



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra mechaniky

**Analýza kondenzace vodní páry v tunelu**

Analysis of vapor condensation in tunnel

**Diplomová práce**

2016/2017

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Prof. Dr. Ing. Bořek Patzák



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Daňková Jméno: Michaela Osobní číslo: 396381  
Zadávající katedra: Katedra mechaniky - K132  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza kondenzace vodní páry v tunelu

Název diplomové práce anglicky: Analysis of vapor condensation in tunnel

Pokyny pro vypracování:

Vytvoření modelu vedení tepla v charakteristickém průřezu. Na základě průběhu teplot na ostění tunelu formulovat model charakterizující kondenzaci vodní páry. Pro řešení využít existující software a propojit jej pomocí prostředí MuPIF.

Seznam doporučené literatury:

Bittnar, Šejnoha: Numerické metody mechaniky I, II, Nakladatelství ČVUT, 1992

R. Černý: Řešení transportních jevů na počítači, ČVUT, 1997.

Jméno vedoucího diplomové práce: Prof. Dr. Ing. Bořek Patzák

Datum zadání diplomové práce: 12.9.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 6. 1. 2017

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

19.9.2016  
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Michaela Daňková

Název diplomové práce: Analýza kondenzace vodní páry v tunelu

Základní část: Model kondenzace vodní páry v tunelu podíl: 100 %

Formulace úkolů: 1) Implementace modelu kondenzace vodní páry příčného řezu na základě rozložení teploty příčného řezu ostění získané teplotní analýzou a parametrů vzduchu v tunelu (relativní vlhkost, teplota) v prostředí MuPIF, výstupem bude množství zkondenzované vody.

2) Rozšíření modelu o chování v podélném směru za zjednodušujících předpokladů (diskrétní dělení na úseky, předpoklady o množství zkondenzované vzduchové masy, úsek bez provozu (laminární proudění) a pod.)

3) Analýza kondenzace na zvoleném úseku dle výpočetních možností, grafická reprezentace výsledků, diskuse.

Podpis vedoucího DP:.....

Datum: 20.12.2016

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

Podpis konzultanta:.....

Datum:.....

3. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

Podpis konzultanta:.....

Datum:.....

4. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

Podpis konzultanta:.....

Datum:.....

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Analýza kondenzace vodní páry v tunelu“ vypracovala samostatně pod vedení Prof. Dr. Ing. Bořka Patzáka s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 07. 01. 2017

Michaela Daňková

## Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Prof. Dr. Ing. Bořku Patzákovi za cenné rady, připomínky k řešení dané problematiky a za čas mně věnovaný při konzultacích, dále doc. Ing. Vítu Šmilauerovi, Ph.D. za poskytnutí vstupních materiálů a za pomoc při řešení problémů s vedením tepla a kondenzací, v neposlední řadě Ing. Michalu Mračkovi za přínosné postřehy během celé tvorby práce.

# Obsah

---

A) Úvod.....	9
B) Geometrie tunelů .....	11
C) Model kondenzace v příčném směru .....	12
1. Vstupní materiály .....	12
2. Materiálové charakteristiky.....	12
3. Okrajové a počáteční podmínky.....	13
4. Nestacionární vedení tepla .....	15
5. Výpočet kondenzace.....	17
6. Zjištění kondenzace v příčném řezu .....	19
6.1. Schéma řešení úlohy.....	20
6.2. Získání teplot na ostění tunelu .....	21
6.3. Rozdělení na úseky .....	23
6.4. Zjištění dělení .....	24
6.5. Průměrování teplot na délce $d$ pro jeden krok .....	25
6.6. Výpočet pro více časových kroků .....	28
6.7. Kondenzace .....	29
6.8. Vykreslení výsledků pomocí modulu VTK .....	31
D) Rozšíření modelu v podélném směru .....	39
1. Zavedení předpokladů .....	39
2. Princip výpočtu.....	42
3. Okrajové a počáteční podmínky.....	43
3.1. Výpočet změněné teploty .....	43
3.2. Výpočet kondenzačního tepla .....	44
4. Zjednodušený model kondenzace v podélném směru .....	45
4.1. Získání tepla.....	48
4.2. Vzniklé překážky a jejich řešení.....	48

4.3. Provedené analýzy .....	49
E) Informace o použitém softwaru .....	53
1. Objektově orientované programování .....	53
2. Program OOFEM .....	54
3. Platforma MuPIF .....	55
4. Program ParaView .....	56
F) Závěr .....	57
G) Reference .....	59

## Abstrakt

Cílem této práce bylo na základě průběhu teplot na ostění tunelu vytvořit model charakterizující kondenzaci vodní páry. Pro řešení měl být využit existující software OOFEM a propojen pomocí prostředí MuPIF. V první části práce je formulován model kondenzace v charakteristickém řezu a druhá část se zabývá vytvořením modelu kondenzace v podélném směru. Vytvořené modely poskytují možnost zjistit, kde kondenzace probíhá a kvantifikovat ji, a to vše s rozumnými výpočtovými nároky. V provedených analýzách bylo zjištěno, že nejvíce vodní páry kondenzuje v červenci a srpnu, kdy do tunelu proudí teplý vlhký vzduch.

## Abstract

The aim of this thesis was to create a model characterizing the condensation of water vapor based on the temperature distribution on the tunnel lining. The existing software OOFEM should have been used for the solution and connected with the MuPIF platform. In the first part the model of condensation in a characteristic cross-section is formulated and the second part deals with creating a model of condensation in the longitudinal direction. Created models show where condensation occurs and quantify it, and all that with reasonable computational demands. It was found out in analyzes that most of the water vapor condenses in July and August, when warm humid air flows into the tunnel.



## A) Úvod

---

Diplomová práce se věnuje problematice modelování kondenzace vodních par v tunelu. Motivací k práci bylo, že i v období silných dešťů bylo z tunelového komplexu Blanka čerpáno méně vody než v teplých suchých dnech. Právě v těchto dnech si spousta řidičů mohla všimnout mokré vozovky. Problém tedy nastává při kontaktu teplého vlhkého letního vzduchu s chladným ostěním tunelu [1]. Prezident firmy Metrostav a.s., Ing. Jiří Bělohlav, v týdeníku Euro ze 14. září 2015 dodává:

*„Měli jsme ve smlouvě, že máme postavit suchý tunel ve třídě jedna a třídě dvě. To znamená, že do tunelu ve třídě jedna může ostěním za 24 hodin vniknout 0,02 litru vody na čtvereční metr. Na plochu ostění Blanky to vychází na 22 kubíků vody denně, která je v normě. My jsme i před prázdninami v době silných dešťů čerpali šest kubíků vody včetně té z deště i té zkondenzované. Takže čtvrtinu normy.“*

Bylo třeba rozlišit, kolik z odčerpávané vody je průsakové a kolik zkondenzované.

Problém je obecně třídídimenzionální, kombinující nestacionární vedení tepla v zemním tělese a ostění, nelineární proudění vzduchu v tunelu a fázové změny na rozhraní vzduch – ostění. To je velice komplexní problém. Cílem této práce bylo formulovat, za mnoha zjednodušujících předpokladů, prakticky použitelný jednoduchý model s rozumnými výpočetními nároky, umožňující kvantifikovat množství zkondenzované vodní páry. Vedlejším cílem práce pak bylo ověřit propojení programu OOFEM s platformou MuPIF a otestovat jejich vzájemnou komunikaci.

Nejprve byl formulován model kondenzace v charakteristickém příčném řezu, který umožňuje kvantifikovat, zda dochází ke kondenzaci vodní páry, a stanovit měrné množství kondenzované páry. Nejprve byly v příčném řezu analýzou nestacionárního vedení tepla v softwaru OOFEM 2.4 dev [2], s teplotou vzduchu jako okrajovou podmínkou, zjištěny teploty ostění a zprůměrovány. Poté je z relativní vlhkosti vzduchu na vstupu do tunelu těmito zprůměrovanými teplotami na ostění určena koncentrace vodní páry. Koncentrace vodní páry je určena také na výstupu z tunelu z hodnot relativní vlhkosti vzduchu a teplotou vzduchu na

výstupu z tunelu. Pokud ke kondenzaci dochází, je z jejich rozdílu zjištěno množství zkondenzované vody. Smyslem modelu je především zjistit, kde v příčném řezu ke kondenzaci dochází.

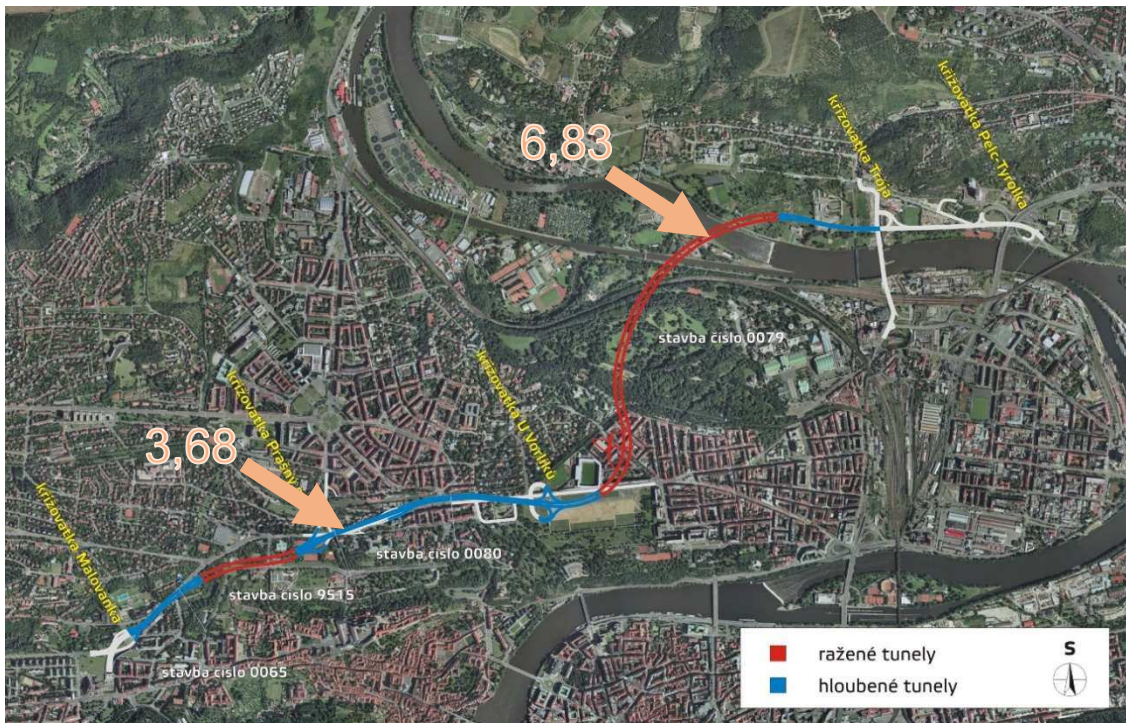
Tento model byl následně využit pro vytvoření 2,5D modelu popisujícího celý proces jak v příčném, tak v podélném směru. Jeho principem je diskretizace vybraného řešeného tunelu a aktualizování teploty jako okrajové podmínky. Ta je počítána se zahrnutím jak změny teploty vzduchu přestupem tepla na rozhraní vzduch – ostění, tak vlivu kondenzačního tepla.

Implementace modelu jak v příčném, tak podélném směru je provedena v jazyce Python ve formě objektově orientovaného programu, kde jednotlivé třídy implementují požadované kroky výpočtu. Program využívá platformu MuPIF, která umožňuje komunikovat s výpočetním programem OOFEM, měnit vstupní parametry, okrajové podmínky, spouštět výpočet a získávat výstupní data přímo v jazyce Python.

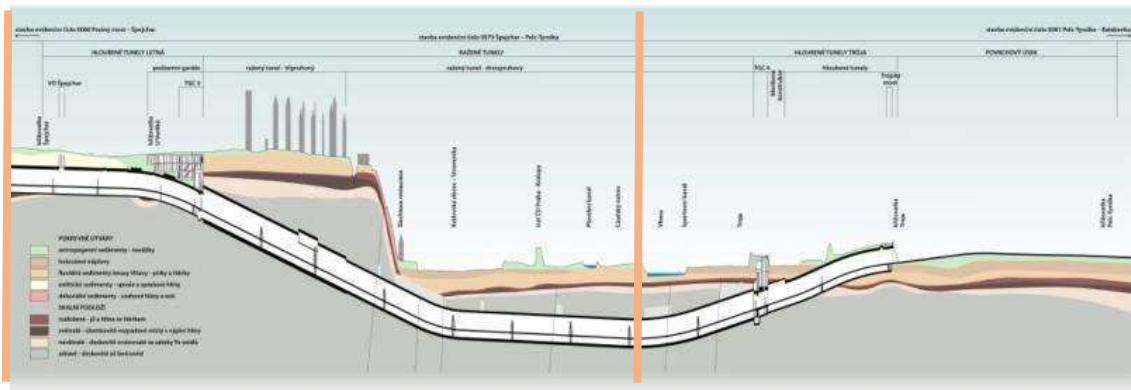
V práci [1], která se tímto problémem zabývala, byly simulovány celkem tři situace. První situace předpokládala uzavřený tunel a bylo zjištěno, že vnější teplota ražený tunel neovlivňuje vůbec, hloubený jenom zanedbatelně, a to pouze do hloubky zhruba sedmi metrů od povrchu. Druhá simulace byla provedena za předpokladu otevřeného tunelu a spuštěných ventilátorů, třetí s otevřeným tunelem v denním režimu. V denním režimu byla uvažována hodinová fluktuace teploty. Tato práce se zabývá pouze druhou simulací, kterou je otevřený tunel se spuštěnými ventilátory.

## B) Geometrie tunelů

Model kondenzace v příčných řezech je zpracován pro dva charakteristické úseky tunelu (viz Obr. 1 a Obr. 2 [3] – zobrazení místa řezu je vyznačeno oranžovou barvou) [1]. V hloubeném úseku za křižovatkou Prašný most na stavbě č. 9515 a ve staničení 3,68 km jižní tunelové trouby, s výškou nadloží 5 m. V úseku raženém pod Císařským ostrovem na stavbě číslo 0079, ve staničení 6,83 km severní tunelové trouby, s výškou nadloží 20 m.



Obr. 1 - Zobrazení řezů pro provedení analýzy [3]



Obr. 2 - Podélný řez tunelem Blanka se zobrazením řezů [3]

Při výpočtu je uvažována osová symetrie tunelu, a proto je v obou případech modelován pouze jeden ze dvou tubusů a uvažovány příslušné okrajové podmínky na ose symetrie.

## C) Model kondenzace v příčném směru

---

Tento oddíl je věnován problematice modelování kondenzace v příčném řezu. Nachází se zde také popis propojení existujícího softwaru OOFEM s prostředím MuPIF a popis nových v rámci práce vzniklých programů.

### 1. Vstupní materiály

Vstupní materiály pro analýzu vedení tepla mi byly laskavě poskytnuty doc. Ing. Vítem Šmilauerem, Ph.D. a jsou to:

- vstupní soubor pro výpočet nestacionárního vedení tepla v programu OOFEM [2],
- soubor v Excelu pro výpočet průměrné měsíční kondenzace [1],
- výkres řezu hloubené části tunelu,
- textový soubor s popisem problematiky [1].

### 2. Materiálové charakteristiky

Uvedené materiálové charakteristiky jsou převzaty ze vstupního souboru pro výpočet nestacionárního vedení tepla a přiloženého textu [1].

Beton byl uvažován s objemovou hmotností  $2,45 \text{ t m}^{-3}$ , tepelnou vodivostí  $1,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a tepelnou kapacitou  $870 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Hloubený úsek se nachází ve spraších a sprašových hlínách, jejichž tepelná vodivost je v závislosti na vlhkosti v rozmezí  $0,33 - 1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a tepelná kapacita je mezi  $800 - 1480 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Objemová hmotnost je  $1,6 \text{ t m}^{-3}$ .

Ražený úsek se nachází v břidlicích s tepelnou vodivostí  $1,1 - 2,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a tepelnou kapacitou  $800 - 1480 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Objemová hmotnost je  $2,6 \text{ t m}^{-3}$ .

Pro zjednodušení jsou pro oba úseky uvažovány hodnoty tepelné vodivosti  $1,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a tepelné kapacity  $1200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

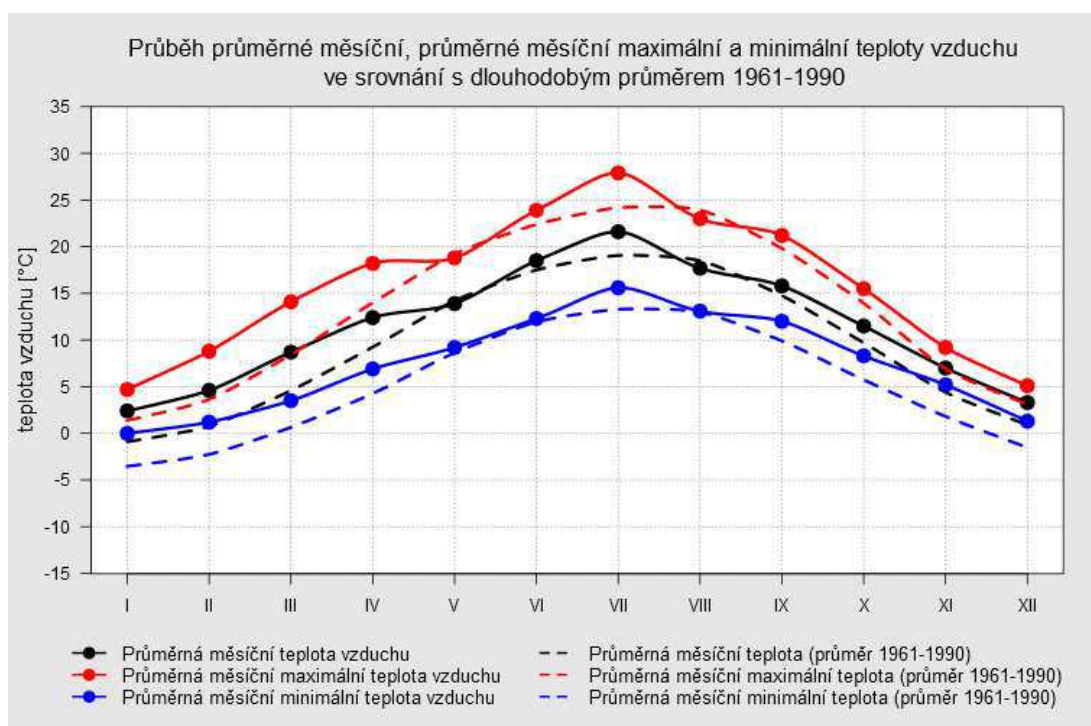
### 3. Okrajové a počáteční podmínky

Pro provedení výpočtu nestacionárního vedení tepla v programu OOFEM jsou jako okrajové podmínky uvažovány průměrné měsíční teploty na zemském povrchu, naměřené na klimatologické stanici Praha - Karlov. Teploty se pohybují v rozmezí 2,5°C - 21,5°C, viz Obr. 3. Jako součinitel přestupu tepla byla zvolena hodnota 20 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> jako průměrná roční hodnota dle doporučení ČSN 731208 [1].

Pro výpočet množství zkondenzované vody byly použity průměrné měsíční relativní vlhkosti (Obr. 4).

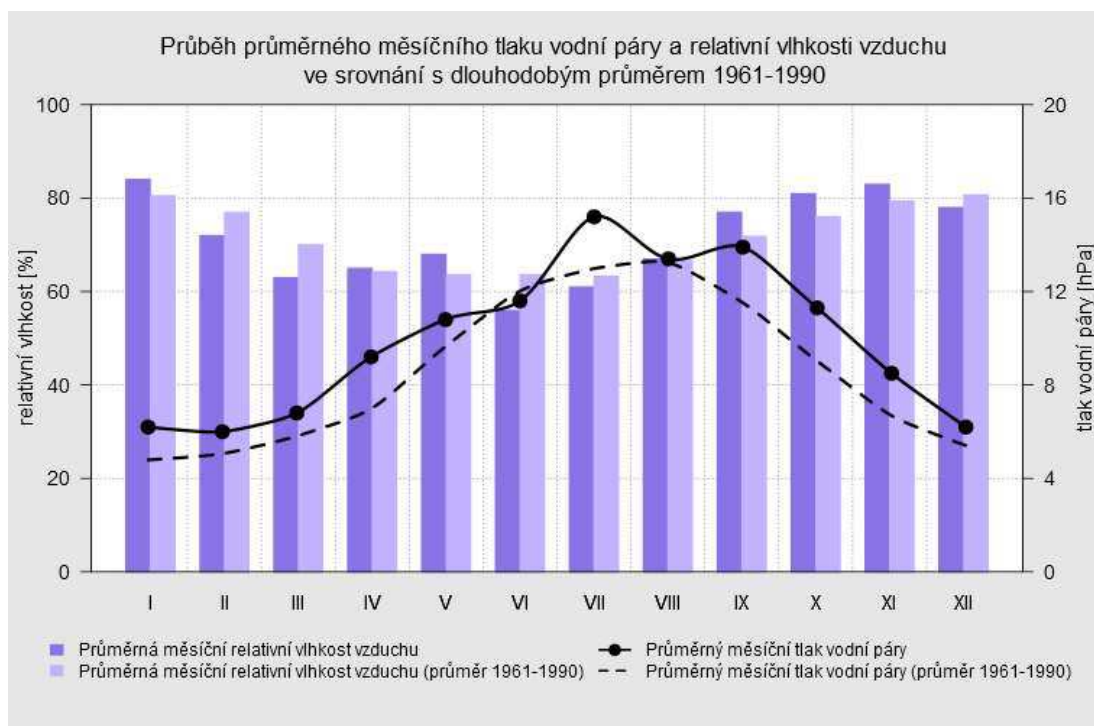
Všechny tyto údaje jsou volně přístupné na webových stránkách Českého hydrometeorologického ústavu [4].

Počáteční teplota zemního tělesa a tunelového tělesa byla uvažována konstantní, a to 10°C.



Obr. 3. Průměrné měsíční teploty pro rok 2014 - stanice Praha – Karlov [4]

## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu



Obr. 4. Průměrné měsíční relativní vlhkosti pro rok 2014 - stanice Praha – Karlov [4]

## 4. Nestacionární vedení tepla

Pro zjištění rozložení teploty na ostění je programem OOFEM počítáno nestacionární vedení tepla. Dvourozměrný model zahrnuje oblast zemního tělesa s tunelovým tělesem. Na povrchu zemního tělesa a ostění byl uvažován přestup tepla s teplotou okolního prostředí odpovídající průměrné teplotě v daném dni. Nestacionární vedení tepla (viz Řešení transportních jevů na počítači [5]) je časově evoluční proces. Tento problém můžeme řešit buď analyticky, nebo pomocí numerických metod. Kromě prostorových proměnných je nutné zahrnout do výpočtu další proměnnou, a to čas. Diferenciální rovnice pak obsahují derivace podle prostorových i časových proměnných.

Nestacionární vedení tepla je úloha s 1. derivací podle času. Tento problém je možné vyjádřit pomocí rovnice

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

kde  $\rho$  je hustota,  $c$  měrná tepelná kapacita.

Diskretizace podle časových proměnných s využitím Galerkinovy metody

$$\int_{\Omega} \{N\} \left[ \rho c \langle N \rangle \frac{\partial \{T\}^e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \{T\}^e \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \{T\}^e \right) \right] d\Omega = \{0\} \quad (2)$$

a následná integrace per partes vede na diskrétní formu

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \rho c \{N\} \langle N \rangle d\Omega \frac{\partial \{T\}^e}{\partial t} + \\ & + \int_{\Omega} \left( K \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} + K \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \right) d\Omega \{T\}^e \\ & - \int_{\Gamma} \{N\} \left( K n_x \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} + K n_y \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \right) d\Gamma \{T\}^e = \{0\}, \end{aligned} \quad (3)$$

kterou můžeme zapsat v kompaktním tvaru jako

$$[P]^e \frac{\partial \{T\}^e}{\partial t} + [H]^e \{T\}^e = \{A\}^e, \quad (4)$$

kde

$$[P]^e = \int_{\Omega} \rho c \{N\} \langle N \rangle d\Omega. \quad (5)$$

Pro diskretizaci v čase můžeme použít metodu konečných diferencí, kde řešení je obecně aproximováno na časovém intervalu  $[t, t+\Delta t]$  ve tvaru

$$\{T\}^e = (1 - \alpha)\{T\}_t^e + \alpha\{T\}_{t+\Delta t}^e, \quad \alpha \in [0, 1]. \quad (6)$$

Pomocí stejného postupu lze aproximovat i vektor okrajových podmínek,

$$\{A\}^e = (1 - \alpha)\{A\}_t^e + \alpha\{A\}_{t+\Delta t}^e, \quad \alpha \in [0, 1]. \quad (7)$$

Diferenční náhrada pro časovou derivaci je

$$\frac{\partial \{T\}^e}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (\{T\}_{t+\Delta t}^e - \{T\}_t^e), \quad (8)$$

po dosazení do rovnice (4) získáme

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} [P]^e (\{T\}_{t+\Delta t}^e - \{T\}_t^e) + [H]^e ((1 - \alpha)\{T\}_t^e + \alpha\{T\}_{t+\Delta t}^e) \\ = (1 - \alpha)\{A\}_t^e + \alpha\{A\}_{t+\Delta t}^e. \end{aligned} \quad (9)$$

Po úpravách je dosaženo rekurentního tvaru pro výpočet teplotního pole

$$[C]^e \{T\}_{t+\Delta t}^e = [D]^e \{T\}_t^e + \{\bar{A}\}^e. \quad (10)$$

Hodnota součinitele  $\alpha$  je volena nejčastěji  $\frac{1}{2}$ , potom dostáváme výše uvedené matice v následujícím tvaru:

$$[C]^e = \frac{1}{2}[H]^e + \frac{1}{\Delta t}[P]^e \quad (11)$$

$$[D]^e = -\frac{1}{2}[H]^e + \frac{1}{\Delta t}[P]^e \quad (12)$$

$$\{\bar{A}\}^e = \frac{1}{2}(\{A\}_t^e + \{A\}_{t+\Delta t}^e). \quad (13)$$

Popsané metodě řešení odpovídá v softwaru OOFEM problém s klíčovým slovem NonStationaryTransportProblem.



## 5. Výpočet kondenzace

Kondenzace znamená skupenskou přeměnu plynné fáze na kapalnou. V příčném řezu je zaveden předpoklad, že vzduch okolo ostění má stejnou teplotu jako ostění.

Množství kondenzátu je možné určit podle údajů na vstupu do tunelu a výstupu z něj [6]. Dále jsou uvedeny použité vztahy.

Tlak syté páry:

$$p_s = 610,78 \cdot e^{\frac{17,2694 \cdot T}{T+238,3}} \quad (14)$$

Množství vodní páry v saturovaném vzduchu:

$$m_w = 0,002166 \cdot \frac{p_s}{(T + 273,16)} \quad (15)$$

Tlak vodní páry:

$$p = \frac{RH \cdot p_s}{100} \quad (16)$$

Teplota rosného bodu:

$$T_{dew} = \ln \frac{p}{610,78} \cdot \frac{238,3}{\left(17,294 - \ln \frac{p}{610,78}\right)} \quad (17)$$

Množství vodní páry pro jakoukoliv relativní vlhkost:

$$m = 0,002166 \cdot \frac{p}{(T + 273,16)} \quad (18)$$

kde:  $T$  = teplota [°C]

$p$  = aktuální parciální tlak [Pa]

$p_s$  = tlak syté páry [Pa]

$RH$  = relativní vlhkost [%]

$m_w$  = množství vodní páry v saturovaném vzduchu [kg m<sup>-3</sup>]

$T_{dew}$  = teplota rosného bodu [°C].

$m$  = množství vodní páry [kg m<sup>-3</sup>]

Výpočet je proveden pro každou průměrnou teplotu na ostění. Nejprve je z této teploty a relativní vlhkosti vzduchu na vstupu do tunelu spočítáno množství vodní páry na vstupu  $m_{IN}$ . Poté je zjištěno množství vodní páry na výstupu z tunelu  $m_{OUT}$  z hodnot teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu na výstupu z tunelu.

Pokud je splněna podmínka, že je jednotlivá průměrná teplota na délce  $d$  na ostění  $T_{Average,d}$  nižší než teplota rosného bodu  $T_{dew}$ :

$$T_{Average,d} < T_{dew}, \quad (19)$$

pak je množství zkondenzované vody zjištěno

$$m_c = m_{IN} - m_{OUT}, \quad (20)$$

kde:  $T_{Average,d}$  = průměrná teplota na délce  $d$  [°C],

$m_c$  = množství zkondenzované vodní páry [kg m<sup>-3</sup>],

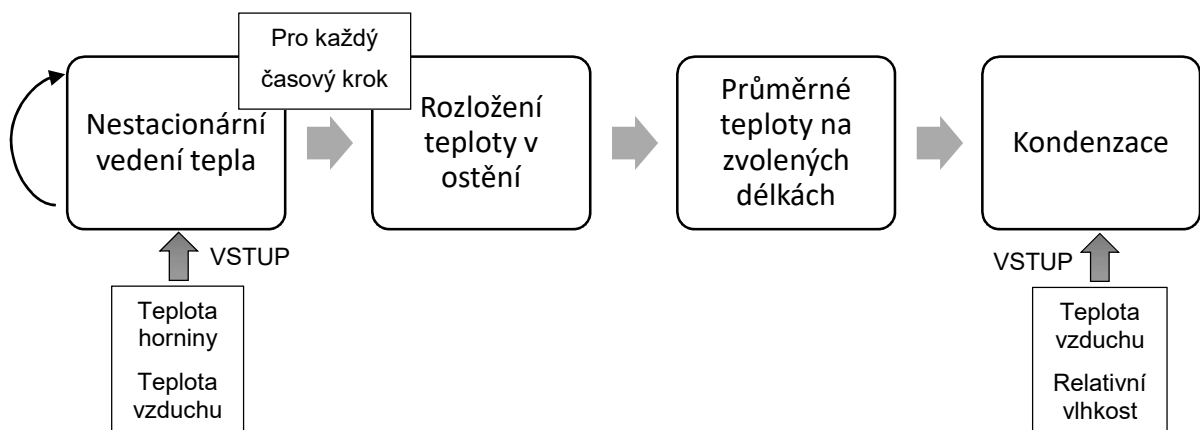
$m_{IN}$  = množství vodní páry na vstupu do tunelu [kg m<sup>-3</sup>],

$m_{OUT}$  = množství vodní páry na výstupu do tunelu [kg m<sup>-3</sup>].

## 6. Zjištění kondenzace v příčném řezu

Jako první bylo přistoupeno k zjišťování průběhu kondenzace v charakteristickém příčném řezu. Hlavními otázkami bylo, zda vůbec ke kondenzaci dochází, jaká období jsou nejvíce pravděpodobná pro její vznik a jaká místa v řezu jsou nejvíce náchylná k výskytu kondenzace.

Program OOFEM spočítá nestacionární vedení tepla a zjistí tak pro každý časový krok rozložení teploty v řezu. V každém časovém kroku jsou identifikovány uzly na ostění a jejich teploty. Ty jsou následně zprůměrovány na zvolené délce. Hlavním důvodem pro průměrování je zjednodušení výpočtu a redukce množství vyhodnocovaných uzlů. Je zjištěno, zda pro tyto teploty ostění, teplotu vzduchu a relativní vlhkost na vstupu do tunelu a výstupu z něj, ke kondenzaci dojde a v jaké míře (Obr. 5).



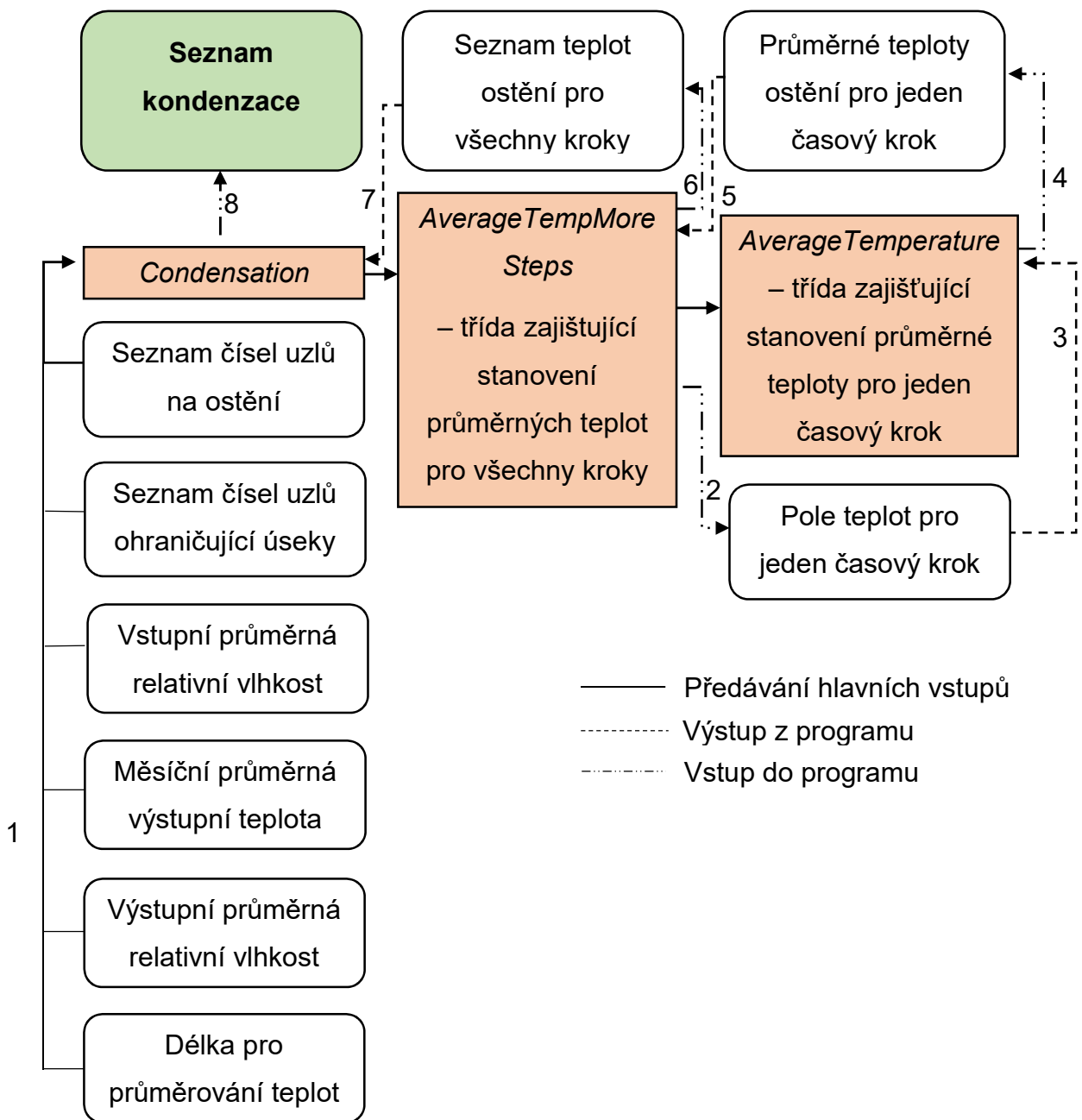
Obr. 5. Zjištění kondenzace v příčném směru

Analýza je provedena s časovým krokem jeden den pro období 1 roku, tj. celkem 365 časových kroků. Výsledkem sledu výpočtů je grafické znázornění, na jakých částech ostění dochází ke kondenzaci a kolik gramů vody zkondenzuje z jednoho metru krychlového vzduchu.

### 6.1. Schéma řešení úlohy

Níže je uvedeno schéma řešení úlohy (Obr. 6). Kurzivou jsou vyznačeny názvy tříd, které provádějí výpočet. Podrobnější popis jednotlivých funkcí je napsán v dalších kapitolách.

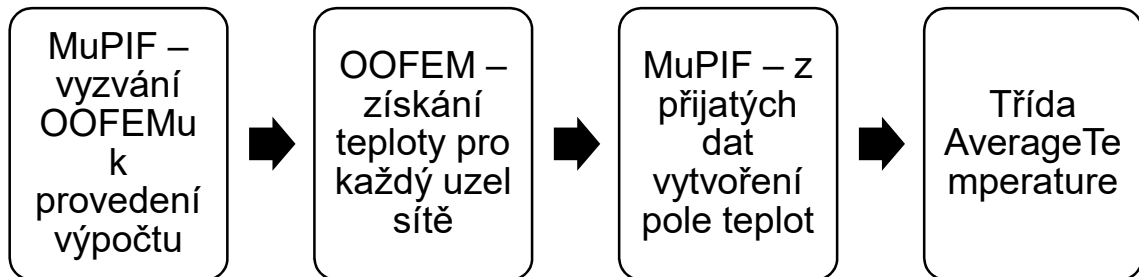
Kroky 2-5 jsou provedeny pomocí cyklu v *AverageTempMoreSteps* celkem 365krát.



Obr. 6 - Princip výpočtu kondenzace v příčném řezu

## 6.2. Získání teplot na ostění tunelu

Pro provedení výpočtu v programu OOFEM a vytvoření polí teplot slouží třída „AverageTempMoreSteps”. Pro další práci s daty, včetně získání a průměrování teplot na ostění, je vytvořena třída „AverageTemperature”. Princip implementace je zobrazen v následujícím schématu (Obr. 7).

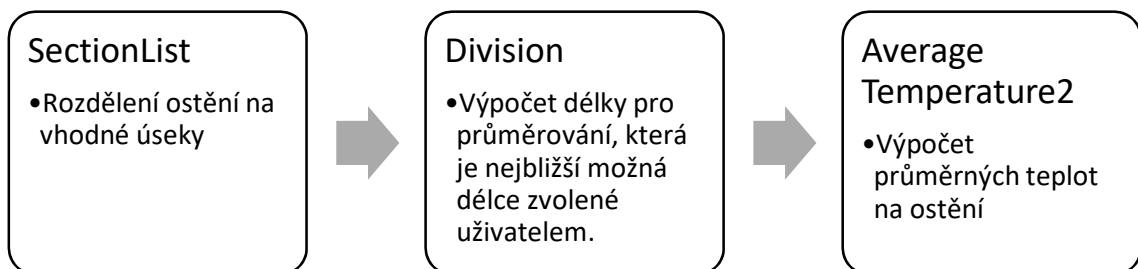


Obr. 7 - Schéma získání teplot

Prostředí MuPIF nejdříve pošle vstupní soubor do řešiče OOFEM. Poté pro každý časový krok vyzve OOFEM k výpočtu v daném čase. Z přijatých výsledků následně MuPIF vytvoří pole, které je využito pro opětovné sestavení sítě.

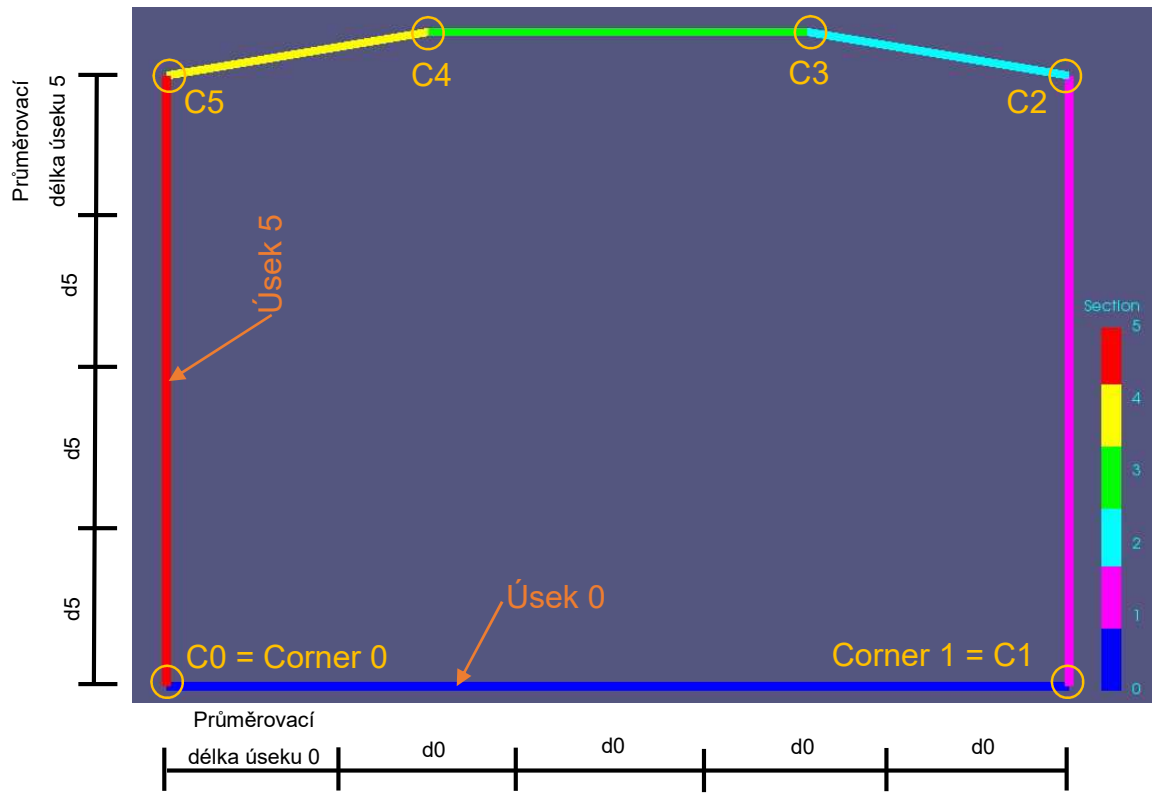
Není nutné provádět výpočet kondenzace pro každý bod sítě, jak už bylo uvedeno výše. Pro identifikaci uzlů tvořících ostění tunelu byl využit program ParaView. Zde byla ručně zjištěna lokální čísla odpovídajících uzlů a zapsána do seznamu „NumbersOfVertices”, viz Obr. 10 (Vertices jsou vyznačeny oranžovou barvou a jsou podél celého ostění.). Současně s tím byl vytvořen další seznam, nesoucí název „NumbersOfCorners”. Ten dále slouží k rozdělení na úseky, viz Obr. 9 a Obr. 10 (úseky jsou od sebe odlišeny barvou, C značí Corner ze seznamu „NumbersOfCorners”).

Získání teploty každého uzlu na ostění není potřeba, proto je počítána rovnou průměrná teplota na daných úsecích (Obr. 8).

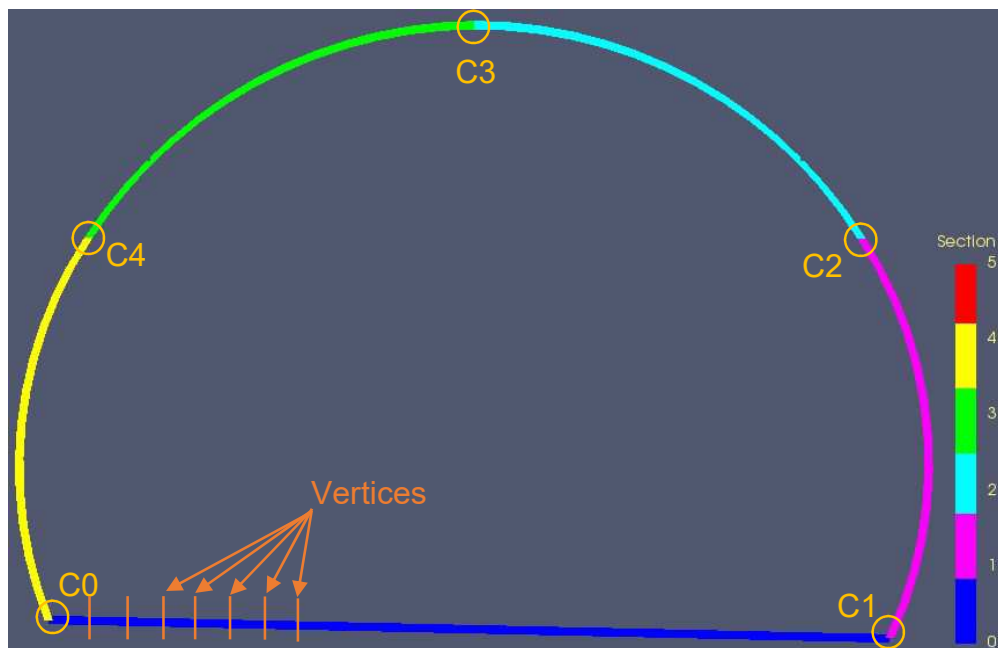


Obr. 8 - Schéma zjištění průměrných teplot na ostění

# Analýza kondenzace vodní páry v tunelu



Obr. 9. Rozdělení na úseky v hloubeném tunelu



Obr. 10. Rozdělení na úseky v raženém tunelu

### 6.3. Rozdělení na úseky

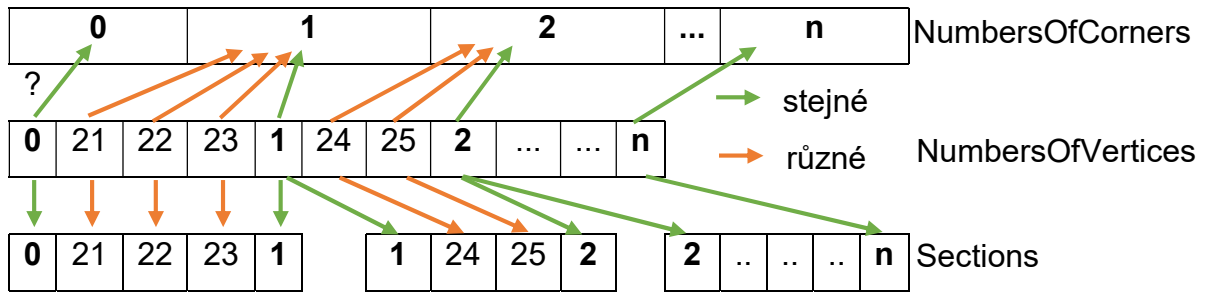
Když třída „AverageTemperature“ přijme pole dat, vytvoří z něj síť. Nyní je možné zužitkovat dříve vytvořené seznamy. Rozdělení na úseky probíhá pouze na základě lokálních čísel, která byla uložena do seznamů „NumbersOfVertices“ a „NumbersOfCorners“, nikoliv na základě souřadnic.

Pro zajištění správného chodu programu je nutné, aby první bod v „NumbersOfVertices“ byl současně také prvním bodem v „NumbersOfCorners“. Jinak vše skončí chybovou hláškou. Toto uspořádání je nutné, protože některé další funkce pracují na principu uspořádaného seznamu.

Jak sám název napovídá, „NumbersOfCorners“ je seznam bodů určujících geometrii tunelu. V hloubeném tunelu jsou to uzly, které oddělují jednotlivé přímé úseky ostění. Na Obr. 9 jsou tyto úseky barevně odlišeny. V tunelu raženém byla geometrie převzata z výkresů pomocí křivky. Zde jsou to body ohraničující spodní linii a body na okrajích křivek (viz Obr. 10).

Funkce „Section“ projde postupně všechna lokální čísla uzlů na ostění a porovná je s lokálními čísly ohraničujících bodů. Pokud nejsou stejná, jsou zapsána do seznamu. Ve chvíli, kdy stejná jsou, je seznam uzavřen a vytvořen další, kde opět dochází k zápisu lokálních čísel (viz Obr. 11).

```
def SectionList(self):
    FinalList = []
    List=[]
    if self.NumbersOfCorners[0]==self.NumbersOfVertices[0]:
        loop = 1
        for Vertex in self.NumbersOfVertices:
            if Vertex != self.NumbersOfCorners[loop]:
                List.append(Vertex)
            else:
                List.append(Vertex)
                FinalList.append(List)
                List = [Vertex]
                loop = loop + 1
    else:
        sys.exit("First point is not corner.")
    return FinalList
```



Obr. 11. Princip funkce Section

#### 6.4. Zjištění dělení

Teploty ostění jsou průměrovány na určité délce. Jak již bylo napsáno, uživatel si přibližnou délku v metrech může zvolit. Výchozí hodnota je nastavena na jeden metr. Pokud uživateli tato míra vyhovuje, může ignorovat tento parametr a vůbec ho nezadávat.

Jednoduchou úvahou dojdeme k závěru, že takto zvolené dělení by jen velice nepravděpodobně končilo přesně v rozích ostění. Pro vykreslení je ovšem vhodné, aby tomu tak bylo. To dalo vzniknout funkci, se jménem „Division“ v třídě „AverageTemperature“.

Její úkolem je vypočítat, jaké je nejvhodnější dělení beze zbytku a současně s tím i nejbližší požadovanému dělení. Nejvhodnějším je myšleno takové, které začíná v počátečním uzlu úseku a končí přesně jeho posledním uzlem, viz na Obr. 9 průměrovací délky úseku. Vstupním parametrem tedy je, pro jaký úsek má funkce zjistit délku.

V tomto kroku do výpočtu poprvé vstupuje získaná síť a je využito příkazů platformy MuPIF pro získání souřadnic bodů. Funkce postupně prochází uzly ve zvoleném úseku, které máme seřazené díky předchozí funkci „Section“.

Jsou zjištěny souřadnice pro každý uzel a uzel jemu následující a vypočítána vzdálenost mezi nimi (21). Tyto vzdálenosti se sčítají až do konce celého úseku (22).

$$length = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (21)$$

$$TotalLength = TotalLength + length \quad (22)$$



Takto je vypočítána celková délka úseku. Ta je vydělena navrženým dělením *estimationDivision* a je zjištěn počet průměrovacích délek (23). V této fázi není obvykle počet délek celé číslo, proto je celočíselně zaokrouhleno. Nyní stačí vzít zaokrouhlený počet a vydělit celkovou délkou. Tím je získána průměrovací délka  $d$  (24) na daném úseku.

$$n = \text{round}\left(\frac{\text{TotalLength}}{\text{estimationDivision}}\right) \quad (23)$$

$$d = \frac{\text{TotalLength}}{n} \quad (24)$$

### 6.5. Průměrování teplot na délce $d$ pro jeden krok

Funkce „AverageTemperature2“ je implementována ve třídě „AverageTemperature“. Má za úkol průměrovat teploty na délce  $d$ , která byla zjištěna díky výše popsané funkci „Division“. Hodnoty délek jsou seřazeny tak, aby jejich pořadí v seznamu odpovídalo pořadí úseků.

Pro spuštění funkce je nutné zadat další vstupní parametr, a to je pole obsahující teploty uzlů. V celém procesu je toto zajištěno třídou „AverageTempMoreSteps“.

Ze začátku je postupováno podobně jako v „Division“. Postupně jsou cyklem procházeny všechny úseky. Opět jsou pomocí funkce „getCoordinates“ z programu MuPIF získány souřadnice uzlu a jemu následujícímu také, zjištěna vzdálenost mezi nimi (21) a vzdálenosti jsou sčítány (22) do chvíle, než je překročena hodnota průměrovací délky. Pokud překročena není, je spočítána plocha lichoběžníku tvořeného vzdáleností mezi body a teplotami bodů (25) a přičtena k celkové ploše podobně jako v rovnici (22) s tím rozdílem, že nyní vzniká *TotalArea*.

$$\text{Area} = \frac{\text{temperature1} + \text{temperature2}}{2} \cdot \text{length} \quad (25)$$

V případě, že celková délka překročí délku průměrovací, je dopočítána zbývající část od posledního vyhovujícího uzlu ke konci průměrovací délky (26) a lineárně interpolována teplota v novém bodě na konci  $\text{length}_{\text{final}}$ .

$$\text{length}_{\text{final}} = \text{length} + \text{division} - \text{TotalLength} \quad (26)$$

Z  $length_{final}$ , teploty posledního vyhovujícího uzlu a teploty interpolované je spočítána poslední plocha. Po jejím přičtení je získána průměrná teplota (27), zařazena do seznamu a proměnné  $TotalArea$  a  $TotalLength$  jsou vynulovány.

$$AverageTemperature = TotalArea/TotalLength \quad (27)$$

Nakonec nesmí být zapomenuto na zbývající část rozdělené vzdálenosti. Opět je zjištěna její délka  $length_{initial}$  (28), a ta je zapsána jako první do  $TotalLength$ . Teplota je již známá z předchozí interpolace. Je dopočítána plocha a je první z přičítaných v dalším úseku do  $TotalArea$ .

$$length_{initial} = length - length_{final} \quad (28)$$

Výsledkem je dvouvrstvý seznam v uspořádání [úsek[průměrná teplota]].

```
def AverageTemperature2(self,field):
    self.f = field
    self.AMesh = field.getMesh()
    self.AllSectionAvTemp = []
    for section in self.SectionList():
        d = self.Division(section)
        TotalLength = 0
        TotalArea = 0
        AverageTemp = []
        for i in range(len(section)-1):
            i1 = i
            st = section[i1]
            i2 = i+1
            nd = section[i2]

            v1 = self.AMesh.getVertex(st)
            x1 = v1.getCoordinates()[0]
            y1 = v1.getCoordinates()[1]
            temp1 = self.f.evaluate(v1.getCoordinates())

            v2 = self.AMesh.getVertex(nd)
            x2 = v2.getCoordinates()[0]
            y2 = v2.getCoordinates()[1]
            temp2 = self.f.evaluate(v2.getCoordinates())

            length = ((x2-x1)**2+(y2-y1)**2)**(0.5)

            TotalLength = TotalLength + length
```

## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu

```
#rozhodnuti zda je bod za nebo pred
    if TotalLength<d:
        area = (((float(temp1[0]))+(float(temp2[0])))/2)*(length)
        TotalArea = TotalArea + area
        if i == (len(section)-2):
            AverageTemp.append(TotalArea/TotalLength)
        else:
            pass
    else:
        length_final = length + d - TotalLength
        temp3 = float(temp1[0])+float(temp2[0])-float(temp1[0])*length_final/length
        area = (float(temp1[0])+temp3)/2 * length_final
        TotalArea = TotalArea + area
TotalLength = TotalLength - length + length_final
#zapis do sporadaneho seznamu a nulovani usekovych hodnot
    AverageTemp.append(TotalArea/TotalLength)
    TotalArea = 0
    TotalLength = 0
    area = 0
#dopocet zbyvajici casti do dalsiho pocatecniho bodu
    length_initial = length - length_final
    area = (temp3+float(temp2[0]))/2 * length_initial
    TotalArea = TotalArea + area
    TotalLength = TotalLength + length_initial
    temp1 = 0
    temp2 = 0
    temp3 = 0
    self.AllSectionAvTemp.append(AverageTemp)
return self.AllSectionAvTemp
```

## 6.6. Výpočet pro více časových kroků

Třída „AverageTempMoreSteps“ díky cyklu přes časové kroky zajišťuje aktualizaci času, vyřešení úlohy pro daný čas v programu OOFEM a vytvoření pole s teplotami. Posléze je pro každý takový krok zavolána třída „AverageTemperature“ a jsou spočítány průměrné teploty na ostění tunelu. Přijaté hodnoty jsou uloženy do seznamu.

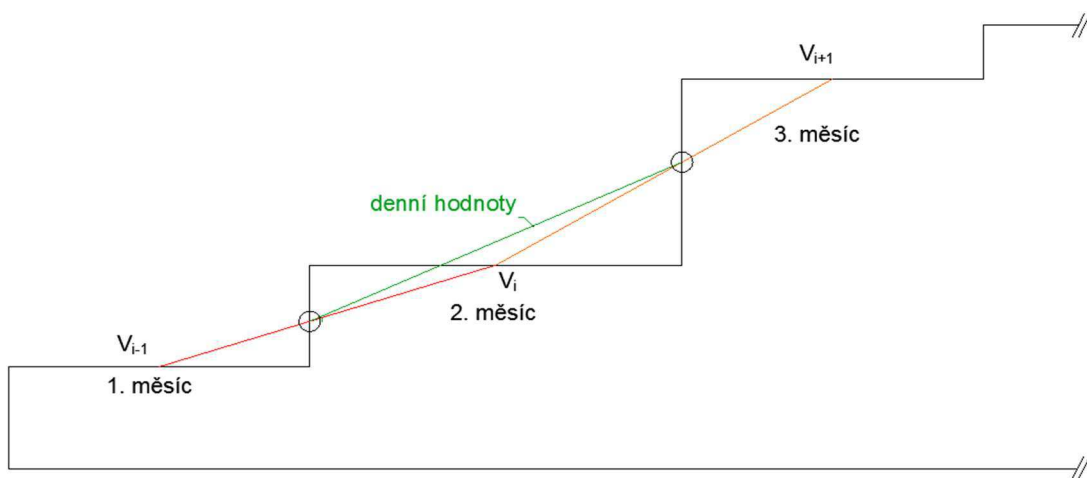
Po tomto procesu je nakonec výsledkem trojnásobný seznam. Bráno z vnější strany, první úroveň značí časový krok, druhá úroveň říká o jaký se jedná úsek a třetí už jsou samotné průměrné teploty. V úryvku z kódu níže uvedeném je volán program OOFEM k vyřešení v určitém čase.

```
def AverageTempMoreSteps(self,oofemLink):
    o = oofemLink
    time = 0.0
    dt = 86400.0
    listOfAverageTemp = []
    for i in range(365):
        time = i*dt
        ts = TimeStep.TimeStep(time,86400.0)
        o.solveStep(ts)
        o.finishStep(ts)
```

## 6.7. Kondenzace

Výpočet vstupuje do finální části ve třídě, která nese název „Condensation“. Samotný model kondenzace je pak implementován ve funkci „Physics“.

Jak je uvedeno na schématu (Obr. 6, str. 20) - Princip výpočtu kondenzace v příčném řezu, mezi vstupní data jsou zařazeny také průměrné měsíční teploty a relativní vlhkosti, oboje na vstupu do tunelu i výstupu z něj. Výpočet je ovšem proveden s časovým krokem jeden den a tak je potřeba měsíční hodnoty přepočítat na denní. Dané teploty jsou získány z měsíčních dat vhodnou interpolací. Ta přispívá ke stabilizaci výpočtu a také poskytuje realističtější výsledky, než kdyby byly teploty po měsících skokově měněny. Schéma slouží pouze k ilustraci použitého principu (Obr. 12). K tak velkému skoku mezi hodnotami nedochází. Rozdíly hodnot mezi jednotlivými měsíci nejsou tak velké a jsou rozděleny mezi dostatečný počet dní. Funkce, sloužící tomuto účelu je nazvána „MonthsToDays“. Je univerzální v tom, že jejím vstupním parametrem mohou být jakékoliv průměrné měsíční hodnoty. Průměrná hodnota je uvažována právě uprostřed měsíce. Pomocí spojnice mezi teplotou měsíce, který je interpolován a předcházejícím je zjištěna teplota na jeho začátku. Obdobně je získána i hodnota na konci měsíce, tentokrát díky průměrné teplotě následujícího měsíce. Rozdíl těchto hodnot je rovnoměrně rozdělen počtem dní v měsíci. K teplotě na začátku měsíce je vždy přičten jeden dílek vynásobený odpovídajícím počtem dní. Na přelomu roku je spojnice tvořena mezi lednem a prosincem.



Obr. 12. Schéma převodu měsíčních hodnot na denní

Je potřeba postupně projít trojnásobný seznam, který byl vytvořen funkcí „AverageTempMoreSteps“ a ve kterém jsou průměrné hodnoty teplot na ostění. Pro každou z těchto hodnot je určeno, zda ke kondenzaci dochází či ne. Přístup k nim je zajištěn pomocí série cyklů.

První cyklus je přes všechny časové kroky. Současně s tím jsou díky funkci „MonthsToDays“ určeny hodnoty pro tento den, jimiž jsou:

- relativní vlhkost na vstupu do tunelu,
- teplota na výstupu z tunelu,
- relativní vlhkost na výstupu z tunelu.

Druhý vnořený cyklus prochází postupně všechny úseky a třetí již konkrétní teploty. Nejdříve jsou stanoveny hodnoty na vstupu do tunelu a poté na výstupu. Jedná se o:

- tlak syté páry (14),
- tlak vodní páry (16),
- koncentraci vodní páry při nasycení (15),
- aktuální koncentraci vodní páry (18),

Poté je spočítána teplota rosného bodu (17). Pokud je teplota na vstupu či výstupu z tunelu nižší než teplota rosného bodu, je množství zkondenzované vody určeno rozdílem vstupní a výstupní koncentrace vody ve vzduchu. Výsledkem je informace, kolik gramů vody zkondenzuje z metru krychlového vzduchu.

## 6.8. Vykreslení výsledků pomocí modulu VTK

Pro vizualizaci výsledků je použit program ParaView [7]. Program umožňuje vizualizovat výsledky na definované síti. Pro jeho využití je třeba sít i výsledky zapsat ve formátu VTK [8].

Funkce, která zajišťuje zapsání dat do modulu VTK, se jmenuje „data2VTK“. Protože je kondenzace spočítána z teplot, které byly průměrovány na přizpůsobených délkách, bylo rozhodnuto, že pro vykreslení nebudou použity stávající informace o uzlech. Místo toho budou vytvořeny uzly nové, a to na okrajích těchto délek.

Funkce „getNewPoints“ vytváří nové uzly. Začátek je stejný jako u funkce „AverageTemperature2“ ve třídě „AverageTemperature“. Nyní je ovšem při překročení délky pro průměrování vytvořen nový bod. Při překročení je dopočítána zbývající délka (26) a zjištěny souřadnice na konci této délky (29).

$$x_N(y_N) = x_1(y_1) \cdot \frac{(x_2(y_2) - x_1(y_1)) \cdot length_{final}}{length} \quad (29)$$

Souřadnice jsou uloženy do seznamu a opět je zjištěna zbývající délka do prvního nevyhovujícího bodu, se kterou se začíná počítat nová *TotalLength*.

Když jsou hotovy nové uzly, je potřeba seřadit data kondenzace do jednoho seznamu pro každý časový krok, a to kvůli zápisu do VTK. Původně má seznam tři úrovně a je nutné z něj udělat seznam jednoúrovňový. K tomu byla vytvořena funkce „get\_Cell\_Data“. Vstupním parametrem je pořadové číslo časového kroku. Ten pak funkce projde přes všechny úseky a hodnoty kondenzace uloží do seznamu.

Vstupní soubor pro program ParaView je textový, s příponou .vtk [8]. Je napsán v ASCII formátu. Funkce otevře nový soubor s odpovídajícím pořadovým číslem časového kroku a do něj jsou pomocí ASCII zapsány v řádném pořadí následující informace. Kromě verze VTK, jména, typ datasetu (v tomto případě je to typ Polydata) jsou to také souřadnice bodů a čísla bodů, kterými je tvořena buňka. V programu je použita buňka typu Line. Pro zápis souřadnic jsou napsány krátké for cykly na jeden řádek.

```

def data2VTK(self):
    self.mesh=self.o.getMesh(0)
    self.getNewPoints()
    for step in range(len(self.Physics())):
        file = open("HloubenyTunel0.%d.vtk" % (float(step)+1), "w")
        # Write the header
        file.write("# vtk DataFile Version 2.0\n")
        file.write("HloubenyTunel\n")
        file.write("ASCII\n")
        file.write("DATASET POLYDATA\n")
        # Write the points
        file.write("POINTS %d float\n" % (len(self.NewPointsCoord)))
        for node in range(len(self.NewPointsCoord)): file.write("%g %g %g\n" %
(self.NewPointsCoord[node]))
        # Write the lines
        file.write("LINES %d %d\n" % (len(self.NewPointsCoord)-1,(len(self.NewPointsCoord)-1)*3))
        for line in range(len(self.NewPointsCoord)-1):file.write("2 %d %d\n" % (line,line+1))
        file.write("CELL_DATA %d\n" % (len(self.NewPointsCoord)-1))
        file.write("SCALARS Condensation float 1\n")
        file.write("LOOKUP_TABLE default\n")
        CellData=self.get_Cell_Data(step)
        for cellID in range(len(CellData)):file.write("%g\n" %(CellData[cellID]))

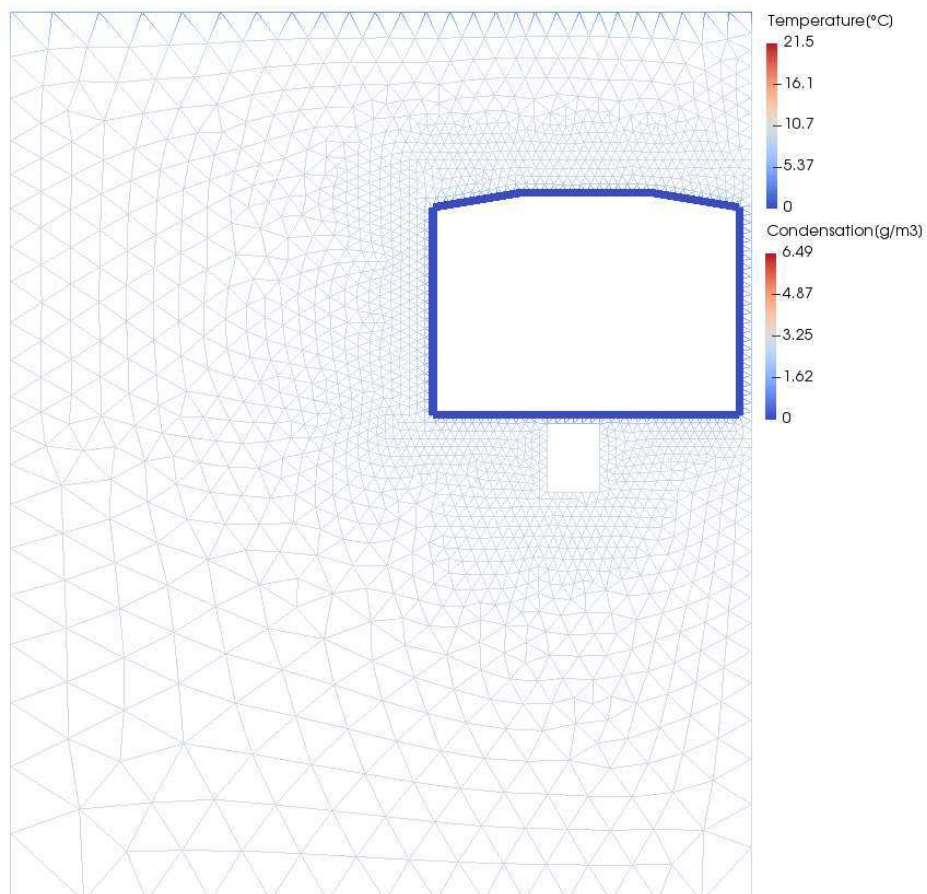
```

Vytvořené soubory je možné otevřít v programu ParaView. Je vytvořen pouze obrys tunelu a vykreslena kondenzace. Nulová kondenzace je v základním nastavení vyobrazena modrou barvou. V případě kondenzace se podle jejích hodnot postupně mění až do červené barvy. Pro lepší vyjádření souvislosti mezi průběhem teplot na ostění a výskytem kondenzace je možné v ParaView současně přes sebe překrýt vykreslení průběhu teplot a kondenzace.

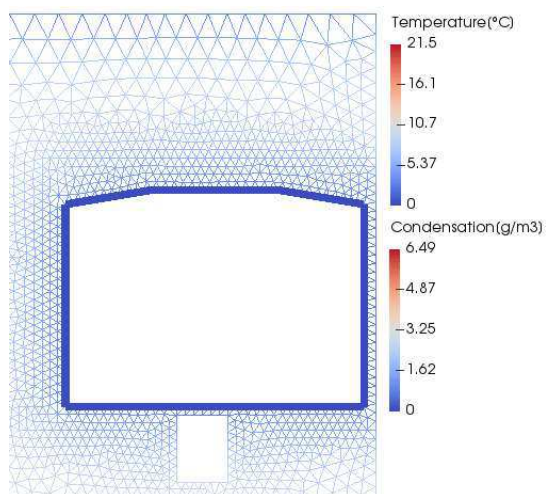


### 6.8.1. Výsledky pro hloubený tunel

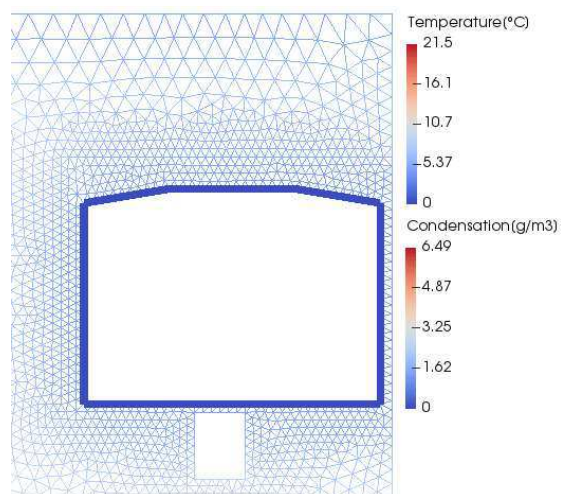
Na následujících obrázcích je zobrazen průběh teplot a kondenzací v jednotlivých měsících v hloubeném tunelu. Vztahuje se vždy k prvnímu dni v měsíci, který je uveden v popisce. Bylo zaznamenáno, že kondenzace začíná na konci června a nejvyšších hodnot dosahuje na přelomu července a srpna.



**Obr. 13. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu – Leden**

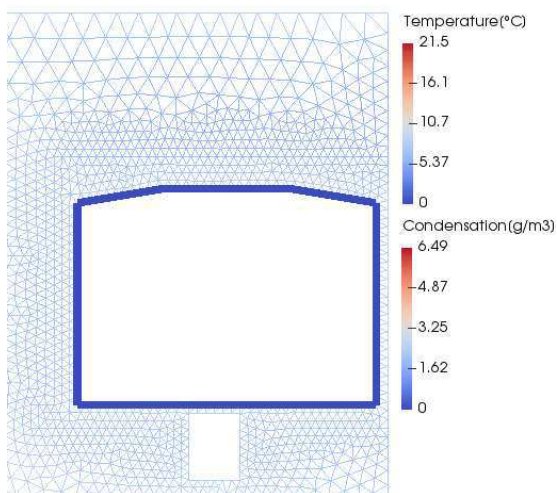


**Obr. 14. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Únor**

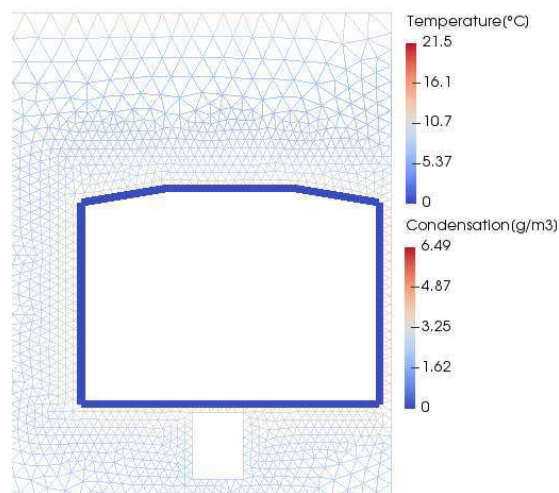


**Obr. 15. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Březen**

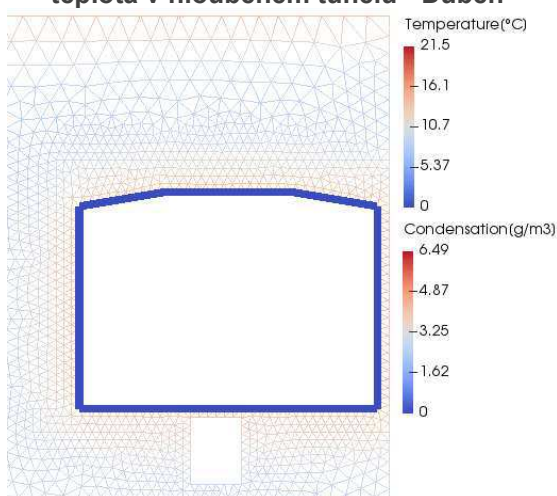
## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu



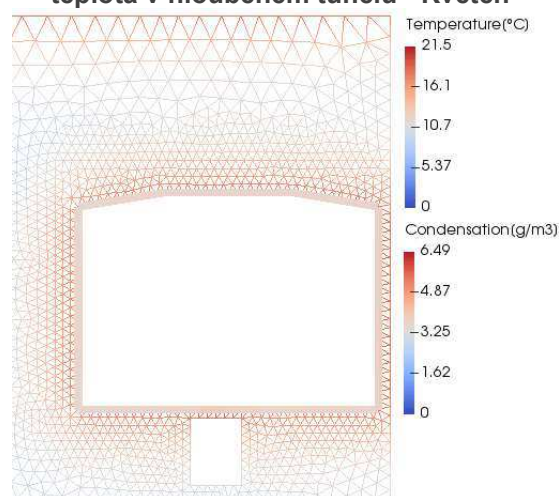
Obr. 16. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Duben



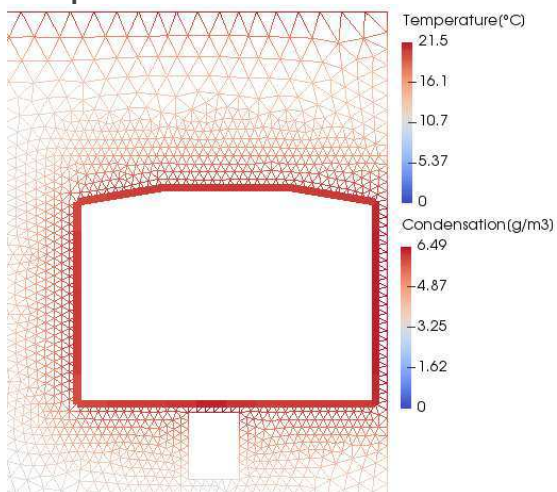
Obr. 17. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Květen



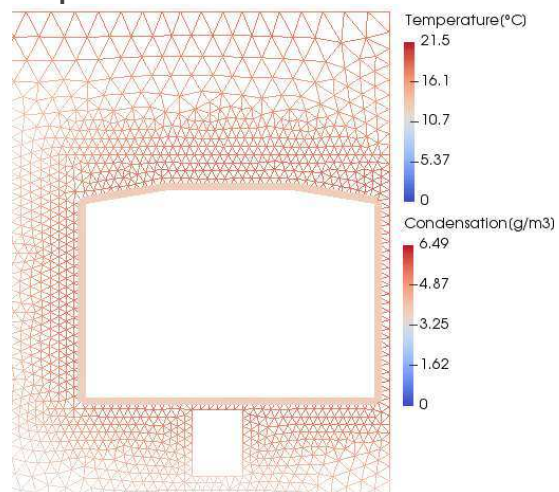
Obr. 18. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Červen



Obr. 19. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Červenec

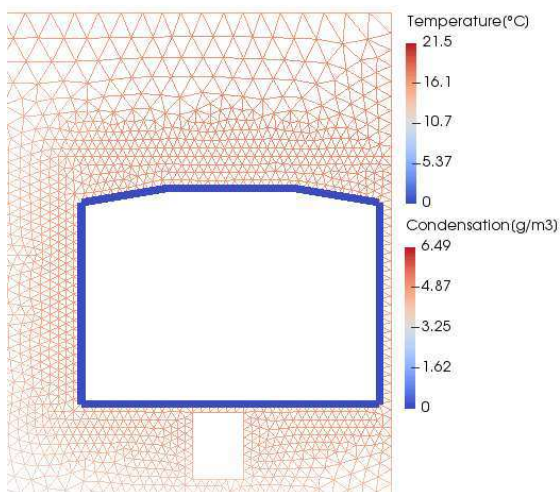


Obr. 20. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Srpen

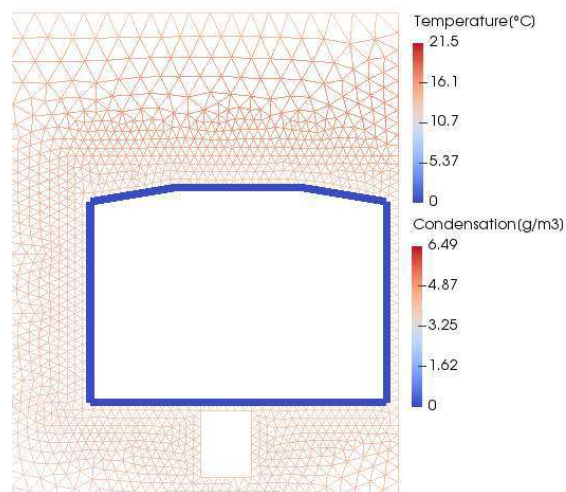


Obr. 21. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Září

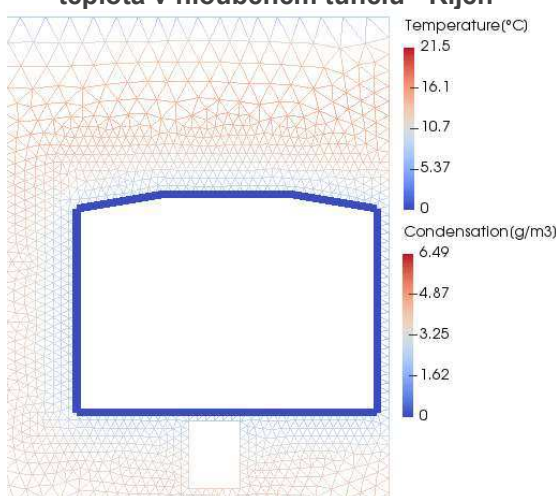
## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu



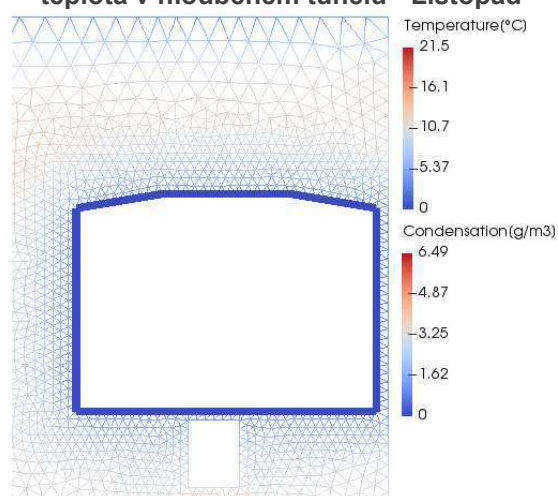
Obr. 22. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Říjen



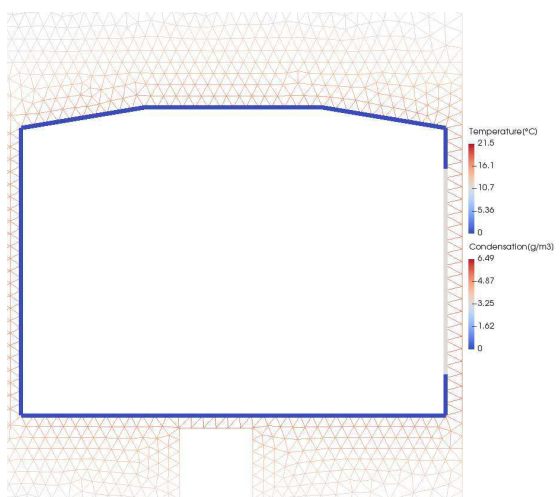
Obr. 23. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Listopad



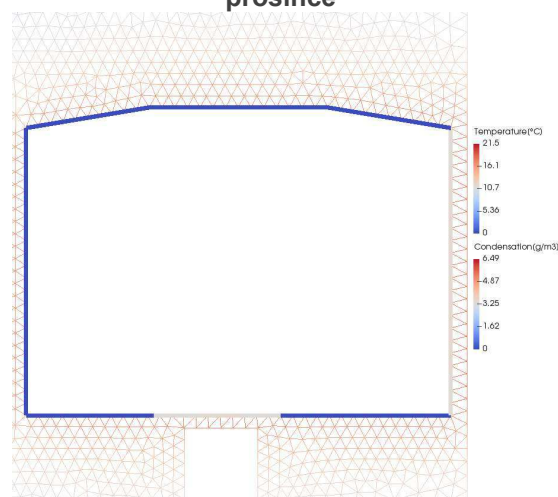
Obr. 24. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu - Prosinec



Obr. 25. Hmotnost kondenzované vody a teplota v hloubeném tunelu – Konec prosince



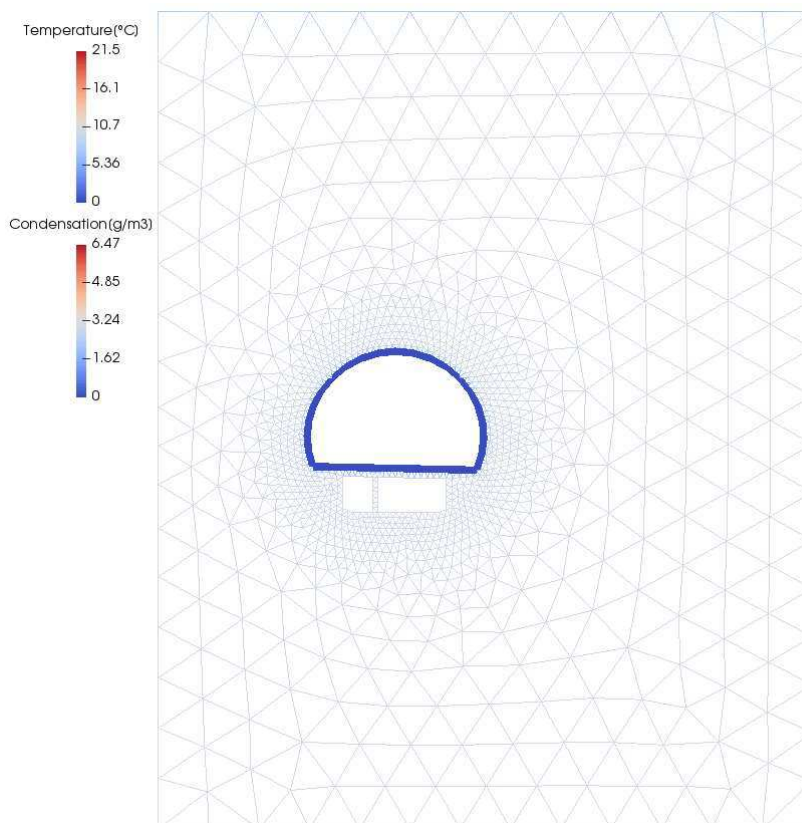
Obr. 26. Začátek kondenzace – Konec června (den 176)



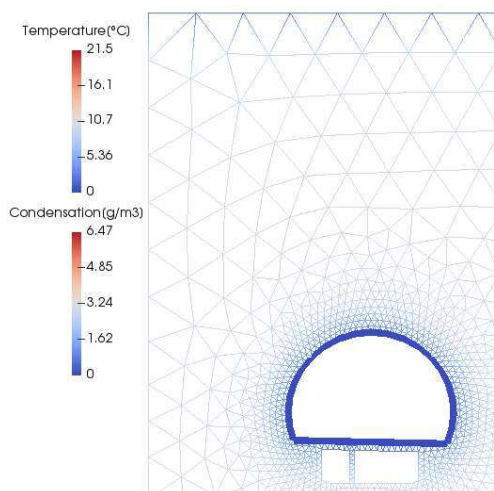
Obr. 27. Začátek kondenzace – Konec června (den 177)

### 6.8.2. Výsledky pro ražený tunel

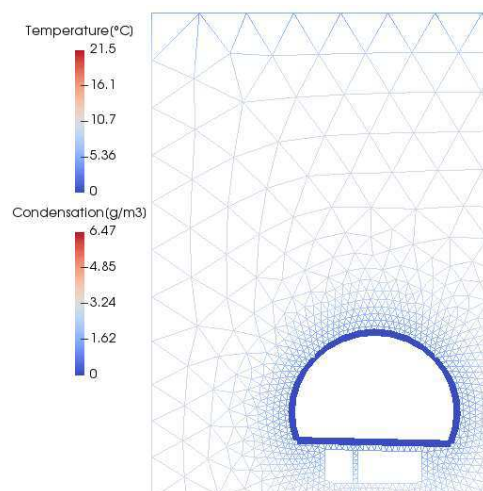
Kondenzace v raženém tunelu je oproti kondenzaci v hloubeném o jeden den zpožděná. Začíná též na konci června, ale 177 den. Rozdílem je, že v raženém tunelu jsou tubusy sobě navzájem více vzdálené. V obou případech nastává kondenzace 177 den na povrchu vozovky, pod níž se vyskytují technické chodby.



Obr. 28. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu – Leden

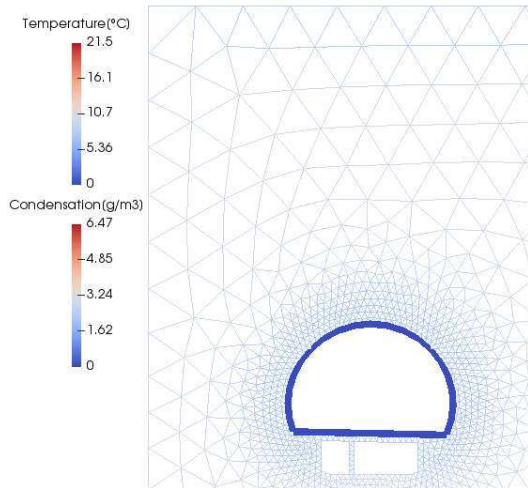


Obr. 29. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Únor

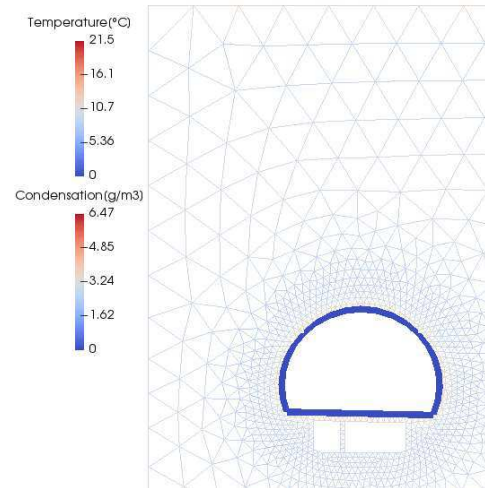


Obr. 30. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Březen

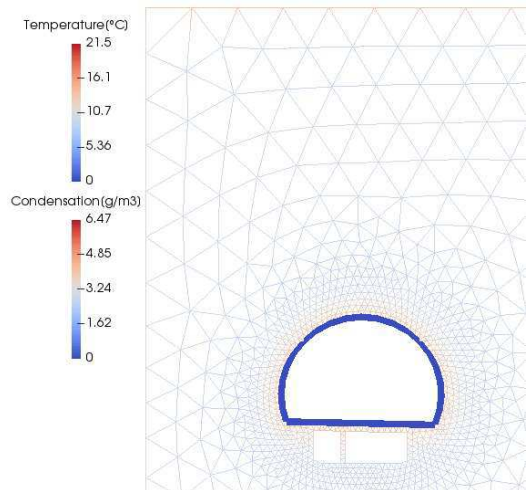
## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu



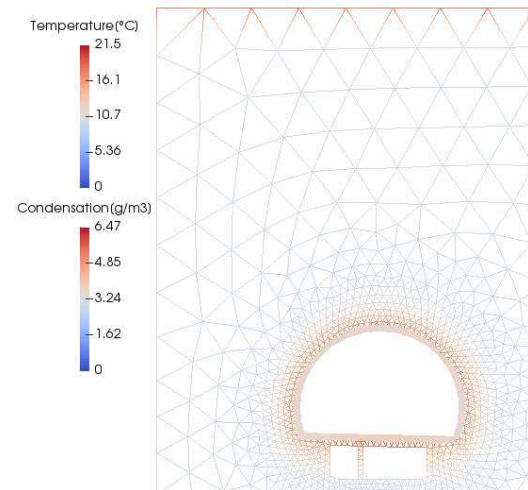
Obr. 31. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Duben



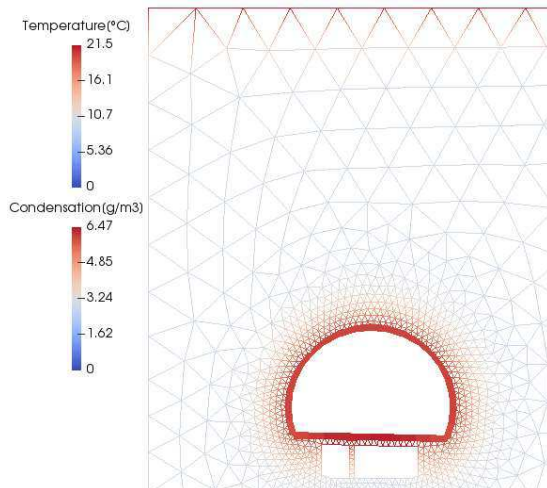
Obr. 32. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Květen



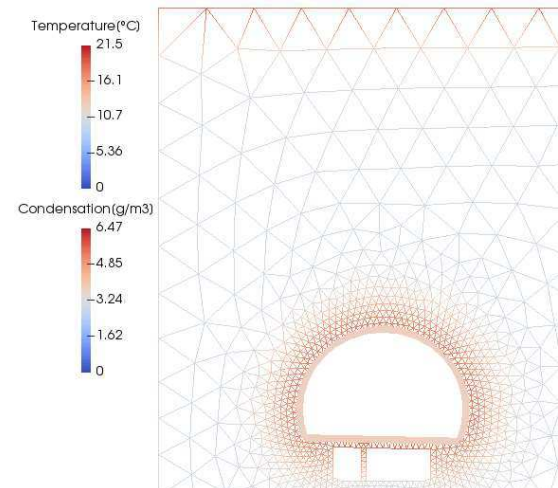
Obr. 33. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Červen



Obr. 34. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Červenec

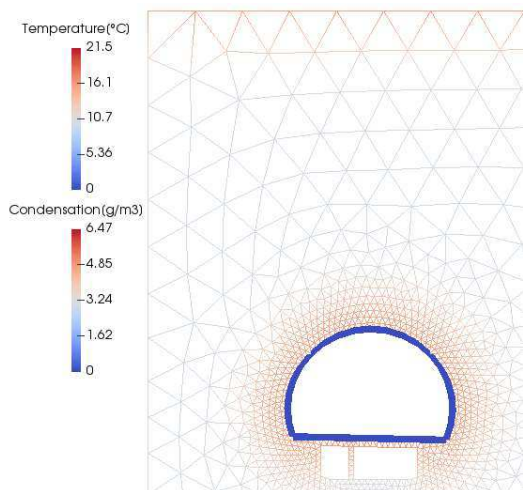


Obr. 35. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Srpen

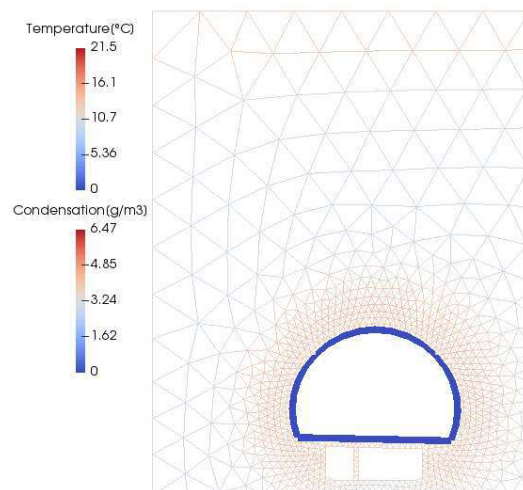


Obr. 36. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Září

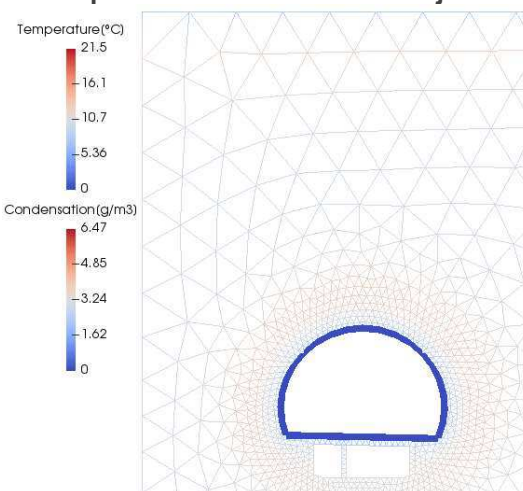
## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu



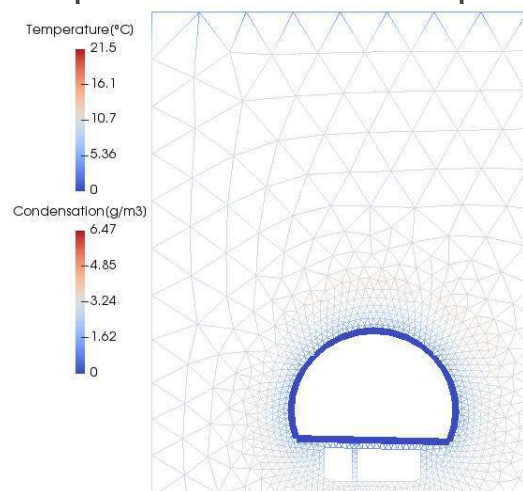
Obr. 37. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Říjen



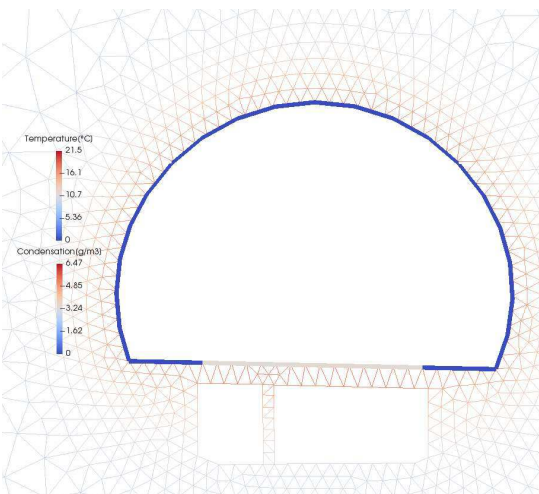
Obr. 38. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Listopad



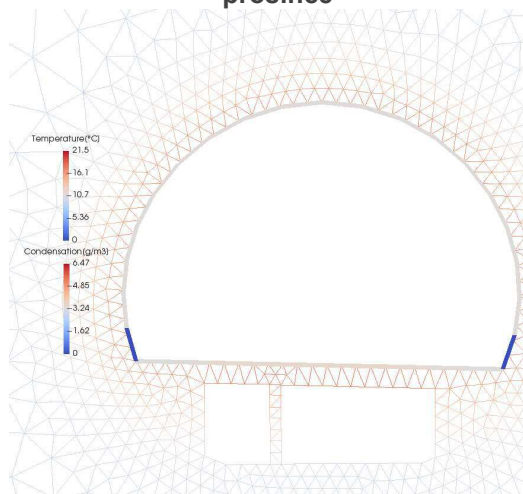
Obr. 39. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu - Prosinec



Obr. 40. Hmotnost kondenzované vody a teplota v raženém tunelu – Konec prosince



Obr. 41. Začátek kondenzace – den 177



Obr. 42. Začátek kondenzace – den 178

## D) Rozšíření modelu v podélném směru

---

Model příčného řezu umožňoval stanovit celkovou charakteristiku pro uvažovaný reprezentativní úsek charakterizovaný příčným řezem. Cílem modelu uvedeného v této kapitole je rozšíření o podélný směr.

Principem modelu je rozdělení tubusu na menší úseky. Základním předpokladem je uvažování konstantních vlastností v rámci každého úseku, který je charakterizován příčným řezem uprostřed úseku. V řešení podélného směru je uvažováno, že vzduch se ochladí o ostění natolik, že není schopen nést stejné množství vodní páry, které měl teplejší vzduch na začátku tunelu, a ta částečně zkondenzuje.

### 1. Zavedení předpokladů

V rámci zjednodušeného modelu kondenzace v podélném směru byly zavedeny níže popsané předpoklady. Je třeba zdůraznit, že se jedná o koncept řešení, který je možné dále rozvíjet.

#### a) *Provoz na komunikaci*

Při skutečném provozu tunelu by docházelo k ohřívání vzduchu výskytem jedoucích vozidel. Jejich provoz by také zvyšoval vlhkost vzduchu. Žádný vnitřní zdroj ale není uvažován.

#### b) *Proudění vzduchu*

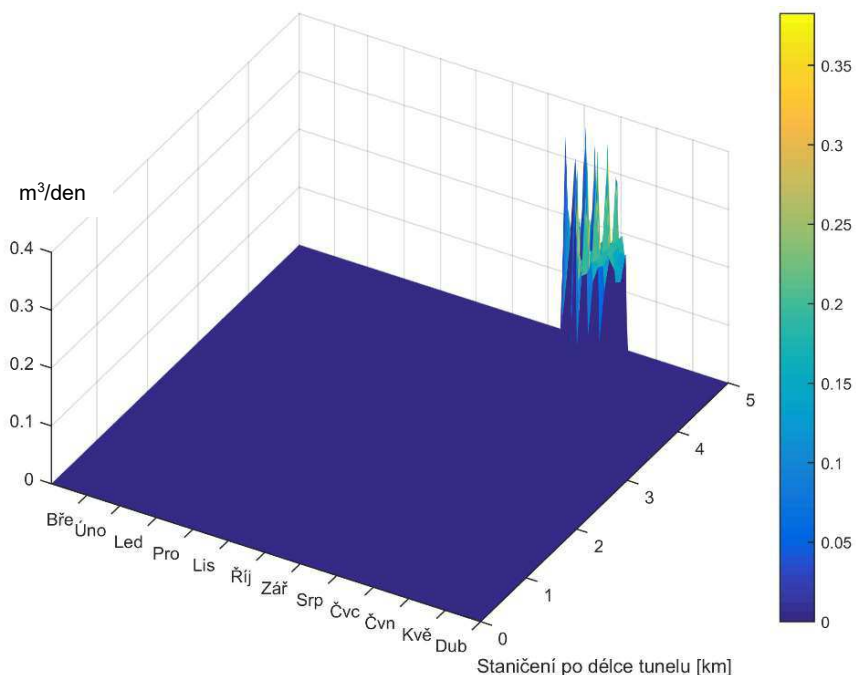
V práci není řešeno proudění vzduchu. Pokud by byla uvažována přítomnost vozidel, vzduch by byl promícháván. Ta ovšem, jak už bylo popsáno, uvažována není. V práci se předpokládá laminární proudění. Dále je předpokládáno, že oteplení/ochlazení vzduchu kontaktem s ostěním a případná kondenzace se projeví na jistém objemu vzduchu v okolí ostění, jinak by bylo nutno provádět i analýzu v příčném řezu uvnitř tunelu.

Nabízí se otázka, jak toto zohlednit ve výpočtu. Po několika úvahách, mezi kterými bylo například omezení množství tepla přecházejícího z ostění do vzduchu nebo zmenšení plochy průřezu, byla zvolena následující možnost:

Vzduch je ohříván/ochlazován okolo ostění. Jeho teplota na konci každého úseku je teplotou vstupní v úseku následujícím. Ta je také novou okrajovou podmínkou. K omezení dochází ve chvíli výpočtu množství zkondenzované vody.

Je používána absolutní vlhkost. Z celkového množství vodní páry, které by mělo zkondenzovat, zkondenzuje pouze část a zbylá pára je předána do dalšího úseku.

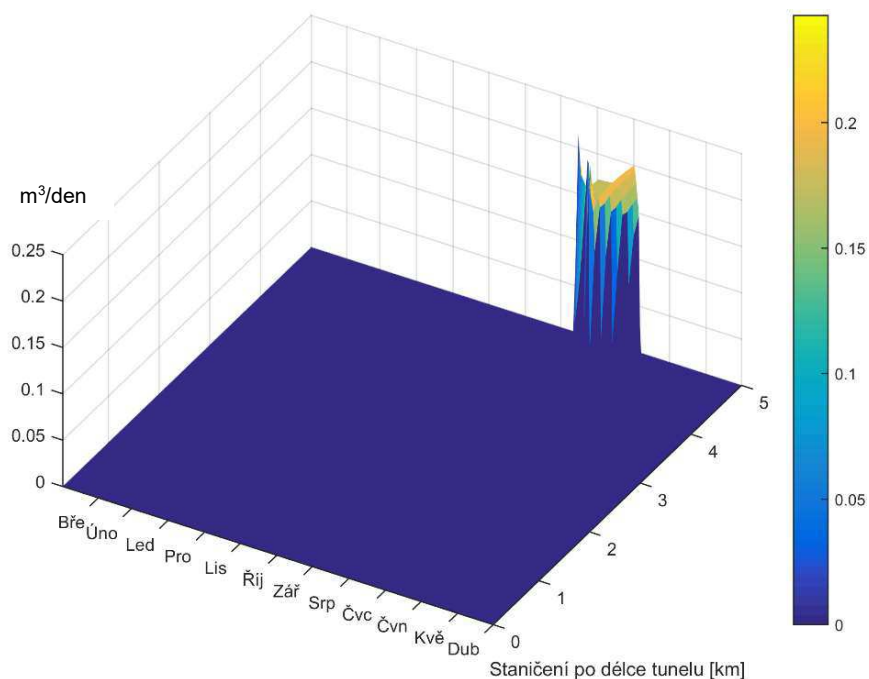
Jak velká má být tato část, by bylo potřeba vyšetřit dalším výzkumem. V této práci bylo v prvních analýzách uvažováno 80% z množství vodní páry, které mělo zkondenzovat. Absolutní vlhkost, která postupovala dál, byla tedy vlhkost, která zbyla v tunelu po kondenzaci a navíc zbylých 20% (39). Pak ale průběh kondenzace nebyl plynulý, viz Obr. 43. V jednom úseku ke kondenzaci docházelo, v druhém ne a v třetím opět ano. To se v některých případech opakovalo až do konce vyšetřovaného tunelu. Bylo to způsobeno tím, že kondenzační teplo vzduch ohřálo natolik, že teplota vzduchu byla vyšší než teplota rosného bodu. V dalším úseku tedy ke kondenzaci nedošlo. V následujícím opět teplota klesla pod teplotu rosného bodu. Protože součinitel nebyl nijak odborně stanoven, bylo možné jej upravit s ohledem na průběh kondenzace. Jeho alternativní hodnota byla zvolena na 50%. Vykreslení průběhu hodnot bylo potom hladší, viz Obr. 44. Výkyvy jsou stále patrné, ale nyní pouze v místech, kde kondenzace začíná. Jsou to tedy počáteční úseky a také dny, kdy kondenzace začíná nebo končí. Teplota v těchto místech je jen o něco menší než teplota rosného bodu, takže není problém ji kondenzačním teplem zvýšit natolik, aby ke kondenzaci nedocházelo.



Obr. 43. Graf s 80% zkondenzované vodní páry, úsek délky 100m, rychlost proudění 1m/s



## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu



Obr. 44. Graf s 50% zkondenzované vodní páry, úsek délky 100m, rychlost proudění 1m/s

### c) Výška nadloží

Výška nadloží je uvažována po celém vyšetřovaném tunelu stejná. Protože byla analýza provedena pro ražený tunel, je výška nadloží dvacet metrů.

### d) Fluktuaace teploty

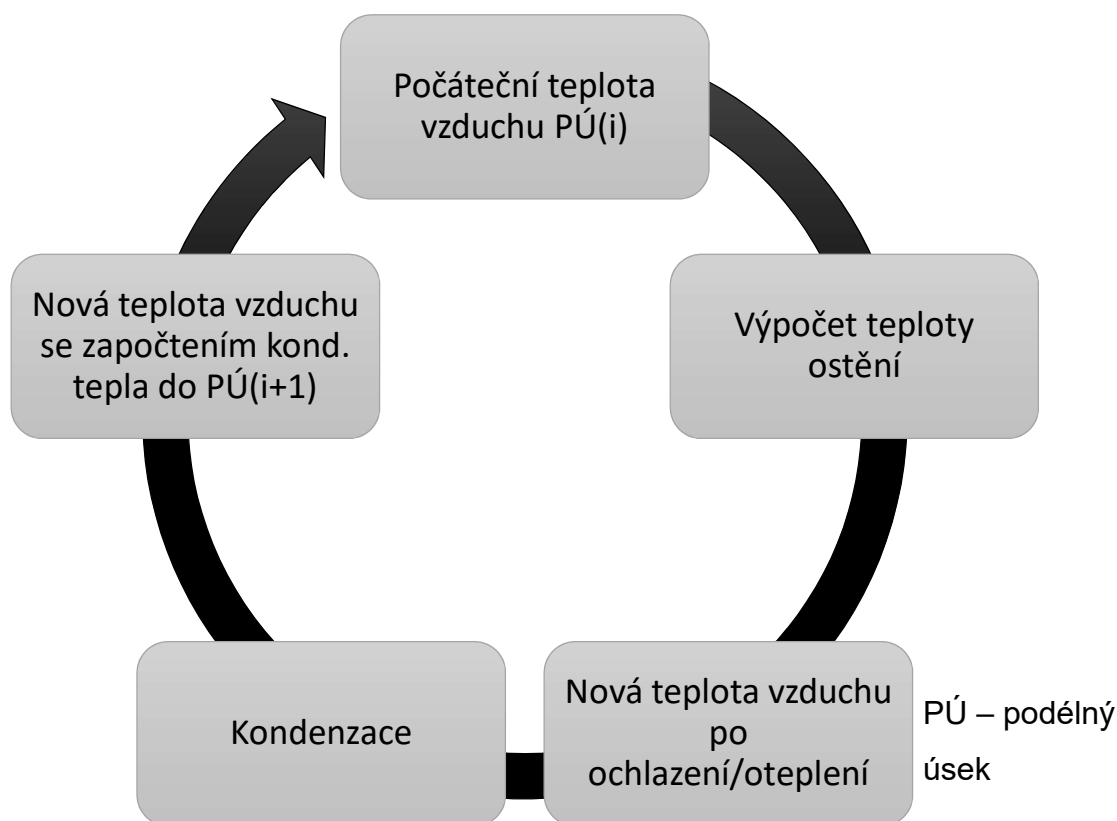
Při výpočtu není uvažována fluktuaace teploty během dne a noci.

### e) Délka tunelu

Kvůli pomalu klesající teplotě a nemožnosti demonstrace řešení, musel být vyšetřovaný tunel prodloužen na délku 5 km, jež neodpovídá žádnému z ražených úseků komplexu Blanka.

## 2. Princip výpočtu

Vstupní soubory byly použity prakticky stejné, jako v analýze v charakteristickém řezu, jen byla provedena úprava umožňující měnit teplotu vzduchu v tunelu v závislosti na ohřívání/ochlazování a kondenzaci v předchozích úsecích podélného směru. Teplota vnějšího prostředí vstupuje jako okrajová podmínka do prvního vstupního souboru programu OOFEM. Ten spočítá teplotu ostění. Pomocí nově vzniklého programu je zjištěna výstupní teplota vzduchu na konci úseku, ochlazená nebo ohřátá o ostění. Je rozhodnuto, zda v oblasti dochází ke kondenzaci. Pokud ano, je zjištěno kondenzační teplo, které vzduch ohřeje, a výstupní teplota vzduchu je aktualizována. Ta vstupuje jako okrajová podmínka do dalšího úseku, viz schéma (Obr. 45).



Obr. 45. Princip výpočtu kondenzace v podélném směru

### 3. Okrajové a počáteční podmínky

Zatímco v analýze příčného řezu je teplota vzduchu daná, v řešení podélném je uvažována změna teploty vzduchu způsobená přestupem tepla z ostění. Pro přestup tepla je uvažován stejný příčný řez jako v předchozí analýze, vynásobený délkou úseku. Teplota vzduchu v tunelu v daném příčném řezu, která vstupuje do okrajové podmínky přestupu tepla, je ovlivněna chováním předchozích úseků, kde dochází k postupnému ohřívání/ochlazování vzduchu a případné kondenzaci. Stejně tak je ovlivněna vstupní vlhkost. Okrajová podmínka je tedy v každém úseku jiná.

Počáteční teplota byla uvažována konstantních  $10,57^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.1. Výpočet změněné teploty

Množství tepla, které projde rozhraním mezi tekutinou a pevnou látkou, je počítáno pomocí následujících rovnic. [9]

Hustota tepelného toku:

$$\bar{q} = \alpha \cdot (T - T^0). \quad (30)$$

Množství tepla pomocí hustoty tepelného toku:

$$Q = \bar{q} \cdot S \cdot \Delta t. \quad (31)$$

Po sloučení těchto rovnic:

$$Q = \alpha \cdot (T - T^0) \cdot S \cdot \Delta t. \quad (32)$$

Množství tepla pomocí měrné tepelné kapacity (za jednotku času):

$$Q = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1). \quad (33)$$

Teplota vzduchu po přijetí tepla Q:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{c \cdot m}. \quad (34)$$

Teplota vzduchu po přijetí tepla  $Q$  z rovnice (32):

$$T_2 = T_1 + \frac{\alpha \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot \Delta t}{c \cdot \rho \cdot V}, \quad (35)$$

kde:  $q$  = hustota tepelného toku [ $\text{Wm}^{-2}$ ]       $\rho$  = hustota [ $\text{kg m}^{-3}$ ]  
 $\alpha$  = součinitel přestupu tepla [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]       $S$  = teplosměnná plocha [ $\text{m}^2$ ]  
 $T$  = teplota ostění [K]       $T_0$  = teplota kapaliny [K]  
 $\Delta t$  = změna času [s]       $Q$  = teplo [J]  
 $m$  = hmotnost [kg]       $T_2$  = nová teplota vzduchu [K]  
 $T_1$  = původní teplota vzduchu [K]       $V$  = objem [ $\text{m}^3$ ]  
 $c$  = měrná tepelná kapacita [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

Uvažované hodnoty:       $\alpha = 25 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$  [10],  
 $c = 1\,007 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  [11],  
 $\rho = 1,20 \text{ kg m}^{-3}$  [11].

### 3.2. Výpočet kondenzačního tepla

Kondenzace je opačným dějem k vypařování [12]. Proto je skupenské kondenzační teplo stejně velké jako skupenské teplo vypařování pro tutéž teplotu. Skupenská tepla se nazývají latentními, protože je možné je získat zpět.

Skupenské kondenzační teplo:

$$L_v = l_v \cdot m, \quad (36)$$

kde:  $L_v$  = kondenzační teplo [J]  
 $l_v$  = měrné skupenské teplo [ $\text{J kg}^{-1}$ ]  
 $m$  = hmotnost zkondenzované vody [kg]

#### 4. Zjednodušený model kondenzace v podélném směru

Třída, pod kterou je analýza provedena, se jmenuje „LongitudinalDirection“. Samotná funkce má stejné jméno. Nezbytnými vstupy pro fungování celého procesu jsou:

- seznam vstupních souborů pro program OOFEM,
- seznam bodů na ostění,
- seznam uzlů ohraničující úseky v rámci příčného řezu,
- průměrné měsíční teploty vnějšího prostředí, seřazené od měsíce dubna,
- průměrné měsíční relativní vlhkosti vnějšího prostředí.

Dalšími vstupy, které mají v základním nastavení danou hodnotu, ale mohou být změněny, jsou:

- délka úseku v metrech v rámci podélného směru,
- plocha průřezu tunelu,
- rychlost proudění vzduchu v tunelu,
- délka, která bude základem pro průměrování teplot v rámci příčného řezu.

Funkce „LongitudinalDirection“ využívá cyklu přes všechny časové kroky, tentokrát o délce 12 hodin. Celkem je tedy uvažováno 730 kroků, aby byl analyzován celý rok. Na začátku je určena první vstupní teplota vzduchu. K tomu je využita funkce „MonthsToDays“, která byla více popsána na str. 29. Nyní jsou ale počty dnů v měsíci vynásobeny číslem dva, aby jejich počet odpovídal počtu časových kroků. Další cyklus realizuje smyčku přes dílčí podélné úseky. Zjištěná teplota je poslána do vstupního souboru jako okrajová podmínka. Jednou je nahrána jako teplota vnějšího prostředí a podruhé jako teplota vzduchu v tunelu. Poté je program OOFEM vyzván k vyřešení daného kroku.

```
ChangeTemp = liboofem.FloatArray(1)
ChangeTemp[0] = InAverageTempAir
self.first.oofem_mesh.giveLoad(1).setComponentArray(ChangeTemp)
self.first.oofem_mesh.giveLoad(2).setComponentArray(ChangeTemp)
time=i*dt;
ts = TimeStep.TimeStep(time, dt)
self.first.solveStep (ts)
self.first.finishStep (ts)
```

Z přijatých teplot je vytvořeno platformou MuPIF pole. Je zavolána funkce „getHeat“, která je popsána níže. Je vypočítána teplota na konci úseku, viz vztah (35). Opět pomocí funkce „MonthsToDays“ je zjištěna relativní vlhkost v daném časovém kroku. Jsou spočítány hodnoty na začátku tunelu:

- tlak syté páry (14),
- tlak vodní páry (16),
- maximální koncentrace vodní páry (15),
- skutečná koncentrace vodní páry (18),
- teplota rosného bodu (17).

Zde dochází k rozhodnutí, zda je teplota vzduchu menší než teplota rosného bodu a zda dochází ke kondenzaci.

Pokud ke kondenzaci dochází, jsou spočítány hodnoty s teplotou na konci úseku:

- tlak syté páry (14),
- maximální koncentrace vodní páry (15).

Maximální koncentrace vodní páry je současně uvažována jako skutečná koncentrace vodní páry  $m$  a z ní je určen tlak vodní páry vztahem:

$$p = \frac{m \cdot (T + 273,16)}{0,002166}, \quad (37)$$

kde:  $T$  = teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $p$  = aktuální parciální tlak [Pa],  
 $m$  = množství vodní páry [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

Kondenzující množství vodní páry je:

$$m_c = k \cdot (m_{vstup} - m), \quad (38)$$

kde:  $m_c$  = kondenzující množství vodní páry [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  
 $m_{vstup}$  = množství vodní páry na vstupu do úseku [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  
 $k$  = součinitel, zohledňující různé aspekty zjednodušení.

Množství vodní páry, které přechází do dalšího úseku je tedy:

$$m_{next} = m + (1 - k) \cdot (m_{vstup} - m), \quad (39)$$

kde:  $m_{next}$  = množství přecházející vodní páry [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

Objemový průtok je:

$$Q_v = 3600 \cdot A \cdot v, \quad (40)$$

kde:  $Q_v$  = objemový průtok [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ],  
 $A$  = plocha průřezu [ $\text{m}^2$ ],  
 $v$  = rychlost proudění vzduchu [ $\text{m s}^{-1}$ ].

Množství zkondenzované vody za jeden časový krok je:

$$C = \frac{Q_v \cdot m_c \cdot 12}{\rho}, \quad (41)$$

kde:  $C$  = zkondenzovaná voda [ $\text{kg (12h)}^{-1}$ ].  
 $\rho$  = hustota vody (=  $1\,000 \text{ kg m}^{-3}$ )

Dále je spočítáno kondenzační teplo vztahem (36) a změněná teplota (34).

Pokud ke kondenzaci nedojde, je vstupní absolutní vlhkost současně výstupní a také vstupní absolutní vlhkostí v následujícím úseku.

V následujícím úseku je jako okrajová podmínka poslána do programu OOFEM výstupní teplota z úseku předcházejícího a celý proces se opakuje s tím rozdílem, že nyní je už počítáno s absolutními vlhkostmi. Ty jsou pak v případě potřeby převedeny aktuální teplotou na vlhkost relativní. Vnější teplota na povrchu zemního tělesa zůstává v daném časovém kroku pro všechny úseky stejná.

#### 4.1. Získání tepla

K zjištění tepla, které prochází rozhraním, slouží funkce „getHeat“. Využívá třídu „AverageTemperature“, funkci „AverageTemperature2“ ke zjištění průměrných teplot na odpovídající délce na ostění. Pro každou takovou teplotu je spočítáno přenesené teplo podle rovnice (32). Získaná tepla jsou sečtena.

#### 4.2. Vzniklé překážky a jejich řešení

Během řešení daného problému se vyskytly mnohé potíže. Několik nejzásadnějších je popsáno na následujících řádcích.

##### a) Nestabilní řešení na začátku roku

Mezi prvními problémy bylo, že na počátku bylo řešení nestabilní. Na prvním úseku vznikla malá chyba ve výpočtu teploty ostění. Ta byla přenesena pomocí změny teploty vzduchu na druhý úsek a opět se přidala další chyba. Tak to šlo dál přes celou délku tunelu. Na konci vyšetřovaného tunelu vznikaly v prvním měsíci teploty o několika milionech stupňů, to se v dalších měsících ustálilo na reálných hodnotách. Důvodem bylo, že pokud byla teplota ostění v počátečních podmínkách nastavena na 10 stupňů a teplota vstupního vzduchu v prvním úseku v lednu byla 2,9 stupně, počáteční stav nebyl rovnovážný. Navržené řešení spočívá v zahájení výpočtu v období, u něhož bude teplota vnějšího prostředí téměř totožná s počáteční teplota výpočtu. První měsíc výpočtu byl stanoven duben. Rozdíl mezi teplotami byl jenom půl stupně, a přesto chyba po několika úsecích dosahovala stovek stupňů. Až po přizpůsobení počáteční podmínky přesně teplotě vstupního vzduchu (10,57°C) byl problém téměř vyřešen.

##### b) Oscilace teplot

Kondenzace neprobíhala rovnoměrně, i když data teplot na první pohled vypadala dobře. Při vykreslení bylo zjištěno, že teplota vzduchu na vstupu do úseků na konci tunelu osciluje okolo správného řešení. Dalším postupem tedy bylo zmenšení časového kroku. Nový časový krok byl nastaven na již zmíněných 12 hodin a shledán dostačujícím i po prodloužení tunelu.



## c) Neprobíhající kondenzace

Bohužel při stávající reálné průměrné vlhkosti z roku 2014 [4] a délce raženého tunelu 2,2 km ke kondenzaci nedocházelo. Teplota v tunelu neklesala dostatečně rychle. Kondenzace byla proto ve všech měsících nastavena o 13,5% vyšší. Tato hodnota byla vybrána tak, aby maximální relativní vlhkost byla 90%. Kondenzace přesto nezačala probíhat.

Dalším krokem bylo prodloužení vyšetřovaného tunelu na 5 km. Nejdřív byly simulace provedeny se zvýšenou vlhkostí. V Tab. 1 je možné vidět, že kondenzace probíhala jak při rychlosti proudění 1 m/s, tak při rychlosti 2 m/s. Na těchto analýzách je dobře vidět, jaký vliv má rychlost proudění na to, v jakých místech bude kondenzace probíhat. Vlhkost mohla být tedy opět snížena na skutečné relativní vlhkosti v roce 2014. Bylo zjištěno, že voda by kondenzovala pouze při rychlosti proudění vzduchu 1 m/s.

## 4.3. Provedené analýzy

V průběhu bylo provedeno několik analýz pro porovnání výsledků a optimalizaci vstupních dat. V tabulce (Tab. 1) je výpis některých z nich i s výsledky, zda kondenzace probíhá nebo ne. Analýzy byly zpracovány do grafů v programech Matlab (Obr. 43, Obr. 44) [13] a Excel 2013 (Obr. 46 - Obr. 49). V grafech je zkondenzovaná voda převedena na jednotku  $\text{m}^3\text{den}^{-1}$ .

č.	délka úseku [m]	rychlost proudění [m/s]	počet úseků [ks]	délka tunelu [km]	úpravy zadání	kondenzace [Ano/Ne]	čas výpočtu [h]
01	200	2	11	2,2	RH2014	Ne	1,28
02	100	1	22	2,2	RH2014	Ne	1,19
03	100	2	22	2,2	RH2014+13.5%	Ne	1,62
04	100	1	22	2,2	RH2014+13.5%	Ne	1,58
05	50	1	100	5,0	RH2014+13.5%	Ano	5,09
06	100	1	50	5,0	RH2014+13.5%	Ano	2,55
07	200	1	25	5,0	RH2014+13.5%	Ano	1,27
08	200	2	25	5,0	RH2014+13.5%	Ano	1,27
09	200	2	25	5,0	RH2014	Ne	1,32
10	50	1	100	5,0	RH2014	Ano	5,11
11	200	1	25	5,0	RH2014	Ano	1,30
12	100	1	50	5,0	RH2014	Ano	2,50

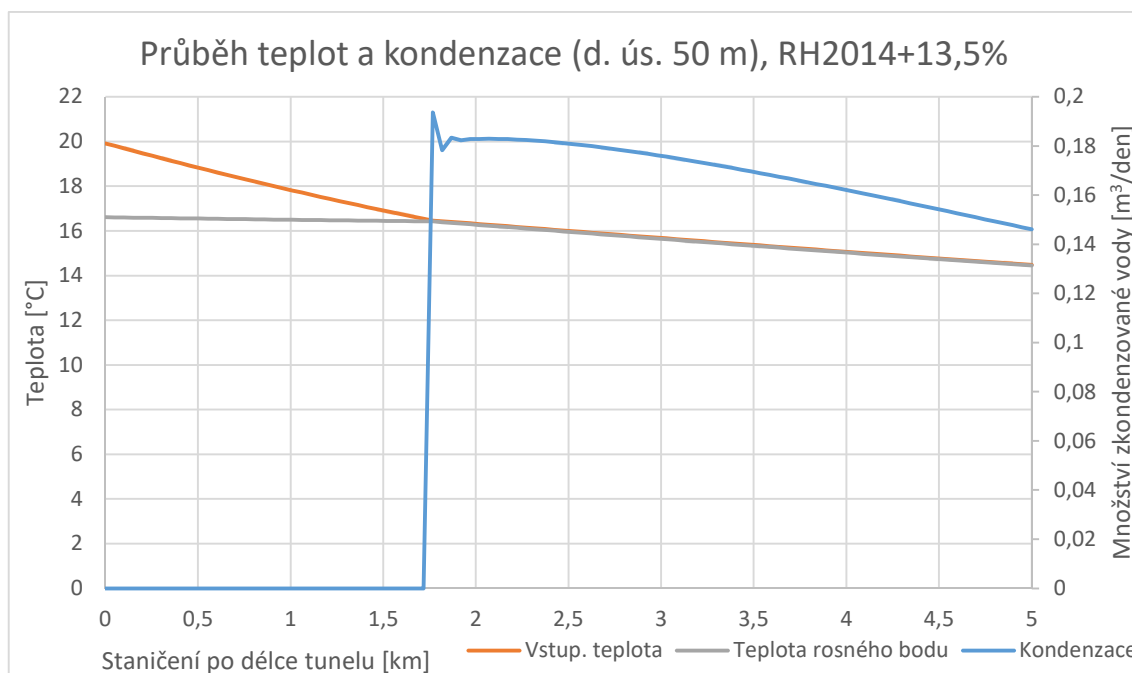
Tab. 1. Výpis analýz v podélném směru

Na následujících grafech je zobrazen průběh teplot a kondenzace po délce tunelu v 95. dni výpočtu. Jedná se o 2. červen. Pro porovnání jsou zde umístěny čtyři grafy - dva s délkou úseku 50 m a dva s délkou úseku 100 m. Každá z těchto variant je uvedena s různým zadáním vlhkosti.

Je na nich možné pozorovat rozdílný začátek kondenzace. Při zvýšené vlhkosti začíná kondenzace už na cca 1,7 km (Obr. 46, Obr. 47), ale při skutečné vlhkosti z roku 2014 začne probíhat až za čtvrtým kilometrem (Obr. 48, Obr. 49).

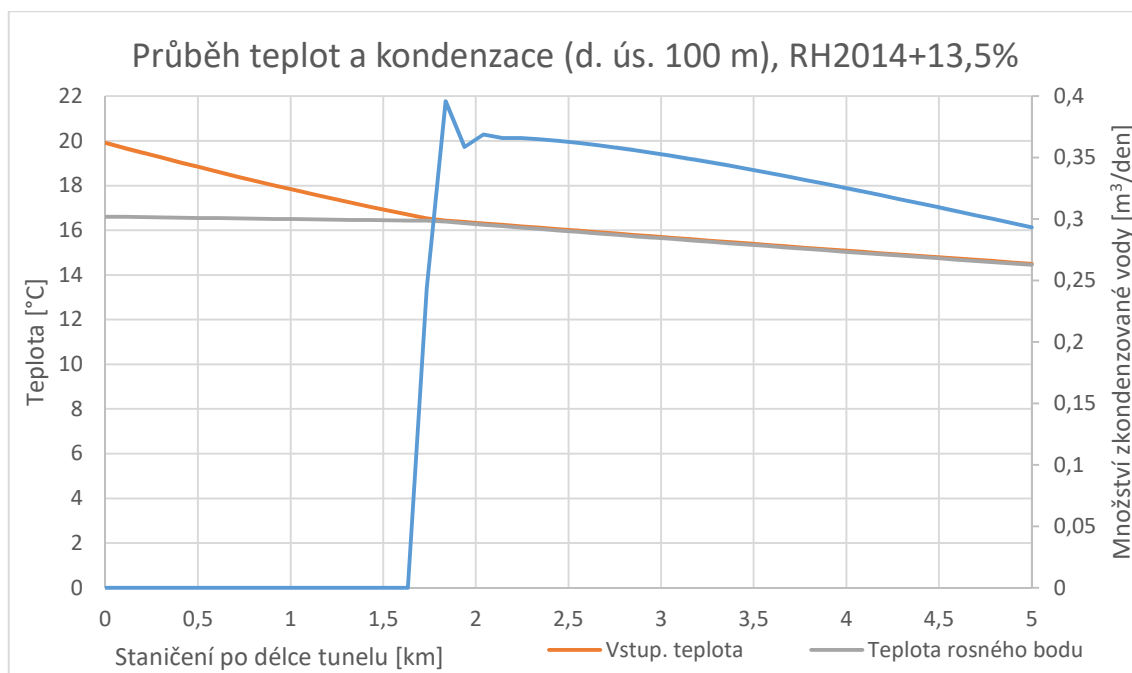
Na stejných vlhkostech zase lze dle předpokladu vidět, že na grafu s délkou úseku 50 m (Obr. 46) je kondenzace stabilizována na kratším úseku, než na druhém grafu s délkou úseku 100 m (Obr. 47).

Na všech průbězích je vidět změnu sklonu klesání vstupní teploty do úseků.

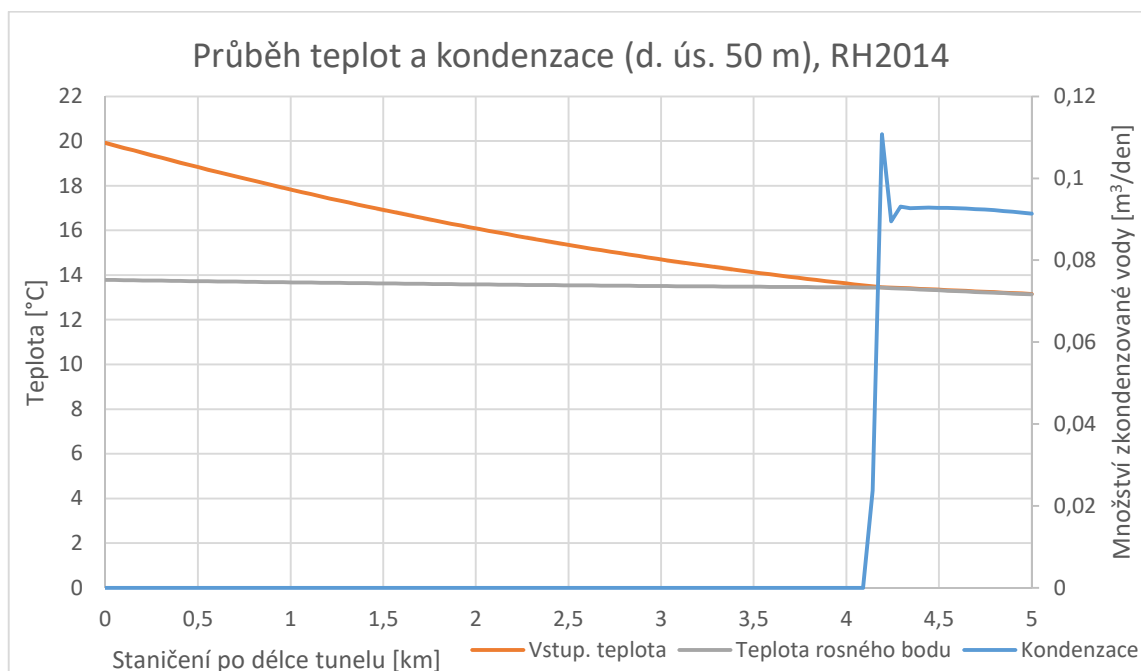


Obr. 46. Graf teplot a kondenzace, d. ús. 50 m, RH2014+13,5%

## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu

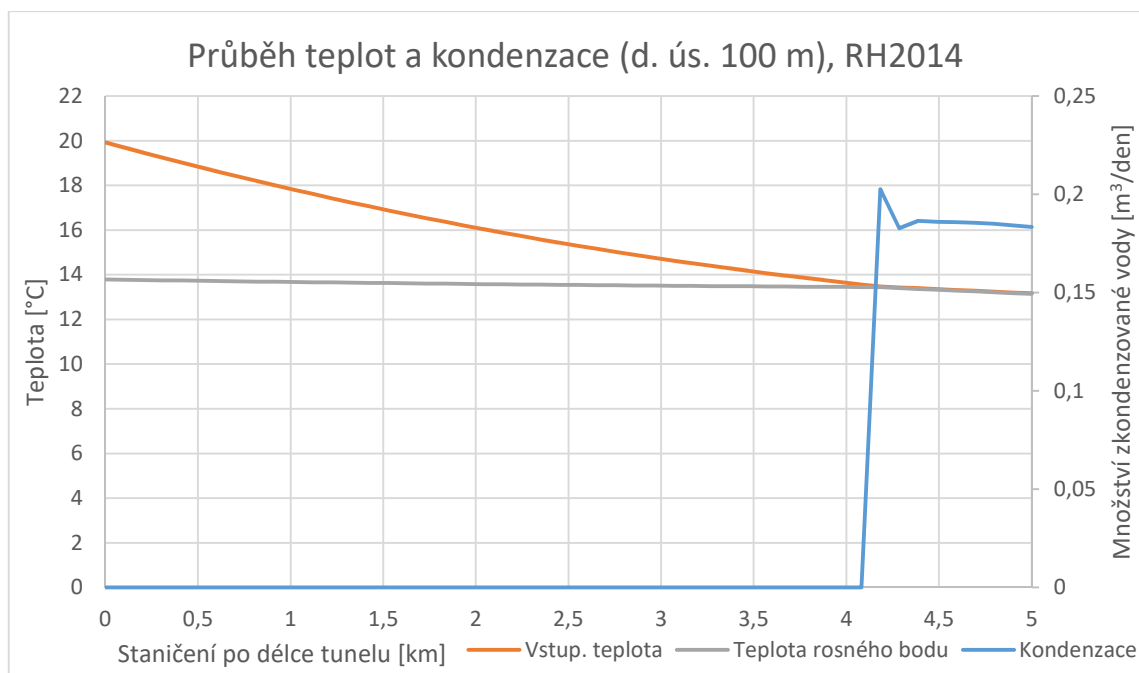


**Obr. 47. Graf teplot a kondenzace, d. ús. 100 m, RH2014+13,5%**



**Obr. 48. Graf teplot a kondenzace, d. ús. 50 m, RH2014**

## Analýza kondenzace vodní páry v tunelu



Obr. 49. Graf teplot a kondenzace, d. ús. 100 m, RH2014

## E) Informace o použitém softwaru

---

### 1. Objektově orientované programování

V práci je využit imperativní způsob programování v jazyce Python. Výpočtu je dosaženo pomocí řady příkazů, které určují přesný postup řešení. [14] Pomocí Pythonu je napsána i platforma MuPIF. Program OOFEM je napsán v jazyce C++. Spojuje je objektově orientovaná architektura. Proto je zde uvedeno něco málo o objektově orientovaném programování.

Jedná se programovací paradigma, které je vhodné k psaní velkých a složitých programů. Zakládá si na znovupoužitelnosti. Program je tak snadné udržovat a při přítomnosti chyby ji stačí opravit na jednom místě. Kód je přehledný. Celé objektově orientované programování je založeno na několika základních principech.

Z názvu je zjevné, že základní jednotkou je objekt. Funkce a data jsou vázána pouze k objektu a bez nich nemají smysl. Objekt může obsahovat i jiné objekty se zapouzdřením dat a funkcí nad těmito daty.

Je možné abstrahovat funkci jednotlivých objektů. Každý z nich je schopen provádět určené činnosti a komunikovat s okolím, aniž by vyžadoval znalost způsobu, jakým vnitřně jiné objekty pracují, musí znát pouze jejich rozhraní. [15]

Dalším principem je dědičnost. Je to schopnost přebírat funkce nebo i data jiného objektu. Objekty umí používat funkce, které jsou napsané pro jiný objekt.

Polymorfismus je možnost definování a pojmenování skupiny funkcí. Je možné je pak volat bez ohledu na to, na jakém objektu se nachází, a využívat jejich funkce. Lze tedy použít jakýkoliv objekt, i když každý zvlášť pracuje rozdílně.

Jazyků umožňujících objektové programování je mnoho, z nejznámějších například Java, C++, PHP, Python. [16]

## 2. Program OOFEM

OOFEM začal vznikat jako součást doktorské disertační práce prof. Patzáka v roce 1997 [2]. Od té doby se aktivně vyvíjí za podpory a s přispěním mnoha odborníků. Kód s objektově orientovanou architekturou je napsán v jazyce C++ a v současné době je napsáno více než 220 tisíc řádek. Cílem programátorů je vytvořit robustní a efektivní nástroj pro řešení úloh numerickými metodami.

Hlavní výhodou OOFEMU je jeho volná šiřitelnost. Lze ho použít pro numerické řešení multifyzikálních problémů, jako jsou úlohy mechaniky pevné fáze, transportních jevů a mechaniky tekutin. Dokáže řešit lineární i nelineární problémy. Podporuje paralelní zpracování výpočtů, založené na doménové dekompozici. Disponuje též rozhraním ke generátoru sítí t3d a Targe2 a možnostmi využití dalších externích programů.

OOFEM je rozdělen na dvě základní části. První z nich je knihovna (OOFEMlib), která obsahuje všechny základní sady tříd. Tyto třídy jsou nezávislé na řešeném problému a mohou být využity v jakémkoli konečně prvkovém problému. Do jádra je možné přidávat nové konečné prvky, materiálové modely s libovolným počtem a typem stavových proměnných.

Druhá je distribuční část, která obsahuje všechny moduly závislé na typu problému. Do této části patří samostatné moduly pro mechaniku, transportní problémy a mechaniku tekutin. Každý modul má kromě dalšího i svou knihovnu konečných prvků odpovídající dané problematice.

Vstupní soubor pro výpočet může být napsán v textovém editoru nebo generován konverzním programem či konečně prvkovým preprocesorem.

Výstup z programu zajišťuje zabudovaný postprocessor. Umožňuje exportovat výsledky ve formátu VTK, který je pak spustitelný například v programech ParaView a MayaVi.

### 3. Platforma MuPIF

Platforma MuPIF byla vytvořena s cílem vytvořit nástroj, který umožňuje kombinovat existující programy řešící dílčí problémy s cílem umožnit jejich vzájemnou komunikaci a výměnu dat, a řešit tak komplexní multi-fyzikální problémy. [17] Získává výsledky z různých na sobě navzájem nezávislých komponent. Platforma je nadřazena pracujícím softwarům, vede je a zajišťuje jejich vzájemnou komunikaci. Dále podporuje paralelní a distributivní výpočet.

Jedním z přínosů je ušetření výpočtového času při výměně informací mezi softwary. Zprostředkuje také komunikaci při použití rozdílných diskretizačních technik. Tím pádem jsou jednotlivé softwary na sobě nezávislé. Každý z nich si obvykle také vytvoří jinou síť. Platforma zajistí vzájemné mapování nebo interpolaci výsledků.

Aby bylo možné platformu použít k propojení se softwarem, je potřeba na již existujícím kódu vytvořit rozhraní, které umožní platformě řízení jednotlivých aplikací a přístup k práci s daty. Řízení musí být umožněno na vysoké úrovni.

## 4. Program ParaView

ParaView je open source program, který slouží pro analýzu dat a jejich grafické znázornění ve 2D či 3D. [8] Je vyvinut k analýze extrémně velkých datových sad. ParaView používá pro zpracování dat knihovnu Visualization Toolkit. Vstupem pro program ParaView je model ve formátu VTK.

VTK model je možné vytvořit ve formátu XML nebo ASCII. V této práci byl použit formát ASCII. Je méně flexibilní než formát XML. [8].

ASCII je slovo poskládané z prvních písmen anglického American Standard Code for Information Interchange. Což ve volném překladu znamená americký standard pro převod znaků na čísla. Jedná se o tabulku se 128 řádky, zapsaných v sedmibitovém kódu.

XML je standardní formát pro výměnu informací, používající znakovou sadu Unicode se 100 000 řádky.



## F) Závěr

---

V této práci byla řešena problematika modelování kondenzace. Nejdříve byla kondenzace řešena v příčném řezu. Tento model byl pak s přihlédnutím ke zjednodušujícím předpokladům rozšířen na řešení ve směru podélném. Principem je diskretizace tunelu a aktualizace okrajových podmínek na jednotlivých úsecích pro výpočet nestacionárního vedení tepla v příčném řezu.

Analýza v charakteristických řezech dokazuje, že kondenzace je největší problém, pokud je do tunelu hnán teplý vlhký vzduch. Ke kondenzaci vodní páry dochází v největší míře na přelomu července a srpna. Voda se začne na ostění tunelu srážet v červenci a přestane v září.

Dále bylo zjištěno, že na ostění nejsou všude stejné hodnoty kondenzace. Například v tunelu hloubeném jsou hodnoty nejvyšší u stěny rozdělující tubusy a u technické chodby pod povrchem vozovky. V raženém tunelu kondenzace také začne probíhat na povrchu vozovky v místech, kde jsou pod ní umístěny technické chodby, a současně zde má nejvyšší hodnoty. Důvodem je, že v hloubené části jsou tubusy k sobě mnohem blíže a teplota ostění je částečně ovlivněna teplotou na povrchu. Naproti tomu ražené úseky jsou hluboko, kde nedochází k ovlivnění vnější teplotou, a tubusy jsou od sebe vzdálené 29 m, tudíž se navzájem neovlivňují.

Koncept analýzy v podélném směru nám ukazuje, že kondenzace bude při zjednodušujících předpokladech probíhat při relativní vlhkosti z roku 2014 a proudění 1m/s nejdříve po čtvrtém kilometru. Z toho je vyvoditelné, že na kondenzaci má kromě teploty a vlhkosti zásadní vliv rychlost proudění vzduchu.

Jedním z problémů takovéto úlohy je její výpočetní náročnost. Pro relevantní výsledky je nutné adekvátně přizpůsobit časový krok délce a počtu úseků. Pokud k tomu nedojde, výsledné hodnoty oscilují okolo správného řešení. Oscilace se mohou pohybovat v rozpětí několika stupňů, a to už může mít za následek, že je nesprávně splněna podmínka pro kondenzaci, tedy ke kondenzaci dochází, když nemá, a naopak.

Tento koncept by se dal v budoucnu rozšířit pomocí zohlednění nyní neřešených aspektů. Mezi nimi jsou rozdílná hloubka úseků tunelu, proudění vzduchu, přítomnost vozidel a možnost kombinace hloubených a ražených úseků, včetně různých geometrií.

V celém problému by bylo možné také zohlednit absorpci vlhkosti ostěním při použití různých materiálů, např. betonu oproti keramickému obložení.

## G) Reference

---

- [1] V. Šmilauer, J. Pruška a J. L. Vitek, *TunnelCond*, Praha, 2016.
- [2] B. Patzák, *OOFEM - an object-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures*, Acta Polytechnica, 52(6):59–66, 2012.
- [3] „Městský okruh v Praze: Malovanka - Pelc Tyrolka,“ [Online]. Available: <http://mo.ttnz.cz/informace/souhrnne-udaje/>.
- [4] Český hydrometeorologický ústav, „Měsíční data,“ 2014. [Online]. Available: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data>. [Přístup získán 1 Listopad 2016].
- [5] ČERNÝ, Robert. *Řešení transportních jevů na počítači*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 978-800-1015-803.
- [6] „Conservation Physics - Index,“ [Online]. Available: <http://www.conservationphysics.org/atmcalc/atmoclc2.pdf>. [Přístup získán 13 Listopad 2016].
- [7] Ahrens, James; Geveci, Berk; Law, Charles; *ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization*, Visualization Handbook, Elsevier, 2005, ISBN-13: 978-0123875822
- [8] Schroeder, Will; Martin, Ken; Lorensen, Bill (2006), *The Visualization Toolkit* (4th ed.), Kitware, ISBN 978-1-930934-19-1
- [9] MIKŠ, Antonín a Jiří NOVÁK. *Fyzika I*. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05201-3.
- [10] M. Pavelek, „Energetický ústav: Odbor termomechaniky a prostředí,“ [Online]. Available: [http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/15\\_Prenos.pdf](http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/15_Prenos.pdf).
- [11] „TZB-Info: Tabulky a výpočty,“ [Online]. Available: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa>.

- [12] Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK, „Skupenská tepla,“ [Online]. Available: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/molekul/8\\_3](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/8_3).
- [13] MathWorks, (2015), Bioinformatics Toolbox: User's Guide (R2015a), <http://ch.mathworks.com/help/matlab/2-and-3d-plots.html>, 2015.
- [14] „Wikipedia: Imperativní programování,“ 25 Duben 2016. [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Imperativní\\_programování](https://cs.wikipedia.org/wiki/Imperativní_programování). [Přístup získán 9 Prosince 2016].
- [15] „Wikipedie: Objektově orientované programování,“ [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Objektově\\_orientované\\_programování](https://cs.wikipedia.org/wiki/Objektově_orientované_programování).
- [16] RM Software, „Principy programování,“ 6 9 2009. [Online]. Available: <http://principyprogramovani.blog.zive.cz/2009/09/styly-programovani/>.
- [17] Patzák, Bořek et al. MuPIF, *A distributed multi-physics integration tool*. Adv Eng Softw (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.09.005>