

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES

OPTIMALIZACE NÁVRHU MODERNÍCH NÍZKOENERGETICKÝCH DŘEVOSTAVEB

OPTIMIZING THE DESIGN MODERN LOW ENERGY TIMBER
CONSTRUCTION

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. TEREZA BEČKOVSKÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL ŠUHAJDA, Ph.D.

BRNO 2015

OBSAH

A.	ÚVOD	9
B.	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	10
1.	Fyzikální děje ve stavebních konstrukcích	11
1.1	Vlhkost ve stavebních látkách a konstrukcích	11
1.2	Sorpce vodní páry	12
1.3	Šíření vlhkosti v konstrukci	15
1.4	Difúze vodní páry	18
2.	Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků	20
3.	Formulace okrajových podmínek	22
3.1	Parametry venkovního prostředí	22
3.2	Parametry vnitřního prostředí	23
3.3	Vlhkostní parametry vzduchu	25
3.4	Částečný tlak nasycené vodní páry jako funkce teploty dle ČSN EN ISO 13788	27
4.	Tepelně-vlhkostní stav v interiéru budov v průběhu klimatického roku	28
5.	Hodnocení vlhkostního stavu ve stavebních konstrukcích	31
5.1	Celoroční množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}$, popř. celoroční množství vypařené vodní páry $M_{ev,a}$ podle ČSN 73 0540-4	32
5.2	Výpočet celoroční bilance podle ČSN EN ISO 13788 (srpen 2013)	34
5.3	Návrh vylučující růst plísní dle ČSN EN ISO 13788 (srpen 2013)	34
5.4	Analýza rizika růstu plísní Mold Growth Risk Analysis	35
6.	Dřevo ve stavebních konstrukcích	38
6.1	Charakteristika dřeva	39
6.2	Vlhkost dřeva	42
6.3	Dřevo jako konstrukční materiál	47
7.	Konstrukční systémy dřevostaveb	48
7.1	Sloupkový konstrukční systém	48
7.2	Řešení systému obálky budovy	49
7.3	Materiálové řešení dílčích částí skladby konstrukce	51
7.4	Retardéry difúze vodní páry	52
7.5	Retardéry difúze vodní páry v difúzně otevřených skladbách konstrukcí	54
8.	Metody stanovení vlhkosti materiálů	57
8.1	Volba metody stanovení vlhkosti materiálu	57
8.2	Vodivostní (odporové) metody	57
9.	Stav řešené problematiky v ČR a ve světě	60
C.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	62
10.	Cíle disertační práce	63
10.1	Vytyčení cílů disertační práce	63
10.2	Zdůvodnění volby cílů	63

10.3 Prostředky ke splnění cílů	65
D. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	66
11. SWOT analýza řešení problematiky experimentálního měření.....	67
11.1 Shrnutí.....	70
12. Metodika řešení experimentální části	72
12.1 Měřicí aparatura	72
12.2 Experimentální dřevostavba EXDR1	74
12.3 Ověřovací měření experimentálních místnosti	76
12.4 Osazení měřících zařízení v obvodových konstrukcích.....	77
12.5 Specifikace monitorovaných obvodových konstrukcí	82
12.6 Volba parametrů vnitřního prostředí pro experimentální měření	88
13. Numerické metody	97
13.1 Stacionární model - Glaserova metoda	97
13.2 Dynamický model	97
13.3 WUFI - Wärme Und Feuchte Instationär.....	98
E. VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE.....	100
14. Experimentální měření	101
14.1 Monitoring dřevěných prvků a materiálů na bázi dřeva	101
14.2 Teplotně vlhkostní děje za parotěsnicí vrstvou v případě difúzně otevřené a uzavřené skladby konstrukce.....	104
14.3 Vliv latexového nátěru na vlastnosti parotěsnicí vrstvy tvořené OSB deskou a parametry vnitřního vzduchu	115
14.4 Difúzně otevřená skladba obvodové stěny z pohledu materiálového řešení parotěsnicí vrstvy.....	118
15. Simulační metoda	121
16. Komparace experimentálního měření a simulací	123
F. ZÁVĚRY PRO TECHNICKOU PRAXI	126
17. Závěry pro technickou praxi.....	127
17.1 Ověření použitelnosti dřevěných prvků a prvků z materiálů na bázi dřeva ve skladbách obvodových stěn dřevostavby z pohledu jejich vlhkostního chování	127
17.2 Komparace difúzně otevřené a difúzně uzavřené skladby obvodové stěny dřevostavby.....	127
17.3 Vlastnosti parotěsnicí vrstvy (difúzního retardéru) v případě difúzně otevřené skladby (OSB desky).....	128
17.4 Optimalizace skladby obvodové stěny dřevostavby	129
17.5 Řešení konstrukčních detailů z pohledu šíření vlhkosti obálkou a její vzduchotěsnosti.....	130
G. MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝZKUMU	133
18. Možnosti dalšího výzkumu.....	134
18.1 Monitoring skladeb konstrukcí s odlišným materiálovým řešením	134
18.2 Monitoring difúze vodních par do obvodových konstrukcí dřevostaveb v průběhu celého klimatického roku.....	135

18.3 Monitoring difúzně otevřených konstrukcí s vrstvou odolnou proti působení povětrnostních vlivů umístěnou na straně exteriéru	136
18.4 Vliv nevhodného technického provedení parotěsnicích vrstev a vzduchotěsné obálky na funkčnost a trvanlivost konstrukce jako celku	137
18.5 Vliv materiálu tepelné izolace v systému ETICS na charakteristiku teplotních a vlhkostních kmitů	138
18.6 Monitoring difúze vodních par obálkou budovy staveb se vzduchotechnikou	139
Použitá literatura	141
Seznam použitých symbolů a zkratk	144
Seznam publikací autora	148
Účast v grantech	150
Patenty, užité vzory a tvůrčí aktivity	150

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Tereza Bečková *Optimalizace návrhu moderních nízkoenergetických dřevostaveb*. Brno, 2015. 150 s., 0 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci zpracovala samostatně na základě vlastního výzkumu, konzultací a citovaných publikací.

V Brně dne 24. 2. 2015

Ing. Tereza Bečková

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala především manželovi a celé rodině za podporu, trpělivost a motivaci k práci a svému školiteli Ing. Karlu Šuhajdovi, Ph.D. za cenné rady.

V Brně dne 24. 2. 2015

Ing. Tereza Bečková

Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na optimalizaci návrhu moderních dřevostaveb. Jelikož je toto téma velmi obsáhlé, podrobně se práce věnuje problematice šíření vlhkosti obálkou budovy.

V úvodní části jsou shrnuty poznatky z oblasti fyzikálních dějů ve stavebních konstrukcích, dále jsou zde uvedeny vlastnosti dřeva jako materiálu a informace o konstrukčních systémech dřevostaveb.

V další části je popsána metodika a experimentální měření realizované na experimentální dřevostavbě. Je zde specifikován princip měření vycházející ze SWOT analýzy, použitá měřící zařízení nebo možnosti řešení v oblasti numerického modelování.

Hlavní dosažené výsledky disertační práce a závěry pro technickou praxi včetně možností dalšího výzkumu jsou shrnuty v závěrečné části.

Abstract

This Doctoral thesis is focused on optimizing the design of modern wooden structures. Because this theme is very comprehensive, the work analyzes the distribution of moisture through the building envelope in detail.

In the introduction are summarized the knowledge of the physical processes in the constructions, there are also the properties of wood as a material and basic information about system of timber structures.

The next section describes used methodology and experimental measurements realized on an experimental timber house EXDR1. There is specified the principle of measurement based on the SWOT analysis, the use measuring devices or possible solutions in the field of numerical modeling too.

Main results and conclusions of the dissertation for technical practice including possibilities of further research are summarized in the final section.

A. ÚVOD

Dřevo je jedním z nejstarších materiálů, které se lidstvo naučilo používat nejen ke stavbě obydlí, ale i k výrobě nástrojů a jako zdroje energie. Na rozdíl od většiny běžně používaných stavebních materiálů, se dřevo řadí mezi obnovitelné suroviny s minimálními energetickými nároky a s bezodpadovými technologiemi zpracování.

Dnešní dřevěné stavby nemají už mnoho společného s historickými stavebními systémy, chatami nebo se stavbami pro sociálně slabší vrstvy. Technický vývoj přispěl k rozvoji nejen v oblasti výstavby rodinných domů, ale i vícepodlažních staveb, kancelářských a administrativních budov. Stavby ze dřeva se nyní stávají reálnou alternativou k dosud převládajícím materiálům.

Díky komplexnímu technickému vývoji získávají moderní dřevostavby stále více na popularitě u široké veřejnosti a především proto je důležité řešit nedostatky, které daný druh výstavby provází. Tyto nedostatky mohou být způsobeny jak nevhodným provedením konstrukce, tak nesprávným návrhem dílčích prvků vlastní konstrukce. Mezi ty nejzásadnější patří stavebně fyzikální problémy, a to stavební akustika a tepelně vlhkostní problematika, kterou se tato práce primárně zabývá.

Jelikož dynamika růstu popularity moderních dřevostaveb je intenzivnější než výzkum procesů probíhajících v těchto konstrukcích z dlouhodobého hlediska, je zásadním úkolem tyto děje monitorovat a následně i fyzikálně popsat. Získané poznatky a závěry pak lze využít k eliminaci vad při návrhu, výstavbě a užívání těchto moderních novodobých staveb.

B. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

- Fyzikální děje ve stavebních konstrukcích
- Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků
- Formulace okrajových podmínek
- Tepelně-vlhkostní stav v interiéru budov v průběhu klimatického roku
- Hodnocení vlhkostního stavu ve stavebních konstrukcích
- Dřevo ve stavebních konstrukcích
- Konstrukční systémy dřevostaveb
- Metody stanovení vlhkosti materiálů
- Stav řešené problematiky v ČR a ve světě

1. Fyzikální děje ve stavebních konstrukcích

Pro pochopení jednotlivých vztahů je nutno definovat pojmy a veličiny, které se ve stavební fyzice běžně používají. Mezi základní děje probíhající ve stavebních konstrukcích patří šíření tepla a šíření vlhkosti.

Předložená disertační práce je tematicky zaměřena na řešení šíření vlhkosti ve stavebních látkách a konstrukcích, proto je důležité na začátku definovat a analyzovat šíření vlhkosti a formy vlhkosti vyskytující se právě ve stavebních konstrukcích. Při projekční činnosti, případně hodnocení stávajících konstrukcí je zásadní věnovat dostatečnou pozornost vlhkosti a snaze zabránit jejímu vniku do konstrukce, jelikož právě zvýšená vlhkost ve stavebních konstrukcích je příznivým prostředím pro vznik výskytu mikroorganismů především plísní, bakterií, řas a hub. Ty mohou nežádoucím způsobem ovlivnit kvalitu vnitřního prostředí, technické vlastnosti konstrukce, a především může jejich výskyt negativně ovlivňovat zdravotní stav člověka a také životnost objektu.

1.1 Vlhkost ve stavebních látkách a konstrukcích

Vlhkost se ve stavebních konstrukcích projevuje ve více formách současně, které spolu navzájem velmi často úzce souvisí. Vztahy mezi jednotlivými formami vlhkosti se matematicky nebo i jinak jen velmi obtížně vyjadřují, proto je důležité stanovit základní rozdělení forem a zdrojů vlhkosti nacházejících se ve stavebních látkách a konstrukcích.

Zdroje vlhkosti podle K. F. Fokina (1973) jsou tedy:

1. Stavební vlhkost (mokrý procesy při realizaci, zabudovaná vlhkost);
2. Zemní vlhkost (vnik až do 2,5 m výšky konstrukce ze země);
3. Meteorologická vlhkost (déšť, sníh);
4. Sorpční vlhkost (vnik do konstrukce díky sorpčním vlastnostem materiálu);
5. Zkondenzovaná vlhkost ze vzduchu (často jediná příčina zvýšené vlhkosti konstrukce);
6. Vlhkost vnikající do konstrukcí při běžném provozu budovy (například průmyslové budovy s mokkými výrobními procesy).

Vlhkost se ve stavebních látkách může nacházet ve formě vodní páry, tekutiny, tuhého tělesa, a to jednotlivě nebo i ve dvou, případně ve třech formách současně.

V závislosti na charakteru spojení vlhkosti s látkami je možné všechny formy vlhkosti rozdělit podle P. A. Rebintera (1972) na:

- Chemické spojení (chemické reakce);
- Fyzikálně-chemické spojení (adsorpce, osmóza);
- Mechanické spojení (kapilární kondenzace, přímý styk látky s vodou).

Nejčastější formou vlhkosti ve stavebních látkách je adsorpční a kapilární vlhkost (ve stavební tepelné technice zjednodušeně sorpční vlhkost a volná vlhkost). Vlivem prostředí se může vlhkost v konstrukcích pohybovat, přičemž základní příčinou přemísťování vodní páry je rozdílný tlak v důsledku různé teploty, tvaru povrchu, skupenství látky apod. Naopak příčinou přemísťování tekutiny je zemská přitažlivost, napětí v látce při zamrzání, kapilární síly nebo síly krystalizace.

V rámci řešeného tématu, tedy stavebních konstrukcí jako celku i dílčích konstrukčních prvků a materiálů především na bázi dřeva, je primární zabývat se problematikou transportu vlhkosti difuzí a sorpční vlhkostí.

1.2 Sorpce vodní páry

Je definována jako přijímání vlhkosti pohlčováním vodní páry ze vzduchu. Dělí se na adsorpci (způsobena mezimolekulárními ven der Waalsovými silami, kterými se navzájem přitahují molekuly pevných látek a vodní páry, což vede ke vzniku molekulárních vrstev vodní páry na stěnách pórů), absorpci (kapalná nebo plynná fáze se vstřebává difuzí a vedením vlhkosti dovnitř tuhé fáze) a chemisorpci (uplatnění chemických vazeb vody a tuhé fáze materiálu).

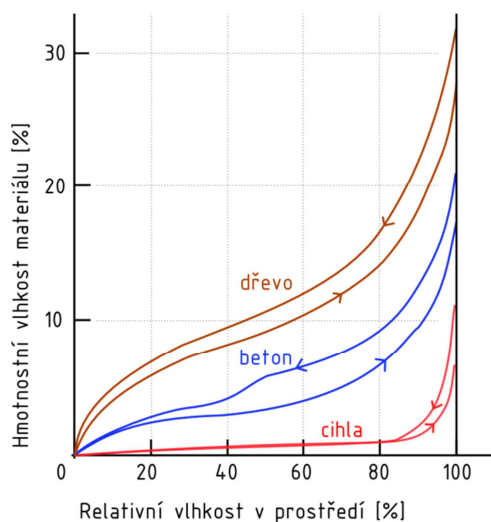
Fyzikálně je možno sorpci vysvětlit tak, že jakmile je částečný tlak vodní páry v pórovité látce nižší než v okolním vzduchu, látka pohlcuje vodní páru ze vzduchu. Opačný jev nastává, pokud je částečný tlak vodní páry v látce vyšší než v okolním vzduchu, a dochází tedy k uvolňování vodní páry z látky. Tento děj se nazývá desorpce.

Jakmile dojde k maximálnímu sorpčnímu nasycení, látka přestane přijímat vodní páru ze vzduchu a začne docházet ke kapilární kondenzaci vlhkosti v látce. Sorpce je tedy proces, který nezávisí na rozdílu teplot vzduchu a látky, a proto nesouvisí ani s kondenzací. Vlhkost, kterou látka přijme vlivem působení vlhkého vzduchu, se nazývá sorpční vlhkost látky.

Proces pohlčování vodní páry ze vzduchu probíhá až do tzv. rovnovážného stavu sorpční vlhkosti látky (do stavu, kdy je částečný tlak vodní páry v látce a v okolním

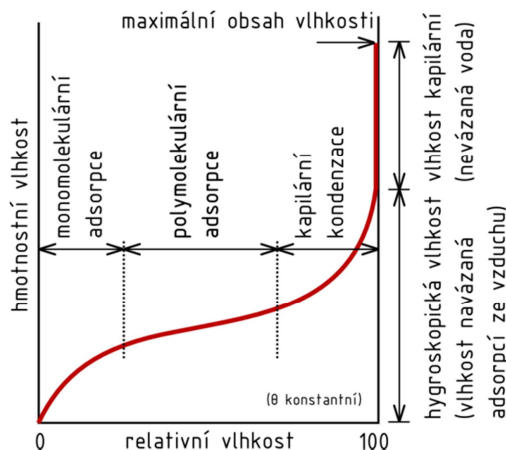
vzduchu v rovnováze). Rovnovážná sorpční vlhkost látky závisí na teplotě, relativní vlhkosti vzduchu a barometrickém tlaku.

Pro popis závislosti rovnovážné sorpční vlhkosti látky a relativní vlhkosti vzduchu při konstantní teplotě se ve stavební praxi užívají izotermy sorpce a desorpce. Při konstantní teplotě a celkovém tlaku prostředí se zvyšuje relativní vlhkost vzduchu a na povrch materiálu se váže stále více molekul, jejichž kvantita je vynášena na svislou osu (hmotnost nebo látkové množství). Pro většinu kapilárně pórovitých stavebních materiálů má sorpční (desorpční) izoterma charakteristický S-tvar, uvedený na grafu č. 1. Je zde uvedena závislost hmotnostní vlhkosti materiálu na relativní vlhkosti prostředí. Je vidět, že vliv relativní vlhkosti vzduchu na dřevo je mnohem významnější než u jiných běžně používaných stavebních materiálů[1].



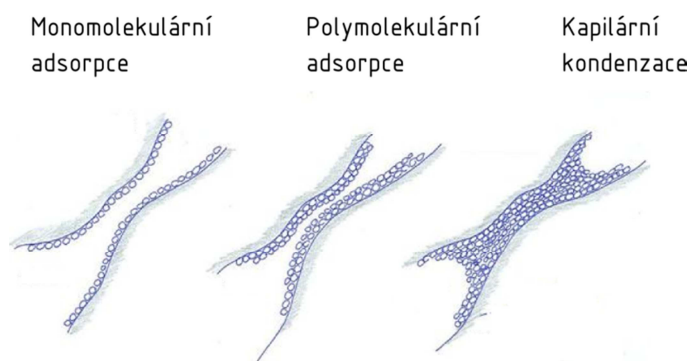
Graf 1) Sorpční izotermy vybraných stavebních materiálů popisující závislost hmotnostní vlhkosti materiálu na relativní vlhkosti prostředí při konstantní teplotě a celkovém tlaku prostředí[2]

Na grafu č. 2 je podrobněji zobrazen proces sorpce vodní páry včetně tří charakteristických stádií, kdy první část izotermy je odrazem monomolekulární adsorpce, střední část odrazem polymolekulární adsorpce a třetí, koncová část, je odrazem kombinovaného jevu kapilární kondenzace a adsorpce. Tato část je charakteristická právě pro kapilárně-pórovité materiály, zatímco u jiných, například hrubě vláknitých struktur se prakticky nevyskytuje. U velmi jemných pórů se tento jev začíná uplatňovat již při nízkých hodnotách relativní vlhkosti, přibližně od 20%. Podstatné je, že jev kapilární kondenzace nemá nic společného s pojmem kondenzace, jak je užíván v běžném smyslu stavební fyzikou.



Graf 2) Proces sorpce vodní páry popisující tři charakteristická stádia, a to monomolekulární adsorbovanou vrstvu (vnější difúzi, obvykle 0 – 40 %), polymolekulární adsorbovanou vrstvu (vnitřní difúze, vlhkost je vázaná a stlačená) a kapilární kondenzaci (rychlé zvyšování vlhkosti látky)[2]

Podstata kapilární kondenzace spočívá v tom, že při polymolekulární adsorpci v tenkých kapilárách resp. v zúženích běžných kapilár dojde při určité hodnotě relativní vlhkosti vzduchu (tj. při určité tloušťce polymolekulární vrstvy) ke značnému sblížení protilehlých povrchů adsorbovaných molekul. Mezi těmito povrchy začnou působit přitažlivé Van der Waalsovské síly a povrchy se skokovým procesem spojí, což je znázorněno na obr. 1.



Obr. 1) Mechanismus obsazování povrchu pórového systému, vznik kapilární kondenzace[2]

Není vhodné sorpci vodní páry zanedbávat, jelikož sorpce vzdušné vlhkosti hraje velmi důležitou roli při skladování cementu, zhoršuje vlastnosti izolačních materiálů a některých druhů vláken a především zásadně mění vlastnosti dřeva[2].

1.3 Šíření vlhkosti v konstrukci

Vodní páry obsažené ve vzduchu mají podobnou schopnost procházet stavebními konstrukcemi jako tepelný tok. Jestliže k objasnění toku tepla je potřebný gradient teploty, k toku vodních par se používá gradient částečných tlaků vodních par. Pro transport vlhkosti se tedy užívají vztahy, jež jsou analogické se vztahy popisujícími šíření tepla.

Bilanční rovnice má tedy tvar:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial g}{\partial x} \quad (1)$$

kde w hmotnostní koncentrace vlhkosti (kg.m^{-3}),
 t čas (s),
 g hustota vlhkostního toku ($\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Pro vlhkostní tok pak následně platí:

$$g = -\frac{1}{\mu(\varphi)} \cdot \delta_a \cdot (T) \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} + \frac{g_a}{p_a} \cdot \frac{p_v}{R_{H_2O} \cdot T} + \lambda_{m,l}(s) \frac{\partial s}{\partial x} \quad (2)$$

kde g hustota vlhkostního toku ($\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$),
 $\mu(\varphi)$ faktor difúzního odporu materiálu v závislosti na vlhkosti (-),
 $\delta_a(T)$ součinitel difuze vodní páry ve vzduchu v záv. na tepl. ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$;s),
 p_v parciální tlak vodní páry (Pa),
 g_a hustota toku vzduchu ($\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$),
 p_a měrná hmotnost vzduchu (kg.m^{-3}),
 T termodynamická teplota (K),
 R_{H_2O} plynová konstanta pro vodní páru – 462 ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$),
 $\lambda_{l,m}$ vlhkostní vodivost pro kapilární transport ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$;s),
 s sání (Pa).

Ve výše uvedeném vztahu popisuje první člen difuzi vodní páry, druhý člen konvekci vodní páry a poslední člen šíření vlhkosti kapilárním vedením[3].

Základní fyzikální modely přenosu vlhkosti vychází z Onsagerovy lineární nevratné termodynamiky a formulovali je nezávisle na sobě Krischer a Lykov v 70. letech 20. století. Na základě jejich prací vznikla nejrozšířenější difúzní teorie transportu vlhkosti, jejímž výstupem je popis transportu vlhkosti pomocí 1. Fickova zákona difúze:

$$g = -\rho \cdot D \cdot \text{grad } c \quad (3)$$

kde g difúzní tok,
 ρ hustota prostředí,
 D součinitel difúze,
 c koncentrace.

Model transportu vlhkosti vyjádřený Fickovým zákonem je tzv. čistý jev, tedy čistou difúzí, kde se uvažuje jako hnací termodynamická síla gradient koncentrace. Součinitel difúze D vyjadřuje vliv vnitřních faktorů (struktura skeletu, například tvar, velikost a rozmístění pórů, charakter tekutiny v porézním tělese). Transport vlhkosti je však ovlivněn také vnějšími vlivy, které nejsou zahrnuty ve výše uvedeném vztahu. Jsou jimi teplota, tlak, koncentrace, gravitace a elektrické pole. Z toho plyne, že transport vlhkosti je velmi komplexní děj a kvalitní matematický model transportu vlhkosti, který by umožňoval řešit transport vlhkosti, není snadné sestavit. Ve stavební fyzice a v českých normách je uveden vztah popisující transport vlhkosti jako:

$$g = -\delta \cdot \text{grad } p \quad (4)$$

kde g difúzní tok,
 δ součinitel difúzní vodivosti materiálu,
 p částečný tlak vodní páry.

Hnací silou je zde gradient částečného tlaku vodní páry a vlastnosti materiálu vyjadřuje součinitel difúzní vodivosti δ .

Výpočet a hodnocení vodní páry ve stavebních konstrukcích se v současné době v České republice počítá nejčastěji pomocí Glaserových metod, které jsou popsány v normách ČSN EN ISO 13788 nebo ČSN 730540-4. Při těchto výpočtech se pro výpočet kondenzace vodních par v konstrukci zjednodušuje vztah (4) na vztahy

$$g = \delta_p \cdot \frac{\Delta p}{d} = \frac{\delta_0}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{d} = \delta_0 \cdot \frac{\Delta p}{s_d} \quad (5)$$

kde δ_p součinitel difúzní vodivosti materiálu,
 δ_0 součinitel difúzní vodivosti vzduchu,
 Δp rozdíl částečných tlaků vodní páry,
 g hustota difúzního toku,
 d tloušťka materiálu,
 μ faktor difúzního odporu,
 s_d ekvivalentní difúzní tloušťka materiálu.

Fyzikální veličiny μ , δ , s_d uvedené ve vztahu (5) se běžně používají pro hodnocení vlhkostního stavu ve stavebních konstrukcích v České republice.

Součinitel difuze vodní páry δ_p vyjadřuje schopnost materiálu propouštět vodní páru difúzí, **faktor difúzního odporu μ** vyjadřuje relativní schopnost materiálu

propouštět vodní páry difuzí. Je poměrem difuzního odporu materiálu a difuzního odporu vrstvy vzduchu o téže tloušťce, při definovaných podmínkách.

$$\mu = \frac{\delta_0}{\delta} \quad (-) \quad (6)$$

Pro převod mezi nimi platí vztah:

$$\mu = \frac{1}{N \cdot \delta_p} \quad (-) \quad (7)$$

kde μ je faktor difúzního odporu,
 δ_p je součinitel difúzní vodivosti (s),
 δ_0 součinitel difúzní vodivosti vzduchu (s),
 N je teplotní difúzní funkce ($l \cdot s^{-1}$).

Výše uvedený součinitel difúzní vodivosti vzduchu závisí na teplotě a atmosférickém tlaku vzduchu:

$$\delta_0 = \frac{(273,15 + \theta_{j,m})^{0,81}}{5,25 \cdot 10^6 \cdot p_a} \quad (s; kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}) \quad (8)$$

kde $\theta_{j,m}$ průměrná teplota materiálu j-té vrstvy ($^{\circ}C$)
 p_a atmosférický tlak vzduchu (Pa),

Teplotní difúzní funkce N a její hodnota se určí ze vztahu:

$$N = \frac{5,25 \cdot 10^6 \cdot p_a}{T^{0,81}} \quad (1 \cdot s^{-1}) \quad (9)$$

kde p_a atmosférický tlak [Pa],
 T absolutní teplota j-té vrstvy konstrukce (K).

Hodnotu atmosférického tlaku lze stanovit ze vztahu:

$$p_a = \frac{101700 \cdot (16300 - h)}{16300 + h} \quad (Pa) \quad (10)$$

kde h nadmořská výška (m).

Ve stavební tepelné technice se také používá parametr **ekvivalentní difuzní tloušťka** s_d , vyjádřená vztahem:

$$s_d = \mu \cdot d_{mat} \quad (m) \quad (11)$$

kde μ je faktor difúzního odporu,
 d_{mat} je tloušťka materiálu (m).

Dalším významnou vlastností stavebních konstrukcí je **difúzní odpor** vyjadřující odpor materiálu proti pronikání vodní páry. Pro konstrukci, ve které lze uvažovat jednorozměrné šíření vlhkosti, se difúzní odpor konstrukce Z_p ($m \cdot s^{-1}$) stanoví ze vztahu:

$$Z_p = \sum Z_{p,j} \quad (12)$$

kde $Z_{p,j}$ je difúzní odpor j -té vrstvy konstrukce ($m \cdot s^{-1}$) stanovený ze vztahu:

$$Z_{p,j} = \frac{s_{d,j}}{\delta_0} = \frac{d_j}{\delta} \quad (13)$$

kde $s_{d,j}$ je ekvivalentní difúzní tloušťka j -té vrstvy konstrukce (m),
 δ_0 je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu (s),
 δ součinitel difúzní vodivosti (s),
 d_j tloušťka j -té vrstvy konstrukce (m)[5].

Tyto vztahy (č. 1 až 5 především) uvažují pouze jednorozměrnou hustotu difúzního toku vlhkosti, a to nejčastěji pouze ve směru kolmém na souvrství stavební konstrukce. Toto zjednodušení je možné pouze v případě homogenních vlastností použitých materiálů a rovinného uspořádání celé konstrukce. Ve skutečnosti však materiály zabudované do stavební konstrukce jsou často nehomogenní, ať už v důsledku poškození nebo konstrukčního uspořádání a tudíž pro ně nelze aplikovat normové metody pro výpočet zkondenzované vlhkosti[4].

1.4 Difúze vodní páry

Jev, při kterém mezi dvěma prostředími s různými parciálními tlaky vodních par oddělenými pórovitou látkou dojde k transportu vlhkosti, nazýváme **difuzí**. Jedná se o samovolné pronikání molekul (atomů, iontů aj.) z oblasti vyšší koncentrace do oblasti nižší koncentrace vlivem tepelného pohybu částic (atomů, molekul, skupin molekul) a jejich srážek, tedy o přenos látky ve směru proti gradientu koncentrace. Difuze probíhá ve všech třech skupenstvích, nejrychleji v plynném a nejpomaleji v pevném. Rychlost difuze se řídí **Fickovými zákony** a její mírou je difúzní součinitel.

Princip difúze je stejný jako u vedení tepla. Obecně se řeší difúzní rovnice, je-li u difundující stavová veličina, má difúzní rovnice v jednorozměrné reprezentaci tvar:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - a \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (14)$$

kde u je termodynamická stavová veličina (tlak, teplota, apod.),
 t je čas (s),

x je prostorová souřadnice (m),
 a je materiálová konstanta,
 $f(x,t)$ je zdrojová funkce.

Ve většině případů uvažujeme $f(x,t) = 0$, tzn., že uvnitř sledované oblasti nejsou žádné zdroje (vodní páry, tepla, organických částic, apod.).

Je-li stavová veličina částečný tlak vodní páry p (Pa), pak platí vztah ve tvaru difúzní rovnice pro vodní páru

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial RT}{M} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = f_p(x, t) \quad (15)$$

kde p je částečný tlak vodní páry (Pa),
 δ je součinitel difúzní vodivosti (s),
 R je plynová konstanta, $R=8314 \text{ J.kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$,
 T je termodynamická teplota (K),
 M je molární hmotnost vodní páry, $M=18,015 \text{ kg.kmol}^{-1}$,
 $f_p(x,t)$ je zdrojová funkce (Pa.s^{-1})[1].

Zásadní je předpoklad, že difundující vodní páry se pohybují z míst s vyšším tlakem do míst, kde je tlak vodních par nižší, je zde tedy tendence vyrovnávat tlakové poměry. Za jistých tlakových a teplotních podmínek může v materiálu dojít také ke kondenzaci vodních par.



Obr. 2) Difúze vodní páry konstrukcí – princip transportu vlhkosti pro zimu a léto[zdroj: archiv autora]

Plyn nebo vodní pára difundují každou látkou, jejíž mezimolekulární prostory jsou větší než střední volná dráha molekul plynů (hodnota pro vodní páru $2,78 \cdot 10^{-10} \text{ m}$), přičemž ve stavebních materiálech se vyskytují **makrokapiláry** ($d > 10^{-7} \text{ m}$) a **mikrokapiláry** ($d < 10^{-7} \text{ m}$). V makrokapilárách nenastává kapilární kondenzace. Vodní páry se pohybují podle zákona difúze, neboť volná dráha jejich molekul je menší než průměr pórů. Naopak v mikrokapilárách nastává kapilární kondenzace. Podle zákona fuze je střední volná dráha molekul vodní páry stejná nebo větší, než je průměr pórů[5].

2. Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků

Při tepelně technických výpočtech v úrovni návrhu, případně při posuzování stavebních konstrukcí a budov, se jako vstupní atribut vychází z fyzikálních vlastností materiálů zabudovaných v konstrukcích. Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů nejsou konstantní veličiny, ale závisí na mnoha parametrech.

Základní tepelné a vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků:

- součinitel tepelné vodivosti λ , tepelný odpor R , součinitel prostupu tepla U ,
- objemová hmotnost ρ , hustota ρ a pórovitost p ,
- objemová vlhkost w_v , hmotnostní vlhkost w_h , kritický obsah vlhkosti w_{cr} , charakteristická hmotnostní vlhkost $u_{23/80}$.
- měrná tepelná kapacita c ,
- faktor difúzního odporu μ , součinitel difúzní vodivosti δ ,
- nasákavost W_p , dlouhodobá navlhavost při difúzi W_{dp} .

Základem tepelně technických stavebních výpočtů je součinitel tepelné vodivosti λ . Vyjadřuje schopnost stejnorodého, izotropního materiálu při dané střední teplotě vést teplo. Je dán vztahem:

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-\text{grad}\theta} \quad (16)$$

kde q vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením, proudícího stejnorodým izotropním materiálem (W/m^2),
 $\text{grad}\theta$ gradient teploty (K/m).

Součinitel tepelné vodivosti je přímo závislý na více faktorech, například na vlhkosti, objemové hmotnosti, nebo střední teplotě.

Součinitel prostupu tepla U charakterizuje tepelně izolační schopnosti konstrukce a jeho hodnota závisí na typu konstrukce a jejích vlastnostech vyjádřených právě součinitelem tepelné vodivosti λ . Součinitel prostupu tepla U se stanoví pro podmínky ustáleného šíření tepla při zimních návrhových okrajových podmínkách a zahrnuje vliv veškerých tepelných mostů, které jsou součástí konstrukce. Součinitel prostupu tepla musí splnit podmínku stanovenou normou [7]:

$$U = \frac{1}{R_T} \leq U_N \quad (17)$$

kde U_N požadovaná (doporuč.) hodnota součinitele prostupu tepla ($W.m^{-2}.K^{-1}$),
 R_T tepelný odpor konstrukce ($m^2.K.W^{-1}$)

Přesnější výpočtové modely jsou založeny na řešení dvourozměrného, případně trojrozměrného teplotního pole celé konstrukce nebo její charakteristické části.

Při popisu vlastností stavebních materiálů rozlišujeme hustotu a objemovou hmotnost. Objemová hmotnost se definuje jako poměr hmotnosti tělesa k objemu tělesa včetně póru, mezer a dutin a je to veličina závislá na vlhkosti materiálu. U materiálů s malou pórovitostí tedy, kde se hodnota blíží nule, se hodnoty hustoty a objemové hmotnosti rovnají. U materiálů s velkou pórovitostí je objemová hmotnost v suchém stavu vždy menší než hustota.

Mezi zásadní vlastnosti materiálů patří také vlhkost, kterou lze vyjádřit dvěma základními veličinami, a to hmotnostní a objemovou vlhkostí.

Hmotnostní (váhová) vlhkost je definovaná jako poměr hmotnosti vody ve vzorku k hmotnosti pevné fáze (hmotnosti vysušeného vzorku)

$$w_h = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100\% = \frac{m_k}{m_d} \cdot 100\% \quad (18)$$

kde m_w hmotnost vlhkého materiálu (kg,g),
 m_d hmotnost suchého materiálu (kg,g),
 m_k hmotnost kapaliny (kg,g),
 w_h hmotnostní vlhkost (% hm.).

Objemová vlhkost je popsána jako poměr objemu vody ve vzorku k objemu pevné části vzorku

$$w_v = \frac{V_w}{V_d} \cdot 100\% \text{ obj.} = \frac{(m_w - m_d)}{\rho_w \cdot V_d} \cdot 100\% \text{ obj.} = \frac{w_h \rho_d}{\rho_w} \cdot 100\% \text{ obj.} \quad (19)$$

kde V_w objem volné vody (m^3),
 V_d objem suchého materiálu (m^3),
 ρ_v hustota vody ($kg.m^{-3}$),
 ρ_d objemová hmotnost suchého materiálu ($kg.m^{-3}$),
 w_v objemová vlhkost (% obj.)[1].

Mezi nejdůležitější veličiny popisující difúzní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků patří faktor difúzního odporu μ , součinitel difúzní vodivosti δ , které byly podrobně popsány výše.

3. Formulace okrajových podmínek

Určení parametrů vnějšího prostředí v posuzované lokalitě je prvním krokem jak při návrhu jednotlivých prvků obalových konstrukcí budovy, tak i při hodnocení energetických kvalit objektu. Základními klimatickými prvky z tohoto pohledu jsou teplota a vlhkost vzduchu.

Vnitřní prostředí budov je pro technické hodnocení omezeno na tepelně-vlhkostní mikroklima, pro něž se definují optimální teploty a relativní vlhkost v interiéru.

3.1 Parametry venkovního prostředí

Venkovní prostředí nejen z pohledu stavební fyziky definuje především teplota venkovního vzduchu a relativní vlhkost venkovního vzduchu.

Návrhové hodnoty parametrů venkovního prostředí

Návrhové hodnoty parametrů venkovního prostředí slouží k ověřování základních požadavků na hygienu, ochranu zdraví a životního prostředí, úsporu energií a tepelnou ochranu stavebních konstrukcí a prostorů pozemních staveb.

Návrhovými parametry venkovního vzduchu tedy jsou:

- návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období θ_e (°C),
- návrh. průměrná měsíční teplota venkov. vzduchu v ročním průběhu $\theta_{e,mm}$ (°C),
- četnost parametrů (teplota a relativní vlhkost vzduchu) venkovního prostředí,
- návrhová teplota zeminy přilehlé ke stav. konstrukci v zimním období θ_{gr} (°C),
- návrhová rychlost a směr větru v zimním období,
- návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období θ_e^* (°C),
- relativní vlhkost venkovního vzduchu φ_e (%),
- rychlost proudění venkovního vzduchu v_a (m·s⁻¹),
- energie globálního slunečního záření E (kW·h·m⁻²).

Návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období

Návrhová teplota θ_e (°C) se stanoví v závislosti na teplotní oblasti a nadmořské výšce mísa budovy ze vztahu:

$$\theta_e = \theta_{e,100} + \Delta\theta_e \quad (15)$$

kde $\theta_{e,100}$ je základní návrhová teplota venkovního vzduchu v příslušné teplotní oblasti zeměpisně vymezené, určená pro nadmořskou výšku 100 m.n.m. (°C),

$\Delta\theta_e$ výškový teplotní gradient (K) pro danou teplotní oblast m který se pro místo budovy s nadmořskou výškou h určí ze vztahu:

$$\Delta\theta_e = \Delta\theta_{e,0} \cdot \frac{\Delta h}{100} \quad (20)$$

kde $\Delta\theta_{e,0}$ je základní teplotní gradient pro danou teplotní oblast (K),

$\Delta h = h - 100$ rozdíl nadmořské výšky místa budovy h (m) a základní nadmořské výšky 100 m.n.m.

Návrhová teplota venkovního vzduchu se zaokrouhlí na celé (°C) směrem k nižší (chladnější) hodnotě.

3.2 Parametry vnitřního prostředí

Údaje parametrů vnitřního prostředí slouží k ověřování plnění základních požadavků hygieny, ochrany zdraví a životního prostředí a také k ověřování základních požadavků úspory energie a tepelné ochrany příslušných norem.

Návrhovými parametry vnitřního prostředí tedy jsou:

- návrhová vnitřní teplota v zimním období θ_i (°C),
- návrhová teplota vnitřního vzduchu v zimním období $\theta_{ai,u}$ (°C),
- návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu $\varphi_{i,u}$ (%),
- návrhová průměrná měsíční relativní vlhkost vnitřního vzduchu $\varphi_{i m,u}$ (%).

Návrhová vnitřní teplota v zimním období

Návrhová vnitřní teplota interiéru stavebních objektů se stanoví na základě druhu vnitřního prostředí podle ČSN EN 7730. Pro jednotlivé druhy budov, kategorie vnitřního tepelného prostředí, vykonávané činnosti dle ČSN EN 12831.

$$\theta_i = \theta_v \approx \theta_o \quad (21)$$

kde θ_v je výsledná teplota vnitřního vzduchu (°C),

θ_o operativní teplota (°C).

Návrhová teplota vnitřního vzduchu v zimním období

Návrhová teplota vnitřního vzduchu $\theta_{ai,u}$ v zimním období se pro tepelně technické výpočty (s ohledem na zajištění přijatelné tepelné pohody vnitřního prostředí) určí dle vztahu:

$$\theta_{ai,u} = \theta_i + 0,15 \cdot U_m \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (22)$$

kde θ_i je návrhová vnitřní teplota (°C),
 θ_e návrhová teplota venkovního vzduchu (°C),
 U_m průměrný součinitel prostupu tepla konstrukce tvořící obálku vnitřního prostoru ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

Pro prostory stavebních objektů, s významným rozdílem mezi průměrnou teplotou okolních ploch a teplotou vnitřního vzduchu, se návrhová teplota stanoví orientačně:

$$\theta_{ai,u} = \theta_i + \Delta\theta_{ai} \quad (23)$$

kde θ_i je návrhová vnitřní teplota (°C),
 $\Delta\theta_{ai}$ teplotní přírážka na vyrovnání teplot mezi průměrnou teplotou vnitřního vzduchu a průměrnou teplotou okolních ploch (°C), která se staví orientačně z tabulky I.2 v ČSN 73 0540-3 .

Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu

Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu vnitřních prostorů pozemních staveb $\varphi_{i,u}$ (%) se stanoví ze vztahu:

$$\varphi_{i,u} = \varphi_i + \Delta\varphi_i \quad (24)$$

kde φ_i je relativní vlhkost vnitřního vzduchu (%),
 $\Delta\varphi_i$ je bezpečnostní vlhkostní přírážka (%).

Relativní vlhkost vnitřního vzduchu vnitřních prostor občanských a bytových staveb s požadovaným stavem vnitřního prostředí se standardně (bez zvláštních provozních požadavků) uvažuje hodnotou:

$$\varphi_i = 50 \, \%$$

Hodnota bezpečnostní vlhkostní přírážky je stanovena na 5% pro výpočet kondenzace vodní páry v konstrukci a výpočet celoroční bilance zkondenzované vodní páry. Pro posuzování rizika růstu plísní je hodnota rovna 0%.

Návrhová průměrná měsíční relativní vlhkost vnitřního vzduchu

Návrhová průměrná měsíční relativní vlhkost vnitřního vzduchu $\varphi_{im,u}$ (%) se stanoví pro vnitřní prostory pozemních staveb:

- bez zvláštních požadavků na stav vnitřního prostředí, bez zvláštních vnitřních zdrojů vlhkosti, s relativní vlhkostí vnitřního vzduchu $\varphi_i \leq 60\%$, které jsou přirozeně větrány, postupem dle příslušné normy,
- které jsou klimatizovány, nebo prostory s vlhkým, mokrým nebo suchým prostředím podle příslušné projektové dokumentace,
- s definovanými vnitřními zdroji vlhkosti a výměnou vnitřního vzduchu, bilančním výpočtem dle příslušné normy[5].

3.3 Vlhkostní parametry vzduchu

Vlhkost vzduchu může být vyjádřena jako:

- tlak (napětí) vodní páry obsažené ve vzduchu (4,5 – 10,0 hPa pro ČR),
- absolutní vlhkost vzduchu,
- relativní vlhkost vzduchu,
- ekvivalentní vlhkost vzduchu – stupeň nasycenosti vzduchu vodní párou vzhledem k aktivnímu povrchu, jehož teplota se liší od teploty vzduchu,
- sytostní doplněk – množství vodní páry, které chybí do nasycení vzduchu vodní párou,
- rosný bod – teplota, na kterou musíme isobaricky ochladit vzduch, aby se nasýtil vodní párou, která je v něm obsažená.

Maximální tlak vodní páry E (dále jako $p_{v,sat}$), vyjadřuje nejvyšší množství vodní páry, které může vzduch obsahovat za dané teploty, vypočteme dle Magnusova vztahu:

$$E = E_0 \cdot 10^{(7,45 \cdot t) / (235 + t)} \text{ (hPa)} \quad (25)$$

kde E_0 tlak vodní páry při teplotě 0°C ,
 t teplota vzduchu v době měření ($^\circ\text{C}$).

Nebo také dle jeho modifikace:

$$p = e^{\left(27,376 - \frac{5745,31}{T}\right)} \quad (26)$$

kde T termodynamická teplota (K),
 p částečný tlak vodní páry (Pa).

Skutečný (částečný) tlak vodní páry e (hPa) (dále jako p_v) vyjadřuje skutečné napětí vodní páry ve vzduchu, výpočet pomocí psychometrické rovnice

$$e_\theta = E' - A \cdot (t - t') \cdot p \quad (27)$$

kde E' maximální tlak vodní páry při teplotě vlhkého teploměru t' (hPa),
 t teplota suchého teploměru ($^{\circ}\text{C}$),
 p atmosférický tlak (hPa),
 A konstanta zahrnující pohyb (rychlost) psychometrické charakteristiky vzduchu ($A = 0,00080$)

Dle [9] lze částečný tlak vodní páry p_v stanovit také z hodnoty relativní vlhkosti vzduchu a částečného tlaku nasycené vodní páry jako

$$p_{v,i(e)} = \frac{\varphi_{i(e)} \cdot p_{\text{sat},i(e)}}{100} \quad (28)$$

kde θ teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$),
 p_{sat} částečný tlak nasycené vodní páry (Pa),
 $p_{v,i,e}$ částečný tlak vodní páry vnitřního a vnějšího vzduchu (Pa),
 $\varphi_{i,e}$ relativní vlhkost vzduchu (%).

Absolutní vlhkost vzduchu A (dále jako ϕ) ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotkovém objemu vzduchu:

- při nasycení vzduchu vodní párou ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

$$A = \frac{217 \cdot E}{T} \quad (29)$$

- při skutečném obsahu vodní páry ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

$$a = \frac{217 \cdot e}{T} \quad (30)$$

kde T teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$),
 E, e tlak (napětí) vodní páry (hPa) při teplotě vzduchu T ($^{\circ}\text{C}$).

Relativní vlhkost vzduchu r (%) (nebo dále jako φ) vyjadřuje poměr mezi skutečným a maximálním obsahem vodní páry ve vzduchu při dané teplotě:

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100 \quad (31)$$

Nebo jako poměr mezi hmotnostmi vodní páry obsažené v jednotkovém objemu vzduchu při nasycení vodní párou a při skutečném obsahu vodní páry:

$$r = \frac{a}{A} \cdot 100 \quad (32)$$

kde A, a absolutní vlhkost vzduchu při nasycení vzduchu vodní párou a při skutečném obsahu vodní páry

E, e tlak (napětí) vodní páry (hPa) při teplotě vzduchu T (°C)[8].

3.4 Částečný tlak nasycené vodní páry jako funkce teploty dle ČSN EN ISO 13788

Pro stanovení hodnoty částečného tlaku nasycené vodní páry lze užít následující empirické vzorce užívající částečný tlak nasycené vodní páry jako funkci teploty:

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\left(\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}\right)} \quad \text{pro } \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (33)$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\left(\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}\right)} \quad \text{pro } \theta < 0^\circ\text{C} \quad (34)$$

Tyto vztahy lze převrátit na výpočet teploty odpovídající částečnému tlaku nasycené vodní páry:

$$\theta = \frac{237,3 \cdot \log_e \cdot \left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{17,269 - \log_e \cdot \left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad \text{pro } p_{sat} \geq 610,5 \text{ Pa} \quad (35)$$

$$\theta = \frac{265,5 \cdot \log_e \cdot \left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{21,875 - \log_e \cdot \left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad \text{pro } p_{sat} < 610,5 \text{ Pa} \quad (36)$$

kde θ teplota vzduchu (°C)

p_{sat} částečný tlak nasycené vodní páry (Pa)[9].

Shrnutí

Pro korektní a ucelenou interpretaci řešení problematiky bylo nezbytné definovat a popsat okrajové podmínky, které zásadním způsobem ovlivňují každou konstrukci. Jedná se především o materiálové charakteristiky a parametry vnějšího a vnitřního prostředí.

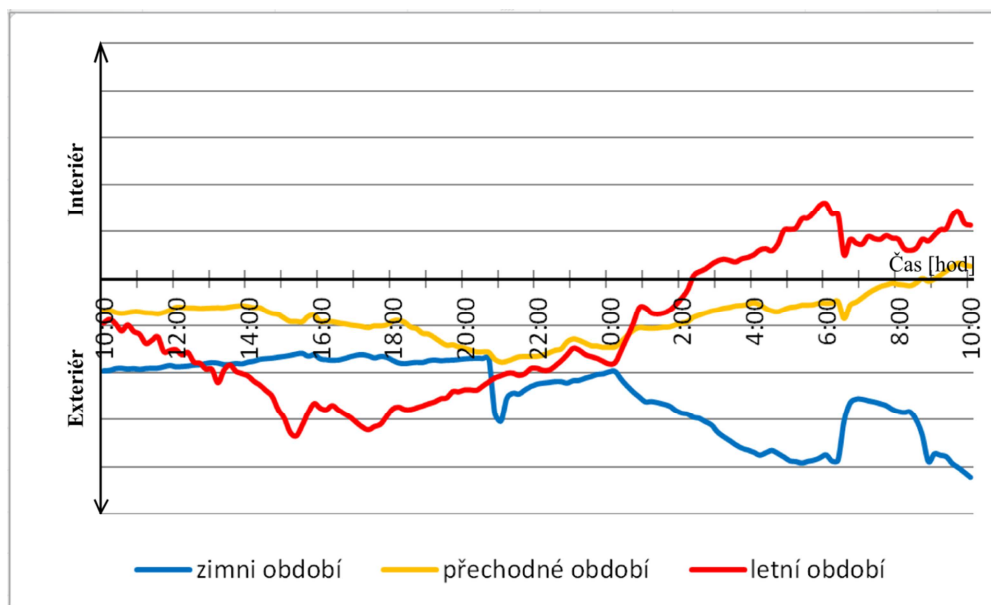
4. Tepelně-vlhkostní stav v interiéru budov v průběhu klimatického roku

Jak již bylo řečeno výše, difundující vodní páry se pohybují z míst s vyšším tlakem do míst, kde je tlak vodních par nižší. Směr proudění se tedy mění v průběhu klimatického roku, a sice v zimním období se vodní páry pohybují z interiéru do exteriéru, v letním období je směr opačný. Toto je znázorněno podrobněji na grafu č. 3. Tento graf popisuje difuzi vodní páry do prostředí exteriéru, respektive interiéru zatíženého běžným provozem v závislosti na změně parametrů venkovního vzduchu. Je zde zobrazeno 24 hodin provozu koupelny, kde je výskyt vodní páry v interiéru za standartních podmínek užívání v rámci typické bytové jednotky nejvyšší.

Jako měřicí zařízení byl zvolen USB datalogger pro měření teploty a relativní vlhkosti Voltcraft DL-121TH s rozsahem měření teploty -40 až $+70$ °C, relativní vlhkost 0 až 100 %.



Obr. 3) USB datalogger pro měření teploty a relativní vlhkosti Voltcraft DL-121TH osazený v interiéru budovy[zdroj: archiv autora]



Graf 3) Difuze vodní páry do prostředí (interiér, exteriér) v průběhu klimatického roku, kdy v zimním období proudí vodní páry směrem do exteriéru, v letním období do interiéru[zdroj: archiv autora]

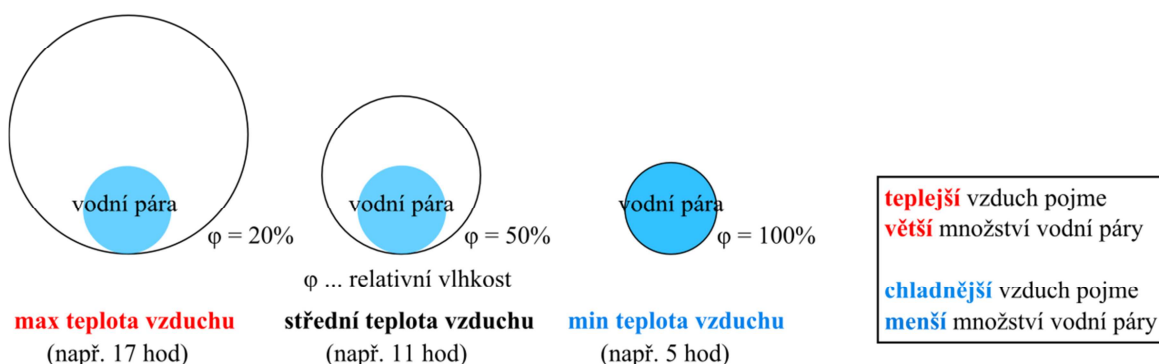
Z výše uvedeného grafu č.3 je patrné, že v zimním období jsou difúzní toky z prostředí interiéru do exteriéru nejvýraznější, jelikož hodnota částečného tlaku vodní páry vnitřního vzduchu p_{vi} je až 4 krát vyšší než hodnota částečného tlaku vodní páry venkovního vzduchu p_{ve} , naopak v letním období difúzní toky proudí převážně z prostředí exteriéru do prostředí interiéru, čili z míst s vyšším tlakem vodní páry do míst s tlakem nižším.

Obecně hodnota tlaku vodní páry je závislá na parametrech prostředí, což je především teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a atmosférický tlak.

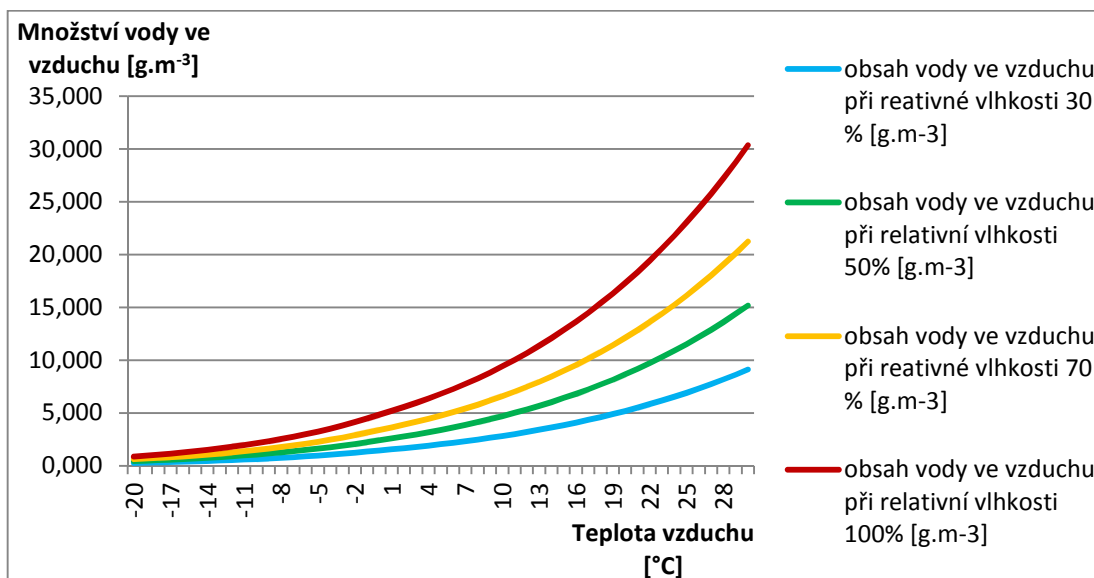
Analogicky tedy platí, že hmotnost vodní páry obsažené v jednotkovém objemu vzduchu je závislá na teplotě vzduchu a napětí vodní páry při dané teplotě. Tato závislost je zobrazena v grafu č. 4 a č. 5.

Je ovšem nezbytné si uvědomit, že vlhkost vzduchu je nejčastěji udávána hodnotou relativní vlhkosti vzduchu neboli poměrem mezi skutečným a maximálním obsahem vodní páry ve vzduchu při dané teplotě. Nikoli absolutním množstvím vodní páry. Proto porovnání hodnot relativní vlhkost pro zimní období, čili okolo 80%, a pro letní období, okolo 40%, nemusí nutně znamenat větší obsah vodní páry ve vzduchu v zimě. Zásadní je, že čím je teplota vzduchu vyšší, tím větší množství vodní páry je schopen pojmout, což je stručně znázorněno na grafu č. 4 a č. 5 a obr. 4.

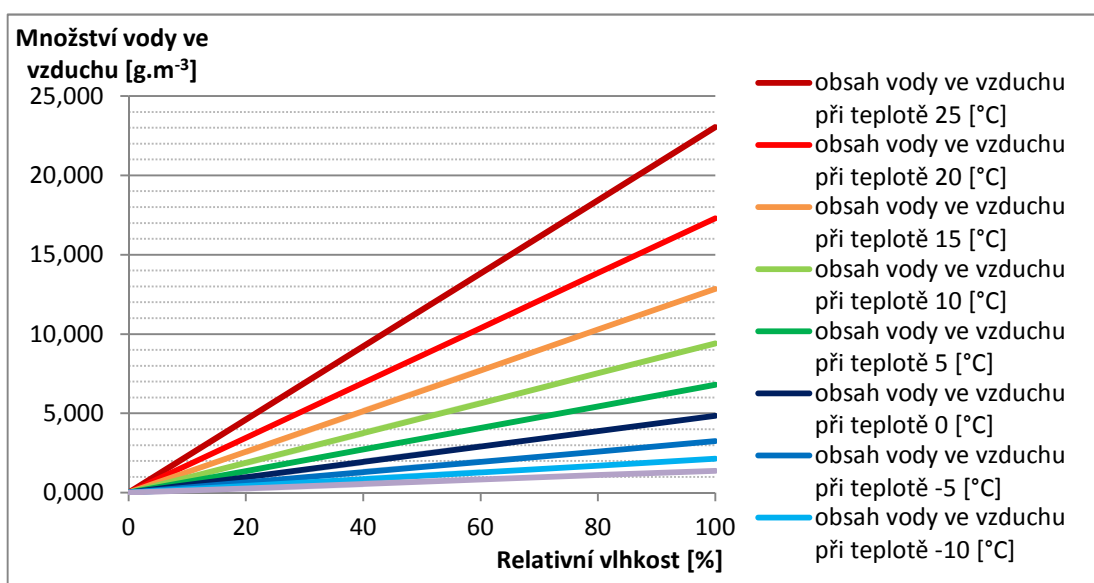
Maximální možné množství vodní páry



Obr. 4) Relativní vlhkost vzduchu - vztah mezi teplotou vzduchu a množstvím vodní páry v něm obsaženém [8]



Graf 4) Množství vody ve vzduchu při proměnné relativní vlhkosti vzduchu [zdroj: archiv autora]



Graf 5) Množství vody ve vzduchu při konstantní teplotě a proměnné relativní vlhkosti [zdroj: archiv autora]

Jelikož pro vlhkostní chování konstrukcí je zásadní zima, bude řešení optimalizace návrhu dřevostaveb zaměřena právě na toto období. Kondenzace v konstrukci může zásadním způsobem ohrozit celou stavbu. Správný návrh konstrukcí zamezující nežádoucí výskyt zvýšené vlhkosti je zásadní o to více, že se jedná o konstrukční systémy na bázi dřeva. U těchto prvků může dojít vlivem dlouhodobého působení vlhkosti až k jejich celkové degradaci, čímž hrozí závažné riziko destrukce celé stavby.

5. Hodnocení vlhkostního stavu ve stavebních konstrukcích

V následujících podkapitolách jsou popsány nejčastěji užívané metodiky pro popis hodnocení tepelně vlhkostního stavu ve stavebních konstrukcích, a to jak v České republice, tak v zahraničí.

Jedná se o hodnocení konstrukcí dle:

1. ČSN 73 0540-4 - Celoroční množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}$, popř. celoroční množství vypařené vodní páry $M_{ev,a}$;
2. ČSN EN ISO 13788 - Výpočet celoroční bilance;
3. ČSN EN ISO 13788 – Návrh vylučující vznik plísní;
4. Analýza rizika růstu plísní Mold Growth Risk Analysis.

Zjištění výskytu kondenzace v konstrukci

Metodika zjištění výskytu kondenzace vodní páry uvnitř stavebních konstrukcí vychází z porovnání hodnot částečných (parciálních) tlaků vodní páry (skutečného částečného tlaku vodní páry a částečného tlaku nasycené vodní páry) v konstrukci. Částečný tlak vodní páry ve vzduchu je funkcí teploty a vlhkosti vzduchu (obvykle relativní vlhkosti vzduchu).

Skutečný částečný tlak vodní páry p_v (Pa) lze vyjádřit vztahem:

$$p_v = p_{v,sat} \cdot \frac{\varphi_a}{100} \quad (Pa) \quad (37)$$

kde $p_{v,sat}$ částečný tlak nasycené vodní páry ve vzduchu (Pa),
 φ_a relativní vlhkost vzduchu (%).

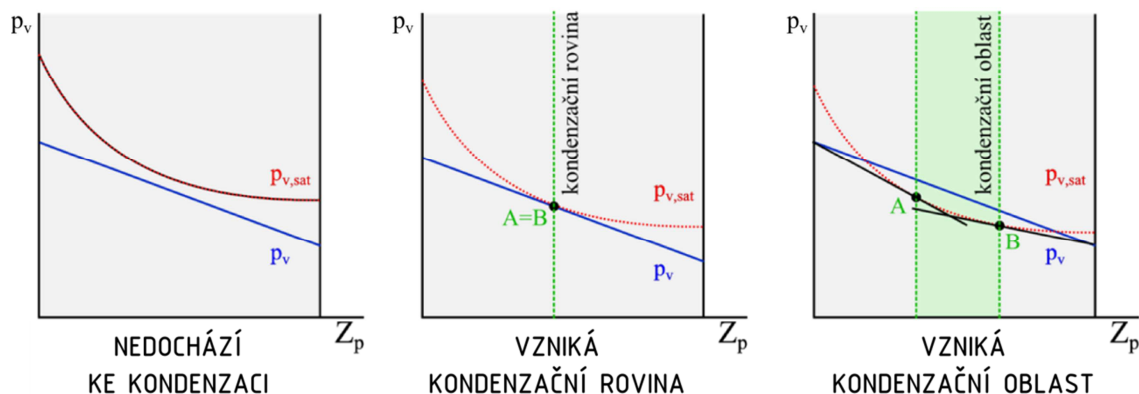
Částečný tlak nasycené vodní páry $p_{v,sat}$ je tlak, při němž je vzduch při dané teplotě vodní párou absolutně nasycen ($\varphi_a = 100\%$).

Zjištění výskytu kondenzace vodní páry se provádí pro okrajové podmínky, odpovídající maximálnímu rozdílu parciálních tlaků vodní páry ve vnitřním a vnějším prostředí (současně maximální teplotní rozdíl). Ke kondenzaci vodní páry v konstrukci dochází, dosáhne-li skutečný částečný tlak vodní páry v libovolném průřezu konstrukce alespoň hodnoty tlaku nasyceného:

$$p_v \geq p_{v,sat} \quad (38)$$

kde $p_{v,sat}$ částečný tlak nasycené vodní páry ve vzduchu (Pa),
 p_v skutečný částečný tlak vodní páry ve vzduchu (Pa),

Lze tedy identifikovat tři základní situace:



Obr. 5) Princip kondenzace vodní páry v konstrukci stěny s tloušťkou v měřítku difúzních odporů. Zobrazen lineární průběh částečného tlaku vodní páry p_v (dále jen p_v), nelineární průběh částečného tlaku nasycené vodní páry $p_{v,sat}$ (dále jen $p_{v,sat}$) a jejich vzájemný vztah.[5]

Roční bilance zkondenzované vodní páry a vypařené vlhkosti

Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry se stanoví buď výpočtem po měsících (podle ČSN EN ISO 13788 Tepelně vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků), nebo jako rozdíl ročního množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}$ a ročního množství vypařené vodní páry $M_{ev,a}$ (podle ČSN 73 0540-4 Tepelná ochrana budov). Metody jsou při hodnocení konstrukcí považovány za rovnocenné[5].

5.1 Celoroční množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}$, popř. celoroční množství vypařené vodní páry $M_{ev,a}$ podle ČSN 73 0540-4

Stanoví se na základě opakovaného výpočtu dílčích množství $M_{a,j}$ pro jednotlivé teploty vnějšího vzduchu $\theta_{ae,j}$, které při kroku $\Delta\theta_{ae} = 5^\circ\text{C}$ pokrývají rozsah teplot venkovního vzduchu v celoročním průběhu. Celoroční množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}$ je přitom součtem nezáporných hodnot dílčích množství $M_{a,j}$. Celoroční množství vypařené vodní páry $M_{ev,a}$ je součtem záporných hodnot dílčích množství $M_{a,j}$.

Dílčí množství zkondenzované nebo vypařené vodní páry $M_{a,j}$ se stanoví:

- **přibližně** (bez zohlednění vlivu slunečního záření)

$$M_{a,j} = (g_{A,j} - g_{B,j}) \cdot t_{e,j} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}) \quad (39)$$

kde $g_{A,j}$ je hustota difúzního toku vodní páry, která proudí konstrukcí od vnitřního povrchu k hranici A oblasti kondenzace ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

$g_{B,j}$ je hustota difuzního toku vodní páry, která proudí od hranice B oblasti kondenzace k vnějšímu povrchu ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$),

$t_{e,j}$ je celková doba trvání teploty vnějšího vzduchu $\theta_{ae,j}$ pro j v intervalu -21°C až 25°C podle tepl. oblasti v zimním období (s).

- **přesněji**, se zohledněním vlivu slunečního záření, pro nezastíněné neodvětrané ploché střechy a výjimečně i pro jiné neodvětrané vnější konstrukce, na které bude po celou dobu jejich životnosti nerušeně dopadat sluneční záření

$$M_{a,j} = M_{az,j} + M_{aj,j} \quad (\text{kg.m}^{-2}\text{rok}^{-1}) \quad (40)$$

kde $M_{az,j}$ je dílčí množství zkondenzované (vypařené) vodní páry pro zataženou oblohu ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$),

$M_{aj,j}$ je dílčí množství zkondenzované (vypařené) vodní páry pro jasnou oblohu ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$).

Postupný výpočet zkondenzované vodní páry a vypařované vlhkosti v průběhu jednoho roku spočívá v opakovaném určování oblasti kondenzace pro různé venkovní teploty.

Na základě normových požadavků mohou být navrženy konstrukce bez kondenzace vodní páry nebo s omezenou kondenzací.

Bez kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce musí být navrženy konstrukce, u kterých by zkondenzovaná vodní pára mohla ohrozit jejich požadovanou funkci:

$$M_c = 0 \quad (\text{kg.m}^{-2}\text{rok}^{-1}) \quad (41)$$

kde M_c je celoroční množství zkondenzované vodní páry uvnitř kce ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$).

Ohrožením požadované funkce je obvykle podstatné snížení předpokládané životnosti konstrukce, snížení vnitřní povrchové teploty konstrukce vedoucí ke vzniku plísní, objemové změny a výrazné zvýšení hmotnosti mimo rámec rezerv statického výpočtu, nebo zvýšení hmotnostní vlhkosti materiálu na úroveň způsobující jeho degradaci. Zejména musí být respektovány podmínky pro uplatnění dřeva nebo materiálů na bázi dřeva ve stavebních konstrukcích. Pokud za normových podmínek užívání překročí rovnovážná hmotnostní vlhkost dřeva nebo materiálu na bázi dřeva hodnotu 16%, je požadovaná funkce konstrukce ohrožena.

S omezenou kondenzací vodní páry uvnitř konstrukce mohou být navrženy stěny, stropy a střechy, u kterých jsou splněny podmínky:

- zkondenzovaná vodní pára neohrozí požadovanou funkci konstrukce, roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry je:

$$M_c < M_{ev} \quad (42)$$

kde M_{ev} je celoroční množství vypařené vodní páry ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$).

Celoroční přípustné množství zkondenzované vodní páry pro stavební konstrukce je podrobně uvedeno v [7].

5.2 Výpočet celoroční bilance podle ČSN EN ISO 13788 (srpen 2013)

Provádí se po jednotlivých měsících, uvažují se průměrné měsíční teploty a vlhkosti v interiéru i exteriéru. Výchozí měsíc výpočtu se stanoví buď přímou volbou, nebo standardním výpočtem, kdy se zjistí první měsíc, kdy dochází ke kondenzaci. Nejčastěji jím bývá říjen [9].

5.3 Návrh vylučující růst plísní dle ČSN EN ISO 13788 (srpen 2013)

V ČR platná norma ČSN EN ISO 13788 (srpen 2013) uvádí, že pro vyloučení růstu plísní nesmí relativní povrchová vlhkost dlouhodobě (po několik dní) převyšovat hodnotu 0,8 (80%). Základem je stanovení přípustné nasycené objemové vlhkosti vzduchu u povrchu v_{sat} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$):

$$v_{sat}(\theta_{si}) = \frac{v_i}{0,8} \quad (43)$$

kde v_{sat} měrná objemová vlhkost vzduchu při nasycení ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 v_i měrná objemová vlhkost vzduchu – interiér,
 θ_{si} povrchová teplota ($^{\circ}\text{C}$),

nebo částečného tlaku nasycené vodní páry u povrchu p_{sat} (Pa):

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{0,8} \quad (44)$$

kde p_{sat} částečný tlak nasycené vodní páry (Pa),
 p_i částečný tlak vodní páry (Pa),
 θ_{si} povrchová teplota ($^{\circ}\text{C}$).

Z těchto hodnot je stanovena minimální povrchová teplota $\theta_{si,min}$ ($^{\circ}\text{C}$) dle vzorců:

$$\theta_{si,min} = \frac{237,3 \cdot \log_e \cdot \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \cdot \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right)} \quad \text{pro } p_{sat} \geq 610,5 \text{ Pa} \quad (45)$$

$$\theta_{si,min} = \frac{265,5 \cdot \log_e \cdot \left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{21,875 - \log_e \cdot \left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad \text{pro } p_{sat} < 610,5 \text{ Pa} \quad (46)$$

a tím požadovaná „tepelně izolační kvalita“ pro danou teplotu vnitřního vzduchu vyjádřená nejnižším teplotním faktorem vnitřního povrchu $f_{Rsi,min}$ (-):

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_{ai} - \theta_e} = 1 - \xi_{Rsi,min} \quad (47)$$

kde f_{Rsi} je průměrný teplotní faktor vnitřního povrchu,
 ξ_{Rsi} poměrný teplotní rozdíl vnitřního povrchu,
 θ_{ai} návrhová teplota vnitřního vzduchu (°C),
 θ_{si} vnitřní povrchová teplota, (°C),
 θ_e návrhová teplota venkovního vzduchu (°C).

Měsíc s nejvyšší požadovanou hodnotou $f_{Rsi,min}$ (-) je kritickým měsícem. Teplotní faktor pro tento měsíc je $f_{Rsi,max}$ (-) a stavební prvky musí být navrhovány tak, aby byla vždy překročena hodnota $f_{Rsi,max}$

$$f_{Rsi} > f_{Rsi,max} \quad (48)$$

Mezní hodnota relativní povrchové vlhkosti může být snížena z 0,8 například na 0,6, a to z důvodu zabránění koroze. Parametrem ovlivňujícím růst plísní je tedy nejen objemová vlhkost vzduchu u povrchu materiálu, ale také jeho typ[9].

5.4 Analýza rizika růstu plísní Mold Growth Risk Analysis

V zahraničí se pro posouzení rizika růstu plísní používá metoda Mold Growth Risk. Vychází z principu určení kritické relativní vlhkosti RH_{crit} , na jejímž základě je konstrukce začleněna do 7 skupin popisujících riziko růstu plísní. K nežádoucímu růstu plísní vede určitá kombinace teploty a vlhkosti. Tato kombinace je vyjádřena vztahem s matematickým výrazem kritických relativních vlhkostí RH_{crit} , která je funkcí teploty. Funkce popisuje hranice možné existence plísní při dané teplotě a vlhkosti. Matematický model pro stanovení rizika růstu plísní je založen na dlouhodobém laboratorním měření prováděném na Technical Research Centre of Finland (VTT - Technickém výzkumném středisku Finsko) a na Tampere University of Technology.

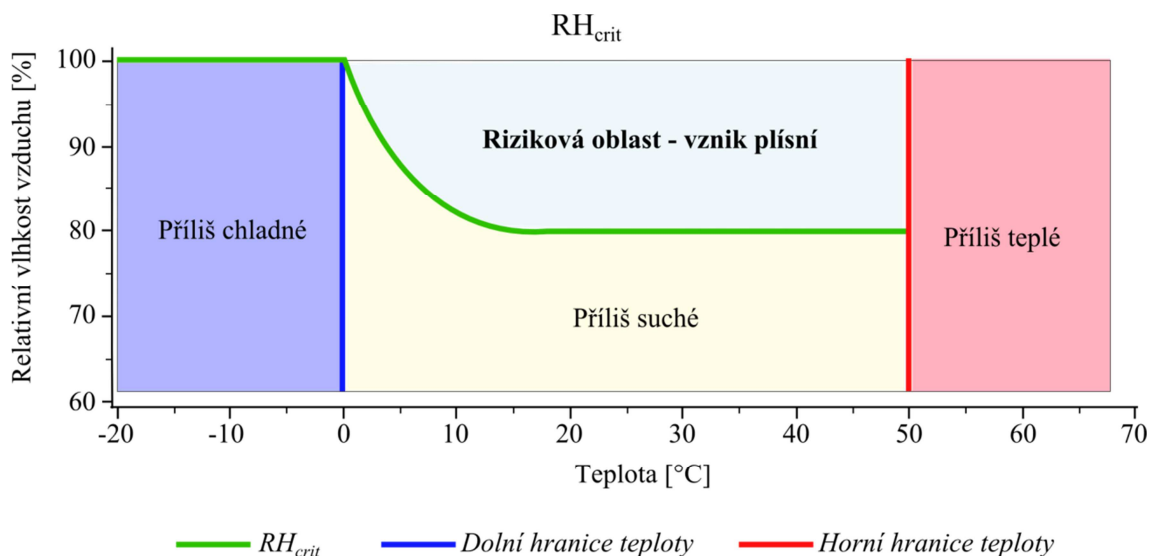
Pro určení kritické relativní vlhkosti RH_{crit} v závislosti na teplotě jsou stanoveny následující vztahy:

$$\text{Pro } T \leq 20: \quad RH_{crit} = (-0,00267 T^3 + 0,160 T^2 - 3,13 T + 100,0) \quad (49)$$

$$\text{pro } T > 20: \quad RH_{crit} = 80\% \quad (50)$$

kde: T teplota ($^{\circ}\text{C}$).

Grafické znázornění příznivých a nepříznivých oblastí pro vznik plísní v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti je uvedeno na obrázku č. 6.



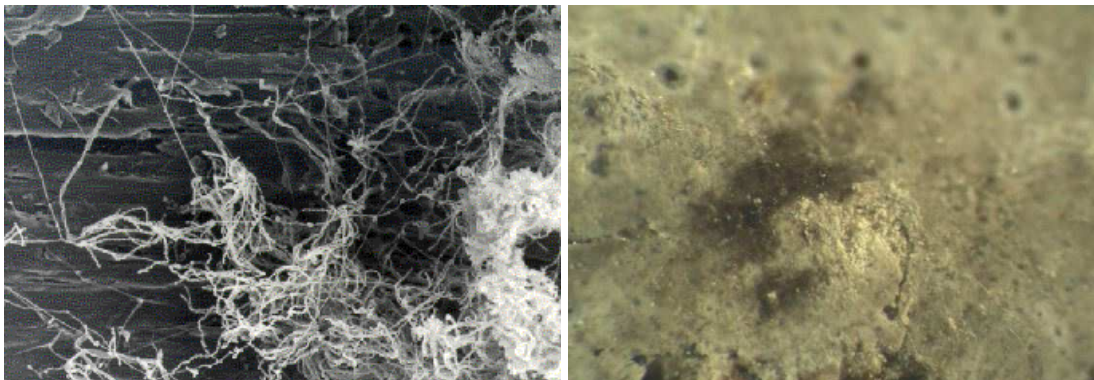
Obr. 6) Příznivé a nepříznivé oblastí pro vznik plísní v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti. Oblast příznivá pro vznik plísní (riziková oblast) je definovaná teplotami 0-50 $^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí vzduchu převyšující hodnotu 80%. Za jiných okrajových podmínek je prostředí příliš chladné, příliš suché nebo příliš teplé.[10]

Dalším zásadním parametrem, který ovlivňuje analýzu rizika růstu plísní, je doba expozice. Čím delší dobu je stavba nebo konstrukce vystavena příznivým podmínkám pro vznik plísní, tím se riziko jejich existence výrazně zvyšuje. Naopak stávající úroveň rizika růstu plísní v průběhu delšího časového úseku lineárně klesá.

Riziko růstu plísní, vyjádřené indexem rizika růstu plísní M , je rozčleněno na 7 úrovní, kde vypočtená hodnota M značí:

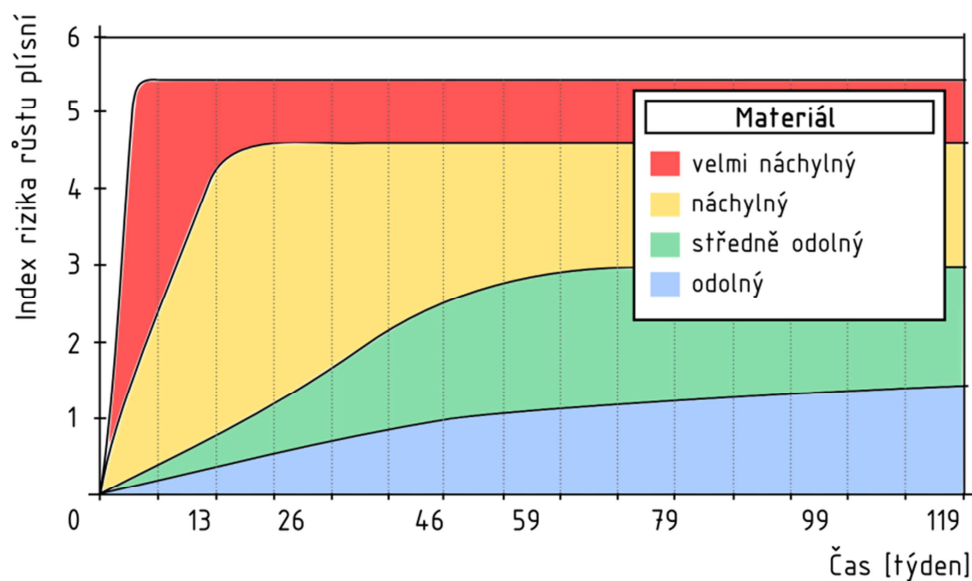
- 0 bez rizika,
- 1 mikroskopické množství plísní na povrchu,
- 2 <10% mikroskopické pokrytí plísní na povrchu,
- 3 10 – 30% pokrytí plísní na povrchu (vizuální),
- 4 30 – 70% pokrytí plísní na povrchu (vizuální),
- 5 >70% pokrytí plísní na povrchu (vizuální),
- 6 těžké zatížení konstrukce.

Příklady zasažených materiálů včetně stanoveného indexu rizika růstu plísní M jsou uvedeny na následujícím obrázku č. 7. Konkrétně se jedná o povrch dřevěné a betonové konstrukce.



Obr. 7) Index rizika růstu plísní M v případě rozdílných materiálů - povrch dřevěné konstrukce ($M = 5 - 6$), povrch betonové konstrukce ($M = 3 - 4$) [10]

Index rizika růstu plísní M je ovlivněn druhem materiálu, kvalitou povrchu a dobou expozice. Na níže uvedeném obrázku je znázorněna právě závislost indexu rizika růstu plísní M na čase a typu materiálu.



Obr. 8) Závislost indexu rizika růstu plísní M na čase a vlastnostech materiálu. Je patrné, že čím náchylnější materiál je, tím rychleji dosáhne maximální hodnoty indexu rizika růstu plísní [10]

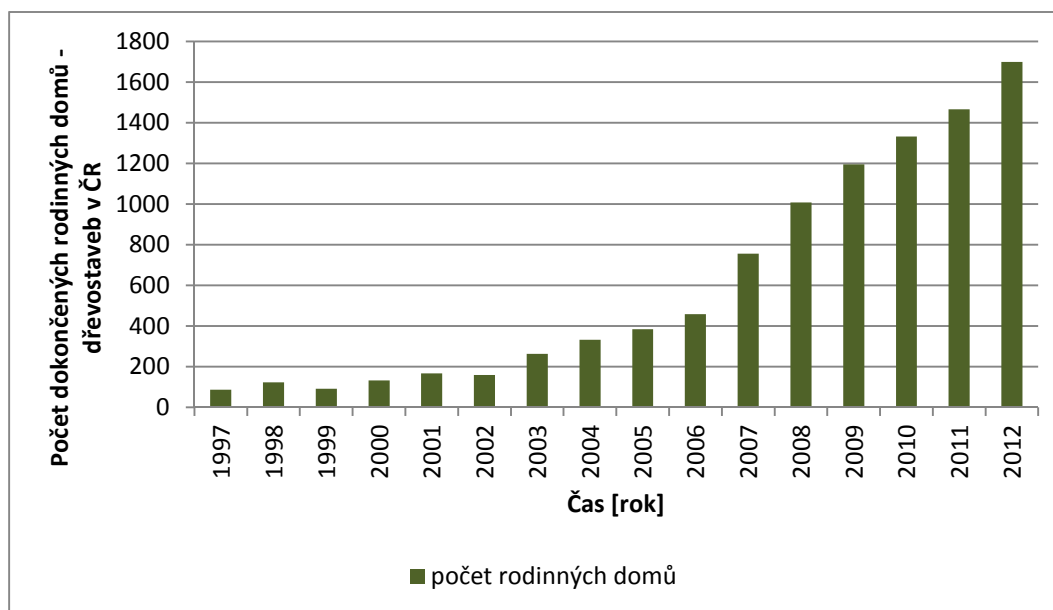
Mezi nejnáchylnější materiály z pohledu růstu plísní patří neošetřené dřevo, mezi náchylné hoblované dřevo nebo materiály s povrchovou vrstvou z papíru. Naopak do nejodolnějších lze zařadit materiály na bázi skla nebo kovu [10].

6. Dřevo ve stavebních konstrukcích

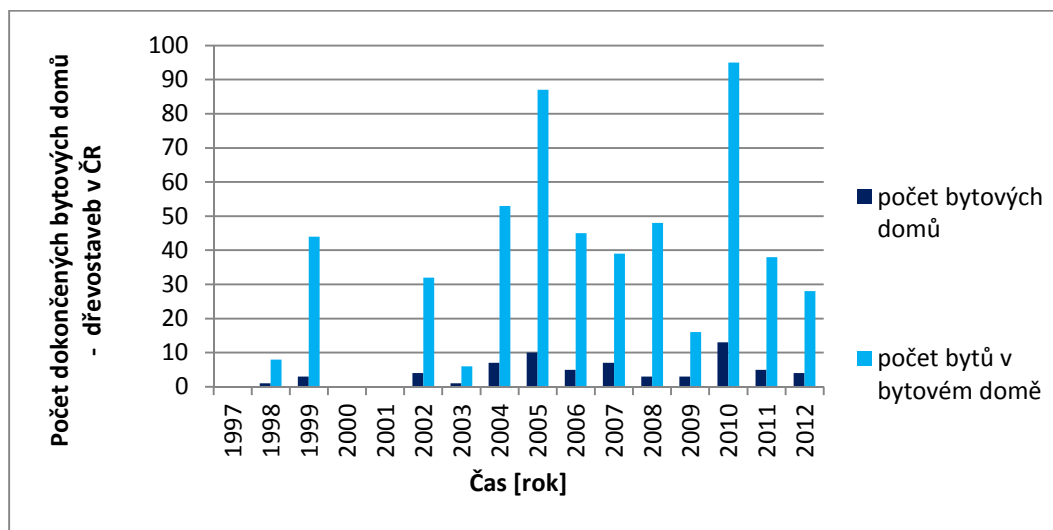
Jeho předností, jako jednoho z nejstarších stavebních materiálů, je především snadná opracovatelnost, vysoká pevnost v poměru k hmotnosti a dobré izolační schopnosti. Nelze rovněž opomenout, že je to materiál plně obnovitelný, jehož produkce a použití má na rozdíl od umělých konstrukčních materiálů příznivý dopad na životní prostředí.

Třetina území České republiky je porostlá lesem. V tomto ohledu je Česko 12. nejlesnatějším státem v Evropě. Dle společnosti Lesy ČR, s.p., jsme k datu únor 2015 v zásobě dřeva na 1 hektar lesa s $246 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ na 4. místě a v ročním přírůstu dřeva na hektar ($7,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) na 6. místě pomyslných evropských tabulek. V českých lesích přiroste za rok asi 18 milionů m^3 dřeva, vytežít se zhruba 14 – 15 milionů. Zásoba dřeva v našich lesích tedy rok od roku stoupá, přičemž materiál na výstavbu jednoho rodinného domu vyroste v českých lesích za necelé tři minuty.

Podle střeoevropských tradic bylo zakořeněno mínění, že dům určený pro trvalé bydlení musel přežít několik generací a musel tedy být „pevný“, kamenný, s masivními obvodovými stěnami a rozsáhlými sklepními prostory. Dřevo pak v těchto stavbách sloužilo pouze jako materiál pro konstrukci krovu a pro výstavbu oken, dveří či podlah. Dřevostavby jako konstrukční systém se rozvíjely primárně v zámoří a v severských zemích, což bylo dáno především dostupností surovin. V České republice můžeme zaznamenat nárůst podílu staveb ze dřeva v celkovém objemu realizovaných staveb pro bydlení až několika posledních letech[11].



Graf 6) Počet rodinných domů - dřevostaveb v ČR za období 1997-2012[12]



Graf 7) Počet bytových domů – dřevostaveb s příslušným počtem bytů v ČR za období 1997-2012 [12]

6.1 Charakteristika dřeva

Jelikož znalosti o struktuře dřeva a jeho charakteristice jsou pro řešené téma stěžejní, je této problematice věnována následující kapitola, přičemž hlavní pozornost je věnována základním vlastnostem, které ovlivňují transformaci tekutin (vlhkosti) v buněčné struktuře dřeva.

5.2.4 Struktura dřeva a jeho základní vlastnosti

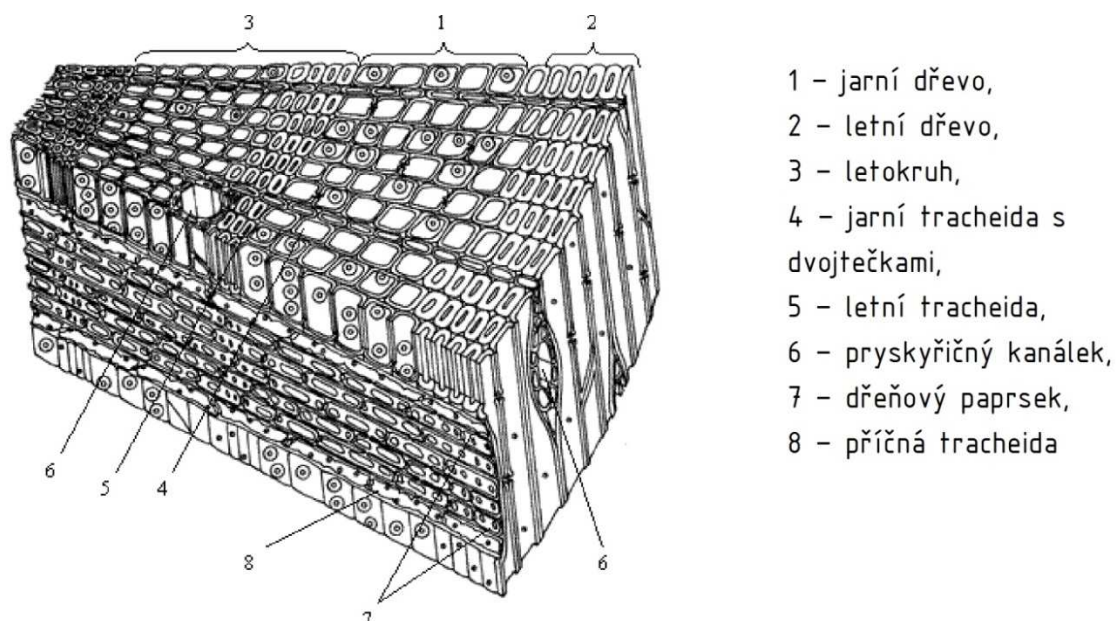
Dřevo je anizotropní “unikátní materiál“, který je vícesložkový, hygroskopický, nehomogenní, přerušovaný, nepružný, porézní, biologicky odbouratelný a obnovitelný. Jedná se o materiál organického původu, složený z buněk, které v průběhu života stromu plní různé funkce.

Podle jejich funkcí rozlišujeme tři typy buněk:

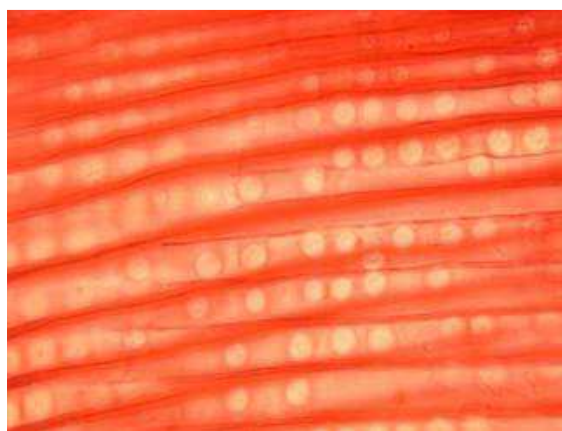
- parenchymatické buňky – vyživovací vodivé a zásobní buněčné elementy,
- sklerenchymatické buňky – vyztužovací buněčné elementy,
- cévy – vodivé buněčné elementy (tracheje – pravé cévy, tracheidy – cévice).

Z hlediska zastoupení jednotlivých typů buněk ve dřevě i z hlediska složitosti mikroskopické (anatomické) stavby dřeva dělíme dřeviny na jehličnaté a listnaté.

Jehličnaté dřeviny se vyznačují jednodušší anatomickou stavbou dřeva (obr. 9). Převládajícím buněčným elementem jehličnanů jsou tracheidy, které představují 90-94 % jehličnatého dřeva. Zbývající část dřeva tvoří parenchymatické buňky.



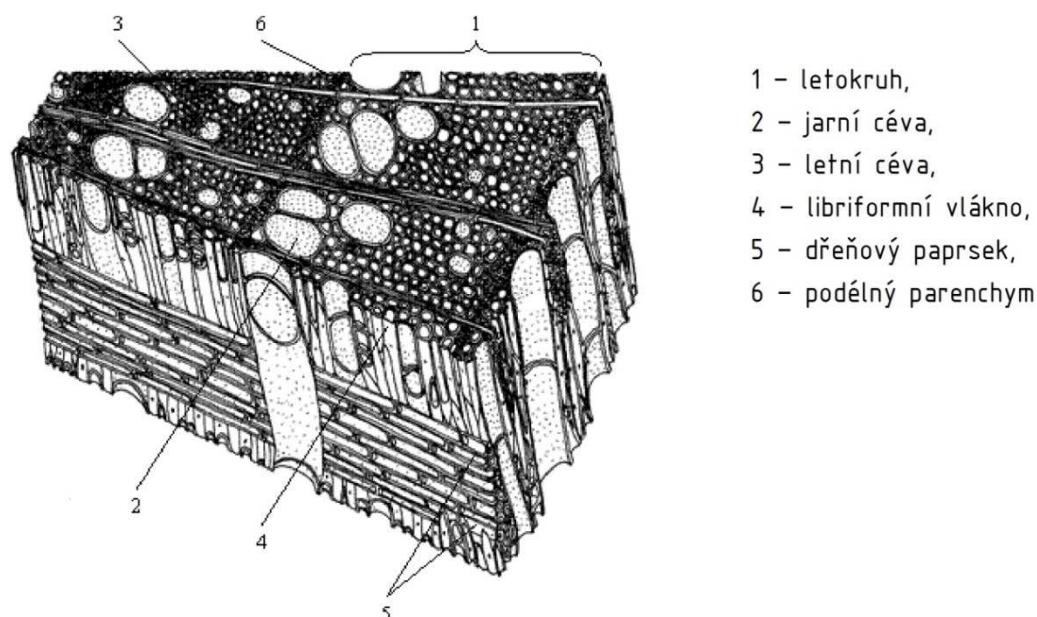
Obr. 9) Prostorové znázornění anatomické stavby jehličnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997): 1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida, 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřeňový paprsek, 8 – příčná tracheida [36]



Obr. 10) Dvojtečky na radiální stěně tracheid borového dřeva, zvětšeno 400krát. [36]

Dřevo listnatých dřevin je tvořeno větším počtem různých buněk, které jsou více specializovány a přizpůsobeny své funkci při porovnání s buňkami jehličnatých dřevin. Dřevo listnáčů obsahuje následující typy buněk:

- cévy (tracheje) – vodivá funkce,
- cévice (tracheidy) – vodivá a vyztužovací funkce,
- libriformní buňky (dřevní vlákna) – vyztužovací funkce,
- parenchymatické buňky – vodivá a zásobní funkce [36].

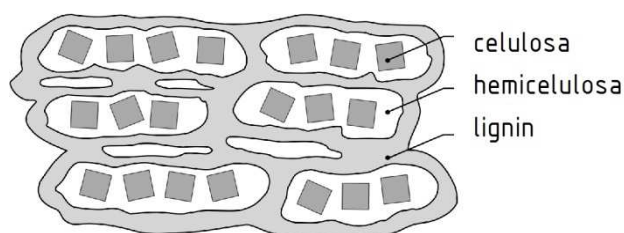


Obr. 11) Prostorové znázornění anatomické stavby listnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997): 1 – letokruh, 2 – jarní céva, 3 – letní céva, 4 – libriformní vlákno, 5 – dřevový paprsek, 6 – podélný parenchym [36]



Obr. 12) Kruhovité pórovité dřeviny, příčný řez: A- dub, B – jasan; zvětšeno 40krát [36]

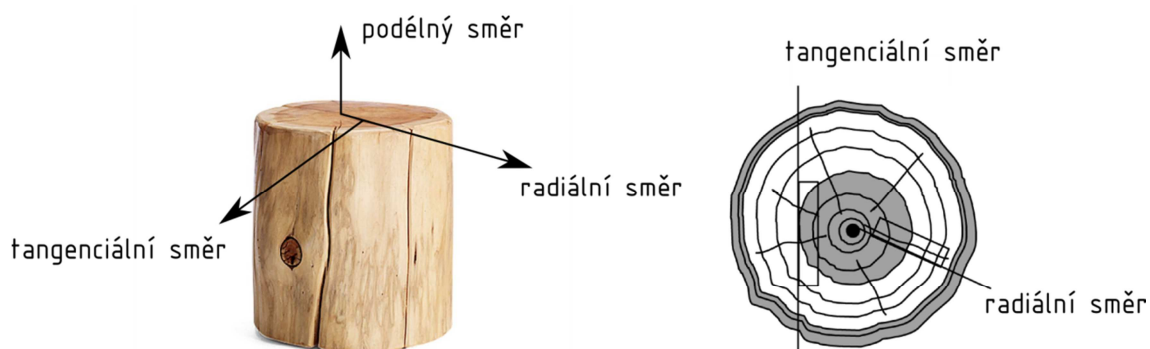
Po **chemické stránce** je to kompozitní materiál, vytvořený z celulosy (asi 50%), hemicelulosy (cca 22 až 25%), ligninu (cca 26 až 35%) a doprovodných látek.



Obr. 13) Příčný řez vlákny[13]

Anizotropní vlastnosti dřeva lze vysvětlit jeho makroskopickou strukturou. Buňky, ze kterých je dřevo tvořeno, jsou většinou protáhlého tvaru, orientované rovnoběžně s osou kmene nebo větve a jsou uspořádány centricky kolem této osy. S touto strukturou souvisí základní směry (řezy), které je nutno při popisu dřeva a jeho vlastností respektovat:

- **příčný směr** – směr vedený kolmo na osu kmene nebo větve,
- **podélný směr** - rovnoběžný se směrem vláken, resp. směrem růstu dřeva,
- **radiální směr** – kolmý na vlákna, ale oproti směru tangenciálnímu je kolmý na letokruhy, resp. jedná se o směr od středu kmene směrem ke kůře kmene
- **tangenciální směr** - směr kolmý na vlákna a je tečný k letokruhům



Obr. 14) Znáznornění základních řezů dřevem (podélný, radiální, tangenciální)

Mezi **fyzikální vlastnosti** dřeva patří především jeho vlhkostní vlastnosti, tepelné a akustické, hustota, vlastnosti elektro-fyzikální a vlastnosti povrchové a optické (barva, textura, lesk, povrch).

Mechanické vlastnosti dřeva vyjadřují jeho schopnost odolávat účinkům působení vnějších sil. Mezi základní mechanické vlastnosti patří především pevnost dřeva (závisí především na jeho vlhkosti), pružnost, tvrdost (6 tříd tvrdosti dřeva), odolnost při dlouhodobém zatěžování, obrobiteľnosť, štípatelnost nebo trvanlivost[14].

6.2 Vlhkost dřeva

Vlhkost je nejdůležitější vlastností dřeva, která ovlivňuje řadu dalších vlastností, jako je hustota, rozměrové změny, odolnost proti houbám a proti napadení hmyzem, mechanické vlastnosti, opracovatelnost, trvanlivost apod. Následující tabulka uvádí, jak výrazně vlhkost dřeva ovlivňuje jeho tepelnou vodivost.

Tab. 1) Hodnoty součinitele tepelné vodivosti dřeva v závislosti na objemové hmotnosti v suchém stavu a na vlhkosti[15]

Objemová hmotnost v suchém stavu ρ_s [kg.m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] při w_m [%]					
	0	2	5	10	20	30
300	0,085	0,093	0,105	0,124	0,164	0,204
400	0,101	0,109	0,121	0,141	0,179	0,219
500	0,117	0,126	0,138	0,158	0,198	0,237

Jelikož je dřevo hygrokopický materiál, je schopno přijímat nebo odevzdávat vlhkost z okolního prostředí, a to jak ve skupenství kapalném, tak ve skupenství plynném. Vlastní vlhkost dřeva se udává jako poměr hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu – vlhkost **absolutní**, nebo podílem hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva – vlhkost **relativní** a vyjadřují se nejčastěji v %.

Ve dřevě se nachází tzv. **volná voda** a **hygrokopicky vázaná voda**. Volná voda se nachází v dutinách buněk, vázaná voda se nachází v buněčných stěnách a je vázána na buněčnou stěnu vodíkovými spoji a van der Waalsovými silami. Bezprostředně po skácení stromu se začne obsah vody snižovat, přičemž nejprve se odpařuje volná voda. Při tomto procesu nedochází k žádným významným rozměrovým změnám. Stav, kdy se vypaří všechna volná voda, nazýváme **mez nasycení buněčných stěn**. V tomto okamžiku má ještě dřevo všechnu vodu vázanou. Jakmile se začne vypařovat i vázaná voda, dochází k významným změnám vlastností dřeva. Voda se vypařuje tak dlouho, dokud nenastane tzv. **stav vlhkostní rovnováhy**. Tento stav je charakteristický tím, že každé kombinaci teploty a vlhkosti vzduchu odpovídá určitá hodnota vlhkosti dřeva (rovnovážná vlhkost).

Rovnovážná vlhkost dřevěných konstrukčních materiálů je stanovena normově[16], v normách pro navrhování dřevěných konstrukcí jsou dále uvedeny tzv. třídy použití (třídy vlhkosti), které charakterizují klimatické poměry prostředí stavební konstrukce během její životnosti.

Třída vlhkosti 1 - Charakterizována obsahem vlhkosti v konstrukčních materiálech, který odpovídá teplotě 20°C a relativní vlhkosti okolního vzduchu, která překračuje 65% nejvýše několik týdnů v roce. U většiny jehličnatých druhů dřeva není překročena průměrná rovnovážná vlhkost 12%.

Třída vlhkosti 2 - Charakterizována obsahem vlhkosti v konstrukčních materiálech, který odpovídá teplotě 20°C a relativní vlhkosti okolního vzduchu, která překračuje 85% nejvýše několik týdnů v roce. U většiny jehličnatých druhů dřeva není překročena průměrná rovnovážná vlhkost 20%.

Třída vlhkosti 3 - Zahrnuje klimatické podmínky, které vedou k vyššímu obsahu vlhkosti než u třídy vlhkosti 2.

Systém tříd použití je potřebný vzhledem k fyzikálním vlastnostem dřevěných konstrukčních materiálů pro přiřazení pevnostních hodnot a pro výpočet deformací při stanovených podmínkách deformací. Pro rostlé dřevo a vrstvené a překližované prvky je přiměřené uvážit pokles pevnosti dřeva s rostoucí vlhkostí výpočtem pouze ve třídě použití 3, výraznější dotvarování při zatížení se však musí uvážit při posuzování deformací již od třídy použití 2. Vlhkost dřeva má tedy prokazatelně významný vliv na mechanickou odolnost a stabilitu[17].

Tab. 2) *Rovnovážná vlhkost dřevěných konstrukčních materiálů a OSB desek v závislosti na třídě použití[16]*

Materiál	Dřevěný konstrukční materiál			Deska OSB
	Třída použití 1	Třída použití 2	Třída použití 3	Typ 2,3,4
Rovnovážná vlhkost	5 až 15% ^a	10 až 20% ^b	12 až 24%	2 až 12%

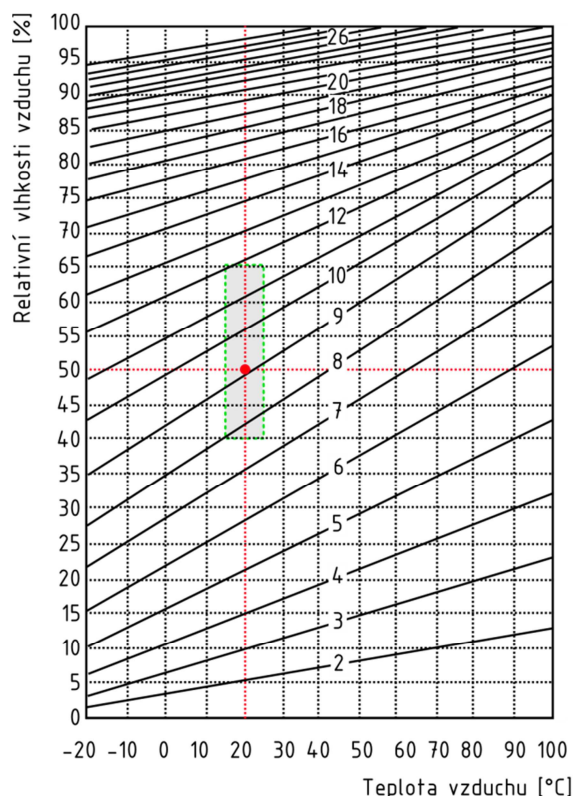
^a u většiny jehličnanů není ve třídě použití 1 překročena střední rovnovážná vlhkost 12%

^b u většiny jehličnanů není ve třídě použití 2 překročena střední rovnovážná vlhkost 20%

Rychlost vypařování vody ze dřeva závisí především na těchto faktorech:

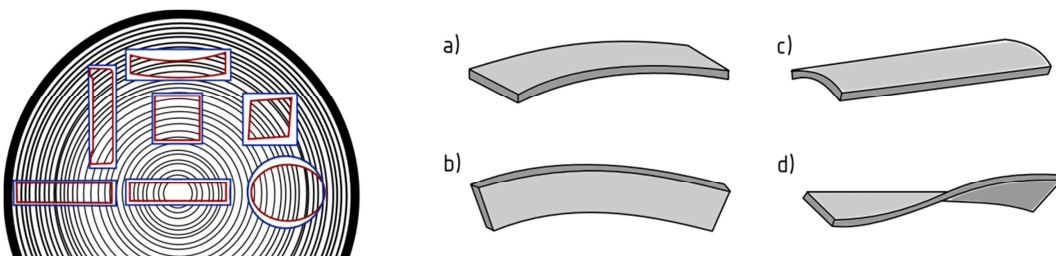
- rozdíl vlhkosti od stavu vlhkostní rovnováhy - čím je větší, tím rychleji dřevo vysychá);
- spád vlhkosti ve dřevě - tj. rozdíl vlhkosti ve dřevě mezi dvěma místy vzdálenými od sebe 1 cm - s jeho růstem roste rychlost pohybu vody;
- čím nižší je vlhkost dřeva, tím pomaleji dřevo vysychá;
- čím je vyšší teplota okolí, tím rychleji se voda vypařuje;
- čím vyšší je hustota dřeva, tím pomaleji se voda ze dřeva vypařuje.

Dále je ve dřevě obsažena voda chemicky vázaná. Nelze ji ze dřeva odstranit sušením, ale pouze spálením, jelikož je součástí chemických sloučenin. Její celkové množství představuje 1 až 2 % sušiny dřeva.



Graf 8) Závislost vlhkosti jehličnatého dřeva na relativní vlhkosti a teplotě okolního vzduchu, červeně zaznačeny optimální hodnoty, zeleně obvyklé rozmezí hodnot v našich klimatických podmínkách[18]

Při odevzdávání vlhkosti dřevo ztrácí svůj objem vlivem sesychání buněk, naopak pokud dřevo vlhkost ze svého okolí přijímá, jeho buňky vlhkost opět absorbují a dřevo zvětšuje svůj objem. Tím dochází k objemovým změnám, které se označují jako **sesychání a bobtnání dřeva**. Mimo to dochází ještě ke změnám tvaru, jako je zkroucení nebo zkřivení, borcení dřeva a vznik výsušných trhlin. Všechny tyto změny – objemové i tvarové – se nazývají **pracování dřeva**. Bobtnání a sesychání dřeva je různé v jednotlivých směrech, přičemž největší je sesychání v tangenciálním směru (je asi 2x až 2,5x větší než radiální) a působí také největší obtíže při zpracování i využití[11].



Obr. 15) Rozměrové změny při sesychání vzorků částí příčného řezu kmene a podélné zakřivení ve směru tloušťky(a), šířky(b) a příčné(c), šroubové zakřivení(d)[19]

Sesychání a bobtnání v mezích běžných změn vlhkosti u dřevěných konstrukcí se označují jako vlhkostní přetvoření. V rozmezí vlhkosti dřeva mezi 5% a 20% se rozměry dřeva mění lineárně s vlhkostí. V této oblasti se může vlhkostní přetvoření vypočítat ze vztahu:

$$h_2 = h_1 \cdot \left[1 + \frac{\beta}{100} (|\omega_2 - \omega_1|) \right] \quad (m) \quad (51)$$

kde h_1 je rozměr (tloušťka) prvku (m) při příslušné vlhkosti ω_1 (%),
 h_2 je rozměr (tloušťka) prvku (m) při příslušné vlhkosti ω_2 (%),
 β je součinitel bobtnání (sesychání) (%).

U deskových prvků, například u překližky, jsou vlhkostní přetvoření v rovině desky porovnatelné s hodnotami pro dřevo v podélném směru. U jiných výrobků na bázi dřeva, jako jsou třískové desky nebo vláknité desky, tato přetvoření závisí velmi výrazně na příslušném typu desky a výrobní technologii. Kolmo k rovině desky mají vratná vlhkostní přetvoření stejnou řádovou velikost jako u dřeva. Nicméně mnoho deskových výrobků, které byly v průběhu výroby vystaveny vysokým tlakovým napětím, vykazuje přídavné, nevratné tloušťkové bobtnání, označované také jako „zpětné odpružení“ [19].

Aby se problémy vlhkostních přetvoření minimalizovaly, má se dřevo vždy zabudovat s vlhkostí co nejvíce odpovídající později očekávané rovnovážné vlhkosti.

Tab. 3) Závislost vlhkosti dřevěných prvků na způsobu jejich použití [20]

Vlhkost dřevěných prvků [%]	Použití
30	ve styku s vodou
18 – 25	bednění, lešení
16 – 20	zakryté venkovní konstrukce
13 – 17	zakryté vnitřní konstrukce
12 – 15	prvky zabudované v konstrukcích ve styku s tepelnou izolací
10 – 14	vnější stavebně truhlářské výrobky
12 – 14	dřevo v interiéru
10 – 12	trvale vytápěné místnosti

Dřevo s vlhkostí přesahující 20-22% se má zabudovat pouze tehdy, když je možné přiměřeně rychlé vysychání konstrukce bez rizika biologické degradace nebo trvalých

přetvoření účinkem mechanickosorpčního dotvarování. Vlhkost dřeva není konstantní, kolísá podle vlhkosti okolí (např. v listopadu je vyšší než v červenci). Tento fakt, v praxi mnohdy opomíjený, lze považovat za velice důležitý při hodnocení spolehlivosti a životnosti staveb, ve kterých je jako hlavní konstrukční materiál použito dřevo [11].

Pro dlouhou životnost dřevěných prvků je při jejich instalaci v interiéru budovy i v jejich konstrukcích třeba dodržet základní zásady, které pomáhají předcházet nežádoucímu zvyšování vlhkosti dřevěných prvků:

- ochrana dřeva proti dešťové a odstříkující vodě a zajištění jejího rychlého odvodu,
- ochrana proti vzlínající vodě,
- ochrana proti kondenzaci vodní páry,
- ochrana před zabudováním vlhkosti do konstrukcí během výstavby,
- úprava klimatu v interiéru objektu (relativní vlhkosti vzduchu, proudění vzduchu a teplota).
- omezit místa styku dřevěných prvků se zdivem a kovovými prvky na minimum.

6.3 Dřevo jako konstrukční materiál

V rámci konstrukčního řešení dřevostaveb jsou dřevěné prvky nejčastěji užívány ve formě řeziva, konstrukčního rostlého dřeva KVH nebo lepených prvků (nosné prvky sloupkových konstrukcí, stropní konstrukce, konstrukce krovů, apod.). Nedílnou součást konstrukcí nejen při výstavbě dřevostaveb tvoří také velkoplošné materiály na bázi dřeva (OSB desky, dřevotřískové desky, dřevovláknité, dřevocementové desky apod.).



Obr. 16) Dřevostavba, sloupkový konstrukční systém – řezivo a OSB desky [zdroj: archiv autora]

7. Konstrukční systémy dřevostaveb

Pojem **dřevostavba** je poměrně široký a zahrnuje různé druhy staveb a skýtá velké množství různých konstrukčních řešení.

Základní konstrukční systémy dřevostaveb:

- srubový konstrukční systém,
- hrázděný konstrukční systém,
- panelové konstrukční systémy,
- skeletové konstrukční systémy,
- sloupkové konstrukční systémy Two by Four (Balloon Frame, Platform Frame)
- rámové konstrukční systémy.



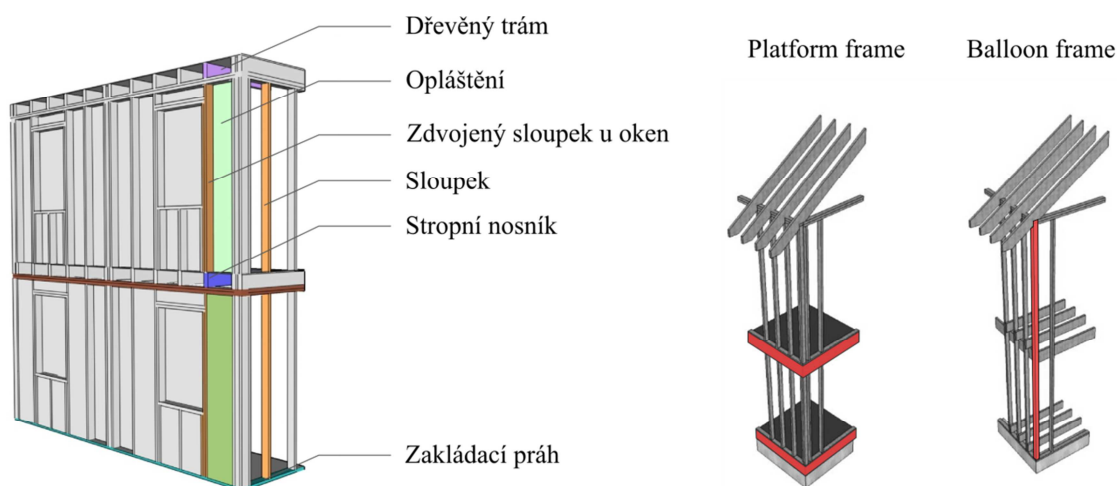
Obr. 17) Konstrukční systémy dřevostaveb – moderní srubová stavba a sloupkový systém [zdroj: archiv autora]

7.1 Sloupkový konstrukční systém

Výše uvedené systémy jsou až na výjimky v dnešní době nahrazeny sloupkovým konstrukčním systémem. S ohledem na požadavky, především v oblasti tepelné techniky, kladené na moderní novostavby se jedná o nejvýhodnější konstrukční řešení v rámci dřevostaveb, jelikož především na masivní dřevo je dnes pohlíženo jako na tepelný most, kterým beze sporu v porovnání s tepelnou izolací je.

Sloupkový konstrukční systém vznikl v USA na konci 19. století a postupně se rozšířil do Evropy a Austrálie. Jedná se o rámový způsob výstavby, kde byly původně využívány sloupky o příčném průřezu 2 x 4 palce – **two by four**, což v metrických jednotkách odpovídá přibližně rozměrům 50 x 100 mm. V dnešní době jsou však tyto rozměry sloupků dřevostaveb ovlivněny zejména tepelně technickými a statickými požadavky. Proto není tento rozměr pravidlem, stejně jako jejich koordinační modul dřevostavby (rastr), který je převážně 625 nebo 417 mm z důvodu navazujících rozměrů velkoplošných materiálů.

Sloupkový systém „two by four“ sestává z nosných sloupků, osově vzdálených nejčastěji 400 až 600 mm, kotvených do základového prahu zpravidla stejné dimenze a jejich délka závisí na typu stavebního systému. Sloupky probíhají buď od základového prahu k okapu a stropní nosníky jsou přiloženy ke sloupkům (systém **Balloon Frame**), nebo jsou sloupky přerušené u stropů a stropní nosníky jsou uloženy na vrchní hranol rámu (systém **Platform Frame**).



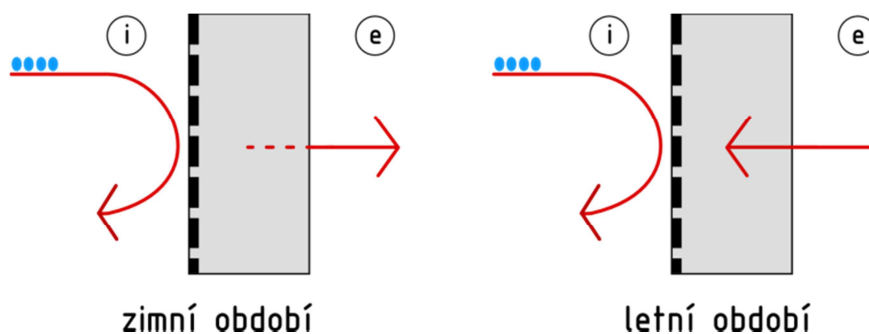
Obr. 18) Popis konstrukčních prvků sloupkového systému Two by Four a graficky znázorněný rozdíl mezi systémem Platform frame a Balloon frame [zdroj: archiv autora]

7.2 Řešení systému obálky budovy

Jedním z hlavních faktorů funkčnosti a trvanlivosti objektu je optimální řešení stavebních konstrukcí obvodového pláště tak, aby ve stěnách nedocházelo ke kondenzaci vodních par. Nezbytná je správná skladba stěn a střešního pláště, využití kvalitních materiálů a správné vyřešení veškerých stavebních konstrukcí včetně detailů, s čímž souvisí i návrh a provedení tzv. parozábrany nebo parobrzdý. Difúzně uzavřené, a naopak otevřené stavby jsou dva systémy, kdy se každý z nich jinak vyrovnává se vzdušnou vlhkostí prostupující obvodovou konstrukcí [11].

Difúzně uzavřené konstrukce

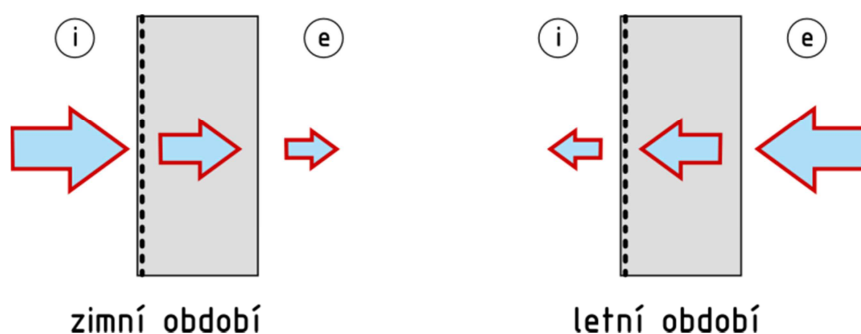
V případě difúzně uzavřených konstrukcí je snaha zcela zamezit prostupu plynů a vodních par z interiéru do exteriéru, a to parotěsnicí vrstvou. Tato vrstva je tvořena parotěsnicí folií s doplňkovými prvky jako speciální lepidla či pásy na přelepení spojů a na přilepení k okolním konstrukcím. Technologie difúzně uzavřených konstrukcí je velmi náročná na přesnost provádění obvodových konstrukcí a veškerých detailů.



Obr. 19) Principi prostupu plynů a vodní páry v zimním a letním období difúzně uzavřenou skladbou konstrukce [zdroj: archiv autora]

Difúzně otevřené konstrukce

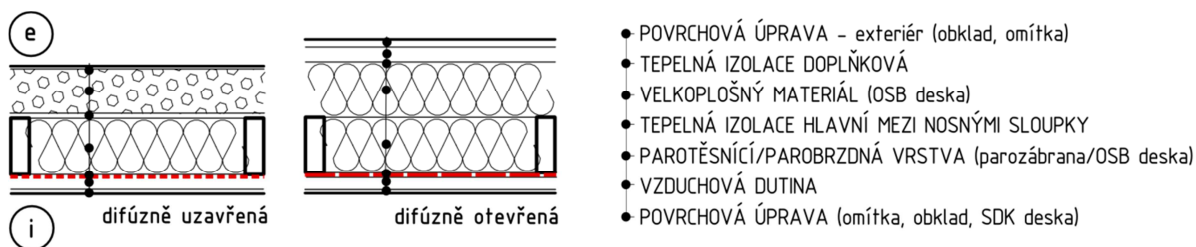
U difúzně otevřeného systému je obvodový plášť domu navržen tak, aby umožnil volný prostup plynů a vodních par mechanismem molekulárního přenosu směrem do exteriéru. U sloupkových dřevostaveb, kde je obvodový plášť vytvořen z více vrstev, musí být zaručeno nejenom použití vhodných materiálů, ale především musí být jednotlivé materiály (vrstvy) v konstrukci správně umístěny. Ve skladbě takovéto konstrukce musí být ze strany interiéru vrstva s přesně definovaným difúzním odporem, omezující jednak difúzi vodních par na minimální přijatelnou mez a zároveň zamezující konvekci teplého vlhkého vzduchu do konstrukce. Směrem k exteriéru musí být dále vrstvy řazeny tak, aby faktor difúzního odporu v konstrukci tímto směrem klesal. V konstrukci se neuplatňuje klasická folie jako parozábrana, její funkci zde přebírá tzv. parobrzdicí vrstva. Jedná se o vrstvu materiálu s vysokým difúzním odporem, s dokonale vzduchotěsným napojením v místě spojů. Pro tuto vrstvu jsou používány velkoplošné materiály, které současně plní v rámové konstrukci dřevostaveb funkci výztužného opláštění [21].



Obr. 20) Principi prostupu plynů a vodní páry v zimním a letním období difúzně uzavřenou skladbou konstrukce [zdroj: archiv autora]

7.3 Materiálové řešení dílčích částí skladby konstrukce

Jelikož obvodový plášť dřevostavby tvoří různé konstrukční prvky (je nehomogenní), je třeba důkladně zvolit a správně umístit každý dílčí prvek skladby v závislosti na jeho mechanických a tepelně technických vlastnostech.



Obr. 21) Princip skladby obvodové stěny dřevostavby – sloupkový konstrukční systém – difúzně uzavřená skladba s parotěsnicí vrstvou (např. PE folie) a difúzně otevřená skladba s „parobrzdnou“ vrstvou (např. OSB deska) [zdroj: archiv autora]

Pro návrh platí samozřejmě obecně známé výše uvedené zásady, například vrstvu s velkým difúzním odporem je zásadní umístit co nejbližší interiéru tak, aby se difúzní odpor směrem do exteriéru v rámci skladby konstrukce snižoval. Naopak vrstvu s velkým tepelným odporem umísťujeme co nejbližší exteriéru. Nosné sloupky mohou být řešeny z tzv. mokrého stavebního řeziva nebo suchého řeziva, které představují KVH hranoly (průřez cca do 100/240mm), DUO/TRIO trámy (profil do 240/240mm) nebo lepené lamelové dřevo BSH (profil nad 240/240mm). Hlavní výhodou vysušeného dřeva je tvarová stálost, nebo odolnost proti biotickým škůdcům, naopak výhodou tzv. mokrého může být cena a možnost výroby prvku podle požadavků přímo na pile.

V následujících tabulkách jsou uvedeny nejčastěji užívané materiály s jejich základními vlastnostmi důležitými pro návrh konstrukcí.

Tab. 4) Velkoplošné materiály (zdroj: rešerše technických listů výrobců)

Typ	Součinitel tepelné vodivosti λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Objemová hmotnost ρ (kg.m ⁻³)	Faktor difúzního odporu μ (-)
Dřevotřískové desky	0,18	800	12,50
Desky OSB	0,13	650	80 – 500
Dřevovláknité desky	0,038 - 0,17	150 - 1000	3 - 12,5
Třískocementové desky	0,11 - 0,35	300 - 1200	6,50
Desky MDF	0,07 - 0,18	250 - 800	5 – 30
Sádrovláknité desky	0,32	1150	13,00
Sádrokartonové desky	0,22	640 - 900	6 – 10

Tab. 5) Tepelné izolace (zdroj: řešerše technických listů výrobců)

Tepelná izolace	Součinitel tepelné vodivosti λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Objemová hmotnost ρ (kg.m ⁻³)	Faktor difúzního odporu μ (-)
Expandovaný polystyren	0,035 - 0,040	15 - 30	20 – 100
Extrudovaný polystyren	0,030 - 0,040	30 - 35	80 – 200
Minerální a skleněné vlákno	0,039 - 0,049	50 - 150	1,2 – 5
Pěnové sklo	0,040 - 0,050	120 - 165	parotěsné (40 000)
Celulóza	0,04	50	1,5
Ovčí vlna	0,038 - 0,050	10 - 25	1,5 – 3
Konopí	0,040 - 0,050	30 - 100	1 – 6

Tab. 6) Parozábrany (zdroj: řešerše technických listů výrobců)

Parozábrana	Faktor difúzního odporu μ (-)
PE fólie	124 000 - 164 000
PE fólie s kovovou (Al) válcovanou fólií	400 000 - 600 000
PVC fólie	8 500 - 17 100
Oxidovaný živičný pás s hliníkovou vložkou	300 000

7.4 Retardéry difúze vodní páry

Pro další práci je zásadní specifikovat a popsat pojmy jako parotěsnicí vrstva, parozábrana nebo parobrzdá, obecně retardéry difuze vodní páry.

Parotěsnicí vrstva je vrstva stavební konstrukce omezující pronikání vodní páry obvykle z vnitřního prostředí do stavební konstrukce, kde by v důsledku poklesu teploty hrozil vznik kondenzace vodních par. Omezením pronikání vodní páry se rozumí omezení difúze (pohyb vodní páry vyvolaný gradientem částečného tlaku vodní páry) a proudění vlhkosti (pohyb vodní páry vyvolaný prouděním vzduchu).

Parotěsná vrstva je nevhodný termín pro parotěsnicí vrstvu. Vede k domněnání, že vrstva zcela zabraňuje prostupu vodních par.

Parozábrana je výrobek, který se používá pro parotěsnicí vrstvu.

Parobrzdá je výrobek, který se používá pro parotěsnicí vrstvu, ale který má nižší hodnotu ekvivalentní difúzní tloušťky než parozábrana.

Parotěsná zábrana je nevhodný termín pro výrobek, který by se použil pro parotěsnicí vrstvu, protože vede k mylnému domnění, že jde o výrobek 100% nepropustný pro vodní páru, což není možné, protože vždy bude docházet k jistému transportu vlhkosti, i když za velmi dlouhou dobu.

Nejvýstižnější rozdělení výrobků pro parotěsnicí vrstvu je podle hodnoty ekvivalentní difúzní tloušťky. V České republice a v zahraničí existuje několik způsobů rozdělení výrobků pro parotěsnicí vrstvu právě podle tohoto parametru.

Česká Republika - v odborné literatuře se výrobky pro parotěsnicí vrstvu dělí na:

- parobrzdy $100 \text{ m} \leq s_d < 1500 \text{ m}$
- parozábrany $s_d \geq 1500 \text{ m}$

Toto rozdělení je nesprávné, neboť znamená, že pokud hodnota ekvivalentní difúzní tloušťky výrobku bude menší než 100 m, už se nejedná o výrobek pro parotěsnicí vrstvu. Přitom existuje mnoho výrobků, které mají hodnotu ekvivalentní difúzní tloušťky menší než 100 m a jsou označovány buď za parobrzdy nebo za parozábrany.

Rozdělením výrobků pro parotěsnicí vrstvu do logických přesně vymezených kategorií se usnadní výběr kvalitních výrobků a sníží se riziko volby nevhodných materiálů[25].

Pro přehlednost bude v další části disertační práce zaveden v obecné rovině pojem parotěsnicí vrstva pro parozábranu i parobrzdu.

S ohledem na téma disertační práce a zaměření plánovaného experimentálního měření budou dále podrobněji popsány parotěsnicí vrstvy užívané v difúzně otevřených skladbách, tedy OSB desky z orientovaných plochých třísek a foliová parobrzda s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou a také tradiční foliové parozábrany navrhované v difúzně uzavřených skladbách konstrukcí.

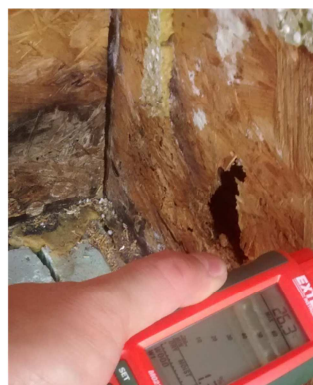
7.5 Retardéry difúze vodní páry v difúzně otevřených skladbách konstrukcí

Retardéry v podobě OSB desky

Jedná se o nejrozšířenější velkoplošný materiál na bázi dřeva používaný při realizacích dřevostaveb. V rámci konstrukce jako celku plní funkci ztužující, vzduchotěsnící a v případě difúzně otevřených systémů především funkci parotěsnící. OSB je tedy deska z tenkých velkoplošných třísek (z anglického Oriented Strand Board), které jsou na sebe skládány v orientovaných vrstvách a následně lisovány společně s pojivem. Mezi nejčastěji používané pryskyřice patří fenylformaldehydová (PF), melamin-formaldehydová pryskyřice (MF), methylen difenyl diisokyanát - polyuretanová pryskyřice (MDI) nebo isokyanátová (PMDI), z nichž všechny jsou voděodolné. V Evropě je běžné používat kombinaci pojiv, například PMDI v jádru a MF na vnější vrstvy.



Obr. 22) Velkoplošné třísky před slisováním[22]



Obr. 23) Degradace OSB desky[zdroj: archiv autora]

Dle normy ČSN EN 300:2006 *Desky z orientovaných plochých třísek (OSB) - Definice, klasifikace a požadavky* [23] jsou klasifikovány 4 typy OSB desek, které se rozlišují následovně:

- OSB/1 - nenosné desky pro obecné účely a desky pro vnitřní vybavení pro použití v suchém prostředí
- OSB/2 – nosné desky pro použití v suchém prostředí,
- OSB/3 - nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí,
- OSB/4 – zvlášť zatížené nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí,

kde vlhké prostředí je definováno jako provozní třída 1 vyznačující se vlhkostí materiálu, která odpovídá teplotě 20°C a relativní vlhkosti vzduchu, jež jen několik týdnů v roce překročí 65%. Naopak vlhké prostředí je definováno jako provozní třída 2 vyznačující se vlhkostí materiálu, která odpovídá teplotě 20°C a relativní vlhkosti vzduchu, jež jen několik týdnů v roce překročí 85% [23].

Jelikož jde o materiál na bázi dřeva, jsou jeho mechanické i tepelně technické vlastnosti závislé na vlhkosti. Při použití OSB desek ve stavebnictví hrozí degradace především vlivem zvýšené relativní vlhkosti vzduchu v interiéru a poškození způsobené technickými závadami. Negativní vliv zvýšené relativní vlhkosti vzduchu je uveden v tabulce č. 7 na příkladu desky OSB Egger a technické závady jsou zastoupeny degradací OSB desky ve stěně dřevostavby způsobené poruchou kanalizace (obr. 25).

Tab. 7) Změny faktoru difúzního odporu a sorpční vlhkosti při různé RH (zdroj: technické listy výrobce Egger)

Změny faktoru difúzního odporu a sorpční vlhkosti při různé relativní vlhkosti vzduchu	μ - hodnota při relativní vlhkosti vzduchu (-)				
	16%	26%	53%	73%	88%
OSB Egger Eurostrand OSB/3	251	240	178	165	129
	Sorpční vlhkost při teplotě 20°C a relativní vlhkosti vzduchu (M %)				
	30%	50%	65%	80%	95%
	5,8	7,5	9,0	13,8	26,2

Významným parametrem z pohledu šíření vodní páry konstrukcí je faktor difúzního odporu μ [-]. Jak bylo uvedeno v tabulce č. 4, u OSB desek se pohybuje v rozmezí hodnot $\mu = 80 - 500$. V následující tabulce je zobrazeno 7 zástupců OSB desek s různými vlastnostmi společně s propustností vodní páry uvedenou v normě ČSN EN 13 986:2004 *Desky na bázi dřeva pro použití ve stavebnictví - Charakteristiky, hodnocení shody a označení* [24].

Tab. 8) Parametry OSB desek – faktor difúzního odporu a ekvivalentní difúzní tloušťka (rešerše technických listů výrobců)

Výrobce	tloušťka (m)	μ_{wet} (-)	μ_{dry} (-)	s_d (m)
Kronopol/Kronoply OSB 3	0,012	200	300	2,4 - 3,6
Kronospan OSB/3	0,015	100	200	1,5 - 3,0
Kronospan OSB/4	0,015	150	300	2,2 - 4,5
OSB Airstop ECO	0,015	400	500	6,0 - 7,5
OSB Reflex ECO	0,015	150	170	2,3 - 2,5
OSB Egger Eurostrand OSB/3	0,012	200	300	2,4 - 3,6
OSB Sterling 3	0,012	107	219	1,3 - 2,6
OSB dle ČSN EN 13 986: 2004 (hustota 650 kg.m ⁻³)	-	30	50	-

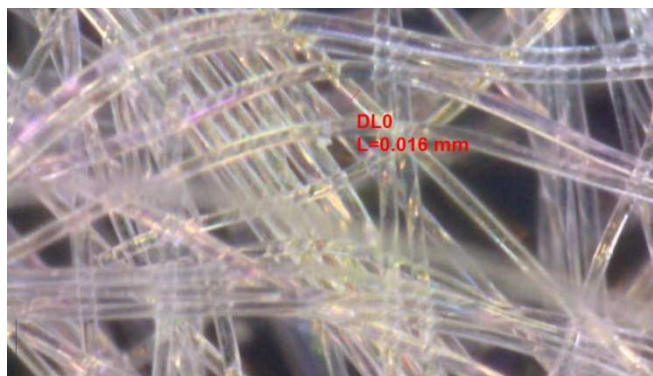
Poznámka k tabulce č. 8 Parametry OSB desek – faktor difúzního odporu a ekvivalentní difúzní tloušťka:

$\mu_{\text{wet}} = \mu_w$ hodnota mokrého faktoru difúzního odporu stanovená zkouškou v podmínkách vysoké relativní vlhkosti, obvykle metodou „mokrý misky“, (-);

$\mu_{\text{dry}} = \mu_d$ hodnota suchého faktoru difúzního odporu stanovená zkouškou v podmínkách nízké relativní vlhkosti, obvykle metodou „suchý misky“, (-) dle ČSN 73 0540-3:2005.

Foliová parobrzda s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou

S ohledem na požadavky a možnosti zvolena parobrzda Isover Vario KM Duplex. Jedná se o folii na bázi polyamidu, která kromě parotěsné funkce má navíc proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťku s_d na základě změn okolních podmínek (teplota a relativní vlhkost vzduchu).



Obr. 24) Mikroskopická struktura foliové parobrzdy Isover Vario KM Duplex, zvětšeno 450x, použit povrchový digitální mikroskop Dino-Lite[zdroj: archiv autora]

8. Metody stanovení vlhkosti materiálů

Zjišťovat lze jak vlhkost plynů, tak kapalin a tuhých látek. Základním dělením metod měření vlhkosti tuhých látek podle typu je na metody absolutní (přímé) a relativní (nepřímé). Jako zástupce metod absolutních lze uvést gravimetrickou, extrakční nebo azeotropickou metodu. Mezi metody relativní se řadí vodivostní (odporové) metody, dielektrické, radiometrické metody, metoda nukleární magnetické rezonance, absorpce a reflexe infračerveného záření, chemické nebo ultrazvukové metody.

8.1 Volba metody stanovení vlhkosti materiálu

Pro monitoring vlhkostního stavu řešených konstrukcí byla zásadní volba právě metody měření. Byla provedena komparace nejčastějších metod měření vlhkosti spolu s jejich hlavními výhodami a nevýhodami. Pro posouzení zvolena gravimetrická metoda, odporová metoda, infračervená metoda, mikrovlnná metoda, neutronová metoda a dielektrická metoda.

Z důvodu potřeby dlouhodobého monitoringu a zabudování sond do vlastní konstrukce zvolena nedestruktivní odporová metoda. Tabulka porovnání základních metod měření vlhkosti s jejich výhodami a nevýhodami uvedena na konci kapitoly.

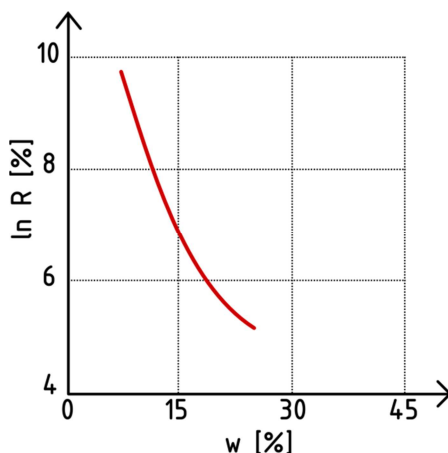
8.2 Vodivostní (odporové) metody

Změna obsahu vody přítomné v materiálu se projevuje změnou jeho měrného odporu. Odpor se přitom mění o několik řádů. Typická hodnota měrného odporu suchého materiálu je 10^8 až $10^{13} \Omega\text{m}$ a vlivem vlhkosti může klesnout až na $10^{-4} \Omega\text{m}$. Tato změna odporu je způsobena přítomností látek iontového charakteru v materiálu, které působením vody disociují. Vlhký materiál proto nelze považovat za směs suchého materiálu a vody, vždy se musí přihlížet ke způsobu vazby vody na materiál. Odpor materiálu při konstantním složení ovlivňuje kromě vlhkosti především teplota, velikost a druh použitého napětí. Jsou-li tyto vedlejší faktory udržovány konstantní, má závislost odporu na vlhkosti u většiny látek tvar:

$$R = k \cdot w^{-a} \quad (52)$$

kde R je měrný odpor materiálu (Ωm),
 k, a je konstanta,
 w je vlhkost materiálu (%).

Tento vztah je platný pouze v limitovaném obsahu vlhkosti – typicky pro hygroskopickou vlhkost odpovídající relativní vlhkosti 30-90%.



Obr. 25) Závislost měrného odporu R dřeva na vlhkosti w [26]

Při větších vlhkostech se již více uplatňuje vliv chemického složení a zakřivení závislosti R - w se zmenšuje. Oblast, kde alespoň přibližně platí výše uvedený vztah, se nazývá oblast hygroskopické vlhkosti a souvisí s vazbou vody. Hygroskopická vlhkost je vlhkost, kterou materiál získává, když je v rovnováze se vzduchem o relativní vlhkosti 30% až 90%. Je to pracovní oblast vlhkoměrů založených na měření odporu, protože se v ní relativně málo uplatňuje vliv ostatních faktorů na měření vlhkosti.

Hlavním problémem u odporové metody je přítomnost solí v materiálu. Jejich obsah nesmí být příliš velký (projevuje se zvýšenou chybou zvláště při velkých vlhkostech) a musí být konstantní. Stejně tak je obtížné a nepřesné měření velkých odporů, kdy se zvyšuje chyba při malé vlhkosti. Dále může být měření negativně ovlivňováno polarizací elektrod, kdy měřené odpory budou vyšší než reálné. V neposlední řadě je nutná individuální kalibrace pro jednotlivé materiály[26].

Nejčastěji používané vlhkoměry mají čidla různých tvarů podle druhu měřeného materiálu. V nejjednodušším případě jsou to dvě jehlové elektrody, které se zavádějí do měřeného materiálu. Elektrody mohou být ve tvaru válečku, kleští, jehel apod. V praxi jsou nejčastěji používány jehlové elektrody, které se instalují do měřeného materiálu. Nejčastěji se používají 2 až 4 elektrody a při instalaci je nutno zajistit kontakt elektrod s materiálem.



Obr. 26) Hrotový vlhkoměr Elbez (zdroj: Elbez s.r.o.)

V případě měření vlhkosti stavebních materiálů (nejen dřeva a materiálů na bázi dřeva) je důležité u každého měřicího přístroje zjistit základní parametry jako rozsah měření vlhkosti (u vlhkoměrů dřeva se může pohybovat od 5 až do 50%), rozsah teplotní kompenzace (u vlhkoměrů dřeva 0-40°C, 0-90°C, apod.), rozsah teploty měření a v neposlední řadě například délky hrotů sondy[26].

Tab. 9) Porovnání základních metod měření vlhkosti

Metoda měření	Výhody	Nevýhody
Gravimetrická metoda	1. přímá metoda pro měření vlhkosti 2. přesná a opakovatelná	1. malé rozměry prvku vs. velikost stěny 2. destruktivní metoda
Odporová metoda (sondy)	1. možnost automatického měření 2. senzory jednoduché a levné 3. možnost dlouhodobého měření 4. jednoduchá instalace	1. nepřesné při špatné instalaci 2. nelineární vztah mezi vlhkostí a tepelnou vodivostí
Infračervená metoda	1. možnost automatického měření 2. necitlivost k elektrickému šumu 3. bezkontaktní měření 4. přesnost	1. pouze povrchové měření 2. cena
Mikrovlnná metoda	1. možnost automatického měření 2. přesnost 3. nedestruktivní	1. relativně nízká přesnost při velmi vysoké / nízké vlhkosti 2. riziko rozptýlu výsledků
Neutronová sonda	1. lze rozlišovat mezi různými stavy vody 2. přímá detekce vody 3. přesnost	1. automatického měření není možné 2. vysoké náklady 3. velikost
Dielektrická metoda	1. možnost automatického měření 2. dobrá citlivost 3. nedestruktivní 4. jednoduché zařízení	1. vliv lokální různorodosti na výsledky 2. náchylnost k elektrickému šumu 3. proměnlivost čidla senzoru

9. Stav řešené problematiky v ČR a ve světě

V České republice se uvedené problematice věnuje především doc. Ing. Zdeňka Havířová a Ing. Pavel Kubů z Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně. V rámci výzkumného záměru MSM 6215648902 byly ve zkušebních komorách CSI a.s. Praha monitorovány 2 skladby obvodové stěny dřevostavby, konstrukční systém sloupkový řešený jako difúzně otevřený. Cílem prováděných měření a výpočtových posouzení bylo ověřit, zda je možno z tepelně technického posouzení sledované konstrukce a hodnocení bilance vlhkosti v konstrukci podle současné technické normy ověřit i předpokládanou rovnovážnou vlhkost dřeva v této konstrukci.

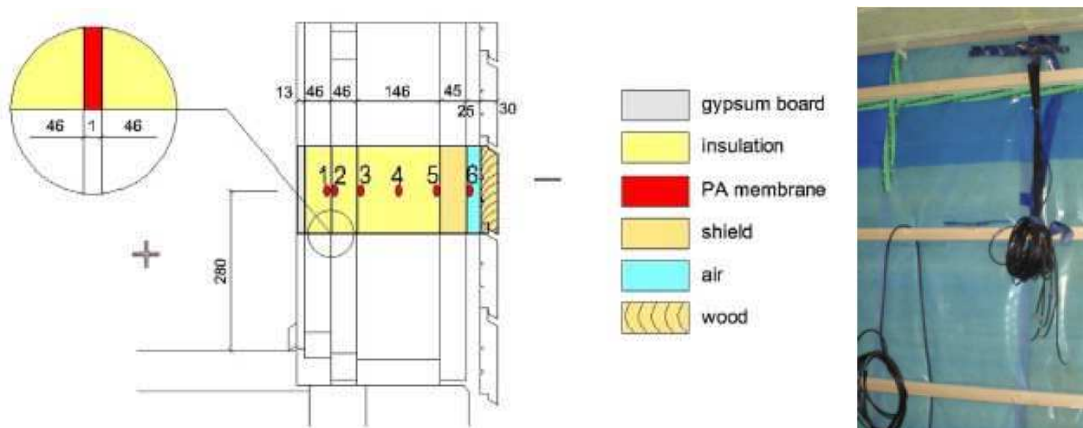


Obr. 27) Zkušební vzorek s umístěnými měřicími sondami. Měření probíhalo v klimatizačních komorách CSI a.s. Praha [28]

Na základě jedno a dvou denního monitoringu bylo zjištěno, že dřevěné prvky lze spolehlivě zařadit do třídy použití 2 podle ČSN 73 1702, respektive EUROCODE 5. Pokud by se vycházelo z průměrné hodnoty rovnovážné vlhkosti profilů dřevěné rámové konstrukce, bylo by možné je zařadit do třídy použití 1 podle uvedených technických norem[28].

Co se týká řešené problematiky v zahraničí, na finské univerzitě Oulu University of Applied Sciences, School of Engineering se monitoringu parametrů u lehkých konstrukcí věnuje Kimmo Ilrikainen.

Měření probíhá na obydlených rodinných domech v energeticky efektivní čtvrti na předměstí Oulu (Energy Efficiency Quarter in Ritaharju) a je zameřeno jak na monitorng skladeb konstrukcí, tak na vzduchotěsnost obálky nebo na vliv okolních faktorů (sníh, vítr, radiace) na spotřebu energie.



Obr. 28) Obvodová stěna s osazenými tepelně vlhkostními sondami, měření probíhající v rodinném domě v energeticky efektivní čtvrti Energy Efficiency Quarter in Ritaharju [10]



Obr. 29) Monitorované rodinné domy v energeticky efektivní čtvrti na předměstí Oulu (Energy Efficiency Quarter in Ritaharju) [10]



Obr. 30) Výstavba rodinného domu ve čtvrti Energy Efficiency Quarter in Ritaharju [zdroj: archiv autora]

Na rozdíl od předložené disertační práce uvedné vědecko výzkumné projekty řeší chování pouze jedné konstrukce, popř. jednoho objektu bez možnosti porovnání dat při rozdílném konstrukčním a materiálovém řešení nebo způsobu užívání objektu.

C.CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Vytyčení cílů disertační práce
- Zdůvodnění volby cílů
- Prostředky ke splnění cílů

10. Cíle disertační práce

V následující části jsou uvedeny cíle disertační práce spolu se stručným zdůvodněním jejich volby. V závěru kapitoly jsou popsány prostředky k jejich naplnění.

10.1 Vytyčení cílů disertační práce

Disertační práce si klade tyto cíle:

1. Návrh rámcové metodiky měření vlhkosti v materiálech obálky budovy dřevostavby;
2. Návrh a realizace systému pro monitoring vlhkosti ve stavebních materiálech konstrukce obvodové stěny dřevostavby;
3. Popsání teplotně vlhkostních dějů probíhajících v konstrukcích dřevostaveb v běžných klimatických podmínkách ČR;
4. Optimalizace skladby obvodové stěny moderní dřevostavby.

10.2 Zdůvodnění volby cílů

Ad 1) Návrh rámcové metodiky měření vlhkosti v materiálech obálky budovy dřevostavby

V rámci nehomogenní materiálové skladby dřevostaveb jsou pro každou její konstrukci zásadní parametry dřevěných prvků a prvků z materiálů na bázi dřeva. Právě dlouhodobě zvýšená vlhkost ve dřevě je zásadním rizikovým faktorem, který může vést až k ohrožení funkce celé konstrukce. U standardního sloupkového konstrukčního systému se tedy jedná o nosné sloupky a velkoformátové desky sloužící jako opláštění, v případě difúzně otevřených systému přejímají OSB desky i parotěsnicí funkci.

Dalšími parametry sledovanými v rámci chování konstrukce obvodové stěny jsou teplota a relativní vlhkost přímo ve skladbě, jelikož hodnoty těchto parametrů nám umožní blíže popsat transport vodní páry konstrukcí.

Ad 2) Návrh a realizace systému pro monitoring vlhkosti ve stavebních materiálech konstrukce obvodové stěny dřevostavby

Jelikož bylo třeba dlouhodobě monitorovat tepelně vlhkostní parametry v dílčích částech celé skladby obvodové konstrukce, byl pro toto měření zásadní právě návrh měřicího systému.

Hlavními požadavky na měřicí aparaturu byly:

- výstupní data měření - teplota a vlhkost v konstrukčním prvku,
- rozsah měření pro teplotu: -20 až +60°C,
- rozsah měření pro vlhkost: 0 – 90%,
- přesnost měření a směrodatná odchylka, rozlišení snímače,
- možnost nastavení intervalu zápisu dat,
- dlouhodobý monitoring,
- počet sond, které lze napojit na ústřednu pro záznam dat,
- rozměr sond umožňující dovolující zabudování do konstrukce,
- volitelná délka kabeláže mezi ústřednou a sondou osazenou do prvku,
- možnost volby hloubky osazení sondy do konstrukčního prvku,
- pořizovací cena

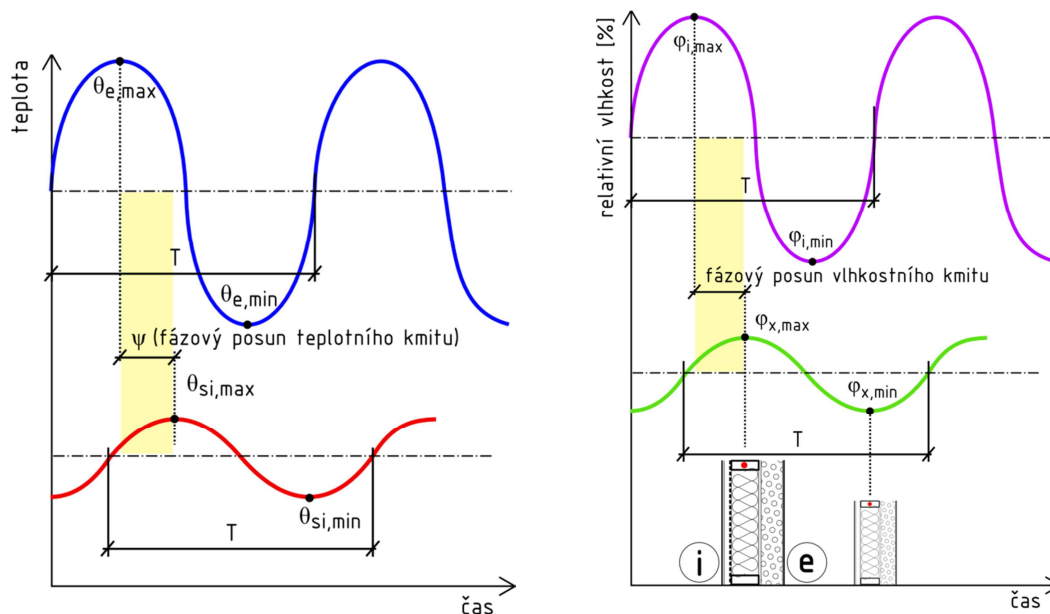
Měřicí zařízení (ústředna pro ukládání dat a sondy pro osazení do dřevěných prvků ve skladbě stěny) bylo řešeno s firmou Elbez s.r.o.

Ad 3) Popsání teplotně vlhkostních dějů probíhajících v konstrukcích dřevostaveb v běžných klimatických podmínkách ČR

Za teplotně vlhkostní děje probíhající v konstrukcích nejen dřevostaveb považujeme primárně teplotu a vlhkost. Pro dřevěné prvky, které jsou v konstrukcích dřevostaveb stěžejní, není natolik podstatnou teplota, ale vlhkost nacházející se v materiálu a jeho okolí. Proto bude na základě analýzy výsledků dlouhodobého měření stanoven průběh vlhkosti v konstrukci a jejích dílčích částech při různém zatížení vnitřního prostředí.

Tento průběh bude v principu analogický k fázovému posunu teplotního kmitu, přičemž fázovým posunutím teplotního kmitu ψ [hod] označujeme časový rozdíl mezi maximem teploty na vnitřním povrchu konstrukce a maximální dosažené teploty venkovního vzduchu.

Zásadním rozdílem bude tedy sledování nikoli teploty, ale vlhkosti.



Obr. 31) Princip stanovení fázového posunu teplotního kmitu a vlhkostního kmitu[zdroj:archiv autora]

Ad 4) Optimalizace skladby obvodové stěny moderní dřevostavby

Na základě analýzy výstupů monitoringu teplotně vlhkostních parametrů difúzně uzavřené a otevřené konstrukce obvodové stěny a jejich komparace s numerickým modelem budou v závěru práce uvedeny možnosti optimalizace skladby obvodové stěny dřevostavby.

10.3 Prostředky ke splnění cílů

Potřebné prostředky byly dostupné v rámci přístrojového vybavení Ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, případně byly pořízeny v rámci studia a výzkumu.

V rámci přístrojů, softwaru a vybavení použity:

- měřicí programovatelná ústředna Elbez, typ Unitronics V130-33-R2,
- sondy Elbez WS-16/T pro monitoring tepelně vlhkostních parametrů,
- digitální čidlo relativní vlhkosti a teploty Ahlborn FHAD462,
- USB datalogger pro měření teploty a relativní vlhkosti Voltcraft DL-121TH,
- měřicí systém permanentní družicové stanice TUBO,
- meteostanice Davis Vantage Pro2™ osazená na experimentální dřevostavbě,
- software WUFI Pro 5, software WUFI – Bio,
- Experimentální dřevostavba EXDR1.

D.ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

- SWOT analýza řešení problematiky experimentálního měření
- Metodika řešení experimentální části
- Numerické metody

11.SWOT analýza řešení problematiky experimentálního měření

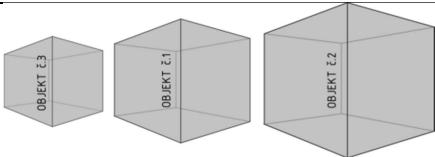
Experimentální měření je zásadní částí předložené disertační práce, z toho důvodu je třeba stanovit metodiku měření tepelných a vlhkostních toků v závislosti na požadovaných okrajových podmínkách. Proto je v následující kapitole uvedena jednoduchá SWOT analýza. Metoda, s jejíž pomocí je možno identifikovat silné (ang: Strengths) a slabé (ang: Weaknesses) stránky, příležitosti (ang: Opportunities) a hrozby (ang: Threats), spojené s určitým projektem.

V tomto případě bude tedy analyzován způsob experimentálního měření, a to:

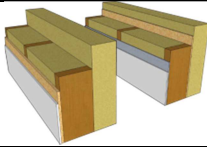
- měření v různých objektech o různých parametrech, reálně užívaných,
- měření vzorků malých rozměrů v laboratořích,
- měření v jednobuňkovém experimentálním objektu,
- měření ve více jednobuňkových objektech,
- měření ve vícebuňkovém experimentálním objektu.

Výsledky uvedeny v následujících tabulkách.

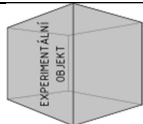
Tab. 10) Měření v různých objektech o různých parametrech, reálně užívaných

Měření v různých objektech o různých parametrech, reálně užívaných	
Silné stránky (S)	Slabé stránky (W)
monitoring chování konstrukce při reálném užívání stavby	řešené objekty jsou různé geometrie a parametrů
nízké náklady - pouze měřicí zařízení	nepřesná komparace dat z měření v různých objektech
volba daného objektu „na míru“ řešené problematice	
Příležitosti (O)	Hrozby (T)
výsledná data zrcadlí reálné chování vnějšího prostředí	ovlivnění měřících zařízení uživateli objektu (přesun, zastínění měřících zařízení)
	ztráta měřících zařízení
	zkreslená data vlivem nestandardního chování uživatelů
POZNÁMKA: Za různé parametry objektů lze považovat odlišné skladby konstrukcí, rozměry objektů, jejich geometrii nebo způsob užívání (rozdílný průběh parametrů vnitřního prostředí).	

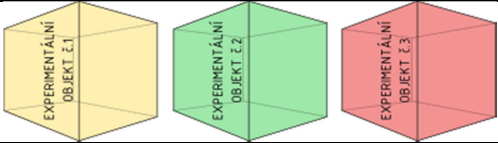
Tab. 11) Měření vzorků malých rozměrů v laboratořích

Měření vzorků malých rozměrů v laboratořích	
Silné stránky (S)	Slabé stránky (W)
cenově dostupné materiálové řešení zkušebního prvku	omezená velikost vzorků
časově méně náročná příprava	modelové okrajové podmínky nemusí odpovídat realitě
libovolné okrajové podmínky (teplota, RH vzduchu pro interiér)	náklady za pronájem laboratoří
libovolné okrajové podmínky (teplota, RH vzduchu pro exteriér)	primárně pouze krátkodobé měření
Příležitosti (O)	Hrozby (T)
metoda vhodná pro rychlé získání informací	zkreslení výsledných dat vlivem malých rozměrů řešených vzorků
možnost ověření výsledky u akreditovaných zkušebních laboratoří	

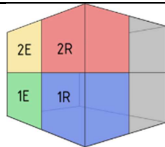
Tab. 12) Měření v jednobuňkovém experimentálním objektu

Měření v jednobuňkovém experimentálním objektu	
Silné stránky (S)	Slabé stránky (W)
skladby konstrukcí dle vlastních požadavků	omezený počet řešených úloh
zkušební prvky reálných rozměrů	bez možnosti opakovaného srovnávací měření z důvodu různých parametrů vnějšího prostředí
skutečné okrajové podmínky v exteriéru	vyšší pořizovací cena
libovolná volba parametrů vnitřního prostředí	
Příležitosti (O)	Hrozby (T)
výsledná data zrcadlí reálné chování vnějšího prostředí	při špatném konstrukčním řešení hrozba nerelevantních výsledků
POZNÁMKA: Buňka definuje experimentální místnost požadovaných rozměrů, geometrie a parametrů dílčích konstrukcí.	

Tab. 13) Měření ve více jednobuňkových experimentálních objektech

Měření ve více jednobuňkových experimentálních objektech	
Silné stránky (S)	Slabé stránky (W)
monitoring různých konstrukcí za totožných parametrů vnitřního prostředí	prostorově náročné
monitoring různých konstrukcí při řízených změnách parametrů vnitřního prostředí	vysoká pořizovací cena
	velký počet měřících a regulačních zařízení
Příležitosti (O)	Hrozby (T)
variabilita	při špatném návrhu může docházet ke vzájemnému ovlivňování (např. nedodržení vzdálenosti - stínění)
možnost spolupráce v rámci různých odborných zaměření	špatný konstrukční návrh - nemožná komparace dat
výsledná data zrcadlí reálné chování vnějšího prostředí	
POZNÁMKA: Buňka definuje experimentální místnost požadovaných rozměrů, geometrie a parametrů dílčích konstrukcí.	

Tab. 14) Měření ve vícebuňkovém experimentálním objektu

Měření ve vícebuňkovém experimentálním objektu	
Silné stránky (S)	Slabé stránky (W)
komparace dat v horizontálním i vertiálním směru	pořizovací cena
výzkum různých konstrukcí při řízených změnách parametrů vnitřního prostředí	vyšší počet měřících zařízení
variabilita konstrukčních řešení dle požadavků	prostorově náročné
výzkum různých konstrukcí za totožných parametrů vnitřního prostředí	
Příležitosti (O)	Hrozby (T)
možnost kombinace vědeckovýzkumných záměrů	při špatném konstrukčním řešení hrozí vzájemné ovlivňování mezi buňkami

unikátní způsob měření – technologické know-how	při špatném konstrukčním řešení hrozba nerelevantních výsledků
výsledná data zrcadlí reálné chování vnějšího prostředí	
POZNÁMKA: Buňka definuje experimentální místnost požadovaných rozměrů, geometrie a parametrů dílčích konstrukcí.	

11.1 Shrnutí

Na základě provedené SWOT analýzy lze stanovit za nejvhodnější řešení problematiky experimentálního měření použití vícebuňkového experimentálního objektu. Tento způsob monitoringu umožní komparaci dat jak v horizontálním, tak i vertikálním směru, navíc při reálných parametrech vnějšího prostředí. Dalším rozhodujícím faktorem je možnost řízených změn parametrů vnitřního prostředí, což umožní sledovat řešené konstrukce při různých teplotně - vlhkostních zátěžích.

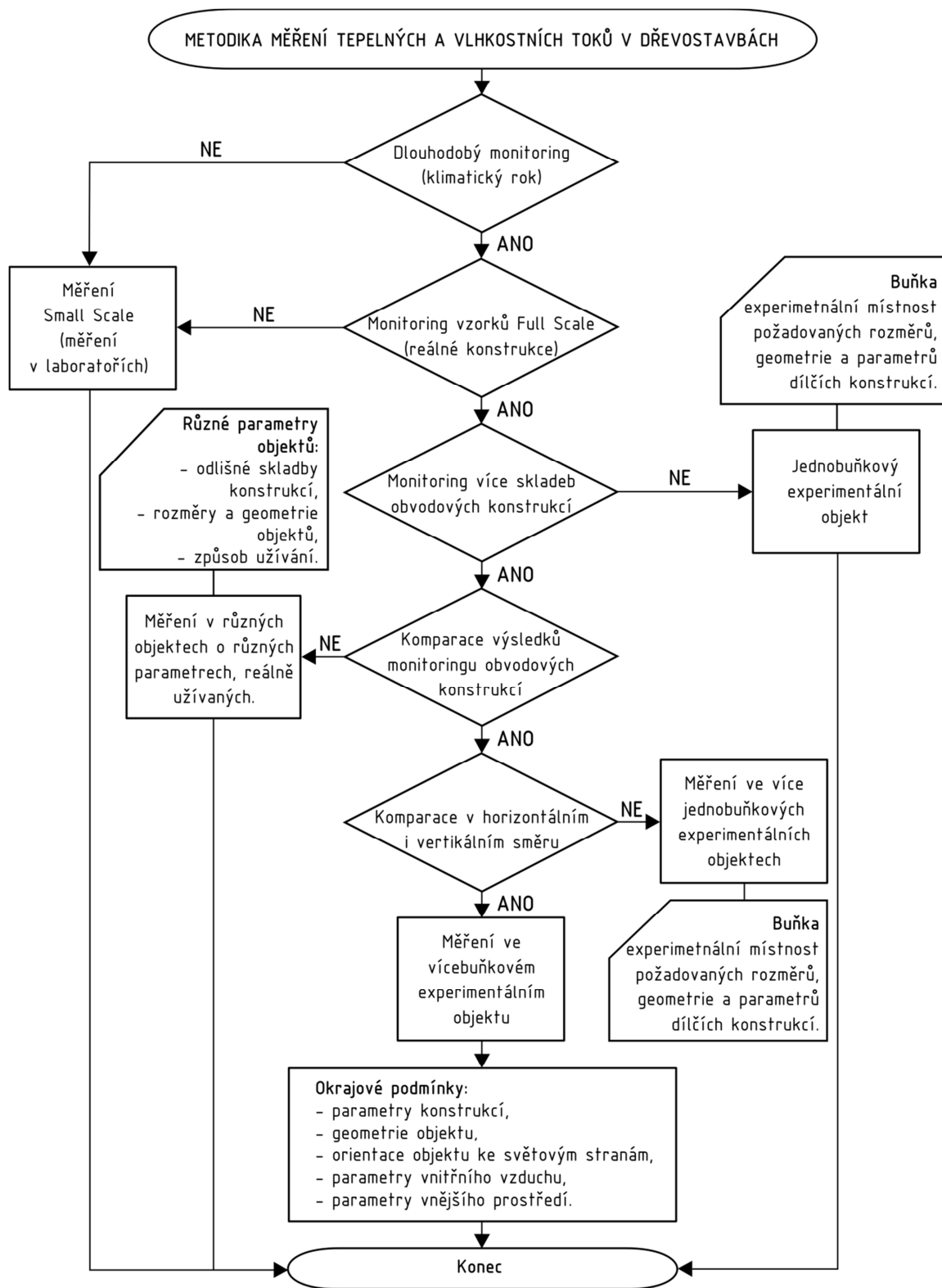
Metoda měření ve vícebuňkovém experimentálním objektu byla realizována na Experimentální dřevostavbě EXDR1 Ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební VUT v Brně.

Zde bych ráda poděkovala kamarádům a kolegům z Ústavu pozemního stavitelství za spolupráci při realizaci projektu Experimentální dřevostavby, a to především Františku Vlachovi a Petru Jelínkovi. Jejich pomoc byla jedním ze stěžejních faktorů umožňujících realizaci praktické části mé disertační práce právě na zmíněném objektu Experimentální dřevostavby.



Obr. 32) Realizace Experimentální dřevostavby EXDR1 [zdroj: archív autora]

Obecná metodika měření tepelných a vlhkostních toků v dřevostavbách vycházející z provedené SWOT analýzy je uvedena ve formě vývojového diagramu na obr. 35. Reflektuje požadavky na časovou náročnost monitoringu, požadavky na rozměry a počet řešených konstrukcí i možnosti následného vyhodnocení získaných poznatků.



Obr. 33) Vývojový diagram metodiky měření tepelných a vlhkostních toků v dřevostavbách [zdroj: archiv autora]

12. Metodika řešení experimentální části

V následující části jsou popsány zvolené metody a postupy použité ke splnění stanovených cílů.

12.1 Měřicí aparatura

Jelikož experimentální měření bylo koncipováno jako dlouhodobé, bylo nezbytně nutné měřicí prvky do konstrukce přímo zabudovat. Proto byly pro monitoring tepelně vlhkostních podmínek v konstrukci obvodové stěny dřevostavby použity sondy Elbez WS-16/T využívající pro měření obyčejné vruty s antikorozní povrchovou úpravou o průměru 3,5 – 4mm. Délka vrutu se volí dle tloušťky měřeného materiálu (nejvyšší vlhkost se ve dřevu nachází ve středu tloušťky desky, fošny, trámu), nebo požadavku měřit vlhkost v určité hloubce. Polovodičový teplotní snímač osazený uvnitř sondy měří teplotu v místě měření a měřicí zařízení provádí dle změřené hodnoty teploty automatickou teplotní kompenzaci na reálnou hodnotu měřené vlhkosti dřeva. Na toto měřicí zařízení – programovatelnou ústřednu Elbez, typ Unitronics V130-33-R2 – jsou sondy napojeny kabelem volitelné délky.



Obr. 34) Sondy Elbez WS-16/T a programovatelná ústředna Elbez [zdroj: archiv autora]

Jelikož ústředna provádí na základě změřené teploty převod na reálnou hodnotu měřené vlhkosti dřeva, je velký rozdíl právě ve druhu monitorované dřeviny. Přímě naměřená hodnota vlhkosti platí pouze pro smrkové dřevo, pro ostatní dřeviny je třeba použít převodní tabulku dodávanou přímo výrobcem měřicího zařízení, firmou ELBEZ s. r. o.

Tab. 15) Převodní tabulka pro korekci vlhkosti běžných druhů dřevin (zdroj: dodavatel měřícího zařízení Elbez s.r.o.)

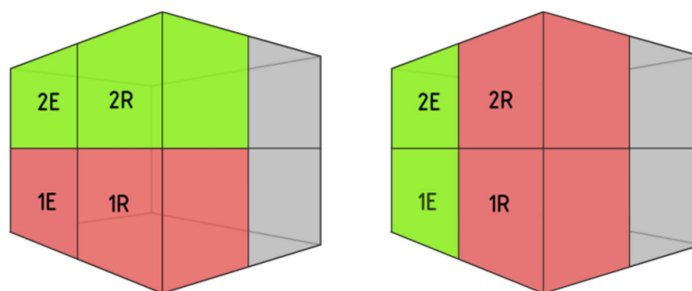
Dřevina	vlhkost [%]								
	1. řádek naměřená hodnota (smrk), ostatní řádky skutečná hodnota								
Smrk	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Dub bílý	7,2	8,0	8,8	9,6	10,5	11,5	12,4	13,5	14,5
Buk	6,7	7,4	8,1	9,0	10,0	11,0	12,2	13,2	14,0
Jedle bílá	8,8	9,7	10,6	11,4	12,3	13,1	14,1	15,1	16,2
Jasan bílý	7,6	8,2	9,0	9,8	10,7	11,5	12,4	13,2	13,9
Lípa	7,5	7,9	8,8	9,5	10,3	11,1	12,0	13,1	14,0
Bříza	8,9	9,8	10,6	11,6	12,5	13,4	14,4	15,4	16,4
Mahagon	8,2	9,2	10,3	11,3	12,3	13,2	14,0	14,8	15,7
Javor	8,8	9,5	10,0	10,8	11,7	12,5	13,4	14,3	15,2
Vlašský ořech	8,5	9,4	10,3	11,2	12,1	13,0	13,9	14,8	15,7
Borovice	8,6	9,6	10,7	11,8	12,8	13,8	14,8	15,8	16,8
Jilm americký	7,6	8,1	8,7	9,1	9,8	10,4	11,0	11,7	12,5
Modřín	8,7	9,7	10,8	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,5
Olše	8,9	9,9	10,8	11,8	12,9	13,8	14,8	15,8	16,9
Topol	8,4	9,5	10,6	11,6	12,7	13,8	14,8	15,9	17,0

Dřevina	vlhkost [%]								
	1. řádek naměřená hodnota (smrk), ostatní řádky skutečná hodnota								
Smrk	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0
Dub bílý	15,6	16,5	17,3	18,3	19,3	20,2	21,2	22,1	23,1
Buk	14,7	15,4	16,3	17,1	17,8	18,8	20,3	22,0	23,9
Jedle bílá	17,3	18,1	19,1	20,0	21,1	22,1	23,0	24,0	24,8
Jasan bílý	14,7	15,6	16,4	17,2	17,9	18,7	19,5	20,3	20,9
Lípa	14,9	15,9	16,9	17,8	18,7	19,6	20,6	21,5	22,2
Bříza	17,4	18,4	19,5	20,5	21,6	22,6	23,6	24,6	25,7
Mahagon	16,5	17,2	18,1	18,8	19,5	20,2	20,9	21,7	22,3
Javor	16,1	17,1	18,2	19,2	20,3	21,2	22,4	23,7	24,6
Vlašský ořech	16,5	17,3	18,3	19,2	20,1	20,9	21,8	22,7	23,3
Borovice	17,8	18,7	19,7	20,6	21,5	22,4	23,3	24,1	24,9
Jilm americký	13,4	14,1	14,9	15,6	16,3	17,0	17,7	18,6	19,0
Modřín	17,5	18,4	19,4	20,4	21,3	22,1	23,1	23,9	24,8
Olše	18,0	18,8	19,8	20,9	22,0	22,9	23,8	24,7	25,6
Topol	17,9	18,7	19,7	20,7	21,6	22,6	23,6	24,7	25,9

12.2 Experimentální dřevostavba EXDR1

Zásadní část, a to experimentální měření, probíhala na objektu Experimentální dřevostavby. Jedná se o projekt pilotní ověřovací jednotky umožňující komplexní monitoring stavebních konstrukcí. Lze zde vytvářet a monitorovat konstrukční řešení některých zásadních nedostatků, které provází daný druh výstavby. Mezi ty nejzásadnější patří především stavebně fyzikální problémy, a to stavební akustika a tepelně vlhkostní problémy, s nimiž souvisí také mikroklimatické podmínky interiéru stavby.

Posuzování jednotlivých konstrukčních prvků lze snadno provádět v laboratořích při simulaci okrajových podmínek, avšak projekt experimentální dřevostavby umožňuje komplexní hodnocení konstrukcí nebo jejich částí v reálných podmínkách, navíc umožňuje komparaci naměřených dat různých skladeb obvodových konstrukcí.



Obr. 35) Experimentální dřevostavba EXDR1 – laboratorní a referenční místnosti s možností horizontální, resp. vertikální komparace[zdroj: archiv autora]

Dispoziční a konstrukční řešení

Dispozičně se jedná o dvoupodlažní nepodsklepený objekt, kdy v každém podlaží jsou umístěny dvě laboratorní a jedna obslužná místnost. Půdorysné rozměry experimentální dřevostavby jsou 6,9 m x 7,1 m, výška objektu 7,3 m. Rozměry laboratorních místností byly navrženy v závislosti na minimálních rozměrech pobytových místností. Okna jsou orientována na jihozápad, aby byl umožněn maximální tepelný zisk. Obslužné místnosti slouží primárně jako technické zázemí a prostory pro doplňkový výzkum. Vstup do objektu je umístěn na severovýchodní fasádě, vertikální komunikace je zajištěna venkovním schodištěm.

Konstrukce dřevostavby je řešena jako systém „two by four“ (Platform Frame), kde hlavní nosnou část tvoří sloupky profilu 50x150 mm, doplněné OSB deskami a tepelně izolační výplň tvoří minerální vata. Doplňkové prvky se liší v závislosti na podlaží, kdy

1NP je navrženo jako difúzně uzavřená konstrukce a 2NP jako difúzně otevřená konstrukce. Vzduchotěsnost obálky objektu a funkci parobrzdy difúzně otevřené konstrukce zajišťují OSB desky a foliová parobrzda s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou ve druhém podlaží, v prvním podlaží (difúzně uzavřená konstrukce) tyto funkce plní tradiční parotěsná fólie. Stropní konstrukce řešena jako fošnový strop. Fasáda je řešena jako kombinace kontaktního zateplovacího systému ETICS (použita tepelná izolace z pěnového polystyrenu) a provětrávané fasády s dřevěným obkladem, kde byly aplikovány minerálně vláknité desky.

U každé místnosti lze individuálně zvolit parametry vnitřního prostředí (teplotu a vlhkost vzduchu) na základě potřeb konkrétní vědecko-výzkumné činnosti. Konstrukční řešení EXDR 1 umožňuje dle záměru výzkumu měnit a upravovat skladby obalových konstrukcí a elementů jednotlivých místností, kterými jsou např. výplně otvorů a s tím související stínící prvky, vnitřní povrchové úpravy, řešení fasád objektu, vnitřní dělící konstrukce apod. Objekt lze v rámci dalšího výzkumu také doplnit novými konstrukčními řešeními, například nuceným větráním nebo zelenou střechou.

V současnosti zde probíhají další měření v rámci diplomových i disertačních prací zaměřených na tepelnou stabilitu v letním období, vliv rozdílných stínících prvků na kvalitu vnitřního prostředí nebo je zde podrobně řešena problematika světlovodů a možnosti řešení skladeb suchých podlah v dřevostavbách z pohledu tepelné techniky a akustiky. Další vědeckovýzkumný záměr realizovaný na EXDR1 dokazuje, jak je problematika difúze vodní páry v konstrukcích dřevostaveb široká a lze ji řešit z mnoha různých pohledů. Jedná se o projekt Ing. Martiny Uvizlové zabývající se prostupem vlhkosti skladbou difúzně uzavřené obvodové stěny dřevostavby.

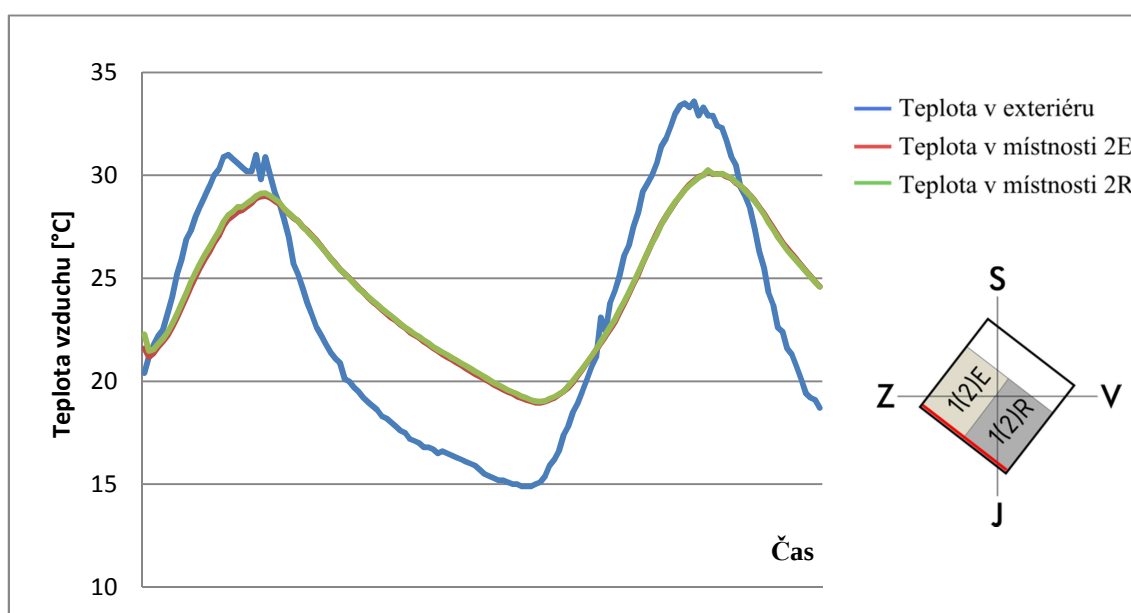


Obr. 36) Dřevostavba EXDR1, systém „two by four“, Platform Frame, průběh výstavby[zdroj: archiv autora]

Právě výsledky těchto reálných projektů mohou pomoci vyřešit nedostatky provázející výstavbu dřevostaveb a nastínit další možnosti rozvoje v oblasti návrhů i realizace lehkých konstrukcí.

12.3 Ověřovací měření experimentálních místností

Před vlastním měřením bylo zapotřebí ověřit vzájemnou interferenci experimentálních 1(2)E a referenčních místností 1(2)R., jelikož řešené místnosti nemají stejnou skladbu obálky (obvodové stěn). Proto bylo provedeno komparační měření bez zatížení konstrukcí vnitřními zdroji tepla a byly sledovány teploty vnitřního vzduchu v jednotlivých místnostech.

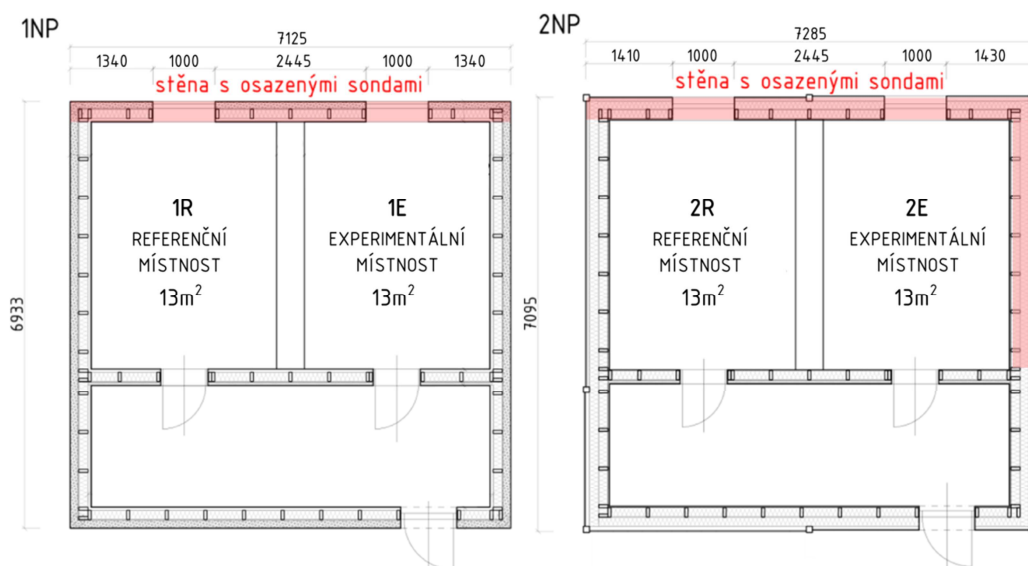


Graf 9) Ověřovací měření v experimentální a referenční místnosti [29]

Jak je patrné z grafu č. 9, průběhy teplot v různých místnostech se liší pouze v řádech desetin stupňů. Lze tedy konstatovat, že místnosti jsou způsobilé pro komparativní analýzu parametrů vnitřního prostředí.

12.4 Osazení měřících zařízení v obvodových konstrukcích

Jak již bylo uvedeno výše, experimentální měření probíhalo na dřevostavbě EXDR1. S ohledem na orientaci objektu ke světovým stranám zvolena jihozápadní fasáda, která současně umožnila vzájemnou komparaci všech získaných dat. Pro monitoring tepelně vlhkostních dějů bylo využito celkem 5 různých skladeb obvodových stěn.



Obr. 37) Schematické půdorysy 1NP a 2NP experimentální dřevostavby EXDR1 se zobrazením monitorované obvodové stěny [zdroj: archiv autora]

Jelikož dřevo je nehomogenní anizotropní materiál, bylo umístění sond v každém prvku zvoleno i na základě základní vizuální kontroly prvku. Nevhodným osazením sondy, například do suku ve dřevě, by mohlo dojít k nežádoucímu ovlivnění monitorovaných hodnot, jelikož v místě suku se nachází dřevo větší hustoty, které pomaleji vypařuje obsaženou vodu).

Měřicí sondy byly osazeny do nosných sloupků u difúzně uzavřené i difúzně otevřené varianty řešení obálky budovy a jako další konstrukční prvek pro monitoring vlhkosti zvoleny OSB desky. V případě difúzně uzavřené konstrukce desky slouží jako opláštění a ztužení konstrukce, v difúzně otevřených systémech plní navíc parotěsnicí funkci, jedná se o tzv. parobrzdý. Z tohoto důvodu jsou oproti difúzně uzavřeným konstrukcím umístěny co nejblíže interiéru. Místo osazení měřící sondy zvoleno do středu profilu sloupku a do poloviny tloušťky desky, jelikož v tomto místě se zpravidla nachází největší vlhkost.

Poloha měřících sond je graficky znázorněna na obrázku č. 39. Sonden jsou osazeny do poloviny profilu nosného sloupku rozměru 50/150mm, čili do hloubky 25mm, výška osazení zvolena 1800 mm od úrovně hrubé podlahy (sondy č. 1, 4, 6, 9). Další sondy jsou umístěny v OSB deskách tl.12mm, opět ve středu desky, čili v hloubce 6mm, výška osazení rovněž 1800 mm (sondy č. 2, 3, 7, 8). Toto je provedeno celkem v 5 skladbách obvodových stěn v 1NP i 2NP (místnosti 1R, 2R, 1E a 2E), které jsou od sebe stavebně odděleny tak, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivňování monitorovaných hodnot.

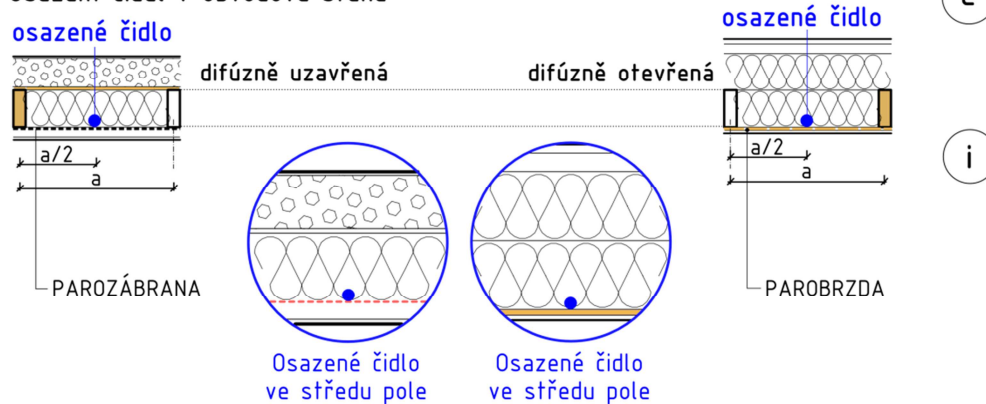
Osazení sond v obvodové stěně



Obr. 38) Osazení sond pro měření teploty a vlhkosti ve dřevě v difúzně uzavřené a difúzně otevřené obvodové stěně [zdroj: archiv autora]

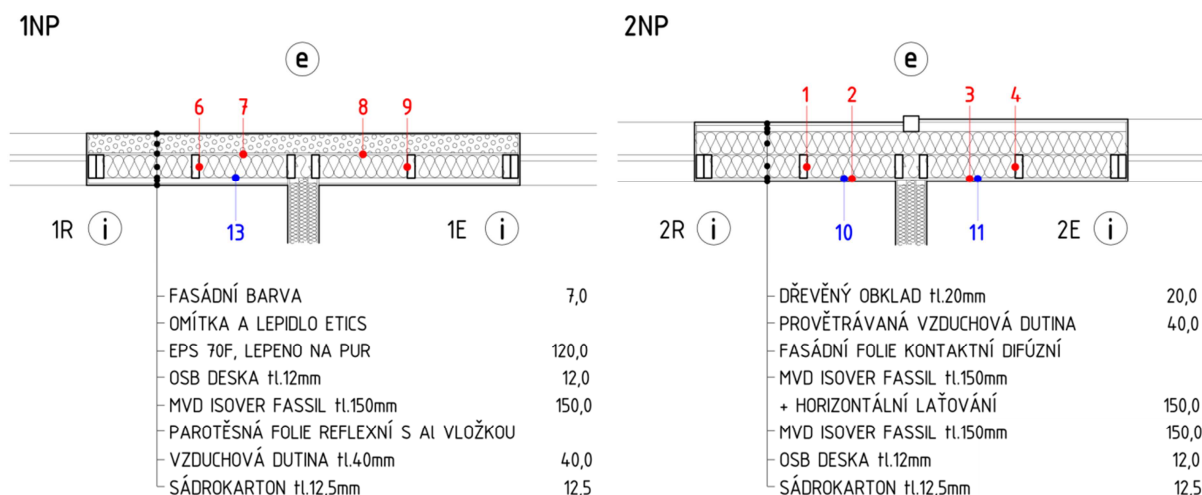
Dalšími parametry sledovanými v rámci chování konstrukce obvodové stěny byly teplota a relativní vlhkost vzduchu přímo ve skladbě. Z tohoto důvodu byla do sledovaných konstrukcí osazena digitální čidla pro snímání právě těchto veličin. Jejich poloha je zobrazena na obr. č. 40 a dále budou vedena pod čísly 10, 11 a 13.

Osazení čidel v obvodové stěně



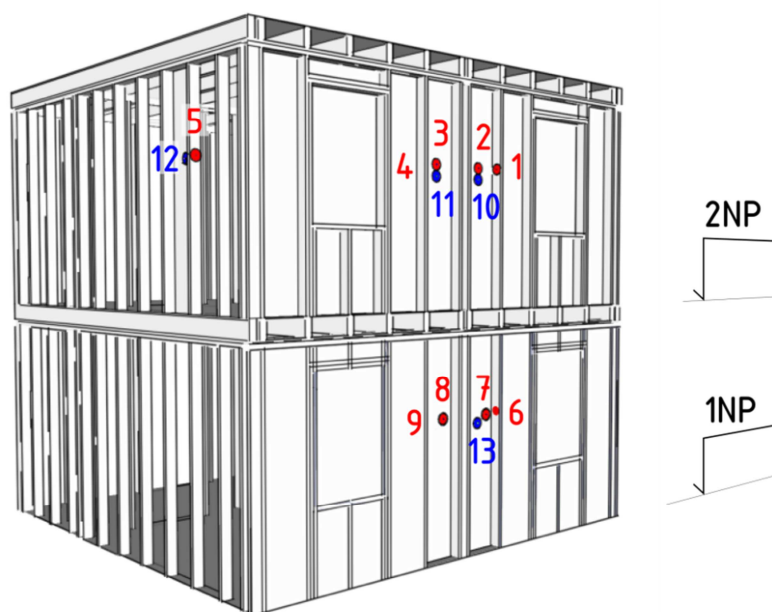
Obr. 39) Osazení čidel pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu v difúzně uzavřené a difúzně otevřené obvodové stěně [zdroj: archiv autora]

Umístění zvoleno vždy za parotěsnicí vrstvou směrem do exteriéru v polovině pole a výšce 1800 mm od úrovně hrubé podlahy. Schéma umístění veškerých měřících zařízení v obvodových konstrukcích včetně jejich skladby je pro názornost uvedeno na níže uvedených obrázcích č. 41 a č. 42.



Obr. 40) Schéma umístění měřících čidel a sond v obvodové stěně (1NP – difúzně uzavřená konstrukce, 2NP – difúzně otevřená konstrukce) [zdroj: archiv autora]

Stejným způsobem řešena i obvodová stěna v místnosti 2E orientovaná na SZ, kde parotěsnicí vrstva není tvořena OSB deskou, ale foliovou parobrzdou s proměnnou ekvivalentní tloušťkou. Měřící zařízení osazená v této skladbě vedena pod čísla 5 a 12.



Obr. 41) Prostorové schéma umístění měřících čidel a sond – Experimentální dřevostavba EXDR1 [zdroj: archiv autora]

Přehled použitých měřících zařízení, jejich popis, měřící rozsah a umístění v experimentální dřevostavbě je uveden v následujících tabulkách č. 16 a č. 17.

Tab. 16) Přehled použitých měřících zařízení pro monitoring teploty a vlhkosti ve dřevěných prvcích a prvcích na bázi dřeva

Ozn.	Název	Měřící rozsah	Umístění	Obrázek
1	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	2NP/2R - sloupek	
2	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	2NP/2R - OSB deska	
3	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	2NP/2E - OSB deska	
4	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	2NP/2E - sloupek	
5	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	2NP/2E - v poli (SZ)	
6	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	1NP/1R - sloupek	
7	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	1NP/1R - OSB deska	
8	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	1NP/1E - OSB deska	
9	Antikorozní sonda vlhkosti s integrovaným snímačem teploty Elbez WS-16/T	Teplota 0 až 110°C Vlhkost 5 až 90%	1NP/1E - sloupek	
Poznámka: Elbez WS-16/T přesnost: Relativní vlhkost: $\pm 0,2 \%$ při jmenovité teplotě 25 °C Rozlišení: 0,1 % / 0,1 °C nebo 0,1 °F [26]				

Pro relevantní hodnoty průběhu teploty a vlhkosti v konstrukcích je nezbytné uvádět i parametry vnitřního a vnějšího prostředí. Z tohoto důvodu byly v interiéru umístěny také dataloggery pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu Voltcraft. Pro sledování vnějšího vzduchu byla využita meteostanice Davis Vantage Pro2™ osazená na experimentální dřevostavbě.

Tab. 17) Přehled použitých měřících zařízení pro monitoring teploty a relativní vlhkosti vzduchu[30][31]

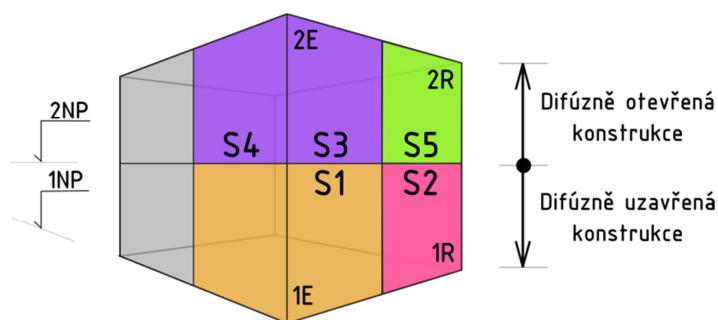
Ozn.	Název	Měřicí rozsah	Umístění	Obrázek
10	Digitální čidlo relativní vlhkosti a teploty Ahlborn FHAD462	Teplota -20 až +60°C Rel.vlhkost 0 až 100%	2NP/2R - v poli (JZ)	
11	Digitální čidlo relativní vlhkosti a teploty Ahlborn FHAD462	Teplota -20 až +60°C Rel.vlhkost 0 až 100%	2NP/2E - v poli (JZ)	
12	Digitální čidlo relativní vlhkosti a teploty Ahlborn FHAD462	Teplota -20 až +60°C Rel.vlhkost 0 až 100%	2NP/2E - v poli „Vario“ (SZ)	
13	Digitální čidlo relativní vlhkosti a teploty Ahlborn FHAD462	Teplota -20 až +60°C Rel.vlhkost 0 až 100%	1NP/1R - v poli (JZ)	
Poznámka: Ahlborn FHAD462 přesnost: Relativní vlhkost: $\pm 1,8\%$ v rozsahu 20 až 80% r.v. při teplotě $25 \pm 2^\circ\text{C}$ Teplota: $\pm 0,3^\circ\text{C}$ při 25°C , $\pm 1,2^\circ\text{C}$ v rozsahu -20 až $+80^\circ\text{C}$				
V1	Bezdrátový datalogger pro měření teploty a vlhkosti Voltcraft VDL-TH	Rozsah měření: Teplota (-40) - (+70) °C Rel.vlhkost 0 - 100%	1NP místnost 1E	
V2	Bezdrátový datalogger pro měření teploty a vlhkosti Voltcraft VDL-TH	Rozsah měření: Teplota (-40) - (+70) °C Rel.vlhkost 0 - 100%	1NP místnost 1R	
V3	Bezdrátový datalogger pro měření teploty a vlhkosti Voltcraft VDL-TH	Rozsah měření: Teplota (-40) - (+70) °C Rel.vlhkost 0 - 100%	2NP místnost 2E	
V4	Bezdrátový datalogger pro měření teploty a vlhkosti Voltcraft VDL-TH	Rozsah měření: Teplota (-40) - (+70) °C Rel.vlhkost 0 - 100%	2NP místnost 2R	
VT1	USB datalogger pro měření teploty a relativní vlhkosti Voltcraft DL-121TH	Rozsah měření: Teplota (-40) - (+70) °C Rel.vlhkost 0 - 100%	1NP místnost 1E	
VT2	USB datalogger pro měření teploty a relativní vlhkosti Voltcraft DL-121TH	Rozsah měření: Teplota (-40) - (+70) °C Rel.vlhkost 0 - 100%	1NP místnost 1R	
VT3	USB datalogger pro měření teploty a relativní vlhkosti Voltcraft DL-121TH	Rozsah měření: Teplota (-40) - (+70) °C Rel.vlhkost 0 - 100%	2NP místnost 2E	
VT4	USB datalogger pro měření teploty a relativní vlhkosti Voltcraft DL-121TH	Rozsah měření: Teplota (-40) - (+70) °C Rel.vlhkost 0 - 100%	2NP místnost 2R	
Poznámka: Voltcraft VDL-TH přesnost: rozlišení $0,1^\circ\text{C}$ Voltcraft DL-121TH přesnost: relativní vlhkost: $\pm 3\%$, teplota: $\pm 1^\circ\text{C}$				

12.5 Specifikace monitorovaných obvodových konstrukcí

Jak již bylo uvedeno výše, pro monitoring bylo zvoleno 5 skladeb konstrukcí obvodové stěny dřevostavby, které se od sebe lišily především volbou typu parotěsnicí vrstvy, a to:

- S1.** Difúzně uzavřená skladba konstrukce s **foliovou parotěsnou folií**, místnost 1E;
- S2.** Difúzně uzavřená skladba konstrukce s parotěsnou fólií s **reflexní aluminiovou vrstvou**, místnost 1R;
- S3.** Difúzně otevřená skladba konstrukce s **parotěsnicí vrstvou tvořenou OSB deskou doplněnou dvojitým latexovým nátěrem**, místnost 2E;
- S4.** Difúzně otevřená skladba konstrukce s **parotěsnicí vrstvou tvořenou parozábranou s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou**, místnost 2E;
- S5.** Difúzně otevřená skladba konstrukce s **parotěsnicí vrstvou tvořenou OSB deskou**, místnost 2R.

V následujících tabulkách jsou uvedeny skladby řešených konstrukcí včetně specifikací jednotlivých materiálů a jejich vlastností. Pro potřeby vyhodnocení měřených veličin jsou zobrazeny pouze vybrané vlastnosti, a sice faktor difúzního odporu μ (-), ekvivalentní difúzní tloušťka materiálu s_d (m) a součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Hodnoty parametrů jsou brány v tomto případě jako ideální, kdy zdrojem byly informace z technických listů výrobců. Nejsou zde zahrnuty korekce zohledňující tepelné mosty, perforace folií nebo kvalitu provedení práce. Toto bude provedeno až v další fázi řešení, kdy budou konstrukce hodnoceny numerickými modely.



Obr. 42) Schéma Experimentální dřevostavby zobrazující umístění monitorovaných obvodových konstrukcí S1, S2, S3, S4 a S5

Tab. 18) Skladba S1 difúzně uzavřené konstrukce obvodové stěny E1 monitorované místnosti 1E s třívrstvou fóliovou parozábranou složenou z výztužné PE mřížky, která je z obou stran laminována polyetylenovou fólií

Místnost 1E		S1 - Obvodová stěna E1 difúzně uzavřená			
Materiál	d (mm)	Specifikace	μ (-)	s_d (m)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
sádkartonová deska	12,5	SDK desky Rigips	8	0,10	0,22
vzduchová dutina	40,0	-	0,25	0,01	0,222
parotěsná folie s Al vložkou	0,25	Dekfol N 140 standard	200 000	50,00	0,35
dřevěný profil 50x150mm	150,0	Smrkové dřevo	157	23,55	0,18
MVD mezi sloupky	150,0	Deska z kamenné vlny	2	0,30	0,041
OSB deska	12,0	Kronopol/Kronoply OSB 3	300	3,60	0,13
EPS 70 F, lepeno na PUR	100,0	Isover EPS 70F	30	3,00	0,039
lepidlo a stěrka ETICS	4,0	Fasco univerz. lepidlo a stěrka na zatepl. systém	35	0,14	0,8
fasádní omítka/barva silikon	3,0	Weber - Terranova	50	0,15	0,86

Skladba obvodové stěny v 1NP byla řešena dvěma způsoby, přičemž prvním bylo použití foliové parozábrany jako parotěsnicí vrstvy. Sondy pro měření teploty a vlhkosti ve dřevě jsou osazeny v nosném sloupku a OSB desce, což je znázorněno na níže uvedeném obrázku.



Obr. 43) Umístění sond Elbez ve sloupku a OSB desce v místnosti 1E (obvodová stěna E1 difúzně uzavřená) a pohled do řešené místnosti

Tab. 19) Skladba S2 difúzně uzavřené konstrukce obvodové stěny E1 monitorované místnosti 1R s parotěsnou fólií s reflexní aluminiovou vrstvou na polyolefinové fólii s výztužnou mřížkou

Místnost 1R		S2 - Obvodová stěna E1 difúzně uzavřená-reflex			
Materiál	d (mm)	Specifikace	μ (-)	s_d (m)	λ (W.m ⁻¹ .K. _i)
sádrokartonová deska	12,5	SDK desky Rigips	8	0,10	0,22
vzduchová dutina	40,0	-	0,25	0,01	0,222
parotěsná folie reflexní s Al vložkou	0,27	Jutafol N Al 170 Reflex	1 111 111	300,00	0,39
dřevěný profil 50x150mm	150,0	Smrkové dřevo	157	23,55	0,18
MVD mezi sloupky	150,0	Deska z kamenné vlny	2	0,30	0,041
OSB deska	12,0	Kronopol/Kronoply OSB 3	300	3,60	0,13
EPS 70 F, lepeno na PUR	100,0	Isover EPS 70F	30	3,00	0,039
lepidlo a sěrka ETICS	4,0	Fasco univerz. lepidlo a sěrka na zatepl. systém	35	0,14	0,8
fasádní omítka/barva silikon	3,0	Weber - Terranova	50	0,15	0,86

Na následujícím obrázku je zobrazen detail výškového umístění sondy Elbez v dřevěném sloupku. Výšková hladina byla dodržena ve všech řešených konstrukcích, tedy přibližně 180 cm nad úrovní hrubé podlahy. Rozdíly v rámci centimetrů byly způsobeny nehomogenitou dřeva.



Obr. 44) Detail výškového umístění sond Elbez ve sloupku v místnosti 1R (obvodová stěna E1 difúzně uzavřená) a pohled do řešené místnosti

Tab. 20) Skladba S3 difúzně otevřené konstrukce obvodové stěny E2 monitorované místnosti 2E s parotěsnicí vrstvou tvořenou OSB deskou doplněnou dvojitým latexovým nátěrem

Místnost 2E		S3 - Obvodová stěna E2 difúzně otevřená-latex			
Materiál	d [mm]	Specifikace	μ (-)	s_d (m)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
sádkartonová deska	12,5	SDK desky Rigips	8	0,10	0,22
latexový nátěr	0,14	Latex univerzální HET	2 070	0,29	0,21
OSB deska	12,0	Kronopol/Kronoply OSB 3	300	3,60	0,13
dřevěný profil 50x150mm	150,0	Smrkové dřevo	157	23,55	0,18
MVD mezi sloupky	150,0	Isover Orsik	1	0,15	0,039
MVD fasádní desky včetně laťování	150,0	Deska z kamenné vlny	1	0,15	0,041
kontaktní difúzní folie	0,5	Jutadach 135	40,00	0,02	0,39
větraná vzduch. dutina	60,0	-	-	-	-
dřevěný fasádní obklad	20,0	-	-	-	-

Řešená skladba stěny ve 2 NP byla navržena ve třech variantách. První z nich byla provedena s tzv. parobrzdou tvořenou OSB deskou tloušťky 12 mm, která byla následně opatřena latexovým nátěrem pro zvýšení difúzního odporu na interiérové straně. Nátěr byl proveden ve dvou vrstvách. Průběh práce a výsledný pohled na stěnu je zobrazen na následujících obrázcích, stejně jako detail na umístěnou sondu Elbez a čidlo Ahlborn.



Obr. 45) Pohled na řešenou stěnu v místnosti 2E (obvodová stěna E2 difúzně otevřená, OSB desky s latexovým nátěrem) s pohledem na sondu Elbez pro měření teploty a vlhkosti dřeva a čidla pro měření relativní vlhkosti a teploty vzduchu Ahlborn

Tab. 21) Skladba S4 difúzně otevřená konstrukce obvodové stěny E2 monitorované místnosti 2E s parotěsnicí vrstvou tvořenou parozábranou s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou

Místnost 2E		S4 - Obvodová stěna E2 difúzně otevřená-Vario			
Materiál	d [mm]	Specifikace	μ (-)	s_d (m)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
sádkartonová deska	12,5	SDK desky Rigips	8	0,10	0,22
parozábrana s proměnnou ekvivalentní difúzní tl.	0,22	Isover Vario KM Duplex UV	1 364-22 727	0,3-5,0	0,13
dřevěný profil 50x150mm	150,0	Smrkové dřevo	157	23,55	0,18
MVD mezi sloupky	150,0	Isover Orsik	1	0,15	0,039
MVD fasádní desky včetně laťování	150,0	Deska z kamenné vlny	1	0,15	0,041
kontaktní difúzní folie	0,5	Jutadach 135	40,00	0,02	0,39
větraná vzduch. dutina	60,0	-	-	-	-
dřevěný fasádní obklad	20,0	-	-	-	-

Druhou variantou je provedení difúzního retardéru pomocí parozábrany s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou. Jedná se o speciálně vyvinutou fólii na bázi polyamidu, která kromě parotěsné funkce má navíc proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťku s_d , díky které umožňuje redukci vlhkostního režimu v konstrukci. Konstrukce je opět zobrazena na následujících obrázcích včetně umístění čidla Ahlborn.

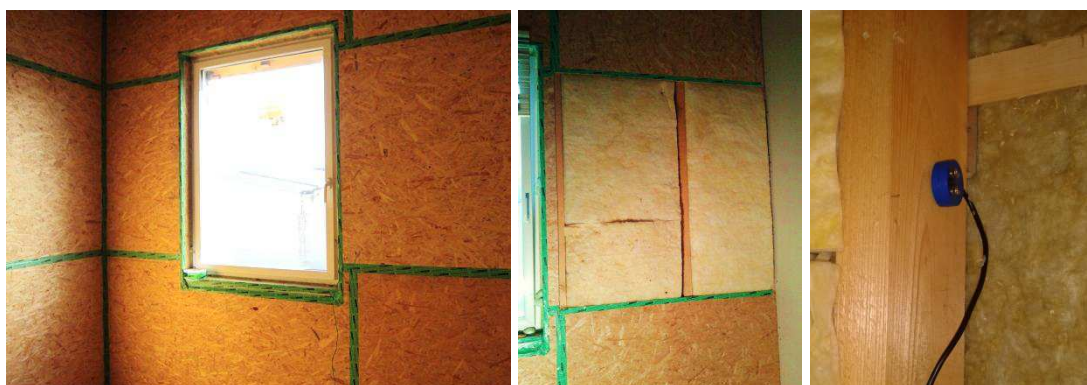


Obr. 46) Pohled na řešenou stěnu v místnosti 2E (obvodová stěna E2 difúzně otevřená, parotěsnicí vrstva tvořená parozábranou s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou) s pohledem na umístění čidlo pro měření relativní vlhkosti a teploty vzduchu Ahlborn, sonda Elbez již zabudovaná ve skladbě

Tab. 22) Skladba S5 difúzně otevřené konstrukce obvodové stěny E2 monitorované místnosti 2R s difúzním retardérem tvořeným OSB deskou s přelepenými spoji parotěsnou páskou

Místnost 2R		S5 - Obvodová stěna E2 difúzně otevřená			
Materiál	d [mm]	Specifikace	μ (-)	s_d (m)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
sádkartonová deska	12,5	SDK desky Rigips	8	0,10	0,22
OSB deska	12,0	Kronopol/Kronoply OSB 3	300	3,60	0,13
dřevěný profil 50x150mm	150,0	Smrkové dřevo	157	23,55	0,18
MVD mezi sloupky	150,0	Isover Orsik	1	0,15	0,039
MVD fasádní desky včetně laťování	150,0	Deska z kamenné vlny	1	0,15	0,041
kontaktní difúzní folie	0,5	Jutadach 135	40,00	0,02	0,39
větraná vzduch. dutina	60,0	-	-	-	-
dřevěný fasádní obklad	20,0	-	-	-	-

Poslední konstrukční variantou je skladba konstrukce s difúzním retardérem tvořeným pouze OSB deskou bez jakýchkoli dalších povrchových úprav. Spojy mezi deskami řešeny na sraz a následně přelepeny parotěsnou páskou, což je zobrazeno na následujícím obrázku. Tím bylo zajištěno parotěsné spojení OSB desek.



Obr. 47) Pohled na řešenou stěnu v místnosti 2R (obvodová stěna E2 difúzně otevřená, parotěsnicí vrstva tvořená OSB deskami) s pohledem na sloupek s umístěnou sondu Elbez pro měření teploty a vlhkosti dřeva

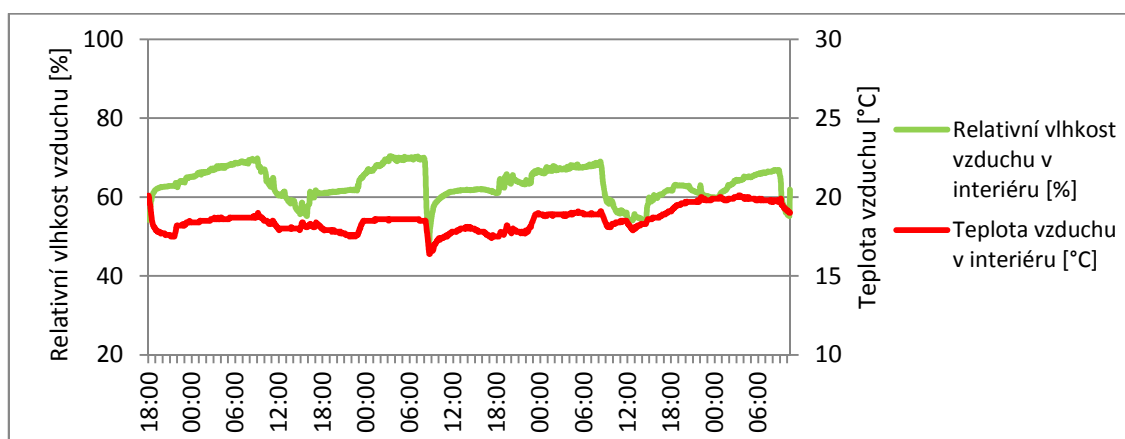
12.6 Volba parametrů vnitřního prostředí pro experimentální měření

Pro vypovídající výsledky experimentálního měření byla podstatná samotná volba parametrů vnitřního prostředí. Bylo možné uvažovat přímo s návrhovými hodnotami popsány v normě ČSN 73 0540 – 3: Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin (listopad 2005) nebo parametry stanovit na základě měření in-situ.

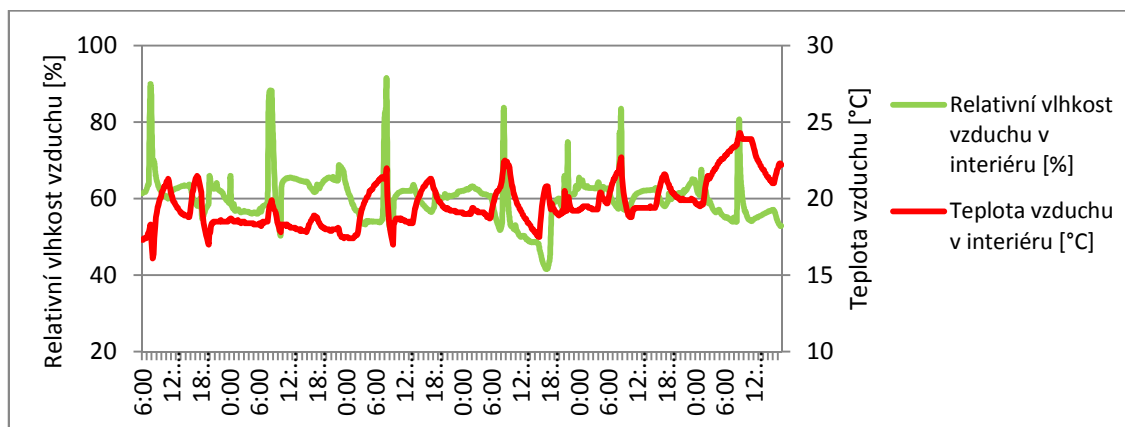
Monitoring parametrů vnitřního prostředí na reálném objektu

Volba parametrů vnitřního prostředí byla stanovena také na základě monitoringu reálně užívaných prostor. Jedná se o rodinný dům řešený jako dřevostavba bez vzduchotechniky, kde byla osazena tepelně vlhkostní čidla pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Jako zástupce obytných místností byla zvolena ložnice (obytná místnost s předpokladem nejvyšších vlhkostních nárůstů) a v rámci dosažení nejvyšší relativní vlhkosti vzduchu v interiéru zvolena koupelna. Nutno zmínit, že větrání koupelny řešeno jako kombinace přirozeného větrání okny a nuceného odtahu mechanickým ventilátorem. Z výsledků měření vyplývá, že relativní vlhkost v ložnici se v průměru pohybuje okolo 60%, přičemž v maximu mírně přesahuje hodnotu 70%. V případě koupelny můžeme sledovat průměrnou hodnotu totožnou (okolo 60%) naopak maximální hodnoty relativní vlhkosti vzduchu přesahují 90%. Průměrné teploty jsou téměř shodné, tedy necelých 20°C, avšak v koupelně maxima dosahují 24°C.

Průběhy teplot a relativní vlhkosti sledovaných místností znázorněny v níže uvedených grafech.



Graf 10) Parametry vnitřního prostředí, hodnoty relativní vlhkosti a teploty vzduchu monitorované v ložnici reálně užívaného rodinného domu (dřevostavbě)[zdroj: archiv autora]



Graf 11) Parametry vnitřního prostředí, hodnoty relativní vlhkosti a teploty vzduchu monitorované v koupelně [zdroj: archiv autora]

Souhrn zaznamenaných hodnot teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu v interiéru uveden v následující tabulce:

Tab. 23) Parametry vnitřního vzduchu (teplota a relativní vlhkost) monitorované v ložnici a koupelně [zdroj: archiv autora]

Místnost	Koupelna		Obytná místnost (ložnice)	
Parametr	teplota vzduchu [°C]	relativní vlhkost vzduchu [%]	teplota vzduchu [°C]	relativní vlhkost vzduchu [%]
min	13,9	41,6	16,4	48,1
max	24,3	91,2	20,1	70,4
průměr	19,2	61,1	18,6	63,4

Normové návrhové hodnoty parametrů vnitřního prostředí

Návrhové hodnoty parametrů vnitřního prostředí obytných budov z normy ČSN 73 0540 – 3: Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin (listopad 2005) uvedeny v následující tabulce.

Tab. 24) Normové návrhové hodnoty parametrů vnitřního prostředí uvažované pro koupelny a obytné místnosti (návrhová vnitřní teplota v zimním období a návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu) [32]

Místnost	Koupelna		Obytná místnost (ložnice)	
Parametr	Návrhová vnitřní teplota v zimním období θ_i [°C]	Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu ϕ_i [%]	Návrhová vnitřní teplota v zimním období θ_i [°C]	Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu ϕ_i [%]
Návrhová hodnota	24,0	70,0	20,0	50,0

Volba parametrů vnitřního prostředí

Na základě komparace výsledků monitoringu vnitřního vzduchu a normových návrhových hodnot pro obytné místnosti (ložnice) a koupelnu byly stanoveny parametry vnitřního prostředí pro experimentální měření v dřevostavbě EXDR1.

V první fázi byla zvolena teplota +20°C a relativní vlhkost vzduchu 50%. Z důvodu popsání vlhkostních dějů v monitorované obvodové stěně při vyšší vlhkostní zátěži byla následně relativní vlhkost zvýšena až na 70%.

Prostředky pro dosažení požadovaných parametrů vnitřního prostředí

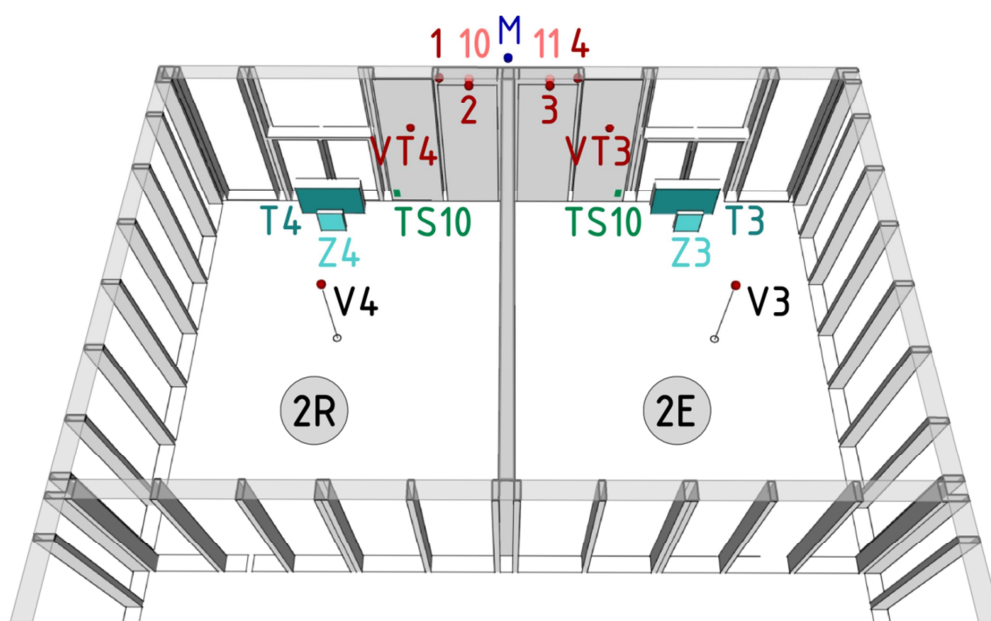
Pro dosažení stanovených tepelně vlhkostních parametrů vnitřního prostředí byla v řešených místnostech instalována elektrická otopná tělesa, elektrické zvlhčovače vzduchu a pro následnou interpretaci dat bezdrátový datalogger. Instalována byla v první řadě elektrická otopná tělesa. Pro regulaci teploty v místnostech byla připojena na tepelně spínané zásuvky typ Elektrobock CZ s.r.o. TS10 pro automatickou regulaci elektrických otopných soustav. Takto byla zaručena požadovaná teplota v interiéru.

Avšak zásadní bylo dosažení a udržení potřebné relativní vlhkosti vzduchu. Jelikož objekt není trvale užíván a nejsou zde žádné přirozené zdroje vývinu vlhkosti, hodnota relativní vlhkosti vzduchu v objektu nedosahovala ani 30%. Z tohoto důvodu byly ve všech řešených místnostech instalovány elektrické zvlhčovače vzduchu.

V neposlední řadě byly v každé místnosti instalovány bezdrátové dataloggery pro měření teploty a vlhkosti Voltcraft VDL-TH pro monitoring parametrů vnitřního vzduchu.

Tab. 25) Přehled použitých přístrojů

Ozn.	Název	Popis	Umístění	Obrázek
Z1	Ultrazvukový zvlhčovač vzduchu Professor Z 70	Zvlhčovací výkon: až 300ml/hod Objem nádržky: 7 l	1NP místnost 1E	
Z2	Ultrazvukový zvlhčovač vzduchu Professor Z 70	Zvlhčovací výkon: až 300ml/hod Objem nádržky: 7 l	1NP místnost 1R	
Z3	Zvlhčovač vzduchu Sanitas SLB39	Zvlhčovací výkon: až 220ml/hod Objem nádržky: 2,8l	2NP místnost 2E	
Z4	Zvlhčovač vzduchu Sanitas SLB39	Zvlhčovací výkon: až 220ml/hod Objem nádržky: 2,8l	2NP místnost 2R	
TS10	Tepelně spínaná zásuvka TS10 pro automatickou regulaci elektrických otopných soustav	Rozsah nastavitelných teplot 5 až 40°C	1NP místnost 1E	
TS10	Tepelně spínaná zásuvka TS10 pro automatickou regulaci elektrických otopných soustav	Rozsah nastavitelných teplot 5 až 40°C	1NP místnost 1R	
TS10	Tepelně spínaná zásuvka TS10 pro automatickou regulaci elektrických otopných soustav	Rozsah nastavitelných teplot 5 až 40°C	2NP místnost 2E	
TS10	Tepelně spínaná zásuvka TS10 pro automatickou regulaci elektrických otopných soustav	Rozsah nastavitelných teplot 5 až 40°C	2NP místnost 2R	
T1	Přenosný elektrický konvektor Turbo	Příkon 750 W (max 2000 W)	1NP místnost 1E	
T2	Přenosný elektrický konvektor Turbo	Příkon 750 W (max 2000 W)	1NP místnost 1R	
T3	Přenosný elektrický konvektor Turbo	Příkon 750 W (max 2000 W)	2NP místnost 2E	
T4	Přenosný elektrický konvektor Turbo	Příkon 750 W (max 2000 W)	2NP místnost 2R	



LEGENDA ZOBRAZENÝCH ZAŘÍZENÍ

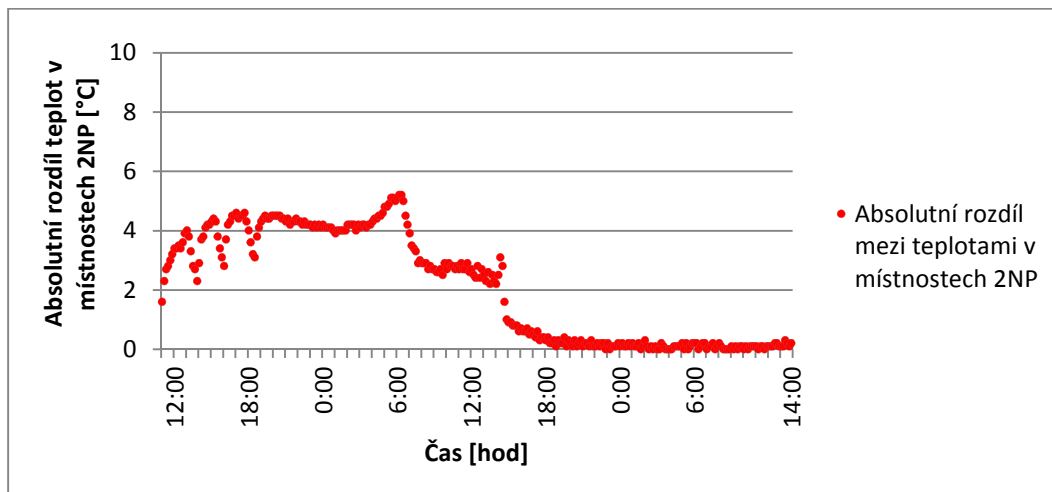
- 1,2,3,4 Antikorozní sonda vlhkosti Elbez WS-16/T
- 10,11 Digitální čidlo relativní vlhkosti a teploty Ahlborn FHAD462
- TS10 Tepelně spínaná zásuvka TS10 pro automatickou regulaci elektrických otopných soustav
- T3,T4 Elektrické topné těleso
- Z3,Z4 Zvlhčovač vzduchu Sanitas
- V3,V4 Bezdrátový datalogger pro měření teploty a vlhkosti Voltcraft VDL-TH
- VT3,VT4 USB datalogger pro měření teploty a relativní vlhkosti Voltcraft DL-121TH
- M Meteostanice Vantage Pro2™

Obr. 48) Prostorové umístění měřících zařízení a zdrojů tepla a vlhkosti v místnosti 2R a 2E ve druhém nadzemním podlaží [zdroj: archív autora]

Optimalizace nastavení zdrojů tepla a vlhkosti

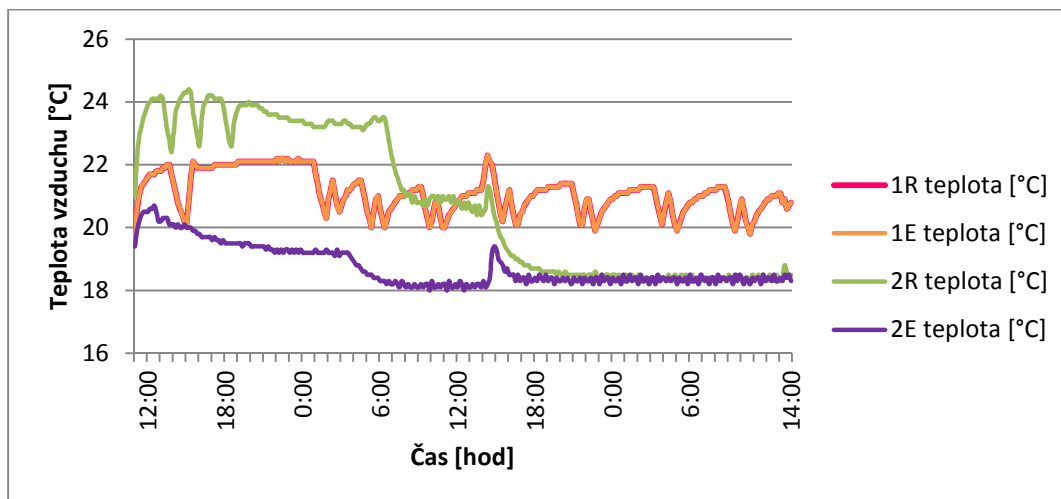
Jak bylo zmíněno výše, pro dosažení optimální teploty vzduchu v interiéru byly v řešených místnostech osazeny tepelně spínané zásuvky pro automatickou regulaci elektrických otopných těles. Relativní vlhkost vzduchu byla regulována pomocí zvlhčovačů vzduchu umístěných v každé místnosti.

Předdefinované **teploty** ve 2. nadzemním podlaží bylo dosaženo přibližně 30 hodin po osazení spínaných zásuvek a teplotní rozdíl mezi místnostmi se následně pohyboval v intervalu 0 až 0,3 °C, přičemž původní maxima rozdílu šplhala až k 5 °C.



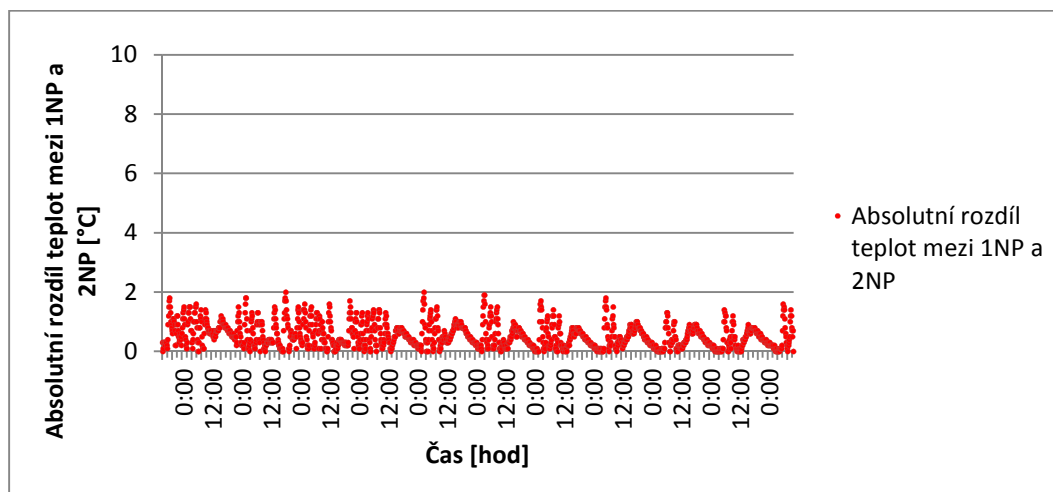
Graf 12) Absolutní rozdíl mezi teplotami v místnostech 2NP

Experimentální a referenční místnost v prvním nadzemním podlaží (místnosti 1R a 1E) od sebe nebyly v době řešení disertační práce stavebně odděleny. Výsledky ani průběh měření tímto nebyl nijak negativně ovlivněn, byly pouze zaručeny totožné teploty a relativní vlhkosti vzduchu v celém 1NP. Naopak bylo nutné ověřit, zda nedochází k nežádoucím diferencím mezi podlažími, tedy místnostmi 1R(1E) a 2R a 2E.



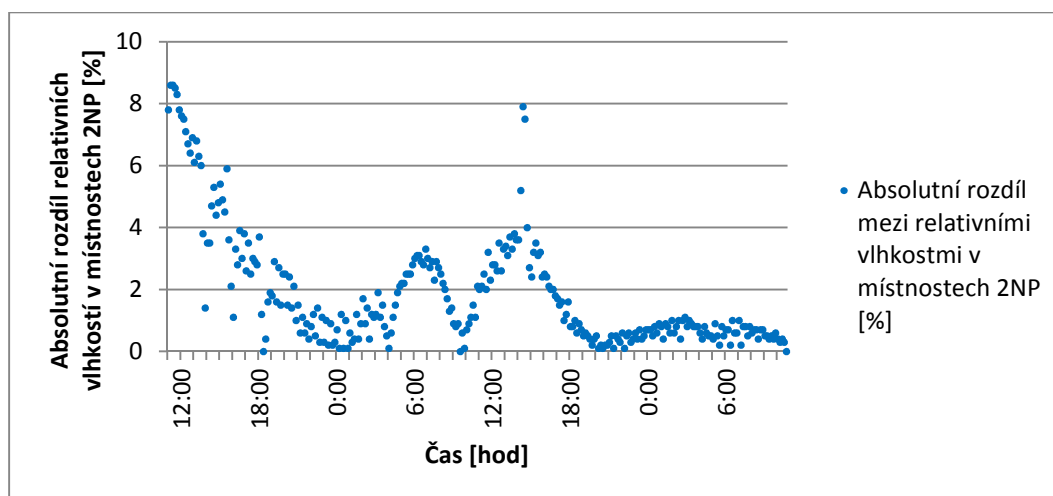
Graf 13) Teplota vzduchu v místnostech po osazení tepelně spínaných zásuvek – nevyhovující rozdíly teplot mezi podlažími

V první fázi dosahoval rozdíl teplot v prvním a druhém podlaží téměř 4 °C, což bylo pro další práci nepřijatelné. Po úpravách v nastavení regulace teploty byl tento rozdíl zredukován na průměrnou hodnotu rozdílu 0,5 °C.



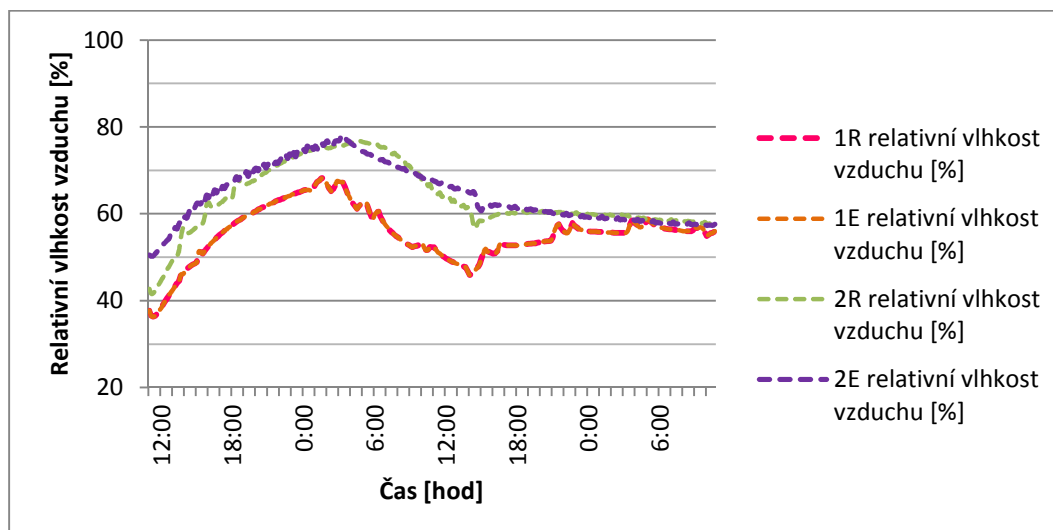
Graf 14) Absolutní rozdíl teplot mezi místnostmi v 1NP a 2NP po úpravách nastavení tepelně spínaných zásuvek

Současně s regulací teploty byla v interiéru upravována i **relativní vlhkost vzduchu**. Po instalaci zvlhčovačů ve druhém nadzemním podlaží byly hodnoty zvýšeny z 30% na téměř 80%, přičemž absolutní odchylka po 24 hodinách nepřesahovala 2%.



Graf 15) Absolutní rozdíl mezi relativními vlhkostmi v místnostech 2E a 2R druhého nadzemního podlaží, vývoj a ustálení hodnot v průběhu 24 hodin

Jelikož experimentální a referenční místnost v 1NP od sebe nebyly stavebně odděleny, jednalo se tedy o dvojnásobný objem zvlhčované místnosti, nepodařilo se v první fázi dosáhnout stejné relativní vlhkosti jako ve 2NP. Toto bylo následně vyřešeno výměnou zvlhčovačů za výkonnější, čímž byla snížena maximální odchylka rozdílu relativních vlhkostí na hodnoty nepřesahující 5%.

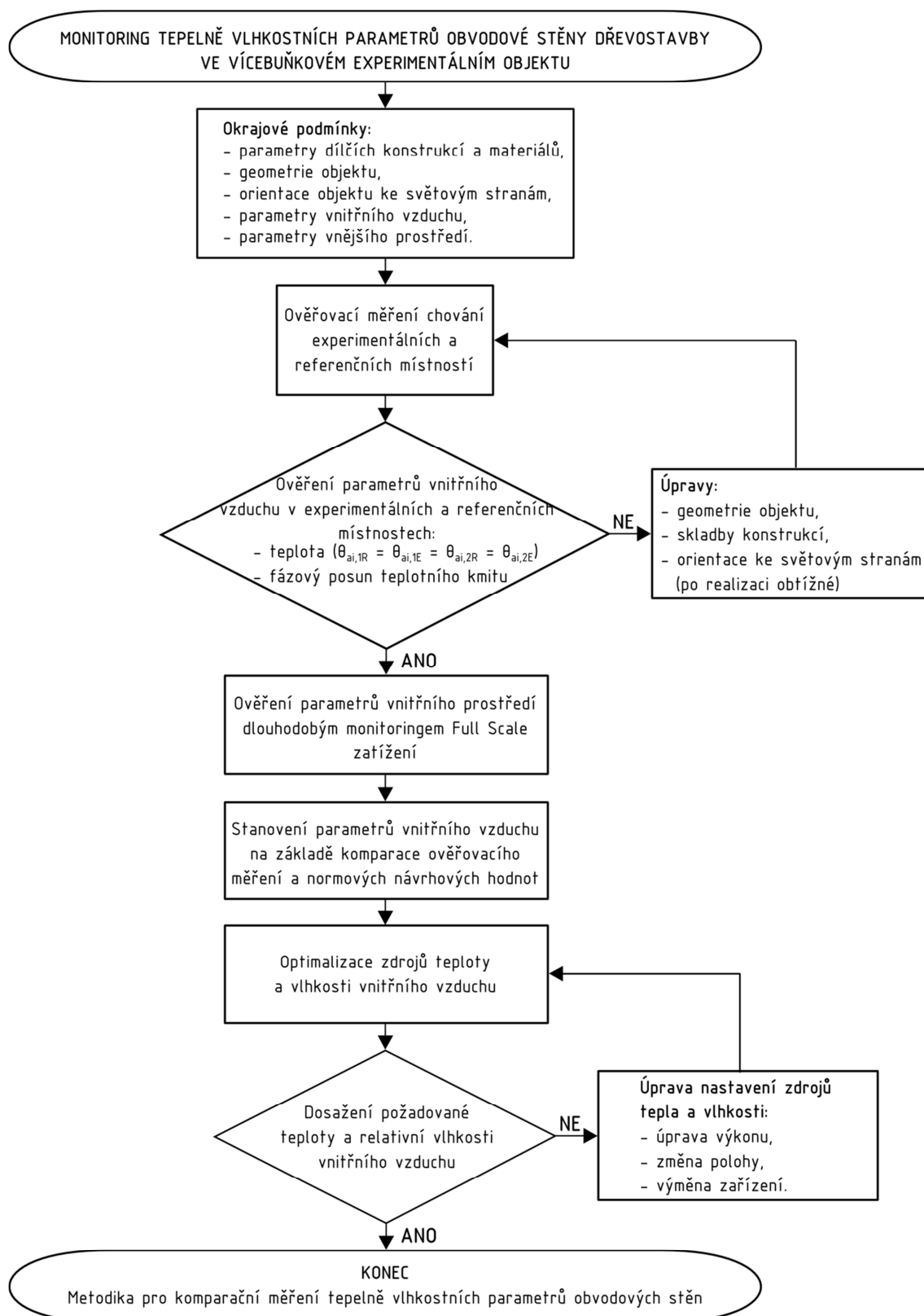


Graf 16) Relativní vlhkost vzduchu v místnostech po instalaci zvlhčovačů. Je patrna její vyšší hodnota v místnostech 2NP po začátku zvlhčování, toto řešeno výměnou zvlhčovačů pro zvýšení výkonu v 1NP. Kladný výsledek je patrný z druhé části grafu.

V případě druhého nadzemního podlaží bylo také zajímavé sledovat vliv latexového nátěru na OSB desce na průběh relativní vlhkosti. Nátěr byl proveden v půdorysně pravé místnosti 2E, kde můžeme v prvních 12 hodinách pozorovat výraznější nárůst hodnot relativní vlhkosti vzduchu. To může být způsobeno právě dvouvrstvým latexovým nátěrem, jehož faktor difúzního odporu je přibližně 2100. Hodnotu nelze blíže specifikovat s ohledem na příliš malou tloušťku nátěru. Při poklesu relativní vlhkosti na 60% se její hodnoty v místnostech 2R a 2E opět přiblížily a absolutní rozdíl mezi nimi výrazně nepřekročil hodnotu 1%.

Lze tedy konstatovat, že po optimalizaci vnitřních zdrojů tepla a vlhkosti bylo v monitorovaných místnostech dosaženo požadovaných parametrů vzduchu (teplota a relativní vlhkost) s minimální odchylkou a bylo tedy možné zahájit experimentální monitoring tepelně vlhkostních parametrů řešených obvodových stěn.

Zkušenosti získané při optimalizaci teploty a relativní vlhkosti vzduchu v interiéru byly využity pro tvorbu vývojového diagramu metodiky pro komparativní měření tepelně vlhkostních parametrů obvodových stěn. Byly v něm zohledněny požadavky na parametry dílčích konstrukcí a materiálů, geometrii monitorovaného prvku nebo parametry vnějšího a vnitřního vzduchu. Diagram je uveden na následující straně pod obr. č. 50.



Obr. 49) Vývojový diagram metodiky pro komparační měření tepelně vlhkostních parametrů obvodových stěn

13. Numerické metody

Hodnocení vlhkostního stavu v konstrukcích lze v rámci numerického modelování řešit dvěma základními metodami, a to stacionárními, kdy transport vlhkosti je uvažovaný pouze difuzí vodních par a transport tepla vedením. Změna materiálových parametrů nebo transport kapalné vlhkosti nelze ve výpočtech uvažovat. Druhými metodami jsou metody dynamické umožňující zahrnout do výpočtů vliv klimatických podmínek (vliv větru, deště, slunečního záření, radiace noční oblohy), materiálové charakteristiky, akumulaci tepla, vnitřní zdroje vlhkosti, atd.

13.1 Stacionární model - Glaserova metoda

Glaserův model je běžná, nejčastěji užívaná metoda pro hodnocení vlhkostní rovnováhy ve stavebních konstrukcích vyvinutá H. Glaserem v roce 1958. Popisuje šíření vlhkosti konstrukcí pouze s ohledem na difuzi vodní páry závislé na jedné materiálové charakteristice. Nezohledňuje transport vlhkosti formou kapilárního vedení konstrukcí, ani sorpční kapacity, které by snížily riziko poškození v případě kondenzace vodní páry. Jelikož model pracuje pouze v ustáleném stavu za zjednodušených okrajových podmínek, nelze zohlednit ani dílčí krátkodobé zatížení, déšť nebo sluneční záření. Cílem je poskytnout obecné tepelně vlhkostní posouzení konstrukce.

Na Glaserově metodě je založen výpočet roční bilance zkondenzované a vypařitelné vodní páry dle ČSN EN ISO 13788, stejně tak šíření vodní páry konstrukcí a ověření výskytu kondenzace dle ČSN 73 0540. Obě metodiky byly podrobně popsány v kapitole č. 5 Hodnocení vlhkostního stavu ve stavebních konstrukcích.

13.2 Dynamický model

Dynamické modely současného šíření tepla a vlhkosti umožňují zahrnout do výpočtů nejen transport vlhkosti difuzí vodních par a transport tepla vedením, ale uvažuje do výpočtů vliv tepla při fázových změnách vody, nebo lze zadávat podrobná klimatická data a parametry materiálů. První fyzikální modely vzájemného šíření tepla a vlhkosti se ve světě objevily již v 50. letech 20. století, přičemž hlavní rozvoj nastal v 70. a 90. letech. V roce 2003 bylo porovnáno D. Hillem 45 různých výpočetních programů predikujících šíření tepla a vlhkosti stavebními konstrukcemi, z nichž pro hodnocení šíření tepla a vlhkosti obalovými konstrukcemi byly nakonec doporučeny dva softwary, a to MATCH a WUFI.

Níže je uvedeno několik dalších programů vyvinutých pro modelování transportu vlhkosti v konstrukcích:

- MATCH (Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials), řeší jednorozměrné šíření tepla a vlhkosti, byl základem pro MOIST 3.0, vyvinut v Technical University of Denmark, 1990
- MOIST 3.0 – Opět řeší jednorozměrné šíření tepla a vlhkosti,
- HAM (Heat, Air and Moisture transport) – poskytuje jednorozměrný výpočet transportních procesů tepla, vzduchu a vlhkosti,
- WUFI® - vyvinut v Institute for Building Physics v Německu pro popis tepelně vlhkostního chování vícevrstevných konstrukcí vystavených klimatickým podmínkám, nabízí řešení v 1D i 2D.
- CHAMPS (Coupled Heat, Air, Moisture, and Pollutant Simulations) - vyvinut v Syracuse University, USA (2005), umožňuje modelování přenosu tepla a vlhkosti v 1D, 2D i 3D.

Na základě výše uvedených informací byl pro simulační metodu a ověření získaných dat zvolen software WUFI Pro.

13.3 WUFI - Wärme Und Feuchte Instationär

Software WUFI Pro byl vyvinut na základě disertační práce H.M.Künzela [34] v roce 1995 a v současné době je dále rozvíjen ve Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) v Německu. Vychází z následující soustavy diferenciálních rovnic:

$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi \cdot p_{sat})) \quad (53)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi \cdot p_{sat})) \quad (54)$$

kde dH/dT akumulace tepla ve vlhkém materiálu ($J.m^{-3}.K^{-1}$),
 $dw/d\varphi$ akumulace vlhkosti v materiálu ($kg.m^{-3}$),
 λ součinitel tepelné vodivosti vlhkého materiálu ($W.m^{-1}.K^{-1}$),
 D_φ součinitel kapilárního transportu vlhkosti ($kg.m^{-1}.s^{-1}$),
 δ_p součinitel difúzní propustnosti materiálu ($kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$),
 h_v měrné skupenské teplo ($J.kg^{-1}$),
 p_{sat} částečný tlak nasycené vodní páry (Pa),
 T teplota ($^{\circ}C$),
 φ relativní vlhkost (-).

Künzelova soustava diferenciálních rovnic je unikátní tím, že jedinou neznámou v jednotlivých rovnicích je pouze teplota, respektive relativní vlhkost. Výhodou této soustavy rovnic je i to, že jednotlivé rovnice (53) a (54) jsou vzájemně svázány, tj. částečný tlak vodních par závisí na okamžité teplotě napříč konstrukcí, součinitel tepelné vodivosti závisí na aktuální vlhkosti v materiálu a skupenské teplo závisí na množství vlhkosti vyskytující se napříč konstrukcí. Künzelův numerický model na rozdíl od stacionárních normových postupů uvedených v souboru tepelně technických norem ČSN 73 05 40 umožňuje:

- dynamicky simulovat šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích s libovolným časovým krokem (nejčastěji se používá krok jedna hodina),
- natočit konstrukci vůči světovým stranám i vůči horizontální rovině,
- zahrnout vliv slunečního a dlouhovlnného záření na šíření tepla a vlhkosti,
- uvažovat s akumulací tepla a vlhkosti v jednotlivých vrstvách konstrukce,
- vzít v úvahu závislost součinitele tepelné vodivosti materiálu na množství vlhkosti v materiálu a faktoru difúzního odporu na množství vlhkosti v materiálu
- uvažovat se šířením kapalně vlhkosti v porézních materiálech,
- zahrnout absorpci hnaného deště na vnější povrch stavební konstrukce.

Dynamické kontinuální modelování s libovolným časovým krokem (běžně 1 hodina) umožňuje modelovat nejrůznější fyzikální děje, které se běžně vyskytují ve stavebních konstrukcích a materiálech, například:

- čas potřebný k vysušení vlhké konstrukce,
- riziko kondenzace na vnitřním povrchu konstrukce,
- riziko růstu plísní na vnitřním povrchu konstrukce,
- vliv hnaného deště na chování obvodové konstrukce,
- riziko nadměrné akumulace vlhkosti uvnitř stavební konstrukce,
- chování konstrukce při zatékání dešťové vody,
- porovnání různých skladeb při rekonstrukci stávající konstrukce [33][35].

Software WUFI Pro využívá rozsáhlou databázi vnějších a vnitřních okrajových podmínek naměřených po celém světě. Použití této rozsáhlé databáze umožňuje modelovat nejrůznější tepelně vlhkostní zatížení stavebních konstrukcí. Do databáze je možné přidávat vlastní vnější i vnitřní okrajové podmínky.

E. VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

- Experimentální měření
- Simulační metoda
- Komparace experimentálního měření a simulací

Výsledky disertační práce:

Na základě stanovených cílů disertační práce bylo dosaženo následujících výsledků, které jsou dále rozčleněny na experimentální měření, simulace a komparace experimentálního měření a simulací.

14. Experimentální měření

14.1 Monitoring dřevěných prvků a materiálů na bázi dřeva

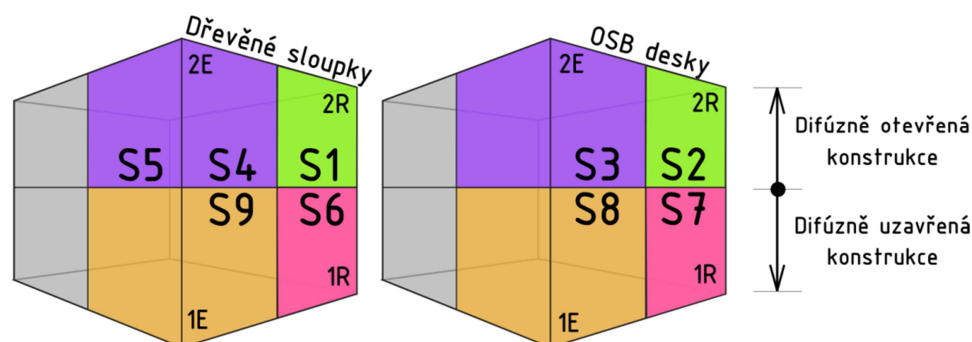
V řešených obvodových konstrukcích byly dlouhodobě monitorovány teplota a hmotnostní vlhkost dřevěných prvků (nosné sloupky) a deskových materiálů na bázi dřeva (OSB desky). Pro popis tepelně vlhkostních parametrů byl zvolen časový úsek zobrazující chování měřených parametrů v průběhu dvou dnů v zimním období.

Pro přehlednost grafických výstupů je zde zavedeno jednoduché barevné členění řešených místností včetně označení používaných měřících sond Elbez, tedy:

- Místnost 1E – oranžová barva;
- Místnost 1R – růžová barva;
- Místnost 2E – fialová barva;
- Místnost 2R – zelená barva.

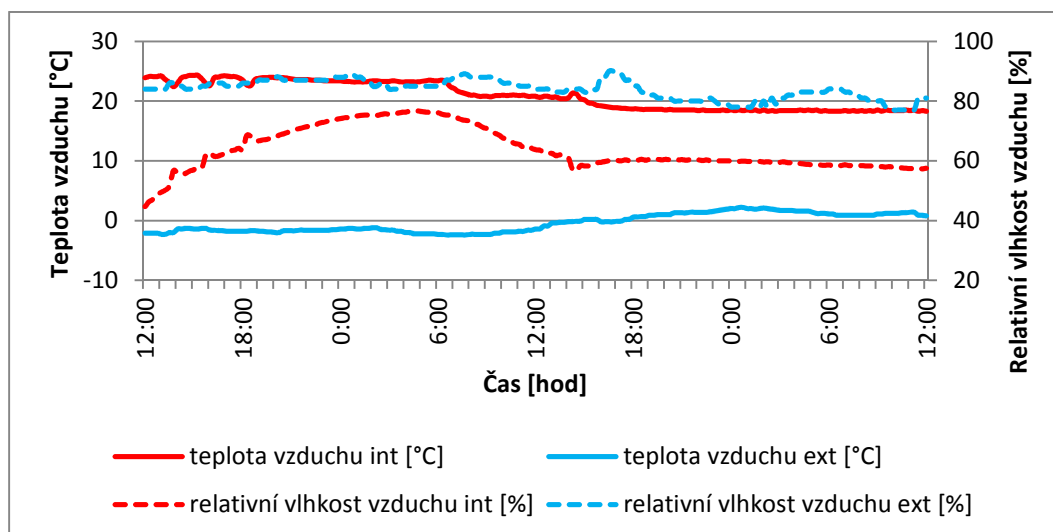
Hodnoty parametrů vnitřního a vnějšího vzduchu jednotně značeny:

- Interiér – červená barva;
- Exteriér – modrá barva.



Obr. 50) Schéma Experimentálního objektu s barevným členěním řešených místností (1E, 1R, 2E, 2R) a čísla měřících sond Elbez (S1 – S9), v prvním případě pro sondy umístěné v dřevěných sloupcích, ve druhém případě v OSB deskách

Jelikož monitoring konstrukcí probíhal po dobu několika měsíců, byl pro vyhodnocení zvolen časový úsek s nejméně vhodnými tepelně vlhkostními podmínkami v interiéru, tedy se zvýšenou relativní vlhkostí vzduchu. Během měření dosahovala až 80 %, v průběhu měření se snížila na úroveň 60 %, což je hodnota běžně se vyskytující v obytných místnostech. Okrajové podmínky, tedy teplota a relativní vlhkost vzduchu na straně exteriéru i interiéru, jsou uvedeny v následujícím grafu.



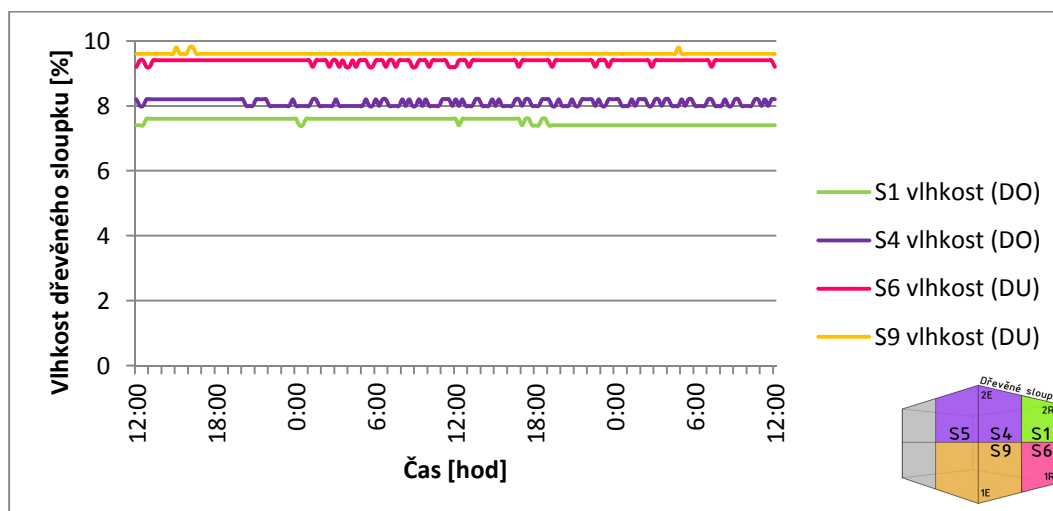
Graf 17) Průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru a interiéru v průběhu vybraného časového úseku

Na hodnoty vlhkosti dřevěných prvků mělo bezpochyby vliv také to, že bylo použito řezivo vysušené přirozenou cestou. V rámci přípravy stavby byla splněna doporučená doba vysoušení 2 – 6 týdnů pro dosažení vlhkosti nepřekračující hodnotu 20 %.



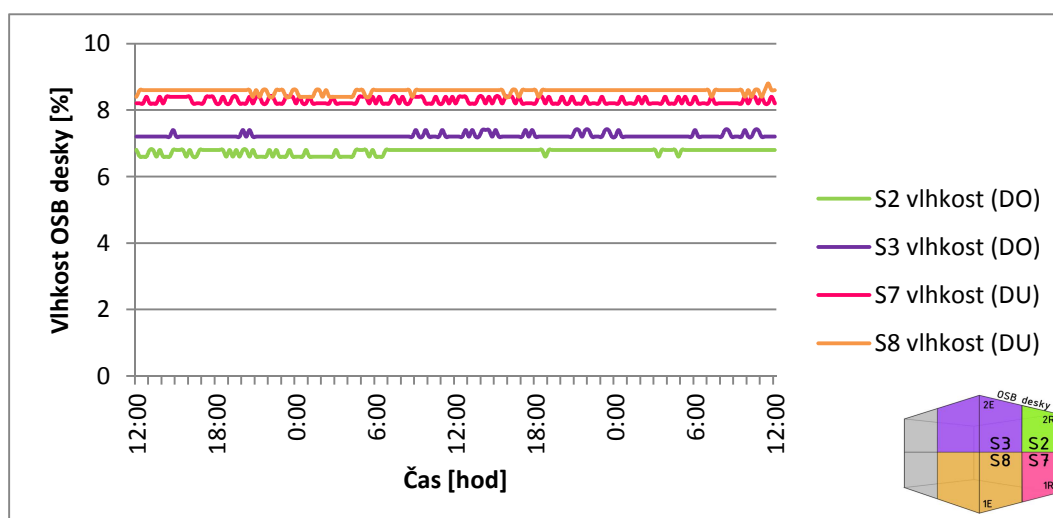
Obr. 51) Uskladněné konstrukční řezivo pro Experimentální dřevostavbu EXDR1 v průběhu vysoušení přirozenou cestou [zdroj: archiv autora]

Jak bylo uvedeno výše, řešena byla problematika vlhkosti ve sloupcích z rostlého dřeva a v deskových materiálech na bázi dřeva, které reprezentují OSB desky. Průběh vlhkosti ve dřevěných sloupcích při různých variantách řešení obvodové stěny je pro přehlednost uveden samostatně v grafu č. 18.



Graf 18) Průběh vlhkosti ve dřevěném sloupku v monitorovaných obvodových konstrukcích (pozn: DO – difúzně otevřená skladba konstrukce, DU – difúzně uzavřená skladba konstrukce)

Změny vlhkosti monitorované v OSB deskách jsou znázorněny v grafu č. 19. V obou případech je vlhkost vyšší u skladeb řešených jako difúzně otevřené, ovšem rozdíl není nijak zásadní, jelikož se pohybuje okolo 2 %.



Graf 19) Průběh vlhkosti v OSB deskách v monitorovaných obvodových konstrukcích (pozn: DO – difúzně otevřená skladba konstrukce, DU – difúzně uzavřená skladba konstrukce)

Z grafu č. 18 a č. 19 je patrné, že během měření nepřekročila hmotnostní vlhkost jak ve dřevěném sloupku, tak v OSB deskách mez 10 %. Z tohoto pohledu naměřené hodnoty zaručují přirozenou ochranu dřeva před napadením dřevokaznými škůdci, jelikož příznivé podmínky pro jejich vznik nastávají při překročení hodnoty 15 – 20 % vlhkosti dřeva. Proto by při použití dřeva jako konstrukčního prvku neměla jeho vlhkost překročit tuto hranici.

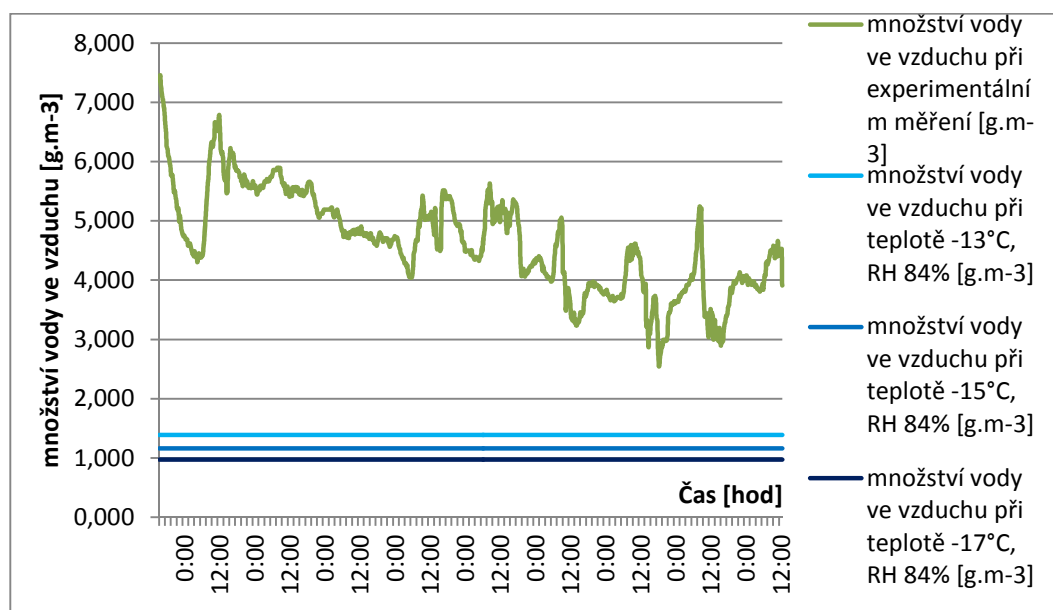
Pro vzájemné porovnání naměřených hodnot v případě difúzně uzavřených skladeb v 1NP a difúzně otevřených ve 2NP je třeba zohlednit, že dřevo je nehomogenní anizotropní materiál, proto odchylky v řádech desetin procent se dají považovat za zanedbatelné.

14.2 Teplotně vlhkostní děje za parotěsnicí vrstvou v případě difúzně otevřené a uzavřené skladby konstrukce

Pro komplexnější popis tepelně vlhkostního chování obvodových konstrukcí byla monitorována teplota a vlhkost za parotěsnicí vrstvou. Právě zvýšená vlhkost vyskytující se přímo ve skladbě konstrukce může mít negativní vliv na její funkčnost a trvanlivost.

Z několikaměsíčního měřicího cyklu byl vybrán 4 denní časový úsek, kde je zachyceno vnitřní prostředí zatížené zvýšenou relativní vlhkostí vzduchu i s relativní vlhkostí pohybující se okolo 50%, která se běžně vyskytuje v obytných místnostech. Jelikož dlouhodobý průměr teplot v zimním období pro Českou republiku činí $+0,1^{\circ}\text{C}$ [zdroj: Český hydrometeorologický ústav], záměrně nebyly voleny extrémně nízké teploty pod hranicí -12°C , jež se v našich klimatických podmínkách vyskytují pouze krátkodobě ojediněle. Teplota odpovídá průměrným hodnotám v zimním období vyskytujícím se v klimatickém podnebí ČR.

Jelikož pro popis transportu vodní páry konstrukcí není primární teplota vzduchu, ale především množství vodní páry ve vzduchu, byly exteriérové podmínky s průměrnými teplotami z tohoto pohledu výhodnější než extrémně nízké idealizované teploty. Oproti idealizovanému stavu (vztaženo k teplotě -15°C a relativní vlhkosti 84%) dosahují skutečné hodnoty množství vodní páry ve vzduchu v průměru 400% nárůstu, což je zobrazeno v grafu č. 20.



Graf 20) Množství vody ve vzduchu (g.m^{-3}) při různých teplotách a relativních vlhkostech vzduchu (značeno RH)

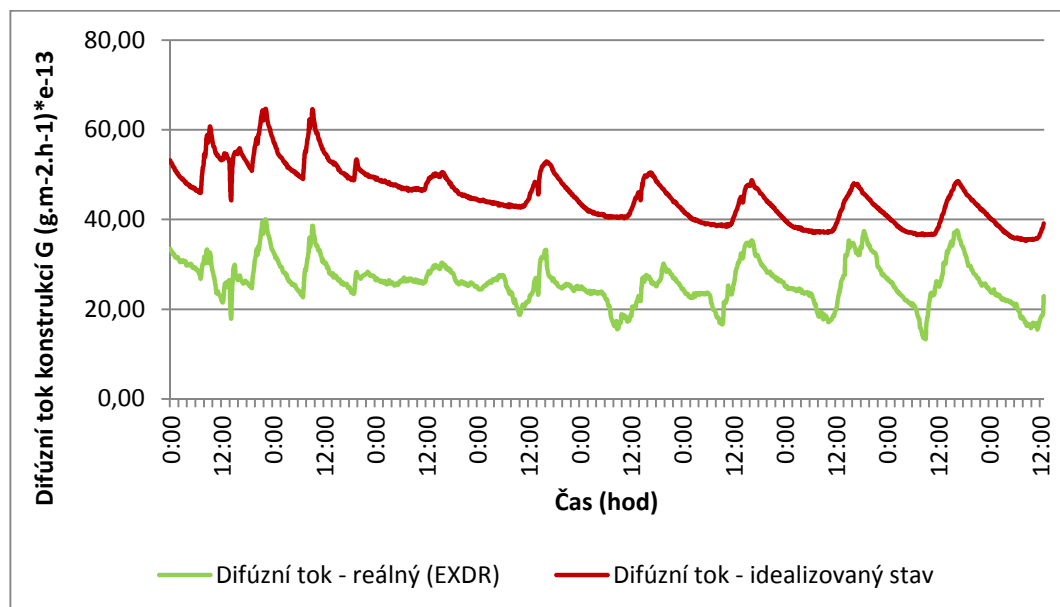
Množství vodní páry procházející konstrukcí je ovlivněno difuzí, tedy rozdílem tlaků vodních par mezi prostředími.

Pro jasnější představu jsou níže graficky znázorněny difúzní toky procházející konstrukcí obvodové stěny a to ve dvou případech:

- tzv. idealizovaný stav, tedy při teplotě vzduchu v exteriéru $\theta_e = -15^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu $\varphi_e = 84\%$, což jsou návrhové podmínky dle normy ČSN 73 0540 – 3: *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin* (listopad 2005).;
- reálný stav, tedy hodnoty teploty a relativní vlhkosti vzduchu naměřené v rámci zpracování disertační práce na Experimentální dřevostavbě EXDR1.

Interiérové okrajové podmínky (teplota a relativní vlhkost) v obou případech uvažovány totožné, tedy reálné hodnoty získané měřením na EXDR1.

Lze pozorovat, že naměřené hodnoty vyjádřené difúzním tokem konstrukcí dosahují průměrně 60% idealizovaného stavu, přičemž nejvíce se přibližují idealizovaným hodnotám v maximech průběhu (přes 80%). Řádově se tedy jedná o rozdíl v průměru $19 \cdot 10^{-13} \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.



Graf 21) *Difúzní toky konstrukcí obvodové stěny za idealizovaných podmínek v exteriéru (teplota vzduchu -15°C, relativní vlhkost vzduchu 84%) a v případě reálného měření prováděného na Experimentální dřevostavbě EXDR1*

Tepelně vlhkostní děje za parotěsnicí vrstvou za výše uvedených okrajových podmínek byly řešeny ve 3 skladbách obvodových stěn, přičemž parametry dílčích materiálů jsou uvedeny podrobně v tab. 19, 20 a 22.

Jedná se tedy o místnosti se skladbami obvodových stěn:

- Místnost 1E/1R – difúzně uzavřená skladba obvodové stěny, parotěsnicí vrstva tvořena foliovou parozábranou;
- Místnost 2E - difúzně otevřená skladba obvodové stěny, parotěsnicí vrstva tvořena OSB deskou s latexovým nátěrem;
- Místnost 2R - difúzně otevřená skladba obvodové stěny – parotěsnicí vrstva tvořena OSB deskou.

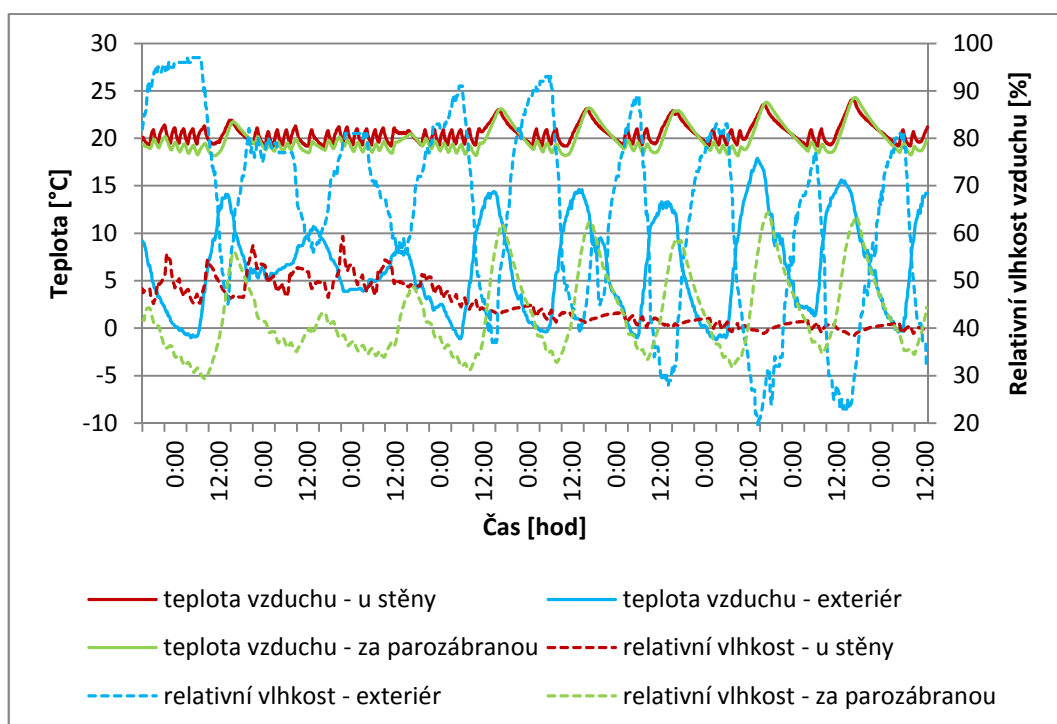
Pro popis tepelně vlhkostních dějů za parotěsnicí vrstvou bylo nezbytné monitorovat také teplotu a relativní vlhkosti vnějšího a vnitřního vzduchu. Chování těchto fyzikálních veličin je uvedeno vždy na prvním grafu, přičemž pro názornost a lepší přehlednost je průběh relativní vlhkosti vzduchu zobrazen samostatně na novém grafu a pouze jako 4 denní úsek.

Výsledky měření jsou prezentovány po dílčích místnostech, v závěru podkapitoly je uvedeno srovnání konstrukcí.

Místnost 1R/1E – difúzně uzavřená skladba obvodové konstrukce

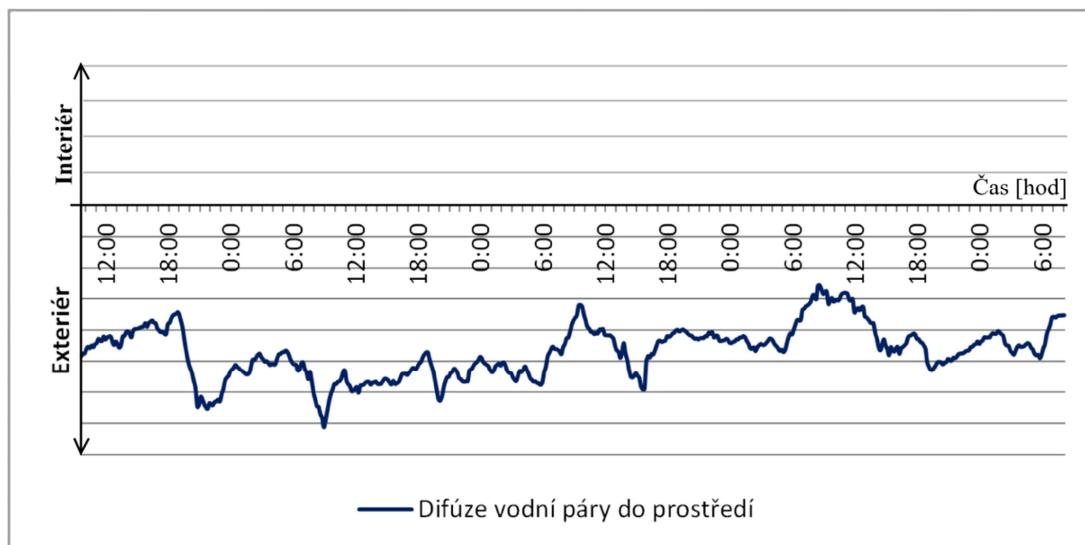
Konstrukce obvodové stěny je navržena jako difúzně uzavřená s parotěsnicí vrstvou tvořenou foliovou parozábranou, doplněna kontaktním zateplovacím systémem ETICS s tepelnou izolací z expandovaného polystyrenu.

Tato konstrukce byla vystavena povětrnostním vlivům na exteriérové straně, na interiérové straně teplota oscilovala kolem 20°C a relativní vlhkost vzduchu se pohybovala v rozmezí 40 - 60 %. Toto je podrobně zobrazeno na grafu č. 22.



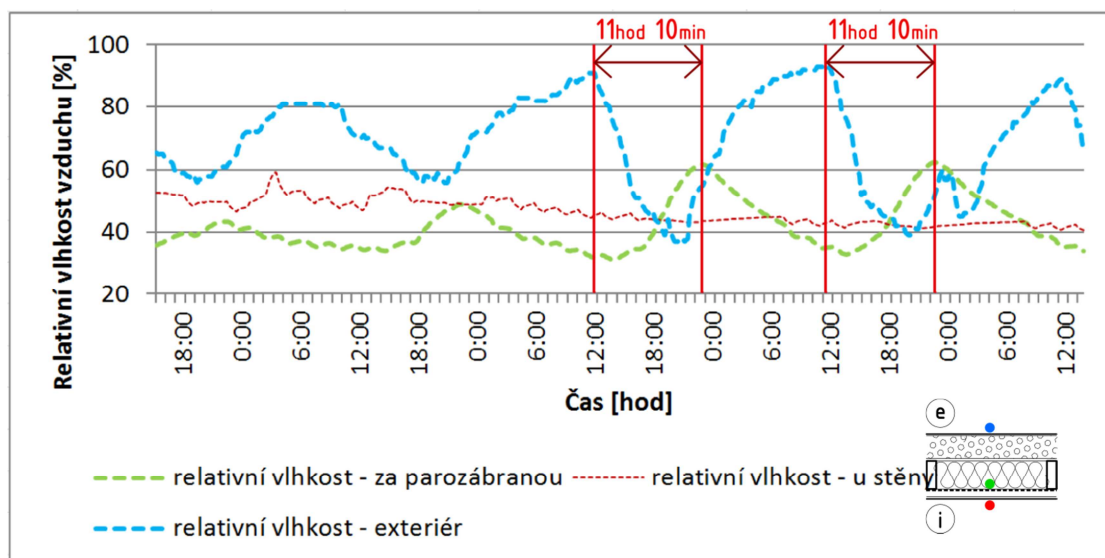
Graf 22) Průběh teplot a relativní vlhkosti vzduchu v 8mi denním časovém úseku u difúzně uzavřené skladby obvodové stěny - místnost 1E/1R, uvedeny hodnoty v místě exteriéru, interiéru i za parotěsnicí vrstvou, která je tvořena foliovou parozábranou

Směr difúze vodní páry uvedený na grafu č. 23 byl stanoven na základě parametrů vnějšího a vnitřního prostředí. Jelikož hodnoty parciálních tlaků vodní páry jsou vyšší na interiérové straně, transport vlhkosti probíhá směrem do exteriéru.



Graf 23) *Difúze vodní páry do prostředí, v monitorovaném časové úseku se jedná o difuzi vodní páry do exteriéru*

Graf č. 24 popisuje chování relativní vlhkosti vzduchu v interiéru u stěny, za parotěsnicí vrstvou a v exteriéru během 4 dnů. Z průběhů vlhkosti není patrný vliv vnitřního prostředí na změny za parotěsnicí vrstvou, naopak lze pozorovat, že tyto hodnoty reflektují průběh relativní vlhkosti v exteriéru. Časový rozdíl mezi maximálními hodnotami v exteriéru a za parotěsnicí vrstvou je přibližně 11 hodin, což je znázorněno také na grafu č. 24.

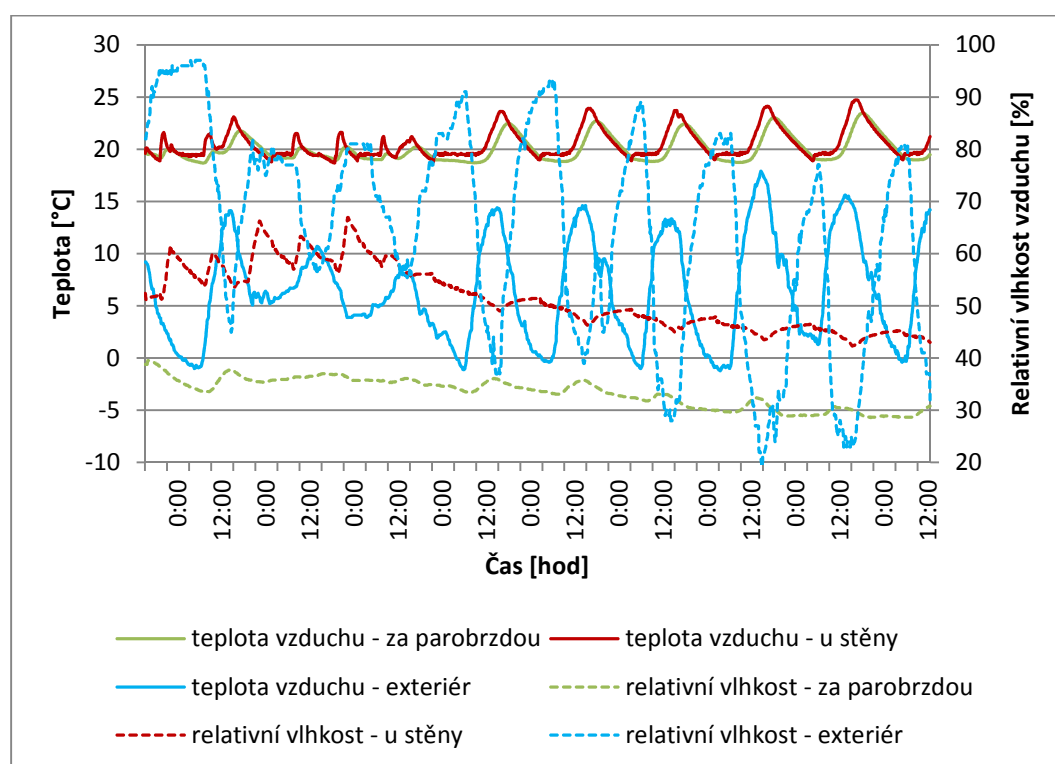


Graf 24) *Časový rozdíl mezi maximální hodnotou relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru a za parotěsnicí vrstvou; hodnoty pro difúzně uzavřenou skladbu obvodové stěny v místnosti 1E/1R (parotěsnicí vrstva tvořena foliovou parozábranou)*

Místnost 2E - difúzně otevřená skladba obvodové konstrukce

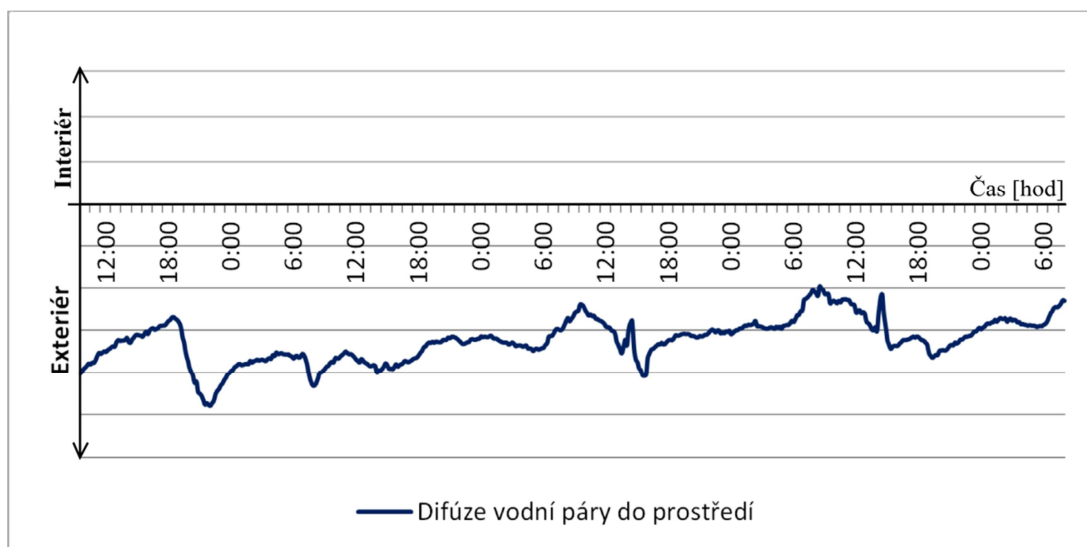
Obvodová stěna v místnosti 2E řešena jako difúzně otevřená s parotěsnicí vrstvou tvořenou OSB deskami s dvojitým latexovým nátěrem. Konstrukce je z vnější strany doplněna systémem provětrávané fasády opláštěné dřevěnými palubkami. Tepelná izolace fasády je z minerálně vláknitých desek.

Obvodová stěna byla opět vystavena vlivům vnějšího prostředí, v interiéru se teplota pohybovala okolo 21 °C a relativní vlhkost vzduchu se pohybovala v intervalu od 65 % do 40 %. Parametry vnější, vnitřního vzduchu a hodnoty za parotěsnicí vrstvou jsou souhrnně uvedeny v grafu č. 25, který zobrazuje 8 denní úsek.



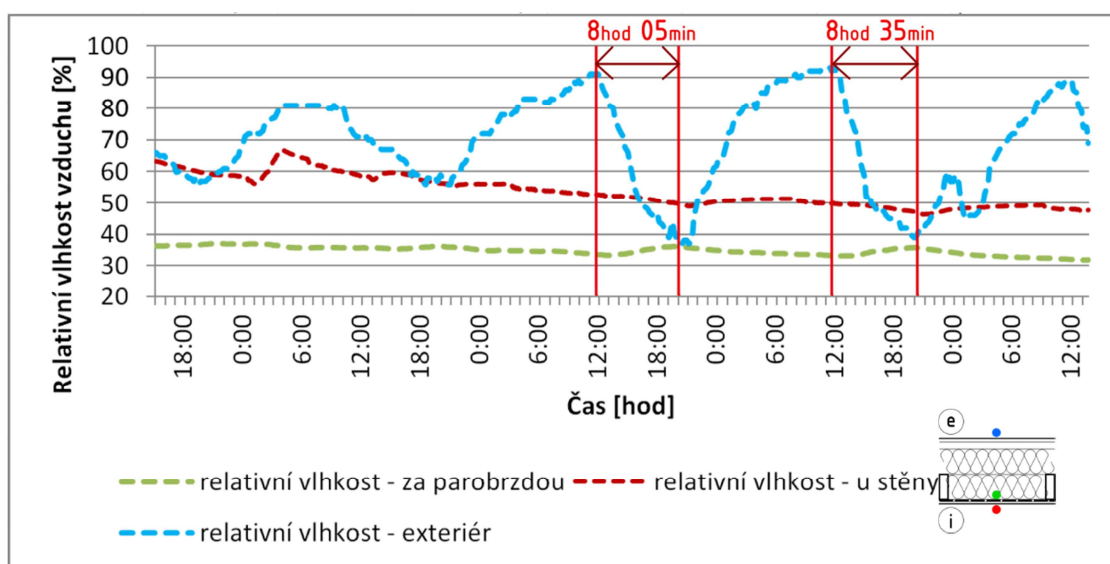
Graf 25) Průběh teplot a relativní vlhkosti vzduchu v 8mi denním časovém úseku u difúzně otevřené skladby obvodové stěny – místnost 2E, uvedeny hodnoty v místě exteriéru, interiéru i za parotěsnicí vrstvou, která je tvořena OSB deskami s dvojitým latexovým nátěrem

Transport vlhkosti probíhá směrem do exteriéru, jelikož hodnoty parciálních tlaků vodní páry jsou vyšší na interiérové straně konstrukce. Tento jev je uveden na grafu č. 26, přičemž směr difúze vodní páry byl stanoven opět na základě parametrů vnějšího a vnitřního prostředí.



Graf 26) *Difúze vodní páry do exteriéru stanovená na základě rozdílu částečných tlaků vodní páry vzduchu v interiéru a exteriéru*

Na grafu č. 27 je zobrazen 4 denní časový úsek popisující chování relativní vlhkosti vzduchu v interiéru, za parotěsnicí vrstvou a v exteriéru. Je zaměřen opět na určení časového rozdílu maximálních hodnot relativní vlhkosti za parotěsnicí vrstvou a v exteriéru. Na rozdíl od skladby s foliovou parozábranou a kontaktním zateplovacím systémem s EPS je v tomto případě tato hodnota nižší, pohybuje se okolo 8 hodin.

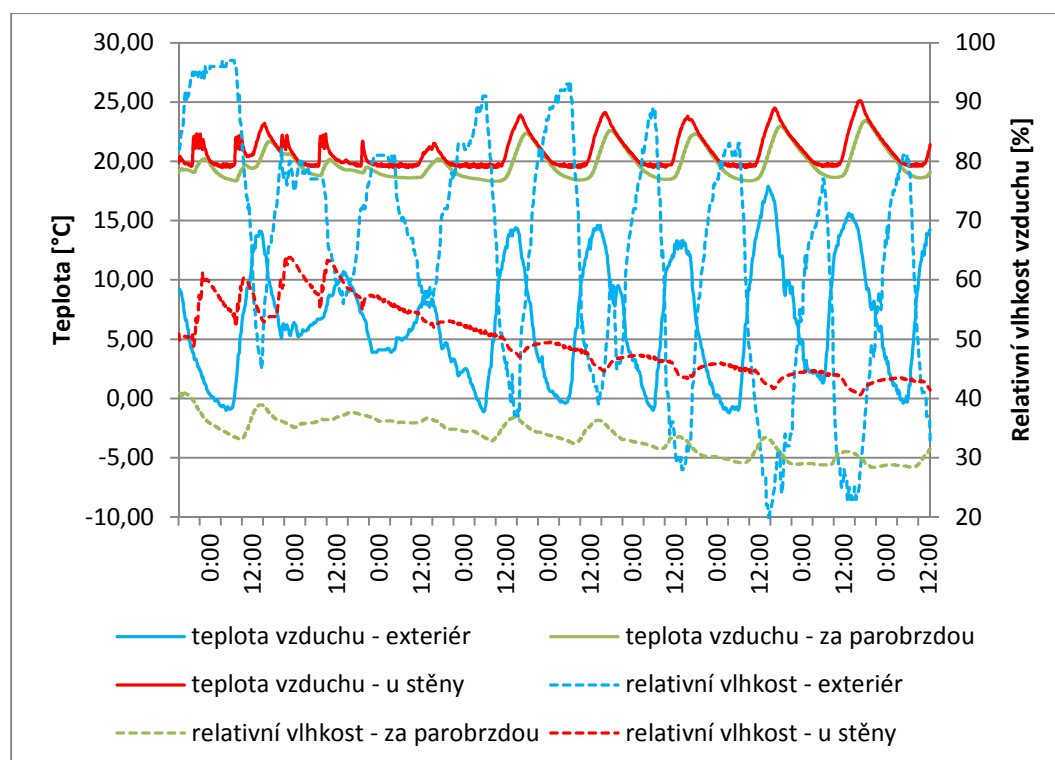


Graf 27) *Časový rozdíl mezi maximální hodnotou relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru a za parotěsnicí vrstvou, hodnoty pro difúzně otevřenou skladbu obvodové stěny v místnosti 2E (parotěsnicí vrstva tvořena OSB deskou s latexovým nátěrem)*

Místnost 2R - difúzně otevřená skladba obvodové konstrukce

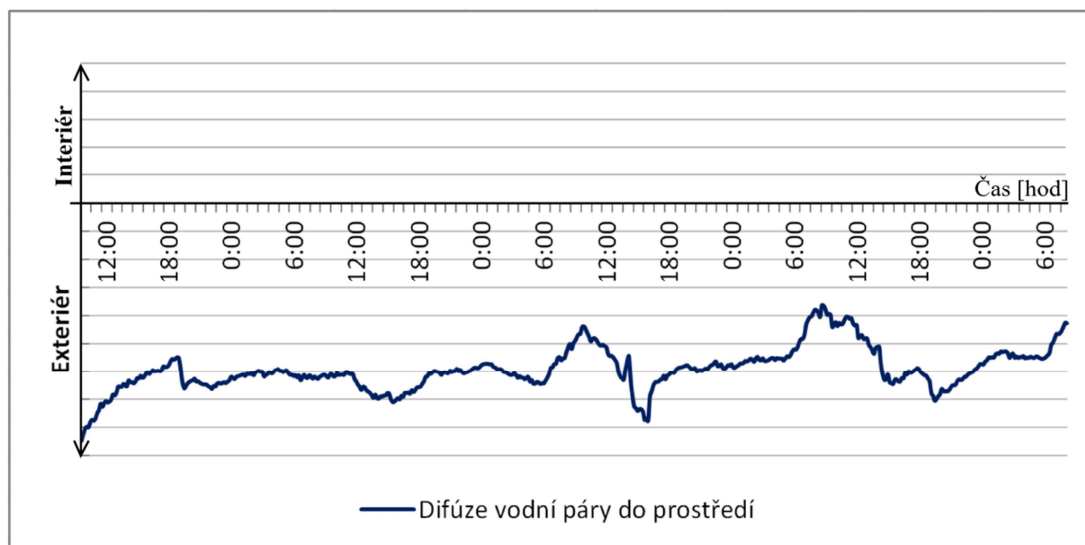
Konstrukce obvodové stěny místnosti 2R je řešena opět jako difúzně otevřená s provětrávanou fasádou opatřenou obkladem z dřevěných palubek. Rozdíl oproti předchozí skladbě místnosti 2E je ve volbě parotěsnicí vrstvy. Ta je v tomto případě tvořena OSB deskami bez latexového nátěru.

Parametry vnějšího a vnitřního vzduchu jsou uvedeny v grafu č. 28. Současně jsou zde uvedeny průběhy teploty a relativní vlhkost za parotěsnicí vrstvou, zobrazeno je opět 8 denní monitorovací období.



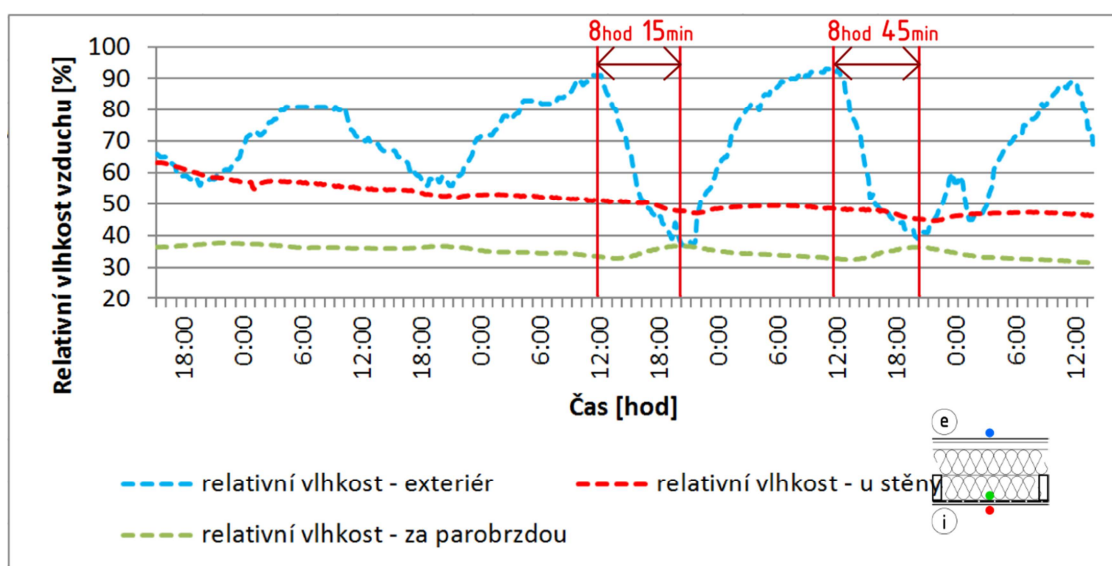
Graf 28) Průběh teplot a relativní vlhkosti vzduchu v 8mi denním časovém úseku u difúzně otevřené skladby obvodové stěny – místnost 2R, uvedeny hodnoty v místě exteriéru, interiéru i za parotěsnicí vrstvou, která je tvořena OSB deskami bez latexového nátěru

Na následujícím grafu č. 29 je, stejně jako u dvou předchozích skladeb konstrukcí obvodových stěn, znázorněna difúze vodní páry do prostředí exteriéru zjištěná na základě hodnot parciálních tlaků vodní páry ve vnitřním a vnějším prostředí.



Graf 29) Difúze vodní páry do exteriéru stanovená na základě rozdílu částečných tlaků vodní páry vzduchu v interiéru a exteriéru

Také u této konstrukce obvodové stěny byl zjišťován časový rozdíl mezi maximální hodnotou relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru a za parotěsnicí vrstvou. Z průběhů vlhkosti není opět patrný vliv vnitřního prostředí na změny za parotěsnicí vrstvou, naopak lze pozorovat, že tyto hodnoty reflektují průběh relativní vlhkosti v exteriéru. Vše je znázorněno na 4 denním časovém úseku, který je zobrazen v grafu č. 30.



Graf 30) Časový rozdíl mezi maximální hodnotou relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru a za parotěsnicí vrstvou, hodnoty pro difúzně otevřenou skladbu obvodové stěny v místnosti 2R (parotěsnicí vrstva tvořena OSB deskou bez latexového nátěru)

Shrnutí

Cílem monitoringu teploty a především relativní vlhkosti v konstrukci za parotěsnicí vrstvou bylo popsání tepelně vlhkostních dějů na základě interakce vnitřního a vnějšího prostředí.

Z výsledků nebyla patrna závislost mezi hodnotami relativní vlhkosti v interiéru a za parotěsnicí vrstvou, naopak hodnoty v konstrukci reflektovaly změny povětrnostních vlivů v exteriéru. Změny relativní vlhkosti za parotěsnicí vrstvou tedy nebyly zapříčiněny difuzí vodních par směrem do exteriéru, ale působením atmosférických změn, což současně prokazuje funkčnost parotěsnicí vrstvy v konstrukci.

Pro popis tohoto jevu, uváděného jako časový rozdíl mezi maximální hodnotou relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru a za parotěsnicí vrstvou, byl zaveden termín fázový posun vlhkostního kmitu. Jeho hodnota je závislá na skladbě konstrukce, přesněji na parametrech materiálů za parotěsnicí vrstvou. Základní dělení je možno v tomto konkrétním případě provést podle konstrukčního řešení zateplovacího systému. Řešena byla varianta kontaktního zateplovacího systému s tepelnou izolací z expandovaného polystyrenu a varianta provětrávané fasády s dřevěnými palubkami s tepelnou izolací z minerálně vláknitých desek. V případě expandovaného polystyrenu je průměrná hodnota fázového posunu vlhkostního kmitu 11 hodin, u minerálně vláknitých desek je tato hodnota nižší, přibližně 8 hodin. Tento rozdíl je způsoben odlišnou skladbou konstrukce zajišťující nepropustnost vůči povětrnostním vlivům.

Zásadní vliv mají ovšem na konstrukci veškeré nedokonalé utěsněné spáry. Ty se nejčastěji vyskytují například u připojovacích spár oken, řešení soklu objektu, u napojení na střešní konstrukci nebo námětků. Mezi nejzávažnější důsledky těchto netěsností patří zvýšená tepelná ztráta budovy, zvýšené riziko kondenzace uvnitř konstrukce způsobené intenzivním transportem vlhkosti nebo urychlení degradačních procesů v okolí netěsnosti a snížení životnosti celé konstrukce.

Je tedy třeba při návrhu konstrukcí i jejich realizaci dbát nejen na parotěsné a vzduchotěsné řešení konstrukcí ze strany interiéru, ale uvažovat i s těsností konstrukcí vůči povětrnostním vlivům ze strany exteriéru.

Souhrn naměřených hodnot je zobrazen v následující tabulce č. 26. Je zde uveden čas, kdy bylo dosaženo maximální hodnoty relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru a za parotěsnicí vrstvou, společně s fázovým posunem vlhkostního kmitu.

Tab. 26) Fázový posun vlhkostního kmitu v místnostech 1NP a 2NP

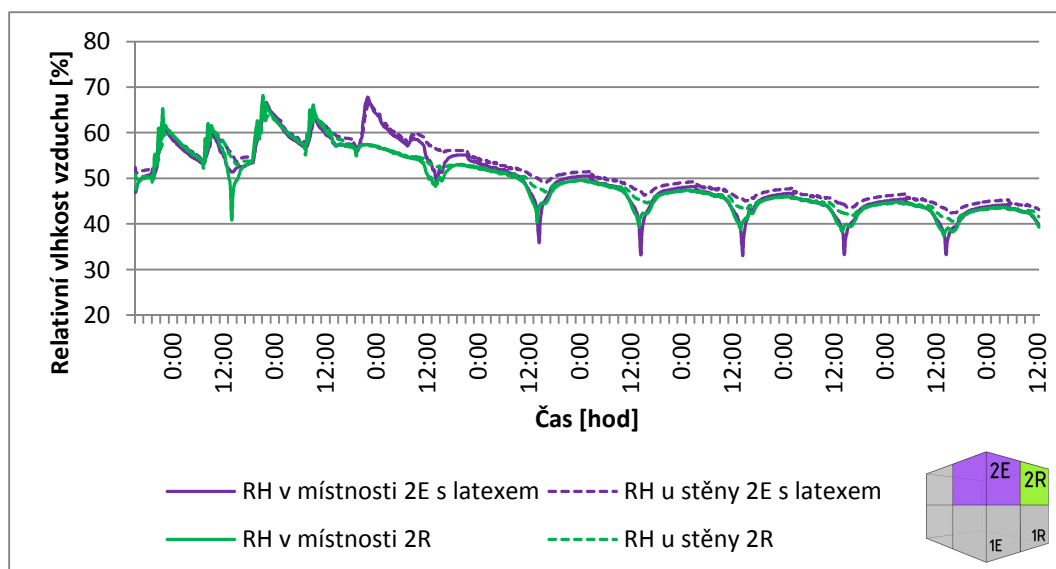
MÍSTNOST 1E/1R	čas dosažení maximální hodnoty relativní vlhkosti vzduchu (hod)		fázový posun vlhkostního kmitu (hod)
	exteriér	za parotěsnicí vrstvou	
	6:00	16:15	10:15
	1:30	16:30	15:00
	0:15	16:30	16:15
	6:00	17:10	11:10
	5:40	16:50	11:10
	6:00	16:15	10:15
	6:00	17:20	11:20
	6:05	17:25	11:20
MÍSTNOST 2E	čas dosažení maximální hodnoty relativní vlhkosti vzduchu (hod)		fázový posun vlhkostního kmitu (hod)
	exteriér	za parotěsnicí vrstvou	
	6:00	14:20	8:20
	1:30	15:45	14:15
	0:15	13:55	13:40
	6:00	14:05	8:05
	5:40	14:15	8:35
	6:00	12:45	6:45
	6:00	13:30	7:30
	6:05	13:05	7:00
MÍSTNOST 2R	čas dosažení maximální hodnoty relativní vlhkosti vzduchu (hod)		fázový posun vlhkostního kmitu (hod)
	exteriér	za parotěsnicí vrstvou	
	6:00	14:30	8:30
	1:30	16:05	14:35
	0:15	14:05	13:50
	6:00	14:15	8:15
	5:40	14:25	8:45
	6:00	13:15	7:15
	6:00	13:45	7:45
	6:05	13:15	7:10

14.3 Vliv latexového nátěru na vlastnosti parotěsnicí vrstvy tvořené OSB deskou a parametry vnitřního vzduchu

Pro posouzení vlivu latexového nátěru na vlastnosti OSB desky a změny parametrů vnitřního vzduchu byla provedena komparace obvodových konstrukcí s parotěsnicí vrstvou tvořenou pouze OSB deskou a s OSB deskou doplněnou dvouvrstevným latexovým nátěrem. Cílem bylo sledovat a popsat vliv latexového nátěru na změny parametrů vnitřního vzduchu. Výsledky prezentovány na hodnotách relativní vlhkosti vzduchu v prostoru místnosti a u stěny.

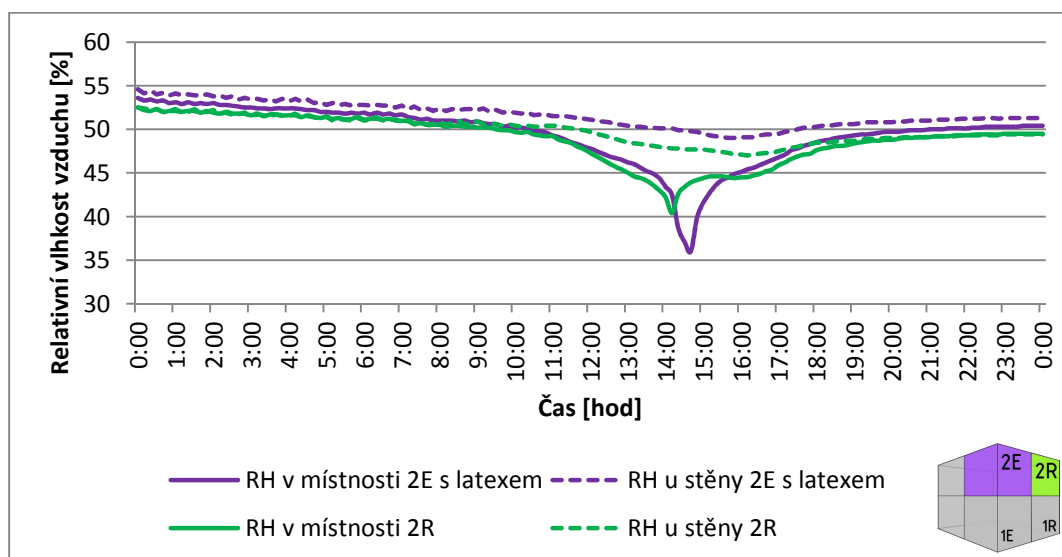
Vliv nátěru byl patrný již při počátečním spuštění zvlhčovačů v místnostech, kdy v místnosti s OSB deskami s latexovým nátěrem bylo dříve dosaženo požadovaných hodnot relativní vlhkosti vzduchu. Po 72 hodinách bylo dosaženo ustáleného chování a hodnot relativní vlhkosti s odchylkou nepřesahující určenou mez.

Na základě průběhů relativní vlhkosti v místnostech 2E (OSB desky opatřeny dvojitým latexovým nátěrem) a místnosti 2R (OSB desky bez latexového nátěru) je možno v grafu č. 32 pozorovat, že dlouhodobě vyšší relativní vlhkost vzduchu u stěny je v místnosti s latexovým nátěrem. Dále je z dlouhodobého měření patrný menší výkyv mezi relativní vlhkostí v místnosti a u stěny v místnosti s OSB deskou bez nátěru.



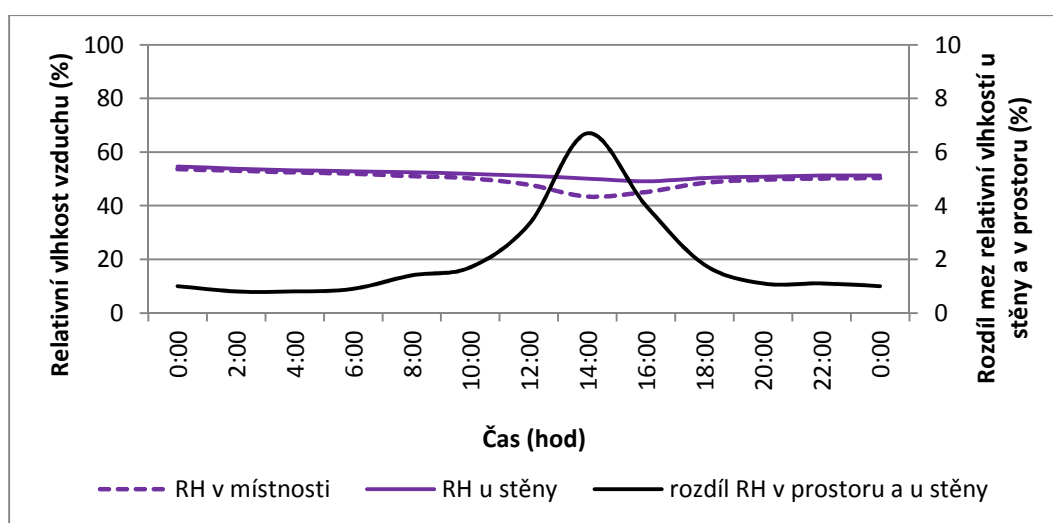
Graf 31) Průběh relativní vlhkosti vzduchu (ozn. RH) v místnostech 2E a 2R, čidla umístěná v prostoru a u obvodové stěny

Pro názornost je uveden průběh typických 24 hodin.



Graf 32) Průběh relativní vlhkosti vzduchu (ozn. RH) v místnostech 2E a 2R, čidla umístěná v prostoru a u obvodové stěny ve vybraném 24hodinovém úseku

Dlouhodobým monitoringem byla ověřena požadovaná hodnota relativní vlhkosti vzduchu v interiéru. Průměrná hodnota z týdenního měření je 49,8 % v případě skladby s latexovým nátěrem a 49,2 % v místnosti bez nátěru. Vzhledem k přesnosti měření monitorovacích zařízení $\pm 3 \%$ lze odchylku 0,6 % zanedbat. Hodnoty naměřené u přímo u stěny jsou v obou případech vyšší, než v samotném prostoru, ale ani tyto rozdíly nejsou výrazné. V průměru je relativní vlhkost u stěny vždy vyšší, v případě konstrukce s nátěrem o 1,7 %, v konstrukci bez nátěru je rozdíl pouze 0,6 %.



Graf 33) Průběh relativní vlhkosti vzduchu v místnosti a u stěny, hodnoty pro místnost 2E a jejich rozdíl

Maximálních rozdílů bylo dosaženo vždy při poklesu relativní vlhkosti v interiéru, což se projevilo více vždy v místnosti než u stěny. Rozdíly dosahovaly až 10 %. Toto je uvedeno příkladu v grafu č. 34, který popisuje průběh relativní vlhkosti v místnosti 2E a na obvodové stěně po dobu 24 hodin. Zobrazen se zde také rozdíl těchto hodnot dosahující max 7 %.

Tab. 27) Průběh relativní vlhkosti vzduchu (značeno RH) v místnosti 2R a 2E, monitorovány hodnoty u stěny a v místnosti, zobrazen 24 hodinový úsek

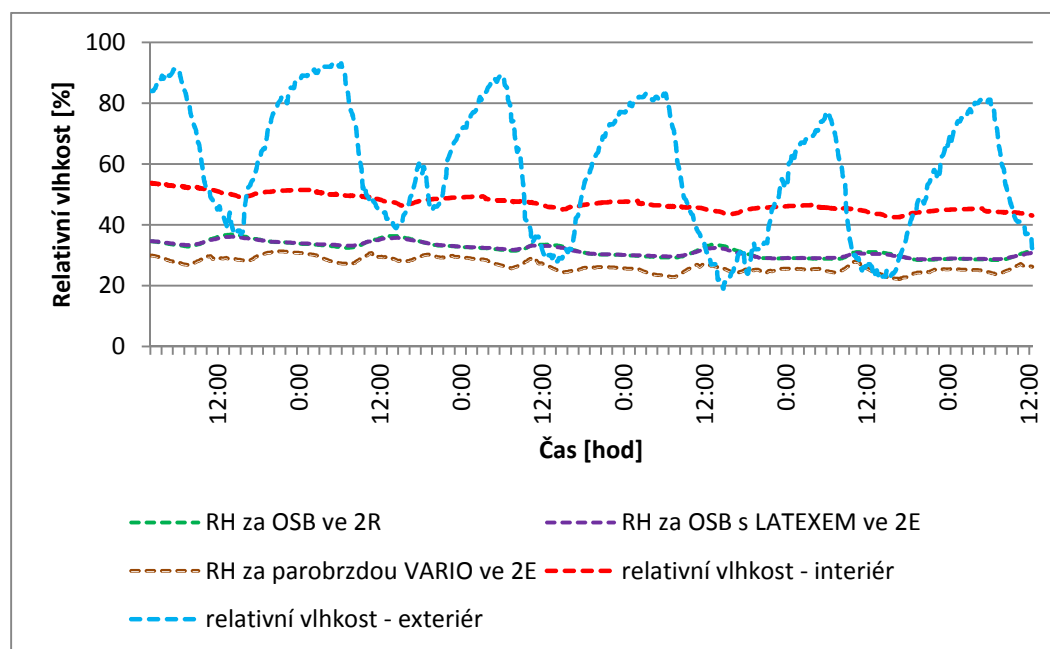
ČAS (hod)	MÍSTNOST 2E (OSB opatřeno latexovým nátěrem)			MÍSTNOST 2R (OSB bez latexového nátěru)		
	RH v místnosti	RH u stěny	rozdíl RH v prostoru a u stěny	RH v místnosti	RH u stěny	rozdíl RH v prostoru a u stěny
0:00	53,6	54,6	1	52,5	52,5	0
2:00	53	53,8	0,8	51,9	52,2	0,3
4:00	52,4	53,2	0,8	51,6	51,5	-0,1
6:00	51,9	52,8	0,9	51,1	51	-0,1
8:00	51	52,4	1,4	50,5	50,9	0,4
10:00	50,2	51,9	1,7	49,7	50,4	0,7
12:00	47,8	51,1	3,3	47,3	49,7	2,4
14:00	43,4	50,1	6,7	42,2	47,9	5,7
16:00	45,1	49,1	4	44,5	47,1	2,6
18:00	48,5	50,3	1,8	47,6	48,5	0,9
20:00	49,7	50,8	1,1	48,8	49	0,2
22:00	50,1	51,2	1,1	49,3	49,3	0
0:00	50,3	51,3	1	49,5	49,4	-0,1

Vzhledem k velmi nízkým odchylkám hodnot relativní vlhkosti neměl latexový nátěr na parametry vnitřního vzduchu zásadní vliv.

14.4 Difúzně otevřená skladba obvodové stěny z pohledu materiálového řešení parotěsnicí vrstvy

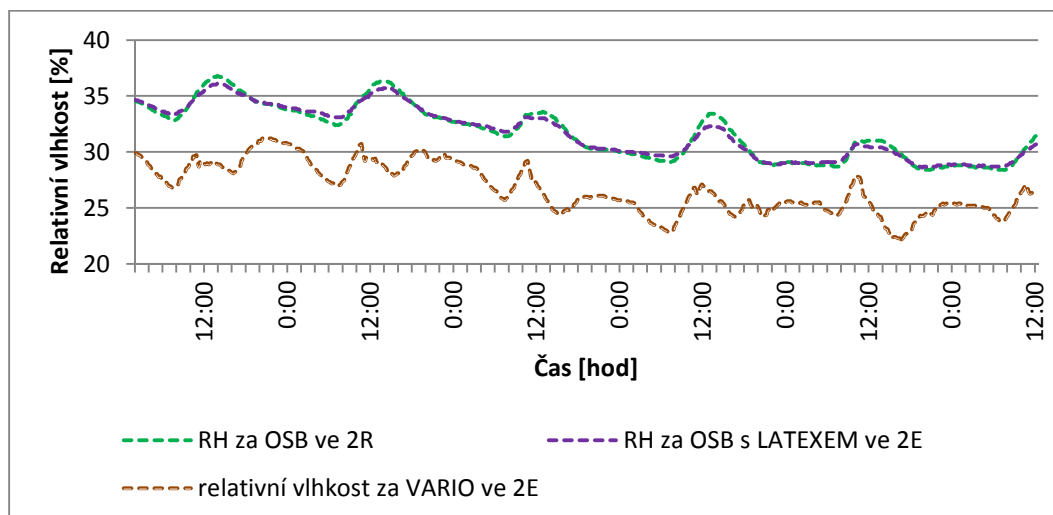
Ve druhém nadzemním podlaží, kde byly obvodové stěny realizovány jako difúzně otevřené, byla použita parotěsnicí vrstva ve formě OSB desek, OSB desek s latexovým nátěrem a také foliová parobrzdá na bázi polyamidu s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou Isover VARIO. Její hodnota se pohybuje v rozmezí 0,3 až 5,0 m, přičemž pro OSB desky použité při experimentálním měření je hodnota $s_d = 3,6$ m). Jedná o problematiku materiálového řešení parotěsnicí vrstvy, předmětem měření tedy byla hodnota relativní vlhkosti právě za touto vrstvou.

Jelikož monitorovaný časový úsek je totožný jako v případě kapitoly 14.2, parametry vnějšího a vnitřního vzduchu jsou podrobně uvedeny v grafu č. 25.



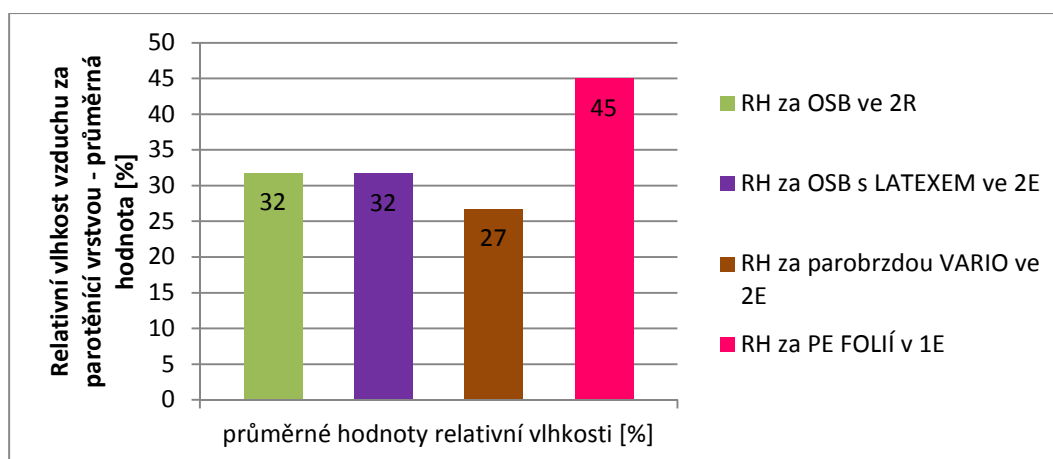
Graf 34) Průběh relativní vlhkosti vzduchu (značeno RH) za parotěsnicí vrstvou v případě jejího řešení jako OSB deska, OSB deska s latexovým nátěrem a parobrzdá Isover Vario včetně hodnot relativní vlhkosti ve vnějším a vnitřním prostředí

Naměřené hodnoty relativní vlhkosti vzduchu za různě řešenými parotěsníci vrstvami jsou uvedeny v grafu č. 34. Zde je zobrazen také průběh tohoto parametru ve vnějším a vnitřním prostředí. Podrobnější průběh měřené vlhkosti za OSB deskou, OSB deskou s latexovým nátěrem a folií s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou je uveden dále v grafu č. 35.



Graf 35) Průběh relativní vlhkosti (ozn. RH) za parotěsnicí vrstvou tvořenou OSB deskou, OSB deskou s dvojitým latexovým nátěrem a folií s proměnnou ekvivalentní tloušťkou ve vybraném 5ti denním monitorovacím období

Při porovnání průměrné relativní vlhkosti vzduchu za materiálově rozdílnou parotěsnicí vrstvou stanovené na základě 7 denního měřicího cyklu jsou patrné dlouhodobě nižší hodnoty relativní vlhkosti za folií s proměnnou ekvivalentní tloušťkou. Naopak nejvyšší relativní vlhkost se nachází v difúzně uzavřené konstrukci s tradiční foliovou parozábranou, která byla do srovnání pro úplnost zařazena také. Průměrné hodnoty za OSB deskou bez latexového nátěru a za OSB deskou opatřenou nátěrem se liší pouze o 0,03 %.



Graf 36) Průměrné hodnoty relativní vlhkosti vzduchu (RH) během týdenního měřicího cyklu v zimním období za různými materiálovými variantami parotěsnicí vrstvy - OSB deska, OSB deska opatřená dvojitým latexovým nátěrem, parobrzda s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou a PE folie

Jelikož foliová parobrzda Isover Vario pracuje s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou, která se mění na základě tlakových změn vnitřního a vnějšího prostředí, je velm obtížné přesně popsat vlhkostní děje právě za touto vrstvou. Oproti tradiční OSB desce, užívané v difúzně otevřených skladbách, průběh vlhkosti reflektuje parametry vnějšího vzduchu s drobnými výkyvy vlivem změn parametrů foliové parobrzdy. Toto je patrné především z grafu č. 35.

Dlouhodobě vyšší hodnota relativní vlhkosti za parozábranou v difúzně uzavřené skladbě, oproti výsledným hodnotám ve skladbě difúzně otevřené, je způsobena odlišnými parametry z pohledu šíření vlhkosti materiálů za monitorovaným místem směrem do exteriéru. Za parozábranou je realizována tepelná izolace mezi dřevěnými sloupky z minerálně vláknitých desek a opatřena z vnější strany kontaktním zateplovacím systémem s tepelnou izolací z desek EPS. Oproti difúzně otevřené skladbě, kde jsou použity pouze vláknité izolace, je expandovaný polystyren difúzně méně propustný a dochází tedy ke shromažďování a nárůstu vlhkosti ve skladbě. Ta je do ní dotována vlivem atmosférických změn, jak bylo uvedeno výše. V případě DO skladby dochází ke snižování vlhkosti rychleji, jelikož je celá skladba směrem do exteriéru difúzně propustná.

15. Simulační metoda

Pro simulační metodu byl zvolen software WUFI Pro umožňující dynamicky simulovat šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích. V rámci disertační práce byly takto řešeny dvě skladby obvodové stěny dřevostavby, a to:

- difúzně uzavřená skladba s foliovou parozábranou (skladba S1 dle tab. 18),
- difúzně otevřená skladba s parotěsnicí vrstvou tvořenou OSB deskou (skladba S5 dle tab. 22).

Při aplikaci okrajových podmínek reálně naměřených na Experimentální dřevostavbě byly řešeny především průběhy vlhkosti obvodovými konstrukcemi, což umožnilo také následnou komparaci simulace a experimentálního měření (podrobněji uvedeno v následující kapitole).

Dále byla provedena Analýza rizika růstu plísní Mold Growth Risk Analysis, na jejímž základě byla konstrukce zatříděna do jedné ze sedmi skupin vyjádřené indexem rizika růstu plísní M :

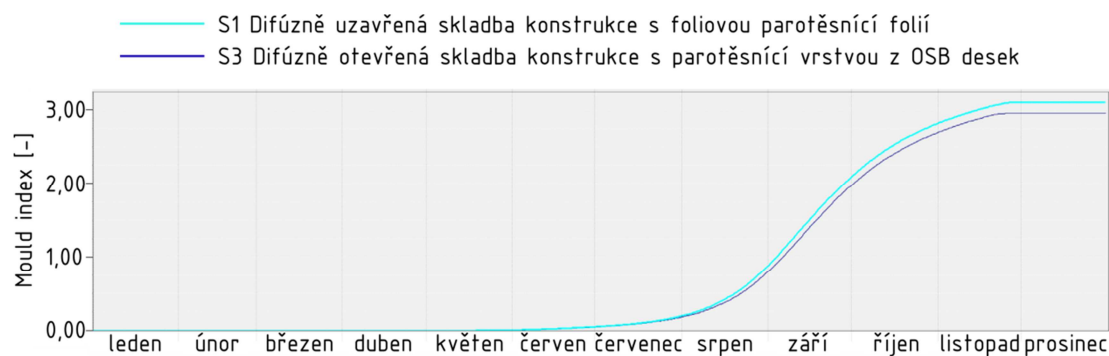
- 0 bez rizika,
- 1 mikroskopické množství plísní na povrchu,
- 2 <10% mikroskopické pokrytí plísní na povrchu,
- 3 10 – 30% pokrytí plísní na povrchu (vizuální),
- 4 30 – 70% pokrytí plísní na povrchu (vizuální),
- 5 >70% pokrytí plísní na povrchu (vizuální),
- 6 těžké zatížení konstrukce.

Pro okrajové podmínky byly použity hodnoty z referenčního klimatického roku ČR pro možnost hodnocení ročního časového úseku.

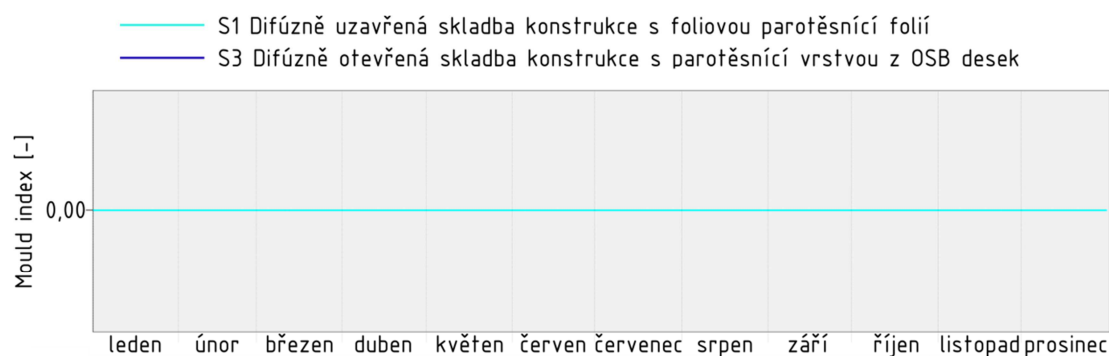
Na základě výsledků simulace lze zatřídit obvodové konstrukce S1 a S3 do kategorie 0 – bez rizika, jelikož hodnota indexu M dosáhla maxima $M = 0,0050$ (-). Při změně parametrů vnitřního povrchu z materiálu náchylného, kam lze zařadit materiály s povrchovou vrstvou z papíru, na nejnáchylnější, například neošetřené dřevo, překročí index M hodnotu 3 (-), tedy lze předpokládat 10 – 30% pokrytí povrchu plísní. V případě zatřídění povrchu konstrukce do skupiny nejodolnějších, za které lze považovat materiály na bázi skla nebo kovu, je výsledkem nulové riziko růstu plísní. Avšak tyto materiály se běžně nevyskytují jako řešení povrchových úprav interiérů dřevostaveb.



Obr. 52) Index rizika růstu plísní M stanovený pro konstrukce S1 a S3, vnitřní povrch definován jako materiál náchylný, software WUFI Bio, referenční klimatický rok ČR, zatříděno do skupiny $M = 0$ (bez rizika)



Obr. 53) Index rizika růstu plísní M stanovený pro konstrukce S1 a S3, vnitřní povrch definován jako materiál velmi náchylný, software WUFI Bio, referenční klimatický rok ČR, zatříděno do skupiny $M = 3$ (10 – 30% pokrytí plísní na povrchu)



Obr. 54) Index rizika růstu plísní M stanovený pro konstrukce S1 a S5, vnitřní povrch definován jako materiál odolný, software WUFI Bio, referenční klimatický rok ČR, zatříděno do skupiny $M = 0$, průběh mould indexu totožný pro obě hodnocené konstrukce ($S1 = S3$)

16. Komparace experimentálního měření a simulací

Pro ověření naměřených hodnot bylo provedeno srovnání experimentálního měření realizovaného na Experimentální dřevostavbě EXDR1 a simulací vytvořených v programu WUFI Pro. Pro porovnání byla zvolena difúzně uzavřená skladba s foliovou parozábranou (skladba S1 dle tab. 18) a difúzně otevřená skladba s parotěsnicí vrstvou tvořenou OSB deskou (skladba S5 dle tab. 22).

Průběhy teplot za parotěsnicí vrstvou (PE folií i OSB deskou) naměřené na reálném objektu jsou při zadání totožných parametrů vnitřního a vnějšího vzduchu téměř shodné s výsledky softwarové simulace. Rozdíl mezi měřením a simulací je v průměru 0,46 °C pro teplotu za parozábranou a 0,60 °C za OSB deskou.

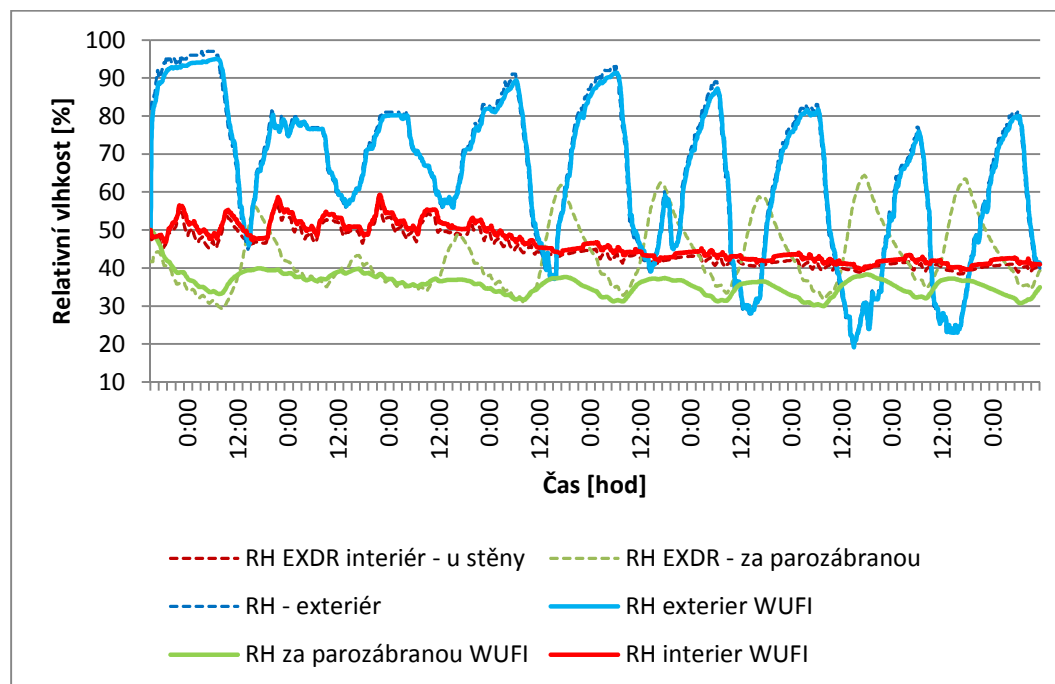
U skladeb S1 i S5 lze naopak pozorovat nesoulad v průběhu relativní vlhkosti za parotěsnicí vrstvou, ačkoli byly opět zvoleny totožné okrajové podmínky (parametry vnějšího a vnitřního prostředí – teplota a relativní vlhkost vzduchu, parametry materiálů konstrukcí). Průměrný rozdíl relativních vlhkostí zjištěných měřením a simulační metodou je v případě PE folie 7,81 % a 5,80 v případě OSB desky, avšak maxima rozdílu dosahují až k 27 % pro folie a 13 % pro OSB desky. Toto je podrobně uvedeno v tabulce č. 28.

Při simulacích je v rámci okrajových podmínek zohledněna teplota a relativní vlhkost vzduchu v interiéru a exteriéru, radiace, srážkové úhrny a tlak vzduchu, avšak není uvažováno s vlivem různých netěsností.

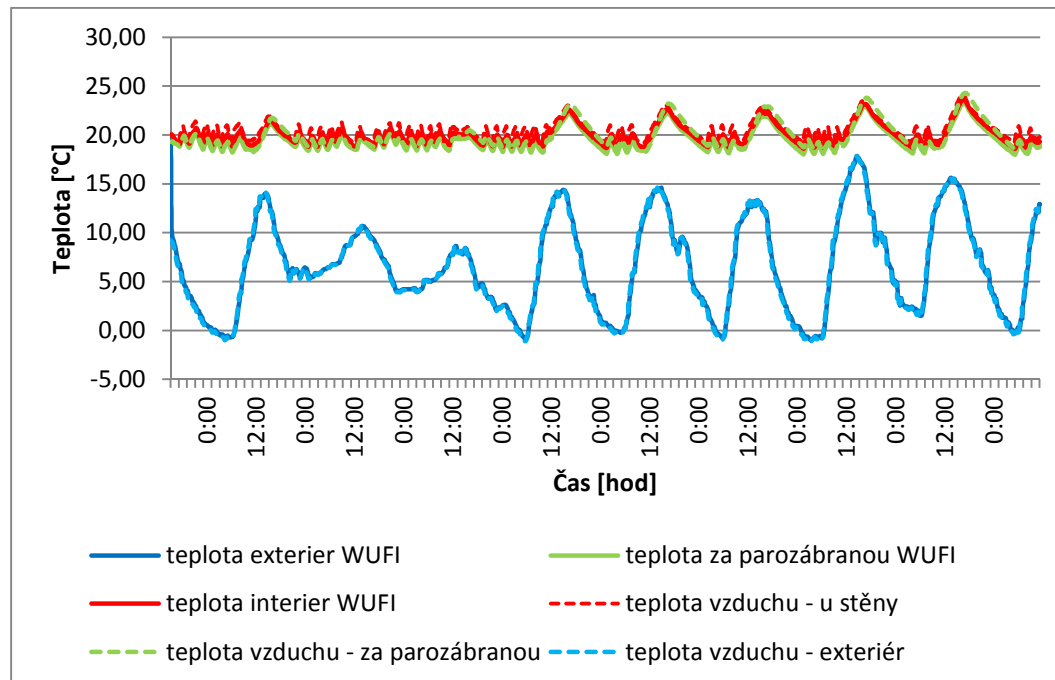
Tab. 28) Porovnání hodnot teploty a relativní vlhkosti získaných měření (Experimentální dřevostavba) a simulacemi (WUFI Pro)

	Rozdíl teplot mezi měřením a simulací (°C)			Rozdíl relativních vlhkostí mezi měřením a simulací (%)		
	průměr	max	min	průměr	max	min
PE folie	0,46	1,48	0,00	7,81	26,82	0,00
OSB deska	0,60	1,64	0,00	5,80	13,16	0,00

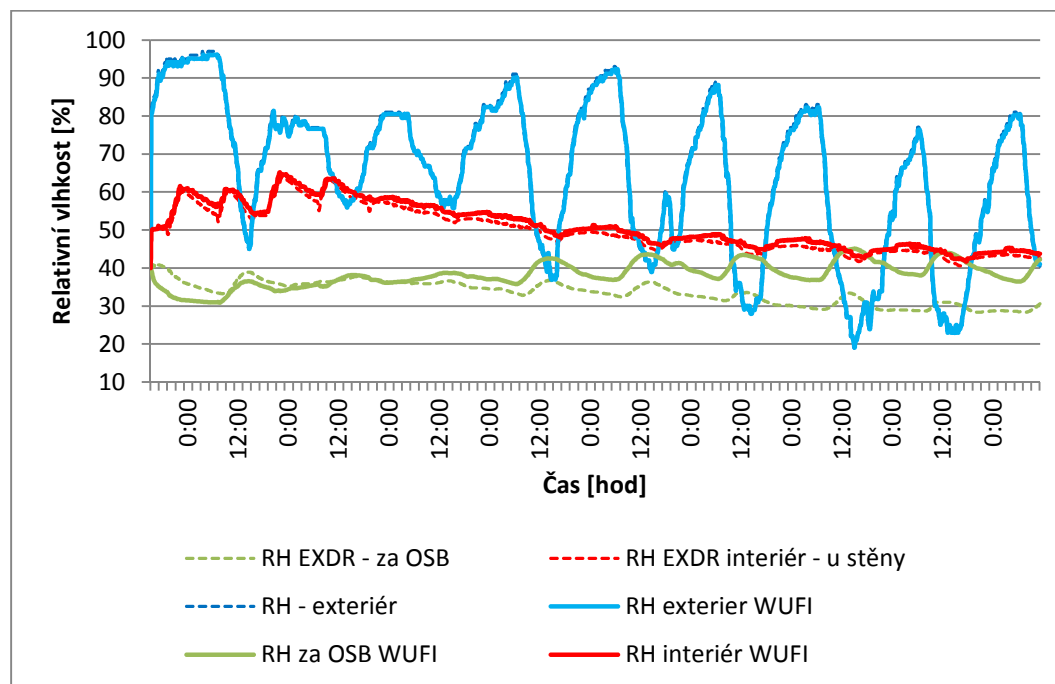
Komparace průběhů teplot a relativních vlhkostí vzduchu v případě experimentálního měření a simulací jsou uvedeny v následujících grafech. Zobrazeny jsou hodnoty pro místnost 1R (difúzně uzavřená skladba konstrukce) a 2R (difúzně otevřená skladba konstrukce).



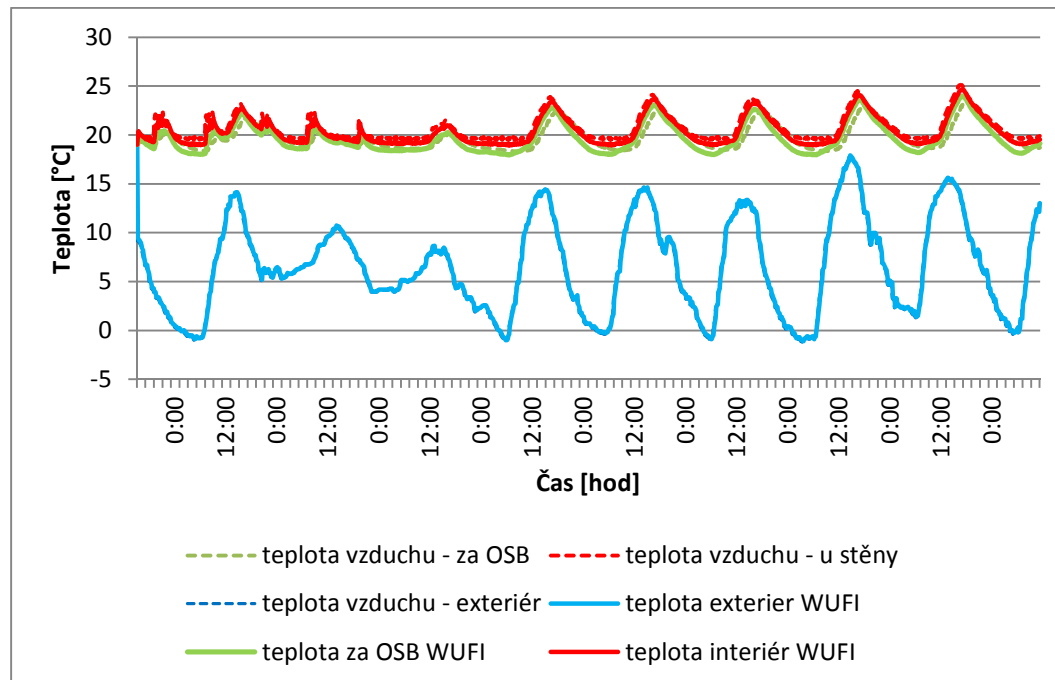
Graf 37) Porovnání průběhu relativní vlhkosti vzduchu v interiéru, exteriéru a za parotěsnicí vrstvou (ozn. RH) v případě experimentálního měření a simulace v programu WUFI, místnost 1R s difúzně uzavřenou skladbou obvodové stěny



Graf 38) Porovnání průběhu teploty vzduchu v interiéru, exteriéru a za parotěsnicí vrstvou v případě experimentálního měření a simulace v programu WUFI, místnost 1R s difúzně uzavřenou skladbou obvodové stěny



Graf 39) Porovnání průběhu relativní vlhkosti vzduchu v interiéru, exteriéru a za parotěsnicí vrstvou (ozn. RH) v případě experimentálního měření a simulace v programu WUFI, místnost 2R s difúzně otevřenou skladbou obvodové stěny



Graf 40) Porovnání průběhu teploty vzduchu v interiéru, exteriéru a za parotěsnicí vrstvou v případě experimentálního měření a simulace v programu WUFI, místnost 2R s difúzně otevřenou skladbou obvodové stěny

F. ZÁVĚRY PRO TECHNICKOU PRAXI

- Ověření použitelnosti dřevěných prvků a prvků z materiálů na bázi dřeva ve skladbách obvodových stěn dřevostavby z pohledu jejich vlhkostního chování
- Komparace difúzně otevřené a difúzně uzavřené skladby obvodové stěny dřevostavby
- Vlastnosti parotěsnicí vrstvy (difúzního retardéru) v případě difúzně otevřené skladby (OSB desky)
- Optimalizace skladby obvodové stěny dřevostavby
- Řešení konstrukčních detailů z pohledu šíření vlhkosti obálkou a její vzduchotěsnosti

17. Závěry pro technickou praxi

Na základě výsledů disertační práce byly stanoveny následující závěry pro technickou praxi.

17.1 Ověření použitelnosti dřevěných prvků a prvků z materiálů na bázi dřeva ve skladbách obvodových stěn dřevostavby z pohledu jejich vlhkostního chování

V rámci experimentálního monitoringu vlhkosti dřevěných prvků a materiálů na bázi dřeva bylo zjištěno, že hodnoty vlhkosti nepřekročily mez 10 %. Pro použití dřevěných prvků je nepřípustné, aby se jejich vlhkosti zvýšila nad hodnotu 20 %, což bylo ověřeno právě dlouhodobým měřením. Pro dřevěné prvky zabudované do konstrukcí je bezpečná mezní hodnota vlhkosti stanovena na 15 – 20 %, a to především z důvodu ochrany před napadením dřevokaznými škůdci. Průměrná naměřená vlhkost 9 % tedy zaručuje přirozenou ochranu dřeva, která ovšem musí být vždy doplněna splněním základních konstrukčních zásad při návrhu i provádění. Mezi tyto zásady patří například to, že dřevěný materiál by měl být založen nejméně 300 mm nad zemí (doporučeno 500 mm), dále je vhodné navrhovat přesahy střech, nebo volit vhodný typ dřeviny pro dílčí části konstrukcí.

17.2 Komparace difúzně otevřené a difúzně uzavřené skladby obvodové stěny dřevostavby

Na základě výsledků experimentálního měření provedeného na objektu experimentální dřevostavby EXDR1 nelze jednoznačně stanovit, zda je z dlouhodobého hlediska vhodnější difúzně uzavřená nebo difúzně otevřená skladba obálky budovy. Za předpokladu kvalitního technologického provedení konstrukcí, především dílčích detailů a s důrazem na volbu každého prvku skladby konstrukce splňují oba typy konstrukčního řešení požadavky na šíření vlhkosti konstrukcí i požadavky z pohledu kondenzace vodní páry v konstrukci. Dále nebyla v obou typech konstrukcí prokázána zvýšená vlhkost dřevěných prvků, ani prvků z materiálů na bázi dřeva.

17.3 Vlastnosti parotěsnicí vrstvy (difúzního retardéru) v případě difúzně otevřené skladby (OSB desky)

V případě difúzně otevřené skladby se jako difúzní retardér – parobrzdá - nejčastěji používá OSB deska. Ovšem díky technickému pokroku je v současné době možno využít materiály na odlišné bázi, mezi které se řadí především foliové izolace s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou.

Pro porovnání byli tedy zvoleni 3 zástupci parobrzd, a to OSB deska, OSB deska doplněná latexovým nátěrem a foliová parobrzdá s proměnnou ekvivalentní difúzní tloušťkou. Jelikož parotěsnicí vrstva slouží ve skladbě k redukci množství vodní páry proudící do konstrukce a jejíž nežádoucí množství by tuto konstrukci mohlo negativně ovlivňovat, byla monitorována hodnota relativní vlhkosti právě v místě za parotěsnicí vrstvou ve skladbě obvodové stěny.

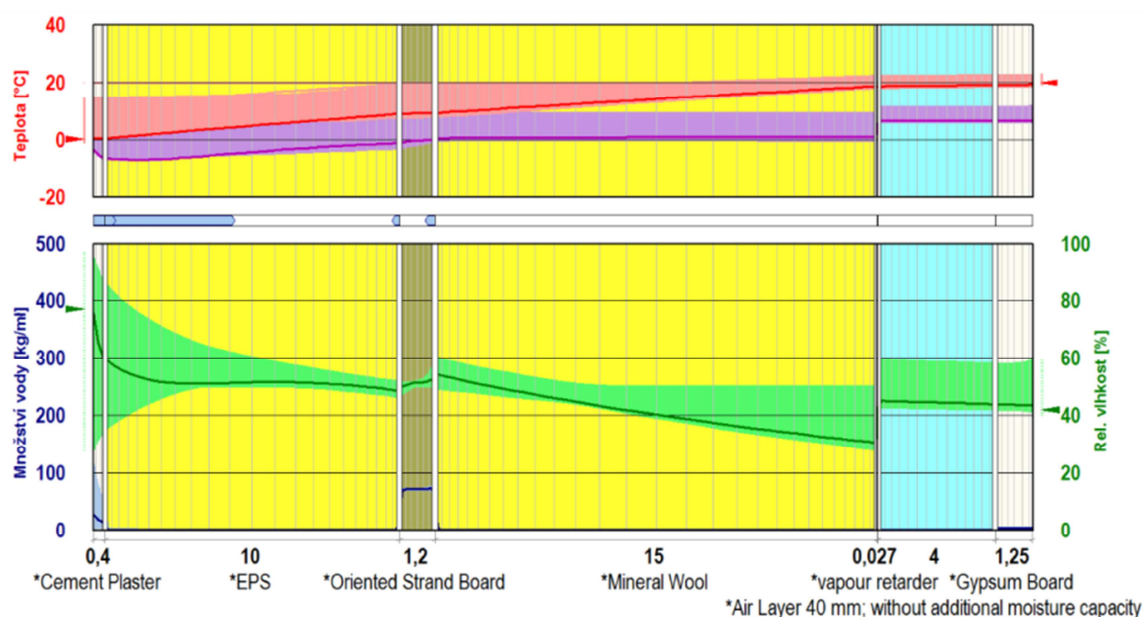
V rámci komparace OSB desky a OSB desky s dvojitým latexovým nátěrem bylo při dlouhodobém měření zjištěno, že rozdíl průměrných hodnot relativní vlhkosti vzduchu za parobrzdou je pouze 1%. Naopak v případě foliové parobrzdý s proměnnou ekvivalentní tloušťkou je průměrná relativní vlhkost o 5% nižší, než u OSB desek, což je způsobeno lepšími parametry materiálu z pohledu šíření vlhkosti konstrukcí.

Aplikace latexového nátěru nemá zásadní vliv na výrazné zvýšení difúzního odporu materiálu, což je patrné z průměrných hodnot relativní vlhkosti vzduchu za parobrzdou.

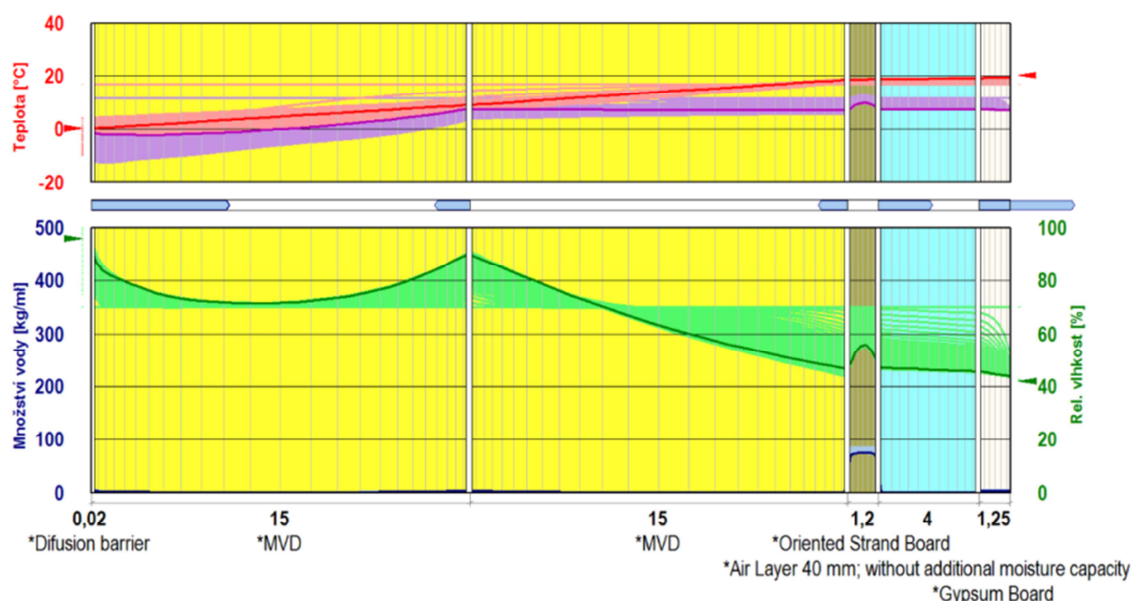
17.4 Optimalizace skladby obvodové stěny dřevostavby

Pro omezení vniku vodní páry do konstrukce ze strany interiéru v zimním období je do konstrukcí aplikována vždy vrstva s velkým difúzním odporem. Jak bylo zjištěno v rámci experimentálních měření, tato parotěsnicí vrstva dostatečně zabezpečuje konstrukci, avšak je třeba ochránit konstrukci i před atmosférickými vlivy. Při průměrných tepelně vlhkostních podmínkách se hodnota relativní vlhkosti ve skladbě konstrukce může pohybovat kolem hodnoty 30%, ale při zvýšené vlhkosti a snížené teplotě exteriéru může být tato hodnota podstatně vyšší.

Na níže uvedeném výstupu simulační metody (program WUFI) lze pozorovat, že při exteriérových teplotách pohybujících se okolo 0°C může být vlhkost v konstrukci pod hranicí 60%, avšak může nastat i situace, kdy vlhkost v konstrukci přesáhne 90% a teplota rosného bodu v totožné části konstrukce bude téměř na úrovni teploty v konstrukci. Následně může docházet k negativním jevům, jako je kondenzace uvnitř konstrukce.



Obr. 55) Průběh teplot a vlhkosti v konstrukci obvodové stěny dřevostavby, skladba difúzně otevřená, vlhkost v konstrukci nepřesahuje hodnotu 60%



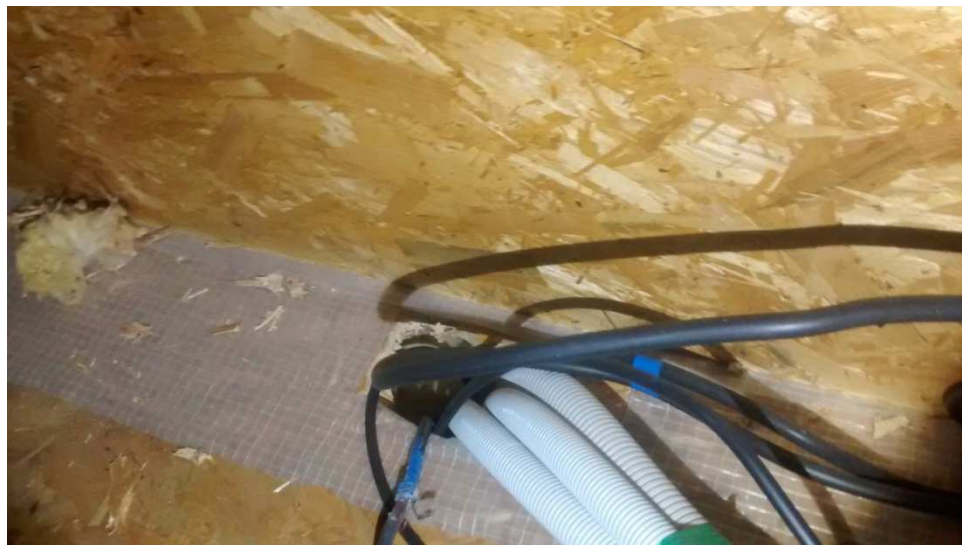
Obr. 56) Průběh teplot a vlhkosti v konstrukci obvodové stěny dřevostavby, skladba difúzně otevřená, vlhkost v konstrukci přesahuje hodnotu 80%, především mezi vrstvami tepelné izolace, přičemž teplota v místě zvýšené vlhkosti neklesá pod 0°C (teplota v exteriéru 0°C)

Řešením by byl návrh skladby konstrukce včetně vrstvy zamezující pronikání atmosférických vlivů do konstrukce z exteriéru.

17.5 Řešení konstrukčních detailů z pohledu šíření vlhkosti obálkou a její vzduchotěsnosti

Problematika vzduchotěsnosti obálky budovy je velmi úzce spjata s řešeným tématem šíření vlhkosti. K typickým netěsnostem v obálce budovy patří zejména neutěsněné prostupy TZB, defekty parozábrany, neutěsněné spáry mezi stavebními dílci, nevzduchotěsné spáry výplní stavebních otvorů apod. Důsledkem těchto vad může být především zvýšená tepelná ztráta budovy, zvýšené riziko kondenzace uvnitř konstrukce způsobené intenzivním transportem vlhkosti, nebo průnik srážkových vod. Tyto procesy vedou k urychlení degradačních procesů v okolí netěsnosti a snížení životnosti celé konstrukce, snížení kvality vnitřního prostředí vlivem proudícího chladného vzduchu, nebo snížení kvality vnitřního prostředí v důsledku ochlazení vnitřního povrchu v místě netěsnosti. Proto je třeba tyto vady eliminovat již v průběhu návrhu konstrukčního řešení.

Na následujících obrázcích je uvedeno několik případů porušení obálky budovy a následně vzniklých vad.



Obr. 57) Nevhodně provedené prostupy bez utěsnění [zdroj: archiv autora]



Obr. 58) Degradace opláštění z OSB desek vlivem zasažení prvků vlhkostí, pohled po odstranění kontaktního zateplovacího systému [zdroj: archiv autora]



Obr. 59) Degradace opláštění z OSB desek vlivem zasažení prvků vlhkostí, pohled po odstranění kontaktního zateplovacího systému [zdroj: archiv autora]



Obr. 60) Degradace vnitřního sloupku dosahující do výšky až 30 cm
[zdroj: archiv autora]



Obr. 61) Sanace odřezáním degradovaných částí dřevěných sloupků
[zdroj: archiv autora]



Obr. 62) Osazení vstupních dveří [zdroj: archiv autora]

G. MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝZKUMU

- Monitoring skladeb konstrukcí s odlišným materiálovým řešením
- Monitoring difúze vodních par do obvodových konstrukcí dřevostaveb v průběhu celého klimatického roku
- Monitoring difúzně otevřených konstrukcí s vrstvou odolnou proti působení povětrnostních vlivů umístěnou na straně exteriéru
- Vliv nevhodného technického provedení parotěsnících vrstev a vzduchotěsné obálky na funkčnost a trvanlivost konstrukce jako celku
- Vliv materiálu tepelné izolace v systému ETICS na charakteristiku teplotních a vlhkostních kmitů
- Monitoring difúze vodních par obálkou budovy staveb se vzduchotechnikou

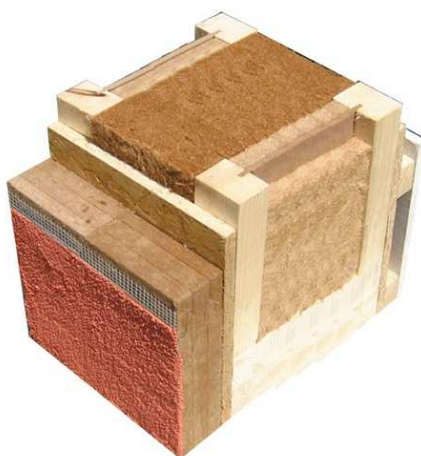
18. Možnosti dalšího výzkumu

Na základě výše uvedených výsledků disertační práce byly stanoveny oblasti, jejichž řešení by umožnilo další vývoj v oblasti nejen dřevostaveb.

18.1 Monitoring skladeb konstrukcí s odlišným materiálovým řešením

Disertační práce byla především zaměřena na komparaci skladby obvodové stěny dřevostavby řešené jako difúzně otevřená a uzavřená. Dílčí materiály použité v konstrukcích byly zvoleny na základě výskytu v realizovaných objektech a také ceny v době řešení projektu. V současnosti je možno využít celou řadu tepelných izolací vhodnějších pro použití ve dřevostavbách než EPS, jako například dřevovláknité izolace. Ve skladbách lze také použít namísto prvků z rostlého dřeva lepené vrstvené hranoly KVH, které jsou vysušené na potřebnou vlhkost a mají zaručenu tvarovou stálost a jsou z nich odstraněny nepřípustné vady jako suky a rozpraskané části. Variant řešení konstrukcí a možností jejich monitoringu je tedy bezpochyby celá řada. Bepochyby zajímavým se jeví srovnávací měření následujících skladeb:

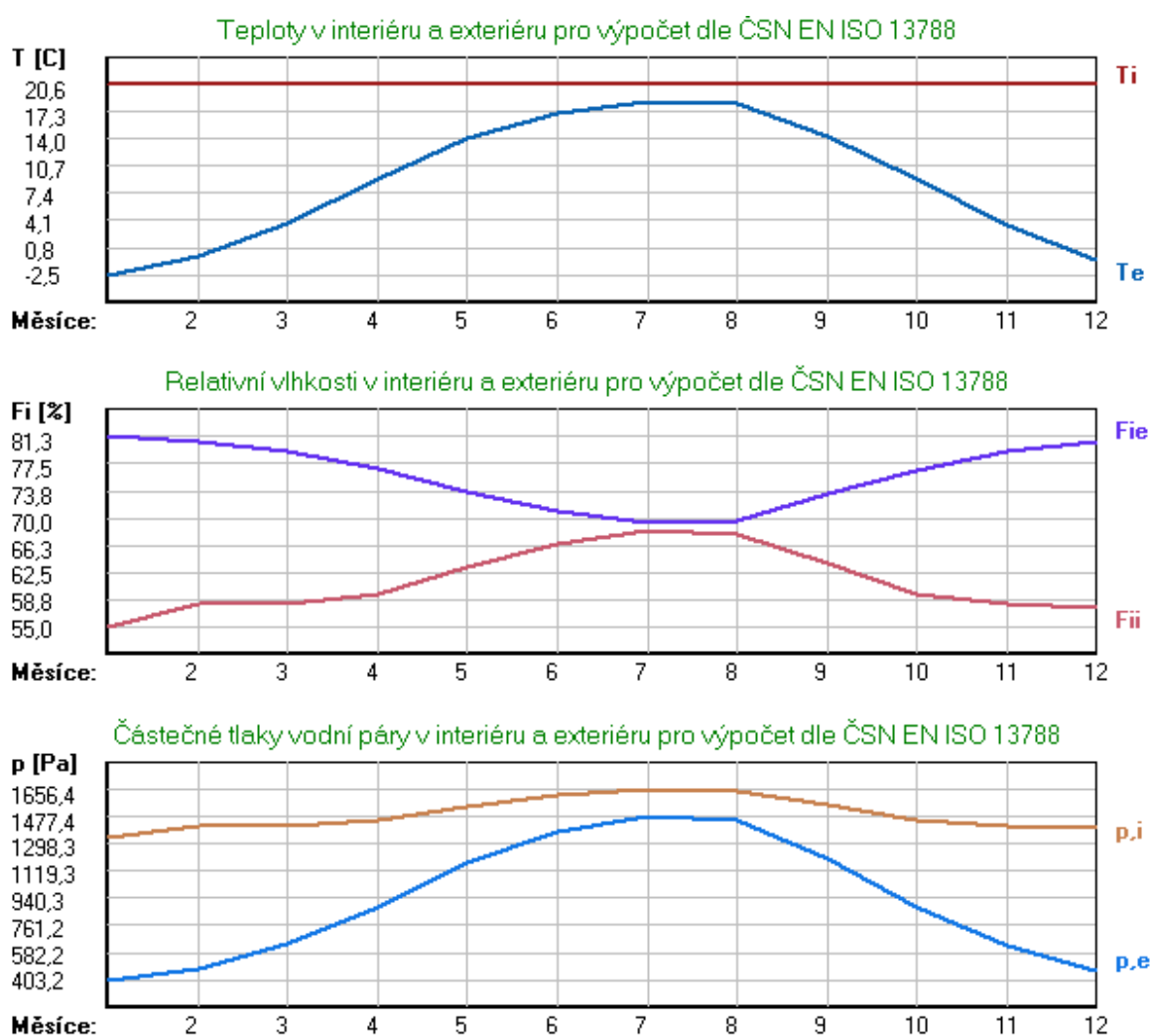
- difúzně otevřená skladba obvodové stěny s provětrávanou skládanou fasádou,
- difúzně otevřená skladba obvodové stěny s provětrávanou fasádou s celoplošným opláštěním deskami na bázi cementu se sěrkovou omítkou,
- difúzně otevřená skladba s kontaktním zateplovacím systémem na bázi dřevovláknité izolace se sěrkovou omítkou.



Obr. 63) Skladba obvodové stěny dřevostavby s použitím dřevovláknité izolace a nosníkem tvořeným kombinací technicky vysušeného řeziva a dřevovláknitých desek [zdroj: Steico]

18.2 Monitoring difúze vodních par do obvodových konstrukcí dřevostaveb v průběhu celého klimatického roku

Předložená disertační práce řeší chování obvodových konstrukcí dřevostaveb o různých skladbách pouze v zimním období. Pro komplexní hodnocení konstrukcí by bylo vhodné rozšířit jejich sledování o přechodné období v rámci klimatického roku, tedy období, kdy se často mění směr difuze vodní páry a ta neproudí tedy pouze z interiéru do exteriéru, jako je tomu v zimním období. Hlavním důvodem rozšíření monitorovacího období je to, že vady a nedostatky v rámci návrhu i realizace staveb (nejčastěji plísň v interiérech) se často projevují právě již v přechodném období.



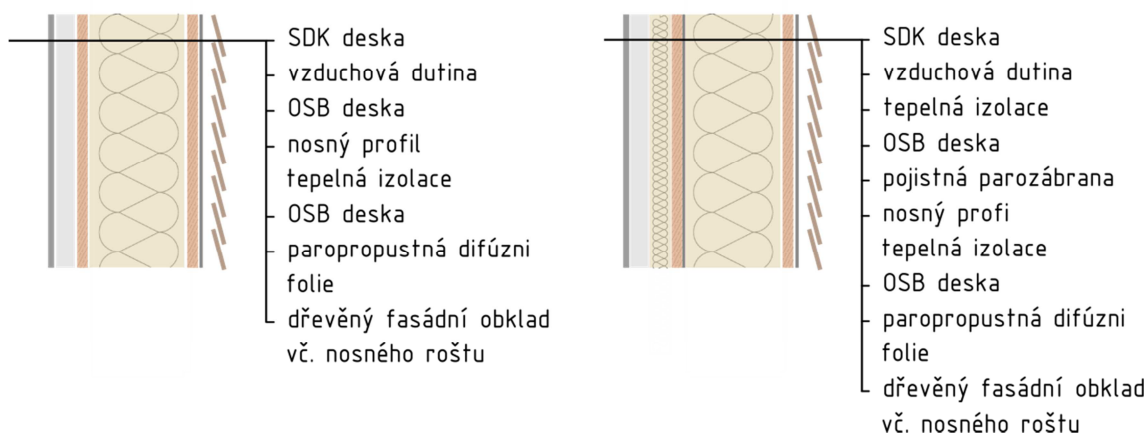
Obr. 64) Okrajové podmínky pro výpočet bilance vodních par v průběhu celého klimatického roku stanovené normou ČSN EN ISO 13788 [zdroj: program Teplo]

18.3 Monitoring difúzně otevřených konstrukcí s vrstvou odolnou proti působení povětrnostních vlivů umístěnou na straně exteriéru

Na základě výsledků monitoringu konstrukcí v zimním období se jako jedna z možností v řešení skladby konstrukcí jeví aplikace vrstvy odolné proti působení povětrnostních vlivů na stranu exteriéru. Tento předpoklad je ovšem nezbytně nutné ověřit experimentálním měřením s komparací totožné skladby bez osazení této dodatečné vrstvy.

Varianty umístění a použití OSB desek v konstrukci:

- **Umístění jedné desky s vysokým difúzním odporem na interiérovou stranu nosné konstrukce**, deska plní současně parotěsnicí funkci;
- **Umístění jedné desky s nízkým difúzním odporem na exteriérovou stranu nosné konstrukce**, na straně interiéru je nutno umístit parotěsnicí folii;
- **Kombinace dvou desek, na interiérové straně deska s vysokým difúzním odporem, na exteriérové straně deska s nízkým difúzním odporem**, velkou výhodou statická tuhost celé konstrukce, nevýhodou může být vyšší cena tohoto řešení.



Obr. 65) Zjednodušené varianty skladeb obvodových stěn dřevostaveb při použité OSB desce na vnější i vnitřní straně konstrukce [zdroj: AB PST Nordic]

18.4 Vliv nevhodného technického provedení parotěsnících vrstev a vzduchotěsné obálky na funkčnost a trvanlivost konstrukce jako celku

Veškerá experimentální měření prováděná v rámci řešení předložené disertační práce byla realizována na konstrukcích prováděných dle technologických předpisů a požadavků na konstrukce. V případě lehkých konstrukcí dřevostaveb se toto týká především kvality provedení parotěsní vrstvy. Na základě výsledků experimentů lze prohlásit, že řešené konstrukce nevykazují zásadní nedostatky z pohledu šíření vodní páry konstrukcí a nedochází v nich tedy k nežádoucímu nárůstu vlhkosti, ať už relativní vlhkosti vzduchu, nebo rovnovážné vlhkosti v materiálech na bázi dřeva, což jsou jedny ze zásadních parametrů ovlivňujících stavbu i její dílčí části z pohledu trvanlivosti a dlouhodobého bezproblémového užívání.

Toto kvalitní provedení s důrazem na řešení každého detailu a napojení dílčích vrstev nelze bohužel při realizaci objektu vždy zaručit. Proto by bylo vhodné stanovit, jak velký vliv na konstrukci jako celek nebo její dílčí části má nekvalitní provedení parotěsní vrstvy. Jelikož hlavní snahou u lehkých konstrukcí je zabránit vniku nežádoucí vodní páry do konstrukce, nebo její množství redukovat na předem stanovenou úroveň, která nebude konstrukci ani její části ohrožovat.



Obr. 66) Realizace parozábrany bez parotěsného napojení na ostatní konstrukce
[zdroj: archiv autora]

18.5 Vliv materiálu tepelné izolace v systému ETICS na charakteristiku teplotních a vlhkostních kmitů

Experimentální měření prováděné v rámci předložené disertační práce prokázalo vliv materiálového řešení zateplovacího systému na hodnoty fázového posunu vlhkostního kmitu. V různých variantách, ať už barevných nebo materiálových, lze řešit také samotnou omítku u systémů ETICS. Jelikož různé materiály tepelných izolací disponují odlišnými charakteristikami z pohledu tepelné jímavosti a šíření vlhkosti materiálem, dochází k rozdílným průběhům teplotních a vlhkostních kmitů v jednotlivých skladbách.

Tento předpoklad je vhodné ověřit experimentálním měřením a studiem jednotlivých procesů na skupině konstrukcí s rozdílnými materiály tepelné izolace:

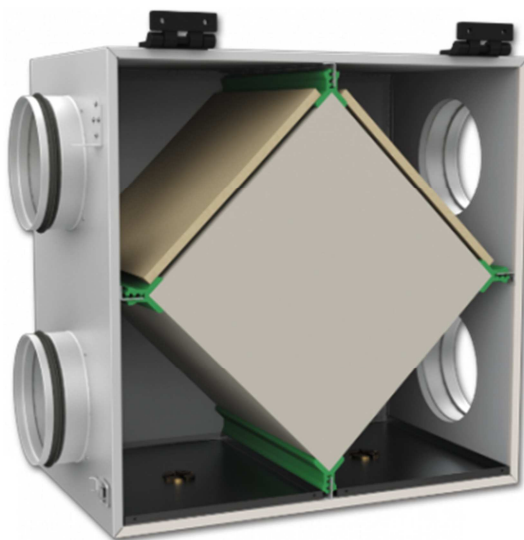
- Kontaktní zateplení z minerálně vláknitých desek s kolmými vlákny;
- Kontaktní zateplení z minerálně vláknitých desek s rovnoběžnými vlákny;
- Kontaktní zateplení z dřevovláknitých lisovaných desek;
- Kontaktní zateplení z desek na bázi konopí.



Obr. 67) Dřevovláknité tepelně izolační desky [zdroj: WoodProgress.cz]

18.6 Monitoring difúze vodních par obálkou budovy staveb se vzduchotechnikou

V minulosti nebylo užívání vzduchotechnických zařízení v rodinných domech častým jevem, avšak dnes se již stává běžnou součástí. Důvodem jsou oproti minulosti především požadavky na nízkou energetickou náročnost objektu a odlišně realizované konstrukce obálky budovy. Při použití vzduchotechnických jednotek s běžnými křížovými, deskovými rekuperačními výměníky nemusí být vždy zajištěna dostatečná relativní vlhkost, která se může běžně pohybovat i pod hranici 30 %. Tyto okrajové podmínky mohou zapříčít změnu směru difúze vodních par vlivem rozdílu parciálních tlaků i v období s nízkými exteriérovými teplotami a vysokou vzdušnou vlhkostí. Proto je důležité věnovat také pozornost studiu takovýchto procesů v klimatických podmínkách střední Evropy.



Obr. 68) Křížový výměník tepla [zdroj: Dalap.cz]

Klíčová slova:

Dřevostavba, relativní vlhkost vzduchu, vlhkost materiálu, vodní pára, dřevo, parozábrana

Key words:

Timber structure, relative humidity, material moisture, water vapor, wood, water vapor barrier

Použitá literatura

- [1] HALAHYJA, Martin, Ján FEHÉR a Pavel HYKŠ. *Stavebná tepelná technika, osvetlenie a akustika*. Bratislava: Nakladateľstvo ALFA, 1970, 432 s.
- [2] KRŇANSKÝ, Jan. *Izolace.cz: Úvaha k interpretaci faktoru difúzního odporu kapilárně pórovitých materiálů*. Izolace.cz[online]. 2009 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.isolace.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2615>
- [3] FICENEC, J., VERTAL, M.: *Numerická analýza hygrotermálních jevů ve stavebních konstrukcích*, Juniorstav 2007, Brno
- [4] ŠILAROVÁ, Š., SLANINA, P. (2005). *Difúzní mosty*. In Zborník zo sympozia Strechy 2005 (pp. 100-103), Bratislava: STU v Bratislavě, Čech strechárov Slovenska
- [5] VAVERKA, J. a kolektiv: *Stavební tepelná technika a energetika budov*, Brno : Vutium, 2006, ISBN 80-214-2910-0.
- [6] FRIDRICH, P., VEDRA, P., KACÁLEK, P.: *Možnosti sanace vlhkého zdiva typu therm*, Juniorstav 2011, Brno
- [7] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*, Praha: Český normalizační institut, 2012
- [8] Multimediální podklady pro cvičení předmětu Agroklimatologie. *Výpočty vlhkostních charakteristik a klasifikace oblaků*, FRVŠ 755/2013/B4/d, Mendelova univerzita, 2013. Dostupné z [www](http://web2.mendelu.cz/af_217_multitext/ke_stazeni/agroklimatologie/prezentace/cviceni_6.pdf): <http://web2.mendelu.cz/af_217_multitext/ke_stazeni/agroklimatologie/prezentace/cviceni_6.pdf>
- [9] 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*, Praha: Český normalizační institut, 2013
- [10] ILLIKAINEN, K., FEDORIK, F. : *HAM and Mould Growth Analysis of a Wooden Wall*, <http://www.passivhusnorden.no>. 2014 [cit. 2014 – 12 - 12]. Dostupné z: <http://www.passivhusnorden.no/files/2012/05/1255-1315-Filip-Fedorik-HAM-and-Mould-Growth-Analysis-.pdf>
- [11] VAVERKA, Jiří; HAVÍŘOVÁ, Zdeňka; JINDRÁK Miroslav a kol. *Dřevostavby pro bydlení*. první vydání. Praha : Grada Publishing, a.s., 2008. 380 s. ISBN 978-80-247-2205-4.
- [12] Český statistický úřad (ČSÚ), *Dlouhodobý vývoj bytové výstavby v České republice*, Č. j.: 01740/2013-51, ISBN 978-80-250-2461-4, 2013, 245 s.
- [13] KRABBENHØFT, K.: *Moisture Transport in Wood, A Study of Physical--Mathematical Models and their Numerical Implementation*, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2003, Printed by Eurographic A/S, Copenhagen, ISBN numer: 87-7877-225-7, Byg Rapport R-153

- [14] HÁJEK, V. *Stavíme ze dřeva*. První vydání. Praha: nakladatelství Sobotáles, 1997. 156 s. ISBN 80-85920-44-1.
- [15] ŘEHÁNEK, J., JANOUŠ A., KUČERA P., ŠAFRÁNEK J. *Tepelně-technické a energetické vlastnosti budov*. 2002. 1. vydání, Praha: Grada Publishing.
- [16] ČSN 73 1702 *Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných konstrukcí – Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby a normou*, ČSN EN 322 *Dosky z dřeva*. Zisťovanie vlhkosti, listopad 2007
- [17] ŠTEFKO, Jozef; REINPRECHT, Ladislav; KUKLÍK, Petr. *Dřevěné stavby : Konstrukce, ochrana a údržba*. Bratislava : JAGA GROUP, spol. s.r.o., 2009. 196 s. ISBN 978-80-8076-080-9.
- [18] HAVÍŘOVÁ Z., KUBŮ, P.: *Stavby 21. století - stavby ze dřeva (IX)*. www.tzb-info.cz. 2014 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2825-stavby-21-stoleti-stavby-ze-dreva-ix>
- [19] KUKLÍK, P., *Dřevo jako stavební materiál*, Prohlubovací kurz v oboru dřevostaveb, ProLignum, 19 s.
- [20] KLOUDA, P., *Základní vlastnosti dřeva*. Strechy-klouda.eu. 2014 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://strechy-klouda.eu/files/prezentace/zakladni-vlastnosti-dreva.pdf>
- [21] HAVÍŘOVÁ Z., *Konstrukce dřevostaveb s difúzně otevřeným stěnovým systémem*. Časopis Stavebnictví. 2014 [cit. 2014-11-28]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/konstrukce-drevostaveb-s-difuzne-otevrenym-stenovym-systemem_N3191
- [22] Wikipedia.org. *Oriented strand board*. 2014 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Oriented_strand_board#mediaviewer/File:OSB_production.jpg
- [23] ČSN EN 300:2006 *Desky z orientovaných plochých třísek (OSB) - Definice, klasifikace a požadavky*, Praha: Český normalizační institut, 2006
- [24] ČSN EN 13 986:2004 *Desky na bázi dřeva pro použití ve stavebnictví - Charakteristiky, hodnocení shody a označení*, Praha: Český normalizační institut, 2004
- [25] SLANINA, P. (2004). *Parotěsná vrstva - terminologie, rozdělení, navrhování*. Tepelná ochrana budov (3)7, 13-16
- [26] FEXA, Josef; ŠIROKÝ, Karel. *Měření vlhkosti*. První vydání. Spálená 51, 113 02 Praha 1 : SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 264 s.
- [27] Elbez.cz, technické listy výrobce
- [28] HAVÍŘOVÁ Z., KUBŮ, P., *Vliv tepelně-vlhkostních podmínek v obvodovém plášti staveb na bázi dřeva*. Tzb-info.cz. 2011. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/7403-vliv-tepelne-vlhkostnich-podminek-v-obvodovem-plasti-staveb-na-bazi-dreva>
- [29] KANTOR, R., *Vliv vnitřního stínění na tepelnou stabilitu místnosti*, Diplomová práce, Ústav pozemního stavitelství, Fakulta stavební Vysokého učení technického v Brně, 2013

- [30] Ahlborn.cz, technické listy výrobce
- [31] Voltcraft.cz, technické listy výrobce
- [32] ČSN 73 0540 – 3: *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin* (listopad 2005). Praha: Český normalizační institut, 2005
- [33] SLANINA, P. *Dynamické tepelně vlhkostní hodnocení stavebních konstrukcí*. Tepelná ochrana budov (5)16, 32-39. 2013
- [34] 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
- [35] SLANINA, P. *WUFI Pro*. www.wufi.cz. 2013. Dostupné z: http://www.wufi.cz/wufi_pro/
- [36] KOLEKTIV AUTORŮ: *Mikroskopická stavba dřeva – teoretická část*. Laboratorní práce "Mikroskopická stavba dřeva". 2008 [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_mikroskopicka_stavba_dreva/

Seznam použitých symbolů a zkratk

θ	teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$),
$\Delta\theta_{\text{ai}}$	teplotní přírážka na vyrovnání teplot mezi průměrnou teplotou vnitřního vzduchu a průměrnou teplotou okolních ploch ($^{\circ}\text{C}$),
θ_{ai}	návrhová teplota vnitřního vzduchu ($^{\circ}\text{C}$),
$\theta_{\text{ai,u}}$	návrhová teplota vnitřního vzduchu v zimním období ($^{\circ}\text{C}$),
φ_e	relativní vlhkost venkovního vzduchu (%),
θ_e	návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období ($^{\circ}\text{C}$),
θ_e^*	návrhová teplota venkovního vzduchu v letním období ($^{\circ}\text{C}$),
$\theta_{e,100}$	základní návrhová teplota venkovního vzduchu v příslušné teplotní oblasti zeměpisně vymezené, určená pro nadmořskou výšku 100 m.n.m. ($^{\circ}\text{C}$),
$\theta_{e,\text{mm}}$	návrhová průměrná měsíční teplota venkov. vzduchu v ročním průběhu ($^{\circ}\text{C}$),
θ_{gr}	návrhová teplota zeminy přilehlé ke stavební konstrukci v zimním období ($^{\circ}\text{C}$),
θ_i	návrhová vnitřní teplota v zimním období ($^{\circ}\text{C}$),
$\theta_{j,m}$	průměrná teplota materiálu j-té vrstvy ($^{\circ}\text{C}$),
θ_o	operativní teplota ($^{\circ}\text{C}$),
ξ_{Rsi}	poměrný teplotní rozdíl vnitřního povrchu,
θ_{si}	vnitřní povrchová teplota ($^{\circ}\text{C}$),
θ_v	je výsledná teplota vnitřního vzduchu ($^{\circ}\text{C}$),
A	konstanta zahrnující pohyb (rychlost) psychometrické charakteristiky vzduchu (-),
a	materiálová konstanta,
A,a	absolutní vlhkost vzduchu při nasycení vzduchu vodní párou a při skutečném obsahu vodní páry,
c	koncentrace,
D	součinitel difúze,
d	tloušťka materiálu (m),
d_j	tloušťka j-té vrstvy konstrukce (m),
d_{mat}	je tloušťka materiálu (m),
E	energie globálního slunečního záření ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^2$),
E_e	tlak (napětí) vodní páry (hPa) při teplotě vzduchu T ($^{\circ}\text{C}$),
E'	maximální tlak vodní páry při teplotě vlhkého teploměru t' (hPa),
E_0	tlak vodní páry při teplotě 0°C ,
$f(x,t)$	je zdrojová funkce,
$f_p(x,t)$	je zdrojová funkce ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$),
f_{Rsi}	je průměrný teplotní faktor vnitřního povrchu (-),
g	hustota difúzního toku ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),
g_a	hustota toku vzduchu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),
$g_{A,j}$	hustota difuzního toku vodní páry, která proudí konstrukcí od vnitřního povrchu k hranici A oblasti kondenzace ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),
$g_{B,j}$	hustota difuzního toku vodní páry, která proudí od hranice B oblasti kondenzace k vnějšímu povrchu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),
$\text{grad}\theta$	gradient teploty (K/m),
h	nadmořská výška (m),
h_1	rozměr (tloušťka) prvku (m) při příslušné vlhkosti ω_1 (%),

h_2	je rozměr (tloušťka) prvku (m) při příslušné vlhkosti ω_2 (%),
M	je molární hmotnost vodní páry (kg.kmol^{-1}),
M	index rizika růstu plísní (-),
$M_{aj,j}$	dílčí množství zkondenzované (vypařené) vodní páry pro jasnou oblohu ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$),
$M_{az,j}$	dílčí množství zkondenzované (vypařené) vodní páry pro zataženou oblohu ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$),
M_c	celoroční množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$),
m_d	hmotnost suchého materiálu (kg,g),
M_{ev}	je celoroční množství vypařené vodní páry ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$),
m_k	hmotnost kapaliny (kg,g),
m_w	hmotnost vlhkého materiálu (kg,g),
N	teplotní difuzní funkce (l.s^{-1}),
p	atmosférický tlak (hPa),
p	částečný tlak vodní páry (Pa),
p_a	atmosférický tlak vzduchu (Pa),
p_i	částečný tlak vodní páry (Pa),
p_{sat}	částečný tlak nasycené vodní páry (Pa),
p_{sat}	částečný tlak nasycené vodní páry (Pa),
p_{sat}	částečný tlak nasycené vodní páry (Pa),
p_v	parciální tlak vodní páry (Pa),
p_v	skutečný částečný tlak vodní páry ve vzduchu (Pa),
$p_{v,sat}$	částečný tlak nasycené vodní páry ve vzduchu (Pa),
$p_{vi,e}$	částečný tlak vodní páry vnitřního a vnějšího vzduchu (Pa),
q	vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením, proudícího stejnorodým izotropním materiálem (W/m^2),
R	měrný odpor materiálu (Ωm),
R	plynová konstanta ($\text{J.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$),
R_{H_2O}	plynová konstanta pro vodní páru ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$),
RH_{crit}	kritická relativní vlhkost (%),
R_T	tepelný odpor konstrukce ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$),
s	sání (Pa),
s_d	ekvivalentní difúzní tloušťka materiálu (m),
$s_{d,j}$	je ekvivalentní difuzní tloušťka j-té vrstvy konstrukce (m),
t	teplota suchého teploměru ($^{\circ}\text{C}$),
t	teplota vzduchu v době měření ($^{\circ}\text{C}$),
T	absolutní teplota j-té vrstvy konstrukce (K),
t	čas (s),
T	termodynamická teplota (K),
$t_{e,j}$	celková doba trvání teploty vnějšího vzduchu $\theta_{ae,j}$ pro j v intervalu -21°C až 25°C podle tepl. oblasti v zimním období (s),
u	termodynamická stavová veličina (tlak, teplota, apod.),
U_m	průměrný součinitel prostupu tepla konstrukce tvořící obálku vnitřního prostoru ($\text{W}\cdot\text{m}^2.\text{K}^{-1}$),
U_N	požadovaná (doporuč.) hodnota součinitele prostupu tepla ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$),
v_a	rychlost proudění venkovního vzduchu (m.s^{-1}),
V_d	objem suchého materiálu (m^3),

v_i	měrná objemová vlhkost vzduchu – interiér,
v_{sat}	měrná objemová vlhkost vzduchu při nasycení (kg.m^{-3}),
V_w	objem volné vody (m^3),
w	hmotnostní koncentrace vlhkosti (kg.m^{-3}),
w_h	hmotnostní vlhkost (%),
w_v	objemová vlhkost (%),
x	prostorová souřadnice (m),
$Z_{p,j}$	difuzní odpor j-té vrstvy konstrukce (m.s^{-1}),
β	součinitel bobtnání (sesychání) (%),
δ	součinitel difúzní vodivosti (s),
$\Delta\theta_e$	výškový teplotní gradient (K) pro danou teplotní oblast,
$\Delta\theta_{e,0}$	základní teplotní gradient pro danou teplotní oblast (K),
δ_0	je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu (s),
δ_0	součinitel difúzní vodivosti vzduchu (s),
$\delta_a(T)$	součinitel difuze vodní páry ve vzduchu v záv. na tepl. ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1};\text{s}$),
Δh	rozdíl nadmořské výšky místa budovy h (m) a základní nadmořské výšky 100 m.n.m (m),
δ_p	součinitel difuzní vodivosti (s),
Δp	rozdíl částečných tlaků vodní páry,
δ_p	součinitel difúzní vodivosti materiálu,
$\Delta\varphi_i$	bezpečnostní vlhkostní přírážka (%),
$\lambda_{l,m}$	vlhkostní vodivost pro kapilární transport ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1};\text{s}$),
μ	faktor difúzního odporu (-),
$\mu(\varphi)$	faktor difúzního odporu materiálu v závislosti na vlhkosti (-),
$\mu_{dry} = \mu_d$	hodnota suchého faktoru difúzního odporu stanovená zkouškou v podmínkách nízké relativní vlhkosti, obvykle metodou „suché misky“, (-),
$\mu_{wet} = \mu_w$	hodnota mokrého faktoru difúzního odporu stanovená zkouškou v podmínkách vysoké relativní vlhkosti, obvykle metodou „mokré misky“(-),
ρ	hustota prostředí,
ρ_a	měrná hmotnost vzduchu (kg.m^{-3}),
ρ_d	objemová hmotnost suchého materiálu (kg.m^{-3}),
ρ_v	hustota vody (kg.m^{-3}),
φ_i	relativní vlhkost vnitřního vzduchu (%),
$\varphi_{i,m,u}$	návrhová průměrná měsíční relativní vlhkost vnitřního vzduchu (%).
$\varphi_{i,e}$	relativní vlhkost vzduchu (%),
$\varphi_{i,u}$	návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu (%).

Použité dolní indexy:

a	Vzduch
cr	Kritická normová hodnota vlastnosti výrobku, stavební konstrukce, budovy
D	Deklarovaná hodnota vlastností materiálů, výrobků
e	Venkovní teplota, tlak, vlhkost
ev	Ekvivalentní
i	Vnitřní teplota, tlak, vlhkost
L	Délka
m	Střední
n	Normová hodnota vlastností materiálů, výrobků
N	Normová hodnota vlastnosti výrobku, stavební konstrukce, budovy,
rq	Požadovaná hodnota
re	Doporučená hodnota
sat	Nasycený
si	Vnitřní konstrukce, vnitřní povrch
se	Vnější konstrukce, vnější povrch
t	Teplota, veličina závislá na teplotě
T	Celkový
u	Návrhová hodnota vlastností materiálů, výrobků

Použité značení legendy grafů:

RH	relativní vlhkost vzduchu (%)
----	-------------------------------

Seznam publikací autora

Články ve světově uznávaných databázích pro hodnocení výsledků vědy a výzkumu

- [1] BEČKOVSKÝ, D.; BEČKOVSKÁ, T.; VLACH, F.; VAJKAY, F. Diffusion of water vapour, monitoring and risk analysis of wooden walls. *WOOD RESEARCH*, 2014, roč. 59, č. 3, s. 431-438. ISSN: 1336- 4561.
- [2] GINTAR, J.; NOVOTNÝ, M.; ŠUHAJDA, K.; SOBOTKA, J.; BEČKOVSKÁ, T. Efficiency of Liquidation of Biotic Pests Using Microwave Radiation. *AMR - Advanced Materials Research*, 2013, č. 688, s. 27-36. ISSN: 1662- 8985.
- [3] UVIZLOVÁ, M.; BEČKOVSKÁ, T. The transition of the water steam through the composition of the diffusive closed circumferential wall of the wooden house with the proper and improper realization of vapor barrier. In: *Advanced Materials Research Vol. 899 (2014) 2014*, pp 446-449, ISSN: 978-3-03835-040-8
- [4] BEČKOVSKÝ, D.; OSTRÝ, M.; KALÁBOVÁ, T.; TICHOMIROV, V. Thermal stability of attic spaces with integrated PCMs during the climatic year. *Advanced Materials Research*, 2012, roč. 649, č. 2013, s. 175-178. ISSN: 1022- 6680.
- [5] KALÁBOVÁ, T., HORÁČKOVÁ, M., VAJKY, F. Experimental timber framed house EXDR1. In: *Advanced Materials Research Vol. 649 (2013) pp 73-76, 2013*. ISSN: 978-3-03785-596-6.

Ostatní publikace

- [6] HLAVSA, P.; BEČKOVSKÁ, T. STAVEBNĚ TECHNICKÝ PRŮZKUM: TEORIE A PŘÍPADOVÁ STUDIE. In *STRUCTURA stavební trendy 2013*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, Fakulta stavební, 2013. s. 74-79. ISBN: 978-80-248-3236- 4.
- [7] BEČKOVSKÝ, D.; OSTRÝ, M.; KALÁBOVÁ, T.; TICHOMIROV, V. Thermal stability of attic spaces with integrated PCMs during the climatic year. In *Buildings and Environment 2012 proceedings*. Brno: Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 249-252. ISBN: 978-80-214-4505- 5.
- [8] HLAVSA, P.; AUTRATOVÁ, L.; KALÁBOVÁ, T. Vady podlah z hlediska poklesu dotykové teploty. In *Sborník anotací konference Junior Forensic Science Brno 2012 (+CD)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2012. ISBN: 978-80-214-4485- 0.
- [9] AUTRATOVÁ, L.; HLAVSA, P.; KALÁBOVÁ, T. Návrh sanace venkovní betonové stěny. In *Sborník anotací konference Junior Forensic Science Brno 2012 (+CD)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2012. ISBN: 978-80-214-4485- 0.

- [10] BEČKOVSKÝ, D.; KALÁBOVÁ, T.; SOBOTKA, J. ZABUDOVANÁ VLHKOST V KONSTUKCÍCH DŘEVOSTAVEB. In STRUCTURA 2012. VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, Fakulta stavební. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA- FAKULTA STAVEBNÍ, 2012. s. 294-297. ISBN: 978-80-248-2879- 4.
- [11] KALÁBOVÁ, T. Monitoring vlhkostní bilance moderních nízkoenergetických dřevostaveb. In Juniorstav 2012 Sborník anotací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 52-52. ISBN: 978-80-214-4393- 8.
- [12] BEČKOVSKÝ, D.; KALÁBOVÁ, T.; ŠUHAJDA, K.; NOVOTNÝ, M.; KRUPICOVÁ, J. Experimentální dřevostavba EXDR1. Materiály pro stavbu, 2012, roč. 18, č. 5, s. 26-27. ISSN: 1213- 0311.
- [13] HLAVSA, P.; KALÁBOVÁ, T.; AUTRATOVÁ, L. Tloušťka stěny ve vztahu k ploše budovy. In Structura 2012. Ostrava: VŠB-TU-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, Fakulta stavební, 2012. s. 238-243. ISBN: 978-80-248-2879- 4.
- [14] HORÁČKOVÁ, M.; HLAVSA, P.; KALÁBOVÁ, T. Problematika hodnocení vzduchotěsnosti budov v jejich jednotlivých fázích. In Budovy a prostředí 2012 - sborník. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2012. s. 237-240. ISBN: 978-80-214-4505- 5.
- [15] BEČKOVSKÝ, D.; ŠUHAJDA, K.; KALÁBOVÁ, T.; NOVOTNÝ, M.; KRUPICOVÁ, J. Experimentální dřevostavba EXDR1. In Sborník přednášek z odborného semináře se zahraniční účastí Dřevostavby 2012. Volyně: VOŠ Volyně, 2012. s. 75-78. ISBN: 978-80-86837-36- 9.
- [16] KALÁBOVÁ, T.; AUTRATOVÁ, L.; HLAVSA, P. Vady obvodového pláště budovy z pohledu průvzdušnosti. In Sborník anotací konference Junior Forensic Science Brno 2012 (+CD). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2012. s. 41-41. ISBN: 978-80-214-4485- 0.
- [17] KALÁBOVÁ, T. Metody revize připojovací a funkční spáry otvorových výplní. In Juniorstav 2011 - sborník anotací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011. s. 43-43. ISBN: 978-80-214-4232- 0.
- [18] BEČKOVSKÝ, D.; OSTRÝ, M.; KALÁBOVÁ, T. Thermal stability of attic spaces with integrated PCM in light building constructions during the climatic year. Knowledge Society, 2011, roč. 4, č. 3, s. 116-119. ISSN: 1313- 4787.

Účast v grantech

- [1] Prostup vlhkosti skladbou difúzně uzavřené obvodové stěny dřevostavby při správné a nesprávné realizaci parozábrany, zahájení: 01. 01. 2013, ukončení: 31. 12. 2013; projekt Specifického vysokoškolského výzkumu (spoluřešitel).
- [2] Analýza vlivu konstrukce zelené střechy na parametry vnitřního prostředí obytných budov, zahájení: 01. 01. 2012, ukončení: 31. 12. 2012; projekt Specifického vysokoškolského výzkumu (řešitel).
- [3] Optimalizace návrhu novodobých dřevěných konstrukcí z hlediska stavební fyziky, zahájení: 01. 01. 2011, ukončení: 31. 12. 2013; projekt Specifického vysokoškolského výzkumu (člen řešitelského týmu).
- [4] Monitoring vlhkostní bilance difúzně otevřených a uzavřených konstrukcí moderních nízkoenergetických dřevostaveb, zahájení: 01.01.2011, ukončení: 31.12.2011; projekt Specifického vysokoškolského výzkumu (řešitel).
- [5] Praktický náhled studentů na předmět BH52-Pozemní stavitelství 2741/2010/F1/a, řešitel prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc., rok 2010-2011; projekt FRVŠ (spoluřešitel).

Patenty, užité vzory a tvůrčí aktivity

- [6] BEČKOVSKÝ, D.; BEČKOVSKÁ, T.; JELÍNEK, P.; HLAVSA, P.; VLACH, F.; Vysoké učení technické v Brně: Testing chamber for air permeability measurement of building components and building structures. 304241, patent. (2014)
- [7] BEČKOVSKÝ, D.; OSTRÝ, M.; VLACH, F.; BEČKOVSKÁ, T.; HLAVSA, P.; JELÍNEK, P.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ: Zavěšený podhled s otevřenou charakteristikou vytvořený z akumulčních termoaktivních panelů a akumulční termoaktivní panel. 2013-5843, užitečný vzor. (2013)
- [8] BEČKOVSKÝ, D.; BEČKOVSKÁ, T.; JELÍNEK, P.; HLAVSA, P.; VLACH, F.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ: Měřicí zkušební komora pro měření průvzdušnosti plošných stavebních dílců a plošných konstrukcí. 25619, užitečný vzor. (2013)
- [9] BEČKOVSKÝ, D.; NOVOTNÝ, M.; ŠUHAJDA, K.; VLACH, F.; BEČKOVSKÁ, T.; JELÍNEK, P.: EXDR1; Experimentální dřevostavba EXDR1. Kulkova 10, 615 00 Brno. URL: http://upst.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=29&Itemid=31. (funkční vzorek)