny grafy závislostí součinitelů tepelné vodivosti dle množství a druhu použité impregnace na relativní vlhkosti prostředí.



Graf 7 Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí při množství použité impregnace 1 %

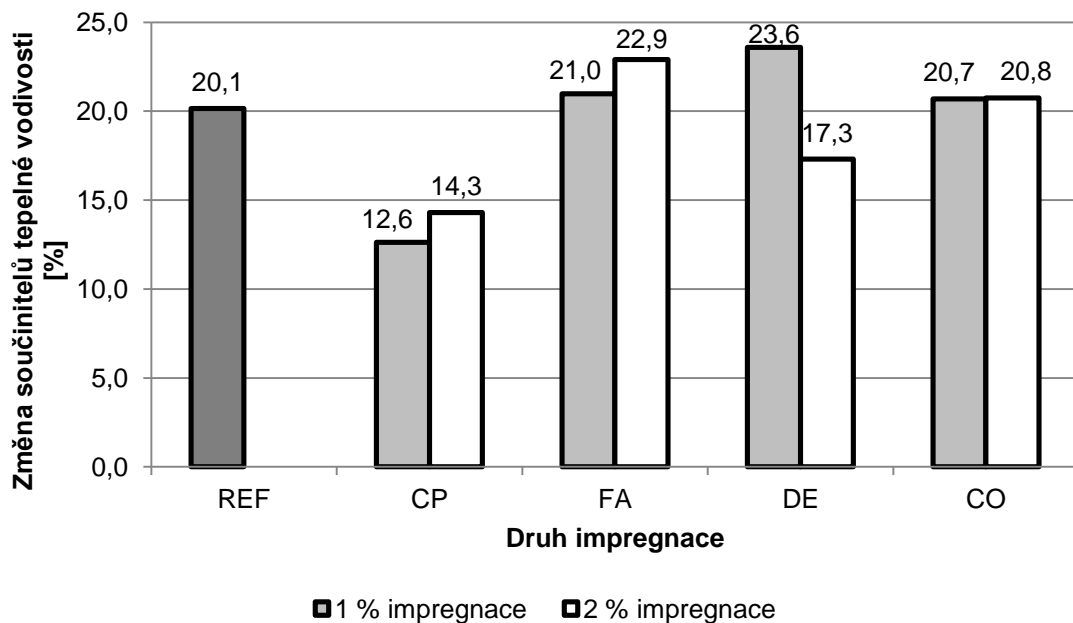


Graf 8 Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí při množství použité impregnace 2 %

Ze stanovených hodnot součinitelů tepelné vodivosti ať už z tabulky, nebo grafického vyhodnocení jde vidět, že se vzrůstající relativní vlhkostí prostředí roste i hodnota součinitele tepelné vodivosti. Jako nejlepší se jeví vzorek CP, a to jak při použitém množství impregnačního prostředku 1 %, tak i u množství 2 %, kdy jeho hodnoty součinitele tepelné vodivosti ve vlhkém prostředí dosahují nejnižší hranice, oproti všem ostatním zkušebním vzorkům včetně referenčního.

Vzorek opatřený prostředkem FA vykazuje ve vlhkém prostředí dokonce vyšších hodnot součinitele tepelné vodivosti, oproti referenčnímu vzorku.

Z obou grafů (viz Graf 7, Graf 8), které jsou uvedeny výše, můžeme sledovat rostoucí hodnotu součinitele tepelné vodivosti se zvyšující se relativní vlhkostí prostředí. Dále se procentuálně zhodnotila poměrná změna součinitelů tepelné vodivosti ve vlhkém stavu tj. při rovnovážné sorpční vlhkosti  $u_{23,80}$ , oproti stavu suchému.



Graf 9 Procentuální změna hodnot součinitelů tepelné vodivosti

Ze srovnání hodnot součinitelů tepelné vodivosti ve vysušeném stavu (*Graf 4*) s jeho hodnotami ve stavu vlhkém (*Graf 6*) jde vidět, jaký vliv měla ošetření jednotlivými druhy impregnace. Z výsledků vyobrazených v grafu 9 lze konstatovat, že nejmenší rozdíly mezi součinitelem tepelné vodivosti ve vlhkém a suchém stavu dosáhly vzorky ošetřené přípravkem CP a to v obou hmotnostních koncentracích. Tento výsledek šlo předpokládat již z grafů závislosti součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí, kde tento přípravek dosáhl nejlepších výsledků. Dále nejmenší rozdíl hodnot vykazoval již jen vzorek DE s 2 % naneseného prostředku. U zbytku vzorků se rozdíly mezi součinitelem tepelné vodivosti ve vlhkém a v suchém stavu pohybovaly výše, než je tomu u referenčního vzorku.

Konečné srovnání všech naměřených hodnot z praktické části bude shrnuto v následující tabulce.

Tab. 8 Konečné porovnání všech naměřených hodnot

Vzorek	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{\text{vysušený}}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{\text{vlhký}}$ [W/(m·K)]	W [kg/m <sup>2</sup> ]	$u_{23,80}$ [%]
REF	36	0,0414	0,0498	2,76	14,9
CP-1	35	0,0422	0,0475	2,25	15,0
CP-2	34	0,0416	0,0476	1,43	10,3
FA-1	35	0,0424	0,0513	1,94	10,5
FA-2	36	0,0422	0,0519	2,57	15,1
DE-1	35	0,0410	0,0506	1,19	15,0
DE-2	35	0,0415	0,0487	2,34	10,5
CO-1	35	0,0415	0,0500	2,50	10,7
CO-2	35	0,0414	0,0500	1,52	14,5

## Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou šíření tepla a vlhkosti v tepelně izolačních materiálech na bázi přírodních vláken. Z dostupných plodin se pro tepelně izolační účely využívají hlavně technické konopí a len. Problémem je však malá odolnost těchto materiálů vůči působení vlhkosti. Přírodní vlákna obsahují hydroxylové skupiny, které pak přitahují vodu a vlákna následně nabývají na jejich objemu. Pokud se sníží množství hydroxylových skupin, bude tak vlákno proti vlhkosti odolnější. Tohoto dosáhneme modifikací přírodních vláken, kdy několik těchto metod je v práci blíže popsáno. Jako nejúčinnější se dle experimentálních poznatků zahraničních prací jeví alkalická úprava za současného ošetření silany.

Dále je třeba posoudit výpočtem vhodnost použití těchto tepelně izolačních materiálů do konstrukce z pohledu transportu tepla a vlhkosti. Přiblížena je Glaserova metoda, která se používá hlavně pro svůj jednoduchý výpočet a je založena na návrhových okrajových podmínkách. Výsledek je pak ale nedostatečný, a pokud se chceme přiblížit reálnému chování, je už zapotřebí užít dynamických simulací, které jsou schopny do výpočtu zahrnout například i sluneční záření a uvažovat s transportem vlhkosti porézním materiálem v podobě kapaliny. Představeny jsou programy Wufi (Hartwig M. Künzle), Delphin (John Grunewald) a Match.

V experimentální části se posuzuje vliv jednotlivých druhů použitých hydrofobizačních prostředků v různých aplikovaných množstvích na vzorky tepelně izolačních rohoží z technického konopí z pohledu nasákavosti, součinitele tepelné vodivosti ve vysušeném a vlhkém stavu a rovnovážné sorpční vlhkosti. Bylo použito čtyř impregnačních prostředků běžně dostupných na trhu. Jednalo se o Carbon Pro – impregnace na kůži a boty, Fabsil – přípravek na bázi silikonů k ochraně technických textilií, Deichmann Protection a Cocciné – obě impregnace na obuv.

Z pohledu krátkodobé nasákavosti lze vidět pozitivní vliv nanesených hydrofobizačních přípravků na výsledné hodnoty oproti referenčnímu vzorku. Jako nejúčinnější se jeví použití Carbon Pro v množství naneseného impregnačního prostředku 2 %, kdy hodnota krátkodobé nasákavosti u tohoto



vzorku činila  $1,43 \text{ kg/m}^2$ , dále pak Deichmann Protection při naneseném množství 1 %. S hodnotou krátkodobé nasákavosti  $1,19 \text{ kg/m}^2$ . Referenční vzorek vykazoval hodnotu krátkodobé nasákavosti  $2,76 \text{ kg/m}^2$ . Avšak při určování rovnovážné sorpční vlhkosti byly mnohdy výsledky stanovené na ošetřených vzorcích vyšší než hodnota pro neošetřený vzorek. Nejlepší sorpční vlastnosti ve vlhkém prostředí oproti neošetřenému vzorku (14,9 %) v tomto případě měly prostředky Carbon Pro (10,3 %) a Deichmann Protection (10,5 %), oba v aplikovaném množství 2 % hmotnostních. U rovnovážné sorpční vlhkosti pro relativní vlhkost vzduchu 50 % není vidět výrazné zlepšení ošetřených vzorků oproti neošetřenému. V souladu se stanovením součinitele tepelné vodivosti, tak není vyloženě prokázán pozitivní vliv v použití impregnačních prostředků na jeho hodnotu ve vlhkém stavu. Zlepšení tepelně izolačních vlastností lze sledovat pouze na vzorcích ošetřených impregnací Carbon Pro. V obou koncentracích (1 % a 2 %) došlo ke snížení hodnoty součinitele tepelné vodivosti ve vlhkém stavu v průměru o 4,6 % oproti neošetřenému vzorku.

Dle všech provedených zkoušek a zhodnocení výsledků mezi sebou se jako nejúčinnější použitý hydrofobizační prostředek jeví impregnace na kůži a boty – Carbon Pro. S přihlédnutím k výsledkům sorpčních vlhkostí je to konkrétně v aplikovaném množství 2 %, kdy lze sledovat pozitivní účinek na všechny sledované vlastnosti.

## Seznam použité literatury

- [1] HALAHYJA, Martin, Ivan CHMÚRNY a Zuzana STERNOVÁ. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov*. 1. vyd. Bratislava, 1998. ISBN 80-889-0504-4.
- [2] SVOBODA, Luboš a Zdeněk TOBOLKA. *Stavební izolace*. Třebíč: Český svaz stavebních inženýrů, 1996.
- [3] ŘEHOŘKA, Petr. Tepelně izolační materiály z přírodních vláken v konstrukcích dřevostaveb. *Tepelně izolační materiály z přírodních vláken v konstrukcích dřevostaveb*. 2011. Dostupné také z: [http://atelier-dek.cz/docs/atelier\\_dek\\_cz/clanky/0015-mineralni-vlakna-v-drevostavbach/2011-03-mineralni-vlakna-v-drevostavbach.pdf](http://atelier-dek.cz/docs/atelier_dek_cz/clanky/0015-mineralni-vlakna-v-drevostavbach/2011-03-mineralni-vlakna-v-drevostavbach.pdf)
- [4] CICALA, Gianluca, Giuseppe CRISTALDI, Giuseppe RECCA a Alberta LATTERI. Composites Based on Natural Fibre Fabrics. *Woven Fabric Engineering*. Sciyo, 2010. DOI: 10.5772/10465. ISBN 978-953-307-194-7. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/woven-fabric-engineering/composites-based-on-natural-fibre-fabrics>
- [5] KABIR, M.M., H. WANG, K.T. LAU a F. CARDONA. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*. Sciyo, 2012,43(7), 2883-2892. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053. ISBN 978-953-307-194-7. ISSN 13598368. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812002922>
- [6] MISHRA, S, A.K MOHANTY, L.T DRZAL, M MISRA, S PARIJA, S.K NAYAK a S.S TRIPATHY. *Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites*. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00084-8. ISBN 10.1016/S0266-3538(03)00084-8. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353803000848>
- [7] Slanina, P. Dynamické tepelněvlhkostní hodnocení stavebních konstrukcí. *Tepelná ochrana budov* (5)16, 2013, 32-39.

- [8] KUSHWAHA, Pradeep K. a Rakesh KUMAR. Studies on Water Absorption of Bamboo-Polyester Composites: Effect of Silane Treatment of Mercerized Bamboo. DOI: 10.1080/03602550903283026. ISBN 10.1080/03602550903283026. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03602550903283026>
- [9] KÜNZEL, HARTWIG M. a KURT KIESSL. *Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components*. DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00084-1. ISBN 10.1016/S0017-9310(96)00084-1. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931096000841>
- [10] Benvelop: We develop building envelopes. *Benvelop* [online]. Praha, 2010 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.benvelop.com/dynamicke-simulace-vyhody-a-nevyhody.php>
- [11] Difúze vodní páry a její kondenzace uvnitř konstrukcí. *Šíření vodní páry* [online]. Praha [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [kps.fsv.cvut.cz/file\\_download.php?fid=4280](http://kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=4280)
- [12] Zateplovací systémy: Vnitřní zateplení historických budov. *TZB info* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/zateplovaci-systemy/11841-vnitri-zatepleni-historickych-budov>
- [13] LATIF, Eshrar, Mihaela Anca CIUPALA a Devapriya Chitral WIJEYESEKERA. The comparative in situ hygrothermal performance of Hemp and Stone Wool insulations in vapour open timber frame wall panels. *Construction and Building Materials*. 2014, 73, 205-213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.060. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814010769>
- [14] ČSN 72 7012 – 3: *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu - Metoda desky – část 3: Metoda měřidla tepelného toku*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [15] ČSN EN 1609: *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

- [16] WUFI. *Wufi Pro* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: [http://www.wufi.cz/wufi\\_pro/](http://www.wufi.cz/wufi_pro/)
- [17] *Delphin: Simulation program for the calculation of coupled heat, moisture, air, pollutant, and salt transport* [online]. Německo, 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php?aLa=en>
- [18] *Wikipedia: Delphin Software* [online]. Německo, 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: [https://de.wikipedia.org/wiki/Delphin\\_\(Software\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Delphin_(Software))
- [19] KÜNZEL, Hartwig M. *Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart: IRB Verlag, 1995. ISBN 3816741037.
- [20] Raumlufbedingungen für die Feuchteschutzbeurteilung. *Wufi* [online]. 2002 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel,%20Holm%20et%20al%202003%20-%20Raumlufbedingungen%20f%C3%BCr%20die%20Feuchteschutzbeurteilung.pdf>
- [21] *Wufi Pro. Wufi* [online]. 2013 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: [http://wufi.cz/wufi\\_pro/](http://wufi.cz/wufi_pro/)
- [22] KÜNZEL, Hartwig M. Moisture risk assessment of roof constructions by computer simulation in comparison to the standard Glaser-method. *International Building Physics Conference* [online]. Eindhoven, 2000, , 225 - 232 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel%202000%20-%20Moisture%20Risk%20Assessment%20of%20Roof.pdf>
- [23] Match-box: Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials. In: *Match-box* [online]. Vedbaek, 2003 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.match-box.dk/uk/whatisdescription.htm>
- [24] KRUIS, J. and MADERA, J., 2012, NUMERICAL ANALYSIS OF COUPLED HEAT AND MOISTURE TRANSFER BASED ON KUNZEL MODEL. *Engineering Mechanics* [online]. 2012. P. 763 - 764.

- [Accessed 15 May 2016]. Retrieved from:  
[http://www.engmech.cz/2012/proceedings/pdf/214\\_Kruis\\_J-FT.pdf](http://www.engmech.cz/2012/proceedings/pdf/214_Kruis_J-FT.pdf)
- [25] RIDZUAN, M.J.M., ABDUL MAJID, M.S., AFENDI, M., AQMARIAH KANAFIAH, S.N., ZAHRI, J.M. and GIBSON, A.G., 2016, Characterisation of natural cellulosic fibre from *Pennisetum purpureum* stem as potential reinforcement of polymer composites. *Materials* [online]. 2016. Vol. 89, p. 839-847. DOI 10.1016/j.matdes.2015.10.052. Retrieved from:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515306316>
- [26] ARAMBAKAM, R., VAHEDI TAFRESHI, H. and POURDEYHIMI, B., 2013, A simple simulation method for designing fibrous insulation materials. *Materials* [online]. 2013. Vol. 44, p. 99-106. DOI 10.1016/j.matdes.2012.07.058. Retrieved from:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306912005109>
- [27] KORJENIC, Azra and BEDNAR, Thomas, 2011, Developing a model for fibrous building materials. *Energy and Buildings* [online]. 2011. Vol. 43, no. 11p. 3189-3199. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.08.017. Retrieved from:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811003677>
- [28] Prostup tepla konstrukcí: Součinitel prostupu tepla. *Stavba* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/315-soucinitel-prostupu-tepla>
- [29] ČSN 73 0540-1 – Tepelná ochrana budov – část 1: Terminologie ÚNMZ červen 2005
- [30] MANSOUR, E., C. LOXTON, R.M. ELIAS a G.A. ORMONDROYD. Assessment of health implications related to processing and use of natural wool insulation products. *Environment International* [online]. 2014, **73**, 402-412 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/j.envint.2014.08.004. ISSN 01604120. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412014002529>
- [31] Živočišná vlákna. *Kmi.tul* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [http://www.kmi.tul.cz/studijni\\_materialy/data/2013-10-04/08-13-23.pdf](http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-10-04/08-13-23.pdf)

- [32] Přírodní rostlinná vlákna. *Kmi.tul* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [www.kmi.tul.cz/studijni\\_materialy/data/2013-10-04/08-12-52.pdf](http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-10-04/08-12-52.pdf)
- [33] ŠIROKÁ, Marie: *Konopí seté – energetická a průmyslová plodina třetího tisíciletí*. Biom.cz [online]. 2009-01-26 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/konopi-sete-energiticka-a-prumyslova-plodina-tretiho-tisicileti>>. ISSN: 1801-2655.
- [34] KULHÁNEK, František a Elena AMBROŽOVÁ. Měření krátkodobé nasákavosti a součinitele tepelné vodivosti u tepelně-izolačních materiálů. In: *Tzb-info* [online]. Praha, 2013 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/10268-mereni-kratkodobe-nasakavosti-a-soucinitele-tepelne-vodivosti-u-tepelne-izolacnich-materialu>
- [35] CHYBÍK, J.: Přírodní stavební materiály. GRADA Publishing, a.s., Praha, 2009. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [36] ČSN EN 822. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení délky a šířky*. Praha: ČNI, 8 s., 1996.
- [37] ČSN EN 1602. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: ČNI, 12 s., 1998.
- [38] ČSN EN ISO 12571. *Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hydroskopických sorpčních vlastností*. Praha: ČNI, 16 s., 2001.
- [39] ČSN EN 823. *Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky*. Praha: ČNI, 16 s., 1996.
- [40] Termo izolace z technického konopí. *Konopí izolace: Termo konopí Premium* [online]. 2011 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.konopi-izolace.cz/produkt/termo-konopir-premium-80x580x6000-mm>
- [41] Technický list Termo Konopí. *Konopí izolace* [online]. 2007 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [http://www.konopi-izolace.cz/files/attachments/tl\\_termo-konopi\\_premium.pdf](http://www.konopi-izolace.cz/files/attachments/tl_termo-konopi_premium.pdf)
- [42] Bezpečnostní list - Carbon Pro. *Geminipus* [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [eshop.geminipus.cz/stahnout.php?typ=bl&soubor=2](http://eshop.geminipus.cz/stahnout.php?typ=bl&soubor=2)

- [43] Impregnace na stany a spacáky: Fabsil Gold Aerosol. *Hudy* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [http://www.hudy.cz/impregnace\\_stany\\_spacaky/grangers-fabsil-gold-aerosol-200,100019765.html](http://www.hudy.cz/impregnace_stany_spacaky/grangers-fabsil-gold-aerosol-200,100019765.html)
- [44] Bezpečnostní list - Fabsil Gold Aerosol. *Partinfo* [online]. 2012 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.partinfo.co.uk/docs/3590>.
- [45] Cocciné. *Dakoma* [online]. 2010 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [http://dakoma.com.pl/index.php?p=1586&t=Coccine&m\\_id=1586&l=1&f=pages](http://dakoma.com.pl/index.php?p=1586&t=Coccine&m_id=1586&l=1&f=pages)
- [46] Bezpečnostní list - Deichmann Protection. *Datenblaetter* [online]. 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://datenblaetter.v9477.schwarzkuenstler.org/wp-content/uploads/2015/04/sd18233089000GB-210415-english-29853011.pdf>.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma toku vlhkosti mezi vrstvami vláknitého materiálu [27].....	15
Obr. 2 Schéma difúzního toku při průchodu válcovým vláknem [27].....	15
Obr. 3 Schéma výpočtu transportu vlhkosti ve vláknitých materiálech [27] .....	16
Obr. 4 Schéma rozdělení přírodních vláken .....	17
Obr. 5 Závislost součinitele prostupu tepla na relativní vlhkosti prostředí [13] .	20
Obr. 6 Množství vlhkosti v ošetřených vzorcích podle koncentrace NaOH [25]	22
Obr. 7 Příklad vyhodnocení výsledků pomocí softwaru WUFI [16].....	33
Obr. 8 Metodika výpočtu při užití počítačového modelování [19] .....	34
Obr. 9 Příklad vyhodnocení pomocí softwaru Delphin [17] .....	36
Obr. 10 Ilustrační foto použité izolační rohože z technického konopí [40].....	38
Obr. 11 Použité hydrofobizační přípravky .....	39
Obr. 12 Příklad způsobu uložení ve vodě a následný proces odkapání dle normy ČSN EN 1609.....	43

## Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení vybraných přírodních vláken .....	19
Tab. 2 Vybrané vlastnosti včetně složení zkoušených materiálů [13] .....	19
Tab. 3 Rozdělení vzorků dle množství nanesené impregnace .....	40
Tab. 4 Hodnoty objemových hmotností stanovených na vysušených vzorcích	47
Tab. 5 Vstupní hodnoty včetně výsledné krátkodobé nasákavosti $W$ [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]...	47
Tab. 6 Vypočítané hodnoty rovnovážné sorpční vlhkosti podle relativní vlhkosti prostředí .....	49
Tab. 7 Průměrné hodnoty součinitelů tepelné vodivosti stanovených na vzorcích ve vysušeném stavu a při 50 % a 80 % relativní vlhkosti vzduchu .....	51
Tab. 8 Konečné porovnání všech naměřených hodnot .....	55



## Seznam grafů

Graf 1 Srovnání hodnot krátkodobé nasákavosti dle druhu a množství použité impregnace .....	48
Graf 2 Hodnoty sorpční vlhkosti dle relativní vlhkosti prostředí pro vzorky s použitým množstvím impregnace 1 % .....	49
Graf 3 Hodnoty sorpční vlhkosti dle relativní vlhkosti prostředí pro vzorky s použitým množstvím impregnace 2 % .....	50
Graf 4 Přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti u vzorku o různém množství impregnace ve vysušeném stavu .....	51
Graf 5 Přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti u vzorku o různém množství impregnace při relativní vlhkosti prostředí 50 % .....	52
Graf 6 Přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti u vzorku o různém množství impregnace při relativní vlhkosti prostředí 80 % .....	52
Graf 7 Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí při množství použité impregnace 1 % .....	53
Graf 8 Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti prostředí při množství použité impregnace 2 % .....	53
Graf 9 Procentuální změna hodnot součinitelů tepelné vodivosti .....	54