



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**  
**Katedra biomedicínské techniky**

**Fyzikální vlastnosti materiálu při dýchání v  
simulovaném lavinovém sněhu**  
**Physical properties of material during breathing  
in simulated avalanche snow**

**Bakalářská práce**

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce: Šimon Walzel

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.

---

**Kladno 2019**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Walzel** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **465297**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**  
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**  
Studijní obor: **Biomedicínský technik**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Fyzikální vlastnosti materiálu při dýchání v simulovaném lavinovém sněhu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Physical properties of material during breathing in simulated avalanche snow**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a zkonstruujte přípravek pro studium konvekčních a difuzních vlastností respiračních plynů v simulovaném lavinovém sněhu. Vyrobený přípravek otestujte zvláště pro čistou difuzi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> a pro difuzi kombinovanou s konvekcí. Zjistěte, jak dobře suchý a mokrý perlit simuluje lavinový sníh z hlediska výměny plynů.

Seznam doporučené literatury:

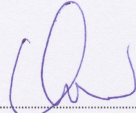
- [1] Roubík K., Sieger L., Sýkora K., Work of Breathing into Snow in the Presence versus Absence of an Artificial Air Pocket Affects Hypoxia and Hypercapnia of a Victim Covered with Avalanche Snow: A Randomized Double Blind Crossover Study, PLOS ONE, ročník 10, číslo 12, 2015, e0144332 s.
- [2] Brugger H. et al., Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in snow: implications for avalanche survival, Resuscitation, ročník 58, číslo 1, 2003, 81–88 s.

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.02.2019**  
Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

  
prof. Ing. Peter Kneppo, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) katedry

  
prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.  
podpis děkana(ky)



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Fyzikální vlastnosti materiálu při dýchání v simulovaném lavinovém sněhu“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně 10. 5. 2019

.....*Walzel*.....

Šimon Walzel

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Roubíkovi, Ph.D. za vedení mého výzkumu, jeho čas a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ortovi a celému týmu nekonvenční ventilace za výpomoc při přípravě experimentů.

## **ABSTRAKT**

### **Fyzikální vlastnosti materiálu při dýchání v simulovaném lavinovém sněhu**

Podle statistik zemřou pod lavinou až stovky lidí ročně, a proto se touto problematikou zabývá ve světě hned několik výzkumných týmů. Tento výzkum by mohl pomoci pochopit jednotlivé děje, které nastávají při dýchání pod lavinovým sněhem, protože většina obětí zemře právě v důsledku asfyxie. Cílem práce bylo navrhnout, sestavit a otestovat vhodnou aparaturu, která by umožňovala studium konvekčních a difuzních vlastností respiračních plynů v simulovaném lavinovém sněhu. Aparatura se skládala z plastového válce (1200 mm dlouhý, 300 mm vnitřní průměr) se 13 vzorkovacími jehlami připojenými k monitoru vitálních funkcí S/5 (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Chicago, USA) s modulem pro analýzu plynů. Suchý perlit, mokrý perlit a sníh byly použity jako materiál simulující lavinový sníh. Byly studovány dvě situace distribuce respiračních plynů: jednoduchá difuze bez nuceného podélného průtoku a kombinace konvekce a difuze. Směs kyslíku (16%) a oxidu uhličitého (5%) vyvážená dusíkem byla použita jako sledovaná plynná směs. V průběhu experimentů byly měřeny změny koncentrací kyslíku a oxidu uhličitého v podélném směru aparatury po 50 mm. Bylo zjištěno, že kyslík se šíří ve všech použitých materiálech rychleji než oxid uhličitý vlivem difuze bez konvekce. Za určitých podmínek by mohl simulovat difuzní vlastnosti sněhu použitý perlit. Oba respirační plyny se šíří stejnou rychlostí při konvekčním pohybu v suchém perlitu. Na základě popsanych mechanismů v této práci vyplynuly rychlejší difuzní vlastnosti kyslíku, které by mohly zajišťovat vyšší dodávku kyslíku pro lidský organismus při dýchání pod lavinovým sněhem.

#### **Klíčová slova:**

difuze, difuzní koeficient, konvekce, respirační plyny, perlit, sníh



## **ABSTRACT**

### **Physical properties of material during breathing in simulated avalanche snow**

According to statistics, up to hundreds of people die annually under the avalanche, which is why several research teams in the world deal with this issue. This research could help to understand processes occurring during breathing under the avalanche snow, as most victims die because of asphyxia. The aim of the study is to design, construct and test a laboratory apparatus suitable for studying convective and diffusive properties of respiratory gases in simulated avalanche snow. The model consisted of a plastic cylinder (1200 mm long, 300 mm ID) with 13 gas sampling needles connected to a gas analyzer of S/5 (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Chicago, USA) anesthesia monitor. Dry perlite, wet perlite and snow were used as materials simulating the avalanche snow. Two gas transfer situations were studied using the apparatus: simple diffusion without forced longitudinal flow and a combination of convection and diffusion. A mixture of oxygen (16%) and carbon dioxide (5%) balanced with nitrogen was used as a tracing gas mixture. Changes of concentrations of oxygen and carbon dioxide were measured at different vertical positions in the snow model during the experiments. It was found that oxygen propagates through the studied materials faster than carbon dioxide during the sole diffusion without a convection. Both the gases propagate the same speed when the combination of diffusion and convection is studied in dry perlite. Based on the described mechanisms, this work showed faster diffusion properties of oxygen that could provide a higher oxygen delivery for the human body while breathing under the avalanche snow.

#### **Keywords:**

diffusion, diffusion coefficient, convection, respiratory gases, perlite, snow

# Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratk</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>10</b>
1.1 Přehled současného stavu .....	10
1.1.1 Fyzikální vlastnosti sněhu ovlivňující výměnu plynů .....	10
1.1.2 Lavinová problematika .....	12
1.1.3 Vliv adsorpce na difuzi plynů sněhem .....	13
1.1.4 Difuze plynů ve sněhu .....	14
1.2 Cíle práce .....	15
<b>2 Metody</b> .....	<b>16</b>
2.1 Měřicí aparatura .....	16
2.1.1 Požadavky na aparaturu .....	17
2.1.2 Popis potrubí .....	17
2.1.3 Záznam distribuce respiračních plynů .....	19
2.1.4 Nastavení složení směsi plynů a průtoku .....	20
2.2 Pilotní měření .....	21
2.2.1 Šíření respiračních plynů v příčném průřezu potrubí .....	21
2.2.2 Vliv difuze při vyplachování vstupní komory .....	22
2.2.3 Chladicí lázeň .....	23
2.2.4 Vliv vlastností O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> na měření v různých směrech šíření vůči gravitaci .....	24
2.3 Realizace hlavního měření .....	24
2.3.1 Měření fyzikálních vlastností materiálů .....	25
2.3.2 Průběh měření difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů .....	26
2.4 Difuzní koeficient .....	27
2.4.1 Teoretický difuzní koeficient .....	27
2.4.2 Difuzní koeficient počítaný z naměřených hodnot .....	28
2.5 Metodické a statistické vyhodnocení dat .....	28
<b>3 Výsledky</b> .....	<b>30</b>
3.1 Výsledky pilotního měření .....	30
3.1.1 Šíření respiračních plynů v příčném průřezu potrubí .....	30
3.1.2 Vliv difuze při vyplachování vstupní komory .....	31
3.1.3 Chladicí směs .....	31
3.1.4 Vliv vlastností O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> na měření v různých směrech šíření vůči gravitaci .....	31
3.2 Fyzikální vlastnosti perlitu .....	32
3.3 Fyzikální vlastnosti sněhu .....	32
3.4 Čistá difuze O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> v suchém perlitu, mokřém perlitu a sněhu .....	32
3.4.1 Časová závislost koncentrací prostorového rozložení .....	33
3.4.2 Studium rozdílů difuzivity mezi O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> .....	34
3.4.3 Porovnání difuzivity O <sub>2</sub> mezi použitými materiály .....	36
3.4.4 Porovnání difuzivity CO <sub>2</sub> mezi použitými materiály .....	37
3.5 Difuzní koeficient O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> v suchém perlitu .....	37
3.5.1 Srovnání naměřených difuzních koeficientů O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> za různých atmosférických podmínek .....	38

3.6 Difuzní koeficient O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> ve sněhu .....	39
3.7 Konvekce kombinovaná s difuzí.....	39
<b>4 Diskuze .....</b>	<b>42</b>
4.1 Návrh a realizace měřicí aparatury .....	42
4.2 Pilotní měření.....	42
4.2.1 Šíření respiračních plynů v příčném průřezu potrubí .....	43
4.2.2 Vliv difuze při vyplachování vstupní komory .....	43
4.2.3 Chladicí směs .....	43
4.2.4 Vliv vlastností O <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> na měření v různých směrech šíření vůči gravitaci	43
4.3 Fyzikální vlastnosti materiálů.....	43
4.4 Čistá difuze respiračních plynů.....	44
4.5 Difuzní koeficient .....	45
4.6 Konvekce kombinovaná s difuzí .....	46
4.7 Vliv počtu měření .....	47
<b>5 Závěr .....</b>	<b>47</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>48</b>
<b>Příloha A: Ukázkové výpočty .....</b>	<b>52</b>
<b>Příloha B: Grafy jednotlivých měření čisté difuze v různých materiálech .....</b>	<b>53</b>
<b>Příloha C: Grafy měření konvekce kombinované s difuzí v různých materiálech.</b>	<b>56</b>
<b>Příloha D: Pomocný technický výkres měřicí aparatury.....</b>	<b>57</b>
<b>Příloha E: Protokol měření.....</b>	<b>58</b>
<b>Příloha F: Obsah přiloženého CD .....</b>	<b>60</b>



## Seznam symbolů a zkratk

### Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$c_0$	%	Standardní koncentrace látky v okolním prostředí
$c_s$	%	Koncentrace látky v přiváděné směsi plynů
$c_{(x,t)}$	%	Koncentrace látky v přiváděné směsi plynů v určitém čase $t$ a vzdálenosti od vstupní komory $x$
$D_{CO_2}$	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Difuzní koeficient oxidu uhličitého ve vzduchu za standardních podmínek
$D_{O_2}$	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Difuzní koeficient kyslíku ve vzduchu za standardních podmínek
$D_{SP_{O_2}}$	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Difuzní koeficient $O_2$ v suchém perlitu
$D_{SP_{CO_2}}$	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Difuzní koeficient $CO_2$ v suchém perlitu
$D_{xair}$	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Difuzní koeficient látky ve vzduchu za standardního tlaku a teploty
$D_x$	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Difuzní koeficient látky v daném prostředí
$\phi$	-	Pórovitost, poměr objemu pórů vztažená k celkovému objemu
$N_2$	%	Dusík
$N_{O_2}$	-	Normalizovaná koncentrace $O_2$
$N_{CO_2}$	-	Normalizovaná koncentrace $CO_2$
$p$	-	Hladina statistické významnosti
$P_0$	Pa	Standardní atmosférický tlak (101 325 Pa)
$P$	Pa	Aktuální atmosférický tlak
$q$	L/min	Průtok
$\rho$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota, hmotnost materiálu vztažená k jeho objemu
$S_L$	-	Poměr mezi aktuálními a standardními atmosférickými podmínkami
$\tau$	-	Tortuosita, poměr délky křivky a vzdálenosti mezi konci této křivky
$T_0$	K	Standardní teplota (273,15 K)
$T$	K	Aktuální teplota
$v$	mm/min	Rychlost

### Seznam zkratk

Zkratka	Význam
$CH_4$	Methan
$CO_2$	Oxid uhličitý
erf	Chybová funkce
MP	Mokrý perlit
NaCl	Chlorid sodný
NO	Oxid dusnatý
$N_2O$	Oxid dusný
$O_2$	Kyslík
PVC	Polyvinylchlorid
SP	Suchý perlit
SS	Sníh

# 1 Úvod

Se vzrůstajícím zájmem o zimní aktivity dochází také k růstu počtu úmrtí v důsledku zasypaní lavinovým sněhem, a proto se tato problematika stává aktuální pro důkladnější studium příčin úmrtí. Dle evropských a amerických statistik zahynou pod lavinou až stovky lidí ročně [1,2]. Většina obětí zemře v důsledku zablokování dýchacích cest nebo v důsledku kritické hypoxie a hyperkapnie [3]. Při dýchání stále stejného vzduchu dochází v uzavřeném prostředí ke snižování koncentrace kyslíku a ke zvyšování koncentrace oxidu uhličitého. Rychlost tohoto procesu závisí zejména na vlastnostech sněhu [4]. I když existují studie, které se zabývají difuzí různých plynů sněhem [5,6], vlivem dechového vzoru na dýchání v lavinovém sněhu [7] či vlastnostmi sněhu, které ovlivňují výměnu plynů [4], žádná studie se dosud nezabývala šířením respiračních plynů sněhem za účelem prohloubení znalostí ohledně přežití lidského organismu pod lavinou či rozdílnou difuzivitou (rozptýleností) vlivem adsorpce nebo fyzikálními a chemickými rozdíly mezi molekulami  $O_2$  a  $CO_2$ .

Kvůli vysoké porozitě sněhu může docházet k šíření plynů vlivem difuze, konvekce nebo obojího. Difuze může být způsobena teplotním, tlakovým či koncentračním gradientem složek plynu vůči ostatním. Rychlost difuze záleží zejména na difuzním koeficientu látky pro dané prostředí a porozitě tohoto prostředí. Pro výpočet chemicky interagujících látek s prostředím se uvažuje efektivní difuzivita, která zahrnuje i chemické reakce a adsorpci [8]. Konvekci se rozumí průměrná rychlost pohybu celé masy způsobená například větrem.

Experiment se zabývá tématem, které může pomoci pochopit souvislosti ve výzkumu ohledně dýchání lidského organismu pod lavinou a také může pomoci při návrhu nových preventivních pomůcek pro oběti zasypané lavinovým sněhem. Dále pomůže prohloubit znalosti ohledně difuzních vlastností respiračních plynů ve sněhu. Cílem je navrhnout a sestavit aparaturu pro studium konvekčních a difuzních vlastností respiračních plynů v simulovaném lavinovém sněhu, sestavený přípravek následně otestovat na simulovaném lavinovém sněhu, suchém perlitu a mokřém perlitu a tyto materiály mezi sebou porovnat.

## 1.1 Přehled současného stavu

### 1.1.1 Fyzikální vlastnosti sněhu ovlivňující výměnu plynů

Pro studium difuzivity plynů sněhem a pro následné výpočty je nutné znát vlastnosti sněhu, které přímo ovlivňují proces šíření plynů sněhem. Mezi nejběžněji používané parametry patří hustota, pórovitost, tortuosita, permeabilita a velikost zrn sněhu.

Hustota sněhu se pohybuje od desítek kilogramů na metr krychlový pro čerstvě napadaný sníh až po stovky kilogramů na metr krychlový pro sníh mokřý. V případě lavin se tato hodnota pohybuje mezi 296 a 350  $kg \cdot m^{-3}$  [9]. Pórovitost sněhu určuje poměr objemu všech pórů (dutin) ku celkovému objemu a vypočítá se ze znalosti hustoty sněhu a ledu.

$$\phi = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_l}, \quad (1)$$

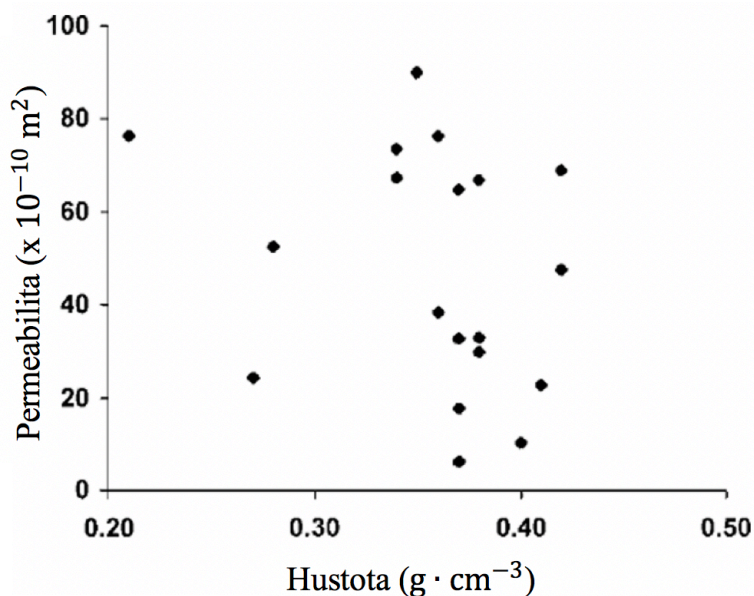
kde  $\phi$  je pórovitost,  $\rho_s$  je hustota sněhu a  $\rho_l$  je hustota ledu ( $917 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

S tímto parametrem blízce souvisí takzvaná tortuosita, kde musí difundující látka v prostředí s heterogenními částicemi urazit delší vzdálenost. Vzhledem k tomu, že tortuositu lze měřit jen velmi obtížně, se podle studie Masta et al. [5] obvykle využívá vztahu

$$\tau = \phi^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

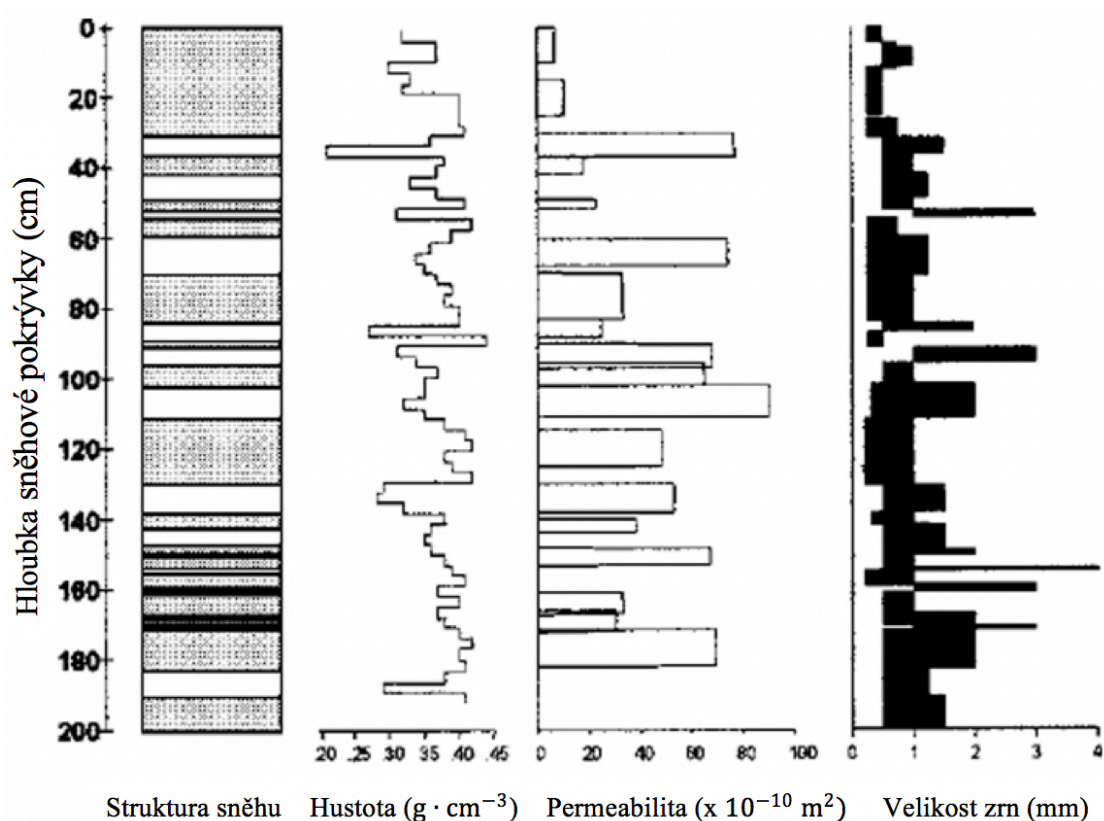
kde  $\tau$  je tortuosita a  $\phi$  je pórovitost.

Dalším obvykle uvažovaným parametrem je permeabilita. Permeabilita je vlastnost porézního prostředí, která popisuje propustnost pro množství tekutiny, která se v tomto prostředí nachází. Studie Alberta et al. [10] se zabývala měřením permeability firnu a sněhu v hloubkách do 15 metrů. Bylo zjištěno, že hustota sněhu není dobrým indikátorem permeability, jak dokládá Obr. 1.1, ale mohla by mít bližší souvislost s velikostí sněhových zrn, jak je patrné z Obr. 1.2. Dále bylo zjištěno, že čím větší hloubka sněhu je, tím je nižší permeabilita. Nejnižší naměřená permeabilita v horních dvou metrech sněhu a firnu se stářím do 6 let byla  $10 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  a nejvyšší  $280 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  [10].



**Obr. 1.1:** Permeabilita je funkcí hustoty v horních dvou metrech firnu. Upraveno podle [10].

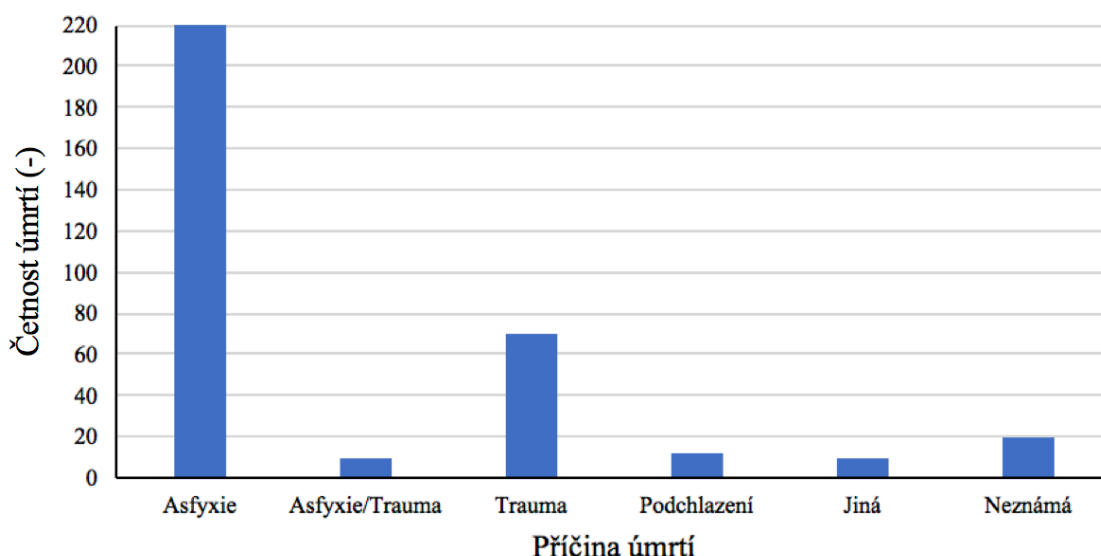




**Obr. 1.2:** Vrstvy, hustota, permeabilita a rozsah velikostí zrn z měření v horních dvou metrech sněhu a firnu se stářím do 6 let. Upraveno podle [10].

### 1.1.2 Lavinová problematika

Podle statistických údajů přejatých z práce McIntosh et al. z roku 2007 [3] je nejčastějším důvodem zahynutí pod lavinou udušení vlivem nedostatku vzduchu. Bylo zaznamenáno 221 ze 343 úmrtí právě z této příčiny, jak je zdokumentováno na Obr. 1.3. Většina výzkumných týmů, které se zabývají problematikou přežití lidského organismu pod lavinou, se domnívají, že doba přežití pod lavinovým sněhem závisí na vlastnostech sněhu [11,4]. Když člověk opakovaně vydechuje a vdechuje stejný plyn, tak se v prostředí postupně snižuje koncentrace kyslíku a zvyšuje koncentrace oxidu uhličitého. Rychlost tohoto procesu závisí zejména na vlastnostech sněhu [4].



**Obr. 1.3:** Četnost příčin úmrtí pod lavinovým sněhem. Převzato z [3].

Studie Grissoma et al. [11], která se zabývala především určením doby přežití v lavinovém sněhu bez i za použití zařízení, které odvádělo vydechovaný oxid uhličitý od probanda, se domnívá, že větší hustota sněhu způsobuje pomalejší difuzivitu  $\text{CO}_2$  dále od probandů.

Vlastnostmi sněhu, které mají vliv na přežití člověka v lavinovém sněhu, se zabývala studie Strapazzona et al. [4]. Výzkum potvrdil, že vysoké hodnoty hypoxie a hyperkapnie při dýchání člověka pod sněhem jsou ovlivněné fyzikálními vlastnostmi sněhu. Bylo zjištěno, že rapidní změny koncentrací (pokles koncentrace  $\text{O}_2$  a nárůst koncentrace  $\text{CO}_2$ ) jsou nejčastěji spojeny s vysokou hustotou sněhu a vedly ke kritické hypoxii. Výsledky měření byly odlišné v nižších hustotách sněhu, kdy ukončení testu bylo způsobeno nejčastěji naakumulováním  $\text{CO}_2$  v dutině, z čehož vyplývá působení spíše hyperkapnie než hypoxie. To naznačuje, že šíření oxidu uhličitého nezávisí pouze na hustotě sněhu. Hustota sněhu nemůže tedy sloužit jako jediný faktor ovlivňující dýchání. Nebyla nalezena korelace mezi difuzivitou  $\text{O}_2$  nebo  $\text{CO}_2$  a permeabilitou či odporem sněhu. Dále není jasné, zda nárůst  $\text{CO}_2$  při nízkých denzitách nastává kvůli adsorpci, difuzní bariéře či pomalé difuzi. Dosud nebyla provedena studie, která by se zabývala rozdílnou difuzivitou vlivem adsorpce nebo fyzikálními a chemickými rozdíly mezi molekulami  $\text{O}_2$  a  $\text{CO}_2$ .

### 1.1.3 Vliv adsorpce na difuzi plynů sněhem

Vliv na difuzivitu plynů sněhem má také interakce mezi látkou a sněhem vlivem chemických reakcí, adsorpcí, absorpcí a desorpcí, a proto se touto problematikou již zabývaly některé výzkumy [12,13,14]. Interakce byla měřena na oxidu siřičitém [12] a organických těkavých sloučeninách [13]. Bylo zjištěno, že adsorpce záleží zejména na teplotě, struktuře a vlastnostech tohoto sněhu. Naměřená koncentrace byla porovnána s výpočtem pro efektivní difuzivitu a hodnoty si navzájem odpovídaly. Avšak nebyly měřeny přímo chemické reakce či adsorpce, což znamená, že efektivní difuzivita přímo měřena nebyla.

Podle studie Bruggera et al. [15] by mohla mít vliv rozpustnost respiračních plynů ve sněhu, respektive ve vodě v něm obsaženém, na šíření plynů při dýchání pod lavinovým sněhem. Při dýchání dochází k tání sněhu v blízkosti obličejů a mohlo by se do vody rozpustit určité množství oxidu uhličitého a kyslíku. Rozpustnosti kyslíku a oxidu uhličitého ve vodě při teplotě 0 °C a normálním atmosférickém tlaku jsou  $1,46 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  pro kyslík a  $3,3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  pro  $\text{CO}_2$  [16,17]. Ve výzkumu, který se zabýval rozpustností  $\text{CO}_2$  v ledu, byla zjištěna hodnota rozpustnosti, která odpovídá  $2,87 \cdot 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  při tlaku jedné atmosféry [14].

#### 1.1.4 Difuze plynů ve sněhu

Měření difuze plynů sněhem probíhalo zejména za účelem pochopení různých biochemických procesů na Zemi, které ovlivňují klimatické a environmentální podmínky. Sníh pokrývá celoročně obrovské území a je rezervoárem mnoha látek.

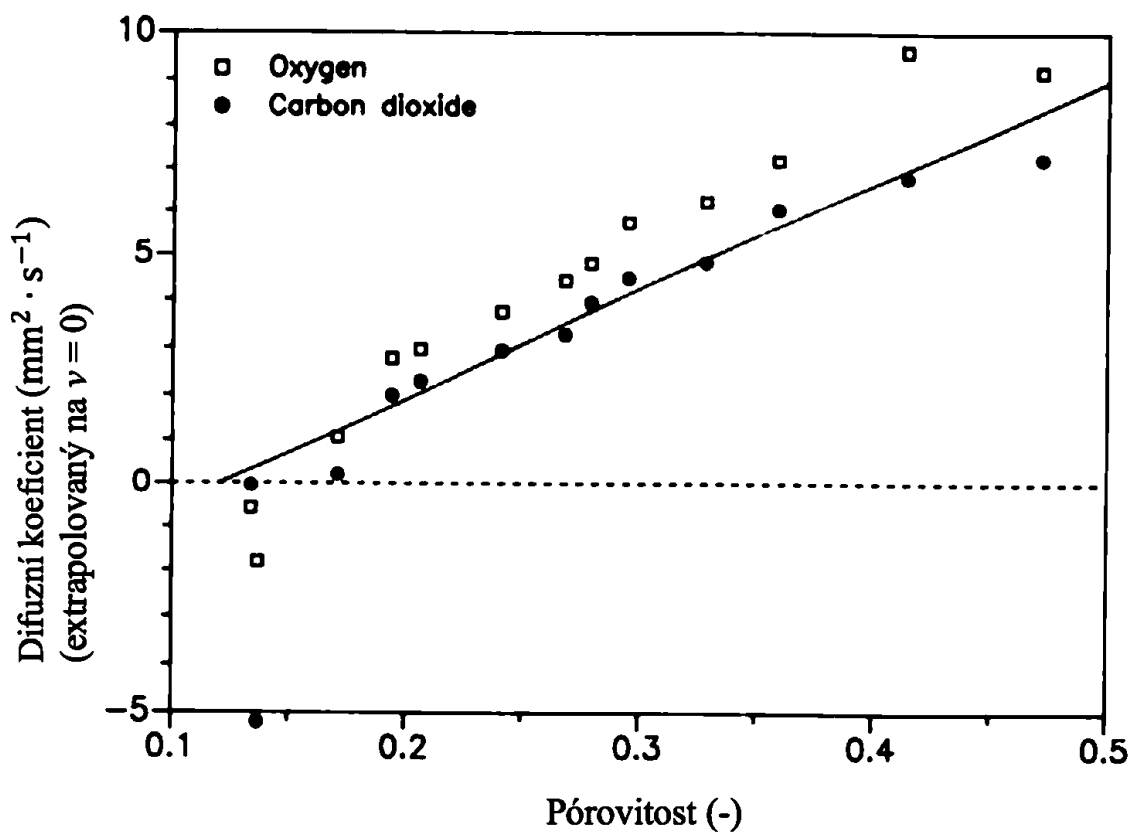
Existuje několik studií, které se zabývají difuzivitou plynů sněhem způsobenou změnami tlaků či větrem. Výzkum Massmana et al. [6] se zabýval mírou difuzivity  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  a  $\text{CH}_4$  sněhem způsobenou turbulentními změnami tlaků. Nárůst koncentrací těchto plynů v ovzduší může mít velký dopad na klimatické změny. Pohyb  $\text{CO}_2$  tedy není způsoben pouze prostou difuzí, ale musí se počítat také s působením větru a s tlakovými a teplotními gradienty, které zapříčiní mnohem vyšší celkový tok  $\text{CO}_2$  [18,19]. Další studie se zabývala měřením koncentrace  $\text{CO}_2$  v průběhu roku v půdě a ve sněhu. Model měření byl založen na Fickově druhém zákonu pro účel výpočtu vertikální distribuce  $\text{CO}_2$  z půdy do ovzduší skrze sníh. Naměřený difuzní koeficient  $\text{CO}_2$  ve sněhu se pohyboval od 0,1 do  $0,026 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  [20].

System, který kontinuálně měřil šíření plynů sněhem, sestrojil výzkumný tým Seoka et al. [21]. Mimo jiné zjistili, že vítr má značný vliv na koncentraci plynů a koncentrační gradienty ve sněhové pokrývce. Za nejvyšších pozorovaných větrných podmínek klesl vliv koncentračních gradientů až na 13 % oproti klidným nevětrným podmínkám. Analýza vlivu závislosti šíření plynů sněhem na rychlosti větru zjistila, že v průběhu tří týdnů bylo šíření plynů o 57 % vyšší, než bylo difuzní metodou vypočítáno, což dokazuje velký vliv větru.

Studie Pinzera et al. [22] zjistila vztah mezi strukturou sněhu a difuzivitou  $\text{NO}$  pomocí výpočetní tomografie a radioaktivního značení. Dále zjistili, že látky, které interagují se sněhem, mají mnohem nižší efektivní difuzivitu než látky neinteragující se sněhem.

Měřením difuze respiračních plynů ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) za účelem měření rozdílného stáří ledu a plynů v jeho prasklinách se zabývala studie Schwandera et al. [23]. K měření bylo použito tepelně–vodivostního detektoru (katarometru), který detekuje látky podle rychlosti šíření tepla z jedné části do jiné. Jako první přímo změřili difuzní koeficienty  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$  ve firnu s porozitou mezi 0,13 a 0,5. Zjistili, že difuzní koeficient záleží téměř lineárně na porozitě, jak je ukázáno na Obr. 1.4. K naměření difuzních koeficientů museli nechat plyn proudit pod určitou rychlostí a následně hodnoty extrapolovali na nulovou rychlost.





Obr. 1.4: Závislost difuzního koeficientu kyslíku a oxidu uhličitého na pórovitosti. Upraveno podle [23].

## 1.2 Cíle práce

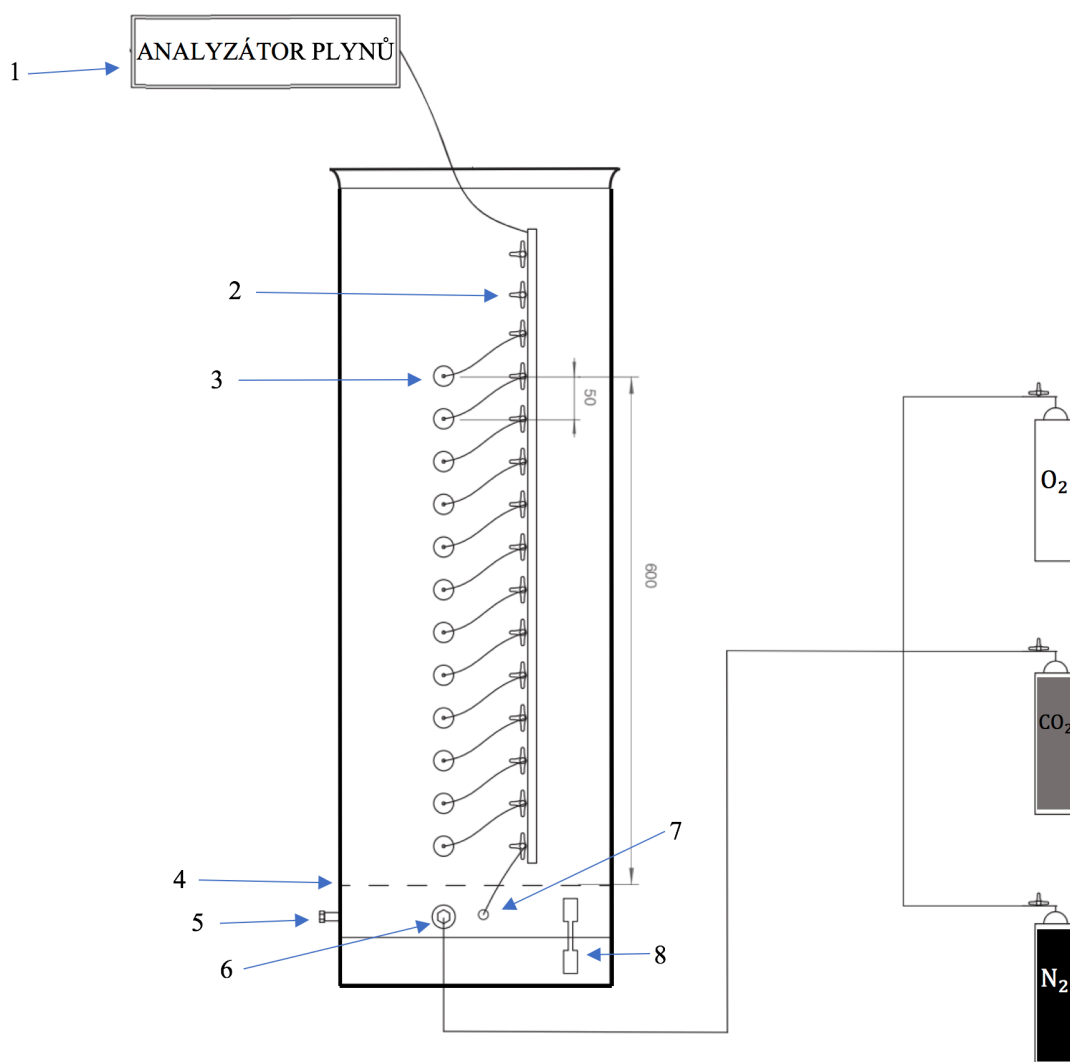
Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a sestavit aparaturu pro studium konvekčních a difuzních vlastností respiračních plynů v simulovaném lavinovém sněhu a vyrobený přípravek otestovat zvlášť pro čistou difuzi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> a pro difuzi kombinovanou s konvekcí. Dalším cílem práce bylo zjistit, jak dobře napodobuje suchý perlit a mokrý perlit fyzikální vlastnosti simulovaného lavinového sněhu z hlediska výměny plynů.

## 2 Metody

Experiment se skládal ze tří na sebe navazujících etap. Nejprve bylo třeba navrhnout a sestavit aparaturu, která by umožňovala měření difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů v různých materiálech a byly tedy definovány požadavky na aparaturu. Následně proběhlo pilotní měření, ze kterého vyplynuly další možné nedostatky měřicí aparatury, které bylo dále třeba vyřešit. Poslední etapou bylo terénní měření zahrnující všechny realizované experimenty a použité materiály.

### 2.1 Měřicí aparatura

Pro možnost provádění experimentů byla sestavena speciální aparatura, která se skládala z potrubí a jeho dalších komponentů (přezky, víko, síťka, trojcestné ventily, gumové zátky s infuzními jehlami, ventily), tlakových lahví s aparaturou pro namíchání směsi plynů a monitoru vitálních funkcí.



**Obr. 2.1:** Schéma měřicí aparatury. 1) monitor vitálních funkcí s module pro analýzu respiračních plynů, 2) trojcestný ventil, 3) gumová zátka s infuzní jehlou, 4) síťka oddělující potrubí na vstupní a měřicí komoru, 5) odvodní ventil, 6) přívodní ventil, 7) průchodka pro odběr vzorků směsi plynů, 8) přezka upevňující víko ke корпусu.

## 2.1.1 Požadavky na aparaturu

Pro správné fungování měřicí aparatury byly definovány požadavky, které aparatura musí splňovat. Bylo důležité, aby byla dostatečně robustní, aby bylo možné s konstrukcí jednoduše manipulovat. Délka aparatury musela být taková, aby byl dostatečný čas na manipulaci s trojcestnými ventily při realizaci experimentů (aspoň 600 mm na měřicí část). Dále bylo nutné, aby byla aparatura dostatečně široká, aby byl co nejvíce minimalizován vliv šíření plynů podél hladkých stěn potrubí vlivem nízké adheze zrn ke stěnám potrubí. Avšak musela mít tvar válce, aby bylo možné použít jednorozměrný výpočet 2. Fickova zákona. Dalšími požadavky na potrubí byly minimální objem vstupní komory, vzduchotěsnost potrubí, možnost měření složení směsi ve vstupní komoře, dostatečně pevná síťka oddělující potrubí na 2 části (jedna pro proudění směsi plynů a druhá pro studium difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů v materiálu) a možnost měření koncentrací každých 50 mm v podélném směru potrubí. Sada pro namíchání směsi plynů musela být schopna zvládat velmi malé průtoky v řádech litrů za minutu a musela být také dostatečně přesná.

## 2.1.2 Popis potrubí

Základem bylo potrubí produktové řady KG systém z polyvinylchloridu (PVC) se zesílenou stěnou o délce 1200 mm a vnitřním průměru 300 mm, které je zachyceno na Obr. 2.2. Další důležitou součástí bylo víko s neprodyšnou pryží zobrazené na Obr. 2.3, které těsnilo vůči okolnímu složení vzduchu. Víko bylo navíc pro lepší těsnění přiděláno 4 přezkami.



**Obr. 2.2:** Corpus aparatury. Fotografie: Michal Fanta



**Obr. 2.3:** Víko s těsněním a fixačními přezkami.

Dovnitř potrubí byla přimontována síťka, která oddělovala potrubí na dvě části, jak je znázorněno na Obr. 2.4. V dolní části potrubí byl prostor pro proudění plynů zvaný vstupní komora. Prodyšná síťka umožňovala průchod směsi plynů do horní části zvané měřicí komora, ve které se nacházel materiál, na kterém byly studovány difuzní či konvekční vlastnosti plynů. Průchodky umožňovaly přívod a odvod směsi plynů ze vstupní komory. Odvodní průchodka měla větší průměr, aby při přivádění směsi plynů se současným odváděním nedocházelo k přetlaku uvnitř vstupní komory.



**Obr. 2.4:** Síťka oddělující potrubí na část pro materiál a část pro proudění plynů.

### 2.1.3 Záznam distribuce respiračních plynů

K záznamu šíření kyslíku a oxidu uhličitého materiálem bylo využíváno monitoru vitálních funkcí S5 (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Chicago, USA), který obsahuje modul pro analýzu respiračních plynů. K odběru vzorků z jednotlivých míst v materiálu byla navržena konstrukce, která se skládala z infuzních jehel, na které byly napojeny hadičky s konektory luer lock, a hliníkové lišty s trojcestnými ventily, jak je zobrazeno na Obr. 2.5. Kvůli vzduchotěsnosti procházely jehly skrze gumové zátky. Pro odběr vzorku plynu bylo nutné pootočit příslušný trojcestný ventil o 90°, kdy byl následně vzorek přenesen skrze lištu a další hadičku do monitoru vitálních funkcí.



**Obr. 2.5:** Hliníková lišta se sadou trojcestných ventilů, hadiček a infuzních jehel. Fotografie: Michal Fanta

Vzorky byly analyzovány ze 13 míst v potrubí, z toho 12 jich bylo tvořeno pomocí infuzních jehel v měřicí komoře a jedna pomocí průchodky ve vstupní komoře potrubí. Infuzní jehly byly od sebe vzdálené vždy 50 mm v podélném směru. Každá jehla měřila buď 75 mm nebo 150 mm od vnitřního obvodu roury a pravidelně se střídaly. Rozdílné délky jehel byly voleny, aby bylo možné kontrolovat, zda se šíří plyny rychleji po stranách potrubí, a také, aby se zamezilo ovlivnění koncentrace plynů v sousedních sondách při odběru vzorku. Průchodka ve vstupní komoře sloužila zejména ke snímání složení působící směsi plynů a také ke kontrole stálosti složení koncentrace ve vstupní komoře.





**Obr. 2.6:** Sběrné infuzní jehly s hadičkami ústíci do lišty s trojcestnými ventily. Fotografie: Michal Fanta

#### 2.1.4 Nastavení složení směsi plynů a průtoku

Na Obr. 2.7 jsou zobrazené tlakové lahve ( $O_2, CO_2, N_2$ ), které byly použité při experimentech. Za pomoci redukčních ventilů, které byly nastaveny na výstupní tlak 1,5 atmosféry, a škrtec ventilů byla vytvořena směs plynů, která byla tvořena z 15,9 % kyslíkem, 5 % oxidem uhličitým a zbytek (79 %) tvořil dusík. Složení bylo zvoleno tak, aby přibližně odpovídalo vydechovanému složení plynů u lidí a aby byl koncentrační gradient pro kyslík a oxid uhličitý v absolutní hodnotě vůči vzduchu stejný (5 %). Dále byl pomocí plynoměru nastaven průtok směsi plynů 2 L/min, což odpovídá konvekčnímu pohybu čela v podélném směru potrubí zhruba  $v = 30$  mm/min. Rychlost průtoku byla volena tak, aby byl dostatečný čas na manipulaci s trojcestnými ventily při realizaci experimentu konvekce kombinované s difuzí.



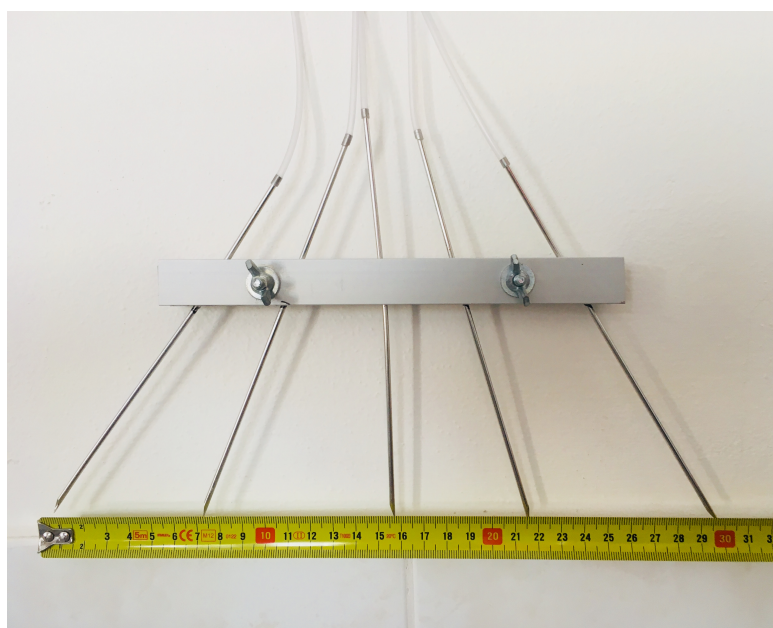
**Obr. 2.7:** Terénní laboratoř pro měření difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů ve sněhu. Fotografie: Michal Fanta

## 2.2 Pilotní měření

Pro ověření správného fungování aparatury bylo provedeno pilotní měření. Pro pilotní studie a pro možnost měření v úplných laboratorních podmínkách bylo potřeba vybrat materiál, který by dobře simuloval lavinový sníh. Na základě studie [7] a na základě mechanických vlastností byl vybrán perlit. Tento materiál je porézní a jeho hustota může odpovídat hustotě sněhu. Ve studii bylo využíváno suchého perlitu s hustotou  $155\text{--}160\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a mokrého perlitu o hustotě  $250\text{--}255\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a oba materiály byly následně porovnávány se sněhem z hlediska fyzikálních vlastností.

### 2.2.1 Šíření respiračních plynů v příčném průřezu potrubí

Jednotlivá zrna perlitu či sněhu nebyla schopna dostatečně přilnout k hladkým a rovným stěnám potrubí vlivem nízké adheze. Při konvekci kombinované s difuzí docházelo k jevu, kdy se respirační plyny směrem ke stěnám šířily lépe než uprostřed. Pro zjištění velikosti vlivu tohoto jevu byla sestavena konstrukce z dvou hliníkových lišt, které k sobě byly přišroubovány, a pěti infuzních jehel, jak ukazuje Obr. 2.8. Rozložení jehel bylo zvoleno tak, aby krajní jehly dosahovaly na obvod a aby všechny jehly končily v stejném místě v podélném směru. Šíření plynů podél stěn potrubí bylo navíc minimalizováno pomocí dvanácti neprodyšných pryžových bariér v podobě kroužků umístěných na vnitřní stěnu měřicí komory se vzájemným odstupem 50 mm, jak je zachyceno na Obr. 2.9. Do vstupní komory byla přiváděna směs plynů. Do měřicí komory byl nasypán materiál a do něho byla vložena konstrukce pro záznam šíření plynů v příčném průřezu. Odběr vzorků probíhal průběžně během měření, kdy docházelo ke zvyšování koncentrací ve všech sondách. Vyhodnocení vzorků probíhalo pomocí monitoru vitálních funkcí (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Chicago, USA).



**Obr. 2.8:** Rozložení infuzních jehel pro záznam šíření plynů příčným průřezem potrubí.





**Obr. 2.9:** Neprodyšné pryžové bariéry v potrubí. Fotografie: Michal Fanta.

### 2.2.2 Vliv difuze při vyplachování vstupní komory

Aby bylo složení ve vstupní komoře po celou dobu experimentu konstantní, bylo nutné komoru nejprve vyplachovat do doby, než bylo dosaženo chtěného složení. Při vyplachování vstupní komory směsí plynů však docházelo k šíření plynů vlivem difuze skrze síťku a bylo tedy nutné tomu zabránit. Na Obr. 2.10 je ukázáno řešení, kdy bylo na aparaturu vzduchotěsně nasazeno plastové víko s průchodkou pro přívod vzduchu na horní konec potrubí. Působící vzduch shora potrubí o průtoku 0,5 L/min zabraňoval difuzi ze vstupní komory do měřicí komory ( $q = 0,5$  L/min odpovídá konvekčnímu pohybu v podélném směru potrubí zhruba  $v = 8$  mm/min).

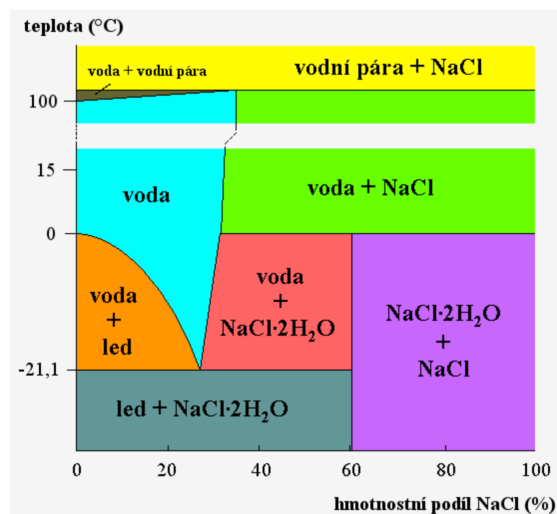


**Obr. 2.10:** Plastové víko s průchodkou pro přívod vzduchu.



### 2.2.3 Chladicí lázeň

Při pilotních měřeních na perlitu problém s rozdílnou teplotou plynů v tlakových lahvích a teplotou v laboratoři nenastával. Při měření v terénních podmínkách by byla teplota směsi plynů z tlakových lahví vyšší než aktuální venkovní teplota, což by způsobilo při experimentu difuzi kvůli teplotnímu gradientu nebo také tání studovaného sněhu. Z tohoto důvodu bylo využito znalosti principu fázového diagramu směsi vody, ledu a soli, pomocí kterého byla tvořena chladicí směs. Byla využívána oranžově značená část fázového diagramu, která je vyznačená na Obr. 2.11. Do plastového boxu, který je zachycen na Obr. 2.12, byl nasypan sníh a takové množství chloridu sodného (NaCl), které tvořilo zhruba 20 % celkové hmotnosti. Chlorid sodný se sněhem vytvořily směs o teplotě okolo  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hadička, kterou proudila vytvořená směs plynů z tlakových lahví, byla ponořena do boxu. Výstupní teplota směsi plynů byla měřena a hadička byla v boxu upravena tak, aby odpovídala aktuální venkovní teplotě.



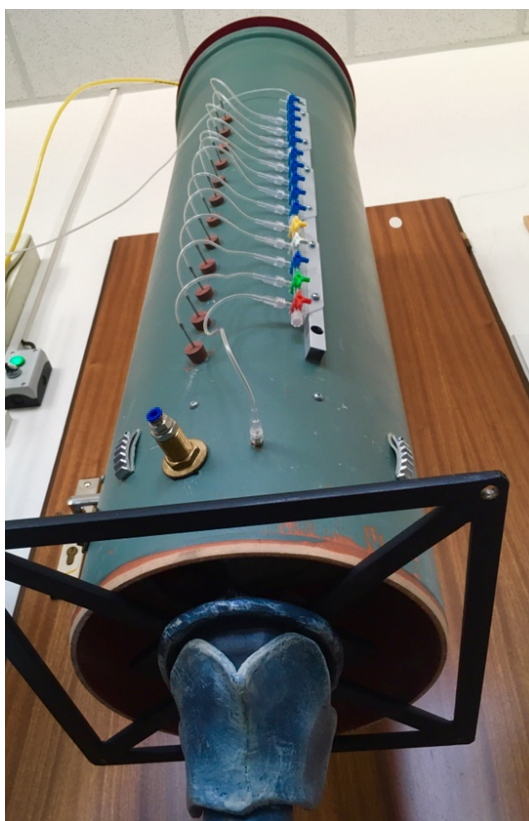
Obr. 2.11: Fázový diagram vody, ledu a kuchyňské soli. Převzato z [24].



Obr. 2.12: Chlazení směsi plynů před vstupní komorou. Fotografie: Michal Fanta

## 2.2.4 Vliv vlastností O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> na měření v různých směrech šíření vůči gravitaci

Vzhledem ke zkonstruovanému přípravku probíhalo měření difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů pouze v podélném směru ve směru proti gravitaci. Vlivem rozdílných fyzikálních a chemických vlastností molekul respiračních plynů by mohly být výsledky odlišné, pokud by bylo měření provedeno v horizontálním směru či ve směru gravitace. Řešením pro zjištění vlivu měření pouze v podélném směru proti směru gravitace bylo využito stejné aparatury, ale směs plynů byla přiváděna horním otvorem potrubí skrze plastové víko s průchodkou. Ze spodní strany bylo odstraněno víko s přezkami a tím bylo umožněno měření ve směru gravitace, jak je zobrazeno na Obr. 2.13.



Obr. 2.13: Realizace zkoušky difuze ve směru gravitace.

## 2.3 Realizace hlavního měření

Po vyřešení zjištěných nedostatků z pilotních měření bylo možné přejít k realizaci hlavní části měření do terénních podmínek. Každé měření se skládalo z měření fyzikálních vlastností materiálu a samotného měření difuzních či konvekčních vlastností respiračních plynů v daném materiálu. Měření také proběhlo v laboratoři pro možnost porovnání výsledků s výsledky z terénního měření na horách.

### 2.3.1 Měření fyzikálních vlastností materiálů

Pro výpočet teoretických hodnot difuzních koeficientů respiračních plynů v perlitu a sněhu a pro následné porovnání difuzních koeficientů mezi sebou bylo nutné měřit několik parametrů – hustotu, pórovitost, velikost zrn a teplotu materiálu. Pro měření hustoty a pórovitosti perlitu byla použita nádoba z rigidního materiálu, která je zachycena na Obr. 2.14. Do nádoby o objemu  $1,6 \text{ dm}^3$  a hmotnosti 174 g byl nasypán perlit a nádoba byla převážena a vypočítána hustota perlitu. Následně byla nádoba uzavřena víkem a byla přilévána voda horním otvorem ve víku do chvíle, kdy došlo k prosakování vody z nádoby. V tuto chvíli byla změřena hmotnost. Ze známých údajů byla vypočítána pórovitost perlitu.



**Obr. 2.14:** Rigidní nádoba s váhami pro měření hustoty perlitu a plynoměr pro měření průtoku.  
Fotografie: Michal Fanta

Pomocí sběrných nástrojů na Obr. 2.15 byla měřena hustota sněhu. Pórovitost sněhu byla vypočítána dle rovnice (1) a následně tortuosita učena dle vztahu (2). Po dokončení experimentu byla proměřena hustota sněhu v potrubí ve třech místech v podélném směru. Při sypání sněhu do potrubí, následném protřepávání pro zabránění vzniku dutin a působením tlaku vyšších vrstev na nižší docházelo ke změnám struktury a vlastností sněhu. S využitím rastru byla měřena velikost zrn sněhu a perlitu, jak ukazuje Obr. 2.16.





Obr. 2.15: 300ml kovové vykrajovátko s podložkou pro měření hustoty sněhu. Fotografie: Michal Fanta



Obr. 2.16: Rastr s lupou pro určení typu sněhu a velikosti zrn. Fotografie: Michal Fanta

### 2.3.2 Průběh měření difuzních a konvekční vlastností respiračních plynů

Před začátkem měření byl nejprve připraven materiál, na kterém měření probíhalo. V případě mokrého perlitu bylo nutné, aby jeho hustota zhruba odpovídala aktuální hustotě sněhu. Dosažení chtěné hustoty mokrého perlitu probíhalo doplněním určitého množství vody do barelu, kde následným důkladným protřepáním bylo dosaženo homogenní hustoty. Pro jistotu byla hustota znovu přeměřena. U sněhu byla hustota změřena třikrát a následně zprůměrována. Součástí přípravy materiálu bylo také změření aktuální teploty a tlaku. Následně bylo potrubí naplněno 53 litry materiálu, kde poslední sonda končila 50 mm pod nejvyšší vrstvou materiálu. Aparatura byla protřepávána v průběhu sypání, aby nevznikaly dutiny.

Monitor vitálních funkcí byl propojen s počítačem a pomocí sámkovací hadičky s aparaturou. V softwaru S5 Collect (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Chicago, USA) byl nastaven ve funkci waves s vzorkovací frekvencí 25 Hz sběr potřebných parametrů (především koncentrace  $O_2$  a  $CO_2$ ).

Před začátkem experimentu bylo nutné, aby se ve vstupní komoře dosáhlo složení směsi o požadovaném složení, avšak bez narušení experimentu vlivem rychlé difuze skrze síťku do materiálu. Z tlakových lahví byla skrze hadičku a chladicí lázeň přiváděna směs plynů průchodkou do vstupní komory a současně s tím byl shora potrubí vpouštěn plyn o složení normálního vzduchu s průtokem 0,5 L/min. Další průchodkou odcházela směs plynů a vzduchu z potrubí, aby nedocházelo k přetlaku uvnitř vstupní komory a následnému šíření směsi skrze síťku do studovaného materiálu.

Začátek experimentu měření prosté difuze nastal ve chvíli, kdy směs plynů ve vstupní komoře odpovídala složení přiváděné směsi, což trvalo zhruba pět minut. Současně s dosažením chtěných koncentrací plynů ve vstupní komoře bylo zamezeno působení vzduchu shora potrubí odstraněním víka s přívodem vzduchu. Po celou dobu experimentu mohla směs plynů ve vstupní komoře proudit ven další průchodkou, avšak skrze síťku difundovala část směsi vlivem koncentračního gradientu. Průběžně byla měřena koncentrace ze všech dvanácti míst v měřicí části potrubí a také ze vstupní komory, aby byla kontrolována stálost složení směsi ve vstupní komoře.

Při měření konvekce kombinované s difuzí bylo při dosažení chtěné směsi plynů ve vstupní komoře zamezeno působení vzduchu shora potrubí odstraněním víka s přívodem vzduchu a současně byla uzavřena průchodka ve vstupní komoře. Směs plynů mohla následně prostupovat pouze síťkou do měřicí komory. V tomto okamžiku začal experiment konvekce kombinované s difuzí, kdy byla průběžně měřena koncentrace ze všech dvanácti míst v měřicí komoře potrubí a také ze vstupní komory, aby byla zkontrolována stálost složení směsi. Měření probíhalo do chvíle, kdy změna koncentrace v nejvyšší sondě dosahovala měřitelných změn.

Po ukončení experimentu byl měřený materiál vysypán a u sněhu byla opět proměřena jeho hustota. Aparatura byla očištěna a vypláchnuta vzduchem, aby bylo zabráněno ovlivnění dalších měření.

## 2.4 Difuzní koeficient

Pro možnost porovnání šíření plynů v různých materiálech a pro porovnání s ostatními výzkumy ohledně difuzních vlastností plynů bylo třeba výpočtu difuzního koeficientu plynu v materiálu.

### 2.4.1 Teoretický difuzní koeficient

Ve výzkumu Massmana et al. [6] byla publikována rovnice, ze které je možné vypočítat teoretický difuzní koeficient plynu ze znalosti parametrů materiálu a aktuálních podmínek prostředí:

$$D_x = \phi \cdot \tau \cdot D_{xair} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^\alpha, \quad (3)$$

kde  $D_x$  je difuzní koeficient látky v daném prostředí,  $\phi$  je pórovitost,  $\tau$  je tortuosita,  $D_{xair}$  je difuzní koeficient látky ve vzduchu za standardního tlaku ( $P_0 = 101\,325$  Pa) a teploty ( $T_0 = 273,15$  K).  $P$  je aktuální tlak,  $T$  je teplota sněhu a korekční koeficient  $\alpha = 1,81$ , který byl pro výpočet použit na základě výzkumu Massmana et al. [6].

Difuzní koeficient  $O_2$  při tlaku jedné atmosféry a teplotě  $0^\circ\text{C}$  ve vzduchu [25] je

$$D_{O_2} = 17,6 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Difuzní koeficient  $CO_2$  při tlaku jedné atmosféry a teplotě  $0^\circ\text{C}$  ve vzduchu [26] je

$$D_{CO_2} = 13,8 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

## 2.4.2 Difuzní koeficient počítaný z naměřených hodnot

Pro porovnání teoretické hodnoty difuzního koeficientu a naměřeného difuzního koeficientu z dat, která byla získána při experimentech, byl použit 2. Fickův zákon. Tento zákon popisuje rychlost difuze a na rozdíl od 1. Fickova zákonu zahrnuje i změnu koncentračního gradientu. Koncentrace látky tedy nezáleží pouze na prostorové souřadnici, ale závisí i na čase. Matematické vyjádření v jednom prostorovém rozměru má následující tvar:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (4)$$

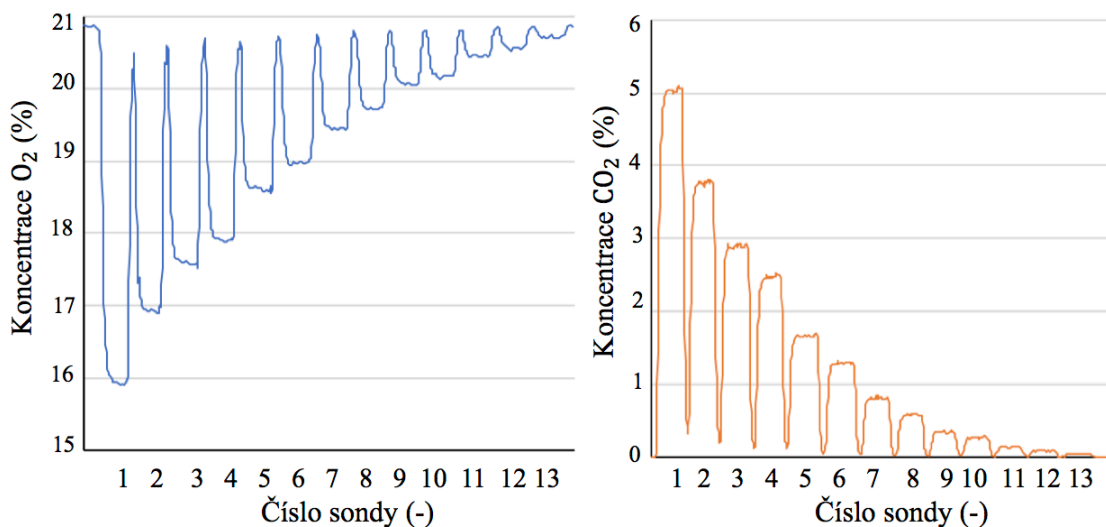
kde řešením diferenciální rovnice vznikl vztah [27]:

$$\frac{c(x,t)-c_0}{c_s-c_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D\cdot t}}\right), \quad (5)$$

kde  $c(x, t)$  je koncentrace v určitém čase  $t$  a vzdálenosti od vstupní komory  $x$ ,  $c_0$  je okolní koncentrace,  $c_s$  je koncentrace ve vstupní komoře, erf je chybová funkce a  $D$  je difuzní koeficient.

## 2.5 Metodické a statistické vyhodnocení dat

K analýze odebraných vzorků  $O_2$  a  $CO_2$  z jednotlivých míst potrubí docházelo pomocí softwaru S5 collect (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Chicago, USA). Následné zpracování dat probíhalo v prostředí Microsoft Excel (Microsoft, USA). Naměřené křivky z jednotlivých měření musely být normalizovány, protože koncentrace  $CO_2$  v podélném směru potrubí klesá a u  $O_2$  je tomu naopak. Následně bylo možné porovnávat respirační plyny mezi sebou. Na Obr. 2.17 jsou zobrazena nezpracovaná naměřená data.



**Obr. 2.17:** Grafy zobrazující nezpracovaná data naměřených koncentrací  $O_2$  a  $CO_2$  v podélném směru potrubí.

Normalizovaných koncentrací respiračních plynů bylo dosaženo pomocí přepočtů:

$$N_{O_2} = \frac{20,9 - c_t}{20,9 - c_0}, \quad (6)$$

kde  $N_{O_2}$  je výsledná normalizovaná koncentrace kyslíku,  $c_t$  je koncentrace kyslíku v daném místě a čase,  $c_0$  je koncentrace kyslíku ve vstupní komoře.

$$N_{CO_2} = \frac{c_t}{c_0}, \quad (7)$$

kde  $N_{CO_2}$  je výsledná normalizovaná koncentrace oxidu uhličitého,  $c_t$  je koncentrace oxidu uhličitého v daném místě a čase,  $c_0$  je koncentrace oxidu uhličitého ve vstupní komoře.

Protokol měření měl zajistit, že jednotlivé experimenty jsou na sobě nezávislé. Následující analýza dat probíhala v softwaru STATISTICA (TIBCO Software Inc., California, USA). Pomocí Shapiro-Wilkova testu byla zjištěna normalita rozdělení, kde byla sledována p-hodnota. Následně byl proveden F-test za účelem zjištění, zda se rozptyly ve výběrových souborech shodují. Po provedení všech předpokladů bylo možné použít parametrický test pro určení statistické významnosti. Byl aplikován takzvaný post-hoc Fisherův (LSD) statistický test. Pomocí tohoto testu bylo určeno, zda na hodnotu náhodné veličiny má statisticky významný vliv hodnota pozorovaného znaku. V kapitole 3 (výsledky) je pomocí znaků (★ – statistická významnost mezi suchým perlitem a mokřím perlitem, ✦ – statistická významnost mezi suchým perlitem a sněhem, ✨ – statistická významnost mezi mokřím perlitem a sněhem, ⊗ – statistická významnost mezi  $O_2$  a  $CO_2$ ) znázorněno, zda test prokázal statistickou významnost.

### 3 Výsledky

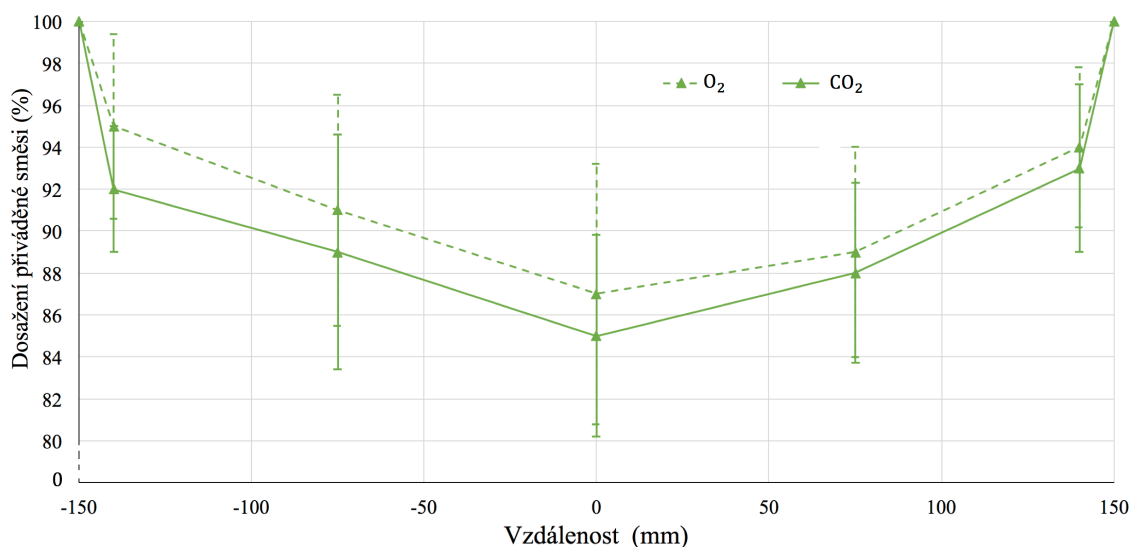
Měření vlastností simulovaného lavinového sněhu probíhalo na dvou lokalitách. Nejprve bylo provedeno pilotní měření na Fakultě biomedicínského inženýrství na Kladně v laboratoři A-13 (50.1353989N, 14.1041861E) v 380 metrech nad mořem za teploty 20 °C a tlaku 991 hPa. Následně probíhalo měření na Přední Labské, Krkonoše (50.6869058N, 15.5735197E) v 700 metrech nad mořem za teploty od -1 °C do 1 °C a atmosférickém tlaku pohybujícím se mezi 930–937 hPa.

#### 3.1 Výsledky pilotního měření

Pilotní měření se skládalo z několika pokusů a řešení, které zjišťovaly vliv nedostatků aparatury na výsledky hlavních experimentů. Byl zde řešen vliv hladkých a rovných stěn potrubí na nehomogenní šíření respiračních plynů v příčném průřezu potrubí, vliv difuze při vyplachování vstupní komory, řešení pro zabránění difuze vlivem teplotního gradientu a vliv rozdílných vlastností molekul O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> na měření v různých směrech vůči gravitaci.

##### 3.1.1 Šíření respiračních plynů v příčném průřezu potrubí

Vliv rychlejšího šíření respiračních plynů podél stěn potrubí při konvekci kombinované s difuzí byl minimalizován dvanácti neprodyšnými pryžovými bariérami a nízkým průtokem ( $q = 2$  L/min). Ve chvíli, kdy došlo na obvodu k dosažení složení přiváděné směsi plynů, byl experiment ukončen. Konstrukce pro záznam šíření plynů v příčném průřezu byla vložena do měřicí komory zhruba 400 mm nad síťku v podélném směru potrubí a bylo provedeno pět měření. Následně byly zpracovány veškeré naměřené hodnoty z příčného průřezu, jak ukazuje Obr. 3.1.



**Obr. 3.1:** Procentuální dosažení přiváděné směsi plynů při 100% dosažení na stranách potrubí v závislosti na vzdálenosti od středu potrubí.



### 3.1.2 Vliv difuze při vyplachování vstupní komory

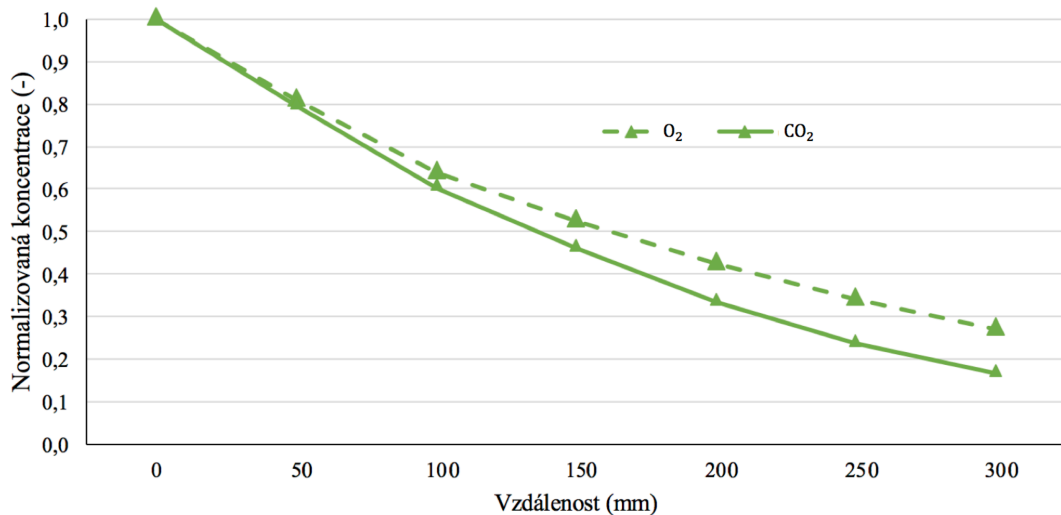
Během vyplachování vstupní komory byla měřitelná změna koncentrace na prvních dvou sondách (50 a 100 mm) v měřicí komoře v případě, že nebylo využito žádného řešení pro eliminaci příliš rychlé difuze plynů skrze síťku do měřicí komory. Při vyplachování vstupní komory se současným působením vzduchu shora potrubí o průtoku  $q = 0,5 \text{ L/min}$  nebyla zjištěna probíhající difuze skrze síťku do měřicí komory.

### 3.1.3 Chladicí směs

Směs vody, ledu a kuchyňské soli tvořící lázeň o teplotě okolo  $-20 \text{ °C}$  ochlazovala směs plynů v hadičce tak, že výstupní teplota směsi odpovídala aktuální venkovní teplotě.

### 3.1.4 Vliv vlastností $\text{O}_2$ a $\text{CO}_2$ na měření v různých směrech šíření vůči gravitaci

Na Obr. 3.2 je znázorněn vývoj normalizovaných koncentrací  $\text{O}_2$  a  $\text{CO}_2$  v podélném směru potrubí. Je patrné, že kyslík se šíří rychleji než oxid uhličitý v podélném směru potrubí ve směru gravitace.



**Obr. 3.2:** Normalizované naměřené koncentrace  $\text{O}_2$  a  $\text{CO}_2$  vztahované k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti zdroje působení.

## 3.2 Fyzikální vlastnosti perlitu

V tabulce 3.1 jsou zobrazeny třikrát naměřené a stanovené parametry suchého perlitu, které byly následně využity pro výpočty difuzních koeficientů v kapitole 3.5.

**Tabulka 3.1:** Stanovené fyzikální vlastnosti suchého perlitu.

Číslo měření	Hmotnost v nádobě (g)	Hustota ( $\text{kg} \cdot \text{m}^3$ )	Pórovitost (-)	Tortuosita (-)
1	245	153	0,78	0,92
2	257	160	0,79	0,92
3	255	159	0,78	0,92
Průměr	$252 \pm 6$	$157 \pm 2$	$0,78 \pm 0,01$	0,92

Velikost zrn suchého perlitu se pohybuje převážně okolo 1–5 mm, ale v souboru je i mnoho částic menších než 1 mm. U mokrého perlitu je velikost zrn také mezi 1 a 5 mm, ale jednotlivá zrna se vlivem vyšší adheze spojují ve větší útvary. Hustota mokrého perlitu byla mezi 250–255  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

## 3.3 Fyzikální vlastnosti sněhu

Naměřené a vypočítané fyzikální vlastnosti sněhu jsou uvedeny v tabulce 3.2. Měření probíhalo na sněhu měkkém z hlediska tvrdosti o hustotě  $150 \pm 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  před nasypáním do potrubí. Velikost zrn se pohybovala okolo 1 mm. Po každém měření byla změřena hustota sněhu ve 3 místech v podélném směru kvůli změně vlastností sněhu.

**Tabulka 3.2:** Stanovené fyzikální vlastnosti sněhu v podélném směru potrubí po ukončení experimentu.

Hloubka (m)	Hustota ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Pórovitost (-)	Tortuosita (-)
0,0–0,2	$153 \pm 7$	$0,83 \pm 0,01$	0,94
0,2–0,4	$221 \pm 9$	$0,76 \pm 0,01$	0,91
0,4–0,6	$289 \pm 13$	$0,68 \pm 0,02$	$0,88 \pm 0,01$

## 3.4 Čistá difuze $\text{O}_2$ a $\text{CO}_2$ v suchém perlitu, mokřém perlitu a sněhu

Kapitola se zabývá difuzními vlastnostmi kyslíku a oxidu uhličitého. Pro názornost je demonstrován vývoj koncentrací v časových intervalech pro různé materiály. Hlubší analýza byla dále provedena na datech z časového intervalu 60 minut od počátku působení směsi plynů. V tabulce 3.3 jsou uvedeny p-hodnoty Shapiro-Wilkova test normality a v tabulce 3.4 jsou p-hodnoty F-testu shody rozptylů. P-hodnoty jsou vyšší než 0,05, tudíž normalita ani shoda rozptylů nebyla zamítnuta.

**Tabulka 3.3:** Tabulka zobrazující p-hodnoty Shapiro-Wilkova testu normality pro jednotlivé materiály v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory v čase  $t = 60$  minut.

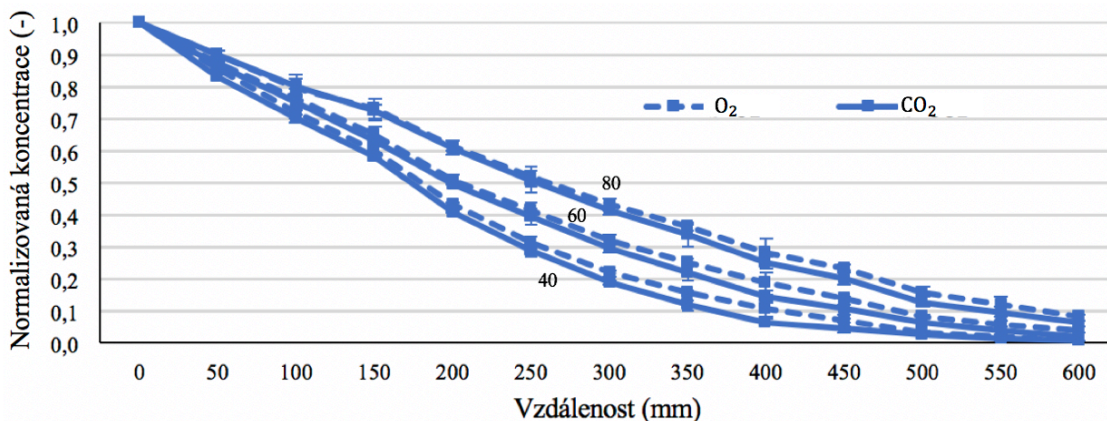
Vzdálenost od vstupní komory (mm)	Materiál - Respirační plyn					
	MP - O <sub>2</sub>	MP - CO <sub>2</sub>	SP - O <sub>2</sub>	SP - CO <sub>2</sub>	SS - O <sub>2</sub>	SS - CO <sub>2</sub>
50	0,73	0,20	0,68	0,85	0,61	0,48
100	0,68	0,22	0,62	0,90	0,83	0,64
150	0,72	0,78	0,91	0,30	0,10	0,92
200	0,31	0,62	0,97	0,34	0,08	0,91
250	0,76	0,78	0,07	0,24	0,05	0,11
300	0,42	0,82	0,57	0,56	0,23	0,83
350	0,36	0,72	0,90	0,45	0,73	0,57
400	0,73	0,80	0,98	0,65	0,62	0,85
450	0,27	0,74	0,85	0,41	0,75	0,71
500	0,61	0,79	0,57	0,24	0,83	0,94
550	0,20	0,79	0,57	0,07	0,85	0,50
600	0,71	0,68	0,69	0,06	0,69	0,58

**Tabulka 3.4:** Tabulka zobrazující p-hodnoty F-testu shody rozptylů mezi jednotlivými materiály v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory v čase  $t = 60$  minut.

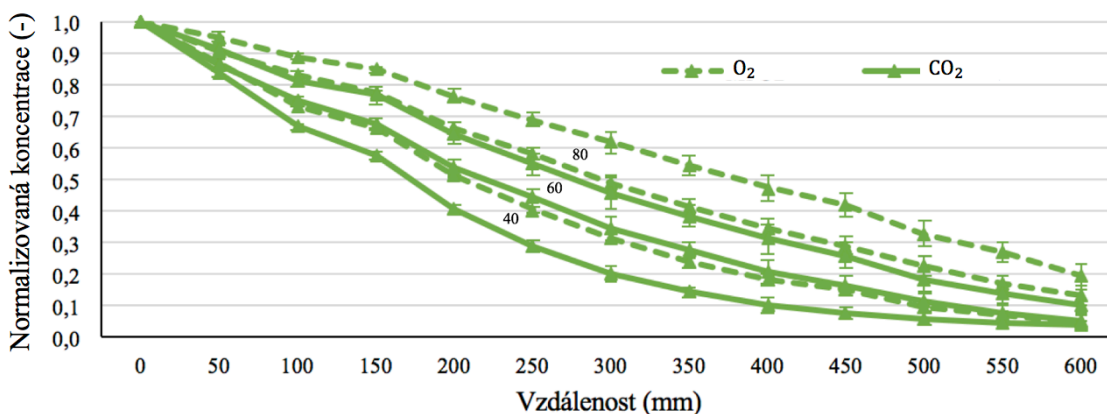
Vzdálenost od vstupní komory (mm)	Materiál/Materiál Respirační plyn					
	SP/MP		SP/SS		SS/MP	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
50	0,50	0,17	0,19	0,89	0,50	0,14
100	0,20	0,11	0,91	0,64	0,24	0,23
150	0,10	0,15	0,15	0,37	0,80	0,55
200	0,69	0,44	0,49	0,24	0,29	0,67
250	0,52	0,80	0,54	0,72	0,23	0,92
300	0,12	0,59	0,50	0,72	0,34	0,38
350	0,46	0,58	0,74	0,75	0,68	0,39
400	0,22	0,19	0,79	0,97	0,33	0,21
450	0,07	0,13	0,10	0,88	0,84	0,16
500	0,05	0,06	0,07	0,21	0,82	0,44
550	0,26	0,06	0,05	0,39	0,32	0,24
600	0,04	0,05	0,04	0,68	0,97	0,10

### 3.4.1 Časová závislost koncentrací prostorového rozložení

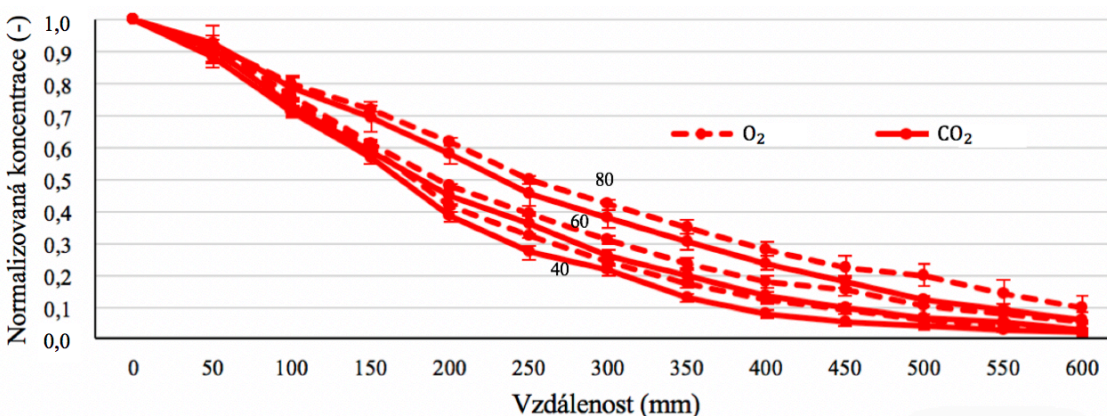
V následující kapitole je zaznamenán postupný růst normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory ve třech časových intervalech (40, 60 a 80 minut). Modře značený je na Obr. 3.3 suchý perlit, zeleně značený je na Obr. 3.4 mokrá perlit a na Obr. 3.5 je červeně označený sníh. Je patrné, že s rostoucím časem dochází k růstu normalizovaných koncentrací ve všech použitých materiálech pro kyslík i oxid uhličitý.



**Obr. 3.3:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu po 40, 60 a 80 minutách.



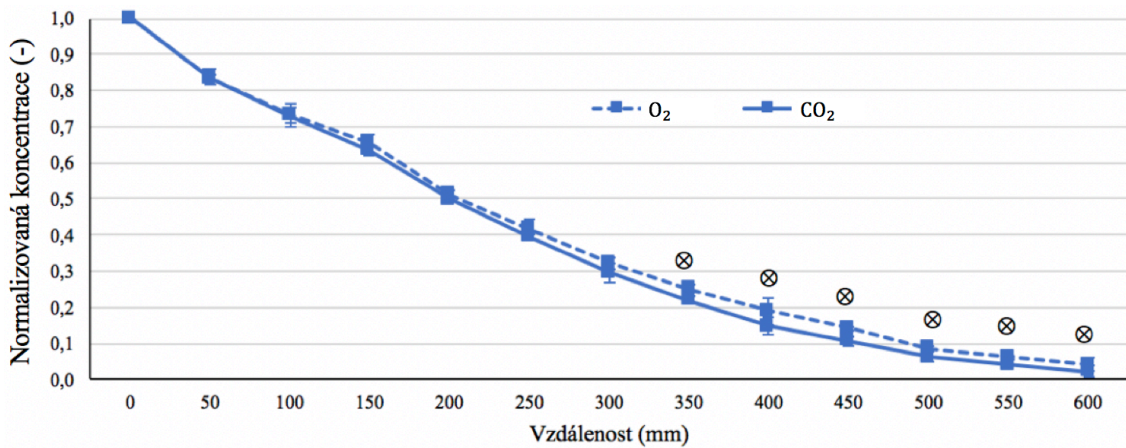
**Obr. 3.4:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v mokřém perlitu po 40, 60 a 80 minutách.



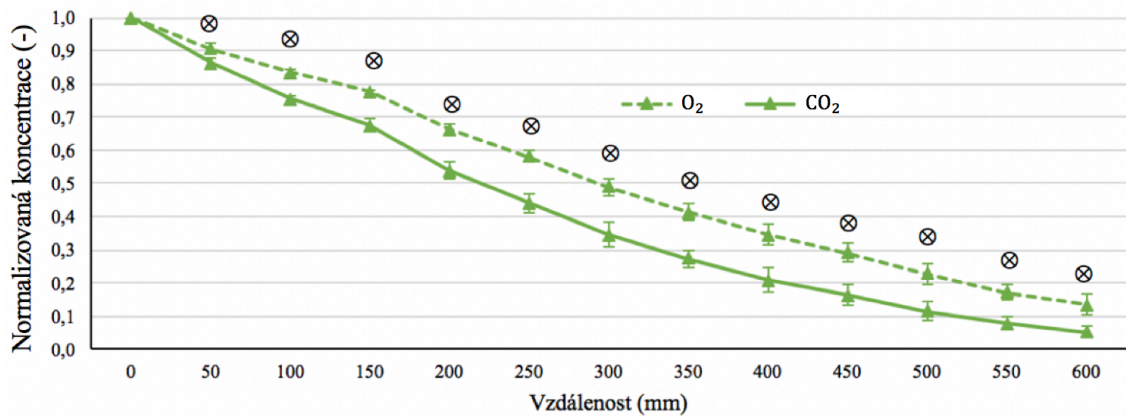
**Obr. 3.5:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory ve sněhu po 40, 60 a 80 minutách.

### 3.4.2 Studium rozdílu difuzivity mezi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>

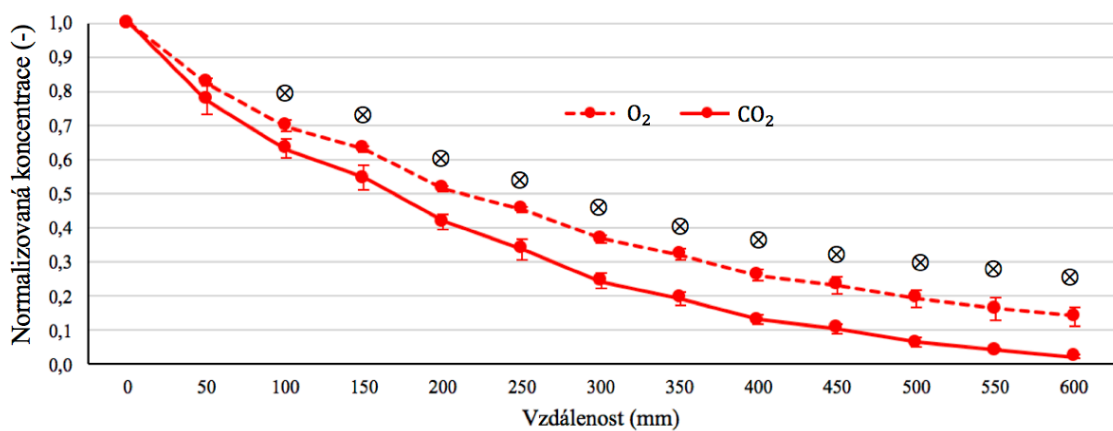
Na Obr. 3.6, 3.7 a 3.8 jsou vyhodnoceny normalizované koncentrace kyslíku a oxidu uhličitého v použitých materiálech po 60 minutách. Kyslík se ve všech materiálech šíří rychleji než oxid uhličitý.



**Obr. 3.6:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu (⊗ – statistická významnost mezi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>).

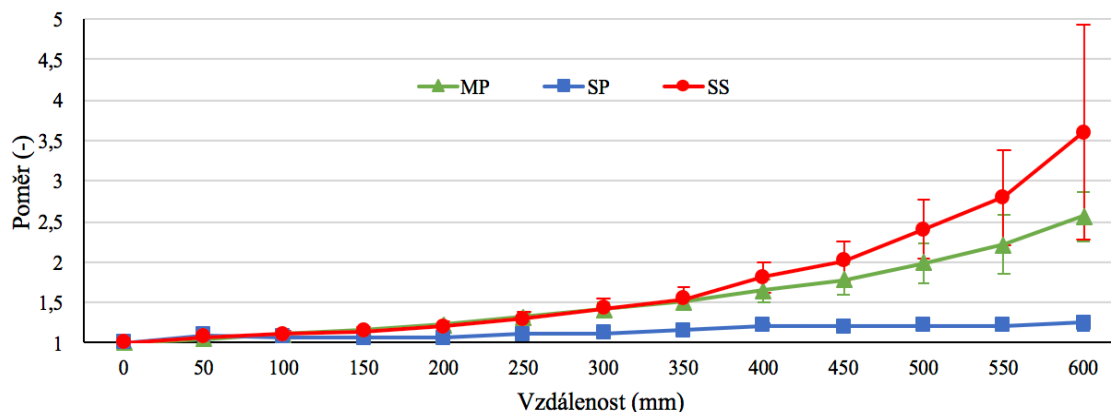


**Obr. 3.7:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v mokřém perlitu (⊗ – statistická významnost mezi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>).



**Obr. 3.8:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory ve sněhu (⊗ – statistická významnost mezi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>).

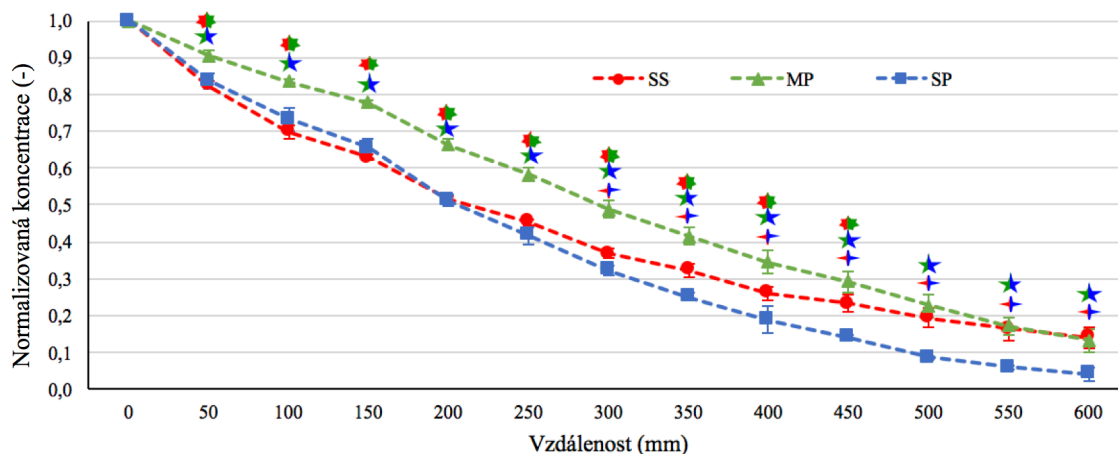
Na Obr. 3.9 je ukázán poměr mezi  $O_2$  a  $CO_2$  v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory. U suchého perlitu je poměr nízký, avšak u mokrého perlitu a sněhu je poměr mezi  $O_2$  a  $CO_2$  s rostoucí vzdáleností vstupní komory dvojnásobný až čtyřnásobný.



**Obr. 3.9:** Srovnání poměrů normalizovaných koncentrací mezi  $O_2$  a  $CO_2$  pro suchý perlit, mokřý perlit a sněh v závislosti na vzdálenosti vstupní komory.

### 3.4.3 Porovnání difuzivity $O_2$ mezi použitými materiály

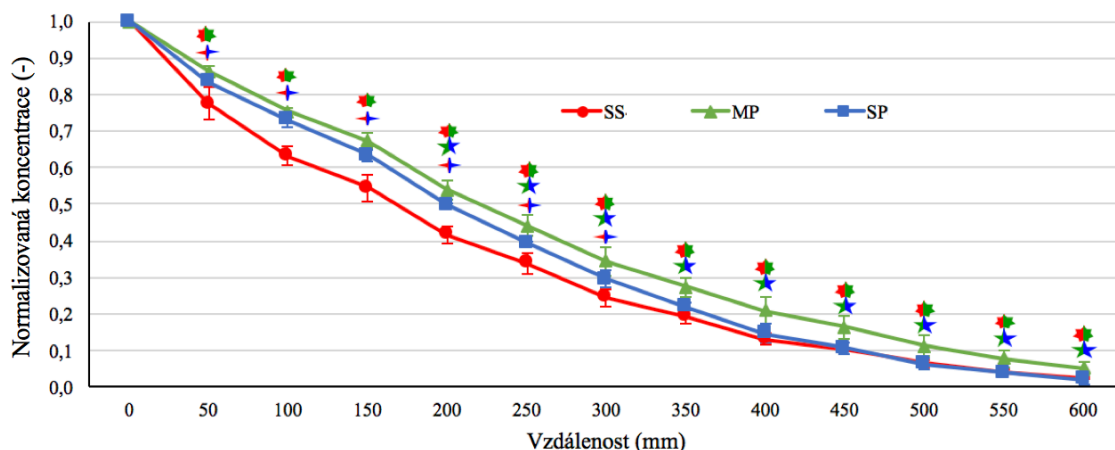
V této kapitole je vyhodnocen vývoj normalizované koncentrace kyslíku v podélném směru potrubí pro tři použité materiály. V zeleně značeném mokřém perlitu se kyslík šíří nejrychleji, což dokládá Obr. 3.10.



**Obr. 3.10:** Normalizované naměřené koncentrace  $O_2$  vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu, mokřém perlitu a sněhu (★ – statistická významnost mezi suchým perlitem a mokřým perlitem, ✦ – statistická významnost mezi suchým perlitem a sněhem, ✧ – statistická významnost mezi mokřým perlitem a sněhem).

### 3.4.4 Porovnání difuzivity CO<sub>2</sub> mezi použitými materiály

Na Obr. 3.11 je vyhodnocen vývoj normalizované koncentrace oxidu uhličitého v podélném směru potrubí pro tři použité materiály. V červeně značeném sněhu se oxid uhličitý šíří nejpomaleji.



**Obr. 3.11:** Normalizované naměřené koncentrace CO<sub>2</sub> vztahované k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu, mokřém perlitu a sněhu (★ – statistická významnost mezi suchým perlitem a mokřým perlitem, ✦ – statistická významnost mezi suchým perlitem a sněhem, ★✦ – statistická významnost mezi mokřým perlitem a sněhem).

### 3.5 Difuzní koeficient O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v suchém perlitu

Tato kapitola se zabývá srovnáním mezi naměřeným difuzním koeficientem a teoretickým difuzním koeficientem. Naměřený difuzní koeficient v tabulce 3.5 byl vypočítán z naměřených koncentrací v potrubí pomocí 2. Fickova zákona. Teoretický difuzní koeficient uvedený v tabulce 3.7 byl stanoven na základě fyzikálních vlastností materiálu a aktuálních atmosférických podmínek zobrazených v tabulce 3.6.

**Tabulka 3.5:** Naměřené difuzní koeficienty O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v suchém perlitu v čase  $t = 60$  minut.

Místo	Difuzní koeficient O <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	Difuzní koeficient CO <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	Poměr O <sub>2</sub> ku CO <sub>2</sub> (-)
Laboratoř	13,5 ± 0,7	11,6 ± 0,9	1,16 ± 0,09
Hory	12,7 ± 0,4	11,1 ± 0,9	1,14 ± 0,07

**Tabulka 3.6:** Naměřené a stanovené parametry pro výpočet teoretických difuzních koeficientů O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v suchém perlitu.

Místo	Pórovitost (-)	Tortuosita (-)	Teplota (°C)	Tlak (hPa)
Laboratoř	0,78	0,92	20 ± 1	991
Hory	0,78	0,92	0 ± 1	934 ± 4



**Tabulka 3.7:** Stanovené teoretické difuzní koeficienty O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v suchém perlitu.

Místo	Difuzní koeficient O <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	Difuzní koeficient CO <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	Poměr O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> (-)
Laboratoř	14,7	11,5	1,27
Hory	13,8	10,8	1,27

Ukázkový výpočet pro stanovení teoretického difuzního koeficientu v Příloze A.

### 3.5.1 Srovnání naměřených difuzních koeficientů O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> za různých atmosférických podmínek

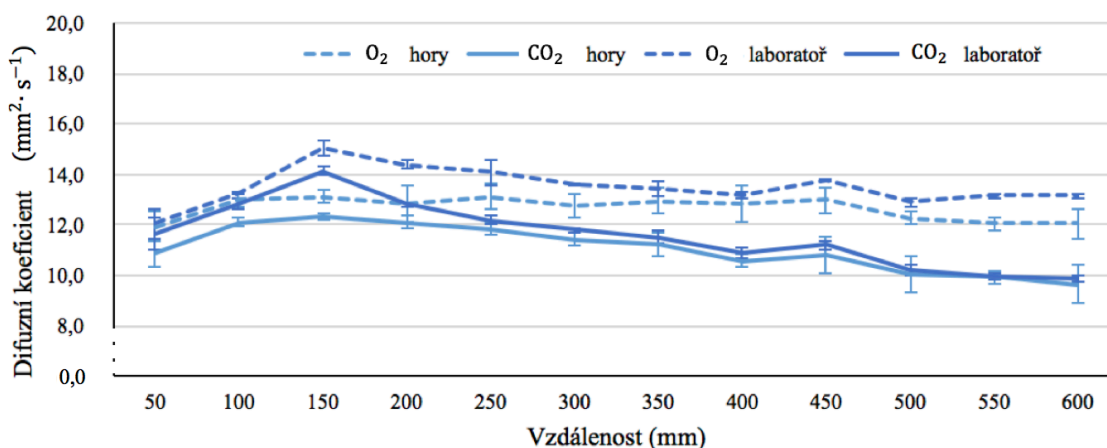
Na základě vztahu (3) byl vypočítán poměr naměřené teploty ku standardní teplotě (273,15 K) a umocněný korekčním faktorem podle Massmana et al. [6]. Analogicky bylo postupováno u výpočtu poměru tlaků, kdy byl vzat standardní tlak (101325 Pa) a vydělen aktuálním tlakem. Tyto poměry byly následně mezi sebou vynásobeny. Ostatní parametry byly pro oba experimenty stejné. Vypočítané poměry jsou vyhodnoceny v tabulce 3.8. Obr. 3.12 zobrazuje vyšší naměřený difuzní koeficient v laboratoři pro kyslík i oxid uhličitý v celé délce potrubí, než byl naměřen na horách.

**Tabulka 3.8:** Srovnání naměřených difuzních koeficientů O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v suchém perlitu.

Místo	Poměr standardního tlaku ku aktuálnímu tlaku (-)	Poměr teplot umocněný korekčním faktorem (-)	Součin poměru tlaků a poměru teplot (-)	Difuzní koeficient O <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	Difuzní koeficient CO <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
Laboratoř	1,02	1,14	1,16	13,5	11,6
Hory	1,09	1,00	1,09	12,7	11,1
<b>Poměr (-)</b>	0,94	1,14	1,07	1,07	1,05

Ukázkový výpočet pro stanovení poměru mezi aktuálními a standardními podmínkami podle vztahu (3) v Příloze A.

Ukázkový výpočet pro stanovení naměřených difuzních koeficientů O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> podle vzorce (5) v Příloze A.



**Obr. 3.12:** Srovnání naměřených difuzních koeficientů O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory po 60 minutách od začátku experimentu.



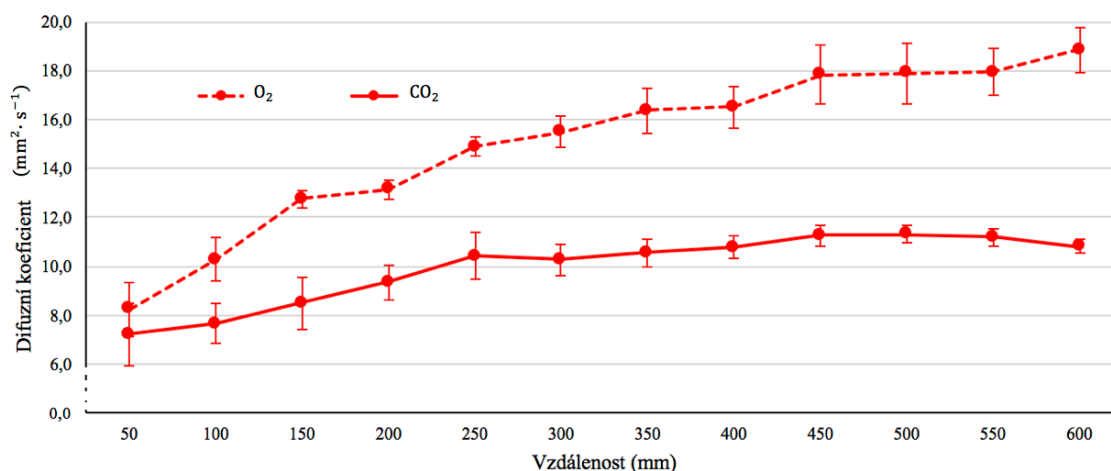
### 3.6 Difuzní koeficient O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> ve sněhu

Na základě naměřených koncentrací O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v celé délce potrubí v čase 60 minut byl vypočítán difuzní koeficient podle 2. Fickova zákona. Také byl vypočítán teoretický difuzní koeficient ze stanovených parametrů sněhu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.9.

**Tabulka 3.9:** Srovnání naměřených a teoretických difuzních koeficientů O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>.

Prostředí		Difuzní koeficient (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )				Poměr (-)
Hloubka (m)	Hustota (kg · m <sup>-3</sup> )	O <sub>2</sub>		CO <sub>2</sub>		O <sub>2</sub> ku CO <sub>2</sub> Naměřený
		Teoretický	Naměřený	Teoretický	Naměřený	
0,0–0,2	153 ± 7	14,9 ± 0,2	17,9 ± 0,4	11,7 ± 0,2	11,1 ± 0,2	1,63 ± 0,06
0,2–0,4	221 ± 9	13,4 ± 0,2	15,8 ± 0,7	10,3 ± 0,2	10,5 ± 0,2	1,50 ± 0,05
0,4–0,6	289 ± 13	11,4 ± 0,3	11,1 ± 1,9	9,0 ± 0,3	8,2 ± 0,8	1,35 ± 0,13

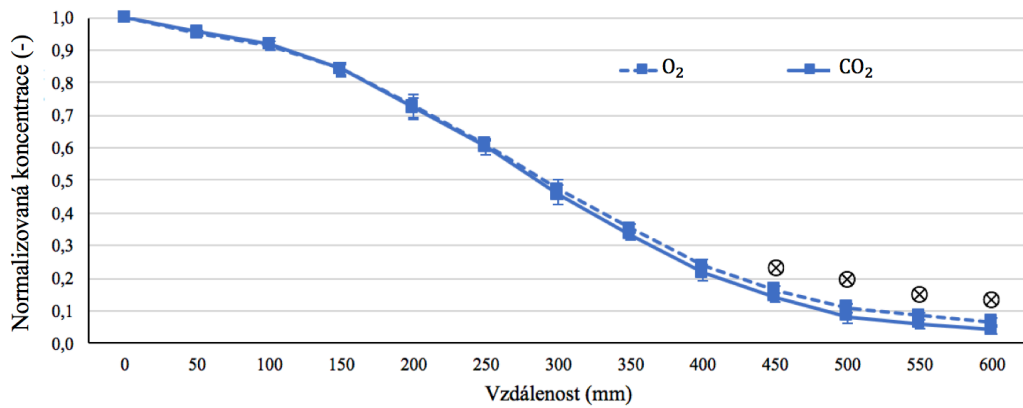
Na Obr. 3.13 je vyhodnocen naměřený difuzní koeficient kyslíku i oxidu uhličitého s rostoucím trendem v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory.



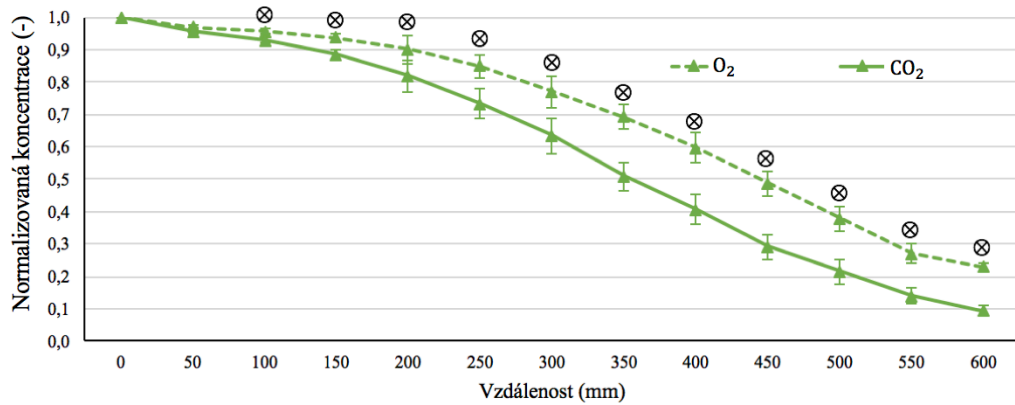
**Obr. 3.13:** Naměřený difuzní koeficient O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory po 60 minutách od začátku experimentu.

### 3.7 Konvekce kombinovaná s difuzí

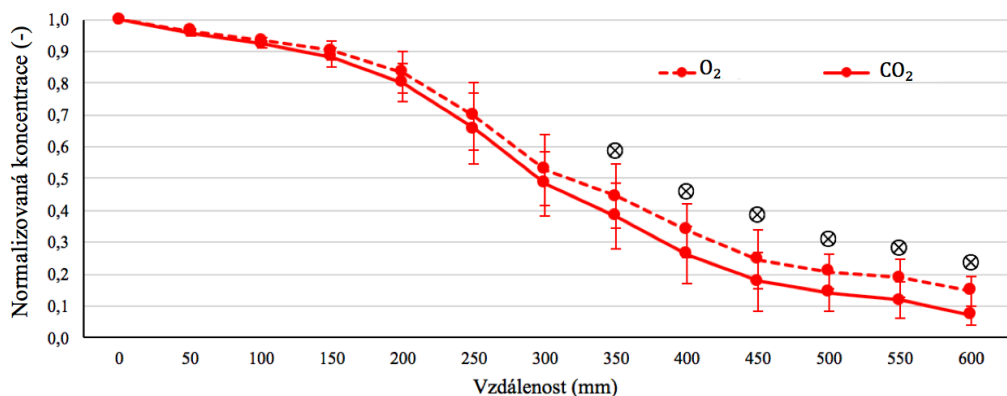
V následující kapitole je vyhodnocen vývoj normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory v časovém intervalu 10 minut. Průtok směsi plynů byl zvolen na 2 L/min, což odpovídá konvekčnímu pohybu potrubím na  $v = 30$  mm/min. Jsou mezi sebou porovnávány jednotlivé materiály na Obr. 3.18 a 3.19 a také respirační plyny v daném materiálu mezi sebou na Obr. 3.14, 3.15 a 3.16. Následně je na Obr. 3.17 znázorněn poměr koncentrací O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti vstupní komory.



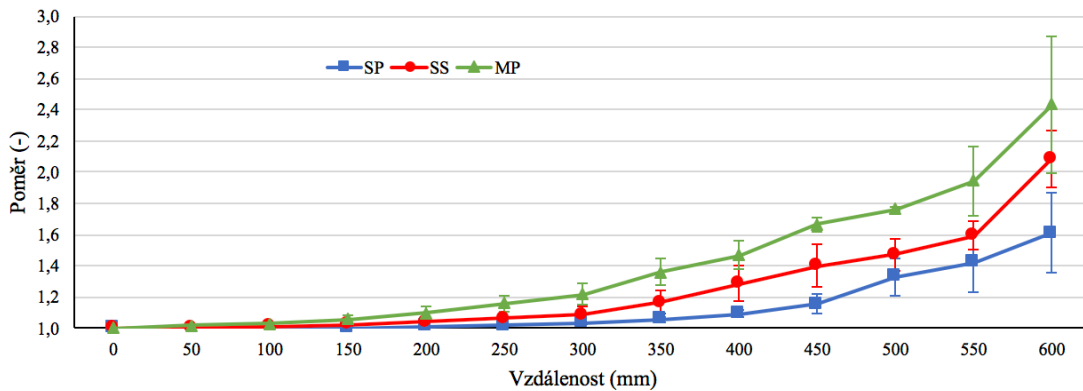
**Obr. 3.14:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu při konvekci kombinované s difuzí v čase  $t = 10$  minut (⊗ – statistická významnost mezi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>).



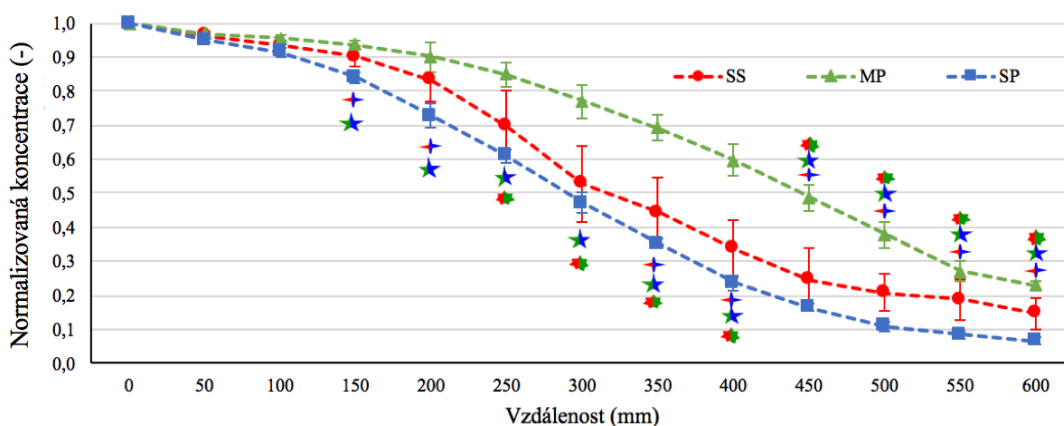
**Obr. 3.15:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v mokřém perlitu při konvekci kombinované s difuzí v čase  $t = 10$  minut (⊗ – statistická významnost mezi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>).



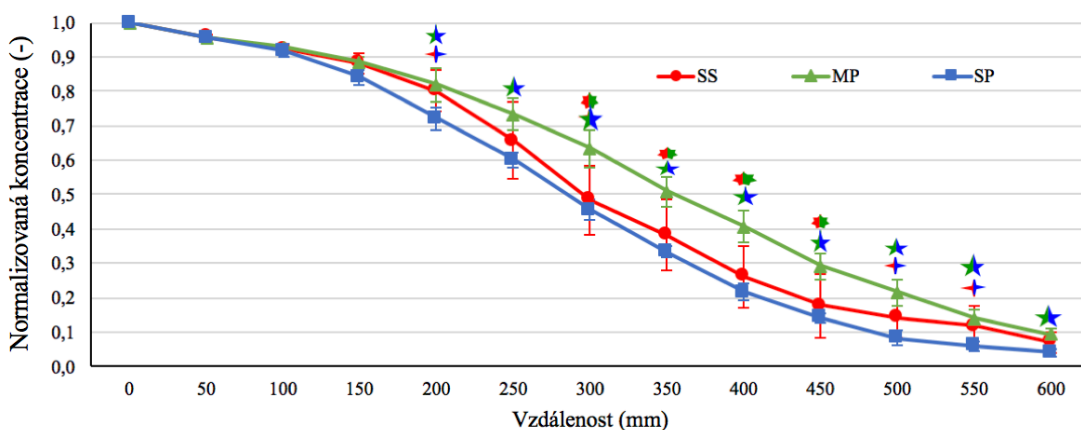
**Obr. 3.16:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi v závislosti na vzdálenosti vstupní komory ve sněhu při konvekci kombinované s difuzí v čase  $t = 10$  minut (⊗ – statistická významnost mezi O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>).



**Obr. 3.17:** Poměr O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti vstupní komory pro tři použité materiály při konvekci kombinované s difúzí v čase  $t = 10$  minut.



**Obr. 3.18:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi plynů v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu, mokrém perlitu a sněhu při konvekci kombinované s difúzí v čase  $t = 10$  minut (★ – statistická významnost mezi suchým perlitem a mokrým perlitem, † – statistická významnost mezi suchým perlitem a sněhem, ★† – statistická významnost mezi mokrým perlitem a sněhem).



**Obr. 3.19:** Normalizované naměřené koncentrace CO<sub>2</sub> vztažené k přiváděné směsi plynů v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu, mokrém perlitu a sněhu při konvekci kombinované s difúzí v čase  $t = 10$  minut (★ – statistická významnost mezi suchým perlitem a mokrým perlitem, † – statistická významnost mezi suchým perlitem a sněhem, ★† – statistická významnost mezi mokrým perlitem a sněhem).

## 4 Diskuze

Hlavním výsledkem bakalářské práce je sestavená aparatura pro studium difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů v různých materiálech. Ze zpracovaných grafů vyplývají rozdílné difuzní vlastnosti kyslíku a oxidu uhličitého ve všech použitých materiálech. Současně bylo zjištěno, že perlit by mohl mít za určité vlhkosti stejné difuzní či konvekční vlastnosti jako sníh. Dále bylo objeveno, že konvekčním pohybem se oba respirační plyny šíří stejně rychle.

### 4.1 Návrh a realizace měřicí aparatury

Aparatura byla zkonstruována tak, aby splňovala na začátku definované požadavky. Robustnost aparatury byla vyřešena corpusem se zesíleným PVC, což umožnilo následnou snadnou manipulaci. Kombinace vnitřního průměru (300 mm), dvanácti kruhových pryžových neprodyšných bariér po vnitřním obvodu potrubí a nízkého průtoku směsi plynů minimalizovala vliv jevu, kdy při konvekci kombinované s difuzí se v blízkosti stěn šířil o něco lépe kyslík i oxid uhličitý než uprostřed aparatury, což bylo způsobené nízkou adhezí jednotlivých zrn materiálu ke hladkým stěnám potrubí. Výsledek tohoto řešení je zaznamenán v kapitole 3.1.1. Jev by byl lépe eliminován jiným tvarem potrubí, ale to by byl problém z hlediska manipulace s potrubím a nebylo by možné použít pro výpočet jednorozměrný 2. Fickův zákon.

Délka aparatury (1200 mm) se jevila jako dostatečná pro záznam difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů. Pokud by byla aparatura výrazně delší, bylo by měření přesnější, avšak pro toto měření nerealizovatelné z hlediska manipulace s aparaturou a časové náročnosti. Ač byl objem vstupní komory minimalizován a bylo využito působení vzduchu proti směru vznikající difuze, bylo vyplachování vstupní komory poměrně komplikované. Síťka oddělující potrubí na dvě části byla natolik pevná, že udržela 15 kg materiálu bez porušení. Řešení vzduchotěsnosti za pomoci přezek a gumových zátek, kterými procházely infuzní jehly, bylo velmi kvalitní a pro toto použití ideální a bezporuchové. Využití infuzních jehel k záznamu distribuce respiračních plynů z potrubí bylo bezproblémové a infuzní jehly se neucpávaly.

Směs tvořená ze 3 plynů ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ) byla původně vyráběna pomocí směšovače plynů a analyzátoru plynů (KM 100-3MEM, Witt, Great Britain). Toto řešení bylo jednoduché, ale obtížně použitelné vzhledem k použitým velmi nízkým průtokům. Z těchto důvodů bylo využito pro smísení plynů redukčních ventilů. Řešení není příliš elegantní, avšak je dostatečně přesné a jednoduché. Rychlost průtoku ( $q = 2$  L/min) byla volena tak, aby byl dostatečný čas na manipulaci s trojcestnými ventily a pro minimalizaci šíření plynů po stranách potrubí.

### 4.2 Pilotní měření

Použití perlitu pro pilotní měření, kde bylo především ověřováno, zda aparatura funguje podle požadavků, se zdálo být vhodné, protože zjištěná rychlost difuze respiračních plynů odpovídala řádově rychlosti difuze respiračních plynů ve sněhu naměřené ve studii Schwandera et al. [23]. Z tohoto důvodu byl následně perlit použit při realizaci terénního měření.

### 4.2.1 Šíření respiračních plynů v příčném průřezu potrubí

Řešení použitím dvanácti neprodyšných pryžových bariér a nízkého průtoku problém šíření respiračních plynů podél stěny potrubí při konvekci kombinované s difuzí do značné míry vyřešil, avšak byl na tento jev brán i nadále zřetel. Ve chvíli, kdy došlo k dosažení přiváděné směsi podél stěn potrubí, byla koncentrace oxidu uhličitého dosažena uprostřed potrubí pouze z 81–90 % a koncentrace kyslíku z 82–94 %.

### 4.2.2 Vliv difuze při vyplachování vstupní komory

Nízký průtok vzduchu shora potrubí ( $q = 0,5$  L/min) byl dostatečný, aby zamezil difuzi vznikající při vyplachování vstupní komory směsí plynů, ale dostatečně malý, aby stále docházelo k vyplachování vstupní komory potrubí přiváděnou směsí plynů. Toto řešení prodloužilo dobu vyplachování vstupní komory o zhruba 2 minuty, ale problém s předčasnou difuzí vyřešil.

### 4.2.3 Chladicí směs

Při pilotních měřeních v laboratoři nenastával problém s rozdílnou teplotou v tlakových lahvích a teplotou v prostředí. Aby nedocházelo k zamrznání redukčních a škrticích ventilů, musely být tlakové lahve uvnitř budovy, kde byla o 8 °C vyšší teplota. I přes 10 m dlouhé hadičky ležící ve sněhu nedocházelo k dostatečnému ochlazení přiváděné směsi. Pro zabránění difuze vlivem teplotního gradientu bylo využito znalosti fázového diagramu směsi vody, ledu a soli, pomocí kterého byla tvořena chladicí směs. Toto řešení se ukázalo jako již dostatečné. Teplota přiváděné směsi plynů do vstupní komory byla ověřována a neodchylovala se více než o 0,5 °C od aktuální venkovní teploty. Problém nastával, pokud byla okolní teplota vyšší než 0 °C, protože by docházelo k odtávání sněhu, proto měření se sněhem nebylo prováděno při vyšších teplotách.

### 4.2.4 Vliv vlastností O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> na měření v různých směrech šíření vůči gravitaci

Hlavním zjištěním tohoto experimentu je rychlejší difuzivita kyslíku než oxidu uhličitého i ve směru gravitace, což by mohlo značit, že nemá na výsledky vliv vyšší hmotnost molekuly CO<sub>2</sub>. Při měření difuze respiračních plynů ve směru gravitace bylo využito aparatury v opačném směru. Směs plynů byla přiváděna shora skrz plastové víko s průchodkou ve směru difuze do objemově větší vstupní komory, což znemožňuje přímé srovnání s měřením v ostatních experimentech. Autor se domnívá, že by toto zjištění mělo být dostatečné pro možnost provádění experimentů pouze v jednom směru vůči gravitaci, ale nevylučuje vliv gravitace na výsledky.

## 4.3 Fyzikální vlastnosti materiálů

Pro možnost vypočtení teoretického difuzního koeficientu respiračních plynů podle studie Massmana et al. [6] ve sněhu a perlitu bylo potřeba zjistit fyzikální vlastnosti tohoto materiálu. Za použití rigidní nádoby byla zjištěna pórovitost suchého

perlitu  $\phi = 0,78$ . Kvůli obtížnému měření byla tortuozita stanovena podle studie Masta et al. [5] jako pórovitost na jednu třetinu. Pórovitost sněhu se pohybovala okolo 0,68–0,84 podle výšky sněhové vrstvy. Velikost zrn suchého perlitu byla 1–5 mm, ale byly zde i mnohem menší částice. V mokřém perlitu byla velikost zrn stejná jako v suchém perlitu, ale vlivem adheze se zrna spojovala ve větší útvary, což mohlo zvyšovat permeabilitu. Měření probíhalo na sněhu, u kterého docházelo k prvotní přeměně částic nejčastěji vlivem větru. Zrna už jsou zaoblenější velikosti okolo 1 mm a zaklíňují se mezi sebe, což způsobuje větší soudržnost sněhu. Vzhledem k hustotě sněhu při měření byla zvolena hustota mokřého perlitu tak, aby bylo možné tyto materiály porovnat mezi sebou.

#### 4.4 Čistá difuze respiračních plynů

V kapitole 3.4.1 je demonstrován postupný nárůst koncentrací kyslíku i oxidu uhličitého v jednotlivých časových intervalech. Z Obr. 3.3, 3.4 a 3.5 je patrné, že ve větší vzdálenosti od vstupní komory se difuze zpomaluje, je to nejspíše způsobené vlivem působící difuze vzduchu z druhé strany potrubí. Normalizovaná koncentrace  $O_2$  a  $CO_2$  v časových intervalech 40, 60 a 80 minut postupně roste, ale rozdíl mezi kyslíkem a oxidem uhličitým se příliš nemění. Hlubší analýza pak byla provedena na intervalu 60 minut, kdy byla na nejvzdálenější sondě měřitelná změna.

Při porovnání difuzních vlastností mezi kyslíkem a oxidem uhličitým v kapitole 3.4.2 byly zjištěny rozdílné vlastnosti ve všech materiálech. V suchém perlitu, kde by měla být vlhkost nulová, byla zjištěna statistická významnost mezi molekulami  $O_2$  a  $CO_2$  ve vzdálenostech od 350 mm od vstupní komory. Rozdíl je nejspíše způsobený fyzikálními a chemickými rozdíly mezi molekulami respiračních plynů. Určitý vliv by mohla mít vlhkost prostředí, která by způsobila zvlhčení suchého perlitu a tím i možný vliv na difuzní vlastnosti kyslíku a oxidu uhličitého. Významnější rozdíl byl zjištěn u mokřého perlitu i sněhu, kde je rozdíl mezi respiračními plyny značný, což ukazují obrázky 3.7 a 3.8. Autor se domnívá, že je to způsobené vlivem vysoké adsorpce  $CO_2$  ve vodě, která je v kapalném stavu v mokřém perlitu i ve sněhu. Se snižující se hustotou sněhu ve podélném směru potrubí byl rozdíl mezi kyslíkem a oxidem uhličitým vyšší. Je možné, že by byl výsledek odlišný, pokud by byla okolní teplota výrazně nižší. Při měření o teplotě okolo  $0^\circ C$  se ve sněhu může vyskytovat více kapalné vody než za nižších teplot a tím by mohla být způsobena vyšší adsorpce  $CO_2$ . Podle studie Ahn et al. [17] je adsorpce  $CO_2$  v ledu velmi nízká a téměř neměřitelná.

V mokřém perlitu se šíří kyslík výrazně rychleji než v suchém perlitu. Autor se domnívá, že je způsobené tím, že voda či led v mokřém perlitu ucpává póry v jednotlivých zrnech, což zapříčiní rychlejší obtékání molekul kolem jednotlivých zrn. Dále se zrna mokřého perlitu spojují ve větší útvary, což by mohlo zvýšit permeabilitu, která tekutinám umožňuje rychleji difundovat. Ve vzdálenostech do 250 mm od vstupní komory má sníh podobné difuzní vlastnosti jako suchý perlit, jak dokumentuje obrázek 3.10. S klesající hustotou sněhu se difuzní vlastnosti přibližují spíše mokřému perlitu. Při srovnání difuzních vlastností oxidu uhličitého v různých materiálech byly výsledky odlišné od kyslíku. Rozdíl mezi suchým a mokřým perlitem je výrazně nižší. Autor předpokládá, že to způsobuje adsorpce  $CO_2$  ve vodě. Vzhledem k možné adsorpci  $CO_2$  v kapalně vodě obsažené ve sněhu jsou difuzní vlastnosti výrazně pomalejší než u obou perlitů. Až při velmi nízké hustotě sněhu se přibližují difuzní vlastnosti suchému perlitu.

## 4.5 Difuzní koeficient

Vztah vytvořený ve studii Massmana et al. [6] pro výpočet teoretického difuzního koeficientu ve sněhu byl v této práci aplikován na suchý perlit pro ověření, zda by suchý perlit mohl odpovídat sněhu z hlediska difuzních vlastností. Je třeba dodat, že vztah byl vytvořen empiricky na základě experimentů na sněhu a tortuosita je odhadována podle studie Masta et al. [5]. Naměřený difuzní koeficient  $O_2$  v laboratoři i na horách byl zhruba o  $1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (relativní odchylka do 8 %) nižší, avšak difuzní koeficient  $CO_2$  odpovídal teoretické hodnotě. Teoretický poměr mezi kyslíkem a oxidem uhličitým by měl být 1,27. Mnou naměřený poměr byl  $1,16 \pm 0,09$  v laboratoři a  $1,14 \pm 0,07$  ve sněhu, jak je znázorněno v tabulce 3.5. V kapitole 3.5.1 byla porovnána rychlost difuze v závislosti na atmosférických podmínkách na základě vztahu (3). V laboratoři byla vyšší teplota, což způsobuje rychlejší pohyb částic, avšak tlak byl vyšší než na horách, což způsobuje pomalejší pohyb molekul plynů. Rychlost pohybu by měla být teoreticky 1,07krát vyšší v laboratoři než na horách. Poměr mezi naměřenými difuzními koeficienty  $O_2$  byl 1,07 a mezi  $CO_2$  byl 1,05, což velmi dobře odpovídá teoretickému poměru. Na obrázku 3.12 je znázorněn rozdíl pro oba respirační plyny podle prostředí. Difuzní koeficient je v celé délce potrubí téměř neměnný, pouze první sonda u všech měření má výrazně nižší difuzní koeficient než ostatní místa. V nejbližších místech difuzní koeficient mírně klesá, je možné, že je to způsobené příliš vysokým vlivem difuze z druhé strany potrubí, což mohl způsobit vítr. Do dalších měření by bylo vhodné použít ochranu před větrem.

Teoretické i naměřené difuzní koeficienty ve sněhu pro oba respirační plyny jsou znázorněny a mezi sebou porovnány v kapitole 3.6. Aby v potrubí nevznikaly velké dutiny, bylo nutné aparaturou dostatečně třepat. Tím docházelo vlivem tlaku vyšších vrstev na nižší ke změnám struktury a vlastností sněhu. V nejvyšší hloubce, kde se hustota pohybovala okolo  $289 \pm 13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , byl naměřený difuzní koeficient kyslíku  $11,1 \pm 1,9 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (velký rozptyl způsobila 1. sonda, kde byla pro všechny měření a všechny materiály výrazně nižší hodnota). Tato hodnota velmi dobře odpovídala teoretické hodnotě. V menší hloubce byl naměřený difuzní koeficient kyslíku o  $2\text{--}3 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (relativní odchylka do 15 %) vyšší, než by měl teoreticky být. Je možné, že je to způsobené šířením plynů podél stěn potrubí, které mohly být ohřívány manipulací s aparaturou nebo působením slunečního záření, což by způsobovalo tání sněhu podél stěn potrubí. Naměřené difuzní koeficienty  $CO_2$  lépe odpovídají teoretickým hodnotám, ale autor si myslí, že je to nejspíše způsobené rozpouštěním oxidu uhličitého ve vodě, která je v kapalném stavu ve sněhu. Poměr mezi kyslíkem a oxidem uhličitým se se snižující se hloubkou zvyšuje. Autor se domnívá, že by to mohlo být způsobené výraznější adsorpcí  $CO_2$  v nižších hustotách. Na obrázku 3.13 je znázorněn zvyšující se difuzní koeficient kyslíku i oxidu uhličitého v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory. Je zřejmé, že strmější nárůst je u kyslíku, což může být také způsobeno možnou adsorpcí oxidu uhličitého. Při dalších měřeních by bylo vhodné využít nějakého principu chlazení potrubí, aby v případě vyšší teploty než  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  nedocházelo k odtávání sněhu podél stěn potrubí.

Ve studii Solomon et al. [20] probíhalo měření distribuce  $CO_2$  z půdy do ovzduší skrze sníh. Naměřený difuzní koeficient  $CO_2$  ve sněhu se pohyboval od 2,6 do  $10 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Měření však probíhalo zejména ve sněhu o vyšší hustotě než

v této práci. Měření Schwandera et al. [23] probíhalo ve firmu s porozitou mezi 0,13 a 0,5. Změřené difuzní koeficienty  $\text{CO}_2$  byl  $1\text{--}7 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  a u  $\text{O}_2$  od  $2 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  do  $9 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . V této práci byla pórovitost sněhu mezi 0,68 a 0,83. Autorem naměřené difuzní koeficienty v při nižší hustotě sněhu pro oba respirační plyny poměrně dobře navazují na ty, které byly naměřené ve zmíněné studii [23].

## 4.6 Konvekce kombinovaná s difuzí

Druhým experimentem bylo měření konvekce kombinované s difuzí. V suchém perlitu, kde by měla být nulová vlhkost, se oba respirační plyny šíří stejnou rychlostí až do vzdálenosti 300 mm, jak dokumentuje Obr. 3.14. To je místo, kam by se měly molekuly respiračních plynů dostat konvekčním pohybem za 10 minut. Ovšem je nutné zmínit, že po stěnách potrubí se nejspíše dostaly oba plyny o kus dále. Ve větší vzdálenosti, kde již působí difuze, se rychleji šíří kyslík jako v experimentu čisté difuze. Obdobně je tomu u sněhu, kde je sice malý rozdíl již při konvekčním pohybu, ale statisticky významný až vlivem difuze, jak je znázorněno na Obr. 3.16. U mokrého perlitu je rozdíl mezi kyslíkem a oxidem uhličitým značný po celé délce potrubí, ale není tak velký v nižších vzdálenostech, kde působí konvekce.

Při porovnání materiálů mezi sebou bylo zjištěno, že za určité vlhkosti perlitu (vlhkost mezi suchým a mokřím perlitem) by měl snít stejné konvekční a difuzní vlastnosti, protože křivka vývoje koncentrace v závislosti na vzdálenosti od vstupní komory se nacházela mezi křivkami suchého a mokrého perlitu. Při měření na sněhu byl poměrně vysoký rozptyl. Někdy se vývoj koncentrací blížil spíše mokrému perlitu a někdy spíše suchému perlitu, což mohlo být způsobené mírnou variabilitou použitého sněhu či rozdílným protřepáním potrubí (lehká variabilita dutin). Při konvekčním pohybu respiračních plynů se však snít přibližoval spíše mokrému perlitu z hlediska konvekčních vlastností.

## 4.7 Vliv počtu měření

Musím podotknout, že experiment proběhl na malém počtu vzorku a bylo by vhodné provést více měření. Vzhledem k trvání jednoho experimentu okolo dvou až tří hodin nebylo možné uskutečnit více měření. Bylo také důležité, aby měl snít pořád stejné fyzikální vlastnosti jako jsou hustota či velikost zrn. Také má do určité míry vliv teplota, která během dne kolísala a měření muselo probíhat za časných či pozdních hodin, aby snít nebyl příliš roztátý, což by znemožnilo měření kvůli tekoucí vodě v aparatuře.



## 5 Závěr

Pro studium difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů byla navržena a sestavena aparatura, která umožňovala měření těchto vlastností v laboratorních podmínkách i v terénu. Data byla zaznamenána pomocí monitoru vitálních funkcí Datex-Ohmeda (GE Healthcare, Chicago, USA) s modulem pro analýzu plynů a následně zpracovávána v prostředích STATISTICA (TIBCO Software Inc., California, USA) a Microsoft Excel (Microsoft, USA). Na základě vyhodnocených grafů bylo zjištěno, že se v suchém perlitu kyslík šíří vlivem difuze rychleji než oxid uhličitý. V mokřém perlitu a ve sněhu je difuzivita kyslíku výrazně rychlejší než difuzivita oxidu uhličitého. Autor se domnívá, že je to nejspíše způsobené rozpouštěním  $\text{CO}_2$  ve vodě, která je v mokřém perlitu a ve sněhu v kapalném stavu.

Konvekčním pohybem se oba respirační plyny šíří stejně rychle v suchém perlitu a ve sněhu. Ve větších vzdálenostech, kde působí pouze koncentrační gradient, se opět rychleji šíří kyslík. V mokřém perlitu se při konvekci šíří lépe kyslík nejspíše vlivem adsorpce oxidu uhličitého, ale není mezi těmito plyny takový rozdíl jako u difuzního pohybu.

Tento výzkum by mohl pomoci pochopit jednotlivé děje, které nastávají při dýchání pod lavinovým sněhem a následně by mohl výzkum sloužit pro úpravu a návrh nových preventivních pomůcek pro oběti zasypané lavinovým sněhem. Z popsaných mechanismů v této práci vyplynuly rychlejší difuzní vlastnosti kyslíku, které by mohly způsobovat vyšší dotaci kyslíku pro lidský organismus při dýchání pod lavinovým sněhem, avšak při dýchání záleží i na dalších procesech a parametrech, jako je například dechová práce.

V rámci hlubšího pochopení problematiky by bylo vhodné provést více měření, zohlednit vliv gravitace a také provést měření na sněhu o různých hustotách.

## Seznam použité literatury:

- [1] TECHEL, F., F. JARRY, G. KRONTHALER, S. MITTERER, P. NAIRZ, M. VALT a G. DARMS. Avalanche fatalities in the European Alps: long-term trends and statistics. *Geographica Helvetica* [online]. 2016, (71), 147--159 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.5194/gh-71-147-2016. Dostupné z: <https://www.geogr-helv.net/71/147/2016/>
- [2] Statistics and reporting. Colorado Avalanche Information center [online]. [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://avalanche.state.co.us/accidents/statistics-and-reporting/>
- [3] MCINTOSH, Scott E., Colin K. GRISSOM, Christopher R. OLIVARES, Bruce TREMPER a Han S. KIM. Cause of Death in Avalanche Fatalities. *Wilderness & Environmental Medicine* [online]. 2007, 2007, (18), 293-297 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1080603207702582>
- [4] STRAPAZZON, Giacomo, Peter PAAL, Jürg SCHWEIZER a Markus FALK. Effects of snow properties on humans breathing into an artificial air pocket – an experimental field study. *Nature: Scientific reports* [online]. 2017 [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.1038/s41598-017-17960-4. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-17960-4.pdf>
- [5] MAST, M. Alisa, Wickland P. KIMBERLY, Robert T. STRIEGL a David W. CLOW. Winter fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado. *Global Biogeochemical Cycles* [online]. 1998, 607--620 [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.1029/98GB02313. ISSN 0886-6236. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/98GB02313>
- [6] MASSMAN, W. J., R. A. SOMMERFELD, A. R. MOSIER, K. F. ZELLER, T. J. HEHN a S. G. ROCHELLE. A model investigation of turbulence-driven pressure-pumping effects on the rate of diffusion of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, and CH<sub>4</sub> through layered snowpacks. *Journal of Geophysical Research Atmospheres: Scientific reports* [online]. 1997, 102(D15):18851 [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.1029/97JD00844. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/260700002\\_A\\_model\\_investigation\\_of\\_turbulence-driven\\_pressure-pumping\\_effects\\_on\\_the\\_rate\\_of\\_diffusion\\_of\\_CO2\\_N2O\\_and\\_CH4\\_through\\_layered\\_snowpacks](https://www.researchgate.net/publication/260700002_A_model_investigation_of_turbulence-driven_pressure-pumping_effects_on_the_rate_of_diffusion_of_CO2_N2O_and_CH4_through_layered_snowpacks)
- [7] CHADIMA, David. *Vliv dechového vzoru na přežití člověka zasypaného lavinových sněhem*. Kladno, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Ing. Václav Ort.
- [8] POLING, Bruce E., John M. PRAUSNITZ a John P. O'CONNELL. *The Properties of Gases and Liquids*. Fifth edition. New York: McGraw-Hill Education, 1987. ISBN 9780070116825.
- [9] PROKSCH, Martin, Nick RUTTER, Charles FIERZ a Martin SCHNEEBELI. Intercomparison of snow density measurements: bias, precision, and vertical resolution. *The Cryosphere* [online]. 2016, 10(1), 371-384 [cit. 2018-11-1]. DOI: 10.5194/tc-10-371-2016. ISSN 1994-0424. Dostupné z: <http://www.the-cryosphere.net/10/371/2016/>

- [10] ALBERT, Mary R., Edward F. SHULTZ and Frank E. PERRON. Snow and firn permeability at Siple Dome, Antarctica. *Annals of Glaciology* [online]. 2000 B.m.: Cambridge University Press, vol. 31, pp. 353–356. [cit. 2018-11-03] DOI:10.3189/172756400781820273. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/annals-of-glaciology/article/snow-and-firn-permeability-at-siple-dome-antarctica/5FAF88CCA571A1F9C35EC3CA8164AE2F/core-reader>
- [11] GRISSOM, Colin K., Martin I. RADWIN, Chris H. HARMSTON, HIRSHBERG, CROWLEY. Respiration During Snow Burial Using an Artificial Air Pocket. *JAMA*. [online]. 2000; 283(17):2266–2271. [cit. 2018-11-07]. DOI:10.1001/jama.283.17.2266. Dostupné z: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/192660>
- [12] CHOI, Jungyill, Martha H. CONKLIN, Roger C. BALES a Richard A. SOMMERFELD. Experimental investigation of SO<sub>2</sub> uptake in snow. *Atmospheric Environment* [online]. 1999, 2000(34), 793–801 [cit. 2018-11-07]. DOI: 0.1016/S1352-2310(99)00286-1. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/dba1/5dda368a71baa440a6d64db5840882520532.pdf>
- [13] HERBERT, B. M. J., C. J. HALSALL, K. C. JONES a R. KALLENBORN. Field investigation into the diffusion of semi-volatile organic compounds into fresh and aged snow. *Atmospheric Environment* [online]. 2006, (40(8), 1385–1393 [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.10.055. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231005010411>
- [14] AHN, Jinho, Melissa HEADLY, Martin WAHLEN, Edward J. BROOK, Paul A. MAYEWSKI a Kendrick C. TAYLOR. CO<sub>2</sub> diffusion in polar ice: observations from naturally formed CO<sub>2</sub> spikes in the Siple Dome (Antarctica) ice core. *Journal of Glaciology* [online]. 2008, 54(187), 685-695 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.3189/002214308786570764. ISSN 0022-1430. Dostupné z: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022143000208794/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022143000208794/type/journal_article)
- [15] BRUGGER, Hermann, Günther SUMANN, Roland MEISTER, Liselotte ADLER-KASTNER, Peter MAIR, Hanns Christian GUNGA, Wolfgang SCHOBERSBERGER a Markus FALK. Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in snow: implications for avalanche survival. *Resuscitation* [online]. 2003, 58(1), 81-88 [cit. 2018-11-11]. DOI: 10.1016/S0300-9572(03)00113-8. ISSN 03009572. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300957203001138>
- [16] Oxygen – Solubility in Fresh Water and Sea Water. *Engineering ToolBox* [online]. 2005 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-solubility-water-d\\_841.html](https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-solubility-water-d_841.html)
- [17] Solubility of Gases in Water. *Engineering ToolBox* [online]. 2008 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d\\_1148.html](https://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d_1148.html)

- [18] SÁNCHEZ-CAÑETE, E. P., C. OVONARTE., SERRANO-ORTIZ, J. Curiel YUSTE, O. PÉREZ-PRIEGO, F. DOMINGO, A. S. KOWALSKI. Winds induce CO<sub>2</sub> exchange with the atmosphere and vadose zone transport in a karstic ecosystem. *Journal of Geophysical research: Biogeosciences*. [online]. 2016, 121, 2049–2063. [cit. 2018-11-07]. doi:10.1002/2016JG003500. Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2016JG003500>
- [19] BOWLING, D. R. a W. J. MASSMAN. Persistent wind-induced enhancement of diffusive CO<sub>2</sub> transport in a mountain forest snowpack. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2011, (116, G04006) [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.1029/2011JG001722. Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2011JG001722>
- [20] SOLOMON, D. K. a T. E. CERLING. The annual carbon dioxide cycle in a montane soil: Observations, modeling, and implications for weathering. *Water Resources Research* [online]. 1987, (23(12), 2257–2265 [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.1029/WR023i012p02257. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR023i012p02257>
- [21] SEOK, B., HELMIG, D., WILLIAMS, M.W. et al. An automated system for continuous measurements of trace gas fluxes through snow: an evaluation of the gas diffusion method at a subalpine forest site, Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry* [online]. 2009, 95, 95-113 [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.1007/s10533-009-9302-3. ISSN: 1573-515X. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-009-9302-3>
- [22] PINZER, B. R., M. KERBRAT, T. HUTHWELKER, H. W. GAGGELER, M. SCHNEEBELI a M. AMMANN. Diffusion of NO<sub>x</sub> and HONO in snow: A laboratory study. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2010, (115, D03304) [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.1029/2009JD012459. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228073143\\_Diffusion\\_of\\_NOx\\_and\\_HONO\\_in\\_snow\\_A\\_laboratory\\_study](https://www.researchgate.net/publication/228073143_Diffusion_of_NOx_and_HONO_in_snow_A_laboratory_study)
- [23] SCHWANDER, J., B. STAUFER a A. SIGG. Air Mixing in Firn and the Age of the Air at Pore Close-Off. *Annals of Glaciology* [online]. 1988, (10) [cit. 2018-11-07]. DOI: 10.3189/S0260305500004328. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/annals-of-glaciology/article/air-mixing-in-firn-and-the-age-of-the-air-at-pore-closeoff/F4F355CBA2ADFB2FB217BA67B6B09051/core-reader#>
- [24] Chladicí směs vody, ledu a soli [online]. In: . 17. 4. 2017 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://fyzikalnipokusy.cz/1614/chladici-smes-vody,-ledu-a-soli>
- [25] MASSMAN, W. J. A review of the molecular diffusivities of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, and NO<sub>2</sub> in air, O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> near STP. *Atmospheric Environment* [online]. 1998, (32), 1111-1127 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/S1352-2310(97)00391-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231097003919>

[26] SCHWANDER, J., J. M. BARNOLA, C. ANDRIE, M. LEUENBERGER, A. LUDIN, D. RAYNAUD a B. STAUFFER. The Age of the Air in the Firn and the Ice at Summit, Greenland. *Journal of Geophysical Research*[online]. 1993, (98), 2831-2838 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1029/92JD02383. Dostupné z: [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_6/b\\_fdi\\_35-36/42328.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_35-36/42328.pdf)

[27] FFREDERIKSEN J. M., Mejlbro L. a Nilsson L. Fick's second law - complete solutions for chloride ingress into concrete [online]. Lund, Sweden, 2008, 112. ISSN 0348-7911 TVBM. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://portal.research.lu.se/portal/files/3965059/1554357.pdf>

## Příloha A: Ukázkové výpočty

Teoretický difuzní koeficient O<sub>2</sub> v suchém perlitu podle vzorce (3):

$$D_{SP_{O_2}} = 0,78 \cdot 0,92 \cdot 17,6 \cdot \frac{101325}{99100} \cdot \left(\frac{293}{273,15}\right)^{1,81} = 14,7 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Teoretický difuzní koeficient CO<sub>2</sub> v suchém perlitu podle vzorce (3):

$$D_{SP_{CO_2}} = 0,78 \cdot 0,92 \cdot 13,8 \cdot \frac{101325}{99100} \cdot \left(\frac{293}{273,15}\right)^{1,81} = 11,5 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet poměru mezi aktuálními a standardními podmínkami podle vztahu (3):

$$S_L = \frac{P_0}{P} \cdot \left[\left(\frac{T}{T_0}\right)^\alpha\right]$$
$$S_L = \frac{101325}{99000} \cdot \left[\left(\frac{293}{273,15}\right)^{1,81}\right] = 1,16$$

Výpočet naměřených difuzních koeficientů O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> podle vzorce (5):

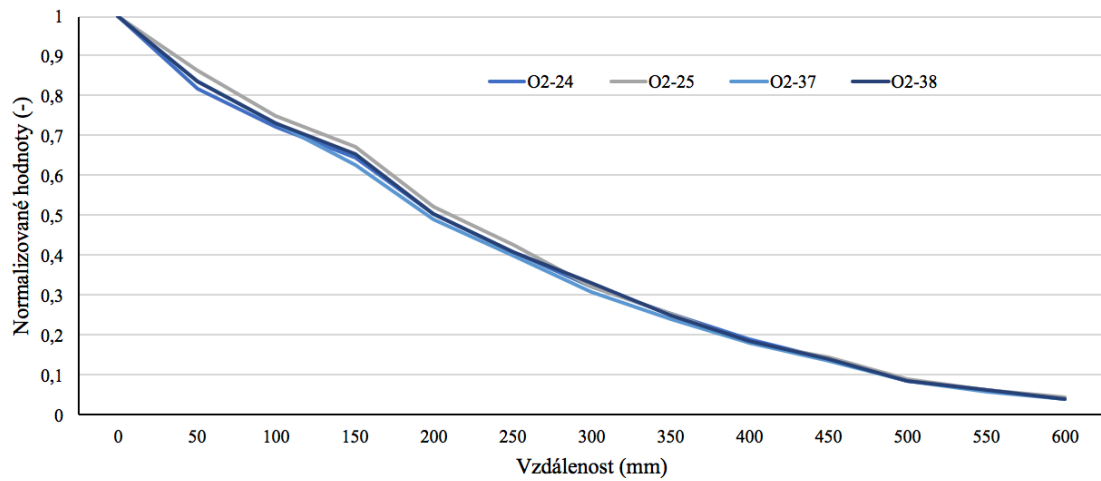
$$c_0 = 20,9 \%$$
$$c_s = 15,9 \%$$
$$c_{(x,t)} = 17,63 \%$$
$$x = 0,15 \text{ m}$$
$$t = 3600 \text{ s}$$
$$\text{erf}(z) = 0,345$$

$$\frac{17,63 - 20,9}{15,9 - 20,9} = 1 - \text{erf}\left(\frac{0,15}{2 \cdot \sqrt{D \cdot 3600}}\right)$$

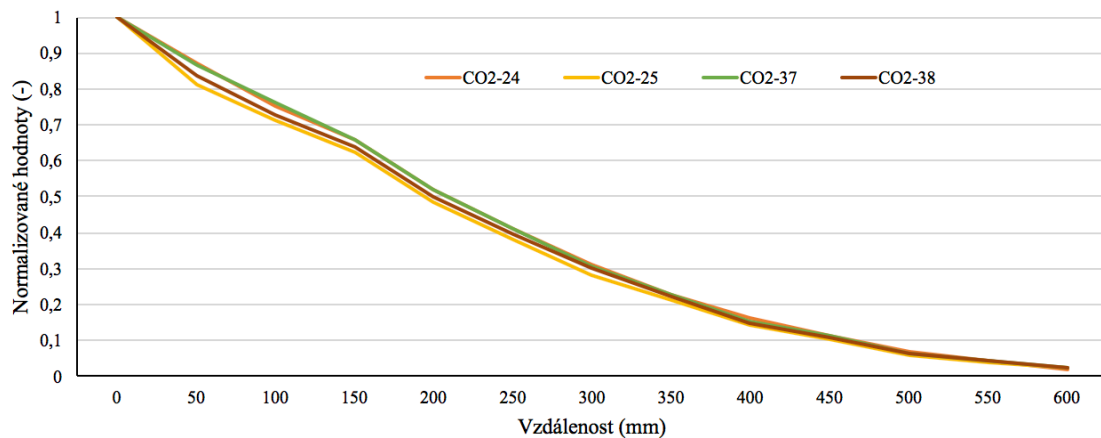
$$D = \frac{0,15^2}{4 \cdot 0,345 \cdot 3600}$$

$$D = 13,1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

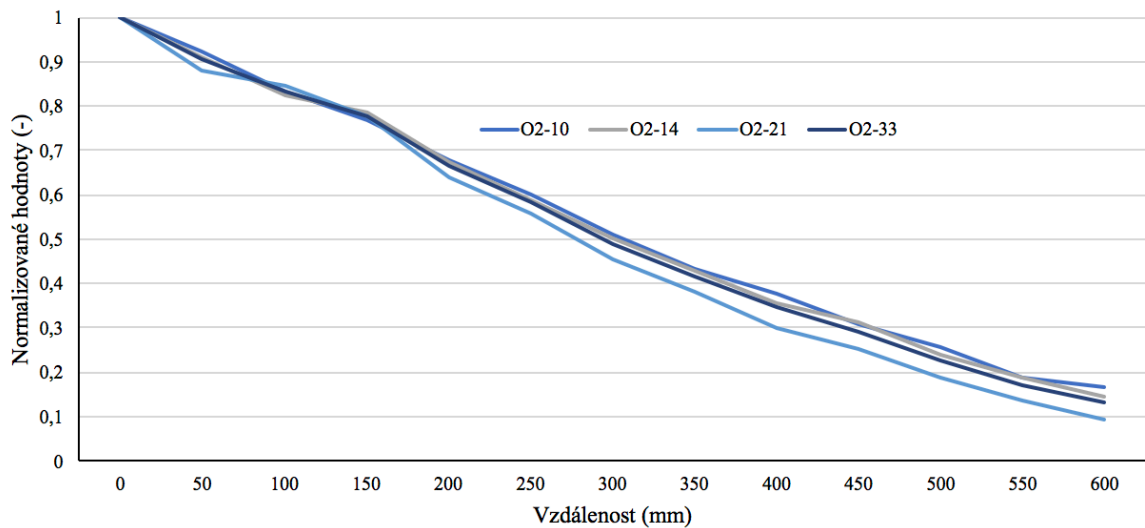
## Příloha B: Grafy jednotlivých měření čisté difuze v různých materiálech



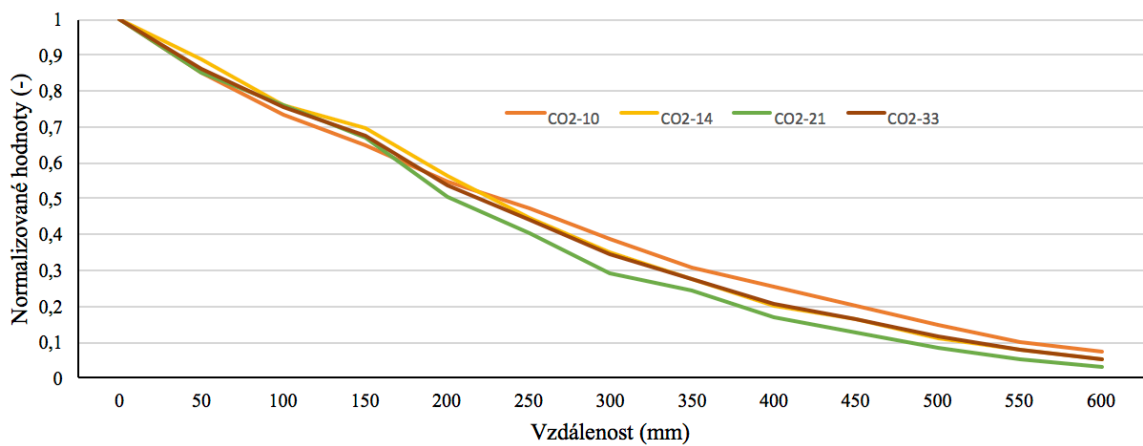
**Obr. 1:** Normalizované naměřené koncentrace  $O_2$  v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu po 60 minutách.



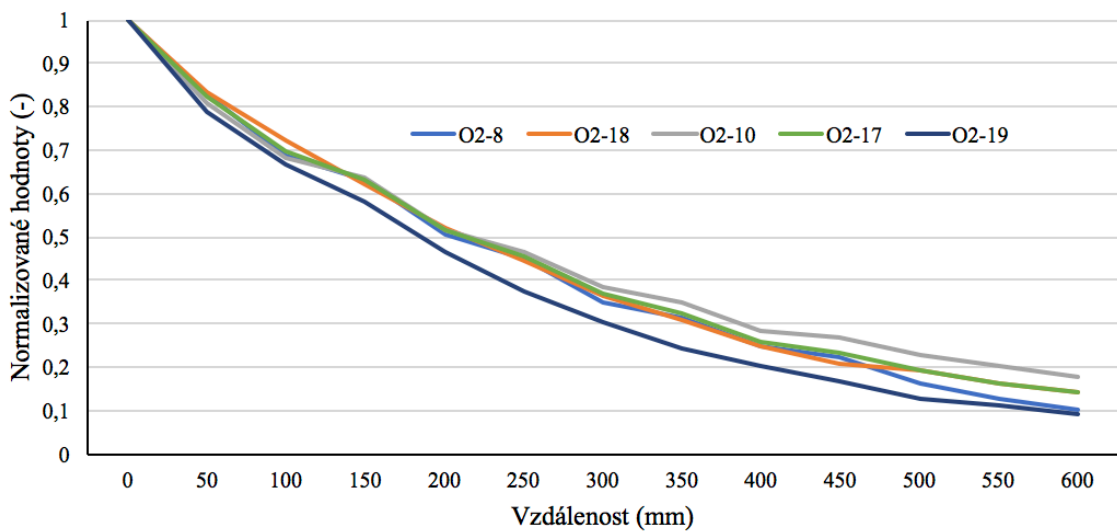
**Obr. 2:** Normalizované naměřené koncentrace  $CO_2$  v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu po 60 minutách.



**Obr. 3:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v mokřém perlitu po 60 minutách.

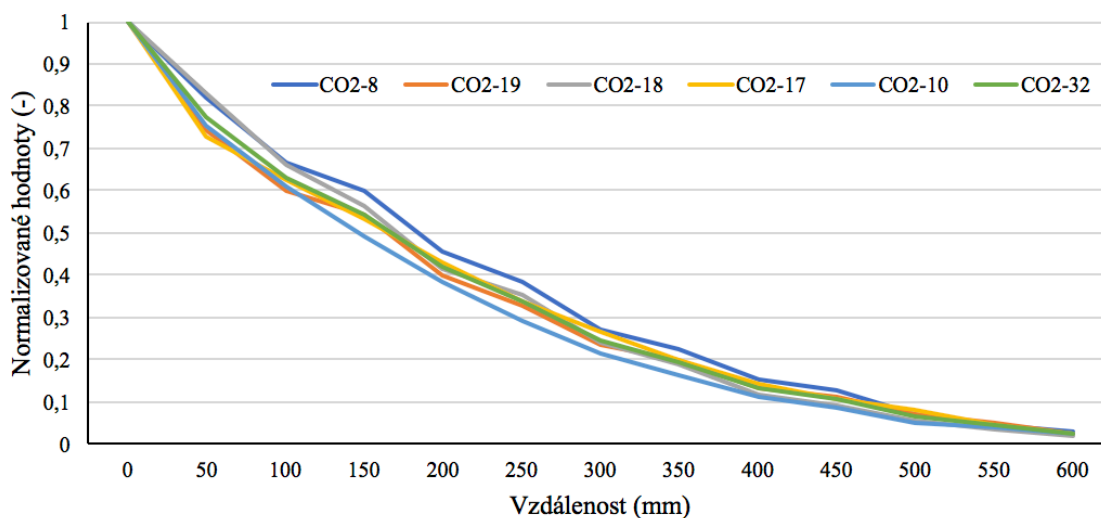


**Obr. 4:** Normalizované naměřené koncentrace CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v mokřém perlitu po 60 minutách.

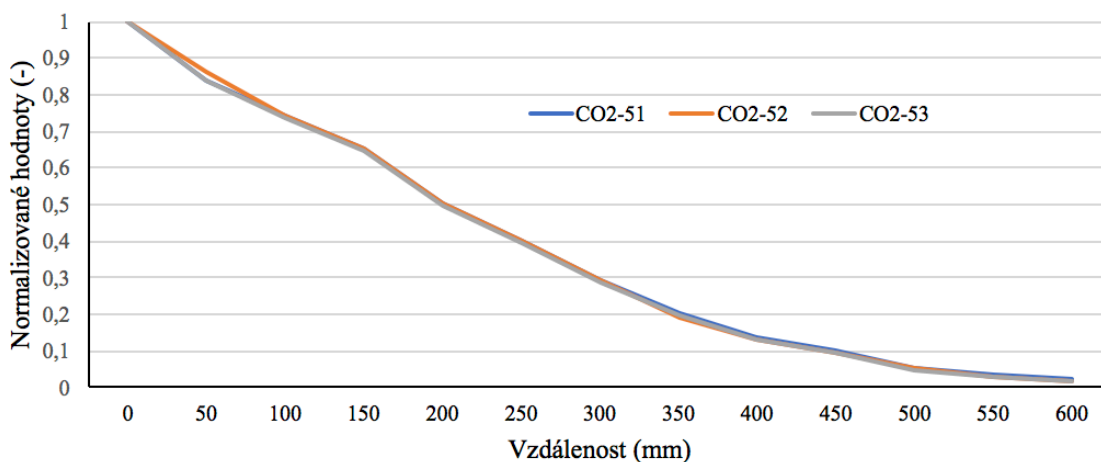


**Obr. 5:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti vstupní komory ve sněhu po 60 minutách.

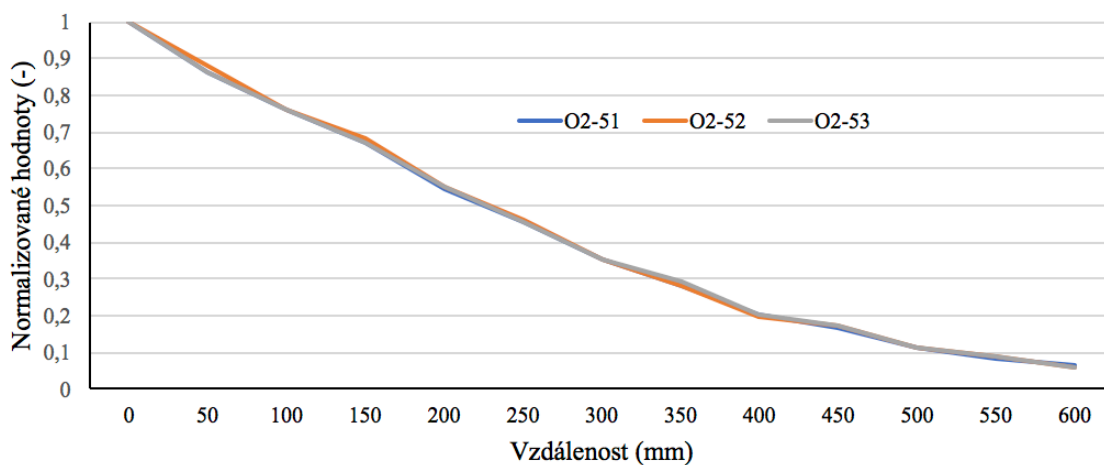




**Obr. 6:** Normalizované naměřené koncentrace CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti vstupní komory ve sněhu po 60 minutách.

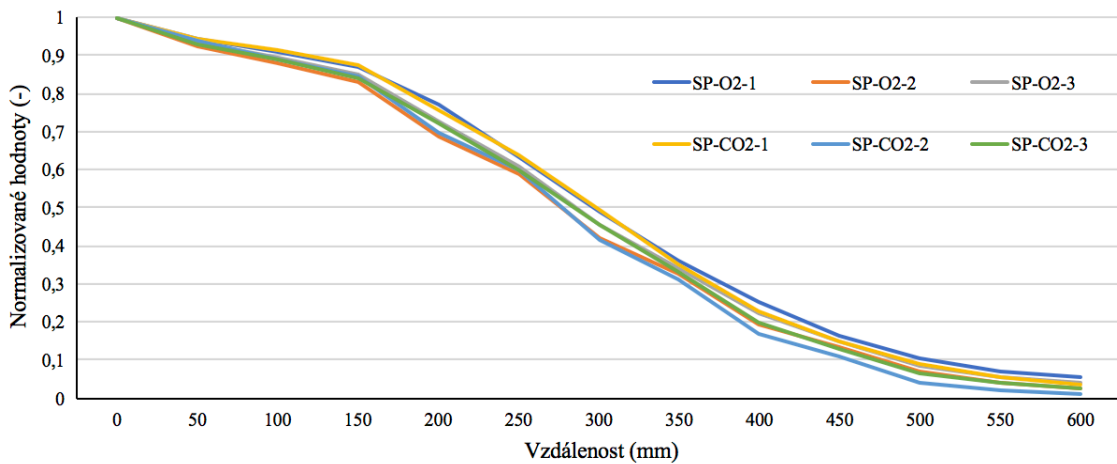


**Obr. 7:** Normalizované naměřené koncentrace O<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu po 60 minutách v laboratoři.

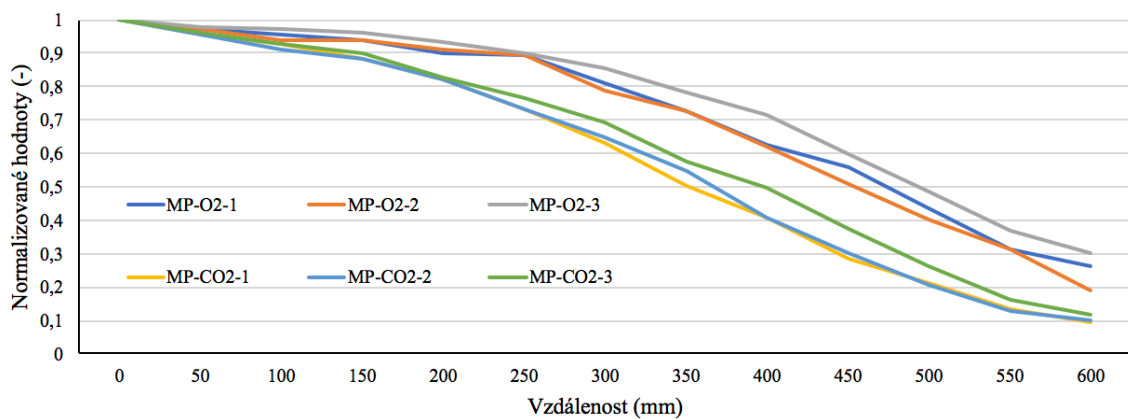


**Obr. 8:** Normalizované naměřené koncentrace CO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu po 60 minutách v laboratoři.

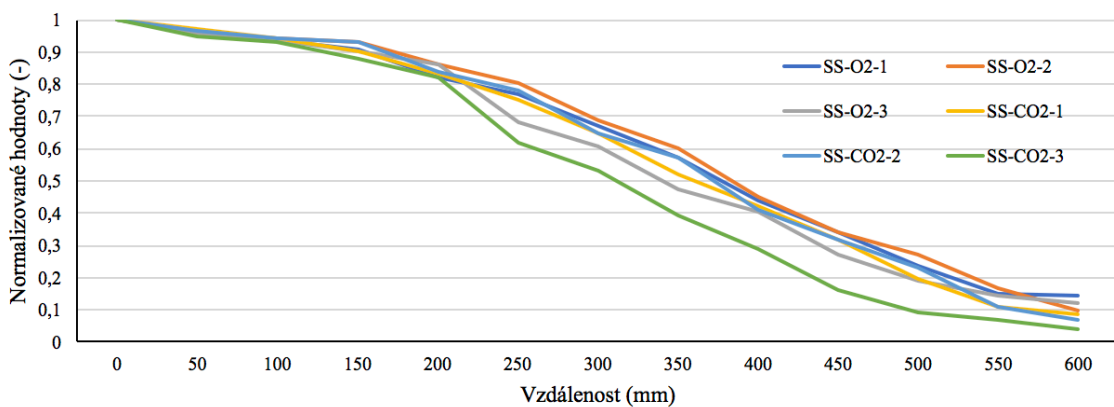
## Příloha C: Grafy jednotlivých měření konvekce kombinované s difuzí v různých materiálech



**Obr. 1:** Normalizované naměřené koncentrace  $O_2$  a  $CO_2$  v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v suchém perlitu po 10 minutách.

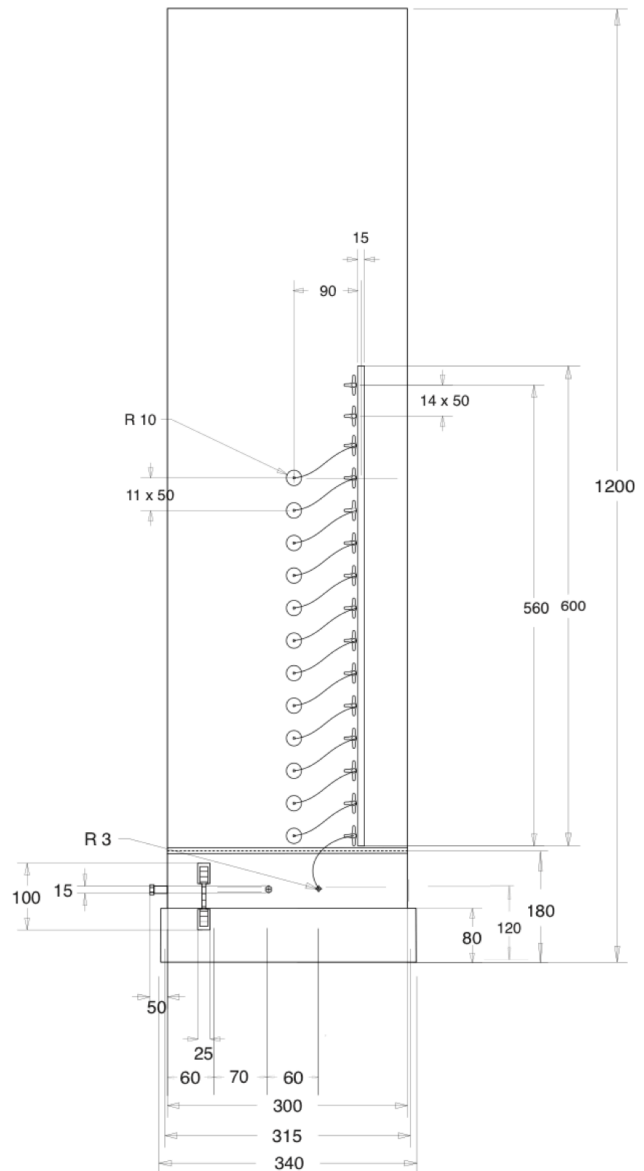
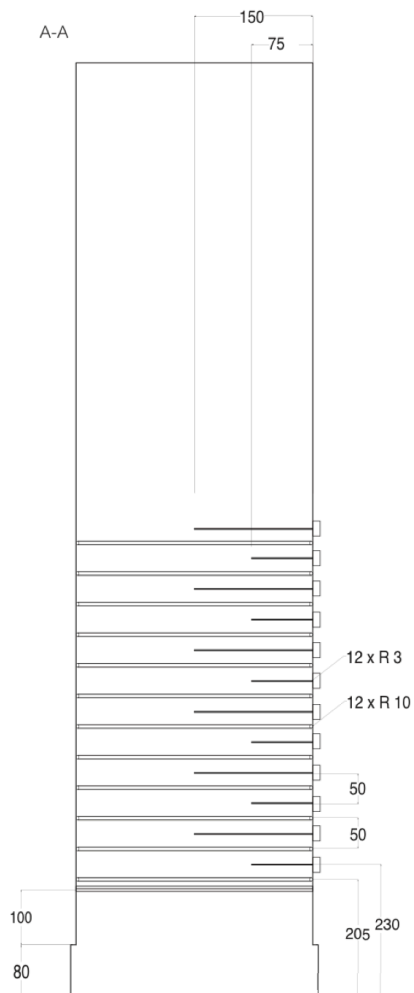
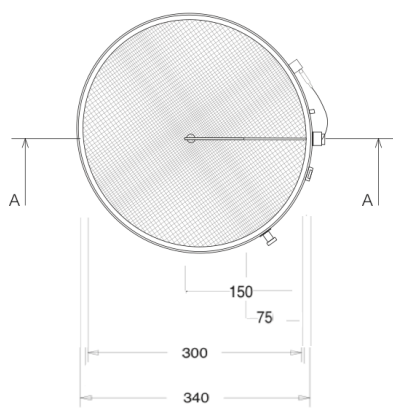


**Obr. 2:** Normalizované naměřené koncentrace  $O_2$  a  $CO_2$  v závislosti na vzdálenosti vstupní komory v mokřém perlitu po 10 minutách.



**Obr. 3:** Normalizované naměřené koncentrace  $O_2$  a  $CO_2$  v závislosti na vzdálenosti vstupní komory ve sněhu po 10 minutách.

# Příloha D: Pomocný technický výkres měřicí aparatury



NÁZEV SESTAVY	MĚŘICÍ APARATURA	DATUM	1. 5. 2019
ZÁKLADNÍ MATERIÁL	PVC	MĚŘÍTKO	1:7,5
VYPRACOVAL	ŠIMON WALZEL	PROMÍTÁNÍ	NÁRYS, PŮDORYS, PRŮŘEZ
ROZMĚRY	1200 x 340 x 340 mm	ČÍSLO VÝKRESU	APA-001

## **Příloha E: Protokol měření**

Protokol – Měření difuzních a konvekčních vlastností respiračních plynů v simulovaném lavinovém sněhu

### **Přístroje:**

Monitor vitálních funkcí S5 (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Chicago, USA) + příslušenství, aparatura pro měření difuzních a konvekčních vlastností, tlakové lahve ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) + redukční ventily, sada pro smísení plynů, chladicí lázeň, teploměr, konstrukce pro měření hustoty a pórovitosti, kompresor

### **Cíle experimentu:**

- Vyrobený přípravek otestovat pro čistou difuzi  $O_2$  a  $CO_2$  a pro konvekci kombinovanou s difuzí.
- Zjistit, jak dobře suchý a mokřý perlit simuluje lavinový sněž z hlediska výměny plynů.

### **Příprava:**

#### **Materiál:**

- Připravit suchý perlit (50 l)
- Připravit mokřý perlit o dané vlhkosti (50 l)

#### **Aparatura:**

- Očištění infuzních jehel
- Kontrola trojcestných ventilů
- Zajištění vzduchotěsnosti víčka
- Kontrola odvodního ventilu

#### **Smísení plynů a jejich nastavení:**

- Otevření tlakové lahve ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) a nastavení výstupního tlaku na 1,5 Atm.
- Nastavení chtěného průtoku
- Nastavení složení směsi plynů (15,9 %  $O_2$ , 5 %  $CO_2$ , 79,5 %  $N_2$ )
- Nastavení průtoku vzduchu z kompresoru zamezující difuzi
- Nastavení chladicí lázně na chtěnou teplotu

#### **Technika:**

- Propojení přístroje Datex s počítačem
- Nastavení sběru potřebných parametrů v softwaru S5 collect (Waves, Trends)
- Připojení sámkovací hadičky na aparaturu

## Měření:

Materiál:            Suchý perlit                             Mokrý perlit                             Sníh

Typ experimentu:            Difuze                             Konvekce kombinovaná s difuzí

Kód měření:

Aktuální teplota:

Hustota materiálu:

- Nasypání materiálu do aparatury
- Průběžné protřepávání (pro zamezení vzniku dutin)
- Ideální množství materiálu (50-70 mm nad poslední sondou)

Čas připojení vytvořené směsi a současně vzduchu v protisměru:

- 5 minut proplachování vstupní komory
- Odstranění působení vzduchu v protisměru

Zavřený odvodní ventil

Otevřený odvodní ventil

- Průběžný odběr vzorků ve vstupní komoře
- Odběr vzorků ze všech 13 sond

Čas ukončení měření:

- Zálohování dat
- Vysypání materiálu a vypláchnutí aparatury vzduchem

Hustota materiálu po konci měření (pro sníh):

## **Příloha F: Obsah přiloženého CD**

- 1) Klíčová slova v českém a anglickém jazyce
- 2) Abstrakt v českém jazyce
- 3) Abstrakt v anglickém jazyce
- 4) Naskenované zadání práce
- 5) Bakalářská práce