

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Numerické simulace teplotního a vlhkostního pole ve střešních

konstrukcích

Bakalářská práce

Zde bude umístěno zadání práce

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: „Numerické simulace teplotního a vlhkostního pole ve střešních konstrukcích“ 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, 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 dne:

.....

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Mgr. Ing. Miroslavu Třácalovi Ph.D, svému vedoucímu bakalářské práce, za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat všem svým blízkým, především rodičům a prarodičům, kteří mě vždy podporovali a to nejen finančně, ale především morálně. Děkuji také své přítelkyni, která mi byla vždy oporou.

Autor bakalářské práce: **Jan Šmiták**

Název bakalářské práce: **Numerické simulace teplotního a vlhkostního pole ve střešních konstrukcích**

Abstrakt:

V této bakalářské práci jsou porovnány různé druhy střešních konstrukcí, jejichž skladby se liší druhem a tloušťkou použitých materiálů. Objasněno je zde šíření tepla a difúze vodních par daných konstrukcí. Pomocí numerických simulací výpočetního softwaru, založeného na metodě konečných prvků, je zde popsáno teplotní a vlhkostní pole za ustálených (stacionárních) podmínek v různých geometrických a okrajových podmínkách.

Klíčová slova: difúze, kondenzace vodních par, střešní konstrukce, šíření tepla, teplotní pole, vlhkostní pole.

Name: **Jan Šmiták**

Title: **Numerical simulations of temperature and moisture fields in roof constructions**

Abstract:

In this bachelor thesis are compared different types of roof structures, whose compositions are different in type and thickness of the used materials. Explained is here of thermal transfer and water vapor diffusion of the structures. By using numerical simulation of calculation software which is based on the finite element method, described temperature and moisture field in stable (stationary) conditions in different geometric and boundary conditions.

Key words: diffusion, condensation of water vapor, roof construction, heat transport, temperature field, moisture field.

OBSAH

1	ÚVOD.....	7
2	CÍL PRÁCE.....	8
3	LITERÁRNÍ PŘEHLED	9
	3.1 Základní pojmy a veličiny	12
	3.1.1 Šíření tepla.....	12
	3.1.2 Difúze vodních par	14
4	METODIKA.....	18
	4.1 Teoretická analýza.....	19
	4.1.1 Fourierův zákon.....	19
	4.1.2 Fickův zákon	19
	4.1.3 Teplotní pole	20
	4.1.4 Vlhkostní pole.....	22
	4.2 Teorie analytických výpočtů	24
	4.2.1 Analytický výpočet jednosměrného toku	24
	4.2.2 Analytické výpočty dvourozměrného toku.....	25
	4.3 Numerické simulace	27
	4.3.1 Okrajové podmínky	27
	4.3.2 Práce se softwarem	28
5	VÝSLEDKY.....	29
	5.1 Analytické výpočty.....	29
	5.1.1 Výpočty jednorozměrného toku	29
	5.1.2 Výpočty dvourozměrného toku	35
	5.2 Numerické simulace	39
	5.2.1 Jednorozměrná analýza	39
	5.2.2 Dvourozměrná analýza.....	42
6	DISKUZE	56
7	ZÁVĚR.....	58
8	SUMMARY	59
9	POUŽITÁ LITERATURA.....	60
10	INTERNETOVÉ ZDROJE	61

1 ÚVOD

Konstrukce dřevostaveb, které tvoří celkovou obálku budovy, se skládají z různých druhů materiálů, které mají odlišné rozměry a vlastnosti. Proto je při návrhu těchto konstrukcí důležité dbát, jak se bude daná konstrukce chovat v různých okrajových podmínkách. Tyto konstrukce ovlivňují energetickou náročnost budov a s tím spojené tepelné ztráty a kvalitu vnitřního klimatu.

V mnoha studiích, se kterými se setkáváme je řešen prostup tepla a vlhkosti u obvodových stěn, které tvoří zhruba 10–20 % tepelných ztrát. Tyto konstrukce tvoří největší část ochlazované plochy domu, se kterými souvisí již zmiňované tepelné ztráty. V této práci se ale budeme zabývat jiným druhem konstrukce, která by také neměla být opomenuta a to konstrukcí střešní, zejména se bude jednat o vodorovné jednoplášťové střechy. V dřívějších dobách nebyly půdní prostory obydleny, tudíž poslední vodorovnou konstrukcí byl strop, u kterého byla tato problematika řešena. V dnešní době jsou stavby obydleny i v podkroví, nebo se staví jednopodlažní domy, kde jediná horní vodorovná konstrukce je střecha. Jak je známo, tak nejtepleji v celém domě bývá v horních částech domu, tedy u stropu či střechy. Z toho důvodu považuji za důležité se zabírat i tepelnými ztrátami střešních konstrukcí, které činí zhruba 7–15 %.

Tepelné ztráty jsou důležité především po stránce finanční, kde nám záleží na množství tepla, které nám touto konstrukcí odchází z interiéru. Důležitou roli hraje také především vlhkost, která úzce souvisí s tepelně technickými vlastnostmi a je většinou považována uvnitř konstrukce za nežádoucí. Nejvíce ovlivněno může být dřevo, které je v těchto skladbách obsaženo jako nosný prvek. Dřevo není obsaženo u těchto skladeb pouze jako nosný prvek, důležitou roli hrají také velkoplošné materiály na bázi dřeva, které mají také funkci nosnou i ochrannou. Vlivem vlhkosti může dojít k trvalému porušení za účelem napadení dřeva plísněmi, dřevokaznými houbami a hmyzem. Vlhkost také ovlivňuje tepelně izolační materiály, u kterých zvyšuje jejich tepelnou vodivost a tím působí jako tepelný most. Proto bude součástí této práce zkoumání možného výskytu kondenzace uvnitř střešních plášťů.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je zkoumat teplotní a vlhkostní pole u různých skladeb jednoplášťových střešních konstrukcí, které budou zkoumány za různých okrajových podmínek.

V teoretické části bude popsána analýza jednosměrného a dvousměrného toku tepla pomocí Furierova zákona a difúze vodní páry pomocí zákona Fickova přes různé druhy materiálů, které se liší svými vlastnostmi a tloušťkou u každé z námi zvolené střešní konstrukce.

Praktickou část bude tvořit analytický výpočet u jedné z námi vybraných konstrukcí. Výpočet bude obsahovat jak prostup tepla, tak difúzi vodních par skrze konstrukci, který bude porovnán s numerickou simulací příslušné skladby. Numerické simulace budou vyhotoveny pro všechny námi zvolené konstrukce, kde bude pozorováno rozložení teplotního a vlhkostního pole, dle kterých lze zjistit možný výskyt kondenzace vodních par. Tyto simulace budou vyhotoveny pomocí výpočetního softwaru založeného na metodě konečných prvků.

Skladby budou posuzovány v zimním období za ustálených (stacionárních) podmínek z důvodu největších teplotních, ale i vlhkostních rozdílů, které ovlivňují funkčnost a převážně životnost konstrukce. V případě zjištění velkých tepelných ztrát či dokonce výskytu kondenzace vodní páry u jakékoli námi zvolené okrajové podmínky, bude navrženo opravné řešení daného problému.

3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

Kromě několika výjimek se stavební materiály v praxi nikdy nevyskytují v absolutně suchém stavu. Vždy obsahují vlhkost, která se vyskytuje v tuhém, kapalném nebo plynném skupenství. Rozložení vlhkosti v materiálu je nerovnoměrné a závisí na tlaku, teplotě a struktuře materiálu. Přítomnost vlhkosti má značný vliv na fyzikální vlastnosti, především na součinitel tepelné vodivosti. (Fuciman, 2001)

Dřevo je ve vztahu k okolnímu prostředí hydrokopický materiálem schopným přijímat nebo odevzdávat vodu, ať už ve skupenství kapalném nebo plynném. Má také schopnost měnit svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí. Tímto můžou být narušeny mechanické vlastnosti dřeva. (Horáček, 2008)

Vaverka a kol. (2000) uvádí, že dřevo a jeho vlhkost, mají velký význam i při zabudování do konstrukce, kdy by celková vlhkost dřeva měla být nižší než 20 %, aby nedošlo k napadení dřeva dřevokaznými houbami a hmyzem.

Dle normy ČSN 73 0540-2 je maximální přípustná rovnovážná hmotnostní vlhkost 16 %, která platí pro dřevo nebo materiály na bázi dřeva a jsou zabudovány v konstrukci, aby nebyla ohrožena její funkce.

Vlhkost materiálů uvnitř skladby je proměnlivá a vyvolává různé účinky na tepelně technické vlastnosti. Difúzi nezpůsobují pouze rozdílné a časově proměnlivé podmínky, ale také podmínky ustálené (stacionární), charakterizované teplotním, vlhkostním nebo tlakovým spádem. (Fuciman, 2001)

Kvalita střešní konstrukce je technologicky náročná z důvodů zajištění těsnosti parozábrany v ploše a v místech její návaznosti na přilehlé konstrukce a řádné provedení tepelné izolace. Na rozdíl od střešních plášťů situovaných nad půdním prostorem, je zde riziko kondenzace vodních par uvnitř skladby střechy. Situování krokví v tepelné izolaci má také vliv na kondenzaci vodní páry uvnitř střešního pláště. (Solař, 2012)

Pokud střešní konstrukce je nekvalitně provedena, může být narušeno fungování difúzní bilance konstrukce. Celoroční přípustné množství zkondenzované vodní páry uvnitř jednoplášťové střechy je maximálně $0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ a navíc všechny tyto kondenzace musí mít možnost se z konstrukce odpařit během roční bilance.

Většinu ročního období probíhá difúze vodní páry do konstrukce ze strany interiéru, kvůli této skutečnosti musí být střešní konstrukce k tomuto přizpůsobeny. (Rypl, 2006)

Dřevěné skladby konstrukcí může rozdělit na difúzně otevřené a difúzně uzavřené. Každá z těchto skladeb má své určité výhody a nevýhody. Z hlediska rosného bodu je poměrně velký rozdíl mezi oběma konstrukcemi.

Difúzně otevřená konstrukce

Difúzně otevřená skladba je navržena tak, aby umožňovala průchod molekul vodní páry konstrukcí. Takovou konstrukci je ale nutné dobře navrhnout s ohledem na parobrzdnou vrstvu (kaširované sádrovláknité desky, OSB desky apod.), která musí brzdit průchod těchto vodních par z interiéru směrem do exteriéru. K rosnému bodu musí docházet v minimálním měřítku a ideálně na vnější straně konstrukce směrem do exteriéru. Po stránce stavební fyziky je potřeba dobře navrhnout plášť konstrukce s dostatečně silnou vrstvou tepelné izolace na fasádě domu. (Makovec, 2014)

Difúzně uzavřená konstrukce

V případě difúzně uzavřené konstrukce se používá na vnitřní straně parozábrana (nejčastěji PE fólie), která zamezí průchodu vlhkosti do konstrukce a její případná kondenzace uvnitř konstrukce. Nicméně je zapotřebí navrhnout také dostatečně silnou vrstvu fasádního izolantu (nejčastěji polystyren). Tato vrstva fasádního izolantu by nám měla pomoci v případě, že dojde k nechtěnému porušení parotěsné fólie a následnému průchodu vlhkosti do konstrukce. K rosnému bodu by zde mělo docházet v co největší vzdálenosti na vnější straně fasádního izolantu, což zabezpečí dostatečná tloušťka této izolace. (Makovec, 2014)

Kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce

Kvůli obsahu dřevěných prvků uvnitř skladby střech je důležité, aby zde byla kondenzace vodní páry zcela vyloučena, jak je požadováno v čl. 6. 1. 1 ČSN 73 0540-2. Zajištění tohoto požadavku lze provést, pokud použijeme parotěsnou vrstvu s dostatečným difúzním odporem s důkladným provedením v celé ploše střešního pláště a řádného napojení na obvodové a prostupující konstrukce. Skladba střechy, která je z obou stran (z interiéru i z exteriéru) provedena jako vzduchotěsná, nebo umístění vzduchové mezery mezi pojistnou hydroizolací a dřevěné bednění (resp. laťování).

Obecně platí zásada, že difuzní odpor parotěsné vrstvy musí být větší, než odpor pojistné hydroizolace. Kvalitní vzduchotěsnost skladby je požadována z důvodu nežádoucího úniku vzduchu skrze netěsnosti v konstrukci střešního pláště (spárami, trhlinami), které bývají vysoké. Pokud pronikne vnitřní vzduch dovnitř do tepelné izolace, který obsahuje vodní páru, tak má zpravidla negativní vliv na její bilanci a bývá příčinou závažných vlhkostních poruch. (Vaverka a kol., 2000)

Jednoplášťové střechy se dají použít za podmínek, kdy relativní vlhkost vzduchu je v místnostech pod střechou nižší než 50 %. Jednoplášťová střecha je zcela nevhodná nad prostory s relativní vlhkostí vyšší než 80 %. Ve střechách nelze připouštět z hlediska možné kondenzace tepelné mosty. (Vaverka a kol., 2000)

Dle normy ČSN 73 0540-2 jsou uvedeny požadavky na navrhování střešních konstrukcí, kde parozábrany a jiné vrstvy s touto funkcí mohou zároveň bránit vysychání konstrukce do vnitřních prostorů v přechodném a letním období, což může být z hlediska roční bilance vlhkosti v konstrukci nevhodné. Jednoplášťové nevětrané střešní konstrukce s nosnou nebo pomocnou konstrukcí ze dřeva by měly být navrhovány se zvýšenou opatrností, zejména s ohledem na účinky vlhkosti. Konstrukční řešení ploché střechy musí zajistit co nejlepší návaznost její tepelné izolace na tepelnou izolaci obvodové stěny, souběžně se zajištěním samostatného dilatování atiky.

Při navrhování může dojít k chybám, které mohou zapříčinit kondenzaci uvnitř konstrukce. U difúzně uzavřené konstrukce, která je ze strany exteriéru opatřena difúzně nepropustným materiálem, (v našem případě hydroizolace PVC) a nejsou z vnitřní strany chráněny parozábranou, která by zabraňovala prostupu molekul vodní páry dovnitř konstrukce. V takovém případě může dojít k nadměrné kondenzaci vodní páry ve skladbě a životnost těchto konstrukcí je vlivem vody uvnitř konstrukce velmi snížena. Tepelněizolační schopnosti materiálů jsou u takto vlhkých konstrukcí výrazně sníženy. (Mařík a kol., 2014)

Střešní souvrství je z vnitřní strany chráněno parotěsnou vrstvou. Pokud je pod vrstvou s vysokou hodnotou difúzního odporu (parozábranou) tepelně izolační vrstva, požaduje se, aby činila nejvýše 20 % z celkového tepelného odporu. (Rypl, 2006)

Střechy, které jsou parotěsně uzavřeny z obou stran, musí mít vlhkost uzavřených materiálů co nejnižší, nejvýše může odpovídat ustálené vlhkosti.

U plochých střech se nedoporučuje řešit problémy s kondenzací vodní páry uvnitř konstrukce pomocí parotěsné vrstvy na vnitřní straně skladby. V zimním období parotěsná vrstva sice sníží difúzní tok vodní páry do skladby, ale také zabrání vysychání střechy do interiéru v přechodném a letním období. (Vaverka a kol., 2000)

Při kondenzaci vodních par v konstrukci, lze uvážit příznivého vlivu sluneční radiace, kdy při oslunění v důsledku zvýšení teploty osluněné konstrukce dochází ke snížení intenzity kondenzace a zvýšení intenzity vypařování vlhkosti z konstrukce. Tento fakt lze uvést u jednoplášťových střešních konstrukcí, které po dobu jejich životnosti nebudou zastíněny. (Kulhánek, 2006)

3.1 Základní pojmy a veličiny

3.1.1 Šíření tepla

Základní podmínkou pro šíření tepla jsou rozdílné teploty v různých místech prostředí. Teplo potom postupuje z míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší. Šíření tepla dochází pomocí vedení (kondukcí), proudění (konvekce), sálání (radiací). (Vaverka a kol., 2000)

Šíření tepla kondukcí

V této práci je počítáno pouze s teplem šířeném vedením, tedy kondukcí. Přenos tepla vedením v pevných látkách je transportem tepelné energie ve směru klesající teploty. Je tomu tak proto, že teplejší, rychleji kmitající molekuly, předávají svoji energii sousedním, pomaleji kmitajícím molekulám. Přenos tepla vedením se uskutečňuje mezi bezprostředně sousedícími částicemi tělesa, jestliže v něm vzniká rozdíl teplot, nebo se dotýkají dvě tělesa různé teploty. (Vaverka a kol., 2000)

Šíření tepla v uzavřené vzduchové mezeře

Prakticky u všech stavebních materiálů a konstrukcí je teplo šířeno vedením, stejně jako je tomu tak u výše uvedených výpočtů. Tato skutečnost neplatí pro konstrukce, jejichž součástí je uzavřená vzduchová vrstva. V této vrstvě dochází k přenosu tepla prouděním a sáláním, tímto je nutné pro vyčíslení tepelného odporu použít jiné vzorce v závislosti na pohltivosti vnitřních povrchů materiálů, které obklopují uzavřenou vzduchovou mezeru o různé tloušťce. V praxi, se ale běžně používá tabelárních hodnot tepelných odporů uzavřených vzduchových vrstev,

stanovených za předpokladu užití běžných materiálů a standardních okrajových podmínek. Je-li tepelný odpor nevětrané vzduchové vrstvy větší než čtvrtina celkového tepelného odporu stavební konstrukce, pak se tepelný odpor nevětrané vzduchové vrstvy uvažuje nejvýše touto čtvrtinou. (Kulhánek, 2006)

Tab. 1 Tepelný odpor nevětraných vzduchových vrstev v zimním období

Nevětraná vzduchová vrstva v zimním období v poloze	Tepelný odpor R_{cav} v $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$ při tloušťce vzduchové vrstvy d_{ev} v mm								
	0	5	7	10	15	25	50	100	300
vodorovné konstrukce při tepelném toku zdola nahoru	0,00	0,11	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16

Hustota tepleného toku – q [$W \cdot m^{-2}$]

Vyjadřuje tepelný tok na jednotku plochy $1 m^2$ postavenou kolmo ke směru šíření tepla, tj. teplo, které je přeneseno materiálem za jednotku času jednotkou plochy. (Ficker, 2004)

$$q = \frac{Q}{tA} \quad (3.1)$$

kde Q je teplo v [J], t čas v [s], A plocha v [m^2]

Součinitel tepelné vodivosti – λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Tepelná vodivost je vlastnost závislá na složení materiálu. Její fyzikální význam spočívá v tom, že udává tepelný tok, který proudí plochou ($1 m^2$) při teplotním gradientu ($1 \text{ }^\circ\text{C}$). (Vaverka a kol., 2000)

$$\lambda = - \frac{q\Delta x}{\Delta T} \quad (3.2)$$

kde Δx je vzdálenost [mm]

Tepelný odpor – R [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]

Tepelný odpor vyjadřuje tepelně izolační vlastnosti konstrukce. Pro skladbu je možno uvažovat o jednosměrném šíření tepla, při ustálených podmínkách. (Vaverka a kol., 2000)

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.3)$$

kde d je tloušťka vrstvy [mm]

Součinitel prostupu tepla – U [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

V současné době využívaná jednotka, která charakterizuje tepelněizolační vlastnosti. Vyjadřuje celkovou výměnu tepla mezi prostory oddělenými od sebe konstrukcí o tepelném odporu R . (Vaverka a kol., 2000)

$$U = \frac{1}{R} \quad (3.4)$$

3.1.2 Difúze vodních par

Vodní páry ve vzduchu mají podobnou schopnost procházet stavebními konstrukcemi jako tepelný tok. Pokud při toku tepla je zapotřebí gradient teploty, k difúznímu toku vodních par je důležitý gradient částečných tlaků vodních par. (Mrlík, 1985)

Jev, při kterém mezi dvěma prostředními s různými parciálními tlaky vodních par oddělenými pórovitou látkou dojde k transportu vlhkosti, nazýváme difúzí. Difundující vodní páry se pohybují z míst s vyšším tlakem do míst, kde je tlak vodních par menší. Za jistých tlakových a teplotních podmínek může v materiálu docházet ke kondenzaci vodních par. V jednovrstvém materiálu bývá účinek kondenzace většinou zanedbatelný. Pokud ovšem hovoříme o konstrukci, která je složena z více vrstev a druhů materiálů, může být výskyt kondenzace nebezpečný. Výpočet difúze vodní páry a její roční bilance je poměrně náročný, a to především v případě manuálního zpracování. Standardem se proto již před řadou let stalo provádění tohoto výpočtu s pomocí specializovaných programů. (Kaňka, 2004)

Mezi vedením tepla a difúzí vodní páry existuje analogie, takže řada vztahů popisujících vedení tepla má v oblasti difúze vodní páry analogické výrazy. (Kulhánek, 2006)

Variabilita difúzních vlastností nemusí být pouze u dřeva, ale také na materiálu, které jsou na bázi dřeva vyrobeny. Difúzní vodivosti OSB desek jsou závislé na jejich hustotě a tloušťce, ale také na výrobci, který tyto desky vyrábí. Zásadní vliv má také druh lepidla a jeho podíl, který pro výrobu použít. (Timusk, 2008)

Hustota difúzního toku vodní páry - δ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]

Hustotu difúzního toku za ustálených podmínek lze vyjádřit vztahem:

$$\delta = -\delta_p \text{ grad } p_v \quad (3.5)$$

Součinitel difúze vodní páry – σ [s]

Vyjadřuje schopnost materiálu propouštět vodní páru difúzí, je závislý na teplotě a také na rozdílu relativních vlhkostí na obou stranách materiálu. (Fuciman, 2001)

$$\delta = \frac{D}{\mu \cdot r_p \cdot T} = \frac{1}{\mu \cdot N} \quad (3.6)$$

kde D – součinitel difúze vodní páry ve vzduchu [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$], μ faktor difúzního odporu[-],
 r_p – plynová konstanta vodní páry [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] ($r_p=461,9$), T - střední teplota vrstvy [K],
 N – teplotní difúzní funkce [s^{-1}]

Faktor difúzního odporu – μ [-]

Vyjadřuje relativní schopnost materiálu propouštět vodní páru difúzí, je poměrem difúzního odporu materiálu a difúzního odporu vrstvy vzduchu o téže tloušťce při definovaných podmínkách. (Vaverka a kol., 2000)

$$\mu = \frac{1}{N\sigma} \quad (3.7)$$

Nebo lze také faktor difúzního odporu vyjádřit dle empirického vzorce:

$$\mu = \frac{\delta_{vz}}{\delta} = \frac{2 \cdot 10^{-7} T^{0,81} / p_{atm}}{\delta} \quad (3.8)$$

kde δ_{vz} je součinitel difúzní vodivosti vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] a p_{atm} je atmosférický tlak [Pa]

Teplotní difúzní funkce N - [s^{-1}]

Teplotní difúzní funkce N a její hodnota se stanoví dle vztahu popsaného Vaverkou a kol. (2000):

$$N = \frac{5,25 \cdot 10^6 \cdot p_a}{T^{0,81}} \quad (3.9)$$

kde p_a – je atmosférický tlak v [Pa], T – absolutní teplota j -té vrstvy konstrukce v [K]

Převodní vztahy mezi difúzní vodivostí

Ve smyslu ČSN 73 7030:1973 se při střední teplotě 10 °C, při které se stanoví součinitel difúzní vodivosti, užívá následujících převodních vztahů:

$$\mu = \frac{1,8824 \cdot 10^{-10}}{\delta} \quad (3.10)$$

$$\delta = \frac{1,8824 \cdot 10^{-10}}{\mu} \quad (3.11)$$

Ekvivalentní difúzní tloušťka r_d nebo také uváděna jako s_d - [m]

Tento parametr se velice často nachází ve stavební tepelné technice a je dán vztahem popsaným Vaverkou a kol. (2000):

$$r_d = s_d = \frac{d}{\delta} \cdot \delta_{vz} = \mu \cdot d \quad (3.12)$$

Kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce

Možnost, jak posoudit možnou kondenzaci uvnitř konstrukce, popisuje norma ČSN 73 0540-4, kde je uveden výpočet, který pracuje s teplotou -12 až -21 °C, přičemž je teplota postupně zvyšována. Výsledkem je roční bilance kondenzátu a kapacita odpaření vodní páry. Oproti této normě se uvádí v ČSN EN ISO 13788 množství kondenzátu v jednotlivých měsících s průměrnou měsíční teplotou, jejíž minimální průměr je -5 °C v nejchladnějším měsíci, proto se u některých konstrukcí využívají obě metody společně. (Svoboda, 2014)

Dle ČSN 73 0540-4 je kritickou relativní vlhkostí pro růst plísní 80 % a pro kondenzaci 100 %.

Metodika zjištění výskytu kondenzace vodních par uvnitř stavebních konstrukcí vychází z porovnání částečného tlaku vodní páry a částečného nasyceného tlaku vodní páry v konstrukci. Částečný tlak vodní páry ve vzduchu je funkcí teploty a vlhkosti vzduchu, obvykle udávané v procentech ve formě relativní vlhkosti vzduchu, (Kulhánek, 2006)

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

Závislost částečného tlaku vodní páry, relativní vlhkosti vzduchu a vlhkosti dřeva, lze vyjádřit podle následujících vztahů, kde je vlhkost dřeva dána:

$$w = \frac{1}{B} \ln \frac{A}{\ln(1/\varphi)} \quad (3.13)$$

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

Z rovnice (3.13) můžeme následně vyjádřit RVV:

$$\varphi = e^{-Ae^{-Bw}} \quad (3.14)$$

Částečný tlak vodních par lze odvodit ze vztahu:

$$p_{v,sat} = p_v \varphi \quad (3.15)$$

4 METODIKA

Porovnání daných konstrukcí je založeno na základě teoretické analýzy a numerických simulací. V teoretické části jsou vysvětleny základní pojmy, které popisují šíření tepelného toku a difúzi vodních par, za ustálených (stacionárních) podmínek. Velké riziko teplených ztrát a kondenzace vodních par je převážně v zimním období, proto byly pro toto období zvoleny různé okrajové podmínky, které vyhovují různým polohám na území české republiky dle normy ČSN 73 0540-3. Početní řešení, pro nehomogenní materiály přenosu tepla, objasňuje Fourierův zákon, pro vlhkostní pole je vysvětlen zákon Fickův.

Numerické simulace jsou vyhotoveny za pomoci výpočetního softwaru, založeného na metodě konečných prvků. V simulacích je znázorněno a popsáno rozložení teplotního a vlhkostního pole a případná kondenzace vodních par. Při zjištění kondenzace vodních par, nebo úniku velkých teplených ztrát, bude navrženo opravné řešení konstrukce, které bude řešit daný problém. Vyhotoveny jsou také analytické výpočty pro jednu z námi zvolených konstrukcí při jednosměrném toku, které jsou následně porovnány s numerickými simulacemi. Dvourozměrné šíření tepla a difúze vodních par je znázorněna pomocí numerických simulací u každé zvolené konstrukce. V těchto simulacích je znázorněn také detail střešní konstrukce, který znázorňuje napojení střešního pláště a obvodové stěny dřevostavby.

Zvolené skladby jednotlivých konstrukcí jsou převzaty z katalogů firem EGGER a NOVATOP. Vlastnosti použitých materiálů jsou zvoleny dle normy ČSN 73 0540-3. Konstrukce použité v této práci jsou difúzně uzavřené. Pro tyto konstrukce platí použití parozábrany na vnitřní straně střešního pláště, které brání difúzi vodních par dovnitř konstrukce. Některé však tuto parozábranu nahrazují deskou OSB, která by měla mít nejméně podobné či stejné vlastnosti difúzního odporu. Toto tvrzení je součástí této studie a bude posouzeno za pomoci numerických simulací.

4.1 Teoretická analýza

4.1.1 Fourierův zákon

Vedení tepla je přenosem energie z jedné látky na druhou, které jsou vzájemně v kontaktu, aniž by došlo ke zdatelnému přemístění částic (atomů, molekul nebo iontů), které tvoří látku. Je tomu tak, protože teplé částice pevných látek kmitají intenzivněji než částice chladnější. I. Fourierův zákon lze vyjádřit v diferenciální podobě a to následovně dle Fickera (2004):

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (4.1)$$

Makroskopické zákony vedení tepla popsal Fourier r. 1822 (Horáček, 2004).

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Za stacionárních (ustálených) podmínek, je-li difúze konstantní v čase a mění se pouze se vzdáleností, můžeme proces popsat podle I. Fickova zákona uvedeného Horáčkem (2008):

$$\frac{m}{t S} = D \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (4.3)$$

kde D – koeficient difúze [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], m – hmotnost prodifundované kapaliny [kg], t – čas [s], S – plocha difúze [m^2], Δx – vzdálenost rozdílných koncentrací [m] a Δc – rozdíl koncentrací [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

4.1.2 Fickův zákon

Podobně jako tepelný tok procházejí materiálem i vodní páry nacházející se v okolním vlhkém vzduchu. Zatímco při toku tepla je potřebný gradient teploty, k toku vodních par je potřebný gradient částečných vodních par. Difundující vodní páry se pohybují z míst vyššího tlaku směrem k nižšímu tlaku. Při určitých teplotních

a tlakových podmínkách mohou vodní páry v materiálu nebo na jeho povrchu kondenzovat. (Fuciman, 2001)

První Fickův zákon difúze říká, že hustota difúzního toku j [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] je přímo úměrná gradientu koncentrace $c = n/V$ [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$] difundujících částic (molekul vodní páry - A), kde je počet molů částic (molekul) v objemu V materiálu - B, kde záporné znaménko vyjadřuje směr toku proti gradientu difúze. (Ficker, 2004)

$$j = -D_{AB}\nabla c_A = -D_{AB} \text{grad}(c_A) \quad (4.4)$$

kde D_{AB} [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$] je difúzní koeficient pro plyn A v difundujícím materiálu B

Makroskopické zákony popsal Fick r. 1855. (Fiala, 2001)

$$\begin{bmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \delta_{xx} & \delta_{xy} & \delta_{xz} \\ \delta_{yx} & \delta_{yy} & \delta_{yz} \\ \delta_{zx} & \delta_{zy} & \delta_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} p \\ \frac{\partial}{\partial y} p \\ \frac{\partial}{\partial z} p \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

U dřeva sledujeme jeho vlhkost a ne koncentraci vody ve dřevě, proto bývá Fickův zákon přepisován do tvaru:

$$\begin{bmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} M \\ \frac{\partial}{\partial y} M \\ \frac{\partial}{\partial z} M \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

kde $K=D\rho_r$ je koeficient vlhkostní vodivosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]

4.1.3 Teplotní pole

Teplotním polem se rozumí funkce, která každému bodu oblasti Ω přiřazuje jednoznačně termodynamickou teplotu. Za stacionárních podmínek je konstantní, za nestacionárních časově proměnná. Termodynamickou teplotou T [K] se rozumí teplota určovaná podle zákonů termodynamiky a lze ji volit za míru kinetické energie pohybujících se molekul (entit). (Trcala, 2007)

Jednorozměrové lineární rozložení teploty dle I. Fourierova zákona:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (4.7)$$

Parciální diferenciální rovnice nazýváme II. Fourierovým zákonem a jejich řešením dostáváme rozložení teploty v tělese v závislosti na poloze a času, tedy $T=f(x,t)$. Obecný tvar II. Fourierova zákona v kartézské souřadné soustavě má dle Trcali (2007) ve tvaru:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial x} \lambda_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} \lambda_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial z} \lambda_{zz} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{xy} + \lambda_{yx}) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{yz} + \lambda_{zy}) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial z} (\lambda_{xz} + \lambda_{zx}) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Pro okrajové podmínky:

$$q = \alpha_T (T_{povrch} - T_{okolí}) \quad (4.9)$$

Pro vyrovnání teploty je důležité znát dané okrajové podmínky na povrchu tělesa, rozložení teploty v počátečním okamžiku a hodnotu konečné teploty, na kterou se má těleso ohřát nebo ochladit.

4.1.4 Vlhkostní pole

Vlhkostním polem se rozumí funkce, která každému bodu oblasti Ω přiřazuje jednoznačně vlhkost. Za ustálených (stacionárních) podmínek je konstantní, za neustálených (nestacionárních) časově proměnná. Podle Fickova vztahu se vyjádří parciální diferenciální rovnice, jak uvádí Trcala (2007):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial x} D_{xx} \left(\frac{\partial}{\partial x} c \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} D_{yy} \left(\frac{\partial}{\partial y} c \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial z} D_{zz} \left(\frac{\partial}{\partial z} c \right) \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial x} (D_{xy} + D_{yx}) \left(\frac{\partial}{\partial y} c \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} (D_{yz} + D_{zy}) \left(\frac{\partial}{\partial z} c \right) \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial z} (D_{xz} + D_{zx}) \left(\frac{\partial}{\partial x} c \right) \right) = \frac{\partial}{\partial t} c \end{aligned} \quad (4.10)$$

Pro okrajové podmínky:

$$j = \alpha_M (M_{povrch} - M_{okolí}) \quad (4.11)$$

Okrajové podmínky pro parciální tlak vodní páry:

$$p = \varphi_{ext} p_v(T_{ext}) \quad (4.12)$$

Vlhkostní rovnice, která popisuje rozložení vlhkosti v tělese, vypadá následovně (Trcala, 2007):

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} j_x \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} j_y \right) + \left(\frac{\partial}{\partial z} j_z \right) + \left(\frac{\partial}{\partial t} M \right) = 0 \quad (4.13)$$

Z hlediska rizika kondenzace vodních par se ve stavební konstrukci sleduje parciální tlak vodních par p a jako síly difuze se využívá gradientu této veličiny. Pro hustotu difuzního toku j_x platí následující vztahy, jak uvádí Trcala (2012):

$$j_x = -\rho_r D_x \frac{\partial M}{\partial x}, j_x = -\delta_x \frac{\partial p}{\partial x}, \rho_r D_x \frac{\partial M}{\partial x} = \delta_x \frac{\partial p}{\partial x}, \delta_x = \rho_r D_x \frac{\partial M}{\partial p} \quad (4.14)$$

$$\delta_x = \rho_r D_x \frac{\partial M}{\partial p}, = \rho_r D_x \frac{\partial M \partial \varphi}{\partial \varphi \partial \varphi} = \rho_r D_x \frac{\partial M}{\partial p} \frac{\partial \left(\frac{p}{p_{sat}} \right)}{\partial \varphi} = D_x \frac{\rho_r}{p_{sat}} \frac{\partial M}{\partial \varphi} \quad (4.15)$$

Parciální tlak nasycené vodní páry vyjadřuje závislost vzduchu na teplotě, s kterou se mění množství vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu. Tento tlak lze vyjádřit:

$$p_v = k e^{-E/RT} \quad (4.16)$$

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

Parciální tlak nasycené vodní páry lze vyjádřit pomocí empirických vzorců, které jsou uvedeny podle ČSN 73 0540:

pro teplotu vzduchu $\Theta_a \geq 0 \text{ }^\circ\text{C}$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot \Theta_a}{237,3 + \Theta_a}\right) \quad (4.17)$$

pro teplotu vzduchu $\Theta_a < 0 \text{ }^\circ\text{C}$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot \Theta_a}{265,5 + \Theta_a}\right) \quad (4.18)$$

Relativní vlhkost vzduchu φ_a v [%] uvnitř konstrukce se určí dle:

$$\varphi_a = \frac{p_{v,sat}}{p_v} \cdot 100 \quad (4.19)$$

kde $p_{v,sat}$ – je částečný tlak vodních par v [Pa] Kulhánek, 2006 uvádí, že: ke kondenzaci vodní páry dochází, dosáhne-li skutečný částečný tlak vodní páry stejné hodnoty jako tlak nasycený, to znamená, že:

$$p_v \geq p_{v,sat} \quad (4.20)$$

Zjištění výskytu kondenzace uvnitř konstrukce lze dosáhnout buď graficko-početní metodou, nebo pomocí počítače. V současné době je vzhledem k časové náročnosti a přesnosti používán výpočetní software. (Kulhánek, 2006)

4.2 Teorie analytických výpočtů

4.2.1 Analytický výpočet jednosměrného toku

Šíření tepla

V tomto výpočtu je uvedeno šíření tepla a difúze vodních par pouze v jednom směru konstrukcí, která se skládá z různých druhů materiálů o různých tloušťkách a vlastností. Kde na vnitřní a vnější straně konstrukce předpokládáme konstantní teplotu a částečný tlak nasycené vodní páry.

Celkový tepelný odpor [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] (Ficker, 2004)

$$R_{tot} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_x}{\lambda_x} + \frac{1}{\alpha_e} \quad (4.21)$$

Součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] (Ficker, 2004)

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (4.22)$$

Hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] (Ficker, 2004)

$$q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_x}{\lambda_x} + \frac{1}{\alpha_e}} \Rightarrow \frac{T_i - T_e}{R} \quad (4.23)$$

Teplota v daných bodech konstrukce [K] (Pokora, 2014)

$$T_1 = T_i - \frac{1}{\alpha_i} \cdot q \quad (4.24)$$

$$T_2 = T_i - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} \right) \cdot q \quad (4.25)$$

$$T_x = T_i - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_x}{\lambda_x} \right) \cdot q \quad (4.26)$$

$$T_{11} = T_i - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_x}{\lambda_x} + \dots + \frac{1}{\alpha_e} \right) \cdot q \quad (4.27)$$

Výpočet difuze vodních par

Návrhová relativní vlhkost venkovního vzduchu dle normy ČSN 73 0540-3 ze vztahu:

$$\varphi_e = \frac{93 \cdot \theta - 3153,5}{\theta - 39,17} \quad (4.28)$$

Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu dle normy ČSN 73 0540-3 ze vztahu:

$$\varphi_{i,u} = \varphi_i + \Delta\varphi_i \quad (4.29)$$

Částečný tlak nasycené vodní páry v závislosti na teplotě z empirických vztahů dle ČSN 73 0540-3:

pro teplotu vzduchu $\Theta_a \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot \Theta_a}{237,3 + \Theta_a}\right) \quad (4.30)$$

pro teplotu vzduchu $\Theta_a < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot \Theta_a}{265,5 + \Theta_a}\right) \quad (4.31)$$

Pro součinitel přestupu vodní páry platí (Fuciman, 2001)

$$\alpha_d = 2,04 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\alpha}{T} \text{ [s} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (4.32)$$

Hustota difuzního toku

$$j = \frac{1}{R} \cdot (p_1 - p_2) \quad (4.33)$$

4.2.2 Analytické výpočty dvourozměrného toku

V tomto výpočtu je uvedeno dvourozměrné šíření tepla. A to šíření tepla v ose x a v ose y. Složení jednotlivých vrstev už nemusí být pouze z jednoho materiálu, jak tomu bylo u šíření tepla v 1-D. Výpočet nehomogenní vrstvy konstrukce je zde uveden jako ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti – λ_{ev} .

Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] (Vaverka a kol. 2000)

$$\lambda_{ev} = \frac{\lambda_2 \cdot (l_1) + \lambda_3 \cdot (l_2)}{l_{celkem}} \quad (4.34)$$

Celkový tepelný odpor [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] (Ficker, 2004)

$$R_{tot} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_{ev}} + \frac{d_x}{\lambda_x} + \frac{1}{\alpha_e} \quad (4.35)$$

Součinitel prostupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] (Ficker, 2004)

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (4.36)$$

Hustota tepleného toku [$W \cdot m^2$] (Ficker, 2004)

$$q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_{ev}} + \frac{d_x}{\lambda_x} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (4.37)$$

Teplota v daných bodech konstrukce [K] (Pokora, 2014)

$$T_1 = T_i - \frac{1}{\alpha_i} \cdot q \quad (4.38)$$

$$T_2 = T_i - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} \right) \cdot q \quad (4.39)$$

$$T_x = T_i - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_x}{\lambda_x} \right) \cdot q \quad (4.40)$$

$$T_{11} = T_i - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_x}{\lambda_x} + \dots + \frac{1}{\alpha_e} \right) \cdot q \quad (4.41)$$

Pro výpočet difúze vodních par, používáme stejné výpočty jako pro šíření tepla, akorát vlastnosti materiálů charakterizujeme součinitelem difúze vodní páry a místo tepelného toku využíváme tok vlhkostní.

4.3 Numerické simulace

4.3.1 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky, které byly zvoleny pro tuto práci, jsou zvoleny dle normy ČSN 73 0540-3 a liší se u různých úloh. Veškeré okrajové podmínky budou zvoleny pro prostředí České republiky. Jako první okrajová podmínka byla zvolena -15 °C pro prostředí exteriéru, kde bude zjištěno, jak se chovají jednotlivé konstrukce a při možném vzniku kondenzace či přílišném vzniku tepelných ztrát, bude navrženo opatření, které zvoleným okrajovým podmínkám vyhoví. V další části těchto numerických simulací bude zvolena okrajová podmínka -20 °C pro prostředí exteriéru, kde bude zkoumáno, zda tyto konstrukce budou moci být použity v takto náročných podmínkách a zda je popřípadě možno navrhnout konstrukční řešení dané skladby pro vyhovění v těchto podmínkách. Ze strany interiéru bude stále použita okrajová podmínka $+20\text{ °C}$, která vyhovuje vytápěným, obytným prostorům budovy v zimním období.

Relativní vlhkost je dána vztahy dle rovnic (4.28 a 4.29), které jsou uvedeny výše.

Parciální tlak nasycené vodní páry

Pro výpočet tlaku částečně nasycených vodních par, který je počítán v závislosti na teplotě a kvůli složitosti zadání dvou rovnic do výpočetního softwaru, kde první rovnice je vztažena k teplotám menším než nula a druhá k teplotám větším nebo rovno nule, musel být zvolen pouze jeden vzorec, který byl zvolen dle nejmenších rozdílů z těchto vztahů:

$$p_{sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot \Theta_a}{237,3 + \Theta_a}\right) \quad (4.42)$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot \Theta_a}{265,5 + \Theta_a}\right) \quad (4.43)$$

$$p_{sat} = \exp\left(27,376 - \frac{5745,31}{273,15 + \Theta_a}\right) \quad (4.44)$$

$$p_v = k e^{-E/RT} \quad (4.45)$$

Při následném porovnání, vyšel nejpřesnější vzorec (4.42). Následně za ním byl vzorec (4.45). Při použití ve výpočetním programu byl použita rovnice (4.42).

4.3.2 Práce se softwarem

Pro tuto práci byly řešeny veškeré simulace teplotního a vlhkostního pole v programu COMSOL multiphysics, který je založen na metodě konečných prvků. Jeho princip je založen jako fyzikální náhrada spojitého prostředí (kontinua) diskretních bodů, kde jsou zvoleny parametry, které popisují vlastnosti použitých materiálů příslušného místa (kontinua).

V programu se zvolí, pro jakou geometrii se bude následná simulace řešit. Zvolí se typ fyzikální úlohy, v našem případě pro teplotní pole „Heat transfer in solid“ a pro vlhkostní pole „Coefficient form PDE“. Dále se nastaví podmínky, za kterých se dané úlohy řeší. Pro tuto práci byli zvolené podmínky stacionární. Po nastavení fyzikálních úloh je nutné v grafickém prostředí softwaru narýsovat skladbu střešní konstrukce. U každé fyzikální úlohy nastavit vlastnosti použitých materiálů a okrajové podmínky pro exteriér a interiér střešní konstrukce.

5 VÝSLEDKY

Hodnoty koeficientů přestupů tepla pro vodorovné konstrukce pro analytické výpočty a numerické simulace dle normy ČSN 73 0540-3:

$$\text{z interiéru: } \alpha_{in} = 10 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

$$\text{z exteriéru: } \alpha_{ex} = 23 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

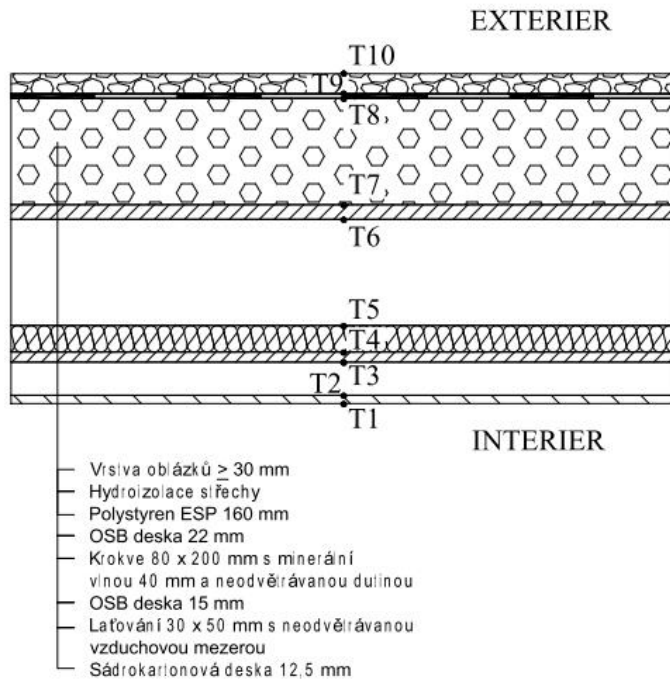
5.1 Analytické výpočty

5.1.1 Výpočty jednorozměrného toku

Konstrukce byla převzata z katalogu firmy EGGER včetně použitých materiálů, celková tloušťka skladby je 491 mm. Výpočet vychází z materiálů, které jsou uvedeny v Tab. 2. Hodnoty pro různé materiály byly použity dle současné normy ČSN 73 0540-3. V příkladu není počítán pouze tepelný odpor konstrukce, ale i teploty v námi zvolených bodech, které jsou následně porovnány s numerickými simulacemi ve výpočetním softwaru. Součástí výpočtu je i výpočet difúze vodních par. Tato difúze je počítána na základě částečných tlaků a částečně nasycených tlaků vodních par, podle kterých lze zjistit, v závislosti na teplotě v daném bodě, možná kondenzace.

Tab. 2 Vlastnosti použitých materiálů dané konstrukce při jednorozměrném toku.

Materiál	d [mm]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	$\delta \cdot 10^{-9}$ [s]
Násyp oblázků	30	0,27	0,038
Hydroizolace PVC	1,5	0,16	0,0000111
Tepelná izolace ESP	160	0,04	0,0028
OSB deska	22	0,15	0,0009412
Vzduchová mezera	160	0,0256	0,183
Tepelná izolace MV	40	0,041	0,063
OSB deska	22	0,15	0,0009412
Sádkartonová deska	12,5	0,22	0,00021



Obr. 1 Skladba střechy EGGER, kde jsou označeny body, ve kterých bude zkoumána námi vypočítaná teplota a tlak nasycených vodních par.

Celkový tepelný odpor konstrukce, součinitel prostupu tepla a hustota tepelného toku:

$$R_{tot} = \frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,041} + \frac{0,16}{0,0256} + \frac{0,022}{0,15} + \frac{0,16}{0,04} + \frac{0,0015}{0,16} + \frac{0,03}{0,27} + \frac{1}{23} = 14,307 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$U = \frac{1}{14,307} = 0,0699 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$q = \frac{20 - (-15)}{14,307} = 2,446 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teploty v daných bodech:

$$T_{in} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 20 - \left(\frac{1}{10}\right) \cdot 2,446 = 19,69 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22}\right) \cdot 2,446 = 19,56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256}\right) \cdot 2,446 = 14,48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15}\right) \cdot 2,446 = 14,24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,041}\right) \cdot 2,446 = 11,79 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_6 = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,041} + \frac{0,16}{0,0256}\right) \cdot 2,446 = -4,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_7 = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,041} + \frac{0,16}{0,0256} + \frac{0,022}{0,15}\right) \cdot 2,446 \\ = -4,81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_8 = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,041} + \frac{0,16}{0,0256} + \frac{0,022}{0,15} + \frac{0,16}{0,04}\right) \\ \cdot 2,446 = -14,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_9 = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,041} + \frac{0,16}{0,0256} + \frac{0,022}{0,15} + \frac{0,16}{0,04} + \frac{0,0015}{0,16}\right) \cdot 2,446 = -14,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{10} = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,041} + \frac{0,16}{0,0256} + \frac{0,022}{0,15} + \frac{0,16}{0,04} + \frac{0,0015}{0,16} + \frac{0,03}{0,27}\right) \cdot 2,446 = -14,89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ex} = 20 - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,0256} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,041} + \frac{0,16}{0,0256} + \frac{0,022}{0,15} + \frac{0,16}{0,04} + \frac{0,0015}{0,16} + \frac{0,03}{0,27} + \frac{1}{23}\right) \cdot 2,446 = -15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Relativní vlhkost vzduchu a difúzní odpor konstrukce:

$$\varphi_e = \frac{93 \cdot (-15) - 3153,5}{-15 - 39,17} = 84 \% \quad \varphi_{i,u} = 50 + 0 = 50 \%$$

$$R_{tot} = \left(2,04 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10}{293,15}\right) + \frac{0,0125}{2,1E - 11} + \frac{0,05}{1,83E - 10} + \frac{0,015}{9,412E - 13} \\ + \frac{0,04}{6,3E - 11} + \frac{0,16}{1,83E - 10} + \frac{0,022}{9,412E - 13} + \frac{0,16}{2,8E - 12} + \frac{0,0015}{1,1E - 15} \\ + \frac{0,03}{3,8E - 11} + \left(2,04 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{23}{258,15}\right) = 2,95E + 11$$

Vlhkostní tok:

$$j = \frac{1}{3,64E + 12} \cdot (1169 - 139) = 3,494E - 9 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$j = \sigma \cdot \frac{p_1 - p_2}{d} p_2 \Rightarrow -\left(\frac{j \cdot d}{\sigma}\right) + p_1$$

Částečný tlak vodních par ve stejných bodech konstrukce, které byli u předešlého výpočtu teplot:

$$p_{in} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot 20}{237,3 + 20}\right) \cdot 0,50 = 1169 \text{ Pa}$$

$$p_1 - (3,494E - 9 \cdot 5,6E - 10) + 1169 = 1169 \text{ Pa}$$

$$p_2 - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,0125}{2,1E - 13}\right) + 1169 = 961 \text{ Pa}$$

$$p_3 - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,05}{1,83E - 10}\right) + 1168,8 = 960,1 \text{ Pa}$$

$$p_4 - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,015}{9,41E - 13}\right) + 1168,8 = 904,4 \text{ Pa}$$

$$p_5 - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,04}{6,3E - 10}\right) + 1164,9 = 903,3 \text{ Pa}$$

$$p_6 - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,16}{1,83E - 10}\right) + 1164,8 = 900,3 \text{ Pa}$$

$$p_7 - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,022}{9,41E - 13}\right) + 1164,6 = 818,6 \text{ Pa}$$

$$p_8 - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,16}{2,8E - 12} \right) + 1158,9 = 618,9 \text{ Pa}$$

$$p_9 - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,0015}{1,1E - 14} \right) + 997,2 = 142,5 \text{ Pa}$$

$$p_{10} - \left(\frac{3,494E - 9 \cdot 0,03}{3,8E - 11} \right) + 148,2 = 139,7 \text{ Pa}$$

$$p_{ex} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot (-15)}{265,5 + (-15)}\right) \cdot 0,84 = 139 \text{ Pa}$$

Tlak nasycených vodních pár v závislosti na teplotě v daných bodech:

$$p_{in} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot 20}{237,3 + 20}\right) = 2337 \text{ Pa}$$

$$p_2 = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot 19,56}{237,3 + 19,56}\right) = 2273 \text{ Pa}$$

$$p_3 = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot 14,48}{237,3 + 14,48}\right) = 1648 \text{ Pa}$$

$$p_4 = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot 14,24}{237,3 + 14,24}\right) = 1622 \text{ Pa}$$

$$p_5 = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot 11,79}{237,3 + 11,79}\right) = 1383 \text{ Pa}$$

$$p_6 = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot (-4,45)}{265,5 + (-4,45)}\right) = 421 \text{ Pa}$$

$$p_7 = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot (-4,81)}{265,5 + (-4,81)}\right) = 408 \text{ Pa}$$

$$p_8 = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot (-14,59)}{265,5 + (-14,59)}\right) = 171 \text{ Pa}$$

$$p_9 = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot (-14,62)}{265,5 + (-14,62)}\right) = 171 \text{ Pa}$$

$$p_{10} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot (-14,89)}{265,5 + (-14,89)}\right) = 166 \text{ Pa}$$

$$p_{ex} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot (-15)}{265,5 + (-15)}\right) = 165 \text{ Pa}$$

Výpočet relativní vlhkosti v daných bodech:

$$\varphi_{in} = \frac{1169}{2337} \cdot 100 = 50 \%$$

$$\varphi_1 = \frac{1169}{2293} \cdot 100 = 51 \%$$

$$\varphi_2 = \frac{961}{2273} \cdot 100 = 42 \%$$

$$\varphi_3 = \frac{960,1}{1648} \cdot 100 = 58 \%$$

$$\varphi_4 = \frac{904,4}{1622} \cdot 100 = 56 \%$$

$$\varphi_5 = \frac{903,3}{1383} \cdot 100 = 65 \%$$

$$\varphi_6 = \frac{900,3}{421} \cdot 100 = 14 \%$$

$$\varphi_7 = \frac{818,6}{408} \cdot 100 = 201 \%$$

$$\varphi_8 = \frac{618,9}{171} \cdot 100 = 362 \%$$

$$\varphi_9 = \frac{142,5}{171} \cdot 100 = 83 \%$$

$$\varphi_{10} = \frac{139,7}{166} \cdot 100 = 84 \%$$

$$\varphi_{ex} = \frac{139}{165} \cdot 100 = 84 \%$$

Tato konstrukce naprosto nevyhověla z důvodů velkého množství kondenzace vodní páry na hranici vzduchové mezery a izolačního materiálu ESP. Zde se využití desky OSB jako parobrzdy nevyplatilo, proto bude v dalším kroku přidána parozábrana, která by měla zamezit vniku velkého množství vlhkosti z interiéru do konstrukce.

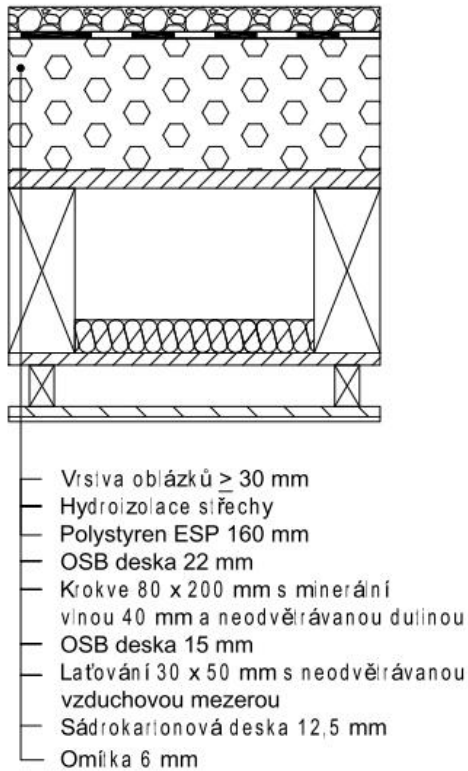
5.1.2 Výpočty dvourozměrného toku

Střešní konstrukce EGGER

Pro výpočet u dvourozměrného šíření tepla jsem použil konstrukci z katalogu firmy EGGER. Jedná se o difúzně uzavřenou konstrukci, která má tepelnou izolaci ze strany exteriéru v podobě polystyrenu, který je chráněn PVC hydroizolací. Celková skladba střechy má tloušťku 497 mm. Základním nosným prvkem jsou krokve o rozměrech 80×200 mm, které jsou z obou stran opláštěny OSB deskou, kterou jsem převzal z katalogu firmy EGGER má typové označení OSB 4 a vyznačuje se nejnižším součinitelem difúze vodních par. Tyto krokve mají rozpětí 1000 mm, které odpovídá zatížení těžkou krytinou. V našem případě, je krytinou hydroizolace, ale v zimě dochází k zatížení vrstvou sněhu, která může být i několikrát těžší než zatížení těžkou krytinou. Mezi těmito krokvemi je umístěna tepelná izolace v podobě minerální vaty o tloušťce pouhých 40 mm. Součástí této skladby je podhled, který může sloužit k vedení elektrických rozvodů. Tato konstrukce je složena z materiálů uvedených v Tab. 3. Veškeré vlastnosti materiálů jsou použity podle normy tepelné ochrany budov ČSN 73 0540-3.

Tab. 3 Vlastnosti použitých materiálů dané konstrukce při dvourozměrném toku.

Materiál	d [mm]	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	$\delta\cdot 10^{-9}$ [s]
Násyp oblázků	30	0,27	0,038
Hydroizolace PVC	1,5	0,16	0,0000211
Tepelná izolace ESP	160	0,04	0,0028
OSB deska	22	0,15	0,0009412
Krokve	200	0,18	0,0012
Vzduchová mezera	160	0,0256	0,183
Tepelná izolace MV	40	0,041	0,063
OSB deska	22	0,15	0,0009412
Lať	50	0,18	0,0012
Sádrokartonová deska	12,5	0,22	0,00021
Omítka silikonová	0,6	0,7	0,00126



Obr. 2 Skladba konstrukce EGGER

Výpočet součinitele tepelné vodivosti λ_{ev} nehomogenních vrstev:

$$\lambda_{ev1} = \frac{0,0256 \cdot (0,475 \cdot 2) + 0,18 \cdot (0,05)}{1} = 0,03332 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\lambda_{ev2} = \frac{0,041 \cdot (0,460 \cdot 2) + 0,18 \cdot (0,08)}{1} = 0,037952 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\lambda_{ev3} = \frac{0,0256 \cdot (0,460 \cdot 2) + 0,18 \cdot (0,08)}{1} = 0,05212 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový tepelný odpor:

$$\begin{aligned}
 R_{tot} = & \frac{1}{10} + \frac{0,006}{0,7} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,05}{0,03332} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{0,04}{0,05212} + \frac{0,16}{0,037952} + \frac{0,022}{0,15} \\
 & + \frac{0,16}{0,04} + \frac{0,0015}{0,16} + \frac{0,03}{0,27} + \frac{1}{23} = 11,1066 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned}$$

$$U = \frac{1}{11,1066} = 0,09004 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

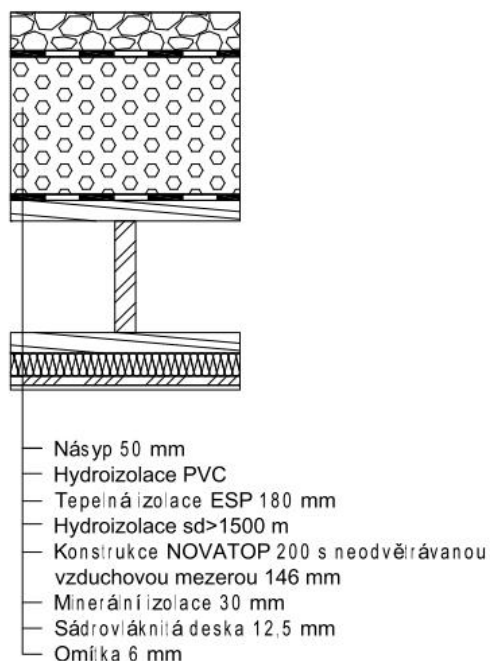
$$q = \frac{20 - (-15)}{11,1066} = 3,15128 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Střešní konstrukce NOVATOP

Další konstrukcí, která je počítána při dvourozměrném šíření tepla je konstrukce od firmy NOVATOP. Tato konstrukce byla převzata z katalogu firmy, kde je označena jako střešní konstrukce typu R 302. Jedná se o difúzně uzavřenou střešní skladbu, jejíž nosnou část tvoří konstrukce označovaná pod názvem Novatop element. Tato konstrukce se skládá z CLT panelů, které tvoří křížem lepené lamely. Tyto panely tvoří vrchní a spodní část konstrukce, mezi kterými se nachází vzduchová mezera. Celková tloušťka tohoto elementu je 200 mm. Element je chráněn parozábranou, na které je umístěna tepelná izolace ESP, která je chráněna hydroizolací PVC. Ze strany interiéru je skladba opatřena minerální vatou, která je chráněna ze strany interiéru sádrovláknitou deskou, která byla převzata od firmy FARMACELL s typovým označení VAPOR. Celková tloušťka střešní konstrukce je 433 mm. Vlastnosti použitých materiálů, které jsou použity v této konstrukci, jsou uvedeny v Tab. 4. Veškeré vlastnosti těchto materiálů jsou použity z normy tepelné ochrany budov ČSN 73 0540-3.

Tab. 4 Vlastnosti použitých materiálů při dvourozměrném toku.

Materiál	d [mm]	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	$\delta\cdot 10^{-9}$ [s]
Násyp oblázků	50	0,27	0,038
Hydroizolace PVC	1,5	0,16	0,0000211
Tepelná izolace ESP	180	0,04	0,0028
Parozábrana	0,4	0,35	0,00000027
Konstrukce novatop	27	0,18	0,0012
Vzduchová mezera	146	0,02336	0,183
Tepelná izolace MV	30	0,041	0,063
Sádrovláknitá deska	12,5	0,32	0,000784
Omítka	6	0,7	0,00126



Obr. 3 Skladba konstrukce NOVATOP

Výpočet součinitele tepelné vodivosti λ_{ev} nehomogenních vrstev:

$$\lambda_{ev1} = \frac{0,0256 \cdot (0,973) + 0,18 \cdot (0,027)}{1} = 0,03182 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celkový tepelný odpor:

$$R_{tot} = \frac{1}{10} + \frac{0,006}{0,7} + \frac{0,0125}{0,22} + \frac{0,03}{0,041} + \frac{0,027}{0,18} + \frac{0,146}{0,03182} + \frac{0,0004}{0,35} + \frac{0,180}{0,04} + \frac{0,0015}{0,16} + \frac{0,05}{0,27} + \frac{1}{23} = 10,5585 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$U = \frac{1}{10,5585} = 0,094711 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$q = \frac{20 - (-15)}{0,094711} = 3,31488 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

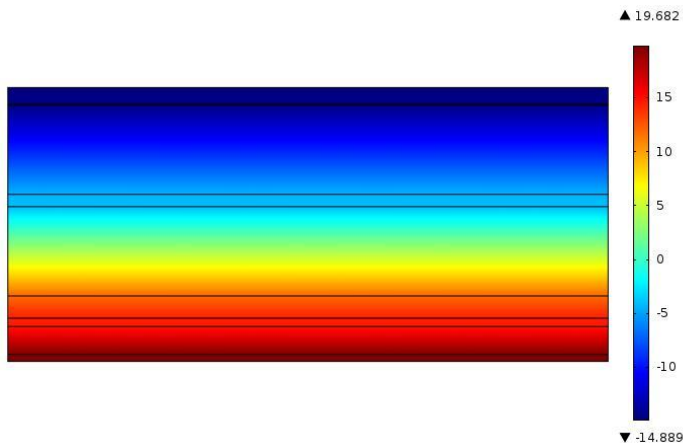
Analytické výpočty dvourozměrného toku obsahují pouze výpočet prostupu tepla konstrukcemi s výsledným součinitelem prostupu tepla. Hodnoty jednotlivých teplot a relativních vlhkostí v daných bodech uvnitř konstrukce, jako jsou uvedeny ve výpočtu jednosměrného toku, jsou řešeny pouze pomocí počítačového softwaru.

5.2 Numerické simulace

Veškeré numerické simulace, pokud není uvedeno jinak, jsou počítány pro okrajové podmínky dle normy ČSN 73 0540-3 a vyhovují umístění města Brna v zimním období. Kde venkovní teplota je $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (258,15 K), vnitřní teplota je $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (293,15 K). Vlastnosti a tloušťky materiálů jsou v tabulkách uvedených výše u analytických výpočtů daných konstrukcí a ve zvolené geometrii šíření tepla a difúze vodních par.

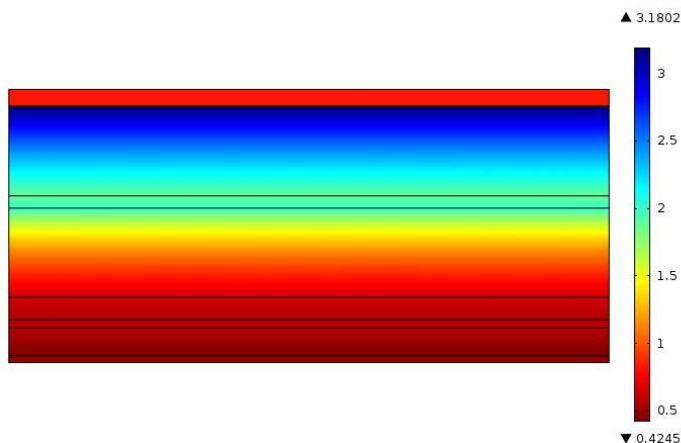
5.2.1 Jednorozměrná analýza

Konstrukce EGGER



Obr. 4 Zobrazení rozložení teploty v konstrukci

Z uvedeného obrázku můžeme pozorovat správnou funkci tepelné izolace ESP o tloušťce 160 mm, kde se teplota mění z $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ na teplotu okolo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. V uzavřené vzduchové mezeře při stejné tloušťce, dochází ke zvýšení teploty na $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naopak uvedený násyp oblázků neplní žádnou funkci ze strany tepelné izolace, proto by jeho použití mohlo být při montáži zanedbáno. Teplota v konstrukci ze strany interiéru nedosahuje žádných velkých tepelných změn, které by byly ovlivněny ze strany exteriéru.



Obr. 5 Zobrazení rozložení relativní vlhkosti v konstrukci

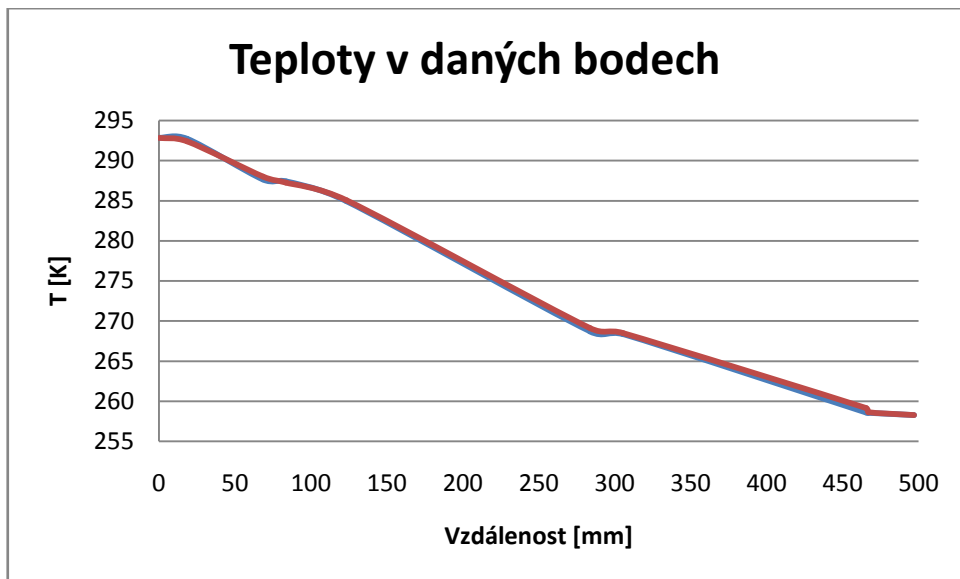
Ve výše uvedeném obrázku můžeme pozorovat maximální relativní vlhkost 3,1802, která se nachází pod hydroizolací z PVC. Maximální přípustná relativní vlhkost u jednoplášťových střešních konstrukcí je 1,0. Z toho hlediska můžeme říct, že v dané konstrukci, bude docházet k abnormálnímu výskytu kondenzace vodních par, která negativně ovlivní funkci tepelné izolace ESP. Může také docházet k ovlivnění dřeva a materiálů na bázi dřeva, které mohou být následně poškozeny za pomoci dřevokazných hub a škůdců. Vznik plísní, které se mohou uvolňovat do prostředí interiéru, negativně ovlivňují zdravé a příjemné ovzduší.

Jako opravné řešení toho problému bude použití parozábrany ze strany interiéru.

Porovnání výsledků analytických výpočtů a numerických simulací

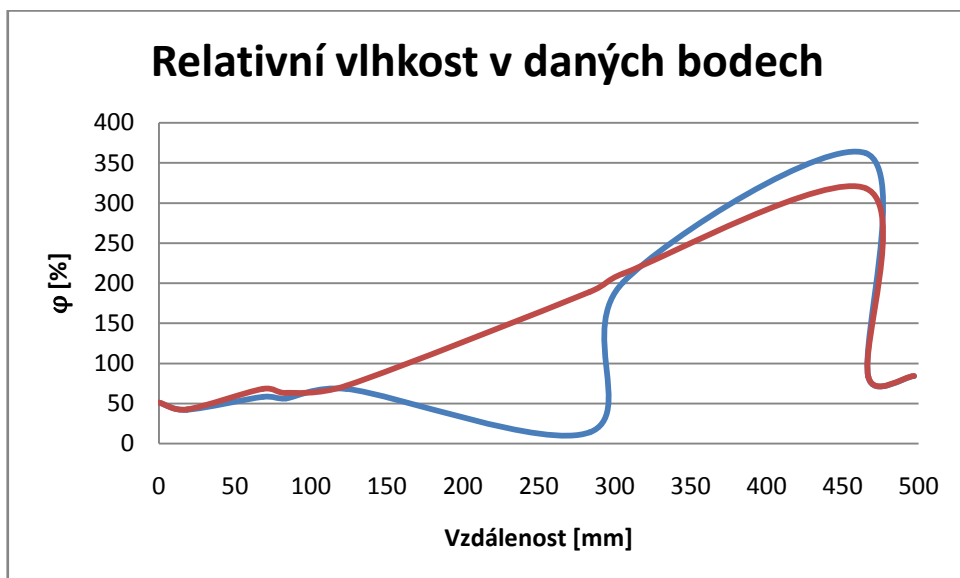
Tab. 5 Hodnoty vypočítaných teplot a vlhkostí a hodnoty numerických simulací v daných bodech znázorněných v Obr. 1.

Materiál	Vzdálenost [mm]	Analytické výpočty		Numerické simulace	
		T [K]	φ [%]	T [K]	φ [%]
Povrch konstrukce	0	292,84	51	292,832	51
Omítka +sádrokarton. deska	18,5	292,71	42	292,39	42
Vzduchová mezera	68,5	287,63	58	288,012	68
OSB deska	83,5	287,39	56	287,26	63
Minerální vata	123,5	284,94	68	285,05	72
Vzduchová mezera	283,5	268,7	14	269,1	189
OSB deska	305,5	268,34	201	268,47	212
Tep. izolace ESP	465,5	258,56	362	259,125	318
Hydroizolace	467	258,53	83	258,62	83
Násyp oblázků	497	258,26	84	258,261	84



Obr. 6 Srovnání teplot v daných bodech analytických výpočtů a numerických simulací.

V grafu jsou zobrazeny teploty v daných bodech, jako je tomu u analytického výpočtu. Modrá křivka zobrazuje teploty vypočtené pomocí analytických výpočtů, které se nepatrně liší od teplot, které byly převzaty z vytvořených numerických simulací. Tyto simulace jsou zobrazeny červenou křivkou.



Obr. 7 Srovnání relativní vlhkosti v daných bodech analytických výpočtů a numerických simulací.

Naopak od srovnání teplot, je u porovnání relativních vlhkostí ve stejných bodech jako u teploty rozdíl velký. Zatím co u analytického výpočtu, který je tvořen

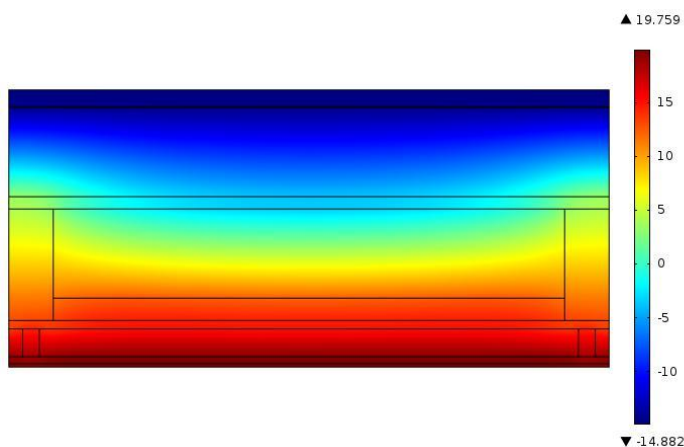
modrou křivkou, dochází k neplynulému zvyšování relativní vlhkosti, u numerických simulací tento skok nevidíme. Tento skok je způsoben velkým rozdílem parciálního tlaku vodní páry a nasyceného tlaku vodní páry, který je závislý na teplotě, která je v tomto bodě velmi změněna. Maximální relativní vlhkost se nachází těsně pod hydroizolací, která má vysoký součinitel vodní páry a tím je způsobeno, že vlhkost nemůže touto hydroizolací volně projít do exteriéru.

5.2.2 Dvourozměrná analýza

Konstrukce EGGER

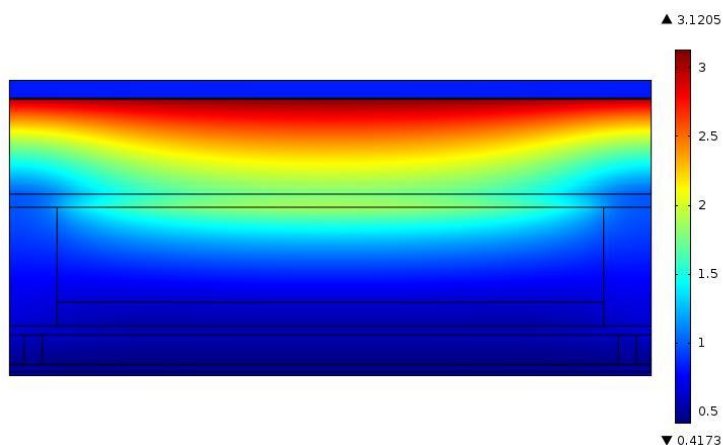
U dvourozměrné analýzy pozorujeme, jak je ovlivněno šíření tepla a difúze vodní páry skrz konstrukci dřevěnými prvky. První prvek tvoří krokve, které tvoří za pomoci opláštění z OSB desek nosnou část. Druhý prvek tvoří latě, které slouží k vytvoření podhledu ze strany interiéru. Kde mohou být vedeny elektroinstalace a různé rozvody. Oba tyto prvky jsou osově vzdáleny 1000 mm.

Skladba podle katalogu



Obr. 8 Zobrazení rozložení teploty v konstrukci

V uvedeném obrázku můžeme pozorovat, že krokve o rozměru 80×200 mm tvoří nepatrný tepelný most, kde je interiérová teplota lépe proniká do exteriéru. Následná tepelná izolace ESP tento teplený most ruší a k velkým tepleným ztrátám takto nedochází. U latí, které jsou umístěny na straně interiéru, nepozorujeme výrazný rozdíl oproti vzduchové mezeře, která je součástí této vrstvy.

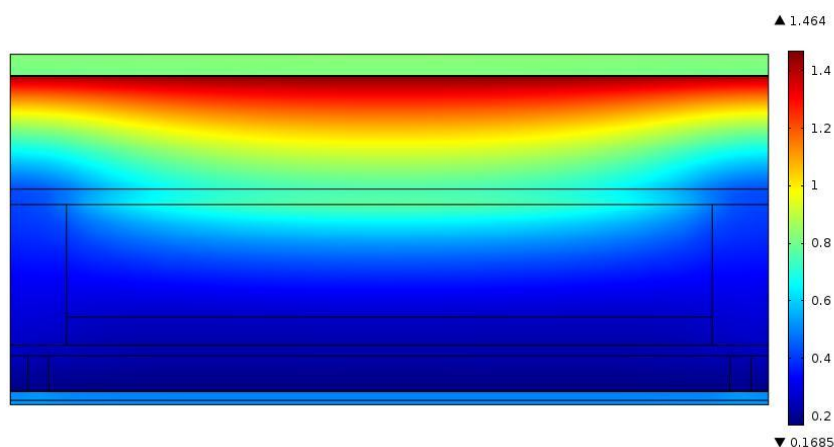


Obr. 9 Zobrazení rozložení vlhkosti v konstrukci

Na tomto obrázku můžeme pozorovat stejně jako u jednorozměrného toku, abnormální relativní vlhkost 3,12, která se nachází pod vrstvou hydroizolace z PVC. Již zmíněný tepelný most, který je způsoben dřevěnou kroví způsobuje tepelné ztráty větší, než jak tomu je u vzduchové mezery a tím je ovlivněno i šíření vlhkosti konstrukcí.

Návrh parozábrany PE ze strany interiéru

Z důvodu velké kondenzace bylo navrženo opravné řešení, kde je umístěna parozábrana ze strany interiéru, pod sádkartonovou deskou. Rozložení teploty v konstrukci za stejných okrajových podmínek se oproti minulé úloze nezměnilo.

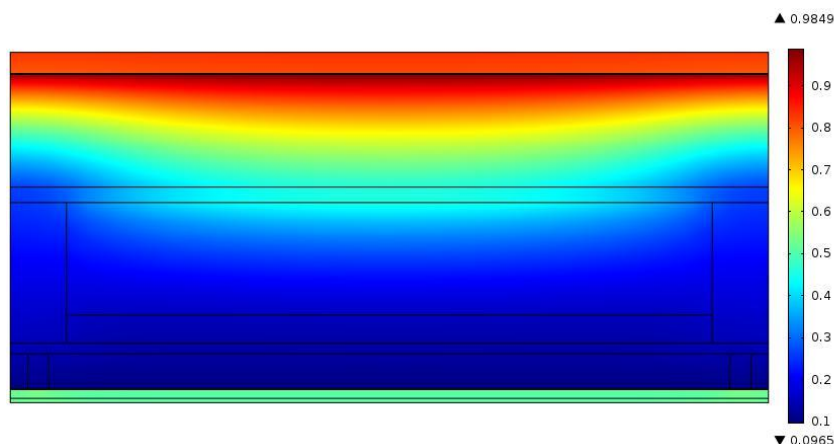


Obr. 10 Zobrazení rozložení relativní vlhkosti uvnitř konstrukce

Změněna byla velmi relativní vlhkost uvnitř konstrukce. Můžeme pozorovat výrazné zlepšení oproti předešlému návrhu, kde maximální relativní vlhkost byla 3,12. Maximální relativní vlhkost je zde 1,464. To znamená, že ani použití parozábrany

ze strany interiéru pod sádkartonovou deskou neplní požadavky pro dané okrajové podmínky a konstrukce je nevhodná.

Použití parozábrany s hliníkovou fólií

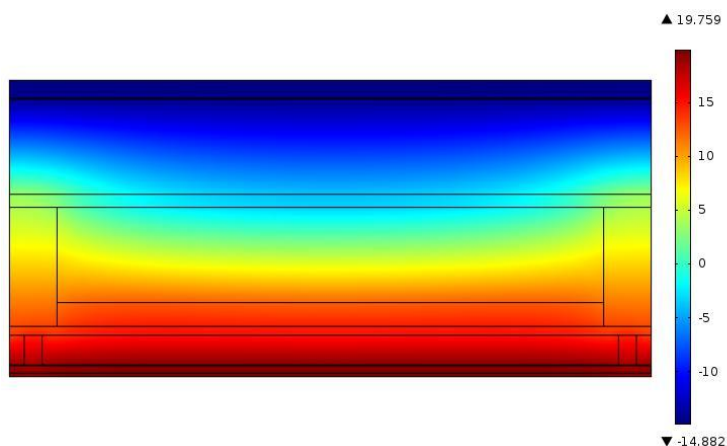


Obr. 11 Zobrazení rozložení relativní vlhkosti vodních par uvnitř konstrukce

Na tomto obrázku můžeme pozorovat konstrukci, která vyhoví daným okrajovým podmínkám, při použití parozábrany o tloušťce 0,4 mm s hliníkovou fólií. Můžeme pozorovat, že na hranici parozábrany je opravdu vysoký skok relativní vlhkosti uvnitř konstrukce. Rozložení teploty zůstává stejné, jako u předešlých úloh, této konstrukce.

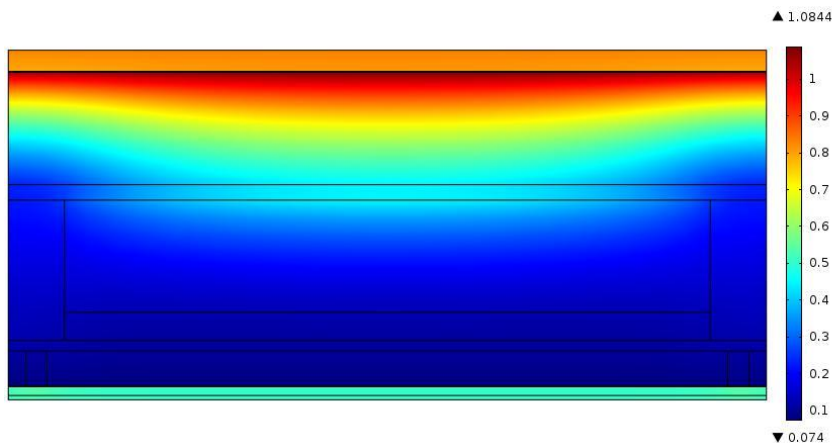
Okrajová podmínka – 20 °C (253,15 K)

Konstrukce, která byla upravena o parozábranu s hliníkovou fólií, byla následně použita v prostředí, které odpovídá dle normy ČSN 73 0540-3 horským podmínkám, kde je teplota venkovního prostředí – 20 °C (253,15 K).



Obr. 12 Zobrazení rozložení teploty uvnitř konstrukce při teplotě exteriéru -20 °C

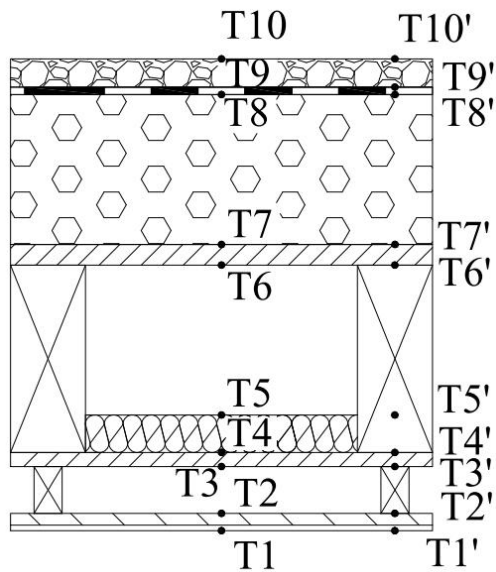
Je patrné, že nižší teplota více ovlivňuje prostup tepla touto konstrukcí oproti okrajovým podmínkám, kde teplota venkovního prostředí byla $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Chladnější teplota více proniká do konstrukce a teplota $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ se posunuje z hranice mezi teplenou izolací ESP a OSB deskou níž do vzduchové mezery, kde se i tak teplota zvyšuje a povrch skladby ze strany interiéru je chráněn bez jakýchkoliv výrazných teplených mostů, které by mohli být tvořeny dřevěnými krokvy a latěmi.



Obr. 13 Zobrazení relativní vlhkosti uvnitř konstrukce

Pro dané okrajové podmínky, které jsou tvořeny teplotou exteriéru $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ s teplotou interiéru, která je stejná jako u předešlých úloh vychází, že maximální relativní vlhkost uvnitř konstrukce je 1,084. Tato vlhkost i tak překročila hranici 1,000 a proto není vhodné v dané okrajové podmínce tuto konstrukci použít.

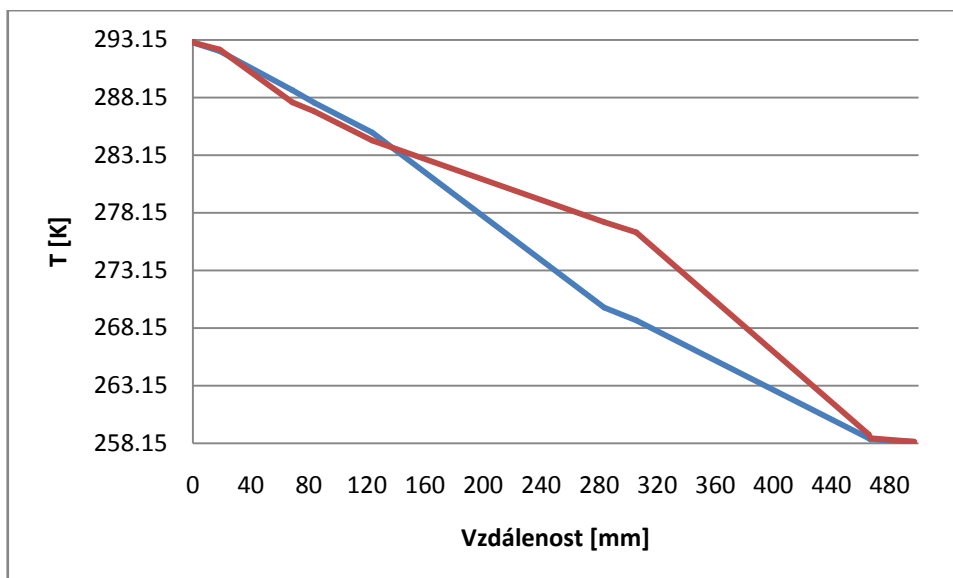
Navíc z hlediska statiky by nebylo rozumné použít vodorovnou střešní konstrukci v horském prostředí, kde by tato konstrukce byla velmi namáhána vrstvou sněhové pokrývky. Která by ovlivňovala šíření tepla a difúzi vodních par skrz konstrukci z hlediska stavební fyziky.



Obr. 14 V těchto označených bodech bude srovnána teplota dané konstrukce

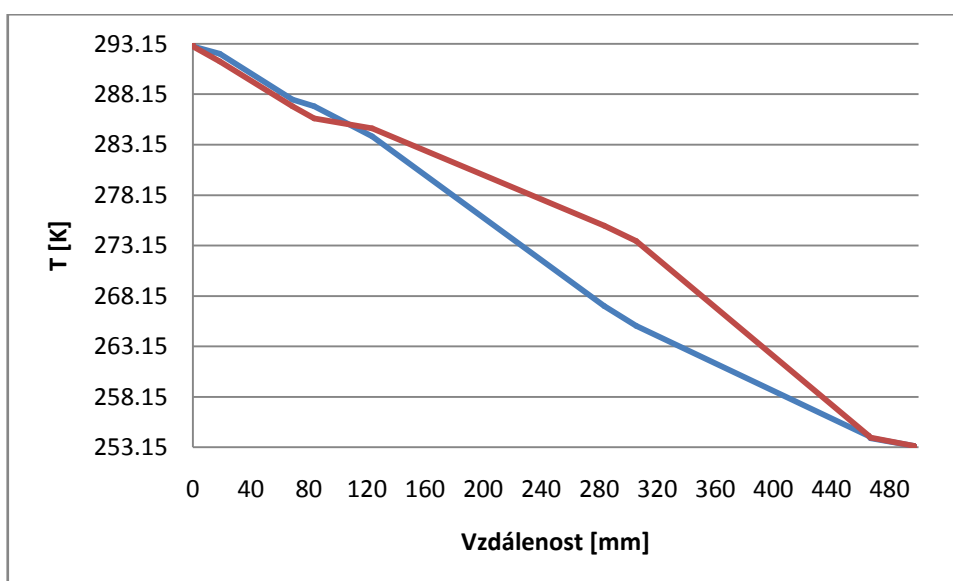
Tab. 6 Naměřené teploty v daných bodech konstrukce, při různých okrajových podmínkách

Vzdálenost [mm]	Teplota exteriéru 258,15 K (-15 °C)		Teplota exteriéru 253,15 K (-20 °C)	
	T1 – T10	T1' – T10'	T1-T10	T1' – T10'
0	292,91	292,91	292,88	292,88
18,5	292,17	292,31	292,14	291,38
68,5	288,77	287,72	287,62	286,93
83,5	287,7	286,94	286,93	285,74
123,5	285,12	284,41	283,97	284,76
283,5	269,92	277,33	267,14	275,09
305,5	268,8	276,45	265,17	273,59
465,5	258,57	258,93	254,24	254,28
467	258,48	258,59	254,04	254,1
497	258,268	258,268	253,28	253,28



Obr. 15 Srovnání teplot v místech uvedených dle Obr. 14, kde je venkovní teplota 258,15 K (-15 °C)

Modrá křivka znázorňuje plynulý průběh klesající teploty skrz konstrukci. Červená křivka znázorňuje průběh tepelného toku přes lať a krokev o celkové tloušťce 80 mm umístěných uvnitř konstrukce.

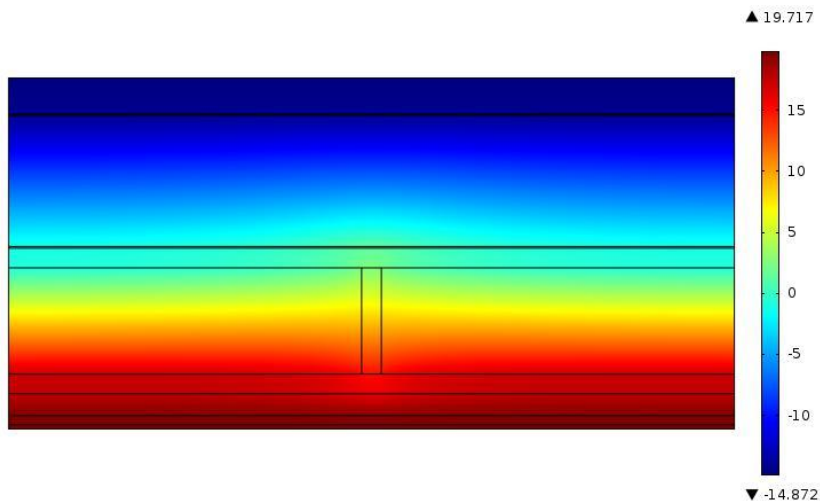


Obr. 16 Stejně srovnání teplot jako u předešlého obrázku, při změně exteriérové teploty na 253,15 K (-20 °C)

Modrá křivka charakterizuje prostředí uvnitř konstrukce a červená křivka znázorňuje průběh teplot skrze lať a krokev o celkové tloušťce 80 mm, kde můžeme pozorovat vyšší teploty než u modré křivky, což způsobuje větší tepelné ztráty, které zmírňuje konečná tepelná izolace ESP.

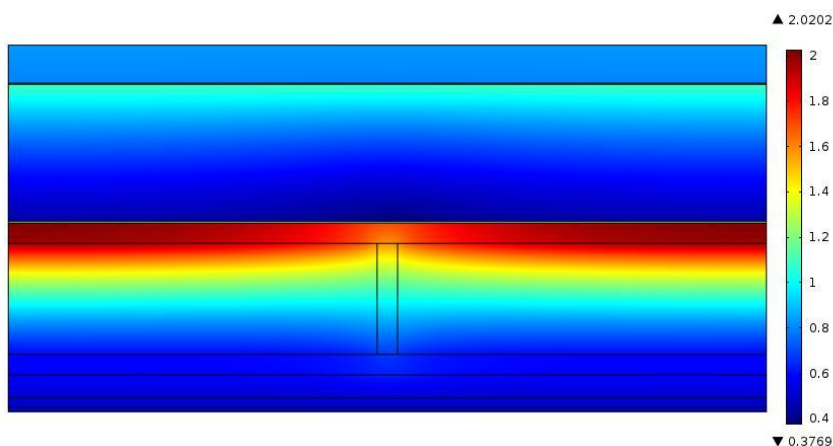
Konstrukce NOVATOP

Skladba podle katalogu



Obr. 17 Zobrazení rozložení teploty uvnitř konstrukce

Na výše uvedeném obrázku můžeme pozorovat plynulé šíření tepla, kde největší zvětšení teploty je u tepelné izolace ESP o tloušťce 180 mm. Dochází tu ke zvýšení z -15 °C skoro na 0 °C . Dalším výborným izolantem je vzduchová mezera o tloušťce 146 mm. Z pohledu interiéru je poměrně velká část v konstrukci o teplotě 10 až 20 °C , které zapříčiní příjemné klima uvnitř místnosti a žádné vysoké tepelné ztráty touto konstrukcí.



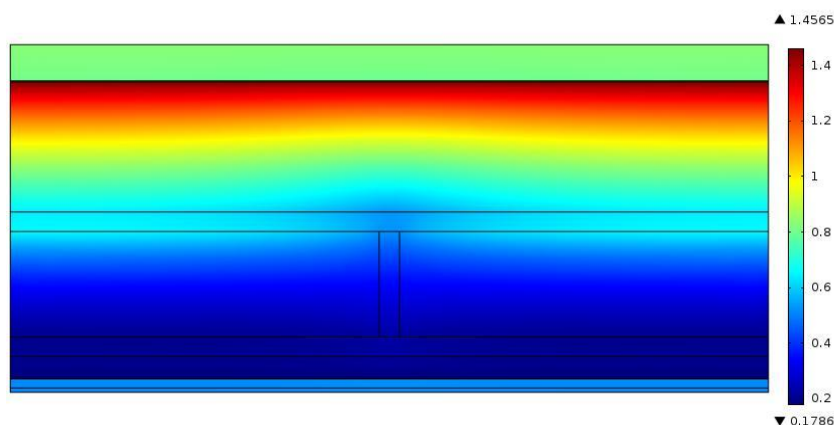
Obr. 18 Zobrazení rozložení vlhkosti uvnitř konstrukce

Tako konstrukce je v místě s relativní vlhkostí 2,0202 chráněna parozábranou, která brání difúzi skrze tuto fólii, což zapříčiní kondenzaci vodních par. Na obrázku je tato relativní vlhkost znázorněna červeným polem, které zobrazeno v místě nosné

konstrukce, tudíž může být přímo negativně ovlivněna životnost této konstrukce a hrozí vznik plísní a degradace materiálu dřevokaznými houbami a hmyzem.

Pro zabránění vniknutí vlhkosti do této konstrukce bude parozábrana posunuta blíže k interiéru.

Návrh parozábrany ze strany interiéru

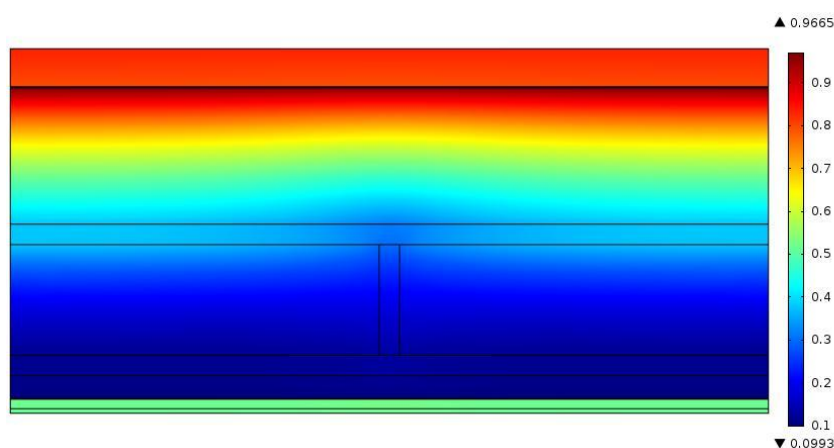


Obr. 19 Zobrazení rozložení relativní vlhkosti uvnitř konstrukce

Parozábrana byla umístěna blíže k interiéru hned pod sádrovláknitou deskou má stejné vlastnosti součinitele difúze vodní páry. Relativní vlhkost se podařilo snížit o 0,56, to znamená skoro o 56 % relativní vlhkosti. Toto snížení je velké, ale výsledná maximální relativní vlhkost je 1,4565 a proto ani tato konstrukce nevyhoví daným okrajovým podmínkám.

Dalším opravným řešením bude využití parozábrany s hliníkovou fólií, která bude umístěna ve stejném místě pod sádrovláknitou deskou.

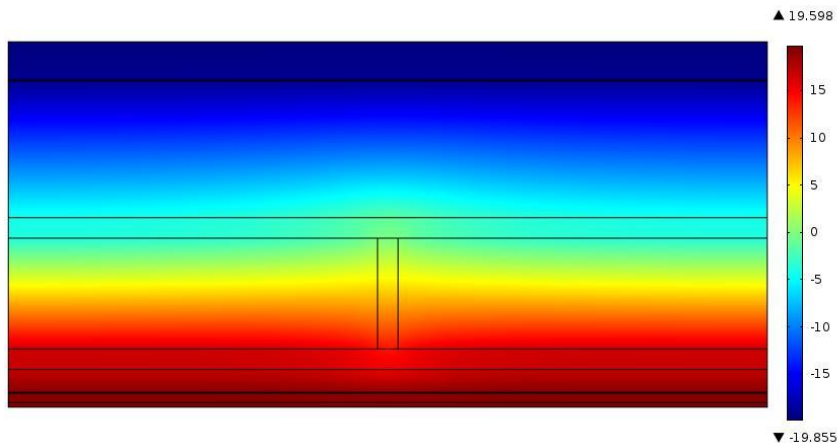
Parozábrana s hliníkovou fólií



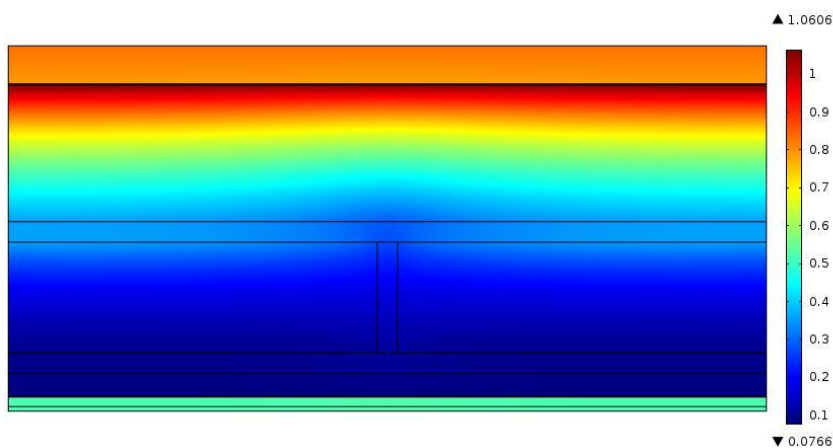
Obr. 20 Zobrazení rozložení relativní vlhkosti uvnitř konstrukce

Při použití parozábrany s hliníkovou fólií ze strany interiéru se docílilo v konstrukci výsledné maximální relativní vlhkosti 0,9665 a konstrukce tímto v daných okrajových podmínkách vyhoví.

Okrajová podmínka -20 °C (253,15 K)

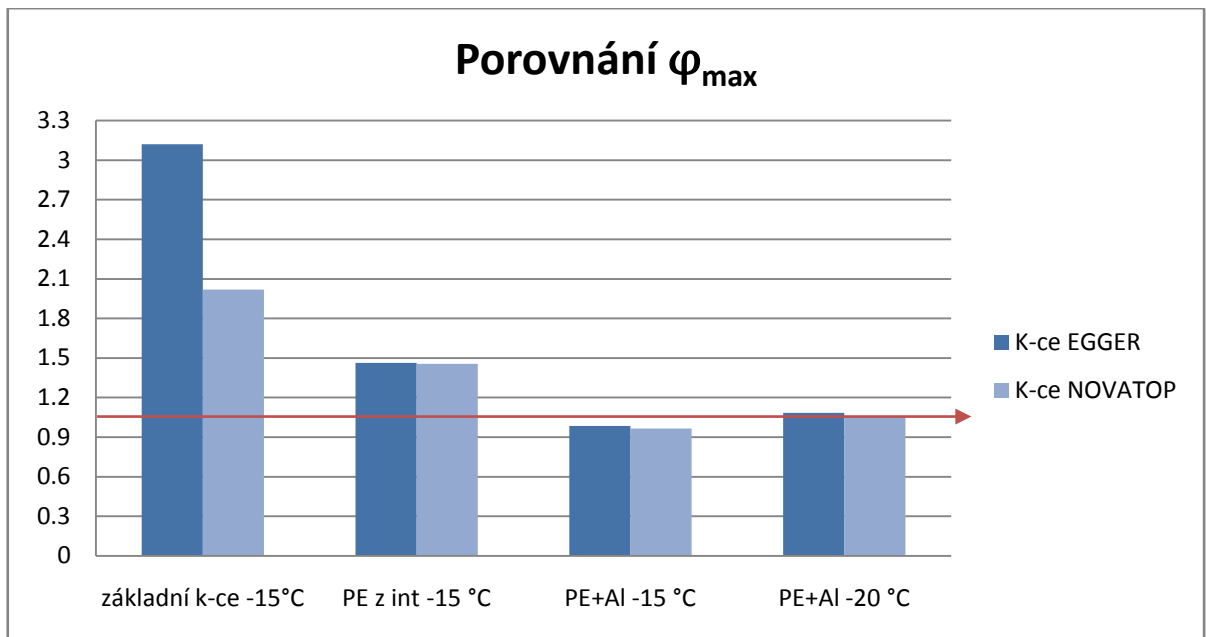


Obr. 21 Zobrazení rozložení teploty při teplotě exteriéru -20 °C



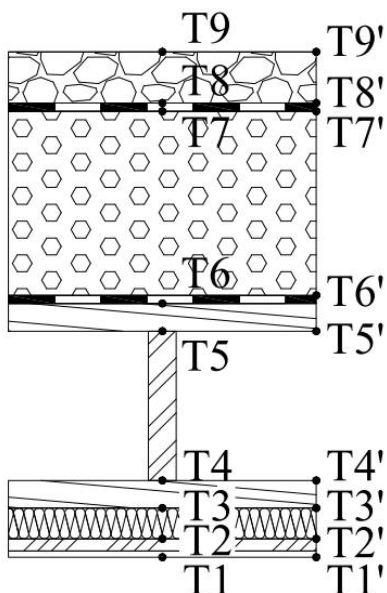
Obr. 22 Zobrazení rozložení vlhkosti při teplotě exteriéru -20 °C

Z obrázku uvedeném výše můžeme zjistit, že tato konstrukce nevyhoví v daných okrajových podmínkách, kde teplota exteriéru je -20 °C. Maximální relativní vlhkost uvnitř konstrukce je 1,0606. V konstrukci proto může dojít ke kondenzaci, která negativně sníží účinky teplé izolace ESP. Navíc jako bylo psáno u předešlé konstrukce, není vhodné umístit vodorovnou střešní konstrukci do horské oblasti.



Obr. 23 Porovnání maximální relativní vlhkosti uvnitř konstrukcí, při daném použití parozábrany a okrajových podmínkách.

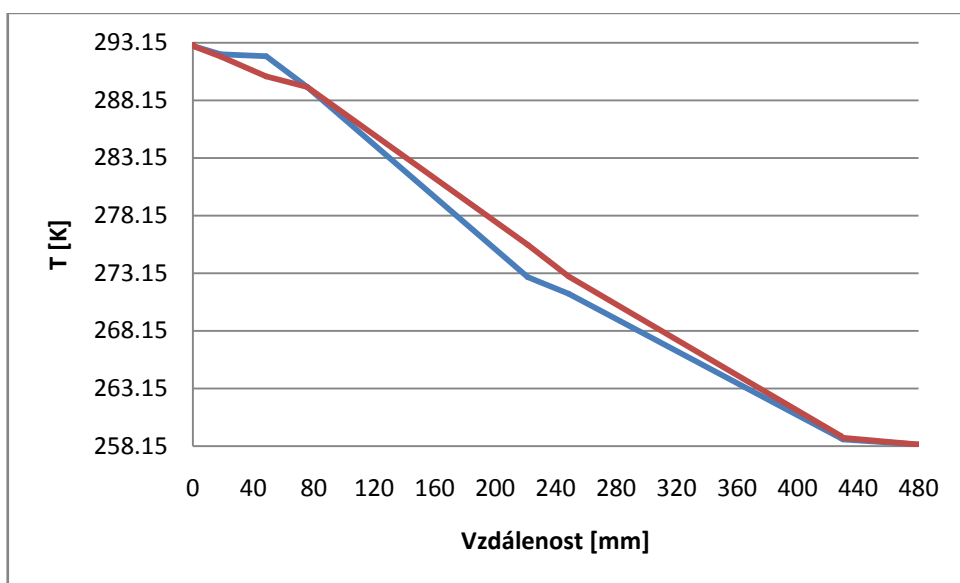
Při porovnání můžeme vidět, že nejlépe jsou na tom konstrukce opatřené parozábranou s hliníkovou fólií v okrajových podmínkách při teplotě -15 °C venkovního vzduchu. Červená úsečka v bodě 1, značí hraniční část možné kondenzace vodních par



Obr. 24 Zobrazení bodů v konstrukci, u kterých bude zkoumána teplota uvnitř konstrukce

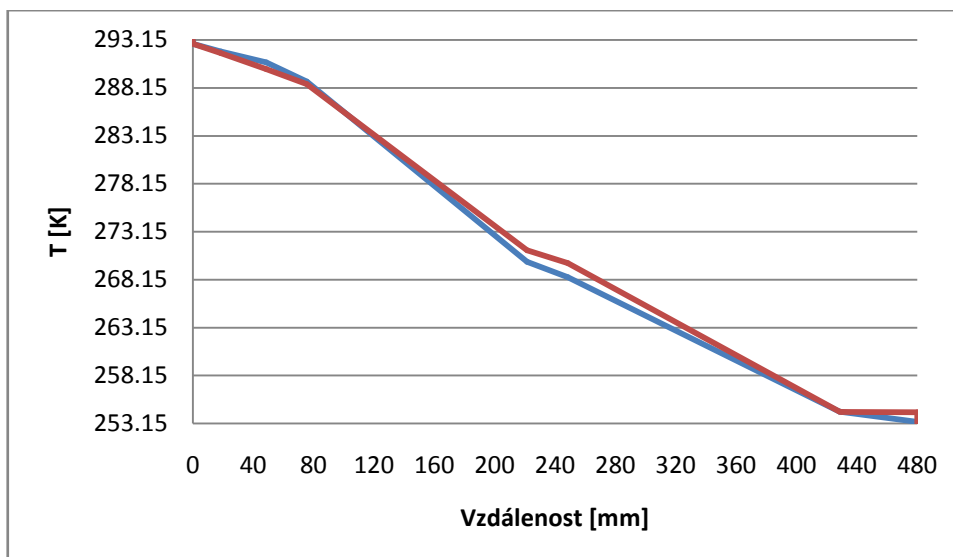
Tab. 7 Teploty v daných bodech určité vzdálenosti T_x uvnitř konstrukce

Vzdálenost [mm]	Teplota exteriéru 258,15 K (-15 °C)		Teplota exteriéru 253,15 K (-20 °C)	
	$T_1 - T_{10}$	$T_{1'} - T_{10'}$	$T_1 - T_{10}$	$T_1 - T_{10}$
0	292,867	292,867	292,748	292,748
18,5	292,13	291,935	291,916	291,76
48,5	291,959	290,209	290,789	290,08
75,5	289,3	289,31	288,81	288,51
221,5	272,7984	275,6	269,993	271,182
248,5	271,3724	272,849	268,39	269,863
428,5	258,84	259,04	254,38	254,36
430	258,73	258,86	254,34	254,33
480	258,277	258,28	253,295	254,294



Obr. 25 Průběh teplot uvnitř konstrukce firmy novatop při venkovní teplotě 258,15 K (-15 °C)

Zde průběh tepelného toku probíhá ve volném prostředí konstrukce (modrá křivka) a v místě sloupku (červená křivka) pouze z malými odchylkami, které tvoří sloupek uvnitř konstrukce o celkové tloušťce 27 mm.

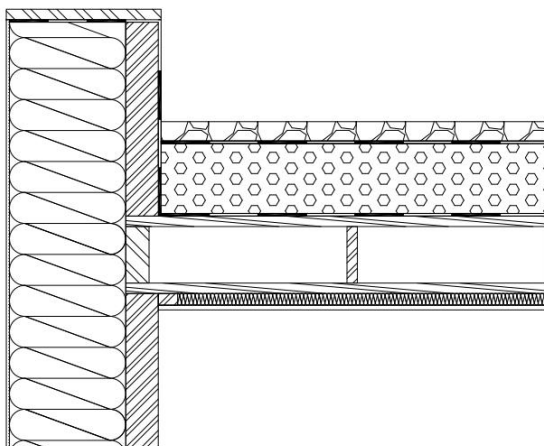


Obr. 26 Průběh teplot uvnitř konstrukce firmy novatop při venkovní teplotě 253,15 K (-20 °C)

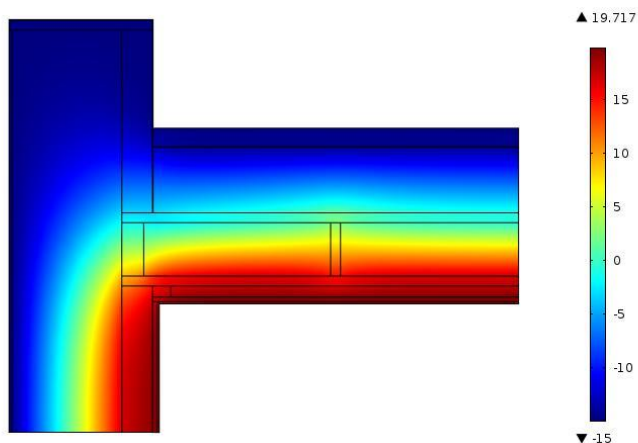
Na výše uvedeném grafu vidíme ještě menší odchylky, než je tomu tak u teplot, které se nachází v okrajových podmínkách, kde teplota venkovního vzduchu je – 20 °C.

Konstrukční spoj jednoplášťové střešní konstrukce a obvodové stěny NOVATOP

Pro tuto práci bylo zvoleno i posouzení konstrukčního napojení střešního pláště na obvodovou stěnu dřevostavby. Střešní skladba i obvodová stěna byla převzata z katalogu firmy NOVATOP. Obvodová stěna pro označením w 100, kde hlavní nosnou část tvoří CLT panel o celkové tloušťce 84 mm, na který ne připevněna tepelná izolace v podobě dřevovláknité desky o celkové tloušťce 300 mm. Tato obvodová stěna slouží jako difúzně otevřená konstrukce.

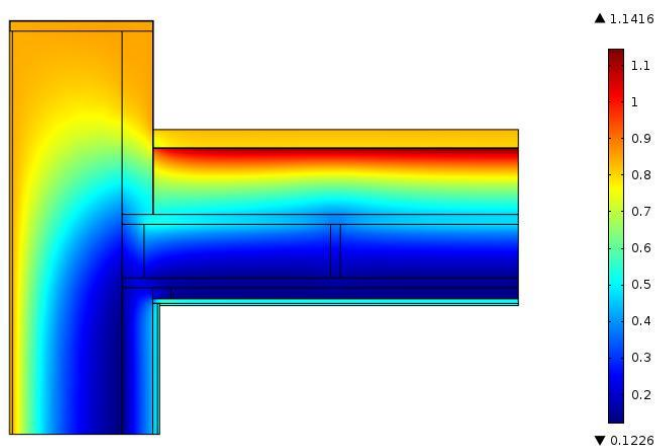


Obr. 27 Zobrazení napojení střešní konstrukce na obvodovou stěnu NOVATOP.



Obr. 28 Zobrazení rozložení teploty u napojení střešní konstrukce a obvodové stěny

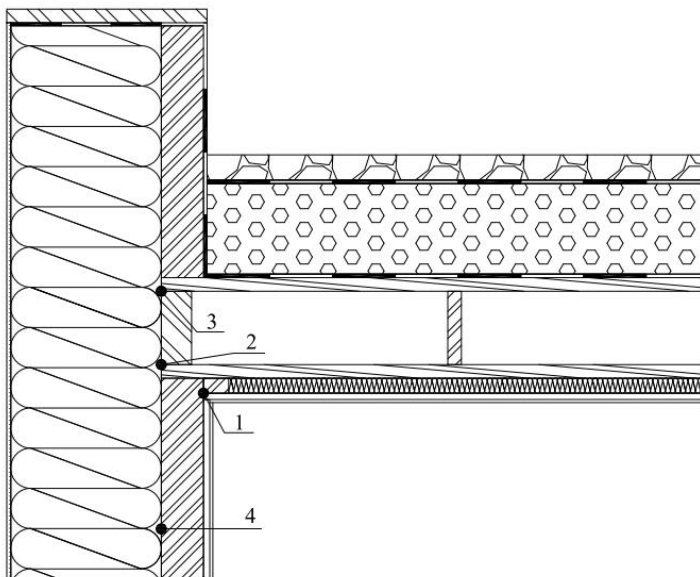
U napojení obvodové stěny a střešní konstrukce nejsou zaznamenány velké tepelné mosty. Nosná část, která tvoří atiku a je přímo v kontaktu s exteriérovými podmínkami, nejvíce oslabuje napojení. V rohu, kde se setkávají nosné dřevěné prvky obou konstrukcí, můžeme zaznamenat nejnižší teplotu na povrchu interiérové strany, která činí zaokrouhleně 16 °C. I tato teplota konstrukci neoslabuje a dané napojení vyhovuje okrajovým podmínkám.



Obr. 29 Zobrazení rozložení teploty u napojení střešní konstrukce a obvodové stěny

Střešní skladba, která je opatřena parozábranou s hliníkovou fólií, vyhověla jako samostatná konstrukce. Při napojení na obvodovou stěnu, která není chráněna z interiérové strany parozábranou a je difúzně otevřená, dochází k maximální relativní vlhkosti pod střešní hydroizolací 1,1416 tzn. 114 % relativní vlhkosti uvnitř konstrukce a možnou kondenzaci vodní páry, která ovlivní tepelné izolační účinky EPS. Tato

vlhkost je nežádoucí a proto by výše uvedené napojení konstrukcí nemělo být použito v daných okrajových podmínkách.



Obr. 30 Zobrazení bodů, ve kterých bude zkoumána teplota a vlhkost

Tab. 7 Zobrazení naměřených hodnot uvnitř konstrukce v daných bodech dle Obr 30.

Body	T [K]	φ [-]
1	290,19	0,5
2	283,27	0,22
3	272,873	0,41
4	288,7	0,2

V tabulce můžeme vidět, že teplota v rohu napojení konstrukcí (bod 1) je 290,19 K (17,04 °C). Tato povrchová teplota je nižší, než teplota povrchu konstrukce 19,717 °C. V tomto bodě budou vznikat jisté tepelné ztráty, než je tomu v ploše konstrukce. Porovnání teplot v bodech 2-4 můžeme zjistit, že teplota klesá s umístěním bodu ve výše v konstrukci. To je zapříčiněno, že nosný prvek stěny, který tvoří v horní části atiku domu, není zcela izolovaný tepelným izolantem a tvoří tepelný most této skladby.

V uvedených bodech, kde dochází k jistým tepelným ztrátám, které nejsou nijak vysoké, byla zjištěna i maximální relativní vlhkost. V bodě 1 se relativní vlhkost rovná vlhkosti interiéru, tudíž 0,5. Body 2 a 4, které jsou umístěny za nosným CLT panelem, mají přibližně stejnou relativní vlhkost 0,2. Tato vlhkost je menší než v bodě 1, z důvodu snížení vlhkosti pomocí dřevovláknité desky Vapor od firmy FARMACELL. V bodě 3 se maximální relativní vlhkost zvyšuje.

6 DISKUZE

Návrh kvalitní konstrukce dřevostavby, která bude vyhovovat, jak ze strany tepelné ochrany budov, tak ze strany nežádoucí kondenzace vodních par, je složitý proces, který hraje významnou roli při používání a životnosti těchto staveb. Proto shledávám důležitým, se touto problematikou více zabývat. Konstrukce, které se při stavbě dřevěných domů využívají, jsou převážně složeny z více druhů materiálů, které mají rozdílné vlastnosti, jako jsou součinitele tepelné vodivosti a difúze vodních par, ale také obecné vlastnosti jakou jsou pružnost a pevnost. Každý z těchto materiálů se chová jinak podle toho, kde se v konstrukci nachází a za jakých podmínek. Okrajové podmínky, ve kterých se konstrukce nacházejí, se mohou lišit i v rámci ČR, proto je důležité každou stavbu, ve které jsou tyto konstrukce použity, zohledňovat zvlášť.

Střešní konstrukce, které jsou v této práci použity, jsou reálně využívané převážně při stavbách rodinných domů. Základní konstrukce, které byly převzaty z katalogu a následně podrobeny výpočtům a simulací, kde bylo zkoumáno šíření tepla a difúze vodních par, z hlediska tepelných ztrát vyhověli. Součinitel prostupu tepla označován jako U , uvedené v kapitole č. 5.1.2, který je u těchto konstrukcí pod hodnotou $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ je z hlediska tepelných ztrát velmi přívětivý a vyhovuje dle normy ČSN 73 0540-3 stavbě pasivního domu. Naopak relativní vlhkost u těchto skladeb je velmi vysoká. Použití a montáž těchto skladeb jsem z výrobcem nekomentoval, proto se domnívám, že z hlediska vysoké kondenzace, zobrazené v Obr. 9, Obr. 18, budou tyto konstrukce obsahovat odvětrávací otvory, které budou narušovat vnější hydroizolaci střešního pláště. Ve výsledcích jsme mohli vidět viz. Obr. 9 vysokou relativní vlhkost hned pod touto hydroizolací. Tímto by problém s kondenzací vodních par mohl být vyřešen. Velká opatrnost by musela být věnována k montáži těchto větracích otvorů, aby nedošlo k zatékání kapalné vody do konstrukce ze strany exteriéru. Následná možnost může také být provětrávání vzduchové mezery, která je součástí skladby. Tato vzduchová mezera by mohla být propojena s exteriérem pomocí průduchů, které by procházeli skrze obvodovou stěnu, a tím by se určité množství relativní vlhkosti mohlo volně uvolnit do venkovního prostředí a tím by se snížila možnost kondenzace uvnitř konstrukce. Dalším řešením, které by vyhovělo při použití konstrukcí, bylo umístění parozábrany ze strany interiéru pod sádkartonovou či sádrovláknitou desku. Použitá parozábrana PE, jak můžeme vidět,

nevyhověla Obr. 10 a Obr. 19. Proto v dalším kroku byla použita parozábrana s hliníkovou fólií, zobrazena v Obr. 11, Obr. 20, která daným okrajovým podmínkám a obsahu nízké relativní vlhkosti pod hranicí kondenzace 1,0 vyhověla. Konstrukce, které vyhověly s parozábranou s hliníkovou fólií, umístěné do okrajových podmínek s venkovní teplotou $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ z hlediska kondenzace vodních par nevyhověly, kvůli mírnému překročení hranice maximální relativní vlhkosti 1,0. Tyto skladby byly posuzovány pouze podle teploty a vlhkosti venkovního vzduchu za stacionárních podmínek. Při reálných podmínkách, by bylo nutné posuzovat skladby za nestacionárních podmínek, i z hlediska výskytu sněhové vrstvy, která by mohla výrazně ovlivnit vlastnosti použitých konstrukcí.

Dřevěné prvky, které jsou součástí skladby, mají tepelný i vlhkostní tok skrz konstrukce odlišný, oproti prostředí, kde se tyto dřevěné prvky nenachází. Rozdílné šíření tepla konstrukcí je uvedeno v Obr. 15, 16 pro konstrukci EGGER a Obr. 25,26 pro konstrukci NOVATOP. Tepelná izolace ESP, která chrání tyto konstrukce před podmínkami v exteriéru, toto rozdílné vedení tepla vyrovnává, a proto nedochází k tvorbě tepelných mostů, které by konstrukce velmi negativně ovlivňovali. V další části jsem posuzoval šíření tepla a difúzi vodní páry u napojení střešního pláště na obvodovou stěnu Obr. 27. U výsledků simulací, jsem zjistil, že konstrukce, která je posuzována samostatně a vyhoví okrajovým podmínkám, v tomto konstrukčním detailu nevyhoví, z důvodů vysoké relativní vlhkosti. Tato vlhkost mohla vzniknout z důvodu, že obvodová stěna je řešena jako difúzně otevřená a skrze tuto stěnu difunduje vodní pára dovnitř konstrukce, kde část této vlhkosti je vedena do střešní konstrukce a v místě pod vnější hydroizolací se vlhkost hromadí a může dojít k následné kondenzaci, jak je uvedeno v Obr 29.

7 ZÁVĚR

Po vypracování této práce bylo zjištěno, že konstrukce převzaté z katalogu firmy EGGER a NOVATOP, vyhovují z hlediska úniku tepelných ztrát a minimálnímu vzniku tepelných mostů, tvořených nosnými konstrukcemi těchto skladeb. Z hlediska kondenzace, kde maximální relativní vlhkost u konstrukce EGGER je 3,12 a u konstrukce NOVATOP 2,02, tyto konstrukce nevyhověly. V opravném řešení, byla umístěna parozábrana ze strany interiéru pod sádrovláknitou nebo sádrokartonovou desku. Tepelný tok zůstal u každé konstrukce nezměněn. Změněna byla maximální relativní vlhkost, která činila u konstrukce EGGER hodnotu 1,46, což je skoro o polovinu menší relativní vlhkost, než u předešlé úlohy. U střešní skladby firmy NOVATOP se maximální relativní vlhkost snížila na hodnotu 1,45. Další řešení bylo použití parozábrany s hliníkovou fólií, kde obě tyto konstrukce vyhověly dle požadavků normy ČSN 73 0540 a hodnota maximální relativní vlhkosti klesla pod hranici 1,0. Konstrukce s parozábranou, která obsahuje hliníkovou fólii, vyhověly okrajovým podmínkám, kde teplota exteriéru je $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, byly posouzeny při okrajových podmínkách, kde teplota exteriéru je $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Byl zaznamenán mírný nárůst maximální relativní vlhkosti pod hydroizolační vrstvou, jejíž hodnota pro konstrukci firmy EGGER je 1,084 a pro konstrukci firmy NOVATOP 1,061. Tyto vlhkosti jsou mírně nad hranicí kondenzace vodních par, proto je lepší tyto konstrukce v daných okrajových podmínkách nepoužívat. U napojení střešního pláště na obvodovou stěnu firmy NOVATOP, jsme mohli zaznamenat, že konstrukce, která při posouzení samostatně vyhoví, v tomto konstrukčním detailu nevyhoví. Z důvodu maximální relativní vlhkosti uvnitř konstrukce pod hydroizolační vrstvou, uvedené hodnotou 1,14. Body, které byly zvoleny pro posouzení teploty a relativní vlhkosti v daných místech napojení střešního pláště a obvodové stěny, bylo zjištěno, že v těchto bodech nedochází ke vzniku tepelného mostu, ani žádné kondenzaci vodních par uvnitř nebo na povrchu konstrukce.

8 SUMMARY

After completion of this study, it was found that the structure taken from the catalog EGGER and NOVATOP meet the terms of leakage thermal lost and minimum formation of thermal bridges, formed by support structures by these compositions. From the perspective of condensation, where the maximum relative moisture in the structure EGGER 3.12 and construction NOVATOP 2.02, these structures fail to comply. In correction solutions was placed the interior vapor barrier under the gypsum or drywall. Heat flow for every structure remained the same. Change was be maximum relative humidity, which was at the construction EGGER 1.46, which is almost half the size of relative moisture than in the previous task. For roof track NOVATOP is the maximum relative moisture dropped to 1.45. Another solution was to use aluminum foil vapor barrier, where both of these structures satisfy and the maximum value of the relative moisture dropped below 1.0. Construction with aluminum foil, which satisfy the boundary conditions where the outdoors temperature is -15°C , was assess in boundary conditions where is the temperature of outdoors -20°C . There was a slight increase in the maximum relative moisture below the waterproof layer, whose value for the construction EGGER is 1.084 and 1.061 for NOVATOP construction. These moistures are slight above the condensation of water vapor, than is better not use this structure in mentioned boundary conditions. In connection roof deck perimeter wall NOVATOP companies, we've seen that the structure, which assessed independently satisfied, in this construction detail was failed. For maximum relative humidity inside the structure beneath the waterproof layer, above the value of 1.14. Points that were chosen for the assessment of temperature and relative moisture in those connection point of the roof cladding and walls, it was found, that at these points there is no formation of a thermal bridge or no condensation of water vapor on the surface or inside konstrukce.zde slight increase maximum relative moisture under waterproof layer, whose value for the construction EGGER is 1.084 and for the construction companies NOVATOP is 1.061.

9 POUŽITÁ LITERATURA

ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 53 s.

ČSN 73 0540-3 *Tepelná ochrana budov. Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 95 s.

ČSN EN ISO 19788: *Tepelně vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků – Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce – Výpočtové metody*.

FIALA, J., 2001, *Inženýrství pevných látek*, ZČU Plzeň, 211 s, ISBN 80-7082-777-7

FICKER, Tomáš., 2004, *Handbook of building thermal technology, acoustics and daylighting: Příručka stavební tepelné techniky, akustiky a denního osvětlení*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 266 s. ISBN 80-214-2670-5.

FUCIMAN, Ondřej., 2001, *Tepelně technické posouzení plochých střešních konstrukcí a jejich návrh se započítáváním vlivu vlhkosti materiálů*. Brno. Státní doktorská zkouška. Vysoké učení technické, 25 s.

HORÁČEK, P., 2004, *Model vázaného šíření vlhkostního a teplotního pole při sušení dřeva*, Mendelova zemědělská a lesnická fakulta Brno, 126 s, ISBN 80-86386-59-7

HORÁČEK, P., 2008, *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. ISBN 80-7157-347-7.

KAŇKA, J., SVOBODA, Z., 2004, *Stavební fyzika 31*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 122 s. ISBN 80-01-02861-5.

KULHÁNEK, F., 2006, *Stavební fyzika II – Stavební tepelná technika*, Česká vyučovací technická v Praze, 143 s, ISBN 80-01-03408-9

MRLÍK, F., 1985, *Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 269 s. Edícia stavebníckej literatúry (Alfa).

MAŘÍK, R., ODEHNAL L., ŠTAHNRT P., 2014, *Stavební fyzika – Návrh a posuzování staveb z hlediska stavební fyziky*, Střední průmyslová škola stavební, Opava, 56s.

POKORA, R., 2014, *Popis teplotního a vlhkostního pole v konstrukcích dřevostavby*, Brno. Bakalářská práce. Mendelova univerzita.

TIMUSK, P. CH., 2008. An Investigation of the Moisture Sorption and Permeability of Mill-fabricated Oriented Strandboard. Department of civil engineering, University of Toronto, 279 s.

TRCALA, M., 2007, *Popis vlhkostního a tepelného toku u anizotropního tělesa*. Brno. Bakalářská práce. Mendlova univerzita.

TRCALA, M., 2012, *Model vázaného pohybu vlhkostního a teplotního pole ve dřevě*. Brno. Disertační práce. Mendlova univerzita.

VAVERKA, Jiří, Josef CHYBÍK a František MRLÍK., 2000, *Stavební fyzika*. Brno: VUTIUM, 420 s. ISBN 80-214-1649-1.

10 INTERNETOVÉ ZDROJE

MAKOVEC, V., 2014, *Difúzně otevřená a uzavřená stěna – Rozdíl v rosném bodu* [online] citováno 5. dubna 2015. Dostupné: <http://www.drevostavby.cz/cs/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/2861-difuzne-otevrena-a-uzavrena-stena-rozdil-v-rosnem-bodu>

RYPL, J., 2006, *Technické vlastnosti podstřešních membrán, fólií a parozábran* [online] citováno 13. dubna 2015. Dostupné na: <http://www.tzb-info.cz/3404-technicke-vlastnosti-podstresnich-membran-folii-a-parozabran>

SOLAŘ, J., 2012, *Problematika nadměrné vlhkosti u střešních pláštů šikmých a strmých střech* [online] citováno 17. dubna 2015. Dostupné na: <http://stavba.tzb-info.cz/strechy/8852-problematika-nadmerne-vlhkosti-u-stresnich-plastu-sikmych-a-strmych-strech>