

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Bc. Ondřej Maňák

**Variabilita koeficientů difuze vodní páry ve dřevě a její vliv na vlhkostní pole
uvnitř vybrané konstrukce**

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Miroslav Trcala, PhD.

Brno 2015

Prohlašuji, že jsem práci: „VARIABILITA KOEFICIENTŮ DIFUZE VODNÍ PÁRY VE DŘEVĚ A JEJÍ VLIV NA VLHKOSTNÍ POLE UVNITŘ VYBRANÉ KONSTRUKCE“ zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně 21. 4. 2015

Bc. Ondřej Maňák

Na tomto místě bych rád poděkoval především školiteli Mgr. Ing. Miroslavu Trcalovi, PhD., za odborné vedení a věcné připomínky. Poděkování patří také všem, kteří mi byli nápomocni nebo mě podporovali při tvorbě této diplomové práce, za jejich trpělivost a ochotu, a to především Radimu Rouskovi, mojí přítelkyni Tereze Čuprové, a celé rodině. Tuto práci věnuji mé babičce Ludmile Maňákové.

Abstrakt

Maňák, O., *Variabilita koeficientů difuze vodní páry ve dřevě a její vliv na vlhkostní pole uvnitř vybrané konstrukce*, Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, 2015, 73 s.

Hygroskopické vlastnosti dřeva mají významný vliv na difuzi vodní páry ve dřevě. K popisu jevu difuze lze použít závislost součinitele difuzní vodivosti na parciálním tlaku vodní páry, nebo relativní vlhkosti vzduchu. Analytické vyjádření koeficientu difuze dřeva bylo modifikováno, aby bylo možno získat hodnoty součinitele difuzní vodivosti. K verifikaci byla použita pohárková zkouška při průměrných vlhkostech vzduchu 25, 62,5 a 75 %, a hodnoty z literatury. Vypočtená data tvořila vstup numerického modelu, ve kterém byl porovnán stacionární lineární výpočet s nelineárním za uvažování variability difuzních vlastností ve stavebních detailech difuzně otevřené dřevostavby. Byly prokázány rozdíly ve vlhkostních polích, které v některých případech vedou k podcenění rizika kondenzace či degradace dřevěných prvků ve stěně dřevostavby, v jiných naopak poukazují na reálně lepší schopnost dřevěných konstrukcí odvést vlhkost z interiéru stavby do exteriéru.

Klíčová slova: stacionární difuze, součinitel difuzní vodivosti, pohárková zkouška, numerický model, vlhkostní pole, stavební fyzika

Abstract

Maňák, O., *Variability of diffusion coefficients in wood and its influence on moisture field inside selected structure*, Diploma thesis, Mendel University in Brno, 2015, 73 p.

Hygroscopic properties of wood have significant impact on water vapor diffusion in this material. For the description of this phenomenon the water vapor permeability dependence on relative humidity or partial water vapor pressure can be used. Analytical expression of the diffusion coefficient of wood was modified in order to obtain values for the water vapor permeability. For the verification a cup method experiment at 25, 62.5 and 75% average relative humidity was performed and the results were compared to other researches. Calculated data formed the input of a numerical model, in which a stationary linear analysis with a nonlinear analysis was compared, taking the variability of diffusion properties into account in the construction details of vapor diffusion-open timber constructions. Differences in moisture fields were shown, which in some cases lead to underestimation of the risk of condensation or degradation of wood components in the building envelope, in other cases point to the actual better ability of wooden structures to divert moisture from the interior to the exterior of the building.

Keywords: steady-state diffusion, water vapor permeability, cup method, numerical model, moisture field, building physics

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce.....	2
3	Literární přehled	3
3.1	Dřevo a vodní pára	3
3.1.1	Vlhkost dřeva	3
3.1.2	Sorpční izoterma	4
3.1.3	Mechanismus pohybu vody ve dřevě.....	6
3.1.4	Vliv faktorů na difuzi	8
3.1.5	Fyzikální vlastnosti vodní páry	11
3.1.6	Funkční vztahy mezi RVD, RVV, a parciálním tlakem vodní páry	11
3.2	Modelování vlhkostního pole	12
3.2.1	Comsol Multiphysics	13
3.2.2	Wufi	13
3.2.3	Moisture expert	13
3.3	Materiály pro dřevěné konstrukce	14
3.3.1	Vlastnosti dřeva.....	14
3.3.2	Používané materiály.....	14
3.3.3	Konstrukční systémy dřevostaveb	17
3.4	Technické normy	18
3.4.1	Součinitel difuzní vodivosti	19
3.4.2	Faktor difuzního odporu.....	19
3.4.3	Ekvivalentní difuzní tloušťka.....	20
3.4.4	Kondenzace vodní páry v konstrukci.....	20
3.4.5	Pohárková zkouška	21
4	Materiál a metodika	22
4.1	Vlastní experiment – pohárková zkouška dle ČSN EN ISO 12572.....	22
4.2	Analytický výpočet	23
4.2.1	Koeficient difuze v příčném směru	24
4.2.2	Souhrnné analytické vyjádření koeficientu difuzní vodivosti v příčném směru	27
4.3	Numerický model.....	27
5	Výsledky.....	29
5.1	Pohárková zkouška	29
5.2	Analytický výpočet	33
5.3	Numerický model.....	35
5.3.1	Prostá masivní stěna.....	36

5.3.2	Detail rohu masivní stěny	44
5.3.3	Stěna rámové dřevostavby	52
5.3.4	Detail rohu rámové dřevostavby	56
6	Diskuze	60
7	Závěr.....	64
8	Conclusion.....	65
9	Použitá literatura.....	66
10	Seznam obrázků.....	70

1 Úvod

Dřevo je všude kolem nás, bylo tomu tak v minulosti, a je naší zodpovědností nalézt mu místo i v budoucnosti. Se zvyšujícími se potřebami společenské a ekologické odpovědnosti při využívání přírodních zdrojů dřevo opět nabývá na významu jako obnovitelný materiál s vyváženými užitnými vlastnostmi v poměru k ceně. Abychom jej dovedli správně využít, měli bychom se obeznámit s jeho výhodami i nevýhodami, a zohlednit je podle účelu využití. Jednou z velmi důležitých vlastností ovlivňující způsob zacházení se dřevem a výrobky z něj je hygroskopicitu, neboli schopnost navazovat vzdušnou vlhkost. S touto je spojen jev vedení či prostupu vlhkosti, jež nazýváme difuzí vodní páry. Právě tento jev dokáže poměrně zásadně ovlivňovat výsledné užitné vlastnosti staveb, a to jak negativním, tak pozitivním způsobem. V době, kdy dřevo a materiály na bázi dřeva hrají ve stavebnictví čím dál tím důležitější roli, je zkoumání procesu difuze esenciální úlohou v souvislosti s posuzováním vlhkostního režimu konstrukcí a rizika kondenzace.

Diplomová práce přímo navazuje na závěry bakalářské práce a snaží se je promítnout do důsledků prostřednictvím numerické simulace vlhkostního pole v konstrukcích dřevostaveb. Parametry pohárkové zkoušky byly pro nový experiment optimalizovány tak, aby přinesly co nejkvalitnější výsledky. Analytická část je modifikována za účelem vyjádření závislosti difuzní vodivosti na parciálním tlaku vodní páry a relativní vzdušné vlhkosti, která za dané teploty odpovídá příslušné vlhkosti dřeva dle sorpční izotermu. Tento přístup usnadňuje kombinaci různých stavebních materiálů v numerické simulaci, v níž jsou porovnávána výsledná vlhkostní pole za uvažování konstantní a variabilní difuzní vodivosti. Výsledky porovnání poukazují na rozdíly mezi jednotlivými přístupy a jejich dopad na posouzení vlhkostní odezvy dřevěných konstrukcí.

2 Cíl práce

Cílem práce bylo stanovit vliv implementace variability difuzních vlastností dřeva v závislosti na vlhkosti do numerického modelu vlhkostního pole sendvičové konstrukce dřevostavby. Experimentální část spočívala v pohárkové zkoušce, kde byly dle měřených hmotnostních úbytků odvozeny součinitele difuzní vodivosti, které odpovídaly různým průměrným podmínkám prostředí. Získaná data byla porovnávána s výsledky analytického výpočtu, jehož podoba musela být pro potřeby přepočtu koeficientu difuze na součinitel difuzní vodivosti upravena. Experimentální výsledky, analytický výpočet a běžně užívané konstanty pak bylo nutné použít v numerickém modelu tak, aby bylo možné porovnat jednotlivé přístupy. Výstupem této práce je posouzení signifikance rozdílů mezi nimi.

3 Literární přehled

V posledních desetiletích se mnoha vědcům povedlo významně rozšířit naše znalosti v oblasti vlhkostních vlastností dřeva. Pohybem vody ve dřevě z pohledu difuze a sorpce se zabývali Burr a Stamm (1956), Eitelberger et al. (2011a, 2011b), Eitelberger a Svensson (2012), Engelund et al. (2013), Hill et al. (2011), Horáček (2004), Kang et al. (2007), Kollman (1951), Krabbenhøft et al. (2003), Rautkari et al. (2013), Rode a Clorius (2004), Siau (1995), Skaar (1988), Stamm (1960), Sonderegger (2011), Tarmian et al. (2012), Tiemann (1906), Time (1998), Timusk (2008), Trcala (2009), Valovirta a Vinha (2004), Wadsö (1993a, 1993b) a mnoho dalších.

Rešerše literatury diplomové práce navazuje na literární přehled bakalářské práce (Maňák, 2013), s cílem téma ve stěžejních bodech rozvést ve směru pohledu stavební fyziky na difuzi vodní páry ve dřevě a kondenzaci vodní páry v konstrukci dřevostaveb. Důkladné studium rozsáhlého množství zdrojů potvrzuje komplexnost tématu.

3.1 Dřevo a vodní pára

Vlhkost je fyzikální faktor, který má zásadní vliv na vlastnosti dřeva. Voda v různých skupenstvích může dřevem procházet a je jeho nedílnou součástí. Dochází k rozměrovým změnám, mění se jeho mechanické vlastnosti, mění se elektrický odpor, tepelný odpor; ve výsledku je tedy poznání mechanismů souvisejících s pohybem vody ve dřevě zásadní pro správné zacházení s výrobky z něj. Následující kapitola shrnuje základní poznatky o navazování vzdušné vlhkosti, její pohyb ve dřevě a vlastnostech vodní páry ve vzduchu.

3.1.1 Vlhkost dřeva

Vodu ve dřevě můžeme rozlišit mezi tři základní formy: voda chemicky vázaná, voda vázaná a voda volná. Pro vyjádření jejího podílu ve dřevní hmotě nejčastěji používáme vzorce (3.1.1) a (3.1.2). V praxi nám pak stačí znát hmotnost absolutně suchého vzorku a vlhkého vzorku, pomocí nich už si vyjádříme potřebnou hodnotu vlhkosti.

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 \quad (3.1.1)$$

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100 \quad (3.1.2)$$

kde w_{abs} je absolutní vlhkost [%], w_{rel} je relativní vlhkost [%], m_w [kg] je hmotnost vlhkého dřeva a m_0 je hmotnost absolutně vysušeného dřeva [kg] a m_v je hmotnost vody [kg].

Hranici obsahu vody volné označujeme jako *mez nasycení buněčných stěn (MNBS)* nebo *mez hygroskopicity (MH)*. Mezi těmito pojmy je nutné rozlišovat. Na hranici MNBS je diferenciální teplo sorpce rovno nule, na sorpční místa se už neváží další molekuly vody (Tiemann 1906). Tuto hodnotu lze dosáhnout při dlouhodobém uložení dřeva ve vodě, dojdeme tak k vlhkosti 30-40%. Podle novějších poznatků nejde o bod ale o škálu rovnovážných vlhkostí, při níž dochází ke změně fyzikálních vlastností dřeva. Voda vázaná v buněčné stěně existuje společně s vodou volnou, aniž by narušovala vodíkové můstky (Hernandez a Bizoň 1994). V praxi častěji užívanou je MH, které je dosaženo při dlouhodobém uložení dřeva v prostředí se vzdušnou vlhkostí blížíící se 100% (Stamm, 1964). Relativní vlhkost dřeva se v praxi zařazuje často do následujících skupin (Vaverka et al., 2008):

- | | |
|---|---------|
| - Dřevo mokré, v dlouhodobém kontaktu s vodou | >100% |
| - Dřevo čerstvě pokáceného stromu | 50-100% |
| - Dřevo vysušené na vzduchu | 15-22% |
| - Dřevo vysušené pro použití v interiéru | 8-15% |
| - Absolutně suché dřevo | 0% |

3.1.2 Sorpční izoterma

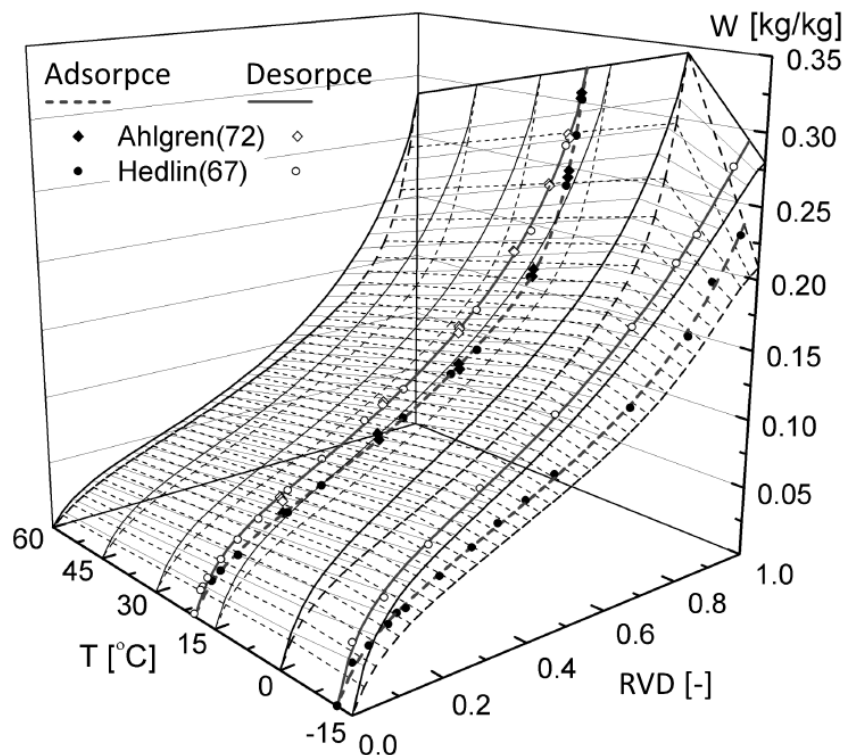
Existuje funkční závislost mezi vlhkostí dřeva a vlhkostí vzduchu, která není lineární. Tento mechanismus nerovnoměrného navlhání nazýváme ji Anderson – McCarthyho, či deBoer – Zwickerovou sorpcí a lze jej vyjádřit pomocí vzorce (3.1.3). Při ustáleném stavu odpovídá dané vlhkosti vzduchu při určité teplotě patričná *rovnovážná vlhkost dřeva (RVD)*. Její hodnota se liší podle toho, jestli je rovnovážného stavu dosaženo navlháním či schnutím, o tzv. *hysterezi sorpce*, která činí přibližně 3% (Horáček, 2008). V reálných podmínkách tento jev není jednoduché pozorovat, proto k měření navlhavosti a souvisejících vlastností bývá používáno zařízení DVS –

“dynamic vapour sorption apparatus”. Hill et al. (2011) pomocí něj zjistili, že pro opakující se cykly navlhání tepelně modifikovaného dřeva dojde k signifikantnímu snížení hystereze.

$$w = \frac{1}{B} \ln \frac{A}{\ln(1/\varphi)} \quad (3.1.3)$$

kde A a B jsou koeficienty vyjádřené rovnicemi: $A = 7,731706 - 0,014348 T$, $B = 0,008746 + 0,000567 T$, kde T vyjadřuje teplotu [K].

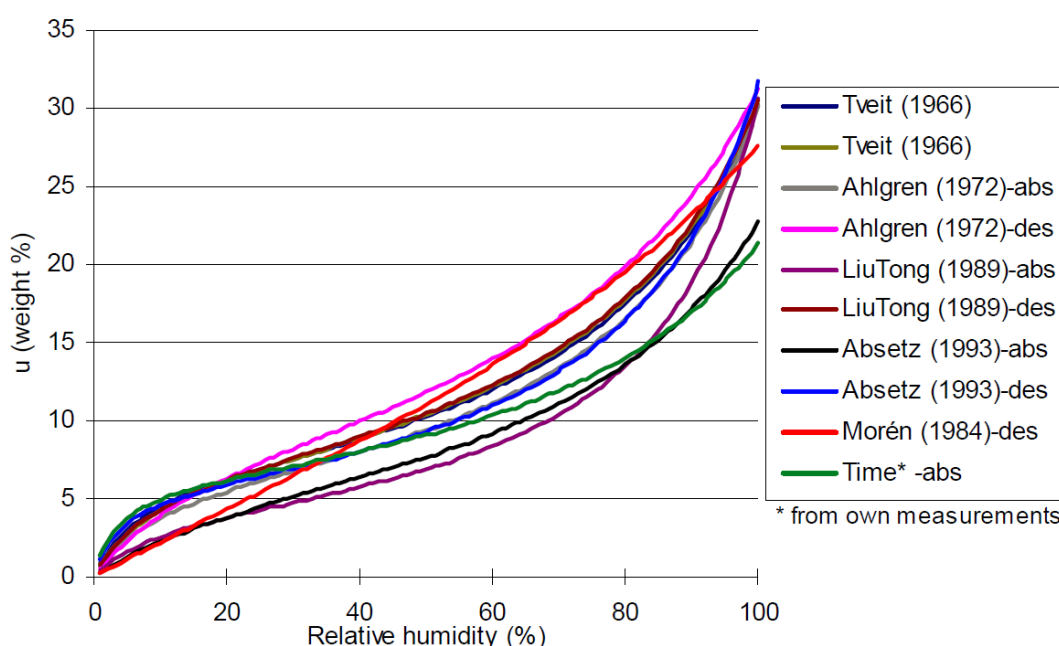
Rozlišujeme 3 oblasti sorpční izotermy (Obr. 3.1.1), a to oblast monomolekulární sorpce (5-7 %), polymolekulární sorpce a oblast kapilární kondenzace, která se začíná vyskytovat při rovnovážné vlhkosti dřeva 15-20% (Horáček, 2008). Zvýšení navlhavosti při vzdušné vlhkosti nad 70% a teplotě 20°C je pravděpodobně způsobeno změkčením hemicelulóz které při těchto podmínkách dosáhnou bodu skelného přechodu a umožní umístění většího počtu molekul vody (Engelund et al. 2013).



Obr. 3.1.1: Sorpční izotermy smrku *Picea Abies* (Dle Rode a Clorius, 2004, experiment dle Ahlgren 1972 a Heldin 1967)

V praxi navlhavost dřeva úzce souvisí s jevem difuze vodní páry. Schopnost dřeva vázat molekuly vody ve své buněčné stěně závisí především na jeho druhu,

objemové hmotnosti či teplotě okolního prostředí, a ve výsledku také ovlivňuje to, jak vodní pára dřevem prochází. U dřev s vysokým podílem extraktivních látek vede jejich odstranění ke zvýšení navlhavosti (Wangaard, 1967), z čehož lze také odvodit, že vyšší podíl extraktivních látek, například u dubu, může vést naopak ke snížení navlhavosti. Platnost modelu sorpční izotermy pro dané dřevo je daná, podobně jako mnoho dalších fyzikálních vlastností, samotnou nehomogenitou dřeva. Time (1998) shrnuje měření adsorpce a desorpce smrku (*picea abies*) několika autorů (Obr. 3.1.2). Rozdíl mezi některými měřeními je více než 8 hmotnostních procent. Spolehlivost propočtu vlhkosti dřeva dle podmínek, kterým je vystaveno, je omezená.



Obr. 3.1.2: Adsorpční a desorpční izotermy dřeva smrku (*picea abies*) (Time, 1998).

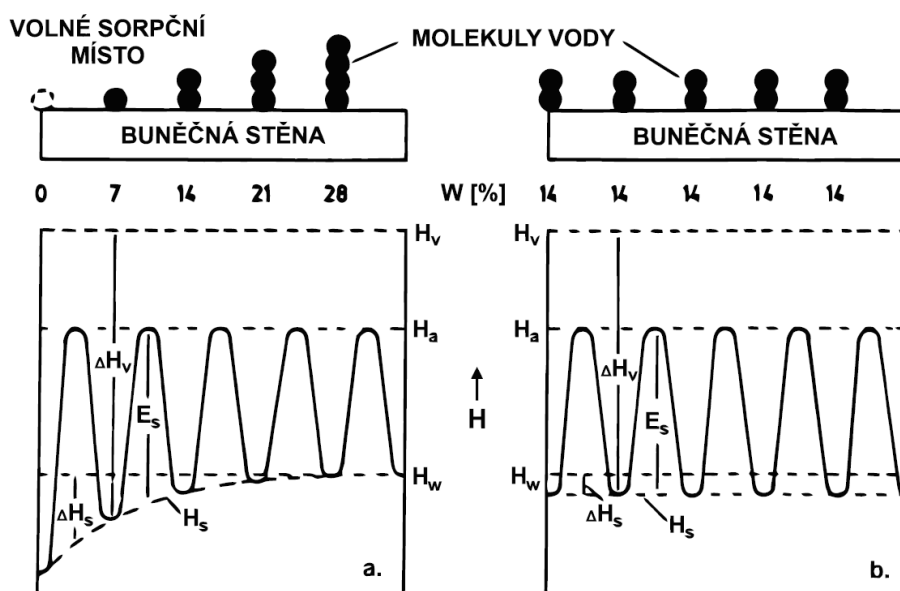
3.1.3 Mechanismus pohybu vody ve dřevě

Na pohyb vody ve dřevě lze nahlížet dle jeho charakteru jako na tok molekulární či objemový, neboli difuzi a propustnost. Pro difuzi dle Siau (1995) platí:

- Molekuly vody jsou sorbovány nebo vázány Van der Waalsovými silami či pomocí vodíkových můstků na sorpční místa ve dřevě (–OH skupiny). K předpokládanému navázání dochází v amorfni části celulózy.
- Na jedno sorpční místo v rámci *polymolekulární sorpce* připadá 1–5 (7) molekul vody.

- Polymolekulární sorpce nastává při rovnovážné vlhkosti dřeva 6–8%, po tuto hranici probíhá pouze sorpce *monomolekulární*, což odpovídá RVV 40-50% (Joly et al. 1996)

Difuzi tradičně chápeme jako pohyb vody vázané, propustnost jako pohyb vody volné. V současné době je asi nejpřesnější definicí difuze tzv. „efektivní difuze“ což je kombinovaný transport vodní páry skrz lumény buněk a přenos vody vázané na hydroxylové skupiny v buněčné stěně (Siau, 1995). V buněčné stěně by pak molekuly vody měly respektovat rozložení dle Obr. 3.1.3., děj ovšem není uniformní ale pravděpodobnostní. (Skaar, 1988).



Obr. 3.1.3: Předpokládaná distribuce molekul vody při a) nerovnoměrně rozložené vlhkosti, b) rovnoměrně rozložené vlhkosti, a znázornění energetických hladin H_v (entalpie vodní páry), H_a (entalpie aktivované vody), H_w (entalpie vody volné), H_s (entalpie vody vázané). (Skaar, 1988).

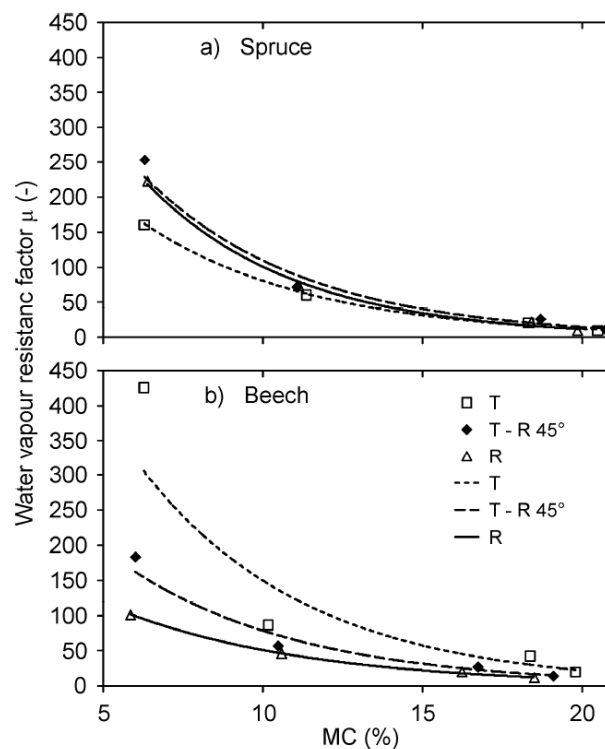
V odborné literatuře lze narazit také na nová zjištění:

- 1) Voda může být ve dřevě vázaná kromě celulózy i na lignin a hemicelulózy (Engelund et al., 2013)
- 2) Lze pozorovat výskyt pomalých a rychlých procesů sorpce, které je nutné dovysvětlit. Tyto procesy mohou být spojeny s rozdíly výsledků měření stacionární a nestacionární difuze. (Engelund et al., 2013)

- 3) Kapilární kondenzace se v přírodním dřevě nevyskytuje ve větším rozsahu (Engelund et al., 2013)
- 4) Existují také pochybnosti, že přístupnost OH skupin ve dřevě má zásadní vliv na navlhavost, je předpokládán nějaký dodatečný mechanismus (Rautkari et al. 2013).

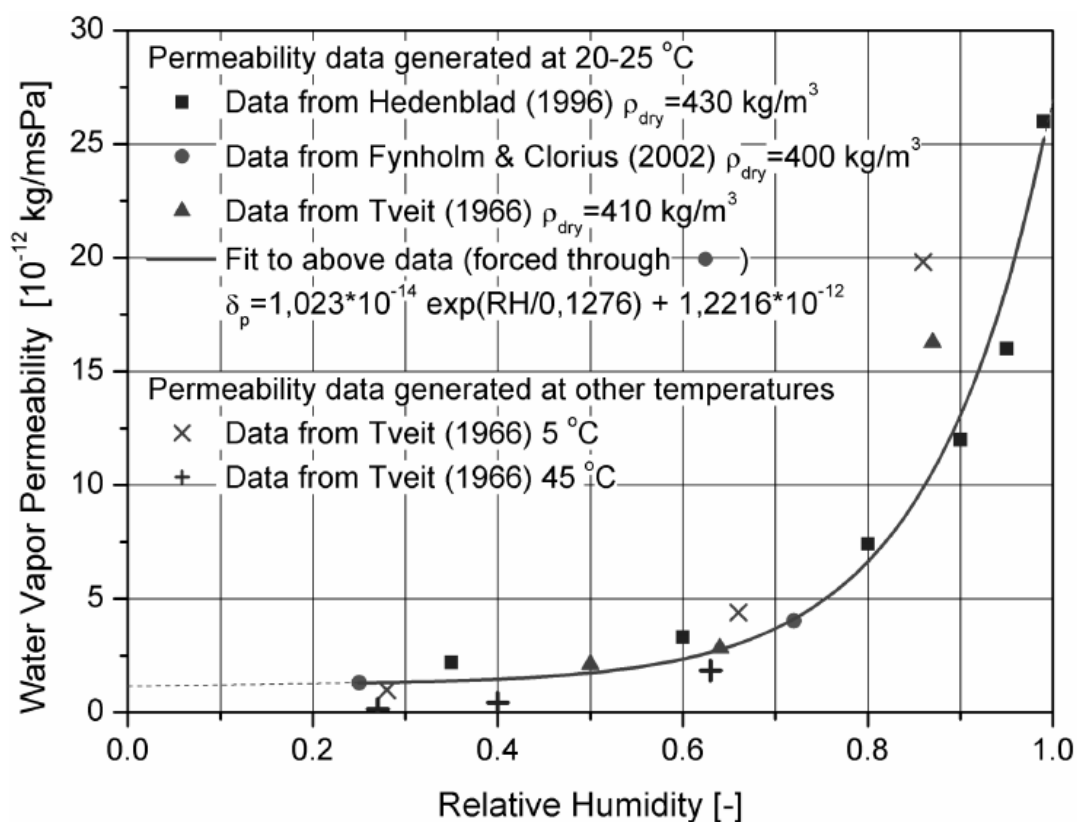
3.1.4 Vliv faktorů na difuzi

Difuze ve dřevě je ovlivňována nejen vlastnostmi samotného dřeva, ale i podmínkami prostředí, ve kterém se nachází. Ať už jde o koeficient difuze D používaný v dřevařství, nebo o koeficient difuzní vodivosti δ zmiňovaný v oboru stavební fyziky, vliv má anatomie dřeva, druh, objemová hmotnost, teplota vlhkost dřeva a vlhkost vzduchu, s níž souvisí parciální tlak vodní páry. Vliv odklonu vláken a vlhkosti na difuzní koeficient a faktor difuzního odporu smrku a buku v příčném směru zkoumal Sonderegger (2011). Buk má vyšší difuzní odpor ve směru tangenciálním, a to více než 3 krát, oproti tomu smrk má vyšší difuzní odpor ve směru radiálním, a to jen přibližně 1,3 krát. S rostoucí vlhkostí se rozdíly mezi anatomickými směry stírají (Obr. 3.1.4).



Obr. 3.1.4: Závislost faktoru difuzního odporu na vlhkosti pro dřeva smrku a buku pro různé odklony vláken v příčném směru (Sonderegger, 2011).

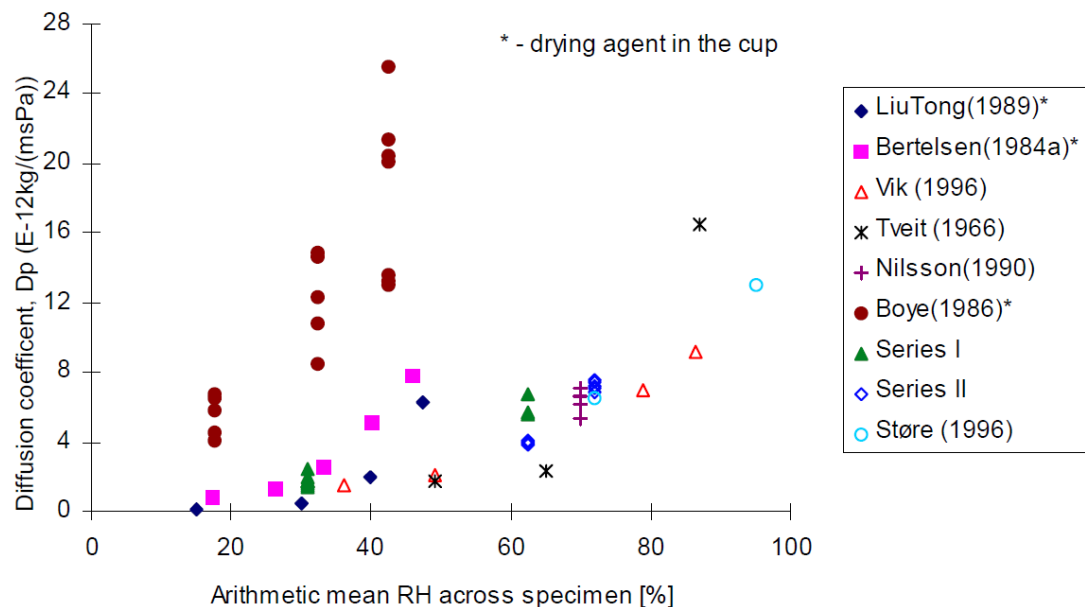
Zásadní pro porovnání výsledků experimentálně zjištěných koeficientů difuze je, jakou metodou byly zjištěny, stacionární pohárková zkouška totiž pro příčný směr dává hodnoty přibližně 2 krát vyšší než zkouška nestacionární (Sonderegger, 2011). Vedle běžného vyjádření závislosti difuzních vlastností na vlhkosti dřeva se lze setkat s vyjádřením závislosti na průměrné vlhkosti vzduchu, a to především v odborné literatuře spojené se stavební fyzikou. Závislost koeficientu difuzní propustnosti měřeném různými autory a různých podmínek shrnuje Rode a Clorius (2004). Takto vyjádřená difuzní vodivost (Obr. 3.1.5) je vhodná pro použití v numerickém modelu, kde se vyskytují i jiné materiály, než dřevo, pro které není koeficient difuze D znám.



Obr. 3.1.5: Závislost koeficientu difuzní vodivosti na relativní vlhkosti vzduchu pro smrč (picea abies) v příčném směru (Rode a Clorius, 2004).

Podobné vyjádření vlivu vlhkosti na difuzní vlastnosti dřeva použil Time (1998) ve svojí dizertační práci. Srovnání je ztížené tím, že pro výpočet relativní vzdušné vlhkosti použil kvadratický průměr podmínek na dvou stranách měřených vzorků. I přesto, že se data z Obr. 3.1.6 v některých případech jeví jako rozdílná, zvyšování koeficientu difuzní vodivosti s rostoucí vlhkostí vzduchu, a tedy i dřeva, je jednoznačné. Nejen dřevo, ale i materiály z něj odvozené, vykazují variabilitu difuzních vlastností s měnícími se podmínkami. Timusk (2008) popisuje vlhkostní závislost difuzní

vodivosti OSB desek, zmiňuje vliv hustoty a tloušťky, kromě jiného také předpokládá vysokou variabilitu u komerčních OSB. Podíl lepidla a jeho druh může mít u aglomerovaných materiálů zásadní vliv na difuzní vlastnosti. Navlhavost lepidel používaných v dřevozpracovatelském průmyslu měřili Wimmer et al. (2013).



Obr. 3.1.6: Závislost koeficientu difuzní vodivosti na relativní vlhkosti vzduchu pro smrč (*Picea abies*) v příčném směru (Time, 1998).

Samotná anatomická struktura je těžko zohlednitelná pro vyjádření fyzikálních vlastností. Jednou z možností je zohlednění velikosti dvojteček, která může mít vliv na prostup vodní páry mezi lumény jednotlivých buněk dřeva. To, že větší dvojtečky vedou ke zvýšení koeficientu difuze prokázali Kang et al. 2007. Již zmíněný podíl extraktiv se dá považovat za vliv chemického složení, i když základním stavebním látkám (celulóza, hemicelulózy a lignin) nepřisuzujeme zásadní podíl odlišností fyzikálních vlastností jednotlivých dřev. U exotických dřev nemá podíl extraktivních látek zásadní vliv na rychlost monomolekulární sorpce, polymolekulární sorpci a snižování MH už ale ovlivňují. Považujeme-li samotnou sorpci za součást děje difuze vodní páry skrz dřevo, podíl extraktivních látek ve dřevě musí mít vliv také na míru difuze (Popper et al. 2006). Neméně významný vliv může mít podíl tlakového dřeva u jehličnanů zvyšující difuzní odpor, oproti tomu dřevo tahové u listnáčů difuzní odpor ve srovnání s běžně rostlým dřevem snižuje (Tarmian et al. 2012).

3.1.5 Fyzikální vlastnosti vodní páry

Vodní pára je běžnou součástí vzduchu. V závislosti na teplotě vzduchu se mění jeho kapacita vodní páru pojmout, tu vyjadřujeme *parciálním tlakem nasycené vodní páry* (3.1.4).

$$p_0 = k e^{-E/RT} \quad (3.1.4)$$

kde p_0 je parciální tlak nasycené vodní páry [Pa], k je Boltzmannova konstanta daná podílem univerzální plynové konstanty k Avogadrovu číslu, $k=R/N=1,3 \cdot 10^{11}$, E je průměrná aktivační energie potřebná pro změnu skupenství vody z kapalného na plynné ($E=43470 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Vedle analytického vzorce lze vodní parciální tlak nasycené vodní páry vyjádřit pomocí empirického vzorce dle ČSN EN ISO 12572. Pro běžné teploty v interiérech a exteriérech budov dává vzorec (3.1.5) srovnatelné výsledky se vzorcem (3.1.4).

$$p_0 = 610,5 \exp \frac{17,269 T}{237,3 + T} \quad (3.1.5)$$

Relativní množství vodní páry ve vzduchu vyjadřujeme v procentech nebo bezrozměrným číslem, jde o podíl parciálního tlaku vodní páry a parciálního tlaku nasycené vodní páry (3.1.6). Pro přesnou informaci je třeba uvádět, jaké teplotě vzduchu daná *relativní vlhkost* (značená *RVV* nebo φ) odpovídá.

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100 \quad (3.1.6)$$

kde φ je relativní vlhkost vzduchu [%], p je parciální tlak vodní páry [Pa] a p_0 je parciální tlak nasycené vodní páry [Pa].

3.1.6 Funkční vztahy mezi RVD, RVV, a parciálním tlakem vodní páry

K vyjádření závislostí částečného tlaku vodní páry, relativní vlhkosti vzduchu a vlhkosti dřeva ve stavu vzájemné rovnováhy, lze použít vzorce (3.1.7), (3.1.8) a (3.1.9). Pro analytické výpočty v kapitole 4.2 je nezávislou proměnnou vlhkost dřeva (3.1.7), z té lze poté vyjádřit RVV (3.1.8), a jelikož známe i teplotu, dovedeme vypočítat částečný tlak vodní páry (3.1.9).

$$w = \frac{1}{B} \ln \frac{A}{\ln(1/\varphi)} \quad (3.1.7)$$

$$\varphi = e^{-Ae^{-Bw}} \quad (3.1.8)$$

$$p = p_0 \varphi \quad (3.1.9)$$

3.2 Modelování vlhkostního pole

Numerické modely vlhkostního pole jsou využívány pro optimalizaci sušení dřeva, tímto směrem se v minulosti ubíraly ve velké míře i výzkumy na Mendelově univerzitě (Horáček 2004, Trcala 2009 a další). Tato práce je však spíše zaměřena na modely spojené se stavební fyzikou, což je velmi progresivní obor především z důvodu implementace směrnice č. 2010/31/EU a kladení čím dál většího důrazu na snižování energetické náročnosti budov. Matematické vyjádření difuze ve dřevě je ztíženo abnormalitami tzv. „non-Fickian“ difuze, což lze napravit použitím „double Fickian“ modelu, jež vyjádřil Krabbenhøft (2003). Uvažuje současně difuzi vodní páry a vody vázané v buněčné stěně, zahrnuje také rychlost sorpce a její závislost na přírůstku vlhkosti a míře nasycení, a je tak schopen přesvědčivě modelovat abnormality, které pozoroval Wadsö (1993a, 1993 b). K modelování difuze se vzhledem ke komplexnosti problematiky i jevu samotného používají téměř výhradně počítačové programy. Dle Canada Mortgage and Housing Corporation (2003) jich existuje 45, přičemž Delgado et al. (2013) hovoří o dalších 12. Většina z nich je ve fázi vývoje, z celkových 57 programů je jen 14 dostupných široké veřejnosti. Liší se v typu použitého modelu - 1D, 2D a 3D, v numerickém schématu (stacionární a nestacionární), možnostech rozšíření (materiálové knihovny), zohlednění závislosti materiálových vlastností na vlhkosti a teplotě, zohlednění proudění vzduchu či průvzdušnosti, a mimo jiné také v samotném uživatelském rozhraní. Mezi nejrozšířenější programy pro modelování vlhkostního a teplotního pole v konstrukci patří Moisture-expert, Wufi a Comsol Multiphysics, jejichž princip funkce je v této kapitole shrnut. Dalšími používanými programy jsou například BMOIST, HAM, nebo pro komplexní návrh pasivních domů určený PHPP.

3.2.1 Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics je softwarová platforma pro obecné použití, založená na pokročilých numerických metodách pro modelování a simulaci fyzikálních problémů. Pomocí přídatných modulů lze definovat a řešit například teplotní a vlhkostní tok se zohledněním v podstatě libovolného zadání. Definicí geometrie, vlastností objektů, okrajových podmínek a samotných fyzikálních rovnic lze spočítat 2-D stacionární teplotní a vlhkostní pole konstrukce složené z několika materiálů, což je vhodné pro účely této diplomové práce.

3.2.2 Wufi

Rodina komerčních programů Wufi pracuje s 1-D nebo 2-D modely přenosu tepla a vlhkosti. Software byl vyvinut institutem Fraunhofer pro stavební fyziku (Fraunhofer Institute for Building Physics) sídlícím poblíž německého Mnichova. Je verifikován daty z venkovních a laboratorních testů, přičemž umožňuje realistickou kalkulaci tepelně-vlhkostního chování konstrukce při nestacionaritě za uvažování měnících se klimatických podmínek během roku. Přenos tepla se uvažuje kondukcí, tepelným tokem (při zohlednění změn skupenství), krátkovlnnou sluneční radiací a dlouhovlnnou ochlazující radiací v noci. Prostup vodní páry je modelován jako difuze a kapilární transport. Stěžejními rovnicemi pro přenos vlhkosti a tepla jsou (3.2.1) a (3.2.2) (Delgado et al., 2013).

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \nabla \left(D_{\varphi} \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_0) \right) \quad (3.2.1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \nabla (\lambda \nabla T) + h_v \nabla (\delta_p \nabla (\varphi p_0)) \quad (3.2.2)$$

kde $\partial H / \partial T$ je tepelná kapacita materiálu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$], $\partial w / \partial \varphi$ je vlhkostní kapacita [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \%$], D_{φ} je koeficient vlhkostní vodivosti ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) a h_v je výparné teplo vody ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

3.2.3 Moisture expert

Moisture-expert je software vycházející z původní evropské rodiny programů Wufi, přizpůsobuje se použití v USA a Kanadě. S vlhkostním a teplotním tokem je zacházeno odděleně, jako hybné síly difuze jsou uvažovány tlak nasycené vodní páry a

relativní vlhkost vzduchu, nicméně je možno zohlednit teplotní závislost sorpčních izoterm.

3.3 Materiály pro dřevěné konstrukce

Dřevo jako materiál pro stavbu je dnes čím dál tím více poptávaným obchodním artiklem. Pro statickou konstrukční část jsou používány téměř výhradně jehličnany, a to především smrk, borovice, jedle a modřín. Nezbytnou součástí sendvičové stěny jsou deskové materiály a izolace, jejichž vlastnosti jsou v této kapitole také shrnuty.

3.3.1 Vlastnosti dřeva

Dřevo jako nehomogenní přírodní materiál není jednoduché z hlediska fyzikálních vlastností popsat. Pro účely stavební fyziky ovšem potřebujeme alespoň střední hodnoty veličin, abychom byli schopni danou konstrukci posoudit. Rozdíly ve vlastnostech dřev používaných pro stavební účely jsou uvedeny v Tab. 3.3.1.

Tab. 3.3.1: Běžné fyzikální vlastnosti jednotlivých dřev. Hustota a meze hygroskopicity dle Horáčka (2008); koeficienty objemového bobtnání dle Ugoleva (1975); tepelná vodivost dle Ross (2010).

Druh dřeva	SM	BO	JD	MD
ρ_0 [kg·m ⁻³]	420	505	405	560
ρ_{12} [kg·m ⁻³]	450	535	435	590
MH [%]	30–34	26–28*	30–34	26–28
$K_{\alpha V}$ [%/1%]	0,5	0,51	0,47	0,61
λ_0 [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,09	0,09	0,10	0,13
λ_{12} [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,11	0,11	0,12	0,15

*Platí pro jádrové dřevo s nízkým obsahem pryskyřice. Pro BO s vysokým obsahem pryskyřice je uvedena MH 22–24 %.

3.3.2 Používané materiály

Konstrukční dřevo – ve stavebnictví je nejčastěji používáno buď dřevo rostlé ve formě kulatiny, či různými způsoby lepené ve formě KVH, BSH, CLT, LVL, LSL a dalších materiálů. Rostlé stavební dřevo je nejčastěji pevnostní třídy C24, rozměrů 50/80 až 60/240 mm, délky 3-5 m a kvalita povrchu je hoblovaná či řezaná, používané dřeviny jsou smrk, jedle a borovice. KVH je délkově napojované hoblované sušené stavební dřevo s vlhkostí 15±3%, vhodné pro zabudování do sendvičové stěny rámové

dřevostavby, používané rozměry jsou 60/40 až 80/240 mm, v provedeních DUO a TRIO až 200/400, délky 12-18 m. Vyrábí se ze dřeva smrku, jedle nebo modřínu. (Kolb, 2011)

OSB – „Oriented strand board“, tedy desky z orientovaných plochých třísek, jsou typicky využívané k opláštění rámové konstrukce dřevostaveb. Tyto konstrukční desky se dělí podle tříd na OSB/1, OSB/2, OSB/3 a OSB/4, přičemž poslední dvě mají zvýšenou odolnost proti vlhkosti. V současné době jsou již formaldehydová lepidla nahrazena polyuretanovými, zanedbatelné množství formaldehydu tak emituje pouze samotná dřevní hmota. Nejčastější rozměry tabulí jsou 625/2500, 675/2500 a 1250/2500, maximálně však i 5000/2500 mm, tloušťky jsou ve výčtu 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 18, 22, 25, 28, 30, 32, 38 a 40 mm, za nejběžnější lze označit 15, 18 a 22 mm. Desky mohou být broušené a nebroušené, s perem a drážkou po obvodě, pro vylepšení neprůvzdušnosti a funkce parobrzdy existuje i provedení s jednostranně přilepenou papírovou vrstvou.

Sádrokartonové desky – hojně používaný plošný materiál vyznačující se především snadnou zpracovatelností. Existují v různých provedeních jako akustické desky (modré), protipožární (červené) nebo se zvýšenou odolností proti vlhkosti (zelené), používané rozměry jsou 2000/1250 mm v tloušťkách 12,5, 15 a 18 mm.

Sádrovláknité desky – stavební desky ze směsi sádry a celulózových vláken v současnosti ve velké míře nahrazují sádrokarton obzvláště pro opláštění obvodových stěn a vnitřních příček, lze je také aplikovat pro systémy podlah. Jsou klasifikovány jako nehořlavé a svou vyšší hustotou přispívají ke zlepšení akustických vlastností dřevostavby. Zároveň lépe pracují s vlhkostí a tak není třeba rozlišovat více druhů, jako u sádrokartonu, jelikož jedna deska plní požadavky na voděodolnost, akustické vlastnosti a požární odolnost najednou. Obsah vlhkosti je při teplotě 20°C a RVV 65% mezi 1-1,5%, tyto desky jsou tedy minimálně hygroskopické. Vyráběné rozměry jsou 2000/625 až 3000/1250 mm při tloušťkách 10, 12,5, 15, a 18 mm.

DHF desky – konstrukční desky vyráběné suchým způsobem, jako pojivo se používají PU pryskyřice. Díky nízkému faktoru difuzního odporu, odolnosti proti vlhkosti a pevnosti se používají pro vnější opláštění difuzně otevřených dřevostaveb. Formáty desek jsou 2500/625 až 3000/1250 při tloušťkách 13 a 15 mm.

DVD desky – izolační desky vyráběné mokřým způsobem, při němž je rozvlákněná dřevní hmota pojena především ligninem. Jsou dodávány v různých provedeních dle účelu použití nejčastěji jako nadkroevní, podlahová, nebo vnější izolace pro stěny dřevostaveb. Fasádní izolace lze použít v kombinaci s moderními provětrávanými fasádními systémy, jsou však i přímo omítnutelné. Formáty P+D desek jsou 1325/615 a 2625/1205 mm, tloušťky 40, 60, 80 a 100 mm.

Minerální izolace – izolační materiál hojně používaný pro vnitřní a fasádní izolaci dřevostaveb. Výroba je založena na rozvláknování taveniny směsi hornin a dalších přísad, vlákna jsou hydrofobizována. Rozměry rohoží pro vnitřní izolaci dřevostaveb jsou 1200/580 mm, tloušťky od 60 do 180 mm s odstupňováním po 20 mm.

Foukaná izolace na bázi celulózových vláken – je vyráběna recyklací novinového papíru, požární odolnosti je dosaženo přísadami kyseliny borité a síranu hořečnatého. Při zvýšených požadavcích na požární odolnost již však není tato izolace vhodná. Tepelnou vodivostí odpovídá čedičové vatě, tepelnou kapacitu má nicméně výrazně vyšší (2020 oproti $800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a tak při izolaci střechy a vnitřku stěn dřevostavby pomáhá prodloužit fázový posun, což bývá poměrně velká slabina dřevostaveb. Pro správné a dlouhodobé fungování materiálu je nutné dodržet aplikační předpisy, jež se liší dle umístění materiálu ve stavbě. Izolace tak může mít objemovou hmotnost při volném foukání malých vrstev $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo při foukání do prefabrikovaných stěn až $70 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Při vyšší hustotě je rozdíl tepelné kapacity oproti minerální izolaci ještě umocněn a bývá tak dosaženo vysokého tepelného komfortu díky zamezení přehřívání v létě a lepší akumulaci tepla v zimě. Kromě jiného zvýšením hmotnosti stěny foukaná celulózová izolace také zlepšuje akustický komfort. Přehled tepelných a vlhkostních vlastností zmíněných materiálů je shrnut v Tab. 3.3.2.

Tab. 3.3.2: Tepelné a vlhkostní vlastnosti nejběžnějších materiálů pro dřevostavby dle českých technických norem.

Název materiálu	Objemová hmotnost ρ [kg·m ⁻³]	Tepelná vodivost λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Faktor difuzního odporu μ [-]	Koeficient difuzní vodivosti δ [kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹]
Dřevěné konstrukční prvky	400-500	0,18	157	1,20E-12
Sádrokartonová deska	750	0,22	9	2,09E-11
Sádrovláknitá deska	1150	0,32	13	1,45E-11
Izolace z celulózových vláken	30-70	0,039	1	1,88E-10
Minerální izolace fasádní	112	0,039	3,55	5,30E-11
Minerální izolace vnitřní	30	0,039*	1	1,88E-10
Fasádní polystyren	20	0,04	40	4,70E-12
Dřevovláknitá deska	230	0,046	5	3,76E-11
OSB/3	650	0,13	150**	1,25E-12
DHF deska	600	0,1	11	1,71E-11
Parozábrana	-	-	200000	9,40E-16
Lepidlo	1250	0,79	21	8,95E-12
Akrylátová omítka	1750	0,65	95	1,98E-12
Silikátová omítka	1800	0,86	40	4,70E-12

* ISOVER woodsil $\lambda=0,035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

**EGGER eurostrand 3 $\mu=300/200$ (suchá a mokrá miska), KRONOSPAN Airstop finish eco $\mu=380$ (pouze suchá miska). KRONOSPAN Superfinish eco $\mu=211/164$ (suchá a mokrá miska)

δ vzduchu při 20°C uvažována $1,88\text{e-}10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$

3.3.3 Konstrukční systémy dřevostaveb

Způsobů konstrukce dřevostaveb se za jejich dlouhou historii vyvinulo mnoho, současně používané konstrukční systémy jsou (Vaverka et al., 2008):

- Masivní dřevostavby (srubová stavba, novodobé masivní stavby)
- Elementární dřevostavby (rámová, panelová, modulový systém)
- Skeletové dřevostavby (historický hrázděný systém, sloupkový systém)

Z pohledu stavební fyziky je u skladby stěny dřevostavby podstatná tepelná vodivost jednotlivých materiálů, tepelná kapacita, z vlhkostních vlastností je to pak součinitel difuzní vodivosti, případně faktor difuzního odporu nebo ekvivalentní difuzní tloušťka, a také fakt, zda je daný materiál navlhavý a do jaké míry. Běžně se skladby stěn dělí na difuzně otevřené a difuzně uzavřené. Princip *difuzně uzavřené skladby* pramení mimo jiné z používání polystyrenu jako vnějšího zateplovacího systému. Pěnový polystyren je materiálem s difuzním odporem $\mu=40$, omezuje tak odvod vlhkosti ze stěny do exteriéru. Z toho důvodu je třeba minimalizovat množství vlhkosti

kteřé do stěny z interiéru difunduje, k tomu účelu jsou používané fóliové parozábrany s difuzním odporem minimálně $\mu=20000$. U difuzně uzavřené skladby stěny tak zamezujeme prostupu vodní páry skrz konstrukci. V *difuzně otevřené dřevostavbě* má vnější zateplovací systém daleko lepší schopnost propouštět vodní páru, faktor difuzního odporu je u fasádní minerální vaty $\mu=3,55$. Z interiérové strany je použita tzv. parobrzdá, nejčastěji v podobě OSB desky. Difuzní odpor parozábran je velice variabilní, minimální hodnota $\mu=150$. Materiály v difuzně otevřené stěně by měly být seřazeny tak, aby jejich difuzní odpor směrem z interiéru do exteriéru postupně klesal, aby nedocházelo ke kumulaci vodní páry v konstrukci. Vzhledem ke stále lepším parametrům parozábran již dnes hovoříme spíše o *difuzně pootevřených stěnách*.

3.4 Technické normy

V současnosti technické normy pracují s difuzními vlastnostmi stavebních materiálů včetně dřeva z pohledu faktoru difuzního odporu a součinitele difuzní vodivosti. Za hybnou sílu je považován parciální tlak vodní páry, což hlediska fyzikálních vlastností dřeva není považováno za zcela korektní přístup, nicméně pro potřeby výpočtů a vlhkostně technického posouzení je matematicky proveditelný a v praxi běžně používaný. Vliv faktorů na difuzi, a to především vlhkosti dřeva, uvedený v kapitole 3.1.4, je zohledněn normami ČSN 730540-3 a ČSN EN ISO 12572 v podobě předepsaných zkoušek suchou a mokrou miskou, pokyny jsou ale nekonzistentní (Slanina, 2006). Pro hojně používané dřevo smrku jsou hodnoty součinitele difuzní vodivosti v závislosti na vlhkosti dřeva, parciálním tlaku vodní páry nebo relativní vlhkosti vzduchu zjistitelné z vědeckých článků (Valovirta a Vinha, 2004; Rode a Clorius, 2004), ČSN 730540-3 uvádí pouze konstantní výpočtovou hodnotu $1,2 \cdot 10^{-12}$ a v technických listech materiálů jsou suché a mokré veličiny uvedeny pouze zřídka. Obecně není postoj k fenoménu variability difuzních vlastností hygroskopických materiálů technickými normami ve větší míře zohledňován, mimo jiné také kvůli časově náročnému postupu zjištění koeficientů difuzní vodivosti v různých podmínkách. Následující podkapitoly dávají přehled o používaných veličinách a jejich významu, je také nastíněn postup výpočtu množství zkondenzované vodní páry v konstrukci.

3.4.1 Součinitel difuzní vodivosti

Součinitel difuzní vodivosti δ , jehož jednotka je $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$, je veličinou závislou na vlhkosti materiálu stejně jako koeficient difuze D . Za hybnou sílu je považován parciální tlak vodní páry, což je z pohledu fyzikálních vlastností dřeva ne příliš uznávaný přístup. Obor stavební fyziky nicméně pro posouzení konstrukcí složených i z jiných materiálů, než je dřevo, tuto veličinu vyžaduje. Norma ČSN 730540-3 uvádí hodnotu pro dřevo $\delta = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ pro difuzní tok kolmý k vláknům a $\delta = 4,2 \cdot 10^{-12} \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ pro difuzní tok rovnoběžný s vlákny. S variabilitou difuzních vlastností je tedy uvažováno pouze v ČSN EN ISO 12572 předepsanými zkouškami tzv. "suchou a mokrou miskou". Obecné vyjádření koeficientu difuzní vodivosti udává rovnice (3.4.1)

$$\delta = -\vec{j} \frac{\partial x}{\partial p} \approx \frac{\Delta m}{\Delta t S} \frac{\Delta x}{\Delta p} \quad (3.4.1)$$

kde δ je součinitel difuzní vodivosti materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$], $-\vec{j}$ je hustota difuzního toku [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], $\partial p/\partial x$ je převrácená hodnota gradientu parciálního tlaku vodní páry, Δm je změna hmotnosti soustavy [kg], Δt je změna času [s], a S je plocha přes kterou difuze probíhá [m^2].

3.4.2 Faktor difuzního odporu

K alternativnímu vyjádření součinitele difuzní vodivosti bývá používán faktor difuzního odporu μ . Jde o bezrozměrnou veličinu vyjadřující kolikrát je daný materiál lepší difuzní izolant, než vzduch při dané teplotě. Norma ČSN 73 0540-3 udává pro dřevo $\mu = 157$ pro difuzní tok kolmý k vláknům a $\mu = 4,5$ pro difuzní tok rovnoběžný s vlákny. Způsob výpočtu pomocí empirického stanovení součinitele difuzní vodivosti vzduchu udává rovnice (3.4.2).

$$\mu = \frac{\delta_{vz}}{\delta} = \frac{2 \cdot 10^{-7} T^{0,81} / p_{atm}}{\delta} \quad (3.4.2)$$

kde μ je faktor difuzního odporu [-], δ_{vz} je součinitel difuzní vodivosti vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] a p_{atm} je atmosferický tlak [Pa]

3.4.3 Ekvivalentní difuzní tloušťka

Hojně používanou veličinou pro vyjádření difuzních vlastností tenkých materiálů, jako jsou třeba fólie, omítky, nebo nátěry, je ekvivalentní difuzní tloušťka. Hodnota S_d udává jak velká vrstva vzduchu má stejný difuzní odpor, jako daný výrobek či materiál.

$$S_d = \frac{d}{\delta} \delta_{vz} = R_d \delta_{vz} = \mu d \quad (3.4.3)$$

kde S_d je ekvivalentní difuzní tloušťka [m], d je tloušťka materiálu [m], a R_d je difuzní odpor [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} \cdot \text{kg}$].

3.4.4 Kondenzace vodní páry v konstrukci

České technické normy požadují, aby byly bez kondenzace všechny konstrukce, u nichž by zkondenzovaná vodní pára mohla ohrozit jejich požadovanou funkci. Splnění tohoto požadavku se prokazuje výpočtem s použitím návrhové venkovní teploty a návrhové teploty a vlhkosti vnitřního vzduchu. Aktuálně české technické normy předepisují dvě metodiky pro posouzení kondenzace uvnitř konstrukcí, obě jsou založeny na glaserově metodě. Norma ČSN 73 0540-4 uvažuje jeden výpočtový stav s teplotou -12 až -21 °C, přičemž je teplota postupně zvyšována. Výstupem jsou dvě hodnoty - roční bilance kondenzátu a kapacita odparu. V ČSN EN ISO 13788 se oproti tomu uvažují průměrné měsíční teploty a kumulace kondenzátu po měsících. Nevýhodou je, že nelze uvažovat s teplotami nižšími než je minimální průměr -5 °C v nejmraznějším měsíci, proto se k posouzení konstrukce používají v některých případech obě metody současně (Svoboda, 2014). Pro stanovení okrajových podmínek existují návrhové tabulky s hodnotami teplot vnějšího prostředí dle teplotní oblasti a s hodnotami teplot a relativních vlhkostí vzduchu dle účelu místnosti. Dle ČSN 73 540-4 je kritickou relativní vlhkostí pro růst plísní 80 %, pro kondenzaci 100%. Ani jedna z norem ve výpočtech množství zkondenzovaných par neuvažuje s vlhkostní variabilitou součinitele difuzní vodivosti.

3.4.5 Pohárková zkouška

Požadavky a doporučení pro zjišťování koeficientů difuzní vodivosti jsou stanoveny normami ASTM E96 a ČSN EN ISO 12572. Princip zkoušky spočívá v měření hmotnostních úbytků nebo přírůstků při známých podmínkách na dvou plochách vzorku. Z dat lze snadno spočítat hustotu difuzního toku a poté i příslušný difuzní koeficient dle zvolené hybné síly. Uvedené normy částečně zohledňují závislost difuzních vlastností na vlhkosti v podobě metod suché a mokré misky. V zásadě se jedná o předepsání podmínek uvnitř a vně misky, kdy vně je uvažováno s $\varphi=50\%$ a $T=23^{\circ}\text{C}$, uvnitř suché misky je použito vysoušedlo a teoreticky je zde $\varphi=0\%$, v mokré misce je demineralizovaná voda a φ dosahuje 100%. Další doporučení se týkají tvarů a rozměrů samotných pohárků, použitých těsnících prostředků, dovolených odchylek, rozměrů vzorků a v případě americké normy i přepočtu imperiálních jednotek na metrické. Alternativní metodikou pro vylepšenou pohárkovou zkoušku se zabývali Eitelberger a Svensson (2012).

4 Materiál a metodika

Prvním krokem práce bylo vlastní měření difuzních vlastností dřeva pomocí pohárkové zkoušky. Hodnoty byly porovnány s upraveným analytickým výpočtem vyjadřujícím závislost koeficientu difuzní vodivosti na parciálním tlaku vodní páry. Vypočtené hodnoty pak tvořily vstupy difuzních vlastností dřeva v programu COMSOL Multiphysics, kde bylo posouzeno několik stavebních detailů, a byl porovnán lineární výpočet s nelineárním.

4.1 Vlastní experiment – pohárková zkouška dle ČSN EN ISO 12572

Pro ověření závislosti difuzní vodivosti na vlhkosti a tedy i parciálním tlaku vodní páry a relativní vzdušné vlhkosti byla provedena pohárková zkouška dle ČSN EN ISO 12572. Kromě metody suché a mokré misky byla přidána série vzorků s nasyceným roztokem NaCl v pohárku. Kruhové vzorky o průměru 89 mm a tloušťce 5,9 mm byly připraveny pomocí hoblovky a modelářské kmitací pilky. Bylo použito dřevo smrku ztepilého (*Picea abies*) s odklonem letokruhů 45°, transport vodní páry při experimentu tedy probíhal vždy v příčném směru a výsledná hodnota koeficientu difuze se dala označit za průměrnou mezi R a T. Před zahájením měření byly vzorky zváženy a byla vypočtena jejich hustota. Byly pak rozčleněny do tří skupin tak, aby průměrná hustota a její variabilita byla přibližně stejná pro všechny tři soubory měření.



Obr. 4.1.1: Zástupci 3 souborů pohárků, zleva „suchá miska“ (silikagel s předpokládanou RVV uvnitř pohárku 0%, sada I.), nasycený roztok NaCl s RVV 75,3% (sada II.) a „mokrý miska“ (demineralizovaná voda RVV 100%, sada III.).

Připravené vzorky byly přiřazeny k jednotlivým pohárkům, do kterých byla navážena potřebná média. Pohárky byly vzorky přikryty a kolem každého byla omotána těsnicí PVC páska. Výsledkem tedy byly soustavy pohárek-médium-vzorek dřeva (Obr. 4.1.1), jež po umístění do místnosti se stabilními podmínkami vykazovaly hmotnostní úbytky, nebo v případě silikagelu přírůstky. K pravidelnému vážení v intervalu 24 hodin byly použity laboratorní váhy Radwag PS 600.R2 s rozsahem měření 0,001 a s přesností $\pm 0,005$. Pro sledování podmínek v místnosti byl použit vlhkoměr a teploměr Greisinger GMH 3350. Po ustálení hodnoty hmotnostních úbytků byl difuzní tok považován za stacionární a bylo tak možné spočítat součinitele difuzní vodivosti. Těm byly přiřazeny průměrné hodnoty R_{VV} dle podmínek uvnitř a vně pohárku. Z naměřených hodnot byla vytvořena křivka závislosti součinitele difuzní vodivosti na vzdušné vlhkosti, kterou lze srovnat s analyticky vypočtenými hodnotami a s hodnotami z literatury. Na konci měření byla zjištěna průměrná rovnovážná vlhkost vzorků váhovou metodou, což bylo umožněno jednoduchým připevněním k pohárku pomocí těsnicí PVC pásky. Dle normy ČSN 49 0123 (vzorec (4.1.1) a předchozích výsledků měření (Maňák, 2013) byl stanoven minimální počet vzorků pro jednu sadu měření na 6. Bylo rozhodnuto, že pro každou sadu měření bude použito 10 vzorků, dohromady 30.

$$n_1 = \frac{t_\alpha^2 V_1^2}{\Delta x^2} \quad (4.1.1)$$

kde n_1 je velikost výběrového souboru, t_α je kvantil studentova rozdělení (pro 95% významnost $\alpha=1,96$), V_x je variační koeficient výběrového souboru [%] a Δx je požadovaná relativní chyba [%].

4.2 Analytický výpočet

Pro analytické vyjádření koeficientu difuzní vodivosti je použita klasická teorie dle Choong 1965 a Stamm 1960 rozšířena v Siau 1995, která pracuje s koeficientem difuze. Kombinace rovnic (4.2.1), (4.2.2) a (4.2.3) vycházejících z prvního Fickova zákona (1855) je použita pro výpočet koeficientu difuzní vodivosti v závislosti na parciálním tlaku vodní páry či vlhkosti vzduchu. Vstupními veličinami pro výpočet jsou hustota, koeficient objemového bobtnání, mez hygroskopicity, teplota a vlhkost daného dřeva. Vzhledem k charakteru difuze vodní páry v konstrukcích dřevostaveb byl zkoumán pouze součinitel difuzní vodivosti v příčném směru δ_T . Technicky byl výpočet proveden pomocí tabulkového procesoru excel.

$$\vec{j} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4.2.1)$$

$$\vec{j} = -\delta \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4.2.2)$$

$$\delta = D \frac{\partial c}{\partial p} \quad (4.2.3)$$

kde D je koeficient difuze [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] a c je koncentrace vlhkosti v dřevní hmotě [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Schéma analytického výpočtu je uvedeno níže. Dává přehled o mechanismu, jakým jsou odvozeny koeficienty difuzní vodivosti dle vypočtených koeficientů difuze.

$$\delta_T = D_T \frac{\partial c}{\partial p} \wedge D_T = f_1(w, T, \rho_0) \wedge c = f_2(w) \wedge w = f_3(p, T) \Rightarrow \delta_T = f(p, T, \rho_0)$$

4.2.1 Koeficient difuze v příčném směru

Koeficient difuze v příčném směru lze zapsat jako kombinací vodivosti vody vázané v buněčné stěně a vodní páry v lumenech, což vyjadřuje vzorec (3.1.5), používaný mimo jiné také pro určení tepelné a elektrické vodivosti dřeva. Dosazením rovnic (4.2.6) a (4.2.7) do (4.2.5) vede ke konečnému vyjádření v (4.2.18).

$$\frac{1}{g_T} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \quad (4.2.4)$$

$$D_T = g_T = \frac{g_1 g_2}{g_1 + g_2} \quad (4.2.5)$$

$$g_1 = \frac{D_{BT}}{(1 - P_w)(1 - \sqrt{P_w})} \quad (4.2.6)$$

$$g_2 = \frac{D_V}{(1 - P_w)} \quad (4.2.7)$$

kde g_t je vodivost v příčném směru, g_1 je vodivost buněčné stěny, g_2 je vodivost lumenu, D_{BT} je koeficient difuze buněčné stěny v příčném směru, D_V je koeficient difuze v lumenu a P_w je pórovitost.

Dle Choong 1965 a Stamm 1960 lze vztah mezi průměrnou aktivační energií difuze vody vázané a vlhkostí dřeva zapsat jako (4.2.9), a po dosazení do (4.2.8) lze koeficient difuze v buněčné stěně v příčném směru zjednodušit zápisem (4.2.10)

$$D_{BT} = 7 \cdot 10^{-6} e^{-\frac{E_b}{RT}} \quad (4.2.8)$$

$$E_b = 38484 - 292,8 w \quad (4.2.9)$$

$$D_{BT} = 7 \cdot 10^{-6} e^{\left(\frac{38484 - 292,8 w}{RT}\right)} \quad (4.2.10)$$

kde E_b je aktivační energie [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$]

Koeficient difuze vodní páry vrstvou vzduchu vyjadřujeme zjednodušeně semi-empirickým vzorcem (4.2.12) dle Dushman a Laferty (1962). Je zapotřebí k výpočtu koeficientu difuze v lumenech za uvažování rovnováhy s koncentrací vodní páry v buněčné stěně. Rovnice (4.2.12), (4.2.13), (4.2.14) a (4.2.15) po dosazení do (4.2.11) vyústí v (4.2.16), kde výraz $\partial\phi/\partial w$ vyjadřuje inverzní směrnici sorpční izotermy (4.2.17).

$$D_V = D_a \frac{\partial c_L}{\partial c_{CW}} \quad (4.2.11)$$

$$D_a = \frac{2,2}{p} \left(\frac{T}{273,15}\right)^{1,75} \quad (4.2.12)$$

$$\partial c_L = \frac{0,018 p_0 \partial w}{RT} \quad (4.2.13)$$

$$\partial c_{BS} = \rho_{BS} \rho_w \partial w \quad (4.2.14)$$

$$\rho_{BS} = \frac{1,5}{1 + 1,5 w} \quad (4.2.15)$$

kde c_L je koncentrace vody vázané v lumenu, c_{BS} je koncentrace vody vázané v buněčné stěně, D_a je koeficient difuze vzduchu a ρ_{BS} je redukovaná hustota buněčné stěny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

$$D_V = \frac{0,018 p_0}{R T \rho_{cw} \rho_w} \frac{\partial \varphi}{\partial w} \quad (4.2.16)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial w} = A B e^{(A B w e^{-B w})} \quad (4.2.17)$$

Pórovitost vyjadřuje poměrný objem volného objemu ve dřevě (4.2.19). Tato veličina je použita pro určení hodnot vodivosti lumenu a buněčné stěny, jak je uvedeno ve vzorci (4.2.18) a závisí především na konvenční hustotě (4.2.20). Závislost D_{BT} a P_w na vlhkosti ústí v závislost výsledného koeficientu difuze v příčném směru D_T .

$$D_T = \left(\frac{1}{(1 - P_w)} \right) \left(\frac{D_{BT} D_V}{D_{BT} + D_V (1 - \sqrt{P_w})} \right) \quad (4.2.18)$$

$$P_w = [1 - \rho_k (0,653 + w)] 100 \quad (4.2.19)$$

$$\rho_k = \frac{\rho_0}{1000 (1 + K_{\alpha V} M H)} \quad (4.2.20)$$

kde ρ_k je konvenční hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], ρ_0 je hustota absolutně suchého dřeva [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], $K_{\alpha V}$ je koeficient objemového bobtnání [%/1%] a $M H$ je mez hygroskopicity [%].

Pro získání hodnot koeficientu difuzní vodivosti v příčném směru δ_T , je koeficient difuze převeden pomocí parciální derivace $\partial c / \partial p$ (4.2.21), použité v (4.2.3), vycházející ze zákonitostí pro přepočet koeficientů difuze závislých na různých hybných silách (Skaar, 1988). Pro integritu celého modelu je dále vhodné použít řešení parciální derivace $\partial w / \partial \varphi$ v (4.2.23), jde o vyjádření směrnice sorpční izotermy.

$$\frac{\partial c}{\partial p} = \frac{1}{p_0} \left[\rho_{rw} - \frac{\rho_0 K_{\alpha V}}{(K_{\alpha V} w + 1)^2} \right] \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (4.2.21)$$

$$\rho_{rw} = \frac{\rho_0}{1 + K_{\alpha V} w} \quad (4.2.22)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} = \frac{1}{100 \varphi B \ln \frac{1}{\varphi}} \quad (4.2.23)$$

4.2.2 Souhrnné analytické vyjádření koeficientu difuzní vodivosti v příčném směru

Za uvažování všech zmíněných rovnic lze konečný koeficient difuzní vodivosti v příčném směru vyjádřit komplexní rovnicí (4.2.24). Jde o kombinaci analytického přístupu dle Siau (1995) a prvního Fickova zákona.

$$\delta_T = \left[\left(\frac{1}{(1 - P_w)} \right) \left(\frac{D_{BT} D_V}{D_{BT} + D_V (1 - \sqrt{P_w})} \right) \right] \left[\frac{1}{p_0} \left(\rho_{rw} - \frac{\rho_0 K_{\alpha V}}{(K_{\alpha V} M + 1)^2} \right) \frac{1}{100 R V V B \ln \frac{1}{\phi}} \right] \quad (4.2.24)$$

4.3 Numerický model

Definování numerického modelu různých stavebních detailů bylo provedeno pomocí softwaru COMSOL Multiphysics. V prvním kroku byl vytvořen geometrický 2D model jednotlivých částí konstrukce v řezu. Každá část modelu reprezentovala materiál, jemuž byly přiřazeny patřičné vlastnosti, pro účely stacionárního výpočtu teplotního a vlhkostního pole postačovala tepelná vodivost a součinitel difuzní vodivosti. Podmínky vnějšího a vnitřního prostředí byly zadány pomocí teploty interiéru a exteriéru s příslušnými koeficienty přestupu teploty, vlhkost prostředí pak určovaly hodnoty parciálního tlaku vodní páry. Součinitel difuzní vodivosti byl pro dřevo vždy v jednom případě zadán jako konstanta a v případě druhém jako proměnná v závislosti na RVV. Bylo tak umožněno porovnat mezi sebou tzv. lineární a nelineární výpočet za uvažování konstantních a variabilních difuzních vlastností.

Model je tvořen dvěma parciálními diferenciálními rovnicemi odvozenými z Fickova a Fourierova zákona pro výpočet vlhkostního a teplotního pole. Počítán je pouze ustálený stav těchto dvou fyzikálních polí (tedy derivace závislých proměnných podle času jsou rovny nule) a uvažuje se jen jednostranný vliv teplotního pole na vlhkostní pole. Jsou řešeny dvě varianty pro součinitel difuzní vodivosti, kde 1. je konstantní a 2. je závislý na vlhkosti. Nerozlišuje se mezi radiálním a tangenciálním anatomickým směrem, jež je dle Sonderegger (2011) pro dřevo smrku zanedbatelný.

$$-\nabla\lambda\nabla T = 0 \quad (4.3.1)$$

kde λ je koeficient tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], ∇T je teplotní gradient [K/m]

$$-\nabla\delta\nabla p = 0 \quad (4.3.2)$$

Okrajové podmínka pro teplotu:

$$-\mathbf{n}\lambda\nabla T = \alpha_T(T - T_{ext}) \quad (4.3.3)$$

kde α je součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$], T_{ext} je teplota prostředí [K] a T je teplota povrchu [K].

Okrajové podmínka pro parciální tlak vodní páry:

$$p = \varphi_{ext} p_0(T_{ext}) \quad (4.3.4)$$

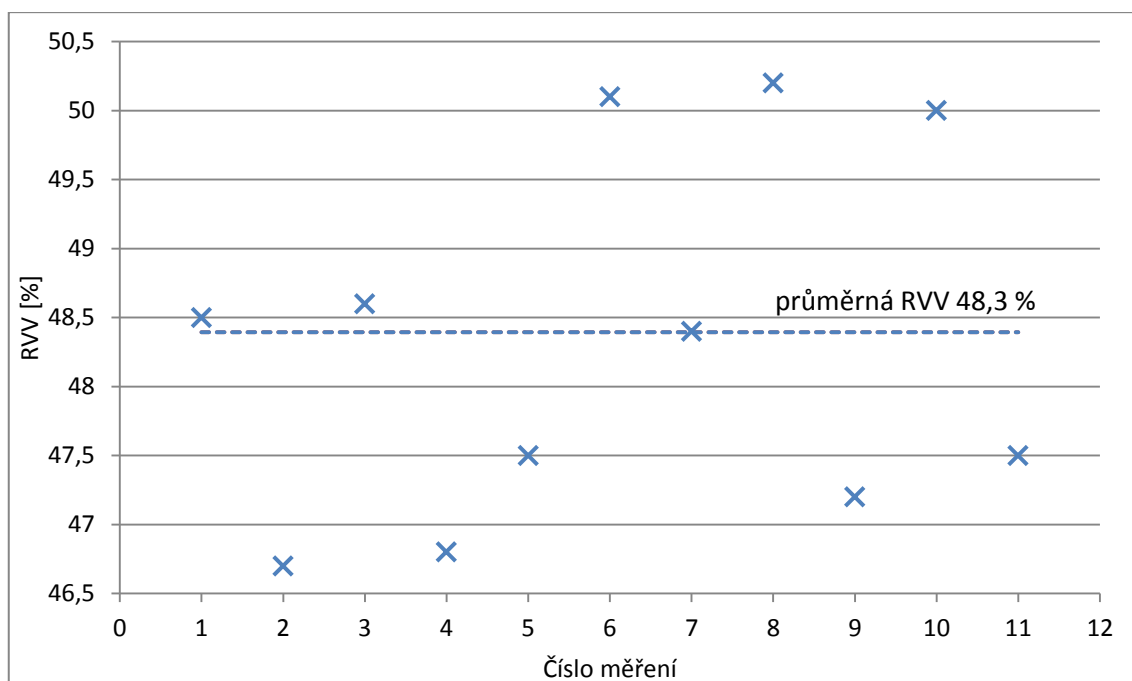
Vlastnosti jednotlivých materiálů jsou převzaty z Tab. 3.3.2, ty jsou jako parametry přiřazovány jednotlivým geometrickým útvarům celého modelu. Pro definici variability součinitele difuzní vodivosti byl použit zápis: $dT_{woodvar}(p/p_0(T))$, jež zohledňuje hodnotu RVV v daném bodě dřevěné konstrukce, pro lineární výpočet zde vystupoval konstantní výchozí parametr dT_{wood} , kde $\delta=1,2\text{e-}12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$. Pro účely této práce byly použity v zásadě dva druhy stěny. Detail 1 a Detail 2 v kapitole 5.3 reprezentuje 150mm masivní dřevěnou stěnu zateplenou z exteriéru 100mm minerální vatou. Detail 3 a Detail 4 jsou typickou skladbou moderní rámové dřevostavby, z interiérové strany 12,5 mm sádrovláknitá deska, 40 mm vzduchová mezera předstěny, 15 mm OSB deska, 140 mm celulózové izolace a dřevěný sloupek, 15 mm DHF deska a 100 mm fasádní minerální izolace.

5 Výsledky

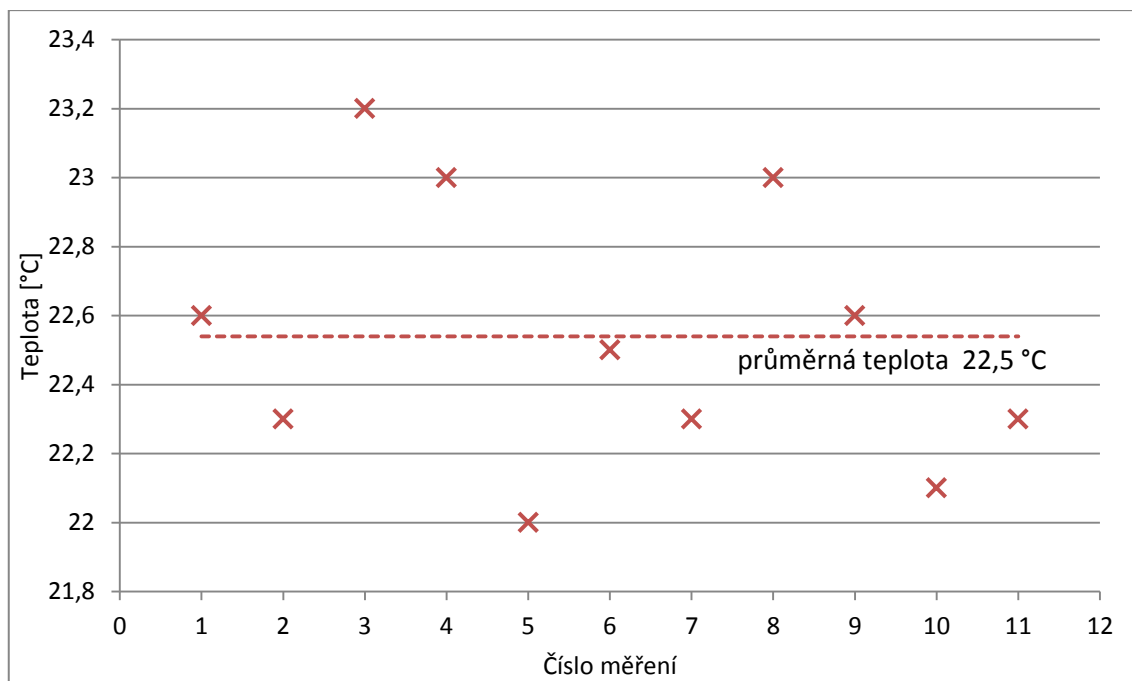
Kapitola výsledky je rozdělena na 3 části, v první jsou představeny výsledky vlastního experimentu, v druhé výsledky analytického výpočtu součinitele difuzní vodivosti a třetí kapitola je věnována modelování vlhkostního pole uvnitř konstrukce dřevostaveb.

5.1 Pohárková zkouška

Experimentální měření součinitelů difuzní vodivosti v příčném směru probíhalo za minimálně proměnlivých podmínek. Relativní vlhkost vzduchu a teplota byly zapsány vždy před vážením pohárků, které probíhalo každý den ve stejnou dobu. Hodnoty RVV a teplot jsou zaznamenány v grafech na Obr. 5.1.1 a Obr. 5.1.2. Variační koeficient RVV za dobu měření byl 2,58%, pro teplotu bylo vypočteno 1,65%. Požadavkem normy ČSN EN 12572 je $RVV=50\pm 3\%$ a $T=23\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Měření probíhalo při $RVV 46,7 - 50,2\%$ a $T 22-23,2^{\circ}\text{C}$, odchylky od normou požadovaných hodnot se tak dají považovat za minimální.



Obr. 5.1.1: Graf naměřených hodnot RVV prostředí v průběhu měření.



Obr. 5.1.2: Graf naměřených teplot vzduchu v průběhu měření.

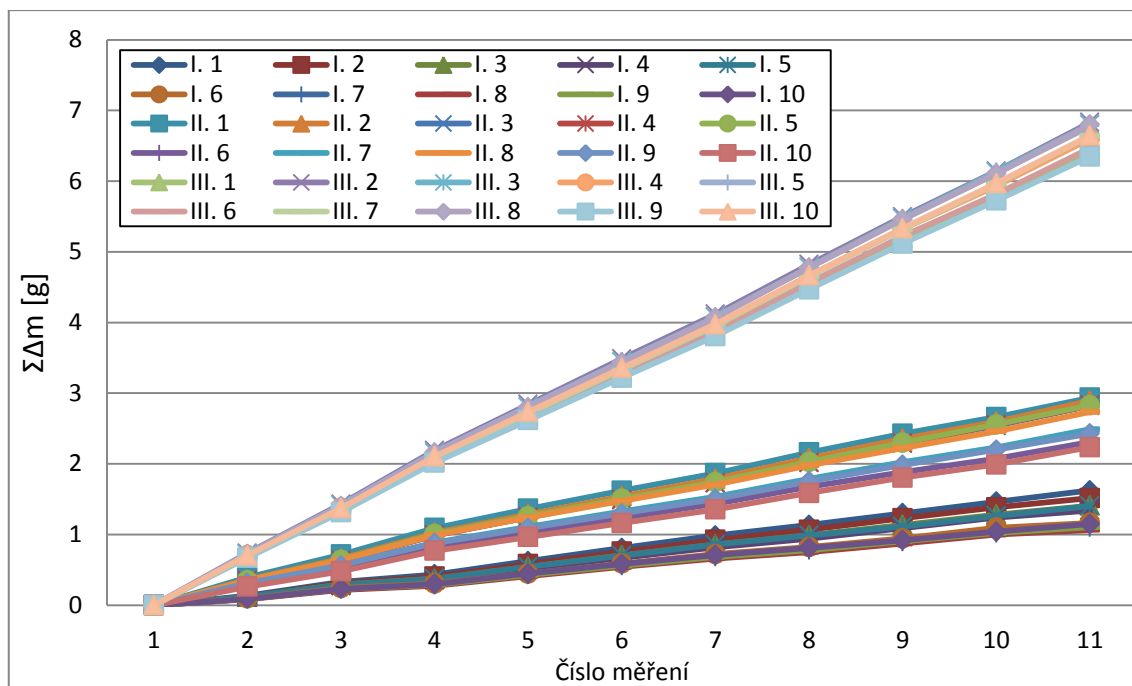
Vzorky dřeva byly zváženy před začátkem experimentu, těsně po jeho skončení a v suchém stavu (Tab. 5.1.1). Výpočtem dle vzorce (3.1.1) byly stanoveny vlhkosti, přičemž vlhkost w se dá označit za průměrnou vlhkost vzorku s rozdílnými vlhkostmi na povrchu a vlhkost w_1 je rovnovážnou vlhkostí celého vzorku (Tab. 5.1.1).

Tab. 5.1.1: Průměrné hmotnosti sad vzorků I., II. a III. před začátkem experimentu (m_{w1}), po sejmutí z pohárků (m_w) a po vysušení (m_{w0}).

	I. m_{w1}	II. m_{w1}	III. m_{w1}	I. m_w	II. m_w	III. m_w	I. m_{w0}	II. m_{w0}	III. m_{w0}
\bar{m} [g]	16,194	16,260	16,161	15,437	16,557	16,677	14,508	14,623	14,474
S_x	1,73	1,74	1,70	1,59	1,70	1,50	1,48	1,49	1,50
V_x [%]	10,67	10,72	10,52	10,32	10,28	10,35	10,18	10,16	10,35

Tab. 5.1.2: Průměrné vlhkosti vzorků před začátkem experimentu (w_1), po sejmutí vzorků z pohárků (w) a průměrná hustota ρ_{12} [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] při vlhkosti w_1 .

	I. w	II. w	III. w	I. w_1	II. w_1	III. w_1	I. ρ_{12}	II. ρ_{12}	III. ρ_{12}
\bar{w} [%]	8,00	17,28	18,90	11,62	11,19	11,66	449	451	448
S_x	0,16	0,19	0,38	0,71	0,96	0,76	47,90	48,31	47,11
V_x [%]	2,55	1,44	2,49	6,10	8,63	6,50	10,67	10,72	10,52



Obr. 5.1.3: Graf sumy hmotnostních úbytků a přírůstků jednotlivých soustav (Sada I.=silikagel, Sada II.=nasyčený roztok NaCl, Sada III.=demineralizovaná voda)

U pohárků s demineralizovanou vodou (sada III.) a s nasyceným roztokem NaCl (sada II.) probíhal difuzní tok vždy směrem ven a byly zaznamenávány hmotnostní úbytky. Pohárky se silikagelem (sada I.) vykazovaly hmotnostní přírůstky, difuzní tok tedy směřoval směrem dovnitř. Při znázornění kumulace sumy hmotnostních úbytků jednotlivých pohárků (Obr. 5.1.3) jde jasně rozeznat 3 sady vzorků lišící se výší těchto úbytků/ přírůstků. Spojnice bodů tvoří téměř dokonalou přímku, difuze se dá považovat za stacionární a lze aplikovat I. Fickův zákon pro výpočet součinitelů difuzní vodivosti.

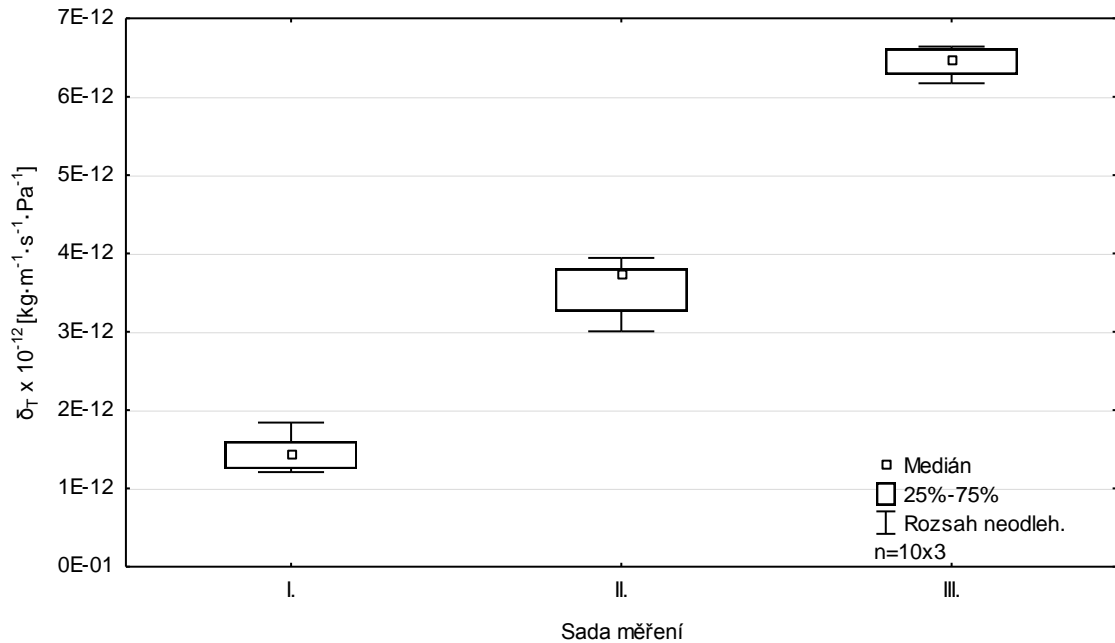
Tab. 5.1.3: Průměrné vypočtené součinitele difuzní vodivosti.

	I.	II.	III.
Prům. RVV [%]	25	62,5	75
ρ_0 [kg·m ⁻³]	402	405	401
δ_T [kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹]	1,46E-12	3,56E-12	6,45E-12
S_x	2,12E-13	3,30E-13	1,58E-13
V_x [%]	14,54	9,26	2,46

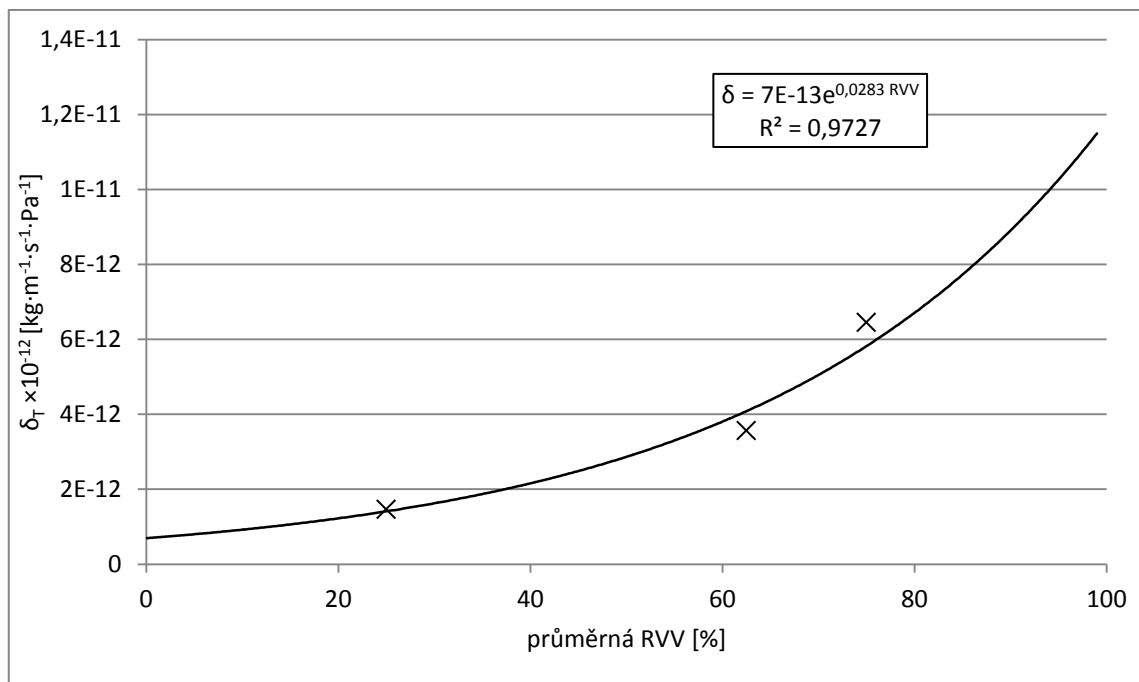
Průměrné vypočtené hodnoty součinitele difuzní vodivosti v příčném směru pro dřevo smrku o uvedené průměrné hustotě v suchém stavu jsou uvedeny v Tab. 5.1.3. Ze statistického hlediska se dají dle krabicového grafu na

Obr. 5.1.4 rozdíly mezi jednotlivými sadami měření označit za signifikantní. Variabilita výsledků s klesající průměrnou vlhkostí vzorků klesá a v případě I. Sady měření je již

relativně vysoká. Průměrné hodnoty součinitele difuzní vodivosti lze vyjádřit graficky v závislosti na vzdušné vlhkosti (Obr. 5.1.5). Takové vyjádření je časté v oblasti stavební fyziky a je vhodné pro další aplikaci například v numerickém modelu. Oproti tomu vyjádření v závislosti na parciálním tlaku vodní páry je nejednoznačné, jelikož se jeho rozsah s teplotou mění.



Obr. 5.1.4: Krabicový graf vypočtených součinitelů difuzní vodivosti pro 3 sady měření.

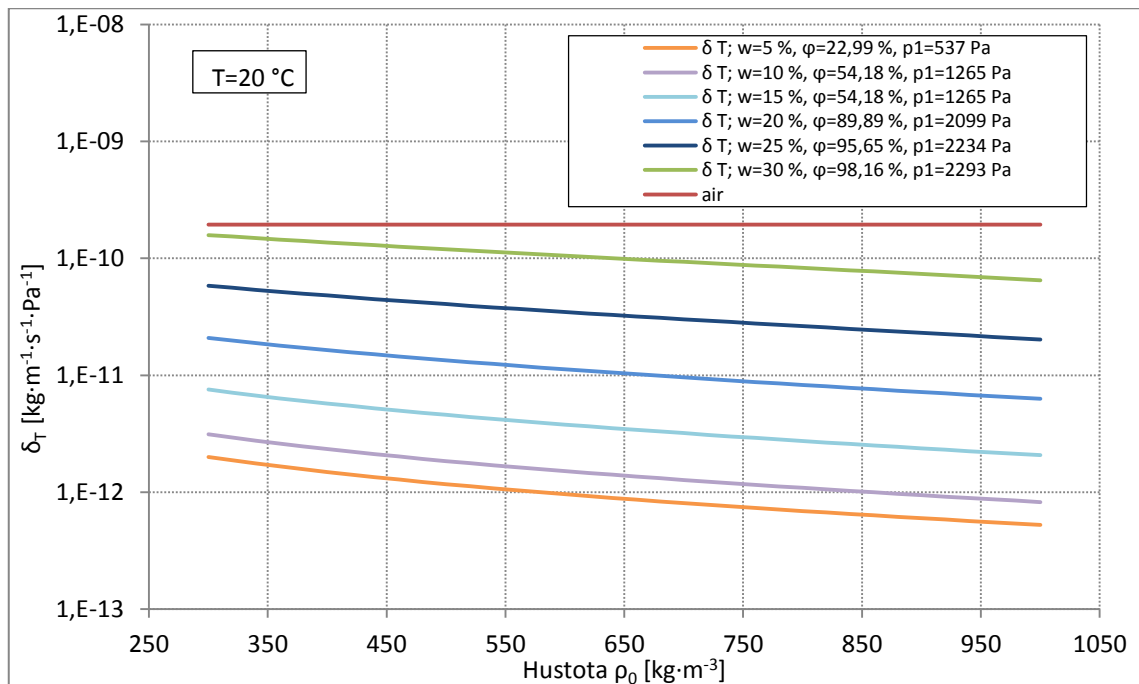


Obr. 5.1.5: Graf závislosti průměrných hodnot součinitele difuzní vodivosti na průměrné RVV uvnitř a vně pohárků.

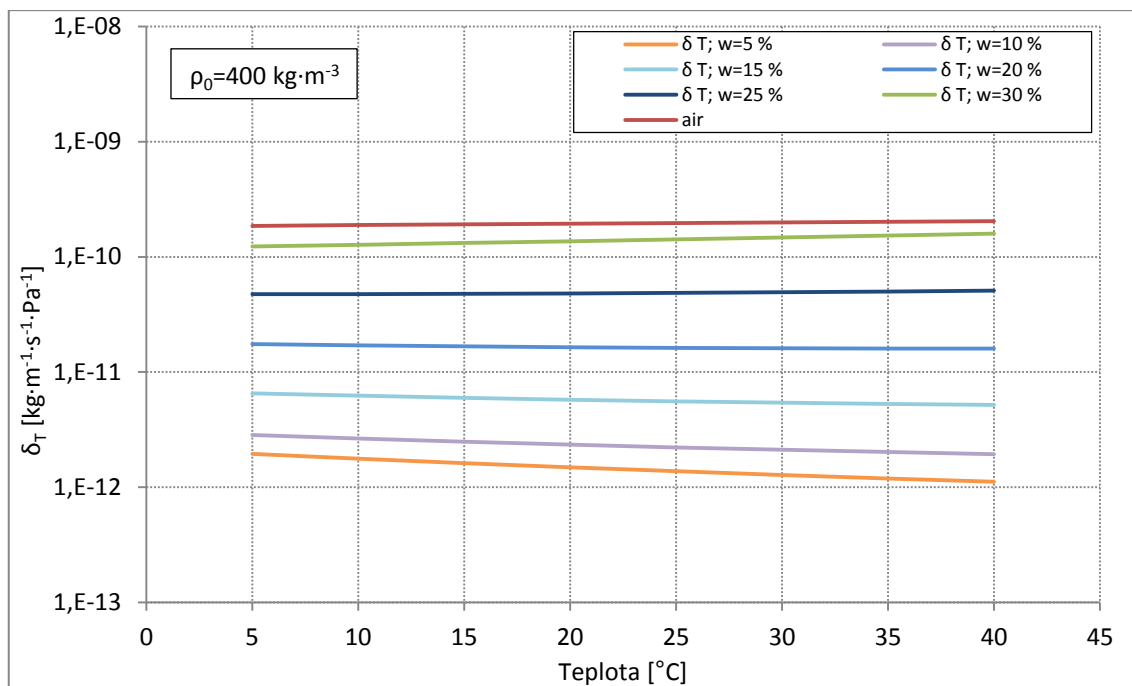
5.2 Analytický výpočet

Analytický výpočet dle postupu uvedeného v kapitole 4.2 podával zajímavé výsledky. Hodnoty δ_T bylo možné vyjádřit graficky v závislosti na hustotě na Obr. 5.2.1 a teplotě na Obr. 5.2.2 pomocí křivek odpovídající určité hladině vlhkosti dřeva. Téměř lineární negativní regrese δ_T a výpočtové hustoty v absolutně suchém stavu je pozorovatelná pro celou škálu vlhkostí. Oproti tomu závislost na teplotě má až po vlhkost dřeva přibližně 20% mírně klesající charakter, nad tuto hodnotu až do meze hygroscopicity s teplotou stoupá. Nutno podotknout že je tvrzení platné pro dřevo o hustotě v absolutně suchém stavu $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

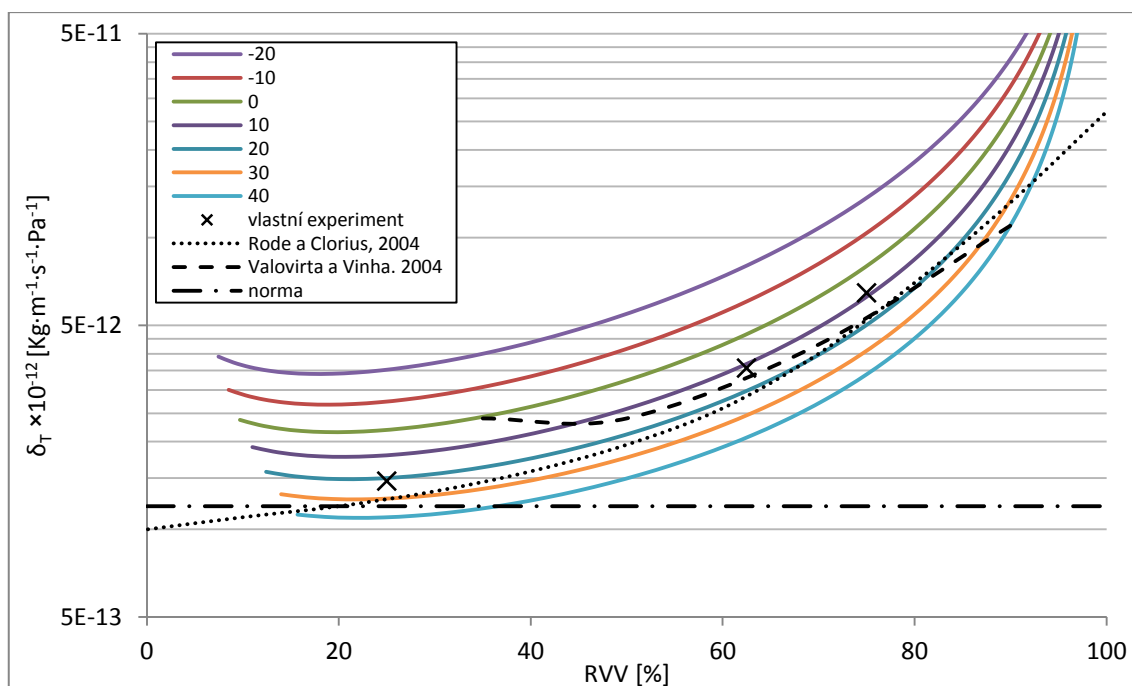
Pro účely aplikace v numerickém modelu byly vypočtené hodnoty δ_T porovnávány s experimentálními výsledky a s literárními zdroji viz Obr. 5.2.3 a Obr. 5.2.4. přičemž byla shledána poměrně vysoká míra shody. Zásadní pro předpokládané rozdíly v numerickém modelu uvažujícím variabilitu difuze je odlišnost δ_T zjištěného experimentem, výpočtem a z literatury, oproti konstantní normě udávané normou.



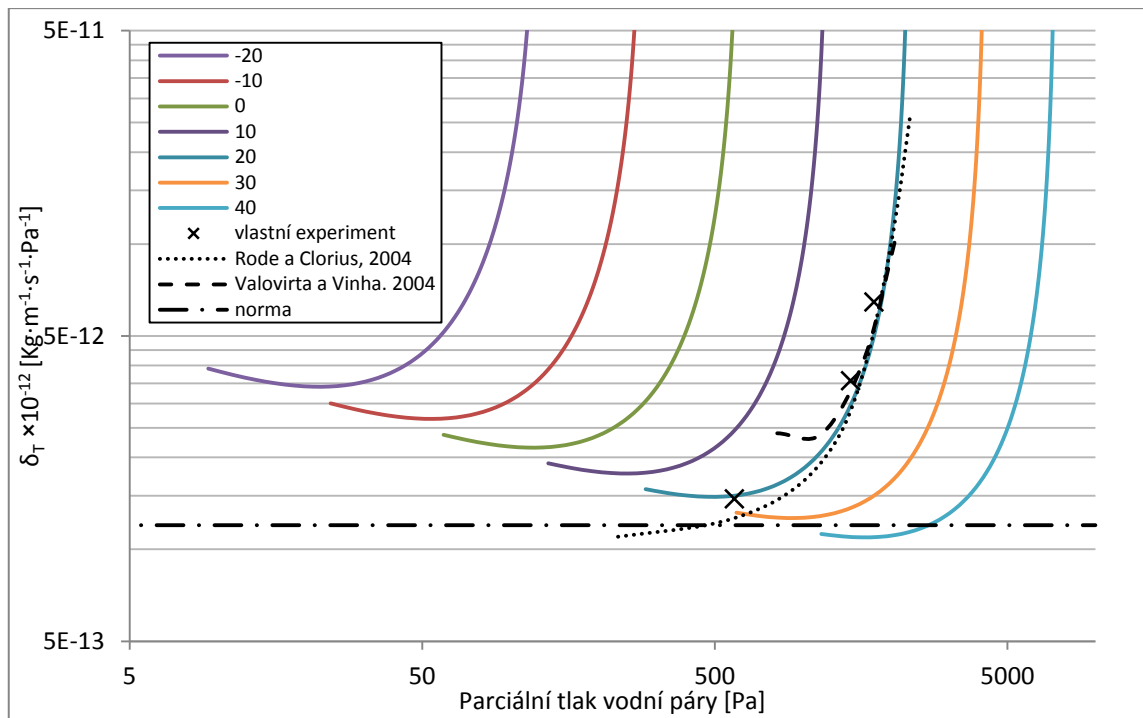
Obr. 5.2.1: Závislost součinitele difuzní vodivosti v příčném směru na hustotě při různých vlhkostech a konstantní teplotě 20°C .



Obr. 5.2.2: Závislost součinitele difuzní vodivosti v příčném směru na teplotě při různých vlhkostech a konstantní hustotě $\rho_0=400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.



Obr. 5.2.3: Graf závislosti analyticky vypočtených hodnot součinitele difuzní vodivosti na RVV při různých teplotách a konstantní hustotě $\rho_0=400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro srovnání jsou vyneseny výsledky vlastního experimentu, měření dle Rode a Clorius (2004), Valovirta a Vinha (2004) a konstantní hodnoty dle normy ČSN 73540-4.

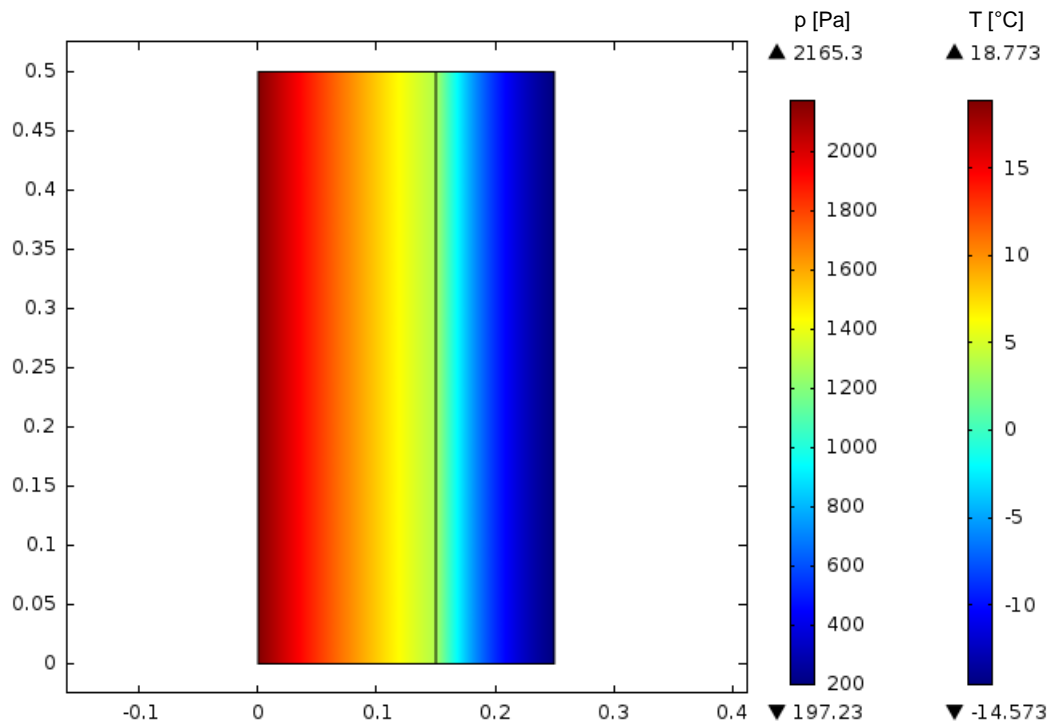


Obr. 5.2.4: Graf závislosti analyticky vypočtených hodnot δ_T na parciálním tlaku vodní páry při různých teplotách a konstantní hustotě $\rho_0=400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro srovnání jsou vyneseny výsledky vlastního experimentu, měření dle Rode a Clorius (2004), Valovirta a Vinha (2004) a konstantní hodnoty dle normy ČSN 73540-4.

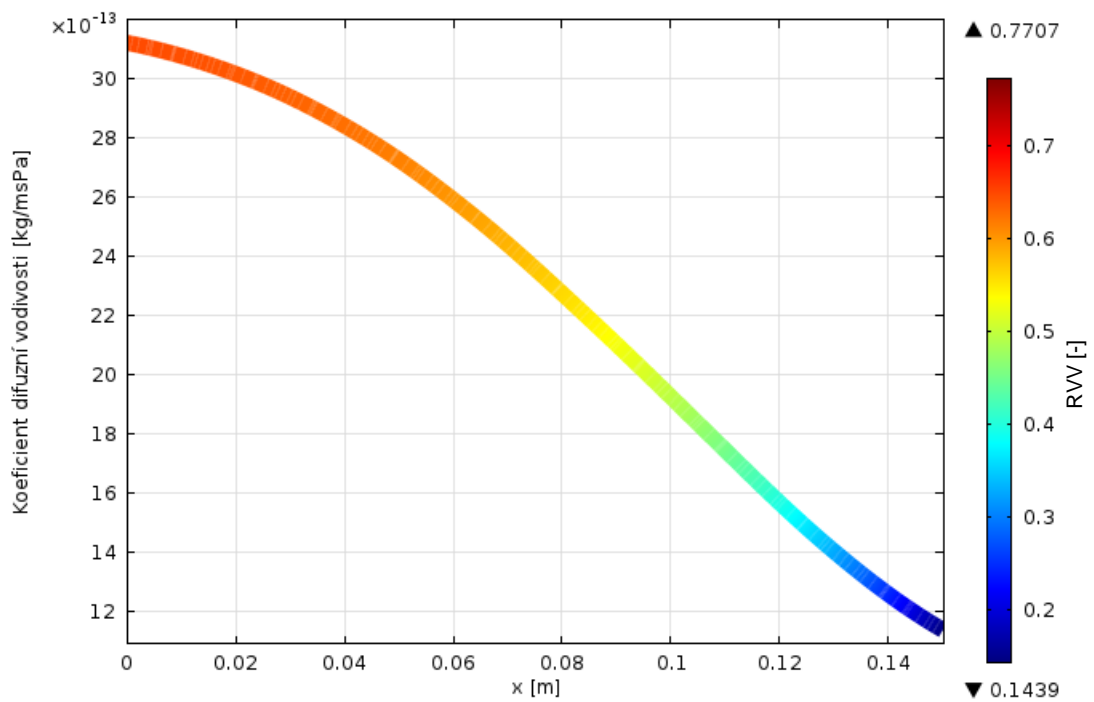
5.3 Numerický model

Pro potřeby numerického modelování byly brány v úvahu vlastnosti materiálů uvedené v Tab. 3.3.2 v literárním přehledu. Pro účely porovnání vždy bylo vypočteno vlhkostní pole konstrukce při uvažování konstantního součinitele difuzní vodivosti v příčném směru $\delta_T 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$, nebo při uvažování δ_T jako funkce RVV. Jednalo se tedy o porovnání nelineárního výpočtu, kde výsledná vzdušná vlhkost ovlivňuje vlastnosti materiálu, s lineárním, kde je schopnost dřeva vést a propouštět vodní páru považována za neměnnou. Pro porovnání byly uvažovány různé podmínky v interiéru a v exteriéru, každý z obrázků je podle zadaných podmínek popsán. Popis in 20°C/60% ext -15°C/80% značí, že byla definována teplota interiéru 20°C a RVV 60% a teplota exteriéru -15°C při RVV 80%. Relativní vlhkost vzduchu byla z pohledu rozměru použité fyzikální veličiny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] potřeba zadat jako parciální tlak vodní páry. Vzhledem ke snížení skutečné teploty povrchu vlivem koeficientu přestupu tepla ovšem hodnota RVV přesně neodpovídá RVV interiéru nebo exteriéru. $\delta_{T_{\text{KONST}}}$ a $\delta_{T_{\text{VAR}}}$ je pak důležitým označením výsledků z hlediska použití konstantního nebo variabilního součinitele difuzní vodivosti dřeva v příčném směru.

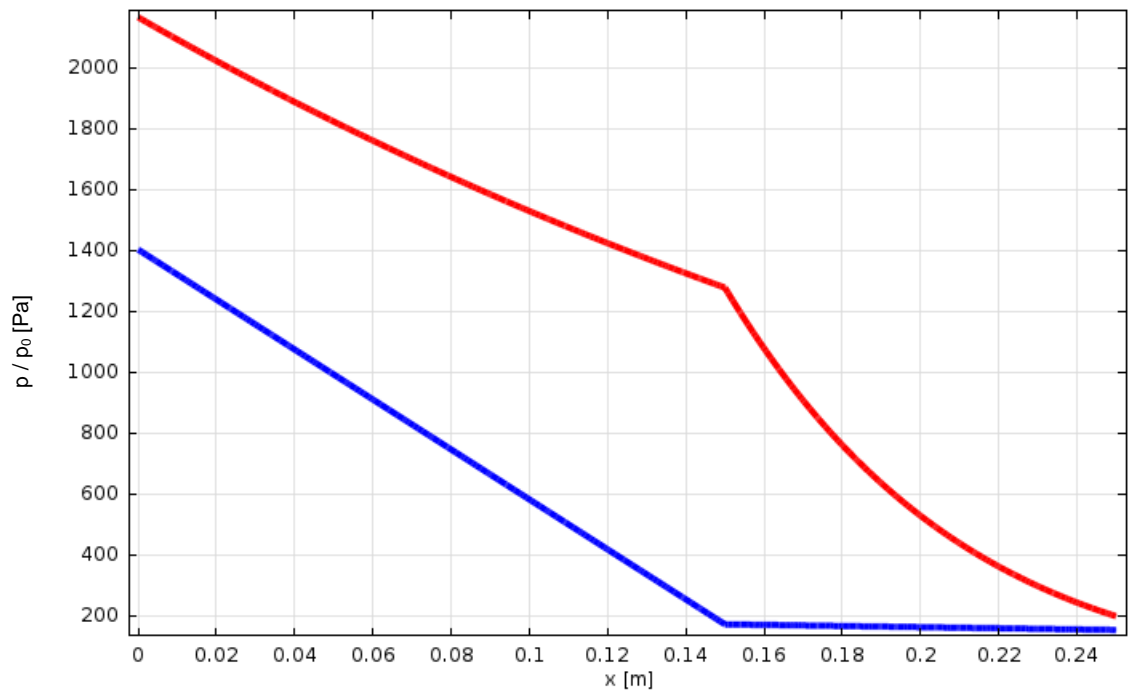
5.3.1 Prostá masivní stěna



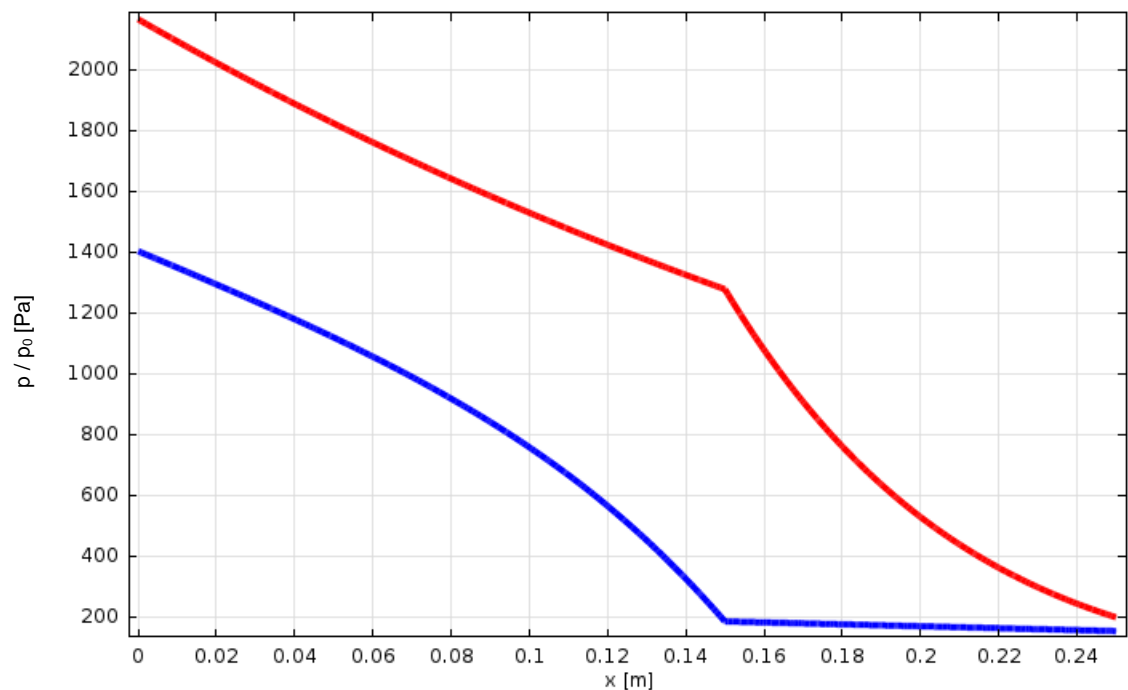
Obr. 5.3.1: Detail 1, ROZLOŽENÍ PARCIÁLNÍHO TLAKU NASYCENÉ VODNÍ PÁRY a TEPLOTNÍ POLE, společně pro δT_{KONST} a δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



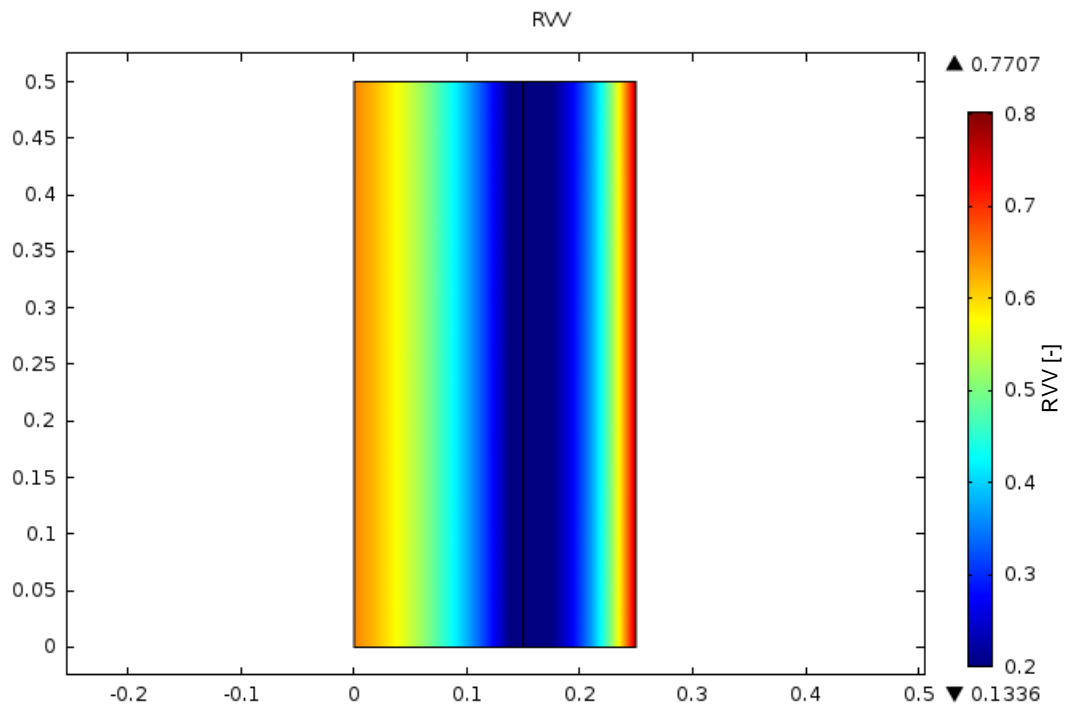
Obr. 5.3.2: Detail 1, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



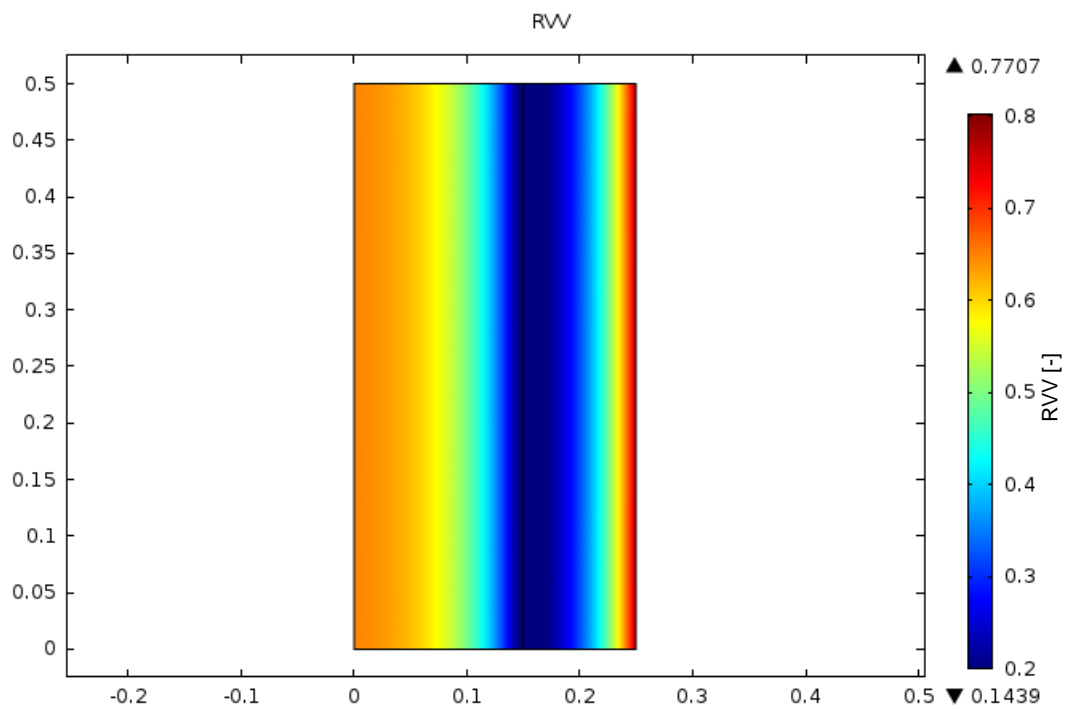
Obr. 5.3.3: Detail 1, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



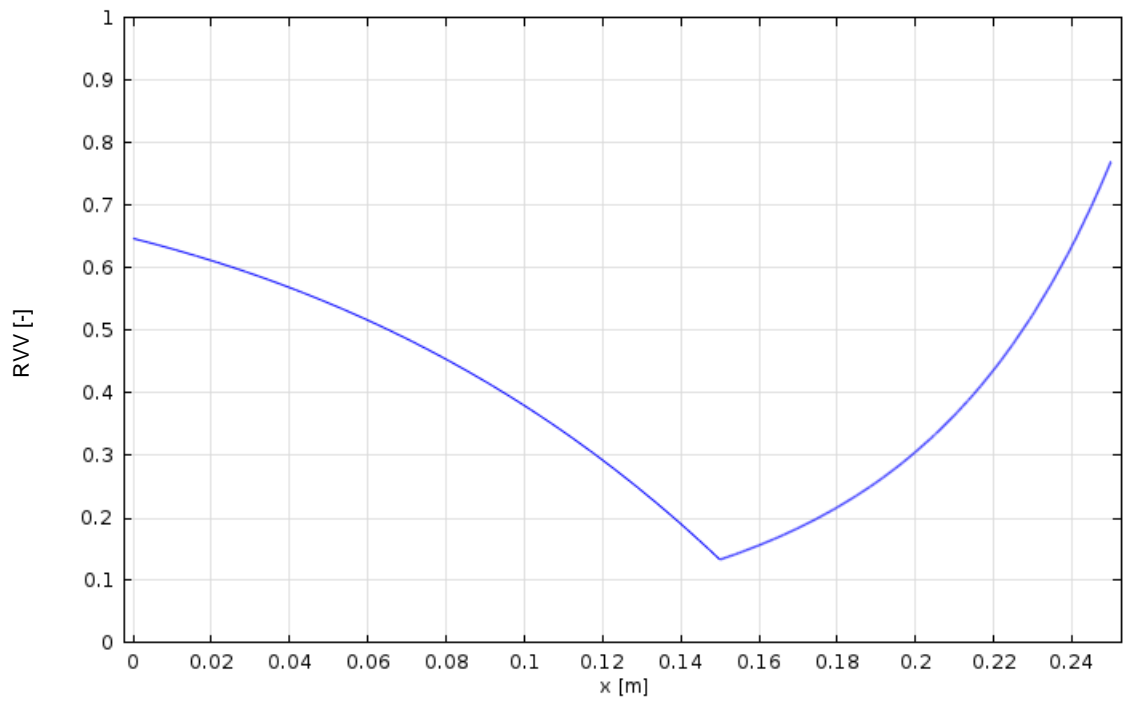
Obr. 5.3.4: Detail 1, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



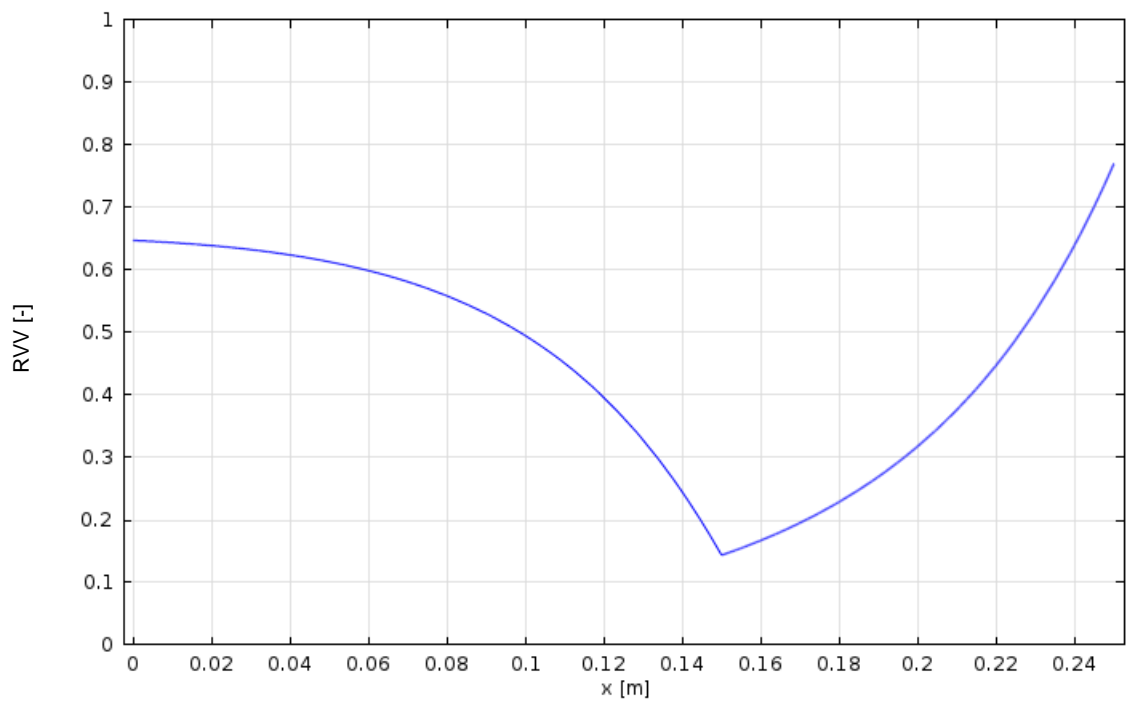
Obr. 5.3.5: Detail 1, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



Obr. 5.3.6: Detail 1, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%

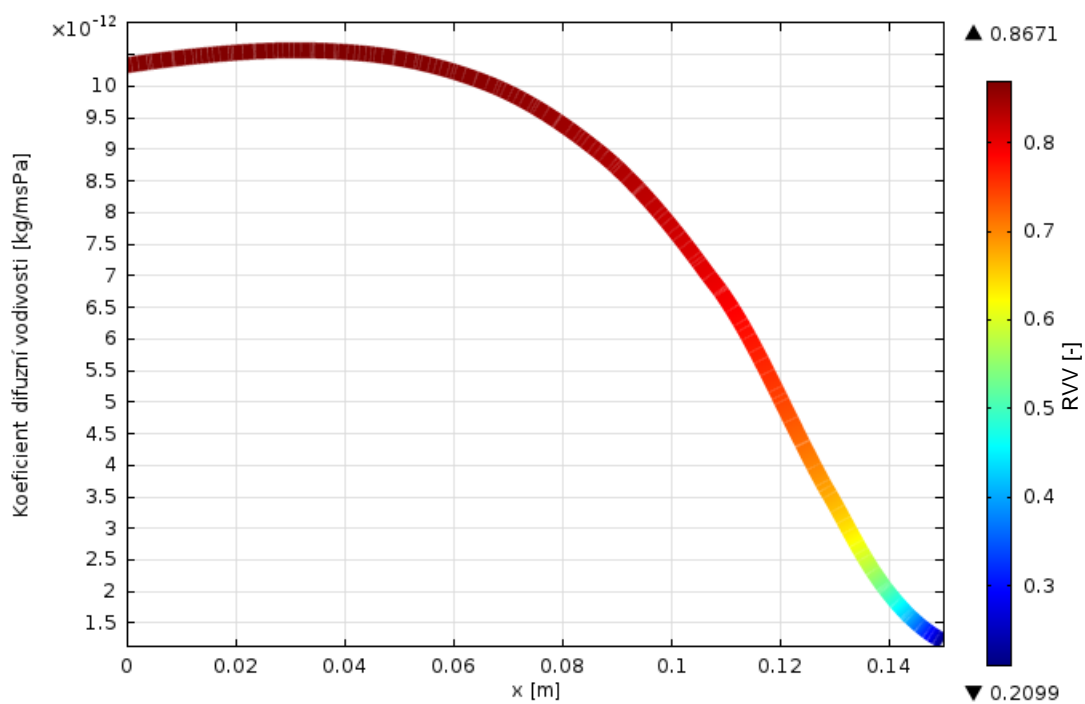


Obr. 5.3.7: Detail 1, PRŮBĚH RWV , δT_{KONST} , in $20^{\circ}C/60\%$ ext $-15^{\circ}C/80\%$

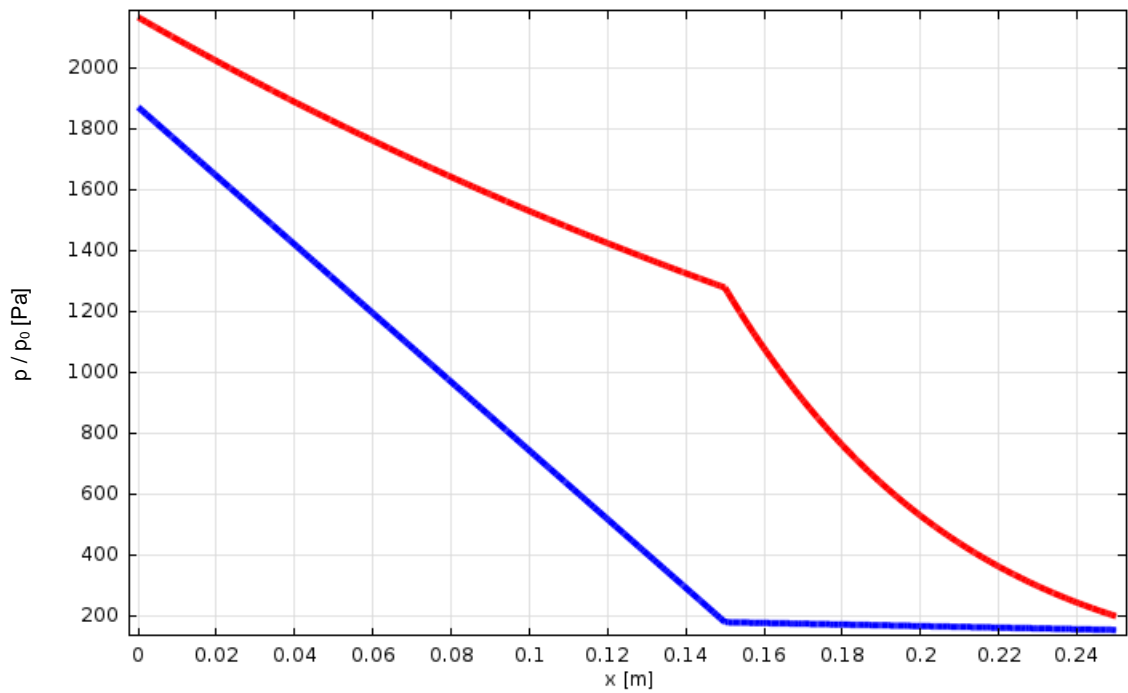


Obr. 5.3.8: Detail 1, PRŮBĚH RWV , δT_{VAR} , in $20^{\circ}C/60\%$ ext $-15^{\circ}C/80\%$

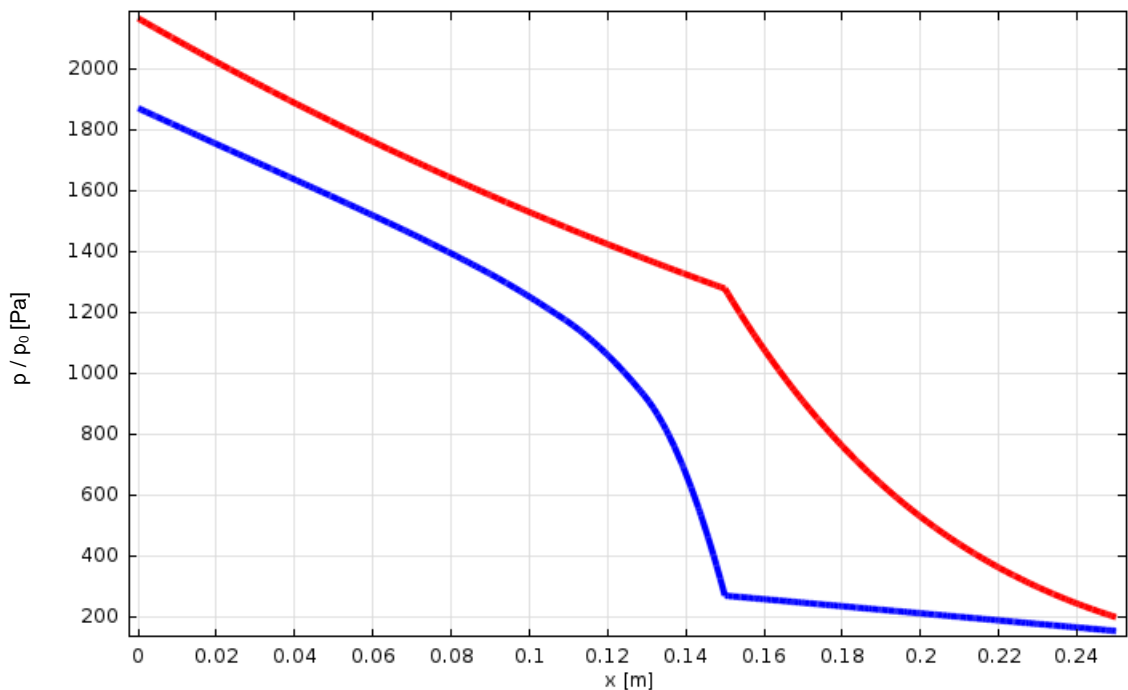
Výsledky vlhkostního pole plynou z výpočtu teplotního pole na Obr. 5.3.1 a samotného rozložení hodnot δ_T Obr. 5.3.2 v závislosti na RVV v daném bodě dřevěné části konstrukce. Rozdíly v lineárním a nelineárním výpočtu jsou patrně z grafů rozložení parciálního tlaku vodní páry (Obr. 5.3.3 a Obr. 5.3.4) a z něj plynoucího rozložení vzdušné vlhkosti (Obr. 5.3.5, Obr. 5.3.6, Obr. 5.3.7 a Obr. 5.3.8). Při uvažování ještě vyšší vzdušné vlhkosti v interiéru (80 %) jsou rozdíly znatelnější. Samotný součinitel δ_T (Obr. 5.3.9) dosahuje vyšších hodnot, než v předchozím případě, což má za následek i větší rozdíly ve výsledných parciálních tlacích vodní páry (Obr. 5.3.10 a Obr. 5.3.11) a také vlhkostních polích (Obr. 5.3.12, Obr. 5.3.13, Obr. 5.3.14 a Obr. 5.3.15). V konstrukci zkoumané v rámci detailu 1 nejsou rozdíly maximálních hodnot RVV, nýbrž vlastního rozložení parciálního tlaku vodní páry a vlhkostního pole. Ty se projevují u normou stanovených podmínek prostředí, významnější jsou ale rozdíly při zvýšené vlhkosti interiéru. Ovlivnění vlhkostního pole užitím variabilního koeficientu difuze se projevuje v samotném dřevě, ve fasádní izolaci pak už jen minimálně ovlivňuje počáteční vlhkost na rozhraní dřevo/izolace, nacházející se vždy ve vzdálenosti 0,15 m na ose x.



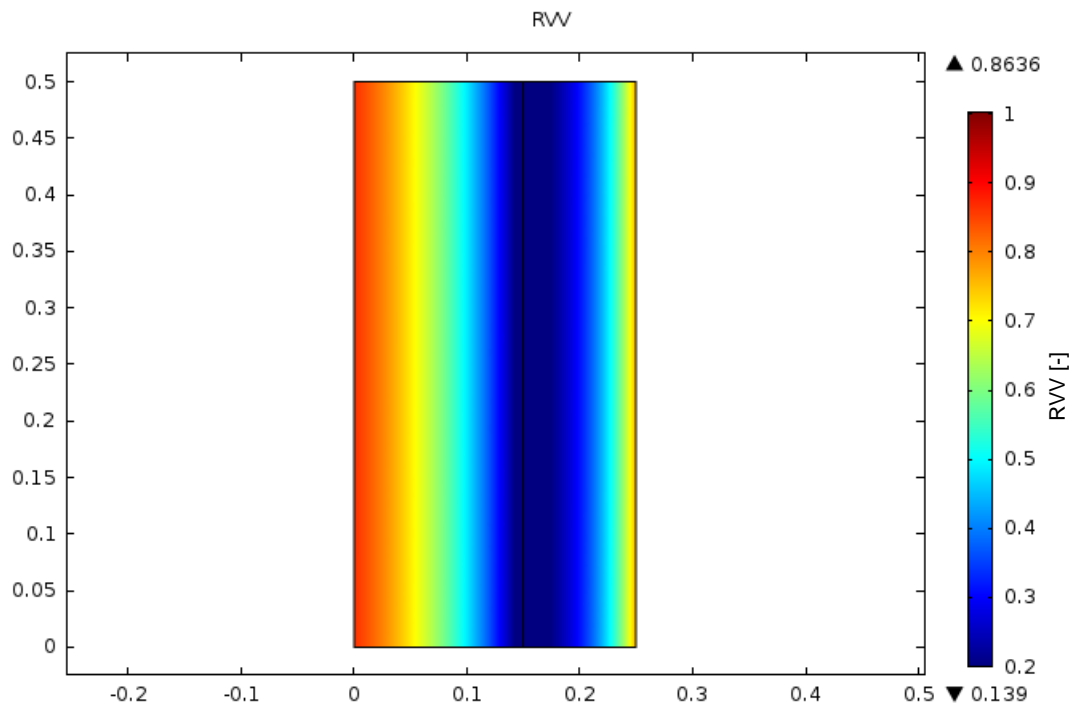
Obr. 5.3.9: Detail 1, Průběh vypočteného $\delta_{T_{VAR}}$ v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. $\delta_{T_{VAR}}$, in $20^{\circ}\text{C}/80\%$ ext $-15^{\circ}\text{C}/80\%$



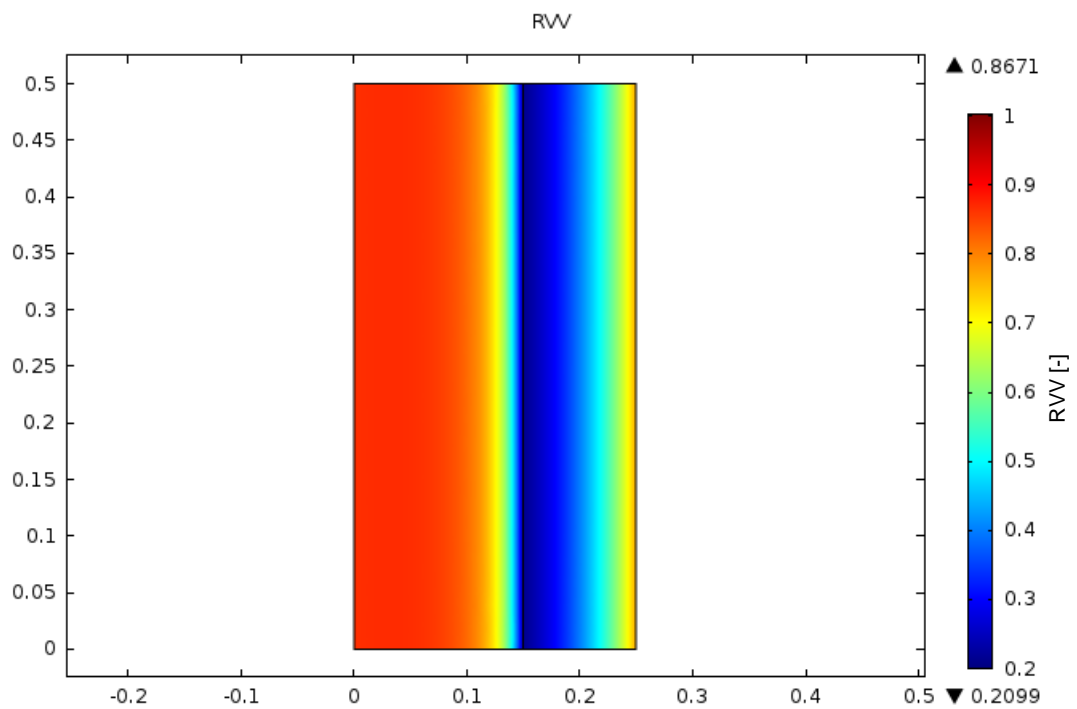
Obr. 5.3.10: Detail 1, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in $20^\circ\text{C}/80\%$ ext $-15^\circ\text{C}/80\%$



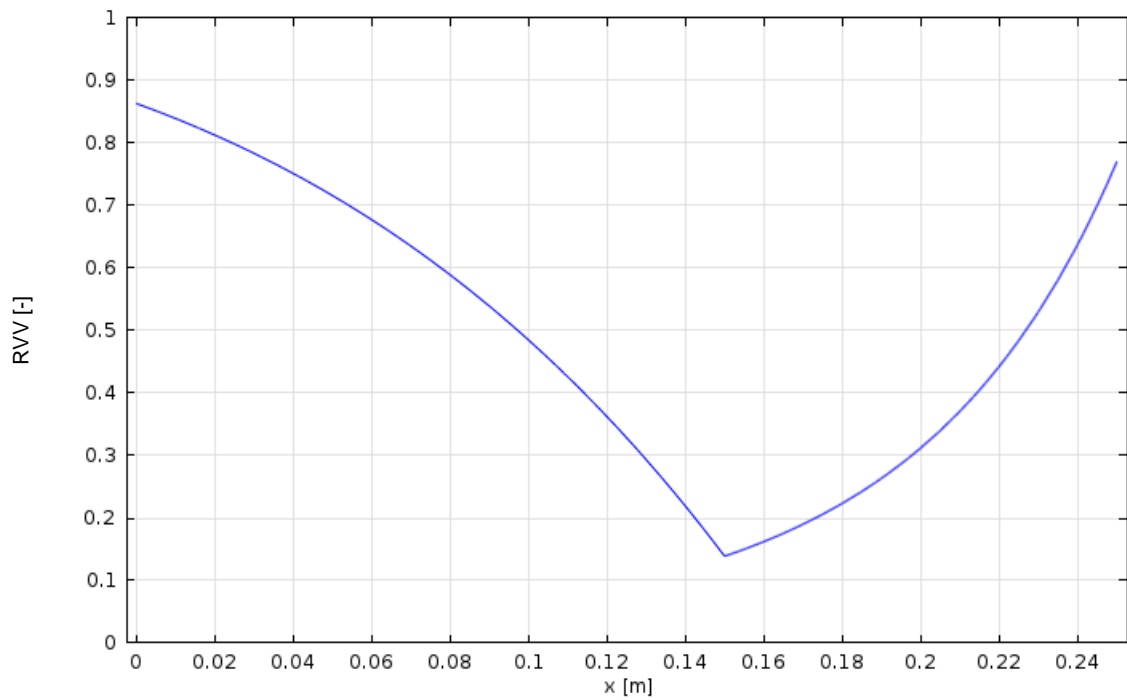
Obr. 5.3.11: Detail 1, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in $20^\circ\text{C}/80\%$ ext $-15^\circ\text{C}/80\%$



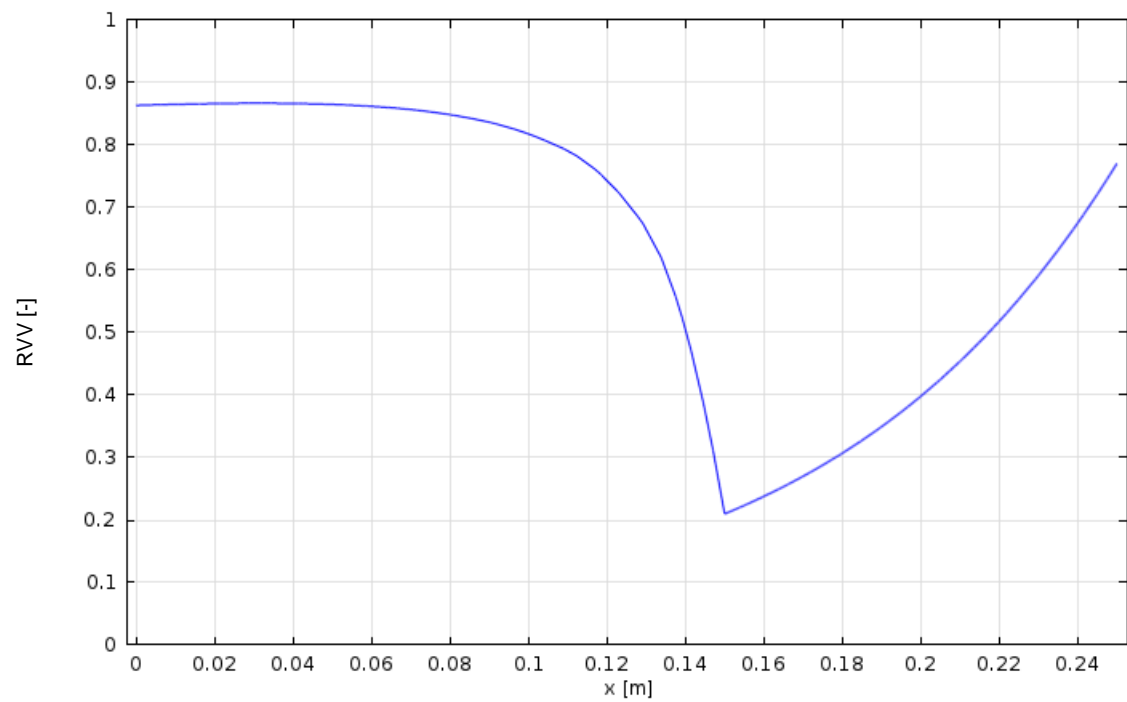
Obr. 5.3.12: Detail 1, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



Obr. 5.3.13: Detail 1, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%

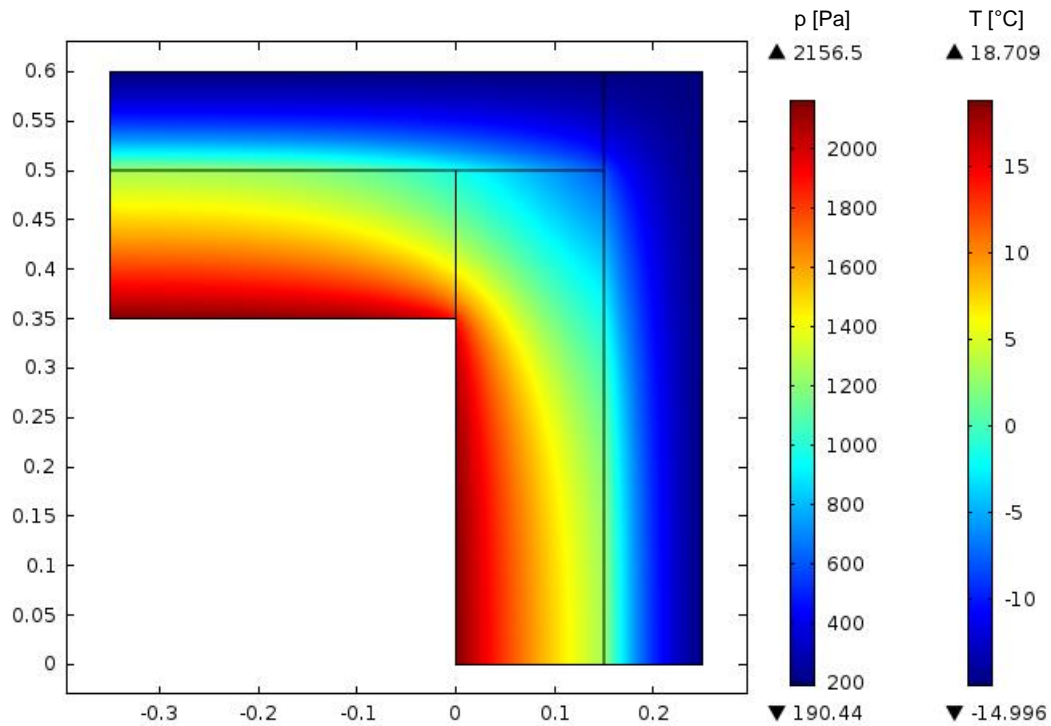


Obr. 5.3.14: Detail 1, PRŮBĚH RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%

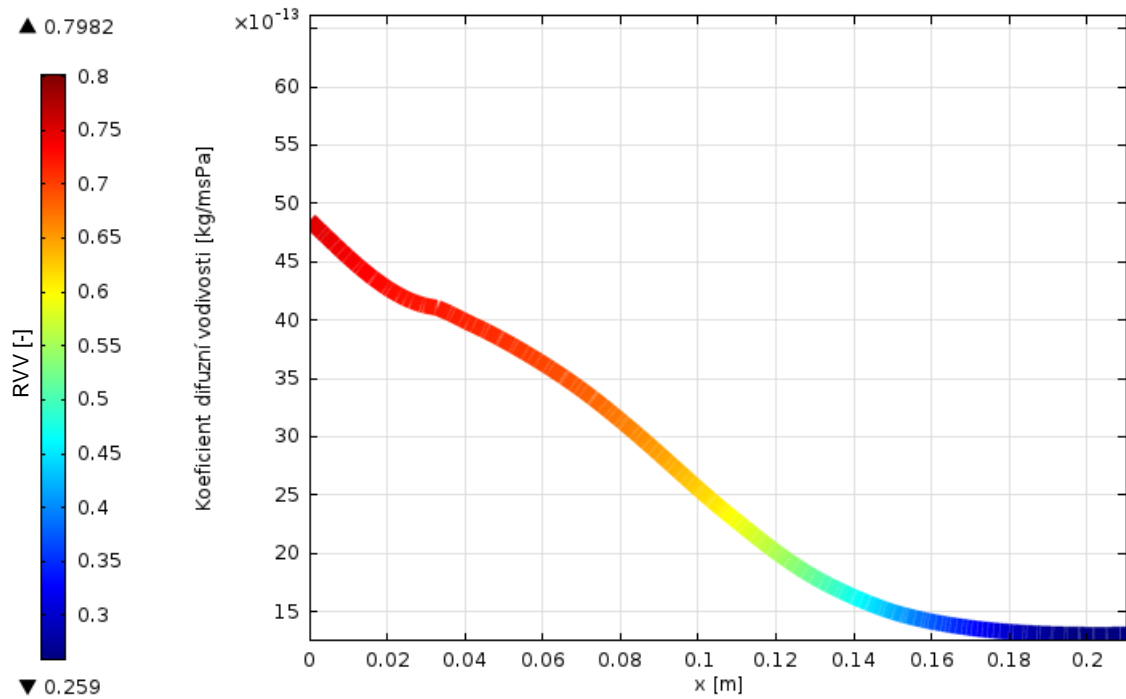


Obr. 5.3.15: Detail 1, PRŮBĚH RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%

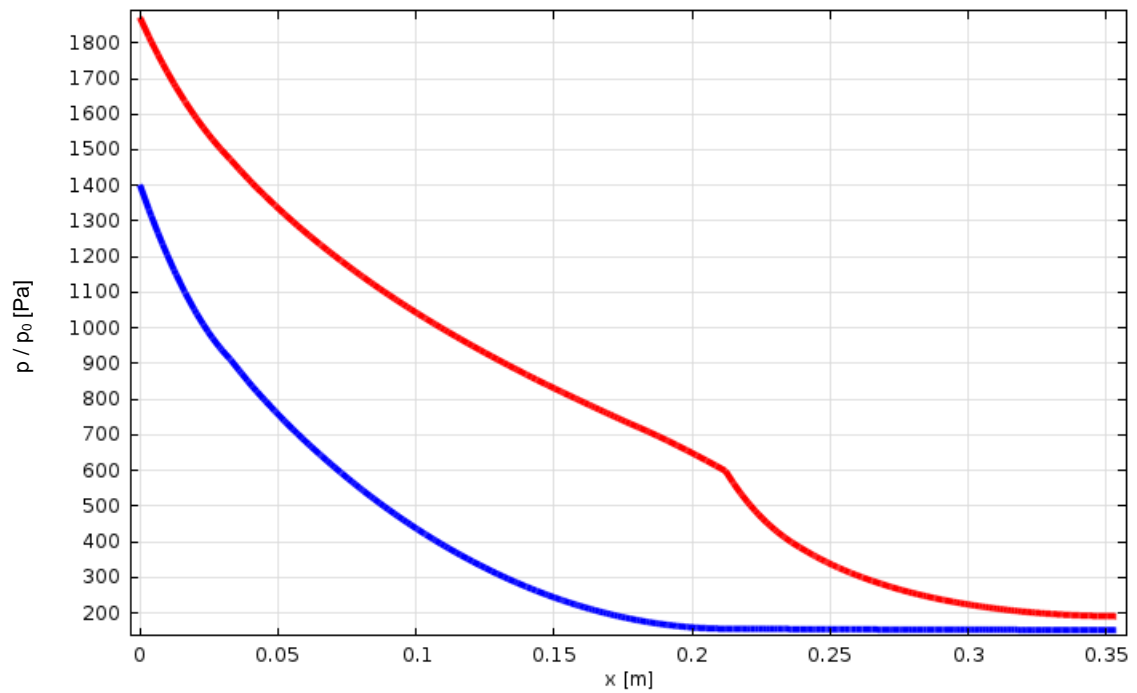
5.3.2 Detail rohu masivní stěny



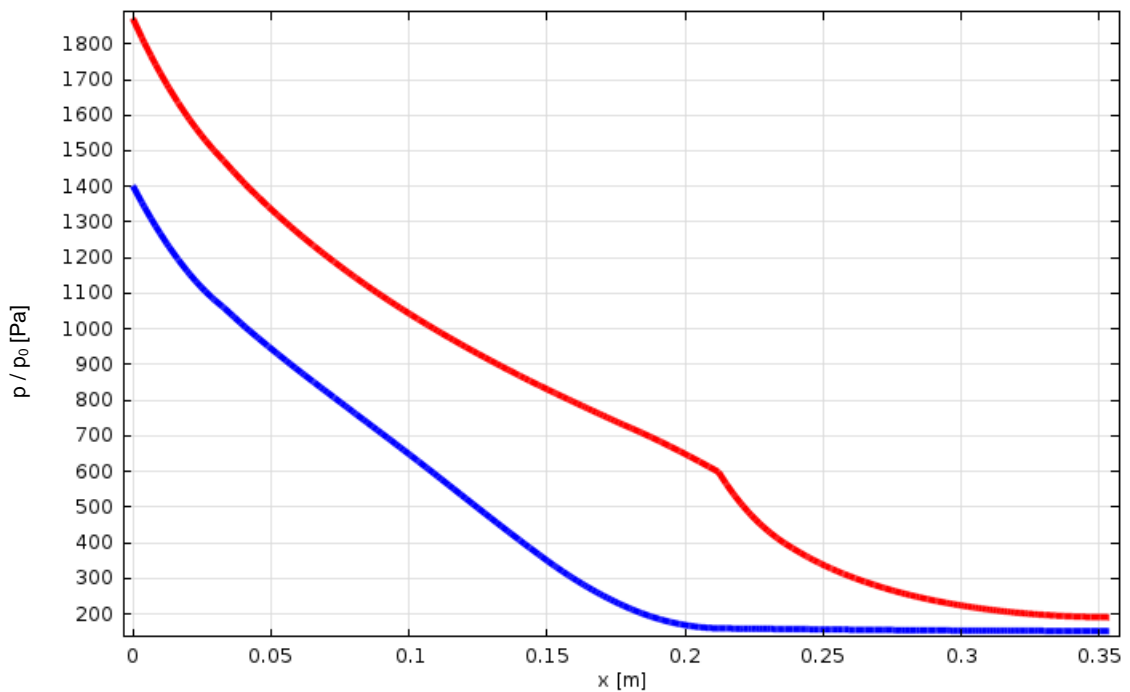
Obr. 5.3.16: Detail 2, ROZLOŽENÍ PARCIÁLNÍHO TLAKU NASYCENÉ VODNÍ PÁRY a TEPLOTNÍ POLE, společně pro δT_{KONST} a δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



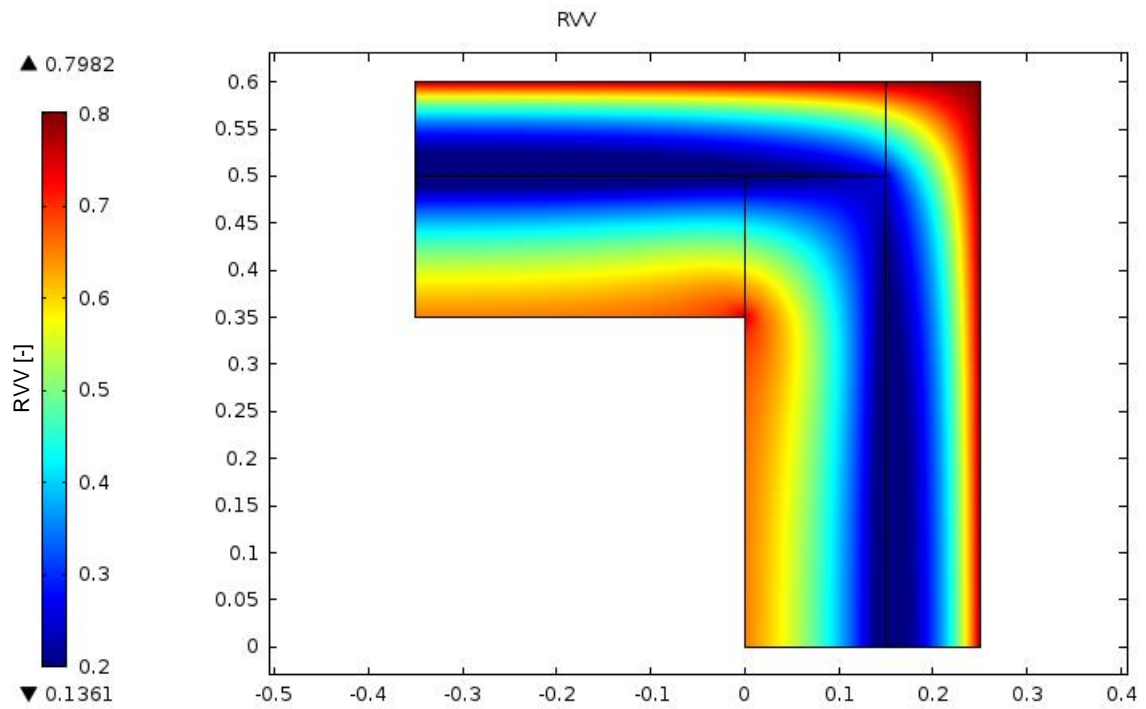
Obr. 5.3.17: Detail 2, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



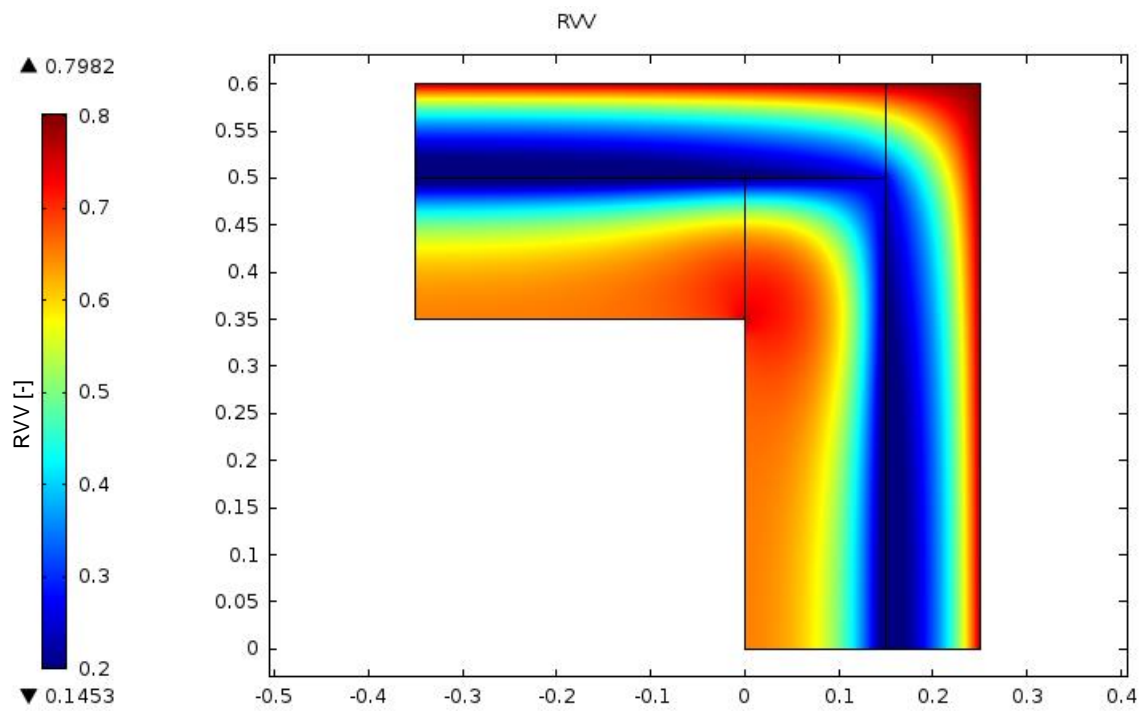
Obr. 5.3.18: Detail 2, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



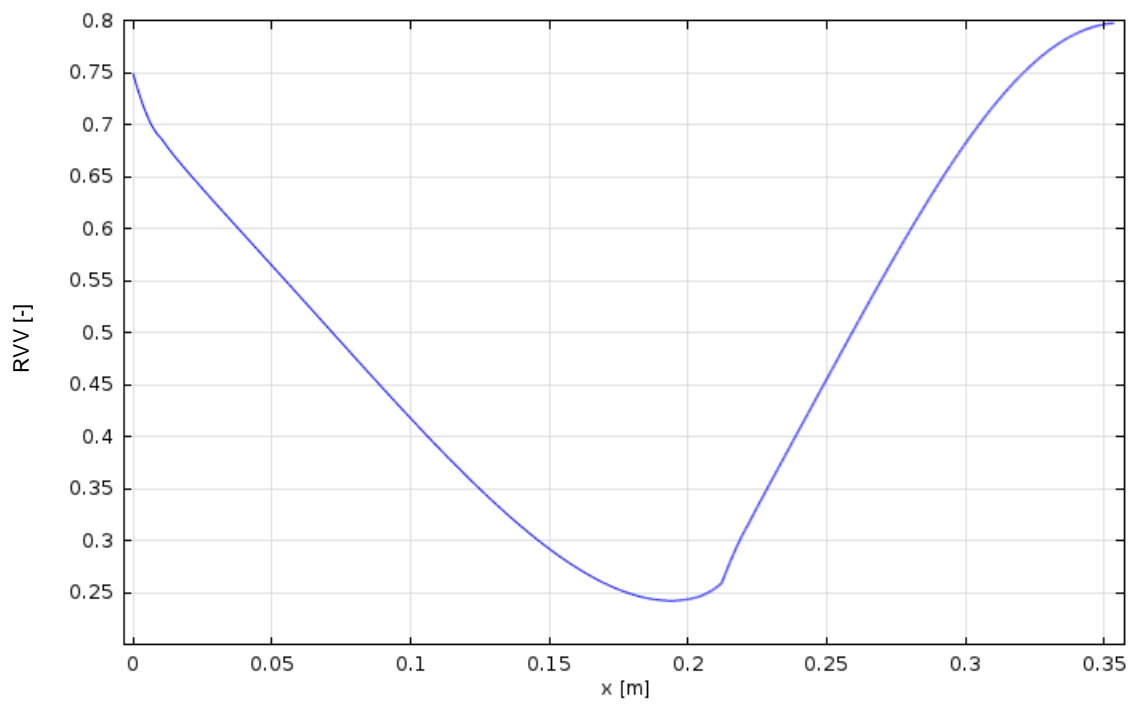
Obr. 5.3.19: Detail 2, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



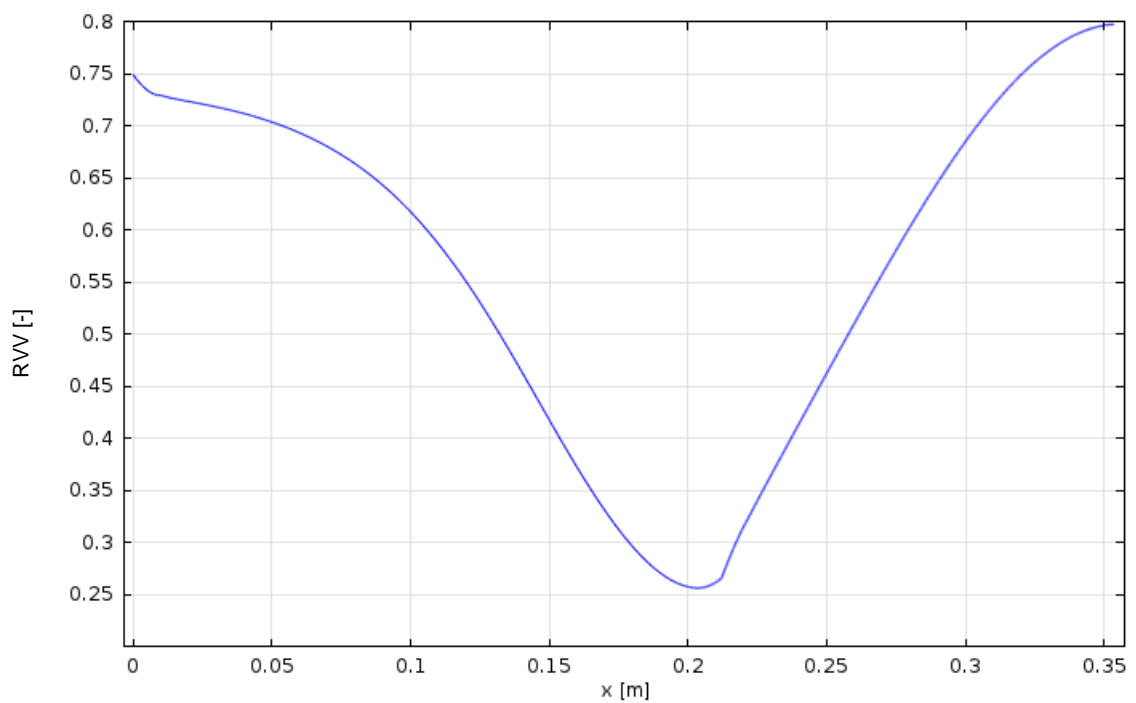
Obr. 5.3.20: Detail 2, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%



Obr. 5.3.21: Detail 2, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%

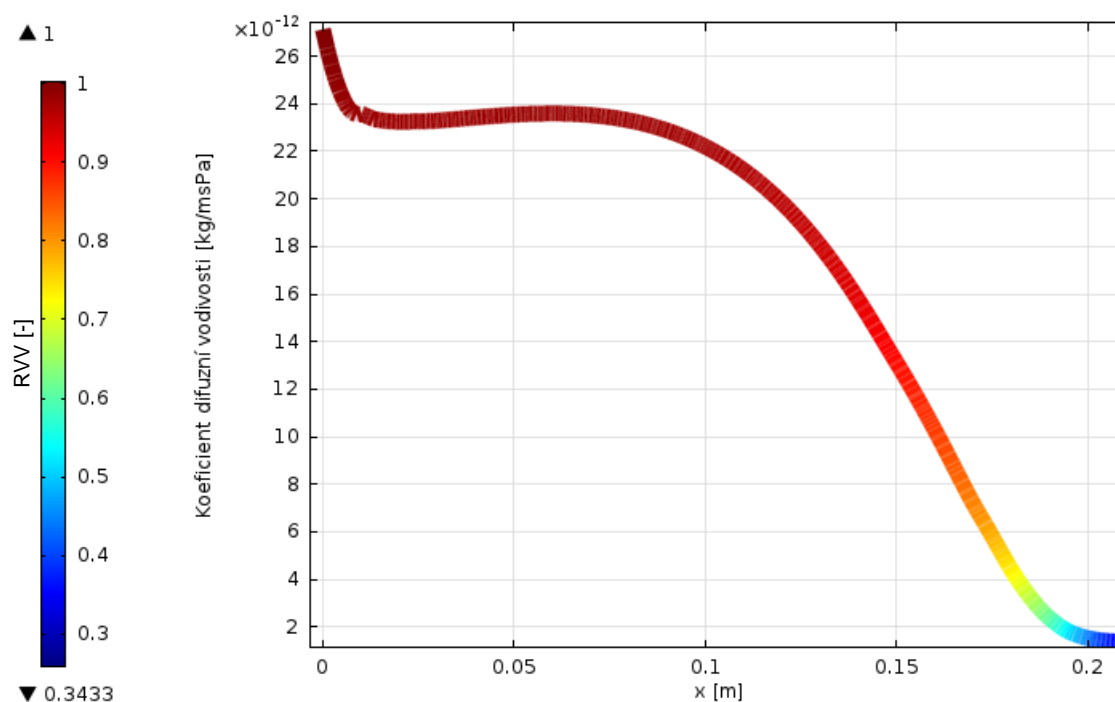


Obr. 5.3.22: Detail 2, PRŮBĚH RWV , δT_{KONST} , in $20^{\circ}C/60\%$ ext $-15^{\circ}C/80\%$

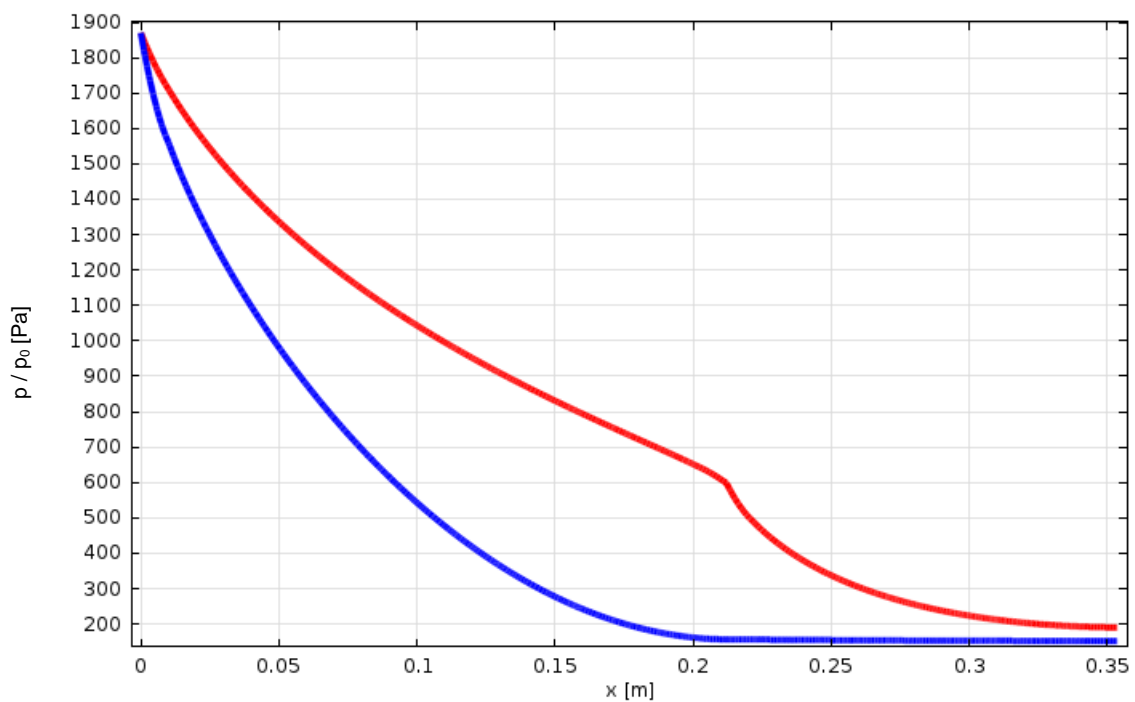


Obr. 5.3.23: Detail 2, PRŮBĚH RWV , δT_{VAR} , in $20^{\circ}C/60\%$ ext $-15^{\circ}C/80\%$

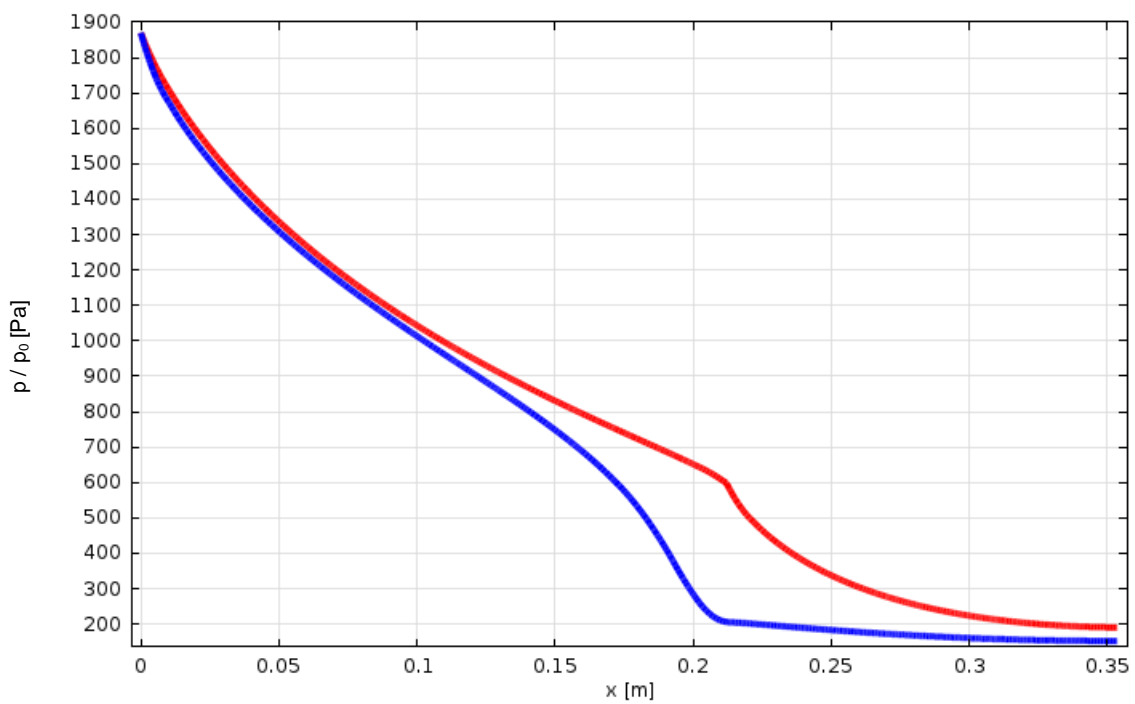
Systém zobrazení výsledků pro detail 2 respektuje předchozí studii detailu 1. Iničiální teplotní pole zůstává společně s parciálním tlakem nasycené vodní páry pro rozdílné vnitřní podmínky (RVV = 60/80%) při zachování teplotního spádu neměnné (Obr. 5.3.16). Co se ale opět mění je vypočtená hodnota δT_{VAR} (Obr. 5.3.17 a Obr. 5.3.24) na přímce protínající roh konstrukce pod úhlem 45°. Hodnoty na Obr. 5.3.18, Obr. 5.3.19, Obr. 5.3.22, Obr. 5.3.23, Obr. 5.3.25, Obr. 5.3.26, Obr. 5.3.29 a Obr. 5.3.30 též odpovídají bodům zmíněné přímky. Posouzením rozdílů vlhkostních polí detailu 2 na Obr. 5.3.20, Obr. 5.3.21, Obr. 5.3.27 a Obr. 5.3.28 a srovnáním s výsledky pro detail 1 lze dojít k závěru, že v rohu takové konstrukce vede zohlednění variability součinitele difuzní vodivosti k výrazným rozdílům, které mohou mít zásadní vliv na posouzení z hlediska možnosti kondenzace a případné degradace dřeva.



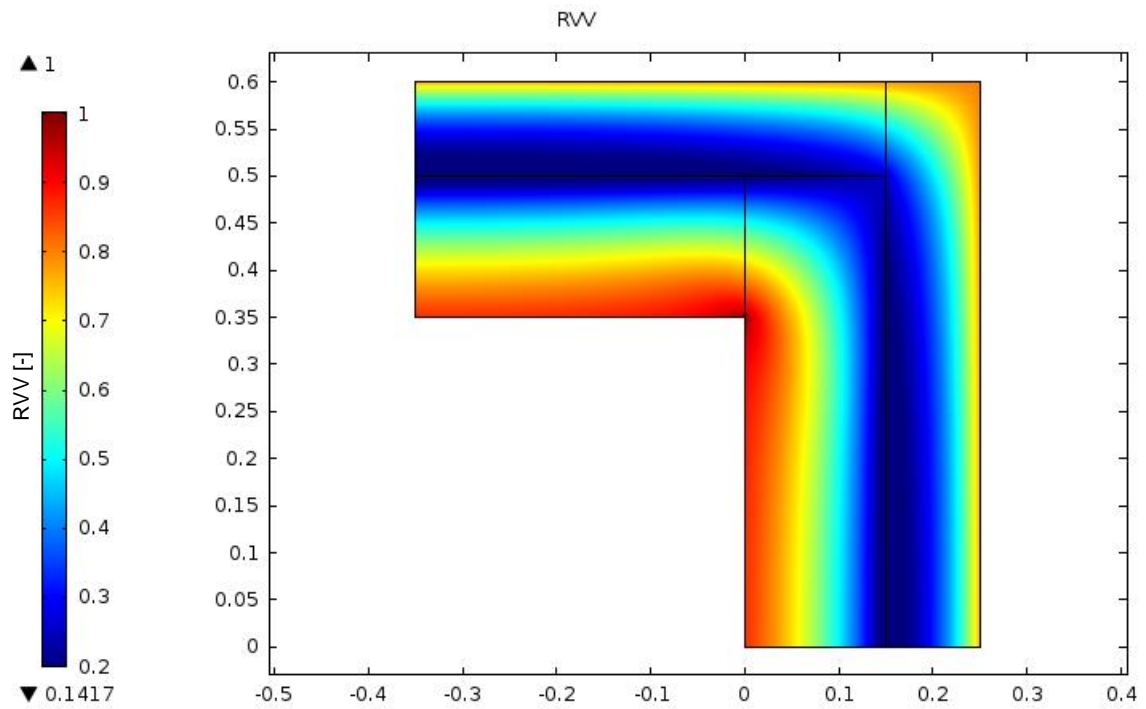
Obr. 5.3.24: Detail 2, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



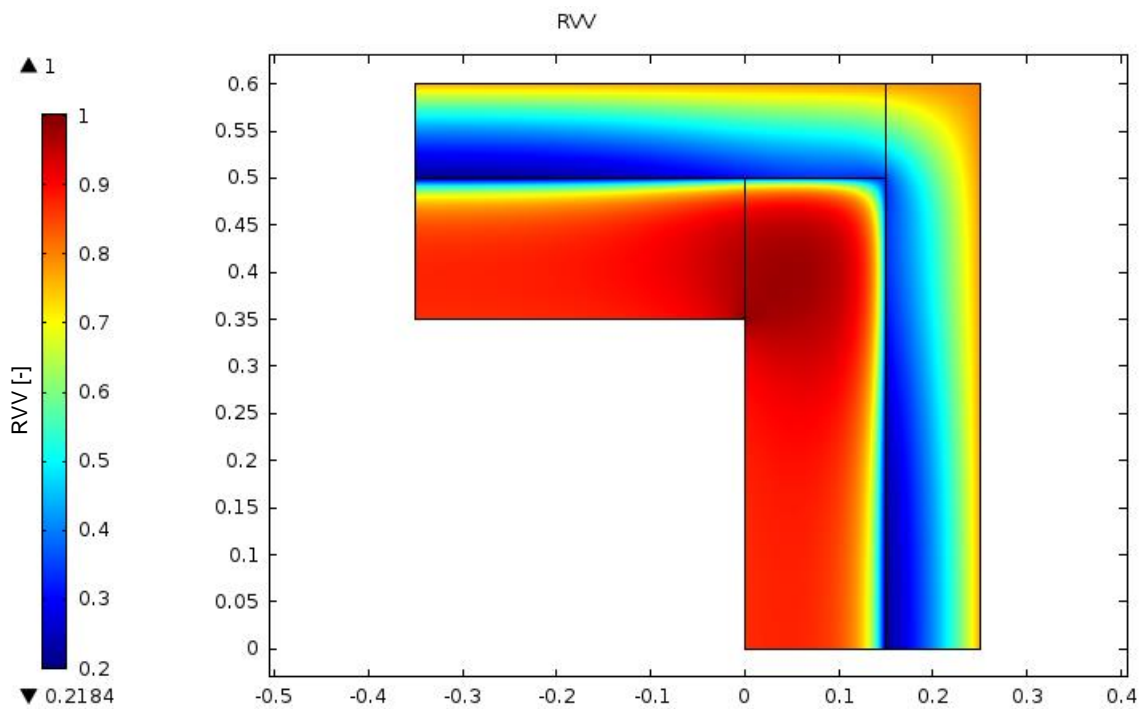
Obr. 5.3.25: Detail 2, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in $20^\circ\text{C}/80\%$ ext $-15^\circ\text{C}/80\%$



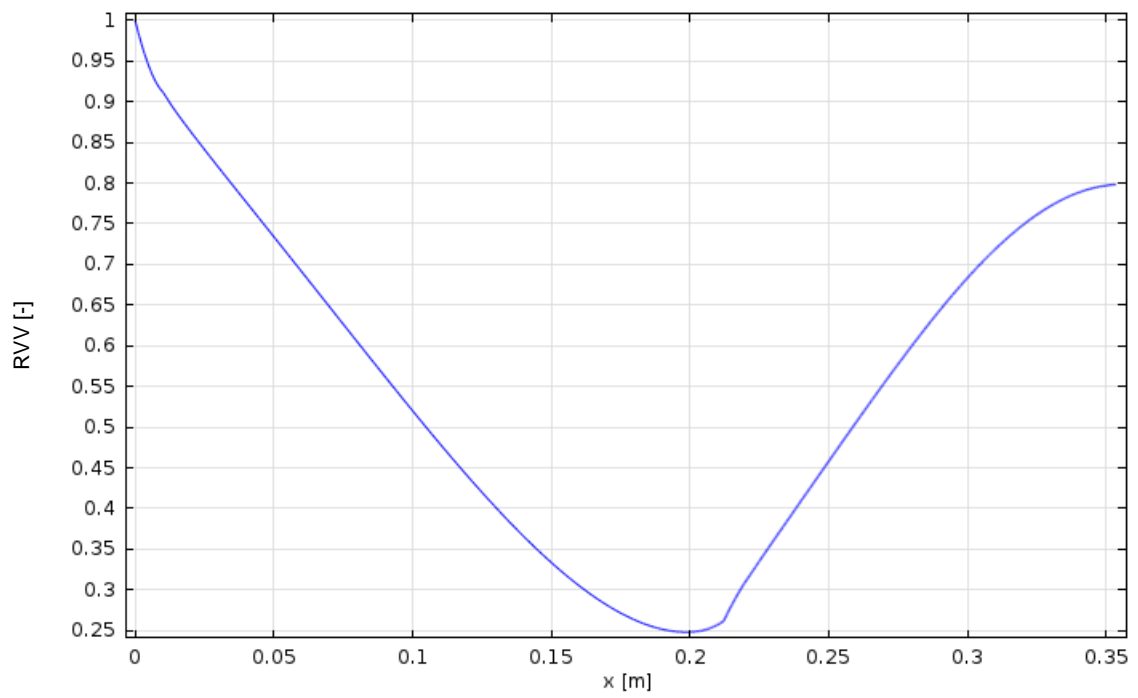
Obr. 5.3.26: Detail 2, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in $20^\circ\text{C}/80\%$ ext $-15^\circ\text{C}/80\%$



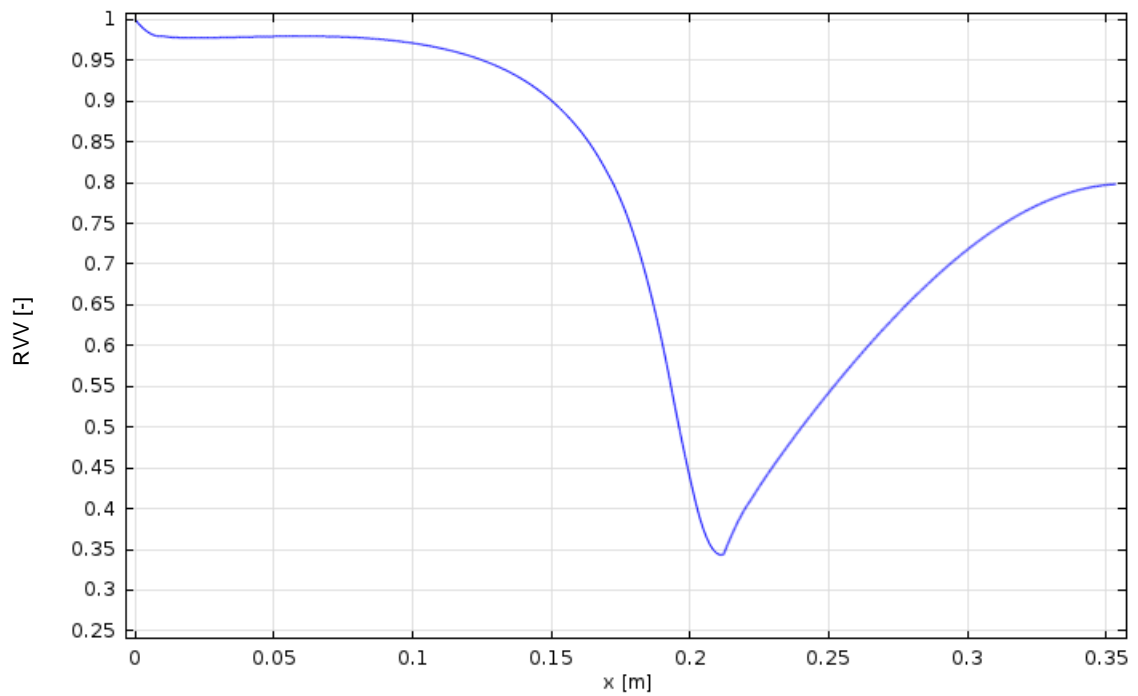
Obr. 5.3.27: Detail 2, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



Obr. 5.3.28: Detail 2, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%

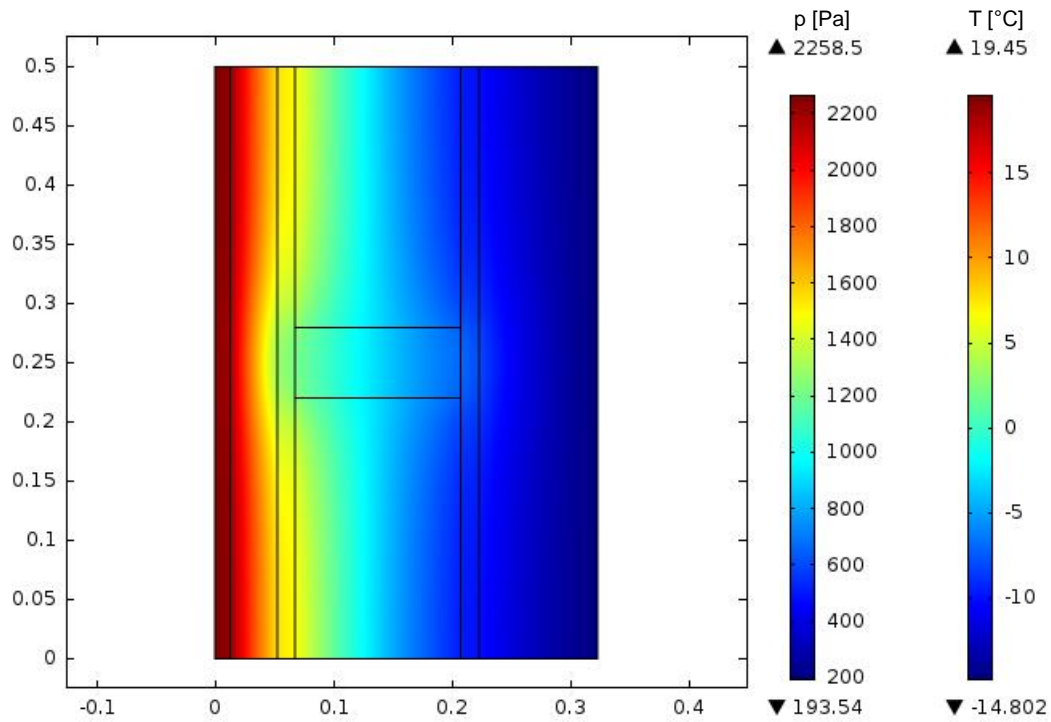


Obr. 5.3.29: Detail 2, PRŮBĚH RVV , δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%

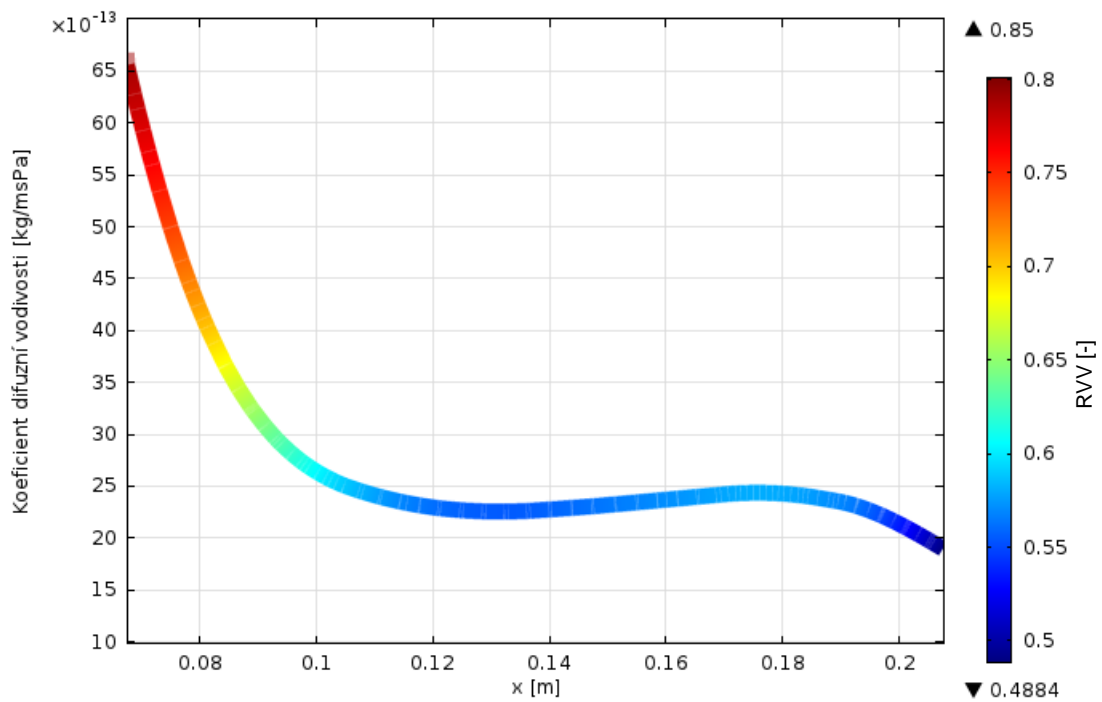


Obr. 5.3.30: Detail 2, PRŮBĚH RVV , δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%

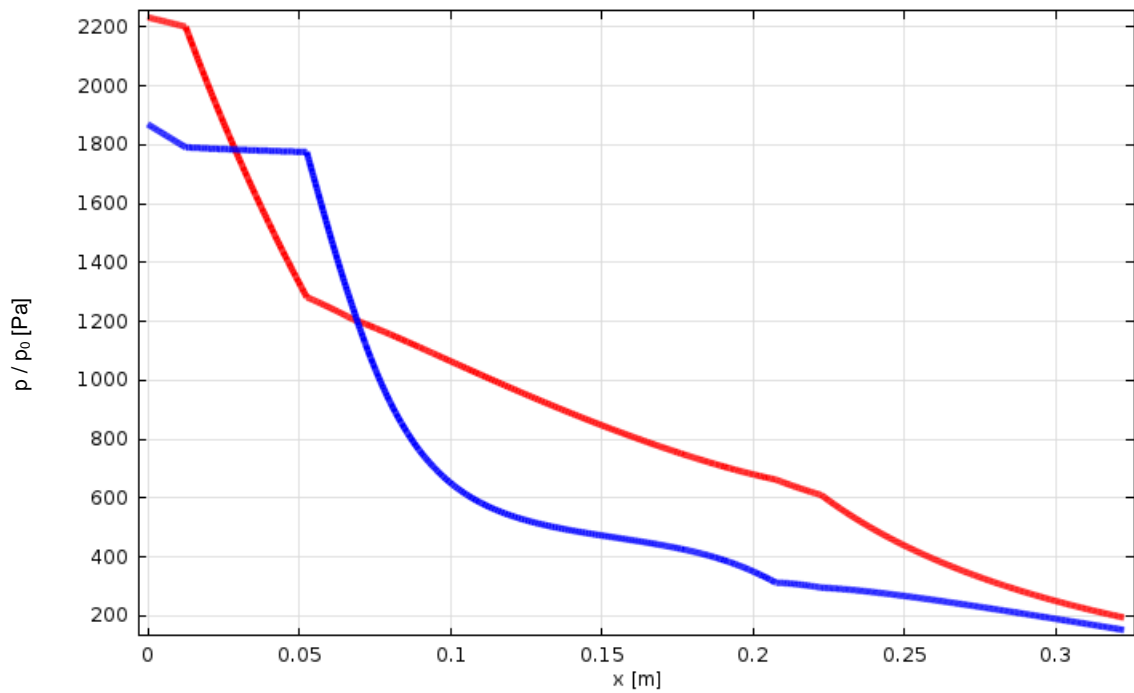
5.3.3 Stěna rámové dřevostavby



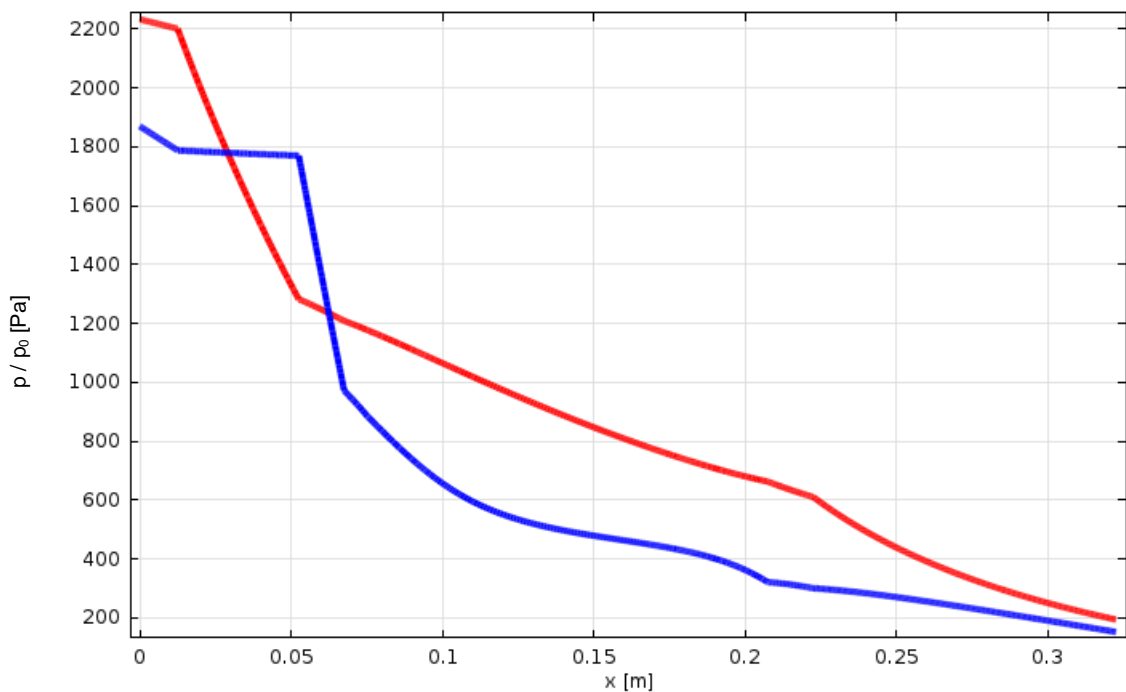
Obr. 5.3.31: Detail 3, ROZLOŽENÍ PARCIÁLNÍHO TLAKU NASYCENÉ VODNÍ PÁRY a TEPLOTNÍ POLE, společně pro δT_{KONST} a δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



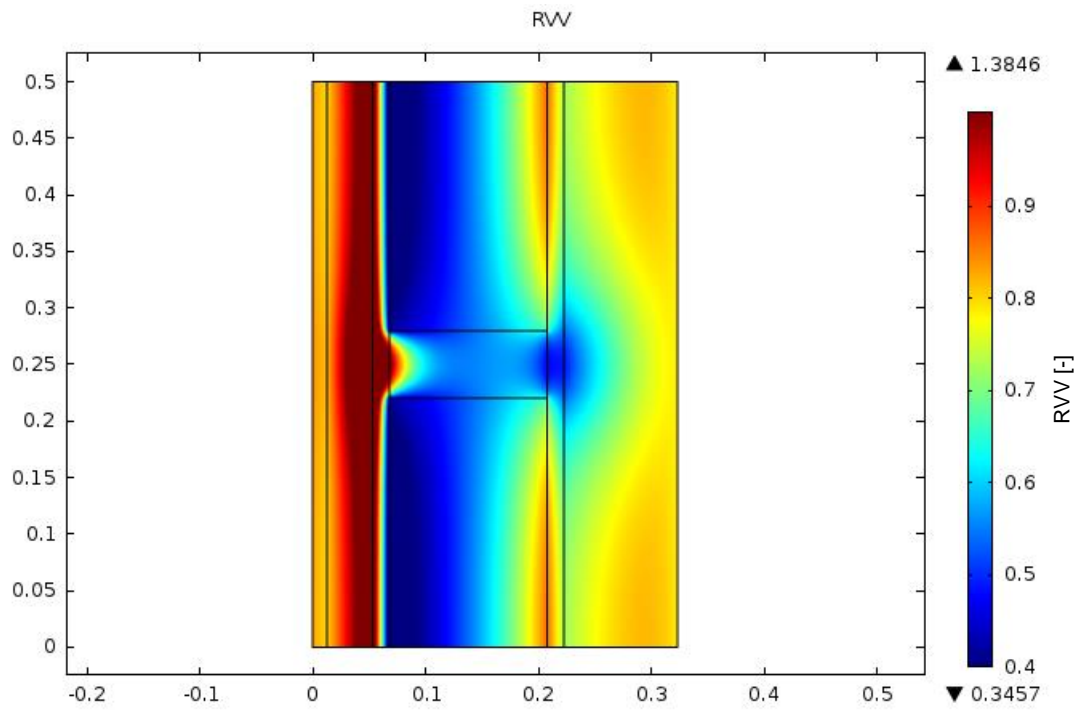
Obr. 5.3.32: Detail 3, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



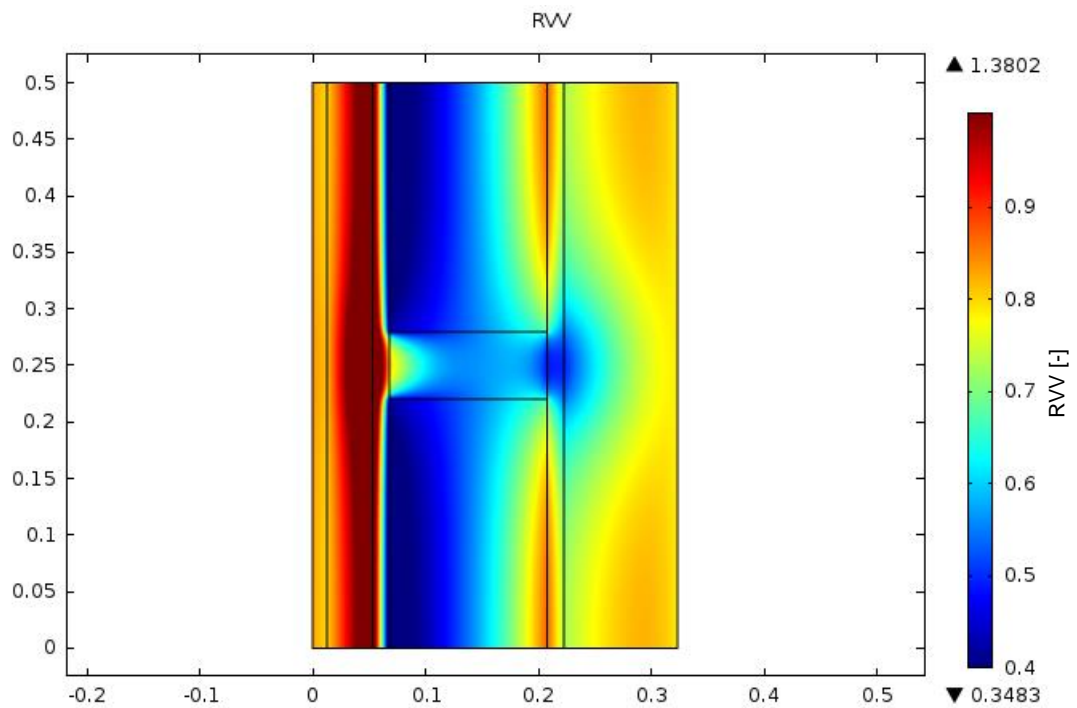
Obr. 5.3.33: Detail 3, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



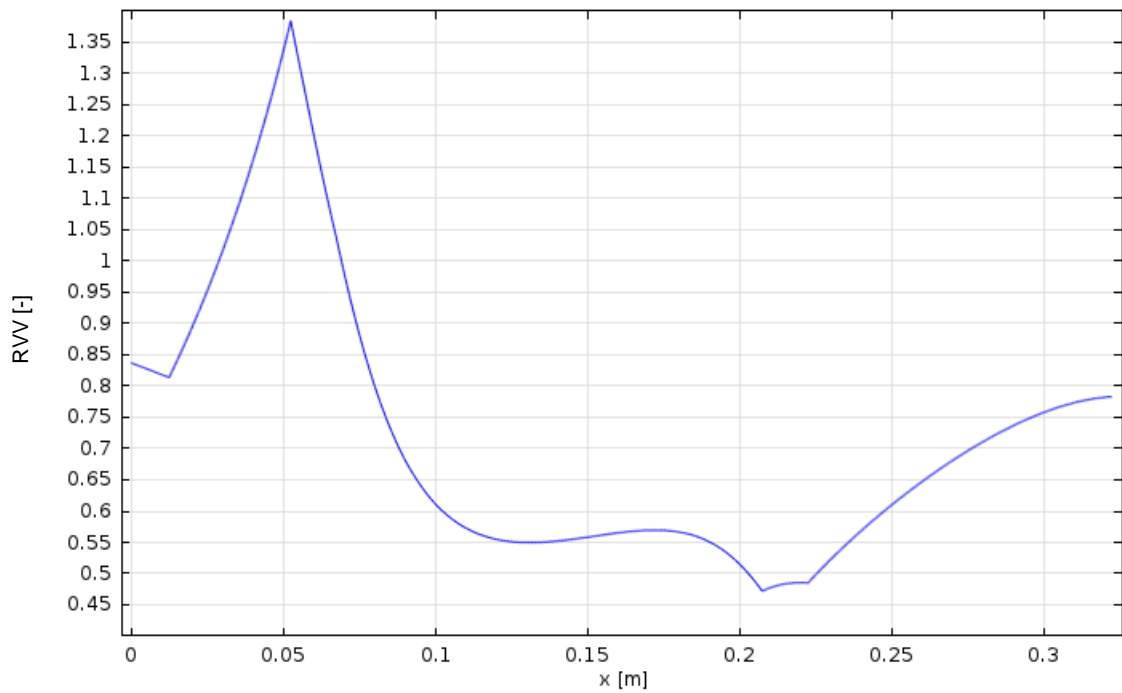
Obr. 5.3.34: Detail 3, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



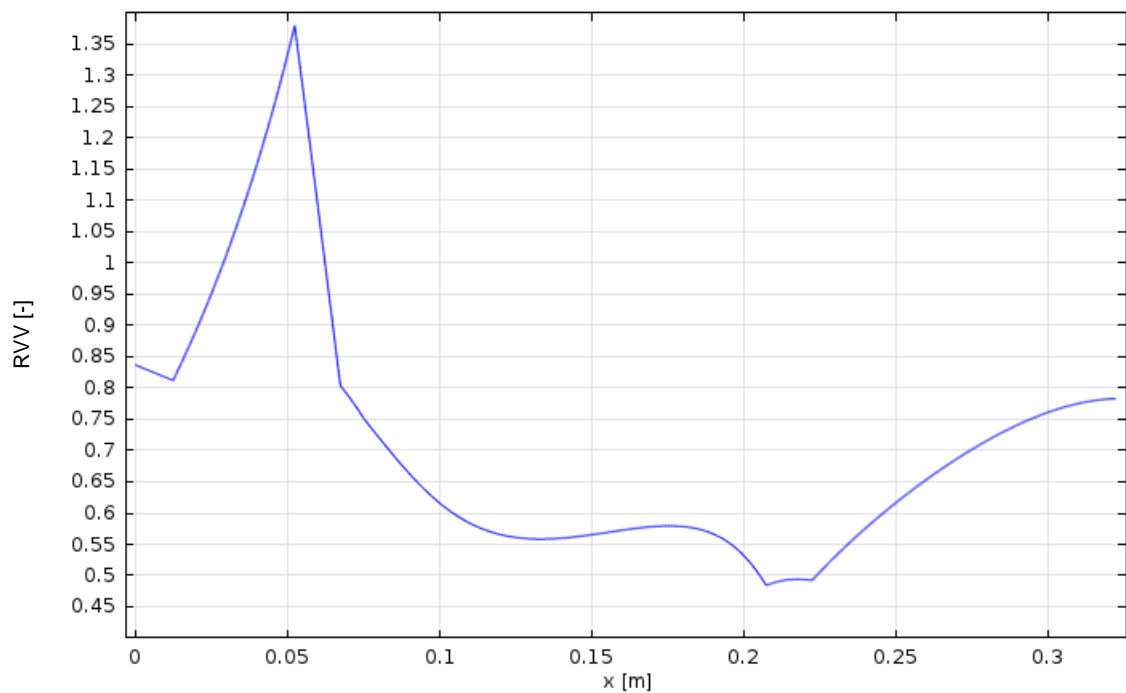
Obr. 5.3.35: Detail 3, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



Obr. 5.3.36: Detail 3, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%



Obr. 5.3.37: Detail 3, PRŮBĚH RWV , δT_{KONST} , in $20^{\circ}\text{C}/80\%$ ext $-15^{\circ}\text{C}/80\%$

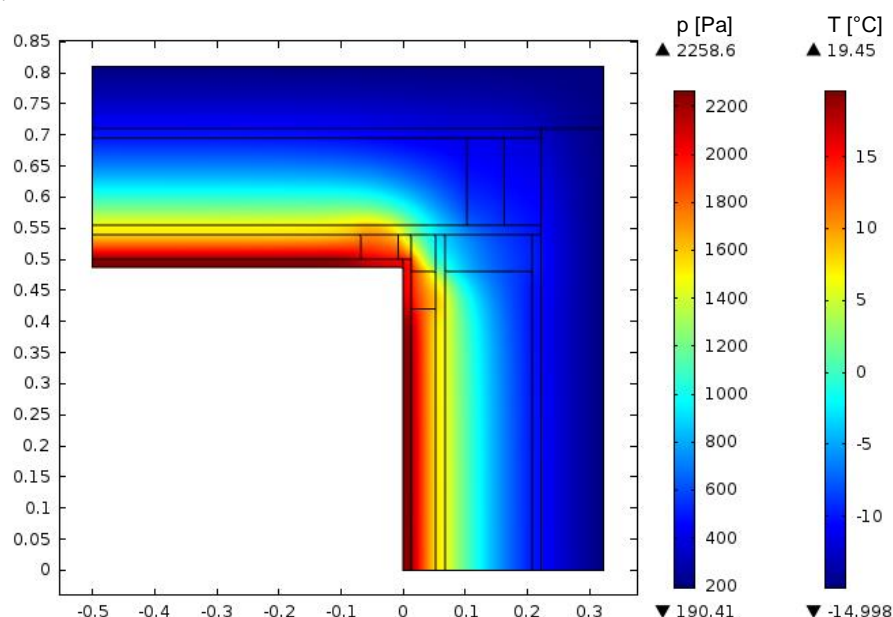


Obr. 5.3.38: Detail 3, PRŮBĚH RWV , δT_{VAR} , in $20^{\circ}\text{C}/80\%$ ext $-15^{\circ}\text{C}/80\%$

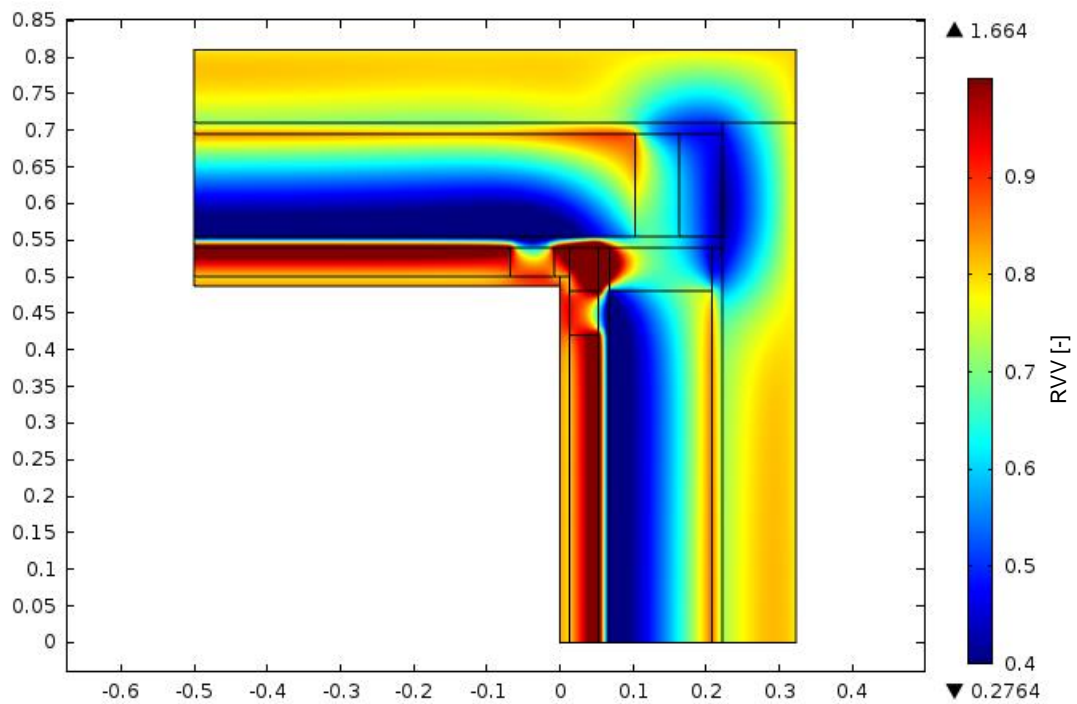
Teplotní pole a rozložení parciálního tlaku nasycené vodní páry na řezu stěnou rámové dřevostavby je pro detail 3 zobrazeno na Obr. 5.3.31. Průběh δT_{VAR} na Obr. 5.3.32 odpovídá bodům řezu konstrukcí v oblasti umístění dřevěného sloupku, přesněji jeho středem, jak je tomu i u ostatních liniových grafů. Průběh parciálního tlaku vodní páry (Obr. 5.3.33, Obr. 5.3.34) a z něj plynoucí RVV (Obr. 5.3.37, Obr. 5.3.38) již nevykazuje takové rozdíly mezi lineárním a nelineárním výpočtem, jako tomu bylo u detailu 1 a 2. Podíl dřeva v této konstrukci je menší a je předmětem diskuze do jaké míry u moderních rámových dřevostaveb variabilita koeficientu difuze ovlivňuje modelové (Obr. 5.3.36) a reálné rozložení vlhkosti.

5.3.4 Detail rohu rámové dřevostavby

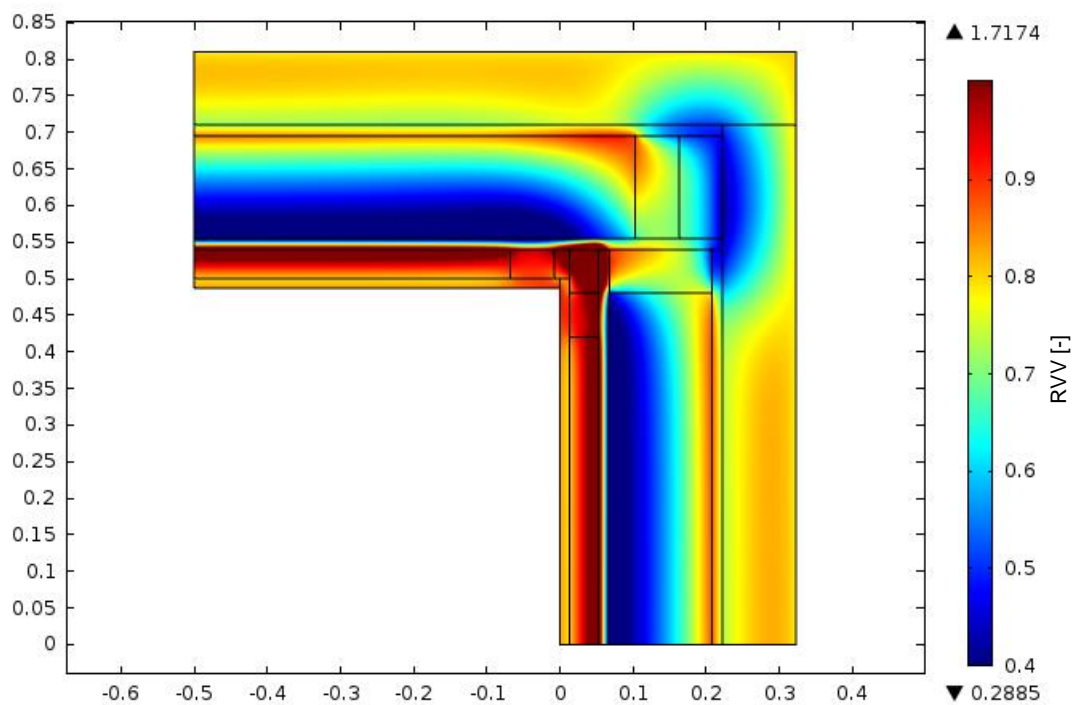
Na závěr kapitoly výsledků lze pro roh rámové dřevostavby po vypočtení teplotního pole (Obr. 5.3.39) na Obr. 5.3.40, Obr. 5.3.43, Obr. 5.3.45, Obr. 5.3.42, Obr. 5.3.44 a Obr. 5.3.45 srovnávat výsledné vlhkostní pole při zahrnutí či zanedbání variability difuzních vlastností OSB do výpočtu. V úvahu je brána pouze lineární závislost daná hodnotami pro suchou a mokrou misku plynoucí z faktoru difuzního odporu daného výrobcem $\mu=200/300$ z tabulky Tab. 3.3.2., což odpovídá hodnotám $6,3-9,4 \text{ e-}13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$. Různými kombinacemi vstupních parametrů δ dřeva a OSB desky jsou vypočteny více či méně rozdílná vlhkostní pole diskutovaná v následující kapitole.



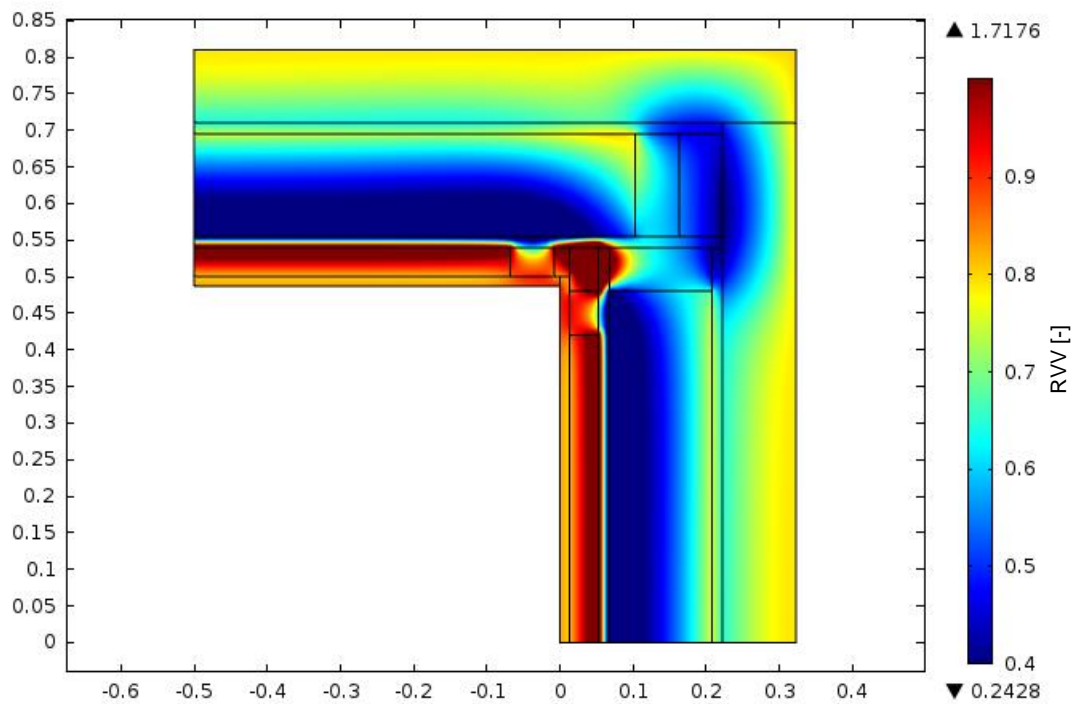
Obr. 5.3.39: Detail 4, ROZLOŽENÍ PARCIÁLNÍHO TLAKU NASYCENÉ VODNÍ PÁRY a TEPLOTNÍ POLE, společně pro δT_{KONST} a δT_{VAR} , in $20^{\circ}\text{C}/80\%$ ext $-15^{\circ}\text{C}/80\%$



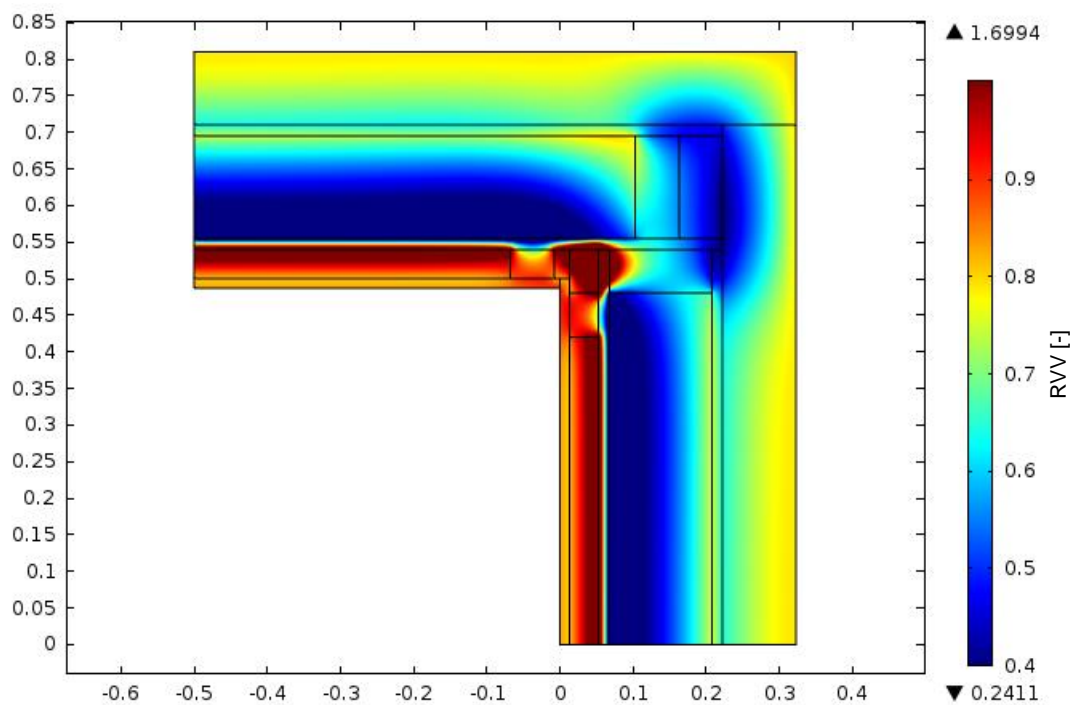
Obr. 5.3.40: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , $\delta_{OSBNORM}$ in 20°C/80% ext - 15°C/80%



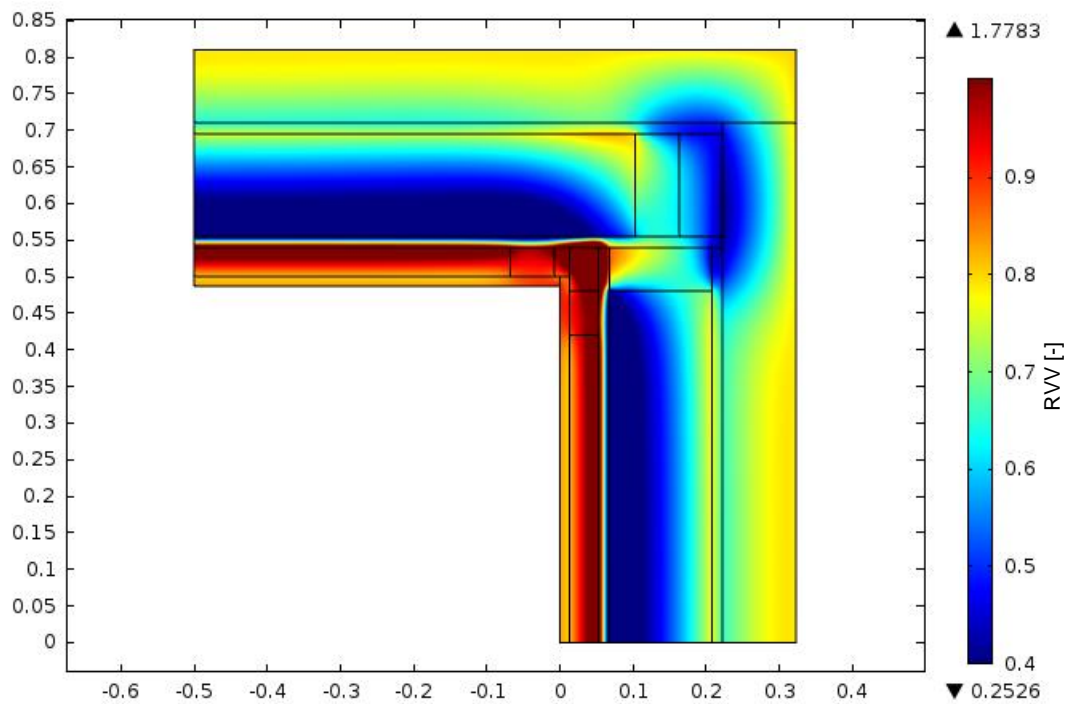
Obr. 5.3.41: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , $\delta_{OSBNORM}$, in 20°C/80% ext 15°C/80%



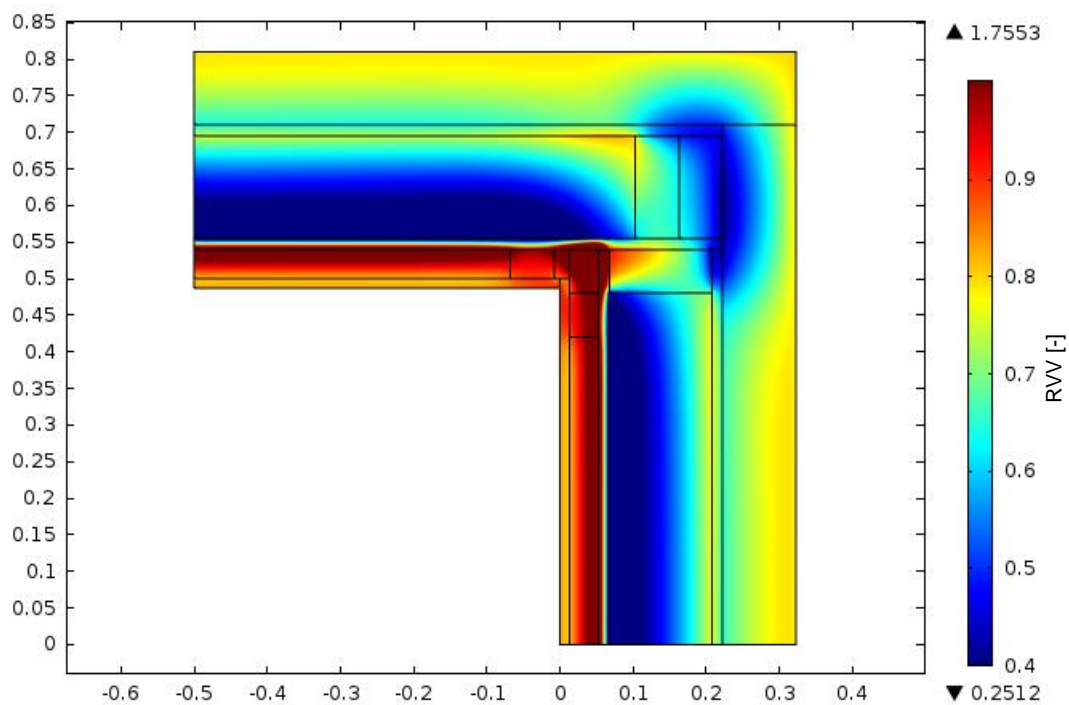
Obr. 5.3.42: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , $\delta T_{OSBKONST}$, in 20°C/80% ext - 15°C/80%



Obr. 5.3.43: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , δT_{OSBVAR} in 20°C/80% ext - 15°C/80%



Obr. 5.3.44: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV , δT_{VAR} , $\delta T_{OSBKONST}$, in $20^{\circ}\text{C}/80\%$ ext - $15^{\circ}\text{C}/80\%$



Obr. 5.3.45: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV , δT_{VAR} , δT_{OSBVAR} in $20^{\circ}\text{C}/80\%$ ext - $15^{\circ}\text{C}/80\%$

6 Diskuze

Problematika variability difuze je uchopena z několika možných úhlů pohledu, které jsou mezi sebou v této diplomové práci navzájem provázány. Pohárková zkouška, jako nástroj pro experimentální zjištění součinitelů difuzní vodivosti, podala výsledky o desetinu řádu vyšší, než byly nalezeny v literatuře (Rode a Clorius, 2004; Valovirta a Vinha, 2004). Z hlediska rozdílů v podmínkách experimentů (teplota a vlhkost) a ve vlastnostech zkušebních vzorků, především průměrné hustotě, se dá míra shody označit za vysokou. Analytický výpočet je experimentem a hodnotami z literatury částečně verifikován, rozsah měření pro jeho úplnou verifikaci je nicméně nerealizovatelný v rámci jediného výzkumu. Závislost δ_T na RVV byla použita do numerického modelu kvůli jednoznačnosti vyjádření oproti závislosti na parciálním tlaku vodní páry. Numerický model porovnává lineární a nelineární výpočet pro masivní konstrukci a pro moderní rámovou konstrukci dřevostavby. Nalezené rozdíly jsou pro detail 1 a 2 poměrně zásadní, zatímco u detailu 3 a 4 již není vlhkostní pole zohledněním variability δ_T zásadně ovlivněno.

Experimentální měření δ_T je v souvislosti s rozměrem této fyzikální veličiny vždy velmi choulostivé na dodržení veškerých zásad pečlivé přípravy a postupu samotného měření. Pro zefektivnění práce a zkvalitnění výsledků byly použity větší vzorky, než v bakalářské práci (Maňák, 2013) a byla přidána sada měření pro nižší průměrnou vlhkost – se silikagelem uvnitř pohárku. Těsnění provedené pomocí PVC pásky umožnilo lepší manipulaci se vzorky a přesnější zjištění jejich váhy a tím i vlhkosti po skončení experimentu. Změřená relativní vlhkost dřeva odpovídá u sady I. vyšší průměrné vzdušné vlhkosti, než která byla očekávána. I přes ověření vzdušné vlhkosti u silikagelu blížící se 0% pravděpodobně toto médium nedokáže zajistit tak nízkou vlhkost u povrchu dřeva, a proto jsou i výsledky δ_T pro tuto sadu měření mírně vyšší, než uvádí literární zdroje. Podobně je tomu i u sady II. Tendenci rostoucí variability s klesající průměrnou vlhkostí (viz Tab. 5.1.3) lze vysvětlit rozdílnými hodnotami hmotnostních úbytků, přičemž nižší hodnoty jsou zatíženy vyšší chybou měření. Průměrně se denní hmotnostní úbytky pohybovaly od 0,15 g pro I. sadu, 0,25 g pro II. sadu po 0,65 g pro III. sadu měření, přičemž absolutní rozptyl sumy hmotnostních úbytků (Obr. 5.1.3) je pro všechny sady stejný, tím je vysvětlována také zmíněná variabilita, která je relativním ukazatelem. Vyšším počtem měřených vzorků by nižší variability pravděpodobně dosaženo nebylo, zpřesnění by mohlo proběhnout na

úrovni měřících přístrojů a umístění vzorků do komory s téměř nulovými výkyvy podmínek, kde by byly soustavy zároveň i váženy. Logika samotného experimentu – pohárkové zkoušky – vyvolává další otázku, zda při měření za různých okolních podmínek vyvolávajících stejnou průměrnou vlhkost lze dojít ke stejným koeficientům difuze či součinitelům difuzní vodivosti. Stejně gradienty ale různé průměrné vlhkosti měřených vzorků by jednoznačně k různým výsledným koeficientům difuze vést měly.

Analytický výpočet podává v oblasti běžných vlhkostí srovnatelné výsledky oproti literatuře a experimentu. Pro vlhkosti vzduchu pod 20% a nad 90% již ale příliš neodpovídá a bylo by třeba aplikovat určitou korekci snižující výsledné hodnoty. Tento nesoulad může být dán mnoha faktory vzhledem ke komplexnosti samotného výpočtu. Jedním z nich je vyjádření sorpční izotermy a její směrnice, jež může být mezi různými dřevy proměnlivá. Nahlédneme-li na variabilitu součinitele difuzní vodivosti jako na $f(\rho, T, p)$, má největší vliv právě tlak nasycené vodní páry a tedy i RVV a samozřejmě těmto hodnotám odpovídající vlhkost dřeva. V menší míře má také vliv hustota absolutně suchého dřeva, v rozsahu 300-1000 kgm⁻³ se mění v rozsahu přibližně půl řádu, zatímco pro RVD = 0% - MH dochází průměrně k navýšení o jeden celý řád (grafy na Obr. 5.2.1 a Obr. 5.2.2). Pro exaktní verifikaci by bylo potřeba u daného dřeva, kromě zmíněného rozsáhlého měření, stanovit také jeho sorpční izotermu. Pro teploty pod bodem mrazu nebyla nalezena odpovídající měření, na druhou stranu se právě kvůli tomu dá analytický výpočet označit za jedinečný nástroj pro stanovení součinitele difuzní vodivosti pro takto nízké teploty. Difuzní chování dřeva při hodnotách pod bodem mrazu není zatím příliš prozkoumanou oblastí, charakter vodní páry v buněčné stěně je ovšem nemrznoucí (Engelund et al., 2013) a proto lze do určité míry hodnoty součinitele difuzní vodivosti nebo koeficientu difuze extrapolovat či vypočítat podobně jako pro teploty nad bodem mrazu. Prakticky aplikovatelná je také parciální derivace koncentrace vlhkosti podle parciálního tlaku vodní páry $\partial c/\partial p$ uvedená ve vzorci (4.2.21), kterou lze použít pro přepočtení experimentálně stanovených koeficientů difuze na součinitel difuzní vodivosti.

Známa variabilita součinitele difuzní vodivosti v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu byla pomocí numerického modelu porovnávána s výpočtem uvažujícím pouze konstantní δ_T . Stacionární vyjádření průběhu difuze tepla a vlhkosti v tomto případě pro zjištění rozdílů mezi nelineárním a lineárním výpočtem postačuje. Ve skutečnosti by nestacionární výpočet mohl lépe vypovídat, v kontextu této práce je ale stacionární přístup smysluplnější, mimo jiné také kvůli rozdílným hodnotám koeficientů difuze

(δ_T a D) měřených stacionární a nestacionární metodou (Sonderegger, 2011). Pro numerický model byly použity hodnoty δ_T z grafu Obr. 5.2.3, přičemž byla pro zjednodušení zanedbána závislost na teplotě, která je dle Obr. 5.2.2 v rozsahu zadávaných teplot minimální. V kapitole 5.3 jsou zkoumány rozdíly lineárního a nelineárního výpočtu u masivní a rámové dřevostavby. Pro nižší vlhkostní a teplotní spády jsou výsledky nevyovídající, proto byly podmínky exteriéru vždy $T = -15^\circ\text{C}$ a $RVV = 80\%$, a v interiéru $T = 20^\circ\text{C}$ a $RVV = 60$ nebo 80% . U masivní konstrukce nelineární výpočet ukazuje na vyšší průměrnou vlhkost konstrukce než u lineárního výpočtu, u podobných konstrukcí tak může dojít k nevhodnému návrhu při zanedbání variability difuzních vlastností. Maximální hodnoty vlhkosti rozdílné nejsou, zásadně se ale mění jejich průběh obzvláště pro případ s 80% vlhkostí interiéru. Detail 2 za takových podmínek vykazuje zvýšení vlhkosti v rohu konstrukce při uvažování variability difuzních vlastností až na hranici kondenzace. Naopak u detailu 3 a 4 rámové dřevostavby ukazuje nelineární výpočet na lepší schopnost dřevěných prvků z konstrukce odvést vlhkost, než je tomu u prostého lineárního výpočtu. V oblasti stykování stěn jsou vidět mírné rozdíly ve vlhkostních polích, a to zejména na Obr. 5.3.40 a Obr. 5.3.41. Okrajově byly studovány i rozdíly za uvažování proměnlivého součinitele difuzní vodivosti OSB desky. Z materiálů na bázi dřeva má zásadní vliv na fungování celé sendvičové stěny difuzně pootevřená dřevostavby, má za úkol co nejvíce brzdit prostup vodní páry z interiéru do konstrukce stěny. V Tab. 3.3.2 jsou uvedeny možné hodnoty faktorů difuzních odporů OSB, které byly po převedení na součinitele difuzní vodivosti aplikovány jako materiálová vlastnost v numerickém modelu. Suché a mokré veličiny umožňovaly definovat pouze lineární závislost, i přesto jsou mezi Obr. 5.3.42, Obr. 5.3.43, Obr. 5.3.44 a Obr. 5.3.45 rozdíly mezi variantami s $\delta_{TOSBKONST}$ a $\delta_{TOSBVAR}$ neznatelné. Zásadní rozdíl je ale globálně ve vlhkostním poli kvůli změně samotné hodnoty δ_T OSB desky. Normová hodnota $\mu = 150$ u parobrzděné roviny znamená, že deska propouští více vlhkosti dovnitř a je zde vyšší riziko vlhkostní degradace dřevěných prvků, než při $\mu = 200/300$, na druhou stranu v instalační předstěně vyšší faktor difuzního odporu zvyšuje riziko kondenzace. Parozábrana, a správné vyřešení detailů jejího napojení či případných prostupů, se tedy dá označit za stěžejní prvek takové konstrukce vzhledem k vlhkostnímu chování dřevostavby. Značné zpřesnění stávajícího modelu by spočívalo ve vytvoření modelu vázaného šíření tepla a vlhkosti v konstrukci, kde by byla zároveň zohledněna závislost koeficientu tepelné vodivosti na vlhkosti. Tepelná vodivost s rostoucí vlhkostí podstatně stoupá nejen u

dřeva (Sonderegger a Niemz, 2011) ale i u materiálů na bázi dřeva (Sonderegger et al. 2009).

Z fyzikálního hlediska není u hygrokopických materiálů považován součinitel difuzní vodivosti, jehož hybnou silou je gradient parciálního tlaku vodní páry, za příliš korektní vyjádření difuzních vlastností. Koeficient difuze, jehož hybnou silou je gradient koncentrací vlhkosti dřeva, je v dřevařské praxi preferovanou veličinou, obzvláště v oblasti sušení dřeva. V oboru stavební fyziky je ale dřevo kombinováno s jinými materiály, pro které součinitel difuzní vodivosti k definici difuzních vlastností vyhovuje a je běžně užíván. Pro správnou implementaci dřeva do numerického modelu takových konstrukcí je znalost δ_T , a jeho závislosti na vnějších vlhkostních podmínkách, stěžejní. Variabilita difuzních koeficientů dřeva je z pohledu stavební fyziky zanedbávána, což je z důvodu obtížné metodiky pro stanovení potřebných veličin pochopitelné. U konstrukcí rámových dřevostaveb nebyl shledán zásadní rozdíl v absolutních hodnotách RVV a tedy i vlhkosti dřeva, jejich profil v průřezu dřevěných prvků ale rozdílný je. Pro přesnější stanovení tohoto vlhkostního profilu je tedy použití nelineárního výpočtu doporučeno. Pro celkové posouzení konstrukce ale nebyly shledány závažné důvody, které by zrazovaly od užívání konstantního součinitele difuzní vodivosti. Naopak u masivních dřevostaveb již nelineární výpočet podává diametrálně odlišné výsledky, které mohou vést k nesprávnému posouzení celkové konstrukce, kritický je v tomto případě detail napojení v rohu. Ve skutečné konstrukci má také určitý vliv samotný fasádní systém nebo například i podkladní lepidla pro vnější izolaci. Nesmíme opomenout také možné imperfekce při výrobě a to, že čím více je v konstrukci materiálu na bázi dřeva, tím více mohou být teplotní, vlhkostní a difuzní vlastnosti variabilní.

7 Závěr

V práci bylo provedeno experimentální měření součinitelů difuzní vodivosti, analytické vyjádření těchto koeficientů a výsledná variabilita byla zohledněna ve vybraných konstrukcích dřevostaveb pomocí numerických simulací. Tyto numerické simulace byly založeny na řešení modelu popisující teplotní a vlhkostní pole pomocí metody konečných prvků.

Experiment, analytický výpočet i numerický model, jako stěžejní části této diplomové práce, podávají čitelné výsledky vlivu variability součinitele difuzní vodivosti na stavebně-fyzikální posouzení dřevěných konstrukcí. Vypočtené hodnoty δ_T platné pro smrk o průměrné hustotě $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ jsou založené na pohárkové zkoušce při průměrných vlhkostech vzduchu 25, 62,5 a 75 % které byly srovnány s literaturou, přičemž jsou diskutovány rozdíly a jejich příčiny. Experiment také částečně verifikoval klasický analytický výpočet dle Choong 1965 a Stamm 1960 rozšířen v Siau 1995, který byl upraven tak, aby byly získány hodnoty δ_T v závislosti na parciálním tlaku vodní páry a RVV. Numerický model používal ke stacionárnímu nelineárnímu výpočtu závislost δ_T na RVV, ten byl porovnán s výpočtem lineárním. Zásadní rozdíl ve vypočteném vlhkostním poli byl nalezen u detailu rohu 15cm masivní stěny zateplené 10 cm fasádní minerální izolace. Nelineární výpočet poukazuje na vlhkost vzduchu blížící se nasycení a na možnost kondenzace, zatímco lineární výpočet nikoliv. U rámové dřevostavby se skladbou 12,5 mm sádrovláknitá deska, 15 mm OSB, 140 mm celulózová izolace a dřevěný sloupek, 15 mm DHF a 100 mm minerální fasádní izolace byly naopak rozdíly mezi lineárním a nelineárním výpočtem zanedbatelné. Zásadní u takové konstrukce nebyla variabilita difuzních vlastností dřeva, ale spíše rozdílné hodnoty součinitele difuzní vodivosti OSB desky na interiérové straně.

Závěry této práce by bylo možné v budoucnu zohlednit v rozsáhlejších modelech moderních masivních dřevostaveb, kde byl pozorován výrazný vliv variability difuze na výsledné vlhkostní pole. Na druhou stranu lze pro difuzně otevřené rámové dřevostavby konstatovat, že zanedbání variability součinitele difuzní vodivosti dřeva nevede k zásadním nedostatkům v posouzení vlhkostní odezvy konstrukce.

8 Conclusion

In this thesis an experimental measurement together with analytical calculation of vapor diffusion permeability coefficients was performed. The variability was taken into account in a numerical model of selected timber structures. These numerical simulations are based on solving the temperature and the moisture field by finite element method.

The experiment, analytical calculation and numerical model, as a key parts of this diploma thesis, give clear results of the influence of variability of vapor permeability coefficient on building physics of timber structure. Resulting δ_T values, valid for spruce at $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, based on cup method, which was performed at the average humidity 25, 62,5 and 75 %, are compared with similar researches and the analytical calculation. The experiment partially confirmed analytical calculation by Choong 1965 and 1960 Stamm Siau expanded in 1995, which was modified to obtain the values δ_T depending on the partial pressure of water vapor and relative humidity. The numerical model used δ_T dependence on relative humidity for stationary non-linear calculation, which has been compared with linear calculation. The essential difference in the calculated moisture field was found in the detail of solid wood structure corner composed of 15 cm solid timber wall insulated by 10 cm mineral wool). Nonlinear calculation shows humidity approaching saturation and the possibility of condensation, while linear calculation does not. For timber frame wall model composed of 12.5 mm gypsum board, 15 mm OSB, 140 mm cellulose insulation and wooden column, 15 mm DHF and 100 mm mineral facade insulation, were the differences between linear and non-linear calculation negligible. The essential part of the simulation of such structure was not the variability of diffusion properties of wood itself but rather different values of the vapor permeability of OSB on interior side.

In the future research the conclusions could be taken into account in the comprehensive models of modern solid wood structure, where there was a significant effect of the variability of vapor permeability observed. On the other side, for vapor diffusion-open timber frame houses variability neglecting diffusion variability of wood does not lead to major inaccuracy in the moisture response assessment of the structure.

9 Použitá literatura

- Ahlgren, L. 1972.** Moisture fixation in porous building materials. Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, Report 36.Lund, Sweden.
- Burr, H. K., Stamm, A. J. 1956.** Diffusion in wood, Forest Service U. S. Department of Agriculture, 18 s.
- Canada Mortgage and Housing Corporation-CMHM. 2003.** Review of hygrothermal models for building envelope retrofit analysis. Research highlights, Technical series 03–128
- Delgado, J. M., Barreira, E., Ramos, N. M., & de Freitas, V. P. 2013.** Hygrothermal Simulation Tools. In *Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics*. s. 21-45. Springer Berlin Heidelberg.
- Dushman, S., Lafferty, J. M. 1962.** Scientific foundations of vacuum technique. Wiley, New York, 806 p.
- Eitelberger, J., Hofstetter, K., Dvinskikh, S.V. 2011a.** A multi-scale approach for simulation of transient moisture transport processes in wood below the fiber saturation point. *Composites Science and Technology*, 71(15), pp. 1727-1738.
- Eitelberger, J., Svensson, S., Hofstetter, K. 2011b.** Theory of transport processes in wood below the fiber saturation point, Physical background on the microscale and its macroscopic description, *Holzforschung*, 65(3), pp. 337-342.
- Eitelberger, J., Svensson, S. 2012.** The Sorption Behavior of Wood Studied by Means of an Improved Cup Method, *Transport in Porous Media*, 92(2), pp. 321-335.
- Engelund, E.T., Thygesen, L.G., Svensson, S., Hill, C.A.S. 2013.** A critical discussion of the physics of wood-water interactions, *Wood Science and Technology*, 47(1), pp. 141-161.
- Fick, A. 1855.** Ueber Diffusion In *Annalen der Physik* 170 (1), [online] Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. s. 59–86, Dostupné na world wide web: <<http://onlinelibrary.wiley.com>>
- Hedlin, C.P. 1967.** Sorption isotherms of twelve woods at subfreezing temperatures. *Forest Products Journal* 17(12):43-48.
- Hernandez, R. E., Bizoň, M. 1994.** Changes in shrinkage and tangential compression strength of sugar maple below and above fiber saturation point In *Wood and fiber science* 26(3). s. 360–369.

- Hill, C. A. S. 2006.** Wood Modification—Chemical, Thermal and Other Processes. Wiley, Sussex. 260 s.
- Horáček, P. 2004.** Model vázaného šíření vlhkostního a teplotního pole při sušení dřeva, Brno: Mendelova Univerzita v Brně. 126 s.
- Horáček, P. 2008.** Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.
- Choong, E.T. 1965.** Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods. For.Prod.J., 15(1), pp. 21-27.
- Joly, C., Gauthier, R. and Escoubes, M. 1996.** Partial masking of cellulosic fiber hydrophilicity for composite applications. Water sorption by chemically modified fibers. Journal of Applied Polymer Science, 61(1), pp. 57-69.
- Kang, W., Kang, Ch. W., Chung, W. Y., Eom, Ch. D., Yeo, H. 2007.** The effect of openings on combined bound water and water vapor diffusion in wood, Journal of Wood Science 54, s. 343-348.
- Krabbenhøft, K., Damkilde, L., & Hoffmeyer, P. 2003.** Moisture transport in wood: A study of physical-mathematical models and their numerical implementation. Disertační práce. Danmarks Tekniske Universitet. 105 s.
- Kolb, J. 2011.** Dřevostavby. Grada Publishing. 317 s. ISBN 978-80-247-4071-3
- Kollman, F. 1951.** Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Vol. 1, 2nd edition, Springer, Heidelberg, New York
- Maňák, O. 2013.** Součinitel difuze vodní páry ve dřevě. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. 56 s.
- Rautkari, L., Hill, C. A. S., Curling, S., Jalaludin, Z., Ormondroyd, G. 2013.** What is the role of the accessibility of wood hydroxyl groups in controlling moisture content?. Journal of Materials Science 48 (18), s. 6352-6356
- Rode, C., Clorius, Ch. O. 2004.** Modeling of Moisture Transport in Wood with Hysteresis and Temperature-Dependent Sorption Characteristics, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference, 15 s.
- Ross, R. J. 2010.** Wood handbook: wood as an engineering material. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison. 509 s.
- Siau, J.F. 1995.** Wood: Influence of moisture on physical properties. *Wood: Influence of Moisture on Physical Propertie.* 227 s.
- Skaar, Ch. 1988.** Wood-Water Relations. Berlin: Springer-Verlag, 283 s. ISBN 3-540-19258-1.

- Slanina, P. 2006.** Difúzní vlastnosti materiálů z pohledu nových tepelně technických norem. In *Tepelná ochrana budov*. Praha: Contour s.r.o. s. 153–156.
- Sonderegger, W. 2011.** Experimental and Theoretical Investigations on The Heat and Water Transport in Wood and Wood-based Materials. . Dizertační práce. Curych: ETH Zurich. 165 s.
- Sonderegger, W., Hering, S., Niemz, P. 2011.** Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions. *Holzforschung*, 65(3), s. 369-375.
- Sonderegger, W. and Niemz, P. 2009.** Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(3), s. 313-321.
- Stamm, A.J. 1960.** Combined bound-water and water-vapour diffusion into sitka spruce. *For.Prod.J.* 10(12), s. 644-648.
- Svoboda, Z. 2014.** Difúze vodní páry a její kondenzace uvnitř konstrukcí. [online] citováno dne 18.3. 2014. Dostupné na world wide web < kps.fsv.cvut.cz >.
- Tarmian, A., Remond, R., Dashti, H., Perré, P. 2012.** Moisture diffusion coefficient of reaction woods: Compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. *Wood Science and Technology*, 46(1-3). s. 405-417.
- Tiemann, H. D. 1906.** Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood. USDA for Serv. Bull. 70 s.
- Time, B., 1998.** Hygroscopic moisture transport in wood, Norwegian University of Science and Technology, Doctoral dissertation, 216 p.
- Timusk, P. Ch. 2008.** An Investigation of the Moisture Sorption and Permeability of Mill-fabricated Oriented Strandboard. Department of civil engineering, University of Toronto, 249 s.
- Trcala, M. 2009.** Model vázaného pohybu vlhkostního a teplotního pole ve dřevě během sušení. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. 84 s.
- Ugolev, V. N. 1975.** Drevesinovedenijes osnovami lesnovo tovarovedenja. Moskva. 382 s.
- Valovirta, I., Vinha, J. 2004.** Water Vapor Permeability and Thermal Conductivity as a Function of Temperature and Relative Humidity. Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference, 16 s.
- Vaverka, Z., Havířová, Z., Jindrák M., a kol. 2008.** Dřevostavby pro bydlení. Praha: Grada. 380 s. ISBN 978-80-247-2205-4

Wangaard, F.F., Granados, L.A. 1967. The effect of extractives on water-vapour sorption by wood. *Wood Science and Technology*, 1(4), pp. 253-277.

Wimmer, R., Kläusler, O., & Niemz, P. 2013. Water sorption mechanisms of commercial wood adhesive films. *Wood Science and Technology*, 47(4), s. 763-775.

Wadsö, L., 1993a. Measurements of Water Vapour Sorption in Wood, part 1. Instrumentation. *Wood Science and Technology*, 27, pp. 396-400

Wadsö, L., 1993b. Measurements of Water Vapour Sorption in Wood, part 2. Results. *Wood Science and Technology*, 28, pp. 59-65

ASTM E 96: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials

ČSN 49 0123: Drevo. Štatistická metóda odberu vzoriek

ČSN EN ISO 12572: Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení prostupu vodní páry.

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.

ČSN 73 0540: Tepelná ochrana budov

10 Seznam obrázků

Obr. 3.1.1: Sorpční izotermy smrku <i>Picea Abies</i> (Dle Rode a Clorius, 2004, experiment dle Ahlgren 1972 a Heldin 1967)	5
Obr. 3.1.2: Adsorpční a desorpční izotermy dřeva smrku (<i>picea abies</i>) (Time, 1998).....	6
Obr. 3.1.3: Předpokládaná distribuce molekul vody při a) nerovnoměrně rozložené vlhkosti, b) rovnoměrně rozložené vlhkosti, a znázornění energetických hladin H_v (entalpie vodní páry), H_a (entalpie aktivované vody), H_w (entalpie vody volné), H_s (entalpie vody vázané). (Skaar, 1988).	7
Obr. 3.1.4: Závislost faktoru difuzního odporu na vlhkosti pro dřeva smrku a buku pro různé odklony vláken v příčném směru (Sonderegger, 2011).	8
Obr. 3.1.5: Závislost koeficientu difuzní vodivosti na relativní vlhkosti vzduchu pro smrk (<i>picea abies</i>) v příčném směru (Rode a Clorius, 2004).....	9
Obr. 3.1.6: Závislost koeficientu difuzní vodivosti na relativní vlhkosti vzduchu pro smrk (<i>picea abies</i>) v příčném směru (Time, 1998).	10
Obr. 4.1.1: Zástupci 3 souborů pohárků, zleva „suchá miska“ (silikagel s předpokládanou RVV uvnitř pohárku 0%, sada I.), nasycený roztok NaCl s RVV 75,3% (sada II.) a „mokrý miska“ (demineralizovaná voda RVV 100%, sada III.).....	22
Obr. 5.1.1: Graf naměřených hodnot RVV prostředí v průběhu měření.	29
Obr. 5.1.2: Graf naměřených teplot vzduchu v průběhu měření.	30
Obr. 5.1.3: Graf sumy hmotnostních úbytků a přírůstků jednotlivých soustav (Sada I.=silikagel, Sada II.=nasycený roztok NaCl, Sada III.=demineralizovaná voda)	31
Obr. 5.1.4: Krabicový graf vypočtených součinitelů difuzní vodivosti pro 3 sady měření.	32
Obr. 5.1.5: Graf závislosti průměrných hodnot součinitele difuzní vodivosti na průměrné RVV uvnitř a vně pohárků.	32
Obr. 5.2.1: Závislost součinitele difuzní vodivosti v příčném směru na hustotě při různých vlhkostech a konstantní teplotě 20°C.....	33
Obr. 5.2.2: Závislost součinitele difuzní vodivosti v příčném směru na teplotě při různých vlhkostech a konstantní hustotě $\rho_0=400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	34
Obr. 5.2.3: Graf závislosti analyticky vypočtených hodnot součinitele difuzní vodivosti na RVV při různých teplotách a konstantní hustotě $\rho_0=400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro srovnání jsou vyneseny výsledky vlastního experimentu, měření dle Rode a Clorius (2004), Valovirta a Vinha (2004) a konstantní hodnoty dle normy ČSN 73540-4.	34

Obr. 5.2.4: Graf závislosti analyticky vypočtených hodnot δ_T na parciálním tlaku vodní páry při různých teplotách a konstantní hustotě $\rho_0=400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro srovnání jsou vyneseny výsledky vlastního experimentu, měření dle Rode a Clorius (2004), Valovirta a Vinha (2004) a konstantní hodnoty dle normy ČSN 73540-4.	35
Obr. 5.3.1: Detail 1, ROZLOŽENÍ PARCIÁLNÍHO TLAKU NASYCENÉ VODNÍ PÁRY a TEPLITNÍ POLE, společné pro δT_{KONST} a δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%.....	36
Obr. 5.3.2: Detail 1, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	36
Obr. 5.3.3: Detail 1, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	37
Obr. 5.3.4: Detail 1, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%.....	37
Obr. 5.3.5: Detail 1, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	38
Obr. 5.3.6: Detail 1, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	38
Obr. 5.3.7: Detail 1, PRŮBĚH RVV, δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	39
Obr. 5.3.8: Detail 1, PRŮBĚH RVV, δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	39
Obr. 5.3.9: Detail 1, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	40
Obr. 5.3.10: Detail 1, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	41
Obr. 5.3.11: Detail 1, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	41
Obr. 5.3.12: Detail 1, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	42
Obr. 5.3.13: Detail 1, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	42
Obr. 5.3.14: Detail 1, PRŮBĚH RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	43
Obr. 5.3.15: Detail 1, PRŮBĚH RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	43
Obr. 5.3.16: Detail 2, ROZLOŽENÍ PARCIÁLNÍHO TLAKU NASYCENÉ VODNÍ PÁRY a TEPLITNÍ POLE, společné pro δT_{KONST} a δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%.....	44

Obr. 5.3.17: Detail 2, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	44
Obr. 5.3.18: Detail 2, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	45
Obr. 5.3.19: Detail 2, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%.....	45
Obr. 5.3.20: Detail 2, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	46
Obr. 5.3.21: Detail 2, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	46
Obr. 5.3.22: Detail 2, PRŮBĚH RVV , δT_{KONST} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	47
Obr. 5.3.23: Detail 2, PRŮBĚH RVV , δT_{VAR} , in 20°C/60% ext -15°C/80%	47
Obr. 5.3.24: Detail 2, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	48
Obr. 5.3.25: Detail 2, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	49
Obr. 5.3.26: Detail 2, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	49
Obr. 5.3.27: Detail 2, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	50
Obr. 5.3.28: Detail 2, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	50
Obr. 5.3.29: Detail 2, PRŮBĚH RVV , δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	51
Obr. 5.3.30: Detail 2, PRŮBĚH RVV , δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	51
Obr. 5.3.31: Detail 3, ROZLOŽENÍ PARCIÁLNÍHO TLAKU NASYCENÉ VODNÍ PÁRY a TEPLITNÍ POLE, společné pro δT_{KONST} a δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	52
Obr. 5.3.32: Detail 3, Průběh vypočteného δT_{VAR} v dřevěné části konstrukce, barevná škála reprezentuje RVV. δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	52
Obr. 5.3.33: Detail 3, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	53
Obr. 5.3.34: Detail 3, průběh parciálního tlaku vodní páry (modrá) a parciálního tlaku nasycené vodní páry (červená). δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	53

Obr. 5.3.35: Detail 3, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	54
Obr. 5.3.36: Detail 3, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	54
Obr. 5.3.37: Detail 3, PRŮBĚH RVV, δT_{KONST} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	55
Obr. 5.3.38: Detail 3, PRŮBĚH RVV, δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%	55
Obr. 5.3.39: Detail 4, ROZLOŽENÍ PARCIÁLNÍHO TLAKU NASYCENÉ VODNÍ PÁRY a TEPLTNÍ POLE, společné pro δT_{KONST} a δT_{VAR} , in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	56
Obr. 5.3.40: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , δ_{OSBNORM} in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	57
Obr. 5.3.41: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , δ_{OSBNORM} , in 20°C/80% ext 15°C/80%.....	57
Obr. 5.3.42: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , $\delta T_{\text{OSBKONST}}$, in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	58
Obr. 5.3.43: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{KONST} , δT_{OSBVAR} in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	58
Obr. 5.3.44: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , $\delta T_{\text{OSBKONST}}$, in 20°C/80% ext -15°C/80%	59
Obr. 5.3.45: Detail 4, VLHKOSTNÍ POLE RVV, δT_{VAR} , δT_{OSBVAR} in 20°C/80% ext -15°C/80%.....	59