



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# MĚŘENÍ A ANALÝZA USAZOVÁNÍ VLÁKEN Z IZOLAČNÍ MINERÁLNÍ VATY V DÝCHACÍM SYSTÉMU

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF DEPOSITION OF FIBERS FROM MINERAL WOOL IN RESPIRATORY SYSTEM

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Hájek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2020





# Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Bc. Ondřej Hájek</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Technika prostředí
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. František Lízal, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Měření a analýza usazování vláken z izolační minerální vaty v dýchacím systému**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Izolační vata ze skleněných a minerálních vláken nahradila dříve používaný azbest. Otázkou však zůstává, zda tato vlákna jsou bezpečná pro lidské zdraví. V rámci diplomové práce se student zaměří na usazování člověkem vyráběných vláken v modelech plic. Na základě studia literatury a příslušných norem zhodnotí potenciální dopady na lidské zdraví a samostatným experimentem na modelu plic ověří schopnost vláken pronikat do nižších částí dýchacích cest.

### **Cíle diplomové práce:**

Provést rešerši norem pro ochranu před vdechováním škodlivých vláken a na základě literatury zhodnotit, jaké mohou být dopady podlimitních a nadlimitních koncentrací na lidské zdraví.

Provést měření usazování vláken v modelu plic a vyhodnotit depoziční parametry.

Zhodnotit výsledky experimentu porovnáním s literaturou, poukázat na případná nebezpečí použití uměle vyráběných vláken.

### **Seznam doporučené literatury:**

HINDS, W. C.: Aerosol Technology: Properties, Behavior, And Measurement Of Airborne Particles, Wiley-interscience, 1999, 504 p.

BĚLKA, M. In vitro výzkum vlivu vlastností částic a průtoku vzduchu na regionální depoziční v dýchacích cestách člověka. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 121 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

PAVELEK, M., ŠTĚTINA, J.: Experimentální metody v technice prostředí. Skripta VUT, Brno, 2007.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vdechování pevných částic, zejména vláken, do lidských plic. Jedná se o vědní oblast, ve které se využívá počítačového modelování pro popis pohybu vláken a jejich depozice v plicích. Výsledky simulací je však nutné ověřit experimentálně. Predikce chování vláken v modelu plic je důležitá z toxikologického hlediska, kdy je potřebné znát, kde se která vlákna usazují a kde mohou způsobovat problémy pro lidský organismus. V rešeršní části je pojednáno o principech depozice částic v plicích, dále se práce zaměřuje na vlákna a limity koncentrací pro pracovní prostředí stanovené světovými organizacemi, načež navazuje kapitola o plicích a jejich nemocech, které se mohou u člověka rozvinout, pokud nejsou dodržena bezpečnostní opatření pro pobyt v místech s nadlimitními koncentracemi. Poslední kapitola této práce se věnuje popisu použité aparatury, měření depozice vláken v modelu lidských plic a následnému vyhodnocení depozčních parametrů důležitých pro srovnání s dalšími měřeními.

### **Klíčová slova**

Vlákna, skelná vata, depozice, experiment, lidské plíce

## **ABSTRACT**

This master thesis deals with inhalation of fine particles and fibres into human lungs. This is a scientific field where computer modelling is used to describe the movement of fibres and their deposition in the lungs. However, the results of these simulations must be verified experimentally. The prediction of fibres behaviour is important from a toxicology point of view where it is important to know deposition hot-spots and places where fibres could possibly cause problems. The review of the state-of-the-art is focused on the deposition of particles in human lungs followed with a chapter on fibre as a type of particle, and occupational exposure limits set by different world associations. The last theoretical chapter describes human lungs and its diseases which can evolve when limits for occupational exposure are not met. The experimental chapter consists of a description of the used experimental setup and results from an experiment together with a comparison of results with other similar experiments.

### **Key words**

Fibres, glass wool, deposition, experiment, human lungs



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HÁJEK, Ondřej. *Měření a analýza usazování vláken z izolační minerální vaty v dýchacím systému*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121501>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Lízal.



## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Měření a analýza usazování vláken z izolační minerální vaty v dýchacím systému** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Mé poděkování patří především Františku Lízalovi za odbornou pomoc při zpracování této práce a Miloslavu Bělkovi za pomoc při přípravě a provedení experimentu. Poděkovat bych také chtěl rodině a přítelkyni za podporu při studiu. Experimentální část práce byla provedena v rámci projektu GA18-25618S Výzkum účinku nestacionárního proudění na transport vláken v postupně se větvících minikanálech.



## OBSAH

1	ÚVOD.....	17
2	AEROSOLY.....	18
2.1	Dělení dle tvaru.....	18
2.2	Pohyb částic.....	20
2.2.1	Brownův pohyb částic.....	20
2.2.2	Pohyb větších částic.....	20
2.2.3	Mezní velikost částic.....	21
2.3	Mechanismy depozice.....	21
2.3.1	Obecné mechanismy.....	21
2.3.2	Rozdíly mezi depozicí sférických částic a vláken.....	22
2.4	Vlákna.....	23
2.4.1	Výplně ze skelného vlákna.....	23
2.4.2	Skelná, minerální a strusková vata.....	23
2.4.3	Žáruvzdorná keramická vlákna.....	24
2.5	Azbest.....	24
2.6	Výroba.....	25
2.7	Rozdíly mezi azbestem a umělými vlákny.....	26
2.8	Účinky depozice vláken na lidské zdraví.....	26
2.9	Vnímání MMVFs světovými organizacemi.....	27
2.9.1	Mezinárodní asociace pro výzkum rakoviny.....	27
2.9.2	Příručka Industrial Toxicology.....	28
2.9.3	Článek o vláknech na pracovišti, Lipworth 2009.....	28
2.9.4	Asociace v USA.....	28
2.9.5	Evropská unie.....	29
2.9.6	Shrnutí limitů v Evropě.....	30
2.9.7	Česká legislativa.....	31
2.10	Vývoj vláken.....	31
2.11	Filtrace vláken a normy.....	31
3	DÝCHACÍ SOUSTAVA.....	33
3.1	Popis dýchací soustavy člověka.....	33
3.1.1	Nos.....	33
3.1.2	Nosní dutina.....	34
3.1.3	Hltan.....	34

---

3.1.4	Hrtan .....	34
3.1.5	Průdušnice.....	34
3.1.6	Průdušky a průdušinky .....	35
3.1.7	Plicní sklípky .....	35
3.2	Shrnutí ochrany proti nežádoucím látkám.....	36
3.2.1	Ochrana vzduchových cest .....	36
3.2.2	Ochrana respirační části.....	37
3.3	Nemoci dýchacího systému ze znečištěného ovzduší v pracovním prostředí	39
3.3.1	Astma.....	39
3.3.2	CHOPN.....	40
3.3.3	Pneumokonióza.....	40
3.3.4	Nádory na plicních tkáních .....	40
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	41
4.1	Popis měření .....	41
4.1.1	Minerální vata .....	41
4.1.2	OOP .....	41
4.1.3	Tvorba vzorků.....	42
4.1.4	Experimentální aparatura .....	43
4.1.5	Zdroj tlaku a podtlaku.....	43
4.1.6	Podavač a třepač .....	44
4.1.7	Neutralizátor a klasifikátor .....	45
4.1.8	Dilutor.....	47
4.1.9	Model plic .....	47
4.1.10	Sestavení modelu .....	48
4.1.11	Průtoky větvemi .....	49
4.1.12	Započetí experimentu.....	49
4.1.13	Metodika vyhodnocování.....	50
4.2	Výsledky měření.....	54
4.2.1	Nevyhodnotitelné filtry.....	54
4.2.2	Stanovení množství vláken na filtru .....	55
4.2.3	Stokesovo číslo .....	56
4.2.4	Depoziční účinnost .....	59
4.2.5	Celkový počet vláken .....	60
4.2.6	Depoziční frakce.....	62

4.2.7	Depoziční hustota .....	63
4.2.8	Impaktní parametr .....	63
4.2.9	Grafy depozičních parametrů .....	63
4.3	Srovnání .....	66
4.3.1	První generace větvení .....	66
4.3.2	Druhá generace větvení .....	67
4.3.3	Třetí generace větvení .....	68
4.3.4	Čtvrtá až sedmá generace větvení .....	68
4.4	Vyhodnocení .....	69
5	ZÁVĚR .....	71
6	ZDROJE .....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	84
	SEZNAM TABULEK .....	86



## **1 ÚVOD**

Jak se vyvíjela lidská společnost, vyvíjely se i technologie a používané materiály, kterými si člověk snažil usnadnit život. V dnešní době jich lze již mnoho zhodnotit. Ty, které byly prospěšné, které byly kontroverzní, a nakonec také ty, které se ukázaly být přímo nebezpečné pro lidské zdraví. Do této kategorie lze zařadit také azbest. Jako stavební materiál byl hojně užíván zejména na začátku 20. století díky svým vynikajícím fyzikálním vlastnostem, mezi nimiž vyniká nehořlavost a nízká hmotnost. Díky tomu byl instalován do mnoha budov, a to ve formě omítek, nehořlavých zástěn, střešních krytín (eternitů) a v neposlední řadě také ve formě tepelné izolace. Jak se ale v průběhu let, především v 2. polovině 20. století, ukázalo, azbestová vlákna jsou velmi nebezpečná pro lidský organismus, ve kterém při vdechnutí do plic zůstávají, a organismus si s nimi není schopen v krátkém čase poradit. Proto byly všechny aplikace s azbestem zakázány a v dnešní době dochází, v lepším případě, k ekologické likvidaci a nahrazování původních nevyhovujících částí objektů za nové, které obsahují pravděpodobně zdravotně nezávadné materiály. V aplikacích, kde je nutné využít nehořlavosti, se používají různé vlákno-cementové či šamotové desky. Pro nahrazení azbestu v aplikacích, kde se využívalo jeho tepelně-izolačních vlastností, bylo využito různých skelných či keramických vláken, která je navíc možné také dobře využít do foukaných izolací.

V dnešní době však stále panuje jistá skepse vůči oněm vláknům, zdali jsou bezpečná a nehrozí stejná rizika při vdechování jako u vláken z azbestu. Vystávají mnohé otázky, například jakým způsobem a kde se skelná a minerální vlákna usazují v plicích, jak se s nimi dokáže organismus vypořádat a tak dále. Proto je cílem této práce najít dostatek vědeckých podkladů na to, aby bylo možné co nejlépe tyto otázky zodpovědět, a navíc přidat měření depozice vláken v modelu lidských plic, jehož součástí je i nosní dutina, díky které je toto měření odlišné od jiných podobných experimentů.

## 2 AEROSOLY

Nejjednodušeji lze aerosol popsat jako směs, která se skládá z nosného plynu a částic v něm rozptýlených, tedy suspenzi částic v plynu. Částicemi se v obecném pojetí rozumí jak pevné, tak i kapalné látky, případně obojí. V následující tabulce č. 2.1 lze vidět různé kombinace nosného média se skupenstvím částic:

Tabulka 2.1 Dělení aerosolů [1]

Nosné médium	Typ suspendovaných částic		
	Plynné	Kapalné	Pevné
Plyn	-	Sprej, mlha	Kouř, prach

Dělení aerosolů na skupiny je vícero a jako jednoduše představitelný příklad aerosolu může posloužit kouř. Jedná se o tuhé (v případě neztuhlých kapek také o kapalné) látky rozptýlené ve vzduchu. Vznik kouře je spjat se spalováním, přičemž množství kouře zpravidla záleží na dokonalosti spalování a kvalitě spalovaného paliva. Obvykle jde o zkondenzované uhlovládky, amorfni uhlík, případně částice popela a popílku ve vzduchu. [2]

Tato práce se však zabývá aerosoly ve tvaru vláken, nikoliv kulovitých či jinak tvarovaných částic. A proto je důležité popsat, jaká jsou specifika dělení a také jak se podle toho takovéto částice chovají.

### 2.1 Dělení dle tvaru

Dělení částic dle velikosti a tvaru je důležité z pohledu na jejich pohyb a principy depozice. [3]

Pro stanovení velikosti kulovitých částic se využívá jejich průměru. K označení poté slouží anglická zkratka PM (*particulate matter*, volně přeloženo jako částice<sup>1</sup>) a následující index značící maximální průměr částic, které jsou v tomto souhrnu zahrnuty. Potom tedy například PM<sub>0,1</sub> označuje všechny částice s průměrem do 0,1 mikrometru.

U nekulových částic je takovéto dělení obtížné, protože částice nemají rozměry ve všech třech směrech stejné, a aby bylo možné srovnání mezi různými tvary částic, a hlavně pak matematický popis jejich pohybu, využívá se obvykle veličina ekvivalentní průměr, která ke sledované nekulové částici přiřadí kulovou částici o určitém průměru tak, aby měly obě částice stejnou určitou fyzikální vlastnost. Například tedy ekvivalentní aerodynamický průměr, který se obvykle využívá při popisu částic, které se usazují v dýchací soustavě a na které působí především gravitace, nahradí původní nekulovou částici novou kulovou částici, která má hustotu rovnu 1000 kg/m<sup>3</sup> a stejnou rychlost při usazování. Pro popis částic, které se naopak řídí Brownovým pohybem, se využívá ekvivalentní pohyblivostní průměr atd. [3]

Aerodynamický ekvivalentní průměr  $d_{ae}$  lze určit následujícími dvěma vztahy, kde vztah 2.1 je pro kulovou a vztah 2.2 pro nepravidelnou částici, a kde  $d_{ve}$  je ekvivalentní objemový průměr kulové částice, která má stejný objem jako počítaná nepravidelná částice,  $\rho_0$  je hustota nové kulové částice a je rovna 1000 kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_p$  je hustota nepravidelné částice, a na závěr  $\chi$ , což je faktor, který zohledňuje tvar částice zvaný dynamický součinitel tvaru (anglicky *dynamic shape factor*). Faktor  $\chi$  je definován jako poměr odporové síly proti pohybu nekulové částice ku stejné síle působící na ekvivalentní kulovou částici.

<sup>1</sup> Lze se setkat také s pojmy jako tuhé znečišťující látky, poléťavý prach atp.



Vybrané hodnoty dynamického součinitele tvaru možné vidět v tab. 2.2. [3]

$$d_{ae} = d_{ve} \left( \frac{\rho_p}{\rho_0} \right)^{0,5} \quad (2.1)$$

$$d_{ae} = d_{ve} \left( \frac{\rho_p}{\rho_0 \cdot \chi} \right)^{0,5} \quad (2.2)$$

Tabulka 2.2 Vybrané hodnoty faktoru  $\chi$ , kde  $l_v$  je délka vlákna a  $d_v$  jeho průměr [3]

Tvar částice	Faktor $\chi$
Koule	1
Krychle	1,08
Válcovité vlákno	
( $l_v/d_v = 2$ )	1,01; 1,14
( $l_v/d_v = 5$ )	1,06; 1,34
( $l_v/d_v = 10$ )	1,50; 1,58
Shluk kulovitých částic (triplet)	1,15

Vlákno může mít vůči směru proudění nosného média různou polohu, kterou je nutné do výpočtu dynamického součinitele tvaru zohlednit. Tímto se zabýval od roku 1955 Fuchs ve [4], kde stanovil následující rovnice, ve kterých je  $\beta$  rovna poměru délky vlákna  $l_v$  ku jeho průměru  $d_v$ . Vztah 2.3 odpovídá případu, kdy se vlákno pohybuje ve směru proudu neboli paralelně s ním, a vztah 2.4 je pro vlákno pohybující se kolmo na směr proudu.

$$\chi_{\parallel} = \frac{\frac{4}{3}(\beta^2 - 1)\beta^{-\frac{1}{3}}}{(2\beta^2 - 1)(\beta^2 - 1)^{-\frac{1}{2}}(\ln(\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})) - \beta} \quad (2.3)$$

$$\chi_{\perp} = \frac{\frac{8}{3}(\beta^2 - 1)\beta^{-\frac{1}{3}}}{(2\beta^2 - 1)(\beta^2 - 1)^{-\frac{1}{2}}(\ln(\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})) + \beta} \quad (2.4)$$

Celkovou hodnotou  $\chi$  pro náhodnou polohu vlákna v proudu určil ze vztahu 2.5, kde se předpokládá, že je vlákno v proudu orientováno 1/3 času paralelně se směrem proudu a 2/3 času kolmo na směr proudu. Takto definovaný dynamický součinitel tvaru používá i Baron a Willeke v druhém vydání *Aerosol Measurement* [5] a taktéž jej používá Bělka a kol. v [6]. Proto byly tyto vzorce použity i v experimentální části této práce.

$$\frac{1}{\chi} = \frac{1}{3\chi_{\parallel}} + \frac{2}{3\chi_{\perp}} \quad (2.5)$$

Jak uvádí Kulkarni, Baron a Willeke ve třetím vydání *Aerosol Measurement* [3], pokud je Reynoldsovo číslo částice<sup>2</sup> menší než 0,1, lze typicky pozorovat nahodilý pohyb vlákna, jehož dynamický součinitel tvaru se dá popsat pomocí rovnice 2.6 Se stejnou rovnicí počítá

<sup>2</sup> Reynoldsovo číslo částice je obdoba Reynoldsova čísla proudu používaná v [3] pro určení vlastnosti částice. Do rovnice pro výpočet Reynoldsova čísla se za charakteristický rozměr dosazuje průměr částice, za charakteristickou rychlost se dosadí pádová rychlost částice a kinematická viskozita se uvažuje jako viskozita vzduchu

i Lízal a kol v [7]. Obecně nelze jednoznačně říct, kterou z rovnic 2.5 a 2.6 zvolit, protože pohyb vlákna závisí na mnoha faktorech, například jaká je dominantní síla působící na vlákno, jaká je usazovací rychlost, jaké jsou gradienty rychlosti atd.

$$\frac{1}{\chi} = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{\chi_{\parallel}} - \frac{1}{\chi_{\perp}} \right) \quad (2.6)$$

## 2.2 Pohyb částic

Pohyb sférických částic lze jednoduše popsat pomocí Langevinovy rovnice, což je druhý Newtonův zákon, popisující pohyb částice:

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = -f_{ric}(\vec{v}_p - \vec{v}_f) + m_p \vec{g} + \vec{F}(t) \quad (2.3)$$

Jedná se o stochastickou diferenciální rovnici, kde levá strana vyjadřuje hmotnost částice  $m_p$  násobenou derivací rychlosti částice podle času  $\frac{d\vec{v}_p}{dt}$ , tedy zrychlením. Na pravé straně jsou postupně vypsány síly působící na částici. V první řadě jde o odporovou sílu danou jednak odporovým součinitelem  $f_{ric}$ , který závisí na dynamické viskozitě nosného média, rozměru částice a také na Cunnighamově faktoru, jednak relativní rychlostí, která závisí na rozdílu rychlosti částice  $\vec{v}_p$  a rychlosti nosného média  $\vec{v}_f$ . Dále se jedná o gravitační sílu a poslední člen je síla  $\vec{F}(t)$  charakterizující Brownův pohyb částic. [8]

Důležitým parametrem pohybu částic v médiu je Knudsenovo bezrozměrné číslo, viz rovnice 2.4, vyjadřující působení okolního média na částice aerosolu. Knudsenovo číslo dává do poměru průměr částice  $d_e$ , resp.  $d_a$ , a střední délku volné dráhy molekul média  $l$ , ve kterém se částice nachází. Přičemž pokud je  $Kn$  výrazně menší než 1, tedy průměr částice  $d_e$  je větší než střední délka volné dráhy molekul  $l_m$ , potom molekuly média častěji narážejí do částice a působí na ni určitou odporovou silou. Zatímco pokud je  $Kn$  větší než jedna, jsou částice v průměru menší, než je střední délka volné dráhy molekul, a potom je na tento pohyb potřeba nahlížet skrze jinou mechaniku pohybu, která se nazývá Brownův pohyb částic. [8]

$$Kn = \frac{l_m}{d_e} \quad [-] \quad (2.4)$$

Z rovnice 2.3 pak vychází různé možnosti pohybu částice, viz následující podkapitoly:

### 2.2.1 Brownův pohyb částic

Tento popis pohybu je specifický tím, že se podle něj řídí velmi malé částice, typicky s ekvivalentním průměrem menším než  $0,5 \mu m$ . [9] Brownův pohyb souvisí s difuzní depozicí, která bude popsána v následující podkapitole.

Z rovnice 2.3 lze pro takto malé částice zanedbat levou stranu a také gravitaci.

### 2.2.2 Pohyb větších částic

V tomto případě již hraje roli gravitace, ale naopak z rovnice 2.3 vypadne třetí člen z pravé strany. Diferenciální rovnici lze poté lehce řešit a z řešení vychází závislost pohybu částice na dvou parametrech. Jedná se o Stokesovo bezrozměrné číslo, viz rovnice 2.5, které vyjadřuje poměr setrvačné síly k odporové síle a díky kterému lze rozlišit, zdali je částice malá a následuje proud, či zdali je natolik velká, a tedy má tak velkou hybnost, že při obtékání překážky nedokáže následovat proud vzduchu a usadí se na ní:

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 \bar{V}}{18\mu L} \quad (2.5)$$

Kde  $\rho_p$  je hustota částice (často se lze setkat s dosazením hodnoty pro hustotu vody, pokud se počítá s aerodynamickým ekvivalentním průměrem),  $d_p$  je průměr částice (lze dosazovat ekvivalentní),  $\bar{V}$  odpovídá charakteristické rychlosti (např. průměrná rychlost proudu v trubici),  $\mu$  je dynamická viskozita nosného média, a nakonec  $L$  se rovná charakteristické délce, v plicích například průměry jednotlivých větví.

A dále pak se jedná o poměr  $\frac{V_g}{\bar{V}}$ , což je poměr rychlosti usazování  $V_g$  ku charakteristické rychlosti  $\bar{V}$ . Tento poměr vyjadřuje, jak moc je závislá odporová síla působící na částici na gravitaci.

Z obou těchto čísel poté vyplývá, že setrvačnost hraje větší roli než gravitace v trubicích s velkým poloměrem, zatímco pro průdušinky těsně před plicními sklípky je důležitější gravitace. [8]

### 2.2.3 Mezní velikost částic

Pro částice na rozmezí mezi Brownovým pohybem a pohybem velkých částic platí, že se pohybují stejně jako se pohybuje nosné médium. [8]

## 2.3 Mechanismy depozice

Principů, kterými se řídí usazování aerosolů v plicích je několik, a obecně lze říct, že závisí na třech parametrech, a to na fyzikálních vlastnostech částic, parametrech plic a také na vlastnostech proudění. [9]

### 2.3.1 Obecné mechanismy

Různé zdroje uvádí 4 až 5 základních druhů depozice kulových částic. Podle Lippmanna a kol. [9] se jedná o zachycení, usazování v důsledku setrvačnosti, gravitační sedimentace, depozice v důsledku difuze, a nakonec o elektrostatickou precipitaci.

Princip gravitačního usazování souvisí, jak název napovídá, s gravitační silou působící na částici. Tato síla je dominantní v úzkých trubicích, kde je malá rychlost proudění, a tedy částice setrvá v oblasti delší časový úsek. V plicích se typicky jedná o průdušky, průdušinky a plicní sklípky. Sedimentace se projevuje nad ekvivalentním průměrem částice  $0,5 \mu\text{m}$ . Pro menší, a tím pádem méně hmotné, částice se uplatňuje difuzní depozice a také pro ně platí výše uvedené, že jejich Knudsenovo číslo je větší než jedna, což znamená, že pro popis jejich pohybu se využívá teorie Brownova pohybu částic. Tento pohyb lze vysvětlit tak, že se drobné částice v plynu neustále pohybují, a protože jsou velmi malé, srážejí se s molekulami plynu. Tyto srážky mohou postupně vést k nárazu částice na stěnu či tkáň plic, na kterých se následně usadí. Tento princip se opět uplatňuje v oblastech s nízkou rychlostí proudění, tedy stejně jako u gravitační sedimentace, v alveolách a v průdušinkách.

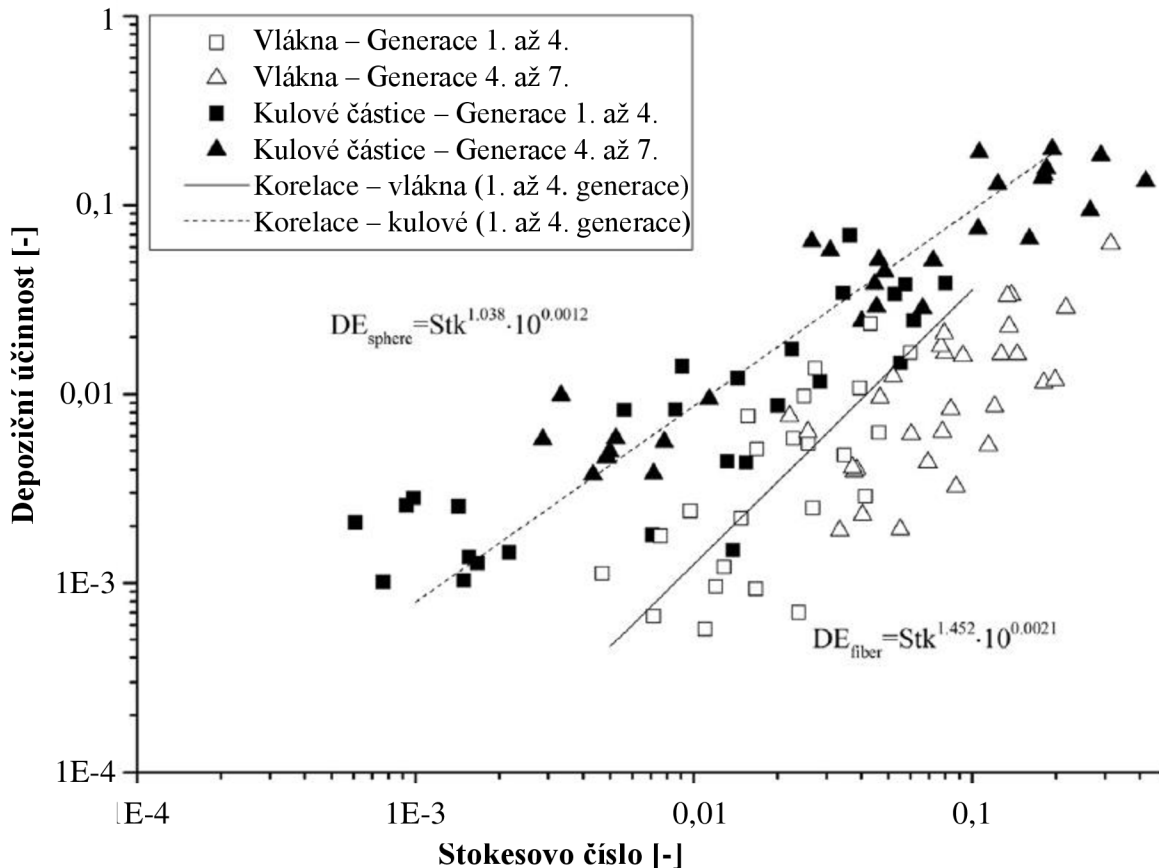
Princip zachycení souvisí hlavně s vlákny. Dochází k němu, pokud se vlákno přiblíží k povrchu dostatečně blízko, takže dojde k zachycení vlákna na daném povrchu. Jak uvádí Liddell a Miller v [10], pravděpodobnost zachycení roste s klesající vzdáleností mezi pohybující se částicí a stěnou a také s rostoucím poměrem rozměru částice ku rozměru trubice, v níž se částice pohybuje. V lidském těle jsou dvě hlavní oblasti, ve kterých dochází k zachycení. Jednak se jedná o nosní dutinu, kde se na zachycení podílí hlavně nosní chloupky, jednak o oblast průdušinek, které mají v průměru okolo  $200 \mu\text{m}$ .

Další důležitou metodou, jak se mohou částice usadit, je depozice v důsledku velké setrvačnosti. Tedy pokud má částice velkou hmotnost a tím pádem velkou hybnost, může dojít k tomu, že částice nedokáže reagovat na náhlou změnu proudu, různá zakřivení, větvení atd.,

a tím pádem narazí na stěnu, na které se usadí. [9] S tímto právě souvisí výše uvedené Stokesovo číslo.

Na závěr zbývá ještě zmínit elektrostatickou precipitaci. To je princip, při kterém se vysoce nabitá částice zachytí na stěnu dýchacího traktu, protože na stěně indukuje opačný náboj. Takto nabitá částice mohou být například aerosoly vzniklé při drcení či řezání minerálů. Tato metoda usazování však není tak častá, protože částice obvykle nemívají takový náboj. [9]

### 2.3.2 Rozdíly mezi depozicí sférických částic a vláken



Obrázek 2.1 Srovnání depozice vláken a kulových částic [6]

Srovnávat depozici vláken a sférických částic lze díky využití Stokesova čísla a účinnosti depozice. Takovéto srovnání provedl Bělka a kol. v [6] ze svých dat depozice vláken a z dat publikovaných Lízalem a kol. v [11] při stanovení depozice kulových částic na stejném modelu plic. Výsledky je možné vidět na obrázku 2.1

Pro výpočet Stokesova čísla je využita rovnice 2.5 a depoziční účinnost byla následně dopočtena podle rovnice 4.10. Pro srovnání bylo také důležité použít korekci na nepřesnosti způsobené automatickým vyhodnocováním filtrů.

Ze srovnání vyplývá, že se oba druhy částic usazovaly kvůli velké setrvačnosti pomocí nárazu na stěny modelu, protože s rostoucím Stokesovým číslem roste i účinnost depozice. Zároveň je možné na obrázku 2.1 pozorovat, že pro stejná Stokesova čísla měly kulové částice větší účinnost depozice. Tento jev lze vysvětlit tak, že vlákna se snáze zorientují ve směru proudu a následně se usadí v hlubších patrech plic. [6]

## 2.4 Vlákná

Jak již bylo naznačeno v úvodu, vlákna jsou částice, jejichž rozměry ve dvou osách jsou výrazně rozdílné oproti třetímu rozměru. Když se řekne vlákno, lze si představit velkou škálu různých výrobků. Počínaje vlákny, ze kterých jsou vytvořeny oděvy, přes dráty a optická vlákna, až po vlákna používaná ve stavebnictví. A právě ta posledně jmenovaná jsou v této práci stěžejní.

Standardně<sup>3</sup> se jako vlákno označuje částice, jejíž délka je větší než 5  $\mu\text{m}$  a zároveň poměr délky ku průměru je 3:1. Tedy délka částice musí být třikrát větší než její průměr, aby mohla být považována za vlákno. Často se lze také setkat s požadavkem [12], aby průměr vlákna nebyl větší než 3  $\mu\text{m}$ .

Vlákná lze prakticky dělit na přírodní (v přírodě se normálně vyskytující) a člověkem vyrobená (neboli syntetická, v anglosaské literatuře se označující jako *man-made vitreous fibers*, *MMVFs*, nebo také *man-made mineral fibers*, *MMMFs*)<sup>4</sup>. Mezi tato uměle vyrobená vlákna se řadí vlákna ze skla, minerálů, strusky či anorganických oxidů, nebo pak žáruvzdorná keramická vlákna, případně speciální vlákna. Obecně je tedy lze označit jako anorganická. Další jejich vlastností je, že jsou nekystalická, tedy amorfni. Vyrábí se ve formě skleněných výplní nebo vat, které se pak následně dělí podle materiálu neboli podle chemického složení. Jako typicky se vyskytující chemickou sloučeninu je důležité uvést oxid křemičitý,  $\text{SiO}_2$ , který se vyskytuje ve všech materiálových typech vláken. Dalšími sloučeninami jsou pak oxid hlinitý,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , typicky se vyskytující ve velkém poměru v žáruvzdorných keramických vláknech, která se používají do vyzdívek pecí. Často se v uměle vytvořených vláknech vyskytuje také oxid hořečnatý  $\text{MgO}$  a oxid vápenatý  $\text{CaO}$ . [13]

Na složení vláken pamatuje i evropská legislativa, konkrétně směrnice z roku 1967 s označením 67/548/EEC, s následující z roku 1997 s označením 97/69/ES, kde se píše, že jako minerální vatu, tedy uměle vytvořená skelná/minerální vlákna, lze označovat takovou, která má složení alespoň z 18 hm. % a více z oxidů alkalických zemin ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ ). Naopak pro vlákna s méně než 18 % se musí používat označení žáruvzdorná keramická vlákna. [14]

### 2.4.1 Výplně ze skelného vlákna

Používají se ve většině aplikací jako výplň do kompozitních materiálů, kde zlepšují mechanické vlastnosti matrice. V praxi jsou využívány jako termoplasty a termosety, které našly využití v automobilním průmyslu, elektrotechnice, stavebnictví, jako materiál pro stavbu lodí a letadel, nebo jako ohnivzdorné oblečení. [13]

### 2.4.2 Skelná, minerální a strusková vata

Jak bylo napsáno v předchozí podkapitole, hlavními složkami vláken jsou křemík, hliník, hořčík, ale i železo a další. Mezi horniny, které se používají pro výrobu minerálních vláken, můžeme zařadit čedič, vápenec a živce, ke kterým se mohou přidávat různá aditiva. Skelná vlákna jsou naopak vyráběna hlavně z oxidu křemičitého. Postupy výroby budou popsány v další podkapitole.

<sup>3</sup> Podle manuálu Národního institutu pro bezpečnost a zdraví v pracovním prostředí [75]

<sup>4</sup> Často se tyto pojmy zaměňují a považují za sobě rovné. Správně by však mělo být, že *MMMFs* označují celou skupinu minerálních vláken, tedy skelné, struskové i kamenné, a jako *MMVFs* by se měla značit skelná vlákna.

Oblast použití vláken ve formě vat je široká, ale největší podíl spadá na tepelné a akustické izolace, případně požáruvzdorné konstrukce. Princip fungování takovýchto izolací je následující: velké shluky vláken vytvoří jakousi houbovitou hmotu, ve které je obsaženo určité množství vzduchových bublin, které následně zabraňují prostupu jak tepla, tak i akustických vln. Z toho vyplývá, že je důležité vytvořit tuto hmotu optimálně stlačenou, aby vzniklo velké množství bublin. Pokud by byla stlačena moc, mohlo by dojít k úbytku vzduchových mezer a omezení izolačních vlastností. Vata se dodává buď ve formě rozměrově různorodých plátů, nebo ve formě sypké, tedy jakýchsi chomáčů, viz obr. 2.2. Mezi speciální aplikace patří jednoznačně skelná vata obsažená v bateriích, kde slouží jako fyzická bariéra oddělující kladně a záporně nabitě desky a zároveň slouží jako filtr pro elektrolyt. 2.22.2 [13]

### 2.4.3 Žáruvzdorná keramická vlákna

Tato vlákna se od předchozích liší tím, že je lze používat při teplotách okolo 1000 °C. Jsou též odolnější proti teplotním šokům a mají menší hustotu, a tedy i hmotnost. Využití je hlavně v průmyslu, např. v pecích jako vysokoteplotní izolace, nebo pak pro vesmírné aplikace. [13]



Obrázek 2.2 Skelná vata [15]



Obrázek 2.3 Tremolit, druh azbestu [16]

## 2.5 Azbest

Doposud uváděná vlákna byla uměle vyráběná a často sloužící jako náhrada za azbest, který se vyskytuje přirozeně v přírodě. Je proto vhodné uvést základní informace i o azbestu.

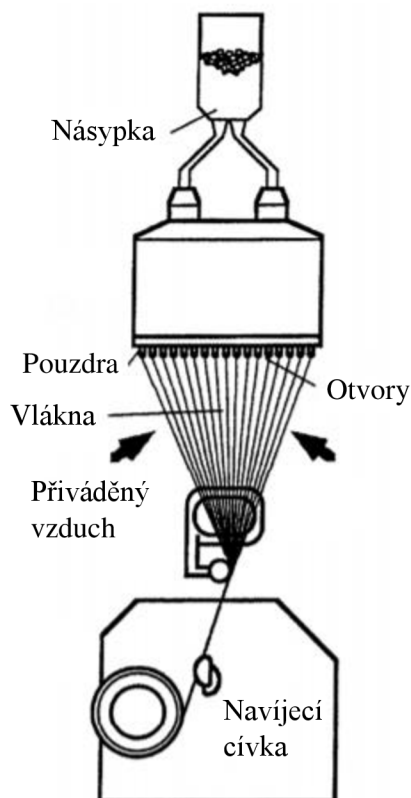
Jako azbest se podle definice souhrnně označuje 6 minerálů ve tvaru vláken. Jedná se o chryzotil, amozit, krokydolit, tremolit (obr. 2.3), aktinolit a antofylit. Pro všechny uvedené je společné, že mají v porovnání s ostatními stavebními materiály vynikající stavebně-technické vlastnosti. Jsou teplotně i chemicky odolné, nehořlavé, pevnost v tahu mají na úrovni oceli. Lze je použít jako tepelnou, elektrickou, nebo i chemickou izolaci, a jako zpomalovač hoření. V chemickém složení lze nalézt křemík, sodík, vápník, hořčík, železo. [17]

V dřívějších dobách byl azbest používán jako izolace potrubí, v podlahách, jako akustická izolace, v betonových konstrukcích. V dnešní době je již zakázán, protože prokazatelně způsobuje dýchací potíže a onemocnění dýchacích cest. Zakaz používání platí od konce minulého století, avšak jeho odstraňování z budov probíhá pomalu. [17]

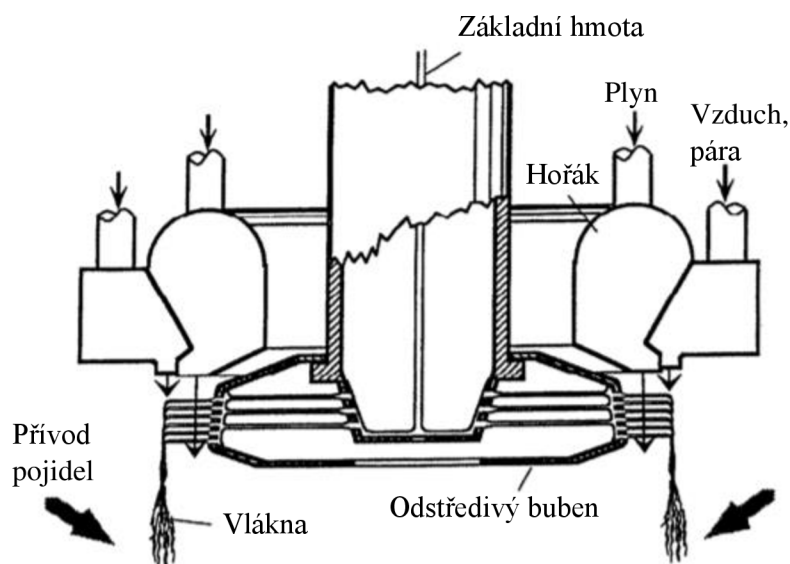
## 2.6 Výroba

Způsobů výroby výše uvedených umělých vláken je mnoho a obvykle je každý specifický pro jednotlivé typy vláken. Popis uvedených metod je převzat z [13].

Pro všechny principy je však shodné, že na začátku musí dojít k roztavení vstupních surovin. Pro výplňová skelná vlákna, viz obr. 2.4, se používá protlačování přes malé otvory v pouzdrech pod pecí. Skelné vlákno je následně namotáváno na vysokorychlostní cívku, před kterou ještě dojde k jejich ochlazení pomocí vzduchu či vody, a vytvoří se tak nepřerušovaná vlákna. Regulací otáček cívky lze zajistit rozdílné průměry vláken.



Obrázek 2.4 Princip výroby výplňových skelných vláken [18]



Obrázek 2.5 Princip výroby skelných vláken [18]

U skelných vláken se využívá technologie na obr. 2.5, při které se roztavená hmota zavede na rotační buben, ze kterého se díky odstředivé síle odpoutávají jednotlivá vlákna. Na vlákna jsou poté zavedeny horké spaliny z pecí, díky kterým vzniká výsledná směs různě směřovaných dlouhých a širokých vláken. V průběhu výroby mohou být na vlákna nanášeny různé pryskyřice a oleje. Pro výrobu filtrů se používá ještě jedna technologie, kdy se táhne velké vlákno z roztavené hmoty, to se pak znovu roztaví a zavedou se na něj horké plyny o velké rychlosti, které mají za následek vytvoření shluku vláken, na které se mohou opět nanést různá pojiva. Tento postup je využíván i pro výrobu keramických vláken, u nichž musí být původní materiál nahřát na teploty okolo 2000 °C.

Dalším principem, kterým se vyrábí minerální a strusková vata a který je podobný principu výroby skelných vláken, je přivedení roztavené hmoty na několik rotujících prvků, zpoza kterých je přiváděn vzduch, který odnáší vytvořená vlákna.



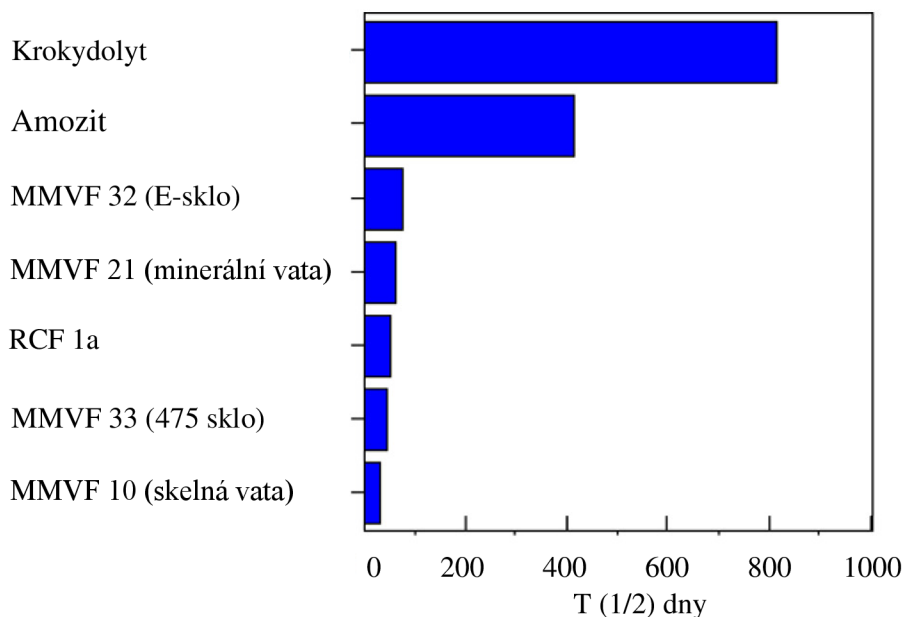
## 2.7 Rozdíly mezi azbestem a umělými vlákny

Hlavním rozdílem při vdechnutí mezi přírodně se vyskytujícím azbestem a uměle vyrobenými vlákny je podle [19] způsob, jakým se rozpadají. Zatímco vlákna azbestu se rozpadají podélně, takže vzniknou dvě stejně dlouhá vlákna o menším průměru, uměle vytvořená se obvykle dělí příčně, zkrátí se tedy jejich délka. Tento fakt zásadně ovlivňuje toxicitu jednotlivých částic, která bude popsána v následující kapitole. Dalším uváděným rozdílem v [20] je, že se vlákna azbestu usazují ve shlucích, zatímco uměle vytvořená vlákna se spíše usazují jako jednotlivá vlákna.

## 2.8 Účinky depozice vláken na lidské zdraví

Vlákna a obecně aerosoly ve vzduchu, zjednodušeně jen prach, působí na lidské tělo různě. Mohou se usazovat na kůži a způsobovat podráždění, stejně tak mohou působit i v očích. Při dýchání však dochází k nasátí částic spolu se vzduchem až do plic. V nich se poté pohybují a usazují podle principů popsaných výše.

Jakmile se tedy vlákno usadí na povrchu plic, přičemž záleží na části plic a také na vlastnostech vlákna, rozběhnou se mechanismy sloužící k ochraně sliznice před cizími částicemi. Mezi nosní dutinou a průdušnicí se jedná o pohyb hlenu, který z daných částí odvádí cizí předměty, a od posledních průdušinek k plicním sklípkům je využita fagocytóza makrofágů. Tyto mechanismy budou podrobněji popsány v podkapitole 3.2. Obvykle také dochází k chemickému rozkladu, případně rozpadu vláken na menší. [21]



Obrázek 2.6 Vážený poločas rozpadu různých vláken [19]

Pro popis toxicity vláken se používají anglické pojmy jako *biopersistence* a *biodurability*. Přičemž první lze vysvětlit jako souhrn všech mechanismů (ať už sebeobrany plic, nebo rozložení vláken) sloužících k vyčištění plic. Druhý pojem udává, zda mohou být vlákna odstraněna fagocytózou, či nikoli. Tento fakt záleží na délce vláken. Pokud je vlákno delší než 15-20  $\mu\text{m}$ , tedy rozměr makrofágu, potom k fagocytóze nemůže dojít, a naopak mohou být poškozeni makrofágy. Bioperzistenci lze názorně popsat váženým poločasem rozpadu, který značí, za jak dlouho si jsou lidské plíce schopné poradit s polovinou usazených vláken. Na obrázku 2.6 jsou



vidět poločasy rozpadu, například pro MMVF 10, značící skelnou vatu pro izolace, pro níž je poločas rozpadu v řádu desítek dnů. Pro azbest je to až několik stovek dní. [19] [21]

Onemocnění způsobených depozicemi vláken v plicích může být celá řada, obecně ale vždy záleží, jakému typu vláken (bioperzistence, rozměry) a jaké dávce bude člověk vystaven. Je nutné zmínit zánětlivé a fibrotické procesy<sup>5</sup>, které se na plicním vazivu objevují. Poté různé obtíže s plicními sklípky a v neposlední řadě také rakovinotvorné bujení plicní tkáně. [21] Podrobnější popis zdravotních potíží bude v kapitole věnované plicím. Lidské tělo si je i přes všechny tyto hrozby s určitým množstvím vláken schopno poradit samo bez pozorovaných následných problémů. [22] A protože je výzkum na lidech nevhodný, používají se laboratorní krysy a křečci, kteří se vystavují po různé časové úseky rozličným druhům vláken, a z těchto pokusů se následně vytváří limity.

## 2.9 Vnímání MMVFs světovými organizacemi

Dalším problémem také je, že různé asociace se k nebezpečnosti uměle vytvořených vláken, některé i přímo ke skelným vláknům, staví různě. Pokud je v následujícím textu psáno uměle vytvořená minerální vlákna nebo uměle vytvořená vlákna, jedná se o skupinu skelných, minerálních i struskových vláken dohromady. Pokud je řeč pouze o konkrétních, jsou tak nazvána.

### 2.9.1 Mezinárodní asociace pro výzkum rakoviny

Například Mezinárodní asociace pro výzkum rakoviny (*International Agency for Research on Cancer, IARC*), spadající pod Světovou zdravotnickou organizaci (*World Health Organization, WHO*), vydává publikace hodnotící karcinogenitu různých substancí a používá řazení do 5 skupin, přičemž je vhodné uvést původní anglické pojmy i s jejich překladem použitým zde (*sufficient* – dostatečné, *limited* – omezené, *inadequate* – nedostatečné):

- Skupina 1 – Látky karcinogenní pro lidi – jsou dostatečné důkazy jak u zvířat, tak i u lidí
- Skupina 2A – Pravděpodobně karcinogenní pro lidi – omezené důkazy karcinogenity u lidí, dostatečné důkazy karcinogenity u zvířat
- Skupina 2B – Možná karcinogenní pro lidi – omezené důkazy karcinogenity u lidí, ne úplně dostatečné důkazy karcinogenity u zvířat; nebo nedostatečné důkazy karcinogenity u lidí, ale dostatečné důkazy karcinogenity u zvířat
- Skupina 3 – Neklasifikovatelné z hlediska karcinogenity pro lidi – nedostatečné důkazy karcinogenity u lidí a nedostatečné nebo omezené důkazy karcinogenity u zvířat
- Skupina 4 – Pravděpodobně nekarcinogenní pro lidi – podle důkazů není prokázána karcinogenita ani u lidí, ani u zvířat

Ve svojí poslední publikaci na téma uměle vytvořených vláken z roku 2002 s názvem *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human* přiřadila přímo ke skelné vatě, že existují nedostatečné důkazy (*inadequate evidence*), že je skelná vata karcinogenní pro lidi. Pro zvířata uvádí omezené důkazy (*limited evidence*) karcinogenity skelných vláken. A celkově řadí různá vlákna do následující tabulky 2.3:

<sup>5</sup> Jedná se o nemoc, při které se tvoří jizvy na plicní tkáni, jež způsobují zmenšení povrchu pro výměnu plynů, podrobněji je popsána v podkapitole 3.3.3

Tabulka 2.3 Řazení dle IARC [13]

Druh vláken	IARC skupina
Speciální skelná vlákna (E-sklo a „475“ skelná vlákna)	2B
Žárovzdorná keramická vlákna	2B
Izolační skelná vata, výplňová skelná vlákna, minerální a strusková vlákna	3

Tato zhodnocení vychází z velkých měření a sledování provedených v minulém století na pracovnících továren pro výrobu vláknitých materiálů v USA a v Evropě. Dále pak používali data z vystavení krys a křečků vláknům. Nelze také opomenout fakt, že postupně dochází k vývoji nových materiálů z hlediska jejich bioperzistence, takže se tato vlákna mohou chovat jinak. [13]

### 2.9.2 Příručka Industrial Toxicology

V knize Hamilton & Hardy's Industrial Toxicology z roku 2015 [20] se uvádí, že uměle vytvořená minerální vlákna mohou způsobovat obtěžující prach, ale neexistují žádná konzistentní epidemiologická data, která by potvrdila, že jsou fibrogenní či karcinogenní pro lidi. Mezi akutní obtíže způsobené depozicí vláken řadí podráždění kůže, symptomy suchého kašle, suchých očí a nosu.

### 2.9.3 Článek o vláknech na pracovišti, Lipworth 2009

Stejně tak Lipworth a kol., kteří v roce 2009 sepsali článek [23], ve kterém se zabývali shrnutím dosavadních znalostí a výzkumů na téma rizik, jenž se pojí s expozicí člověka uměle vyrobeným vláknům, uvádí závěr, že i když došlo k určitému nárůstu vzniku rakoviny u pracovníků ve výrobě umělých minerálních vláken, kvůli nedostatečně nadměrnému riziku mezi koncovými uživateli, absenci závislosti vdechnutého množství na riziku, pravděpodobnosti zkeslení a zároveň kvůli blízkce související problematice kouření tabáku a možnému vystavení lidského těla azbestu, nelze v tuto chvíli přiřadit uvedeným vláknům karcinogenní účinky.

### 2.9.4 Asociace v USA

Naopak v 14. reportu o karcinogenech vydaným americkým národním programem (*National Toxicology Program, NTP*) v roce 2016 je kapitola o vybraných skelných vláknech, ve které se důvodně předpokládá, že jsou určitá skelná vlákna lidský karcinogen. Vychází z poznatků studií depozice vláken na zvířatech a také ze studií vlastností bioperzistentních vláken. Ty pak považuje za karcinogenní. Opět jsou problémem nedostatečné studie karcinogenity v lidském těle. [24]

V tomto reportu se výhradně pro skelná vlákna pro izolaci uvádí, že byl u krys vystavených těmto vláknům sledován nárůst výskytu leukemie a problémy s lymfatickými uzlinami. Nicméně opět hodnotí velké studie pracovníků ve výrobě skelných vláken v USA, Kanadě, Francii a Rusku a popisuje, že je sice zaznamenán statisticky významný nárůst rakoviny, nicméně v americké části studie při uvážení kouření tabáku není důkaz pro spojení rakoviny plic s vystavením pracovníků skelným vláknům.

Bohužel však jednoznačně nestanovuje závěr a odvolává se na nedostatečné záznamy a množství studií, a také na problémy s uvažováním kouření tabáku.

V otázce limitů na americké půdě lze uvést organizace *NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)*, *OSHA (Occupational Safety and Health Administration)*

a ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*). Každá má svá pravidla vláken, pro která určuje limity. NIOSH vychází z doporučených expozičních limitů (*recommended exposition limits, REL*) pro skelná, minerální a strusková vlákna, přičemž hodnotí jak limity pro vlákna s  $\sigma \leq 3,5 \mu\text{m}$  a s délkou  $\geq 10 \mu\text{m}$  (prostřední sloupec tabulky 2.4), tak i celkové množství vláken. OSHA naopak udává přípustné expoziční limity (*permissible exposition limits, PEL*), taktéž pro materiály jako NIOSH. V jejím případě jsou v prostředním sloupci uvedeny hodnoty pro vdechnutelná vlákna a v pravém celkové limity. Třetí organizace se na vlákna dívá obecně a stanovuje prahový limit obecně pro vdechnutelná vlákna. Všechny limity jsou uváděny v časově váženém průměru (*time weighted average, TWA*), obvykle v rámci 8 hodin.

Tabulka 2.4 Limity v USA [24] [25] [26]

Skelná, minerální a strusková vlákna		
Organizace	TWA – omezená	TWA – celkem
<b>NIOSH doporučený limit</b>	3 vlákna/cm <sup>3</sup>	5 mg/m <sup>3</sup>
<b>OSHA přípustný limit</b>	5 mg/m <sup>3</sup>	15 mg/m <sup>3</sup>
<b>ACGIH prahový limit</b>	1 vlákno/cm <sup>3</sup>	-

### 2.9.5 Evropská unie

Problematikou se také zabývá Evropská komise v doporučení od Vědecké komise pro expoziční limity v pracovním prostředí pro uměle vytvořená minerální vlákna bez indikace karcinogenity a bez jiných specifikací (*Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for man made-mineral fibres (MMMFs) with no indication for carcinogenicity and not specified elsewhere*) z roku 2012 [21], a také v publikaci zabývající se limity pro žáruvzdorná keramická vlákna (*Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Refractory Ceramic Fibres*) z roku 2011. [27]

Co se týče prvního doporučení, je nutné nejprve objasnit evropskou legislativu, a jak nahlíží na uměle vytvořená minerální vlákna bez indikace karcinogenity. V nařízení evropského parlamentu č. 1272 z roku 2008 [28] se v poznámce Q píše: „Klasifikace látky jako karcinogenní není povinná, jestliže lze prokázat, že látka splňuje jednu z těchto podmínek:

- krátkodobá zkouška bioperzistence při vdechování prokázala, že vlákna o délce větší než 20  $\mu\text{m}$  mají vážený poločas bioperzistence kratší než 10 dnů, nebo
- krátkodobá zkouška bioperzistence při intratracheální<sup>6</sup> instilaci prokázala, že vlákna o délce větší než 20  $\mu\text{m}$  mají vážený poločas bioperzistence kratší než 40 dnů, nebo
- vhodná intraperitoneální<sup>7</sup> zkouška prokázala, že neexistuje důkaz o zvýšené karcinogenitě, nebo
- při vhodné dlouhodobé inhalační zkoušce nedochází k významným patogenním ani neoplastickým<sup>8</sup> změnám.“

<sup>6</sup> Intratracheální instalace označuje zavedení sledované látky přímo do průdušnice [82]

<sup>7</sup> Intraperitoneální zkouška je označení pro zavedení látky skrz pobřišnici [83]

<sup>8</sup> Jedná se o označení: „týkající se nádoru“ [84]

A dále je ještě ve stejném dokumentu uvedena poznámka R: „Klasifikace látky jako karcinogenní nemusí být použita u vláken, u nichž je geometrický průměr jejich tloušťky vážené délkou po odečtení dvou směrodatných odchylek větší než 6  $\mu\text{m}$ .“ Jedná se o doslovné převzetí z nařízení [28].

Vědecká komise tedy určila limity pro pracovní prostředí ze studií, kdy dlouhodobé (2 roky) vystavení krys vláknům nezpůsobily karcinogenitu, přičemž u všech studií se vyskytovaly hlavně záněty a fibróza plic. Jednalo se o vlákna skelná, minerální a strusková delší než 5  $\mu\text{m}$ , kratší než 100 až 200  $\mu\text{m}$ , s průměrem menším než 3  $\mu\text{m}$  a poměrem délky ku průměru 3:1.

Nejvyšší dávka vláken, u které nedochází ke statisticky významným nežádoucím účinkům na organismus (*no-observed-adverse-effect level*, *NOAEL*), byla potom rovna 30 vláknům na mililitr vdechnutého vzduchu. Pokud se použijí korekční faktory a uvažují se i vlákna, pro něž nejsou dostatečná data, potom vědecká komise uvádí, že limit pro pracovní prostředí (*occupational exposure limit*, *OEL*) pro nekarcinogenní vlákna, jež jsou definována výše, je **1 vlákno na mililitr** (cca 1  $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Dalším je pak limit z roku 2000 pro MMVF10, tedy vyloženě pro izolační skelná vlákna, pro která uvádí 10 vláken na mililitr. [21]

Pro karcinogenní žáruvzdorná vlákna je v [27] uveden limit pro pracovní prostředí (*OEL*) roven 0,3 vlákna na mililitr, přičemž pro uvedenou hodnotu expozice nebyly sledovány nežádoucí efekty.

Nutné je také dodat, že mnoho evropských zemí si určuje vlastní limity. Jedná se například o Holandsko, Velkou Británii, Německo, Francii a další.

### 2.9.6 Shrnutí limitů v Evropě

Publikace holandského ministerstva zdravotnictví, prosperity a sportu z roku 2014 shrnula jednotlivé expoziční limity pro pracovní prostředí pro uměle vyrobená minerální vlákna obecně pro různé Evropské země, přičemž příklady je možné vidět v následující tabulce 2.5. Bohužel každá země si stanovuje limity pro různá vlákna. Například Vědecká komise, jak bylo uvedeno výše, udává limit pro nekarcinogenní vlákna, Holandsko zase pro keramická vlákna.

Všechny limity jsou opět uváděny v časově váženém průměru TWA, obvykle v rámci 8 hodin:

Tabulka 2.5 Vybrané limity v Evropě [29]

Země/organizace	Limit – TWA	Poznámka
<b>Vědecká komise při EK</b>	0,1 $\text{mg}/\text{m}^3$	
<b>Nizozemí</b>	0,5 vlákna/ml	Pro keramická vlákna
	5 $\text{mg}/\text{m}^3$	Neplatí pro keramická vlákna
<b>Velká Británie</b>	10 / 4 $\text{mg}/\text{m}^3$	Vdechovatelná / respirabilní frakce karbidu křemíku
	5 $\text{mg}/\text{m}^3$	Speciální skelná vlákna (E-sklo, 475 skelná vlákna)
<b>Francie</b>	10 $\text{mg}/\text{m}^3$	Karbid křemíku
<b>Finsko</b>	5 $\text{mg}/\text{m}^3$	Obecně pro vdechovatelné minerální vaty

Pro lepší představu lze zjednodušeně převést výše uvedené  $\text{mg}/\text{m}^3$  na řádově 0,1 až 1 vlákno na mililitr. Vdechovatelná vlákna značí všechna vlákna, která mohou být vdechnuta nosem nebo ústy, vlákna respirabilní projdou přes oblasti s řasinkovým epitelem a usazují se až za nimi.

Pokud jde o zařazení na seznam karcinogenních látek, němečtí představitelé například udávají obecný závěr pro vlákna ten, že se jedná o pravděpodobně karcinogenní látky nebo že jsou karcinogenní podle experimentů na zvířatech. EU pak stanovuje u speciálních vláken jejich pravděpodobnou karcinogenitu a izolační skelnou, minerální a struskovou vatu a výplňová skelná vlákna podezřívá z karcinogenity. [29]

### 2.9.7 Česká legislativa

Na přípustné expoziční limity (PEL) pamatuje i česká legislativa v Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. v aktualizovaném znění z roku 2018, viz tabulka 2.6:

Tabulka 2.6 Limity v České republice [30]

Druh vláken	PEL
Azbestová vlákna všech druhů azbestu	0,1 vlákna/ $\text{cm}^3$
Keramická vlákna	0,3 vlákna/ $\text{cm}^3$
Minerální (čedičová...), skelná, strusková vlákna	1 vlákno/ $\text{cm}^3$
Umělá minerální vlákna všech rozměrů	4 $\text{mg}/\text{m}^3$

Přičemž pro uměle vyrobená minerální (skelná, strusková...) vlákna musí být splněny zároveň jak hmotnostní limit, tak i početní limity. [30]

### 2.10 Vývoj vláken

Poté, co se začala zkoumat uměle vytvořená minerální vlákna a zjistilo se, že velký vliv na jejich působení na lidské tělo má jejich bioperzistence, rozběhla se snaha vyvíjet a používat méně bioperzistentní materiály. Toho bylo dosaženo tak, že se přidávaly ke směsi tradičních materiálů pro výrobu skelných vláken navíc alkalické oxidy a boráty. Pro snížení bioperzistence čistě minerálních vláken se přidával hliník namísto křemíku, případně opět oxidy alkalických zemin. Namísto nebezpečných žáruvzdorných keramických vláken byly vyvíjeny směsi na bázi vysokoteplotně odolných materiálů, například vlákna ze silikátů alkalických zemin. [13]

### 2.11 Filtrace vláken a normy

Pokud se člověk přece jen musí nacházet v prostředí, kde hrozí, že se vyskytuje nadlimitní koncentrace nebezpečných aerosolů, musí přijmout taková opatření, aby minimalizoval rizika spojená s jejich vdechováním. Proto se používají ochranné osobní pomůcky (OOP), na které se vztahuje Nařízení Evropského parlamentu a Rady 2016/425, podle kterého byl přijat český zákon č. 90/2016 Sb. Speciálně pro ochranu dýchacího ústrojí existuje navíc ještě norma ČSN EN 149+A1, která standardizuje respirátory a masky pro celou Evropu. [31]

Pro certifikaci respirátorů na území Evropské unie se používá značka *CE (Conformité Européen)* a respirátory jsou zařazeny do několika kategorií ochrany. První dělení lze uvést na masky, které filtrují okolní znečištěný vzduch, a masky, které mají externí zdroj čistého vzduchu. Častěji používané jsou filtrující masky, které se dále podle účinnosti filtrace částic rozlišují na skupinu FFP1 s účinností 80 %, FFP2 a FFP3 s 94 %, resp. 99 % účinnosti. Písmena v kódu značí *filtering face piece*, což do češtiny přeloženo znamená filtrační obličejová maska. Masky

chrání obecně před aerosoly do velikosti cca 0,6  $\mu\text{m}$ . A jejich použití závisí na koncentraci škodlivin v prostoru. Pokud je překročena hraniční hodnota dané škodliviny 4krát, je možné použít FFP1, je-li 10krát, potom se musí použít FFP2, a nakonec pokud dojde k překročení 30krát, nezbyvá než použít masku s třídou ochrany FFP3. [32] [33] Masky a respirátory mohou být buď jednorázové, nebo na více použití, a existují ve formě celoobličejových respirátorů, polomasek, anebo obyčejných respirátorů. Mohou se také lišit v tom, co vše odfiltrují. Některé zvládají pouze pevné částice, ty lepší odfiltrují také plynné škodliviny.

Při nasazování masky je velmi důležité, aby řádně přilnula k pokožce a nevznikly mezery, kvůli kterým by poté maska ztratila na deklarované účinnosti. Stejně tak je důležité, aby byl muž oholen, jak naznačuje studie provedená na maskách splňujících americký standard P2/N95 (účinnost filtrace 95 %) v [34], která stanovuje, že muži s vousy nebyli schopni dosáhnout přilehnutí respirátoru, a tedy požadované filtrace, jako oholení muži.

### 3 DÝCHACÍ SOUSTAVA

Lidské buňky potřebují ke své činnosti kyslík. Celý proces zpracování kyslíku by se dal zjednodušit tak, že kyslík je použit jako reaktant při oxidativní fosforylaci, při které se uvolní jednak energie ve formě adenosintrifosfátu a jednak oxid uhličitý. A právě ten, nebo spíše jeho akumulace v buňkách, nutí k dýchání, a tedy k jeho odstranění z těla. [35]

V této kapitole bude popsána jednak anatomie plic, jednak mechanismy obrany plic před škodlivinami, a nakonec nemoci dýchacího aparátu způsobené znečištěným prostředím. Jednotlivé názvy a pojmy budou pro přehlednost psány jak v češtině, tak i v *latině*. Některé hlavní prvky dýchací soustavy tak mohou být v textu označeny i vícekrát.

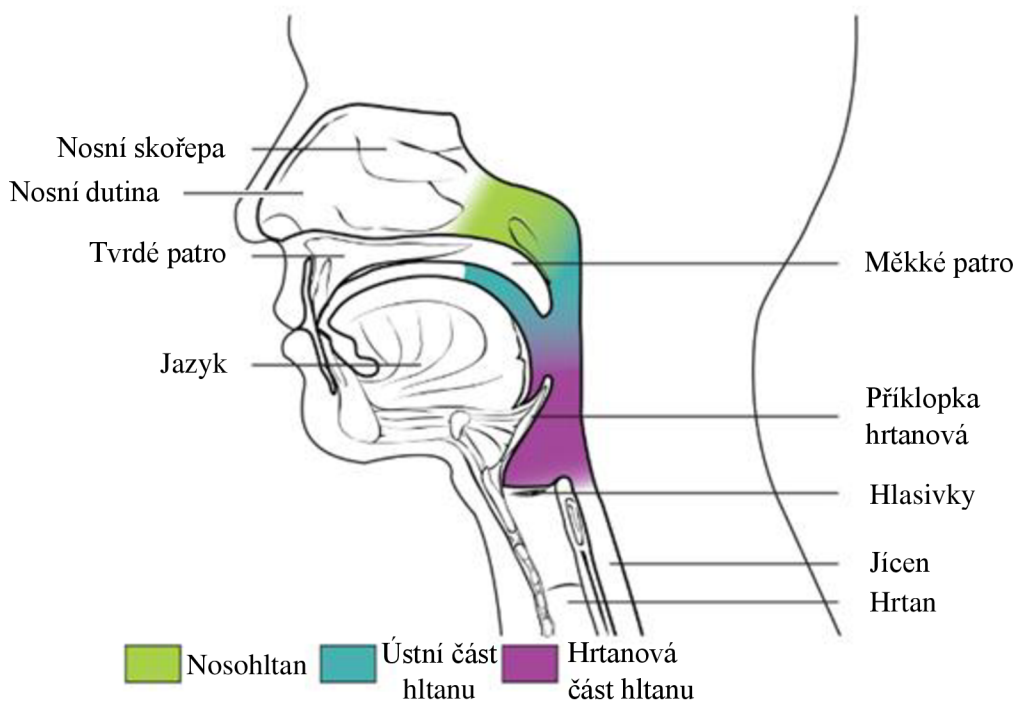
#### 3.1 Popis dýchací soustavy člověka

Obecně lze podle [36] rozdělit dýchací systém na oblast, ve které dochází jen k vedení vzduchu, která se neúčastní interní výměny plynů, a na oblast respirační, ve které naopak dochází k výměně plynů. Další možný pohled na dýchací soustavu nabízí [37], kde je dělení na horní cesty dýchací (nosní dutina, *cavitas nasi*, vedlejší nosní dutiny, *sinus paranasales*, a nosohltan, *nosopharynx*), dolní cesty dýchací (hrtan, *larynx*, průdušnice, *trachea*, a průdušky, *bronchi*), a nakonec samotné plice, *pulmones*.

Popis jednotlivých částí dýchací soustavy v následujících podkapitolách je z převzat z [36] a [37], tedy Anatomy and Physiology od společnosti OpenStax CNX, respektive ze Základů anatomie z Masarykovy univerzity od Hanzlové.

##### 3.1.1 Nos

Nos, latinsky *nasus externus*, lze považovat za vstupní část celé dýchací soustavy. Vystupuje z lidské tváře a je tvořen několika částmi. Pro dýchací soustavu jsou ale důležité především nosní dírky, *nares*, umístěné zesponu pod nosním hrotem, *apex nasi*. Dělí je nosní přepážka, *septum nasi*.



Obrázek 3.1 Nosní dutina, převzato a upraveno z [36]

### 3.1.2 Nosní dutina

Latinsky *cavitas nasi*, neboli nosní dutina, se nachází za nosními dírkami. I v této oblasti se nachází nosní přepážka, která je tvořena kostí, *pars ossea*, v zadní části nosu až po vazivovou část, *pars membranacea*, v přední části u nosních dírek. Nosní dutina je tedy omezena spodní stěnou, stropem, bočními stěnami a nosní přepážkou. Jednotlivé stěny jsou z většiny tvořeny kostí, jež je pokrytá nosní sliznicí, *tunica mucosa*, která pokrývá také výrůstky z boční stěny zvané skořepky, *concha nasalis*, a taktéž nosní průchody, *meatus nasi*, mezi nimi. Sliznice plní dvě funkce, jednak slouží k čichu, ale především je lidskému tělu platná při zachytávání nežádoucích látek, což znamená, že se jedná o první mechanismus, kterým se může lidské tělo bránit při expozici částicím. Problematikou ochrany dýchací soustavy se zabývá podkapitola 3.2.1. Kromě tohoto prvního čištění má nosní dutina také za úkol zvlhčit hlenem a ohřát konvekci od stěn procházející vzduch. Při případném silném podráždění dojde ke kýchnutí, čímž je taktéž možné odstranit nežádoucí látky.

S nosní dutinou jsou propojeny vedlejší dutiny nosní, *sinus paranasales*, které jsou taktéž vystlány nosní sliznicí a které slouží pro odlehčení lebky a zajištění tepelné rovnováhy mozku.

### 3.1.3 Hltan

Na obrázku 3.1 je vidět nosní i ústní dutina, *cavum oris*. Vdechnutý vzduch při nádechu nosem proudí přes nosní dutinu a nosní průduchy kolem měkkého patra, *palatum molle*, až do nosohltanu, *nosopharynx*. Aby se při polykání nedostala potrava do nosní dutiny, zvedá se reflexivně měkké patro. Část pod měkkým patrem a za ústní dutinou se nazývá příznačně ústní část hltanu, *oropharynx*, a nejspodnější část společné trubice dýchací a trávicí soustavy je označována jako hrtanová, tedy *laryngopharynx*. Za zmínku zde ještě stojí hltanové mandle, *tonsilla pharyngea*, které se nachází nahoře v pravoúhlém záhybu nosohltanu. Ty jsou taktéž pokryty řasinkovým epitelem a slouží k záchytu a neutralizaci patogenů. Další mandle se stejným účelem leží v ústní části hltanu. Zajímavé také je, že se na začátku této střední části mění cylindrický řasinkový epitel na dlaždicový. Hrtanová část končí na dělení mezi dýchací a trávicí soustavou. Hltan přechází v hrtan, *larynx*, a jícen, *oesophagus*.

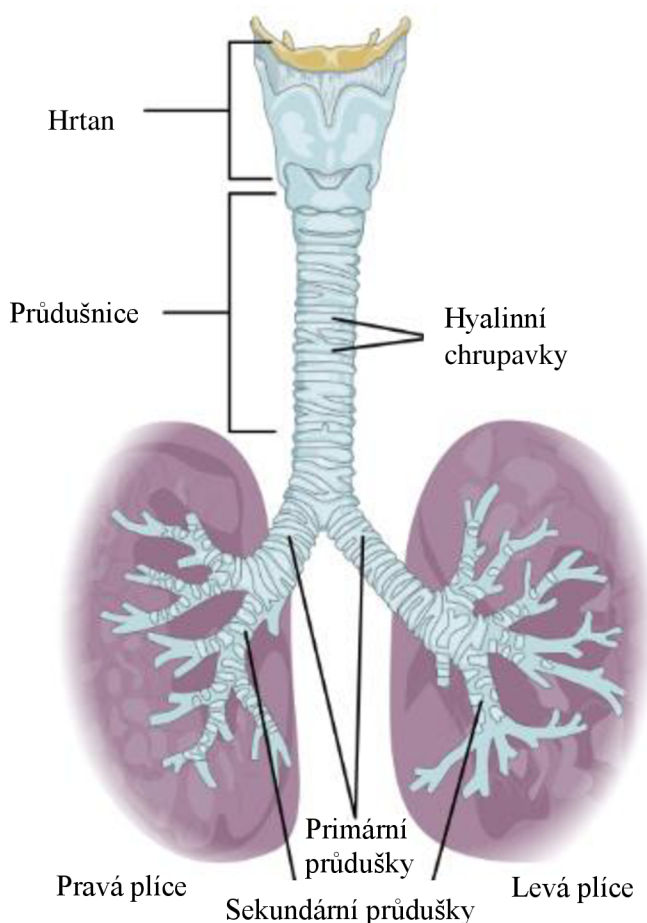
### 3.1.4 Hrtan

Latinsky taktéž zvaný jako *larynx*. Jedná se o různě tvarovanými chrupavkami, svaly a vazy vyztuženou trubicí, která je v horní části kryta proti polykané potravě pružnou chrupavkou zvanou příklopka hrtanová, *epiglottis*. Pod příklopkou se nachází štěrbina z vazů, které se nazývá hlasivky, *glottis*. Ty mohou mít dvě polohy, buď plně otevřené při dýchání, nebo se zúží tak, že vydávají zvuk, který je základem pro řeč. Hrtan pokračuje až po prstencovitou chrupavku, *cartilago cricoidea*, na úrovni 6. krčního obratle, kde přechází v průdušnici, *trachea*. Sliznice přechází z dlaždicového epitelu opět na cylindrický řasinkový, který stejně jako v nosní dutině a v nosohltanu dokáže produkovat hlen, na který se zachytávají nežádoucí látky. Hrtan je možné vidět na obrázku 3.2.

### 3.1.5 Průdušnice

Trubice navazující na hrtan, kterou tvoří hyalinní chrupavky, *cartilagine tracheales*, kterých je 16 až 20 a které jsou spojené vazivem. Chrupavky připomínají písmeno C otočené směrem k jícnu. Povrch průdušnice je opět tvořen jemným řasinkovým epitelem, zpod kterého se uvolňuje hlen. Jak je z obrázku 3.2 patrné, průdušnice se v úrovni horních laloků plic rozdvouje, což se také označuje jako bifurkace. Podle hrudních obratlů toto dělení probíhá na úrovni 4. a 5. obratle. Výstupek na rozdělení průdušek se nazývá latinsky *carina tracheae*.





Obrázek 3.2 Hrtan, průdušnice a další dělení, převzato a upraveno z [36]

### 3.1.6 Průdušky a průdušinky

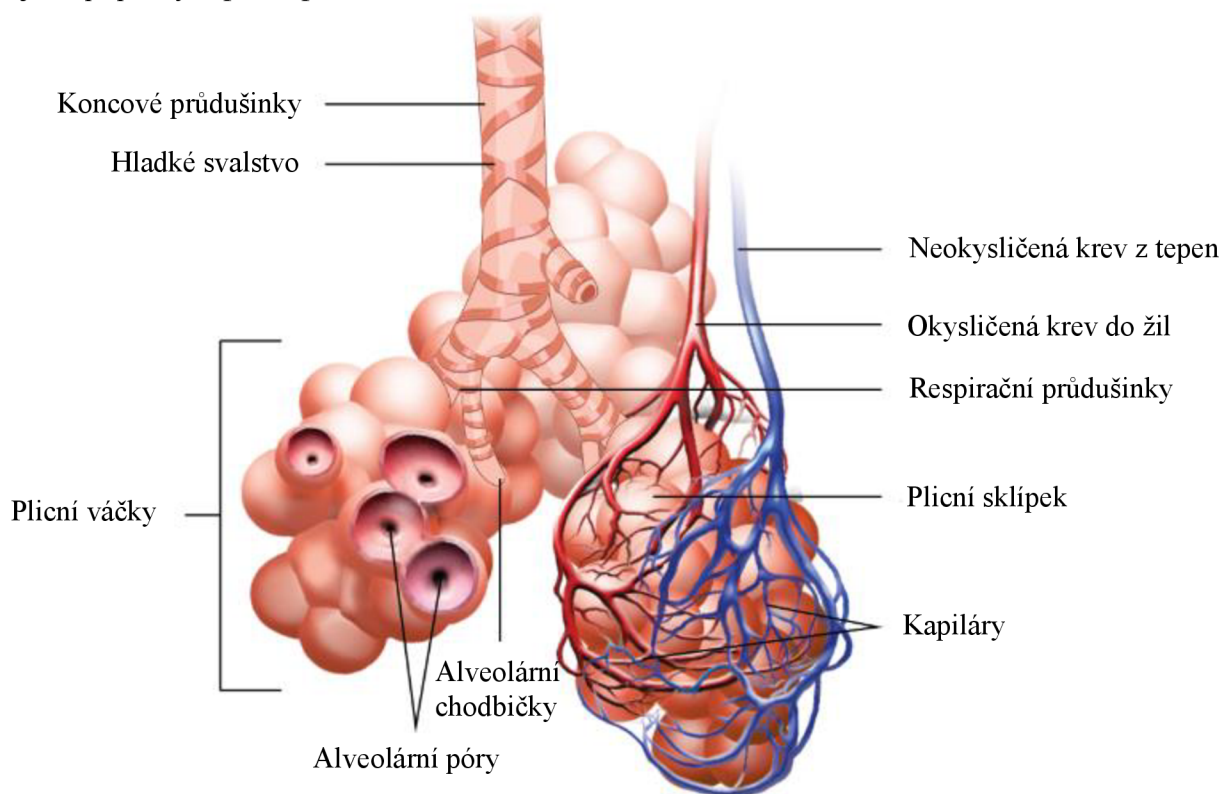
Primární průdušky, latinsky *bronchus principalis* vstupují do plic v místě plicní branky, *hilus pulmonis*. Jak je vidět na obrázku 3.2, pravá průduška je kratší, ale větší v průměru než levá průduška. Pravá se pak dělí na tři, levá na dvě, tzv. sekundární průdušky, či lalokové *bronchi lobares*.

Následně probíhá další větvení cca 16 - 18krát, což vytvoří bronchiální a na konci pak sklípkový strom. Jakmile poklesne průměr při větvení trubice pod 1 milimetr, označují se tyto trubice jako průdušinky, *bronchioli*. I tyto trubice mají hlavní úkol dovést vzduch a zachytit na sliznici nečistoty z něj. Koncové průdušinky, *bronchioli terminales*, se nakonec dělí ještě na respirační průdušinky, tedy *bronchioli respiratorii*, na jejichž začátku končí zóna pouze vedení vzduchu a začíná respirační zóna, která se již aktivně účastní výměny plynů. Průdušinky obecně již neobsahují chrupavkovou výztuž a mohou tak měnit svůj průměr v závislosti na intenzitě dýchání.

### 3.1.7 Plicní sklípky

Na respirační průdušinky pak přes trubičky, které se nazývají alveolární chodbičky, *ductuli alveolares*, navazují váčky plicních sklípků, *sacculi alveolares*. Jednotlivé plicní sklípky mají průměr cca 200  $\mu\text{m}$  a může jich být v lidském těle až 400 milionů. Plicní sklípky se roztahují a smršťují podle potřeby a zároveň jsou mezi sebou ve váčcích propojeny póry kvůli srovnání tlakových rozdílů. Oblast plicních sklípků je na obrázku 3.3. Stěnu tvoří několik typů buněk. Pneumocyty I. typu převažují nad zbylými a umožňují snadnou difuzi kyslíku do krve

a oxidu uhličitého opačným směrem. Druhou skupinou jsou pneumocyty II. typu, které produkují surfaktant, což je látka snižující povrchové napětí na povrchu sklípků, díky čemuž nedojde ke splasknutí plicního sklípku při výdechu. Právě nedostatek surfaktantu se vyskytuje u předčasně narozených novorozenců a způsobuje jejich úmrtí. Třetím typem buněk jsou makrofágy, které jsou stejně důležité jako předchozí buňky. Díky nim totiž dochází k tzv. fagocytóze, tedy k odstranění nežádoucích látek, které pronikly až do plicních sklípků. Bližší informace o fagocytóze jsou popsány v podkapitole 3.2.2.



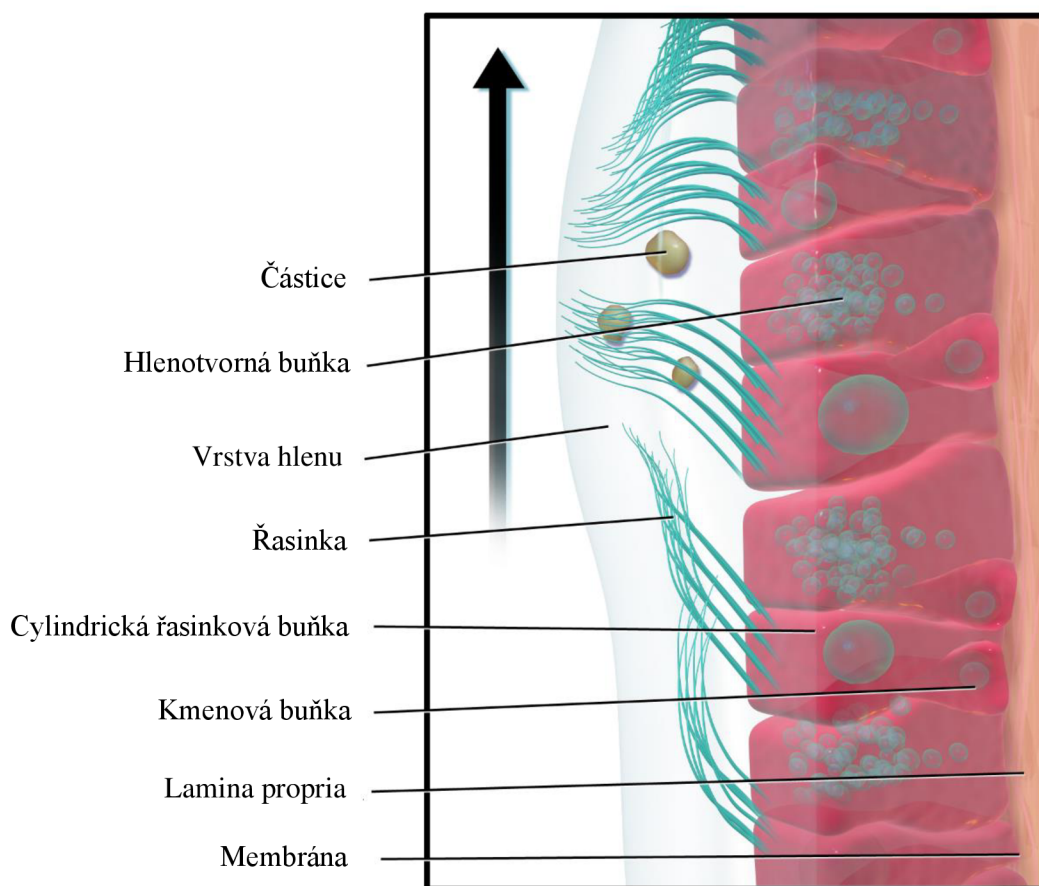
Obrázek 3.3 Detail na plicní váčky, převzato a upraveno z [36]

### 3.2 Shrnutí ochrany proti nežádoucím látkám

Problémem při dýchání je, že spolu se vzduchem člověk vdechuje i množství částic, bakterií, virů. Dýchací systém lze z hlediska obrany rozdělit na dvě části. Jednak část od nosní dutiny až po konecové průdušinky, kde hlavní mechanismus využívá transport hlenu a vykašlávání, a jednak na oblast plicních sklípků, kde funguje fagocytóza.

#### 3.2.1 Ochrana vzduchových cest

Lidské tělo pro svoji obranu v této části plic (tedy např. nosohltan, průdušnice atd.) používá dva mechanismy. Základním předpokladem pro ně ale je, že se částice zachytí na stěnu trubice. Potom následuje buď vykašlání částice, což je vytvoření turbulentního proudění a smykových sil v průdušnici a velkých průduškách a vyloučení nežádoucí látky pryč z dýchací soustavy. [38] Anebo druhý způsob je vidět na obr. 3.4, a je to ten, že částice zachycená na hlenu je posouvána pravidelnými kmity řasinkového epitelu směrem k hltanu, a to až z terminálních průdušinek. Hlen je složen z tekutiny, která má tloušťku 5 až 10  $\mu\text{m}$ . Vlastnosti hlenu dodávají složky jako např. muciny, fosfolipidy a další. Jakmile se částice dostane až nad hrtan, bývá spolknuta do žaludku a vyloučena. [39]



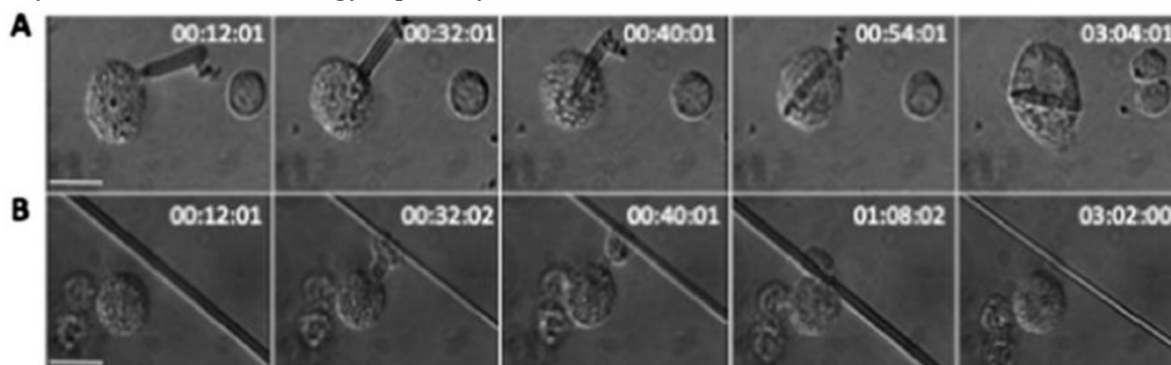
Obrázek 3.4 Znárodnění obranného mechanismu plic, převzato a upraveno z [40]

### 3.2.2 Ochrana respirační části

Problémem této části dýchací soustavy, tedy samotných plicních sklípků, je, že jsou tvořeny pouze tenkou buněčnou vrstvou pro snadnou difuzi plynů a nenachází se v nich řasinkový epitel. Mohou do nich však pronikat velmi jemné částice či patogeny do velikosti jednotek mikrometrů, případně až sem mohou penetrovat i vlákna. Tělo se těchto nežádoucích látek musí zbavit, a proto se v plicních sklípcích nachází alveolární makrofágy. Ty jsou řízeny pomocí různých receptorů, které poznají, pokud se na nich usadí cizí těleso. Makrofágy pak mohou buď sami v případě většího množství spolu s neutrofily, neutralizovat vylučovanými metabolity, peptidy a dalšími různé patogeny, případně je přenést do lymfatických uzlin, kde může být díky nim posilována imunita těla. [41] [42] Důležitými vylučovanými látkami makrofágů jsou pak také oxid dusnatý a různé oxidanty. [43]

Protože je ale v této práci kladen důraz na vlákna, je důležité uvést, jak se makrofágy vypořádávají s vláknitými částicemi. Jak se uvádí ve výzkumu [44], hlavní roli při fagocytóze hraje délka vlákna. Zatímco krátká vlákna byla makrofágy pohlcena bez problému a nedocházelo k výrazné produkci zánětlivých molekul, u dlouhých docházelo k tzv. frustrované fagocytóze, tedy že makrofág nebyl schopen pohltnout celé dlouhé vlákno a začalo se vylučovat množství zánětlivých molekul, které potom mohou vést k dalším nemocem. Hranice mezi krátkými a dlouhými vlákny leží podle výzkumu na hodnotách 12 a 27  $\mu\text{m}$ , přičemž záleží na tom, který ze dvou modelů byl použit. Vlákna pod kritickou délkou je pak možné fagocytovat, delší ne,

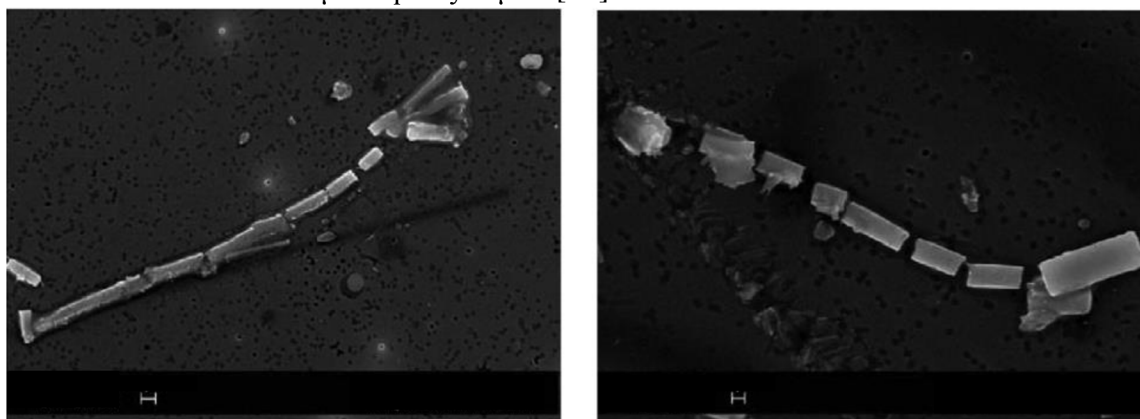
viz obr. 3.5. Ve výzkumu používali borosilikátová skelná vlákna s průměry od 0,1 do 10  $\mu\text{m}$  a různými délkami a makrofágy z plic myši.



Obrázek 3.5 Zobrazení úspěšné (A) a frustrované (B) fagocytózy během 3 hodin, měřítko 20  $\mu\text{m}$  [44]

Pro lidské makrofágy se v [45] se uvádí kritická délka 20  $\mu\text{m}$ , přičemž delší zůstávají v plicích, dokud se nerozpustí nebo nerozpadnou na menší části, které již makrofágy pokryjí. [46] A s tímto souvisí bioperzistence vláken, kdy vlákna, která se rozpadnou v prostředí plic rychleji, mají nižší bioperzistenci než ta, která zůstanou v celku po delší dobu. V plicích jsou totiž dvě různá prostředí, jednak s neutrálním pH v extracelulární tekutině, jednak kyselé pH v makrofázích. [47] A toto prostředí následně působí na různý materiál vláken. Například obsah hliníku ve vláknech výrazně zpomaluje rozpad při normálním pH prostředí, což souvisí s nebezpečností keramických a minerálních (kamenných) vláken. Naopak kovy alkalických zemin působí opačným efektem, a to tak, že urychlují rozklad a rozpad vláken. [48]

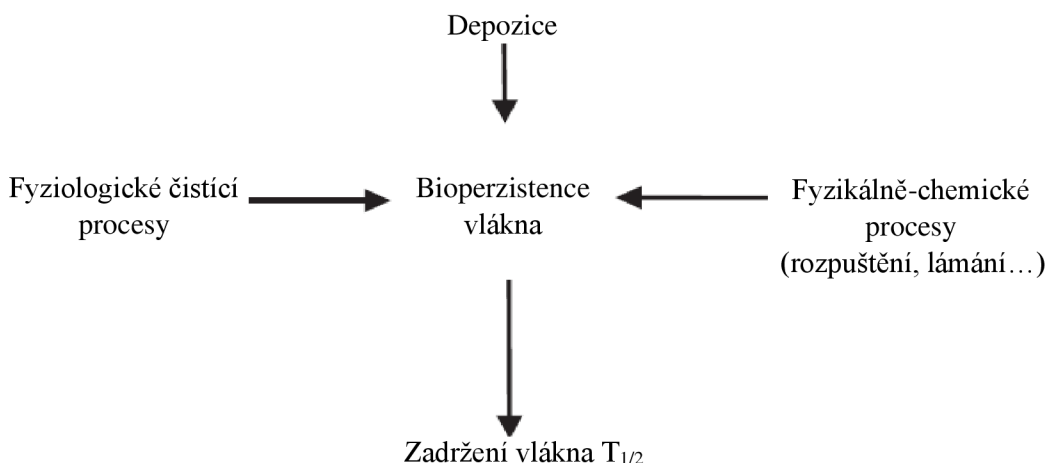
Výzkum [48] probíhal mimo jiné se skelnými vlákny, jejichž složení bylo cca 65 %  $\text{SiO}_2$ , do 5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , cca 5 %  $\text{B}_2\text{O}_3$  a především pak zbylých 25 % tvořily oxidy alkalických kovů a oxidy kovů alkalických zemin, tedy např.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  a další. Na obrázku 3.6 je ukázáno, jak vypadají tato skelná vlákna, pokud jsou po dobu 1 týdne vystavena fyziologickému pH. Je tedy možné si všimnout, že se tento druh vláken láme v šířce, tedy že se zkracuje délka, což potvrzuje v kapitole o vláknech uvedené rozdíly mezi skelnými vlákny a azbestem. Levý obrázek má uvedené měřítko 2  $\mu\text{m}$  a pravý 1  $\mu\text{m}$ . [48]



Obrázek 3.6 Rozpad vláken ve fyziologickém pH [48]

Shrnout celé působení vláken lze následujícím obrázkem 3.7. Po depozici působí jak procesy lidského těla, tak i fyzikálně-chemické procesy, a tyto faktory pak přímo ovlivňují bioperzistenci vláken v těle, která se dá kvantitativně vyjádřit časem zadržení vlákna, resp. počtem rozpadu.





Obrázek 3.7 Shrnutí působení vláken, upraveno z [13]

### 3.3 Nemoci dýchacího systému ze znečištěného ovzduší v pracovním prostředí

Jak již bylo uvedeno, lidské tělo je vystaveno různým látkám, které se nachází v ovzduší, a mnoho z nich může způsobovat dýchací nemoci a obtíže. Lze obecně říct, že se ve vyspělejších zemích jako např. USA a státy EU více dbá na dodržování expozičních limitů a používání ochranných pomůcek, na rozdíl od rozvojových zemí, kde k této problematice nepřístupují s takovou vážností. Navíc stále dochází k vývoji nových materiálů, u kterých ještě nemusí být tak dokonale známé účinky na zdraví. Proto se i v dnešní době vyskytuje mnoho nemocí, které jsou způsobeny vdechováním nebezpečných látek a které budou shrnuty v následujících podkapitolách, přičemž jednotlivé nemoci úzce souvisí s nebezpečným pracovním prostředím.

Dělení je podle části dýchací soustavy, ve které se nemoc obvykle projevuje. Jedná se tedy o nemoci dýchacích cest (astma, CHOPN, a další), nemoci intersticia, plicních sklípků (pneumokonióza, silikóza, azbestóza atd.), a v neposlední řadě také nádory plic v různých formách. [49] Jako důležité faktory pro výskyt nemocí se v [49] uvádí typ vdechovaných částic (prach, plyny, částice, vlákna, chemikálie...), délka trvání expozice, intenzita expozice (koncentrace) a další.

#### 3.3.1 Astma

Pojem astma je označení chronického onemocnění, při kterém imunitní systém reaguje na určitý alergen vyskytující se v prostředí. Dojde tak ke stažení průdušek, zvanému bronchospasmus, a zaplnění dýchacích cest hlenem. Typickým projevem takového stavu je kašel a bolest na hrudníku. Jedná se o nemoc individuální, tedy každý člověk může reagovat rozdílně na rozličné podněty. A proto se uvádí celá škála možných příčin vzniku astmatu. Například genetická predispozice, historie virových onemocnění v dětství, častý styk s možnými alergeny při nedostatečně vyvinuté imunitě atd., případně se může astma rozvinout při pobytu ve znečištěném ovzduší, po prodělání chřipky, mohou jej spustit alergeny. [50]

Pro tuto práci je důležitý popis astmatu ve vztahu k pracovnímu prostředí. Astma spojené s pracovním prostředím (*work-related asthma, WRA*) se dělí na „astma z povolání“ (*occupational asthma, OA*), což je astma, které je způsobené přímo nějakou látkou na pracovišti, a na astma zhoršené při práci (*work-exacerbated asthma, WEA*), což je astma, které není přímo způsobené vdechovanou látkou na pracovišti, ale již existující u člověka a zhoršené kvůli oné látce. [51]

U látek způsobujících OA je v první řadě vždy nutné brát v potaz množství dané látky, které je člověk vystaven. Mezi tyto látky se pak řadí mouka, latex, enzymy, kovy jako chrom,

nikl, akryláty atd. Kompletní přehled nabízí [51]. Mezi látky zhoršující astma WEA pak uvádí prach, chemikálie, kouř, barvy a jiné.

### **3.3.2 CHOPN**

CHOPN je zkratka pro chronickou obstrukční plicní nemoc. Při CHOPN dochází k chronickým zánětům průdušinek, jež zhoršují průchod vzduchu do a z plicních sklípků, a také dochází ke kolapsu plicních sklípků, přičemž se nemoc projevuje problémy s dechem, kašlem, tvorbou hlenu. Nejčastější příčina je kouř z cigaret, nicméně problémy může působit jakýkoliv kouř či znečištění ovzduší na pracovišti. [52]

### **3.3.3 Pneumokonióza**

Tímto pojmem lze označit skupinu nemocí, při kterých dochází buď k usazování nevláknitého prachu v plicních sklípcích, potom se používá pro nemoc označení silikóza či uhelno-hornická pneumokonióza, anebo k usazování vláknitých částic ve sklípcích, kdy se typicky hovoří o azbestu a azbestóze, kterou způsobuje. [53] [54]

Jako silikóza se označuje onemocnění, které je způsobeno vdechováním částic uvolněných při práci s křemenem, čímž se rozumí výroba skla, těžba v dolech, slévárny nebo stavební práce, při nichž se uvolňuje prach (např. při řezání) obsahující křemík. Jedná se o nemoc, při níž dojde k tvorbě jizev na tkáni, tedy fibróze, v plicních sklípcích. Tato nová tkáň však není schopná stejné funkce jako původní, tedy nedifundují přes ni plyny, a tím pádem plíce nepracují potřebným objemem vzduchu, resp. kyslíku, pro tělo. Problémem také je, že se může rozvinout v další nemoci jako tuberkulóza, karcinom plic, případně chronická bronchitida. [53] [55] [56] [57]

Uhelno-hornická pneumokonióza je, jak ostatně název napovídá, nemoc, která postihuje horníky v uhelných dolech, kteří vdechují vysoké koncentrace znečištěného vzduchu uhelným prachem. Stejně jako u silikózy začnou vznikat záněty, na něž navazuje tvorba jizev a zmenšení plochy pro difuzi plynů. Říká se jí mimo jiné také nemoc černých plic. [58]

Další nemocí, která je v tomto výčtu definována, je azbestóza. V tomto případě vlákna azbestu pronikají až do plicních sklípků a makrofágy je nejsou schopny pohltit, takže dochází k tvorbě zánětů a následně fibrotickým procesům. [57] U tohoto druhu nemoci není v tuto chvíli možná léčba, ale pouze potlačení symptomů. [54]

Co se týče skelných a minerálních vláken, podle kapitoly 73 v [53] neexistují důkazy, že by MMVFs způsobovaly fibrotické procesy v plicích, kromě žáruvzdorných keramických vláken, které spolu s kouřením mohou zvyšovat rizika plicních nemocí. [53] Dalšími látkami, které mohou způsobit fibrogenní procesy, jsou těžké kovy jako například kobalt. Granulomatózní záněty (jsou v nich obsaženy makrofágy a lymfocyty) způsobuje beryllium. [53]

### **3.3.4 Nádory na plicních tkáních**

Expozice karcinogenním látkám v pracovním prostředí (samozřejmě i mimo) může vést k různým nádorovým onemocněním, přičemž plíce bývají nejčastěji zasažené. Rizikovým faktorem pro rozvoj onemocnění je, mimo samotnou expozici znečištěnému ovzduší, hlavně kouření tabáku a pobyt v prostředí s azbestem. A právě plicní nádory jsou z pravidla spojeny s vdechováním azbestu. [49] Co se týče nádorů přímo na plicích, při pomnutí efektu vdechování azbestu a u nekuřáků pasivního vdechování kouře, je nejčastějším původcem radon vyskytující v uranových dolech. Mezi další karcinogenní látky se řadí beryllium, arsen, kadmium, chrom a další. [49] Pro uvedení dalších nemocí je nutné uvést zhoubný mezoteliom, jehož je amfibolní azbest v drtivé většině případů prokázaným původcem. Jedná se o karcinom mezotelu, což je vrstva pokrývající například pohrudnici či poplicnici. [59]

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Popis měření

Měření sestávalo z řady různých úkonů, které jsou popsány v následujících podkapitolách. Základními kameny pro přípravu a provedení experimentu byly poznatky a zkušenosti Lízala a Bělky z jejich dřívějšího výzkumu depozice vláken na Clarkson University.

Experiment dokumentovaný v této práci byl proveden pro stacionární nádech nosní dutinou, tedy vystavení modelu konstantnímu proudu vzduchu s vlákny po stanovenou dobu. Cílem měření bylo určit níže definované depoziční parametry v modelu lidských plic pro skelná vlákna používaná do foukaných izolací a také vyhodnotit jejich depozici v nosní dutině.

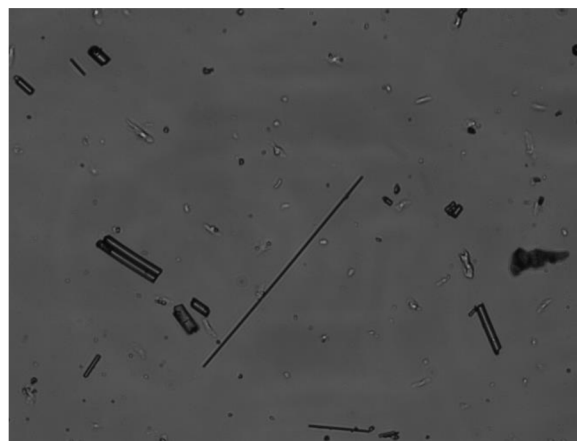
#### 4.1.1 Minerální vata

Pro experiment byla vybrána skelná vata, která se používá pro foukané izolace, s názvem Supafil Loft 045 (Knauf Insulation GmbH, Simbach am Inn, Německo). Dle uvedení výrobce je vata vyrobena ze skla, které bylo recyklováno, a bez použití pojiv a příměsí. Vata je taktéž nehořlavá a nenasákavá. Hustota použitého skla je  $\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$

Použitá vata v tomto experimentu je specifická tím, že se průměry jednotlivých vláken pohybují, podle pozorování na mikroskopu, v rozmezí desetín až jednotek mikrometru, viz obr. 4.1 a 4.2. Zatímco na Clarkson University při experimentu popsáném Bělkou v [60] byla použita vlákna, která měla podobné průměry.



Obrázek 4.1 Ukázka nadrcené směsi 1,  $\times 200$ ,  
rozměr plochy obrázku  $680 \times 520 \text{ }\mu\text{m}$



Obrázek 4.2 Ukázka nadrcené směsi 2,  $\times 200$ ,  
rozměr plochy obrázku  $680 \times 520 \text{ }\mu\text{m}$

Na obrázcích 4.1 a 4.2 jsou vidět různá vlákna před klasifikací, přičemž rozměry strany obrázku jsou cca  $680$  na  $520 \text{ }\mu\text{m}$ , z čehož je možné určit délku jednotlivých vláken.

Dalším specifikem vláken je, že jsou vyráběna v souladu s poznámkou Q v Nařízení Evropského parlamentu a rady z roku 2008 číslo 1272, viz kapitola týkající se vláken. To znamená, že tato vlákna jsou složena mimo oxid křemičitý i z alkalických kovů a jejich oxidů – oxid vápenatý, oxid hořečnatý, oxid draselný, oxid sodnatý, jejichž hmotnostní objem přesahuje 18 % a podle poznámky Q je není nutné označovat jako karcinogenní. Pro snazší dohledatelnost je použita skelná vata označená regulačním číslem REACH: 01-2119472313. [15]

#### 4.1.2 OOP

Při práci se skelnou vatou je důležité dbát především na ochranu lidského zdraví. Proto je nutné používat ochranné osobní pomůcky, jmenovitě pak masky pro ochranu dýchacího

ústrojí a také rukavice pro ochranu pokožky. V laboratoři na Odboru termomechaniky a techniky prostředí (OTTP) při Fakultě strojního inženýrství (FSI) byly k dispozici poloobličejové masky 3M™ řady 4000+ splňující normu EN 405:2001+A1:2009 a také latexové rukavice.

#### 4.1.3 Tvorba vzorků

První fází bylo shluky vlny o rozměrech cca 1 cm<sup>3</sup>, vytažené pinzetou z pytle s vatou, vložit do kovové válcové nádoby a vytvořit na jejím dně vrstvu asi 1 cm vysokou, viz obr. 4.3. Následovalo uzavření nádoby protikusem, který stlačil vatu na dně, obr.4.4. Takto uzavřená nádoba poté mohla být vložena do lisu (obr. 4.5), ve kterém byla stlačena silou 1200 kp, což odpovídá síle 11,8 kN v SI jednotkách. Tím dojde ke stlačení vaty, především pak k nadrcení dlouhých vláken na kratší. Podobný postup s drcením výchozí vaty byl použit i v [61].



Obrázek 4.3 Nenadrcená směs



Obrázek 4.4 Uzavřená nádoba



Obrázek 4.5 Nádoba v lisu

Příprava vzorků pokračuje vizuální kontrolou nadrcené směsi (obr. 4.6). Proces drcení a kontroly je nutné opakovat tak dlouho, dokud nevznikne sypká směs (obr. 4.7), tzn. 5–6krát.



Obrázek 4.6 Směs po prvním stlačení



Obrázek 4.7 Výsledná směs

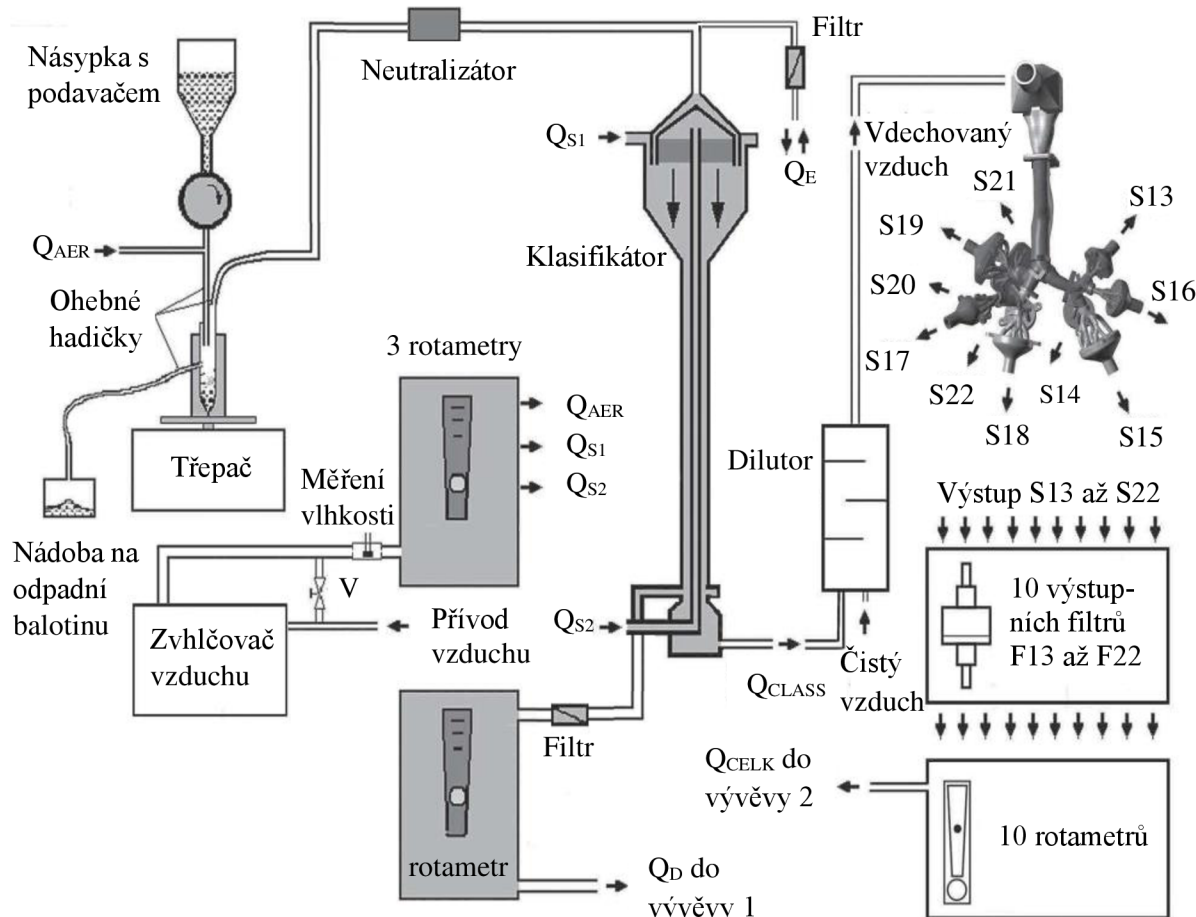
Takto nadrcená skelná vata je připravena na smíchání s balotinou TF 112, což jsou skleněné kuličky o průměru 150–250 μm, které jsou smíchány v hmotnostním poměru 1:100. Tedy na 1 hmotnostní díl vláken je přidáno 100 hmotnostních dílů balotiny. Tato směs byla po smíchání cca 6krát přeseťa přes 3 síta o velikostech oka 0,850, 0,500 a 0,425 μm. Počet přeseťí závisí na stavu směsi po průchodu posledním sítem. Důležité je sledovat okamžik, kdy směs



propadává síty bez nutnosti ji protlačovat. Takto lze poznat připravenou směs, jejíž vzorky jsou znázorněny na obr. 4.1 a 4.2.

#### 4.1.4 Experimentální aparatura

Na následujícím obrázku č. 4.8 je ukázána celá experimentální aparatura. K tomuto schématu se budou odkazovat následující podkapitoly.



Obrázek 4.8 Znázornění měřící aparatury, obrázek převzat a upraven z [6] a [62]

#### 4.1.5 Zdroj tlaku a podtlaku

Stroje pro přívod a pro odvod vzduchu hrají v tomto experimentu důležitou roli. Na vstupu je potřeba zajistit dostatečné množství stlačeného vzduchu. Toho bylo docíleno kompresorem na OTTP při FSI.

Kvůli klasifikátoru a samotnému principu klasifikace nevodivých vláken je ale potřebné vzduch zvlhčit alespoň na 15 % relativní vlhkosti. Vlhkost vzduchu totiž způsobí, že se na povrchu vláken vytvoří vodivá vrstva, a díky tomu je možné vlákna klasifikovat. Relativní vlhkost by se měla tedy pohybovat mezi 15 a 75 %. Pokud je vyšší, mohlo by docházet k výbojům na elektrodách klasifikátoru. [63] Více o klasifikaci vláken bude v další podkapitole.

Zvýšení vlhkosti je dosaženo tak, že je proud vzduchu z kompresoru rozdělen na dvě části. Jeden proud prochází přes uzavřenou nádobu, ve které je volná hladina kohoutkové vody, a pod hladinou je umístěna membrána, která kmitá a nad hladinu vypuzuje molekuly vody. Vzniká tak aerosol vody ve vzduchu, který se směšuje s přiváděným vzduchem, takže se tím dosáhne navlhčení jednoho proudu vzduchu. Druhý proud je veden obtokem kolem nádoby

a pomocí ventilu, či škrcení hadice (na obr. 4.8 ventil označen písmenem „V“), je směřován s navlhčeným proudem na zvolenou hodnotu, v případě tohoto měření 50 %, která byla měřena pomocí hygroskopické sondy uložené v hadici.

Zvlhčený vzduch dále proudil přes tři rotametry, které jej rozdělily na  $Q_{AER}$ ,  $Q_{S1}$  a  $Q_{S2}$ , jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1:

Tabulka 4.1 Vstupní průtoky

Vstupní průtoky	$Q_{AER}$	$Q_{S1}$	$Q_{S2}$
l/min	1	4	4

Pokud by se ale dodával stlačený vzduch pouze na vstupu, docházelo by k poklesu tlaku v experimentální aparatuře, a tedy k nedostatečným průtokům. Z tohoto důvodu byly připojeny na výstup z tratě vývěvy. První, která odebírala vzduch  $Q_D$  proudící jako odpadní z klasifikátoru přes rotametr a která je na obr. 4.8 označena jako vývěva 1, a vývěva 2, která sála vzduch  $Q_{CELK}$  z modelu přes 10 rotametrů. Množství vzduchu na výstupu z aparatury je možné vidět v následující tabulce 4.2:

Tabulka 4.2 Výstupní průtoky

Vstupní průtoky	$Q_D$	$Q_{CELK}$
l/min	8	30

Jak je tedy z tabulek možné určit, před dilutorem je do modelu přisáváno 29 l/min čistého vzduchu a  $Q_{CLASS} = 1$  l/min. Reálně však docházelo k přisávání vzduchu do aparatury přes násypku s vlákny, což je nežádoucí, protože dojde k tomu, že proudy vzduchu nebudou v potřebném poměru, takže začnou vznikat v klasifikátoru turbulence, které pak znemožní klasifikaci. Zamezení tohoto jevu bylo dosaženo tak, že se mezi neutralizátor a klasifikátor umístí T-kus, na nějž se nasadí filtr, a tak může docházet k regulaci. Buď k přisávání, nebo případně k odvodu vzduchu v aparatuře. Tento vstup je na obr. 4.8 označen průtokem  $Q_E$ .

#### 4.1.6 Podavač a třepač

V tomto bodě experimentu je již směs vláken a balotiny umístěna v nejvyšším bodě experimentální aparatury a postupně padá v závislosti na otáčkách podavače do dalších částí aparatury. Podavač v tomto měření tvoří stejnosměrný elektromotor PG520-24-676-B na 24 V, z nějž je vyvedena hřídel s oběžným kolem z plexiskla. Po obvodu 5 mm širokého kola se nachází přilepená látka připomínající drsností povrchu suchý zip. Jak se oběžné kolo otáčí, posouvá se v mezeře s mezikružím (které má vnitřní průměr o několik milimetrů větší než oběžné kolo) i směs. Mezera je zakrytována zepředu i zezadu díly z plexiskla. Nastavení otáček podavače odpovídá pozici 3 na měřítku potenciometru, který řídí napětí od 0 do 24 V, a tím také otáčky motoru. Násypka s podavačem je uvedena na obrázcích 4.9 a 4.10.

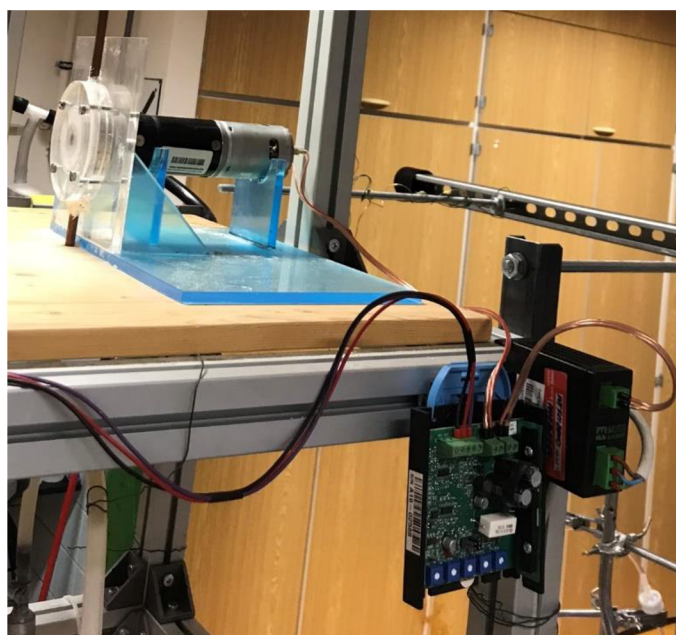
Stále ještě směs skelné vaty a skleněných kuliček padá v nastaveném množství do nádoby umístěné na třepačce Wisd VM-10, před kterou se ještě smísí s průtokem vzduchu  $Q_{AER}$ . Třepačka koná kruhový pohyb ve frekvencích 0 – 3300 min<sup>-1</sup>. Na potenciometru přístroje je nastavena poloha cca 2/3 z jeho maxima. Kmitáním nádoby dochází k odrazům směsi od stěn a vytvořením fluidní vrstvy, tedy směsi částic ve vznosu. Následně dochází k odloučení těžší

balotiny, a také větších vláken a nečistot, níže umístěnou hadičkou do nádoby na odpadní balotinu. Naopak lehká vlákna jsou unášena proudem  $Q_{AER}$ . [64]

Jak je uvedeno v [64], spojení tohoto přístroje s klasifikátorem poslouží k dostatečnému množství generovaných vláken použitelných pro další experimenty.



Obrázek 4.9 Násypka a podavač  
z čelní strany



Obrázek 4.10 Podavač i s řízením z boční strany

#### 4.1.7 Neutralizátor a klasifikátor

Při tvorbě směsi pro experiment, kdy se dlouhá vlákna drtí na menší, dochází ke vzniku různě dlouhých vláken, přičemž pro měření a vyhodnocování je vhodnější, aby byla vlákna jednotné délky.

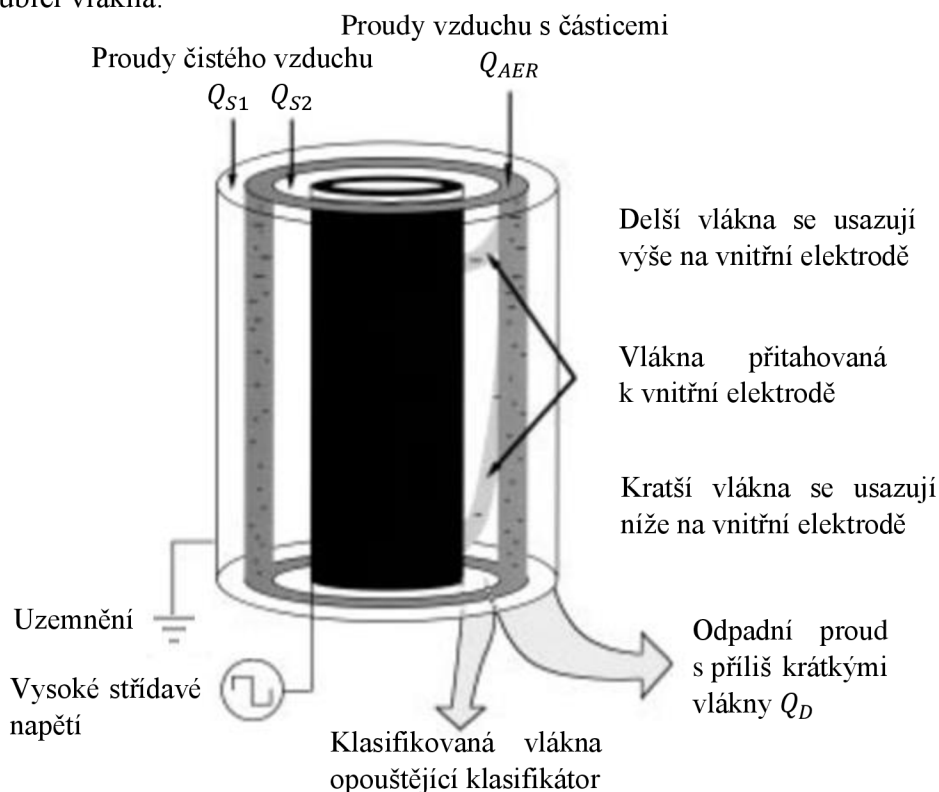
V průběhu druhé poloviny 20. století tedy probíhal vývoj přístroje, který by byl schopný zajistit potřebné roztržení vláken podle délky. Protože ale u vláken nelze využít aerodynamickou separaci, která závisí více na průměru vlákna než na jeho délce, bylo využito elektroforézních, u vláken ze skelné vaty především dielektroforézních, sil. Elektroforéza popisuje pohyb nabitých částic v elektrickém poli, zatímco dielektroforéza je popis pohybu neutrálně nabitých částic způsobený polarizací v nehomogenním elektrickém poli. [65]

Když na vlákno (při správné vlhkosti vzduchu tak, aby bylo vodivé) působí elektrické pole, dojde v něm k polarizaci nábojů, kladný náboj na jednom konci a záporný na druhém. Z vlákna se stane tzv. dipól. A pokud je pole homogenní, působí na kladný i záporný náboj určitá síla, která je stejná, takže se vyruší. Pokud je ale vlákno vloženo do nehomogenního pole, síly se nevyruší, a proto tato nerovnováha způsobí pohyb k elektrodě. [66] [67]

V případě klasifikátoru, který používal Wang se spolupracovníky v [63] a který byl použit v tomto měření, dochází k natočení vláken v proudu ve směru působícího elektrického pole

(paralelně s ním) a jejich pohybu k místům, kde je hustší elektrické pole, až následně dopadnou na elektrodu. Rychlost, s jakou se vlákna pohybují k elektrodě, je nyní závislá na délce vlákna, roste s její druhou mocninou. [62] Pro dielektroforézu je také důležité, aby se jednalo o střídavé napětí, které se přivádí na vnitřní elektrodu, a vnější je uzemněna. [6] Je to z důvodu toho, že dielektroforéza nezávisí na polaritě elektrického pole a náboji částice, zatímco elektroforéza ano, takže pokud se použije střídavé napětí, lze tak snadno eliminovat elektroforézní síly, které jsou podle Lipowicze a Yeha [66] mnohem větší než dielektroforézní, a dosáhnout tak klasifikace pomocí dielektroforézy. Elektroforézu je potřeba podle Hana a kol. [65] eliminovat, protože pomocí dielektroforézy lze efektivněji klasifikovat vlákna podle délky, zatímco u elektroforézy hraje roli i průměr vlákna.

Aby mělo vlákno neutrální náboj, používá se pro odstranění statického náboje z vláken jednotka s názvem NEKR-10 (Eckert & Ziegler CESIO, Praha, Česká republika), která obsahuje Krypton 85. [63] Jedná se o válcový prvek o průměru a délce cca 10 cm, resp. 25 cm, skrze který proudí trubící vlákna.




Obrázek 4.11 Princip klasifikátoru, obrázek převzat a upraven z [62]

Na obrázku 4.11 je názorně vidět, jak klasifikátor funguje. Kolem vnější trubice proudí  $Q_{S1}$  a kolem vnitřní  $Q_{S2}$ . Tyto proudy, ještě než dojde ke kontaktu s proudem  $Q_{AER}$ , prochází skrz pěnu, která má proudy co nejvíce stabilizovat, aby nedocházelo k turbulencím. Následuje úsek klasifikátoru ve tvaru mezikruží s vnitřním průměrem 1,59 cm a vnějším 2,22 cm a s délkou 75 cm, ve kterém dochází ke klasifikaci vláken. Obě elektrody jsou potřeny směsí vazelíny Thomas Lubriseal Stopcock Grease a imerzního oleje v poměru 9:1 [12], což zaručí, že se vlákna na stěny klasifikátoru přichytí a nemohou se znovu dostat do proudu vzduchu. I z tohoto důvodu je důležité klasifikátor v pravidelných intervalech rozebírat, důkladně čistit a znovu nanášet mazivo.

Delší vlákna tedy dopadnou na vnitřní elektrodu, klasifikovaná projdou k další fázi experimentu, kratší vlákna odnáší proud vzduchu  $Q_D$ . Tato vlákna se poté usazují na filtr, který je nutné pravidelně během experimentu měnit, aby se nezanášel, a tím se nezvětšovala jeho tlaková ztráta, která by mohla způsobit nerovnoměrnosti v proudění přes klasifikátor.

Frakce délek, které klasifikátor vytřídí pro použití k depozici v modelu, závisí na nastavení napětí na vstupu do klasifikátoru. Hodnoty používané při experimentech jsou  $\pm 2\text{--}4$  kV, v případě tohoto experimentu bylo nastavení viz tabulka 4.3

Tabulka 4.3 Nastavení klasifikátoru

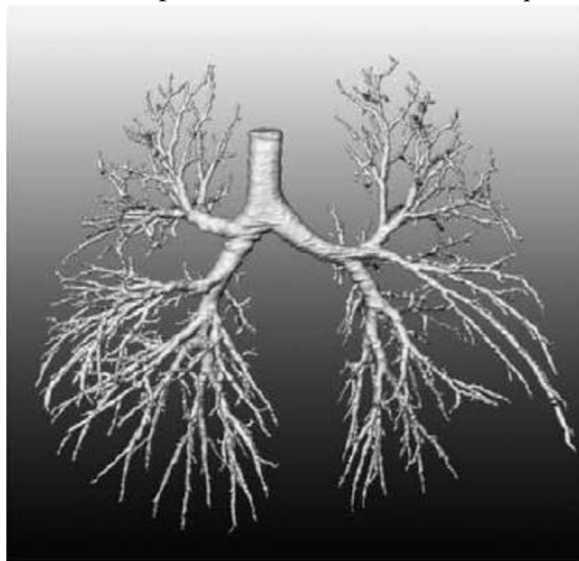
Použité napětí	Frekvence	Tvar signálu
[kV]	[Hz]	
3	50	

#### 4.1.8 Dilutor

Klasifikovaná vlákna nesená proudem o průtoku  $Q_{CLASS}$  jsou vedena do dilutoru, což je válcová nádoba s přepážkami ve tvaru kruhu, z nichž tětíva ve výšce  $1/3$  poloměru vytne kruhovou úseč, kterou následně proudí jak vlákna, tak i čistý vzduch. Ten je přisáván přes prstenek z pěnovitého materiálu, který slouží k potlačení turbulencí. V dilutoru proběhne smísení obou proudů, které následně putují do samotného modelu plic. [68]

#### 4.1.9 Model plic

Model využívaný na OTTP byl vytvořen Lízalem a kol. v [12]. V první fázi byla použita geometrie, kterou získal Schmidt v [69] z reálných plic zemřelého člověka, jehož plíce byly při pitvě vyjmuty a vylity tekutým gumovým přípravkem, jenž zatekl až do nejtenčích trubic. Při následně provedeném CT (*computed tomography*) ve vysokém rozlišení došlo k vytvoření přesného počítačového modelu plic od trachey až po 17. generaci větvení, viz obr. 4.12. Jak uvádí Lízal v [70], pro tvorbu reálného modelu postačila geometrie pouze do 7. generace větvení.



Obrázek 4.12 Počítačový model od části průdušnice po 17. generaci větvení [69]



Obrázek 4.13 Počítačový model od části hltanu po 7. generaci větvení [70]

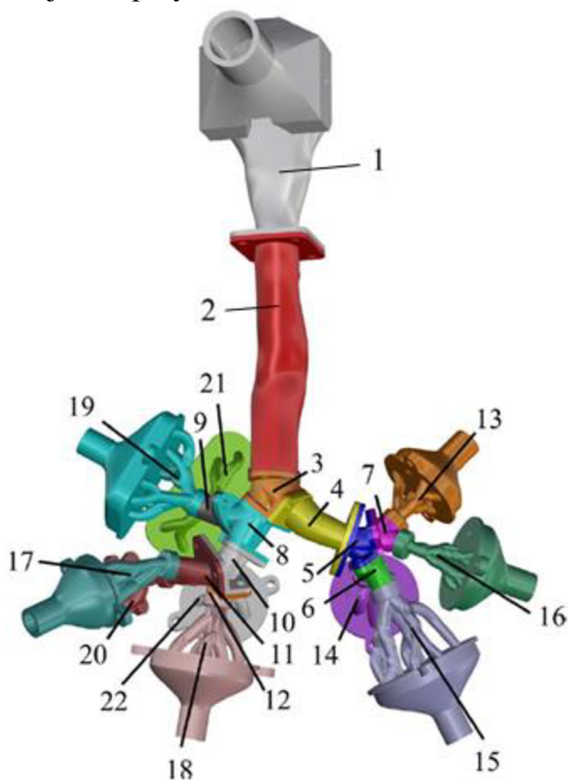
Jak se ale uvádí v [71], podle výpočtového modelování je nutné, aby model obsahoval i horní cesty dýchací. Byl tedy vytvořen na základě 3D tomografie model průdušnice a části



hltnu, včetně příklopky hrtnové, viz obr. 4.13. Zajímavý je také poznatek, že přesné CT nelze provést na živém člověku dále než po 3. generaci průdušek, kvůli přirozeným pohybům těla při skenování. [70]

Pro tvorbu ústní dutiny musel následovat další krok, kterým bylo získání voskového odlitku úst s označením „model A“ od Zhou a Chenga [72]. Pomocí trojrozměrného skenu byl získán model v stereolitografickém formátu, který byl připojen k průdušnici, viz obr. 4.14. Na tomto obrázku je i názorně uvedené číslování jednotlivých segmentů, na které byl rozdělen reálný model vytvořený jako obálka počítačového modelu o tloušťce stěny cca 3 mm, kdy ústní dutina má číslo 1, průdušnice 2 atd. Co se týče sběrných komor ve tvaru trychtýře, ty se poté značí jako číslo základní části plus 10, tedy například na průdušky s číslem 13 v levé plicí se napojuje sběrná komora s číslem 23. Dále byl ještě vytvořen model nosní dutiny a napojen na stávající model, jak je vidět na obrázku 4.15. Celkem tak došlo k rozdělení reálného modelu na 33 segmentů

Materiál, ze kterého je poté 3D tiskem vytvořen reálný model kolem počítačové geometrie, je fotopolymer s obchodním označením RGDA8630 od firmy Stratasys.



Obrázek 4.14 Reálný model s ústní dutinou [6]



Obrázek 4.15 Napojení nosní dutiny

#### 4.1.10 Sestavení modelu

Model plic používaný při tomto experimentu na OTTP je segmentový, jak je ostatně vidět na obr. 4.14 a 4.15. Pro spojení jednotlivých dílů od nosní dutiny až po díl s číslem 12, tedy po 3. generaci větvení, se využívá šroubů, matic a podložek, jak je ukázáno na obr. 4.16. Následné větve, tedy od 4. generace větvení, jsou po několika trubicích spojeny do jednotlivých dílů, viz obr. 4.17, které se na model připojují bajonetovými spoji pro snadnou manipulaci. Na tyto díly (13 až 22) se opět šrouby připojí sběrné komory, které již ústí do trubiček, na nichž jsou umístěny filtry. Ústní dutina byla při tomto experimentu ucpána, takže vlákna proudila přes nosní

dutinu. Propojení s dilutorem zajišťovala pružná hadice napojená na masku, která byla silikonovým tmelem připevněna přes nosní a ústní dutinu.

Po sestavení jednotlivých částí následovalo ještě zamazání všech spojů kvůli těsnosti silikonovým tmelem, ale hlavně pak vylití silikonovým olejem, aby nemohlo dojít k opětovnému vznesení usazených vláken ze stěny, a také kvůli nasimulování hlenu pokrývajícího stěny. [73] [74] Celý model byl na všech výstupech ze sběrných komor ucpán a kompletně vylit silikonovým olejem, který se následně vylil, a celý model se nechal 24 hodin vykapat.

#### 4.1.11 Průtoky větvemi

Na 10 sběrných komor byly umístěny hadičky s filtry napojenými na průtokoměry, za nimiž se již nacházela vývěva. Průtoky jednotlivými větvemi jsou uvedeny v následující tabulce 4.4 přičemž celkový průtok se rovná 30,4 l/min, a jedná se o statický nádech při hlubokém dýchání. [12]

Tabulka 4.4 Průtoky větvemi modelu

Číslo segmentu	-	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Průtok	[l/min]	1,4	1,7	4,0	2,0	3,6	4,7	3,8	3,1	3,1	3,0



Obrázek 4.16 Spojení průdušnice se segmenty po 3. generaci větvení



Obrázek 4.17 Spojení průdušek 4. až 7. generace větvení se sběrnými komorami, segmenty 13-32

#### 4.1.12 Započetí experimentu

Po sestavení modelu a ucpání ústní dutiny již mohl začít samotný experiment. V průběhu depozice byly měněny výstupní nitrocelulóзовые filtry (*Mixed Cellulose Esters Membrane – AAWP02500*) z modelu za segmenty 13 až 22. Podle čísel segmentů se značí i jednotlivé filtry, tedy např. výplachový filtr 15 značí filtr za segmentem 15 (resp. sběrnou komoru 25). Filtry mají tloušťku 0,8  $\mu\text{m}$  a průměr 25 mm.

Časový krok výměny filtrů byl zpočátku stanoven na 45 minut. Výměna probíhala tak, že se nejprve vzaly filtry ze segmentů F17 a F18, ty se vložily na podložní sklíčko, a pomocí par acetonu nanášených na filtr došlo k jeho zprůhlednění a přilepení k podložnímu sklíčku. [75] Na nich ale nebylo shledáno dostatečné množství vláken tak, aby mohly být vyhodnoceny. Proto pokračoval experiment po dobu dalších 45 minut a bylo přidáno množství směsi vláken a balotiny vstupujících do aparatury. Podobný problém nastal i u druhé výměny. V následujících výměnách se čas výměny ustálil na 50 minutách, kromě 7., kdy došlo k problému s ucpanou násypkou, již bylo ale nutné kontrolovat při celém experimentu, protože měla tendence k ucpávání. Jednotlivé časové kroky jsou uvedeny v tabulce 4.5, celkový čas experimentu byl 640 minut s celkem 10 výměnami. Takto bylo získáno přes 100 filtrů na podložních sklech.

Tabulka 4.5 Časové kroky expozice

<b>Výměna</b>	-	1	2	3	4	5
<b>Čas experimentu</b>	[min]	45+45	60+45	55	50	50
<b>Celkový čas</b>	[min]	90	195	250	300	350
<b>Výměna</b>	-	6	7	8	9	10
<b>Čas experimentu</b>	[min]	50	50+30	60	50	50
<b>Celkový čas</b>	[min]	400	480	540	590	640

Po ukončení depozice následovalo rozebrání modelu až na jednotlivé segmenty, jejich výplach, který probíhal tak, že byl každý segment vložen do baňky, zalit izopropylalkoholem tak, aby byl celý ponořen, a celá tato baňka vložena do vodní lázně, ve které se pomocí ultrazvuku uvolnila vlákna ze segmentu. Poté došlo k vyjmutí segmentu ze směsi izopropylalkoholu a vláken, následně byla tato směs přefiltrována přes filtrační papír. Mokrý filtr nyní stačilo nechat vysušit, poté jej vložit na laboratorní sklo a opět pomocí výparů acetonu nechat zprůhlednit.

#### 4.1.13 Metodika vyhodnocování

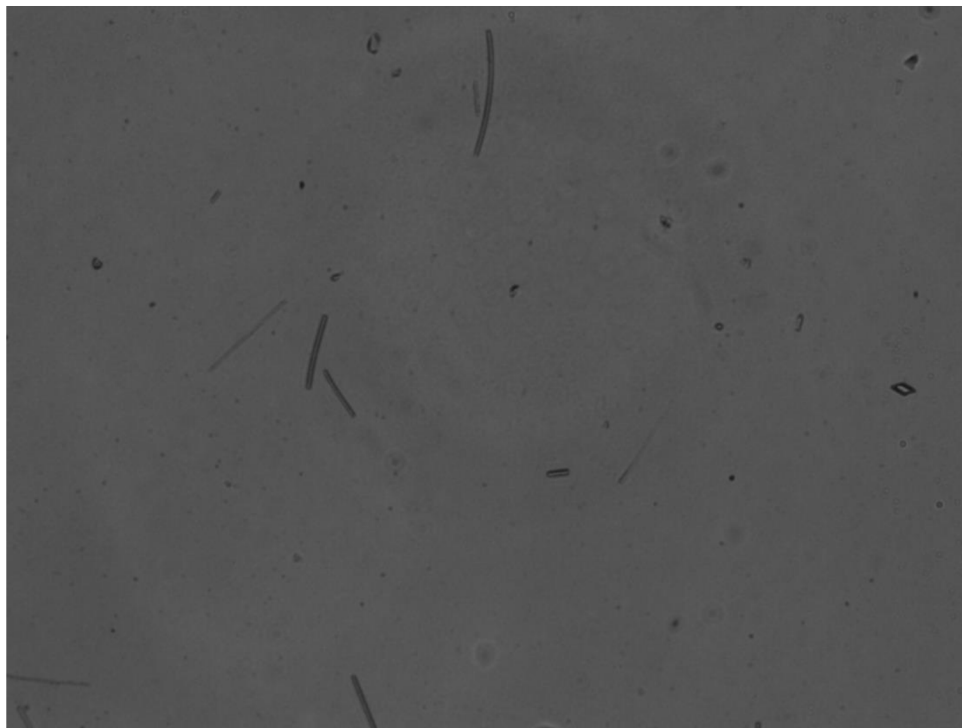
Vyhodnocování probíhalo tak, jak je popsáno v manuálu analytických metod měření a analýzy nebezpečných látek v pracovním prostředí [75] amerického Národního ústavu pro ochranu zdraví a bezpečnosti při práci. Jednalo se o 5. vydání manuálu, ve kterém je i část věnována měření a analýze azbestu a ostatním vláknům zaznamenávaných pomocí fázové kontrastní mikroskopie (*phase contrast microscopy, PCM*), která byla využita nyní s pomocí mikroskopu Nikon Eclipse.

Aby bylo možné zaznamenat průhledná vlákna, je potřebné je prosvítit, a vlnění přímé, které prochází okolo vláken, posunout o 1/4 vlnové délky, zatímco vlnění odražené při průchodu vláknem dopadá beze změny fáze. [12]

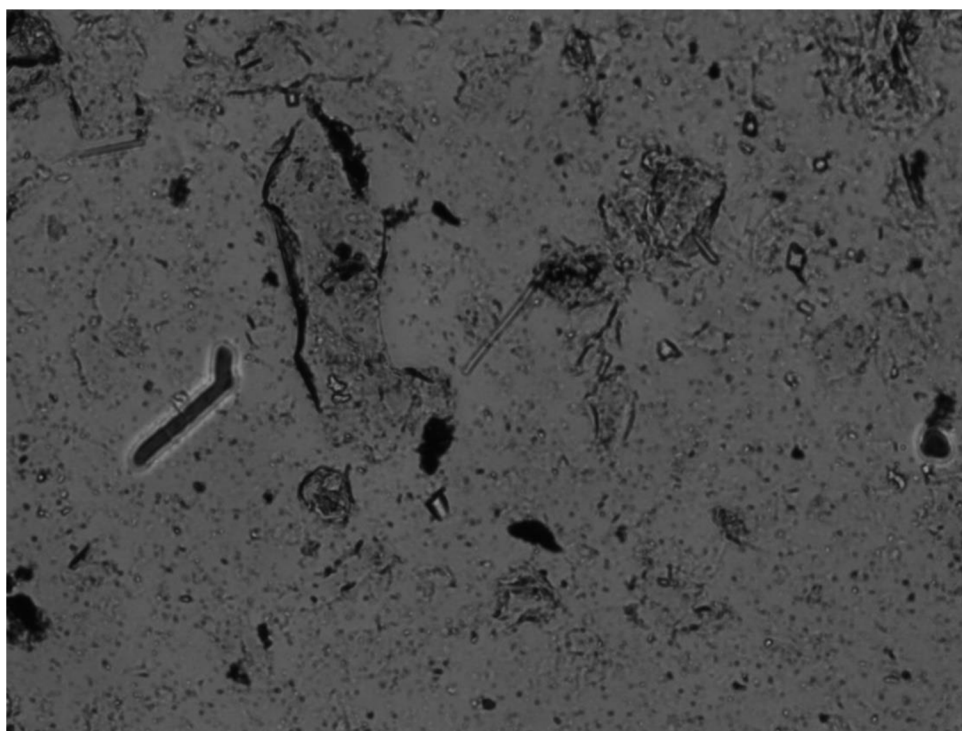
Jak je tedy uvedeno výše, výstupních filtrů (počty vláken na těchto filtrech budou označovány písmenem  $F_i$  a indexem označujícím segment, za kterým se filtr nachází) bylo získáno 105 a výplachových 34 (pro něž bude použito obdobné značení jako u výstupních, tentokrát písmeno  $N_i$  a index označující daný segment). Filtry pro výplach větších segmentů byly použity s větším průměrem (47 mm, AAWP04700) než pro menší segmenty a pro výstupní filtry.



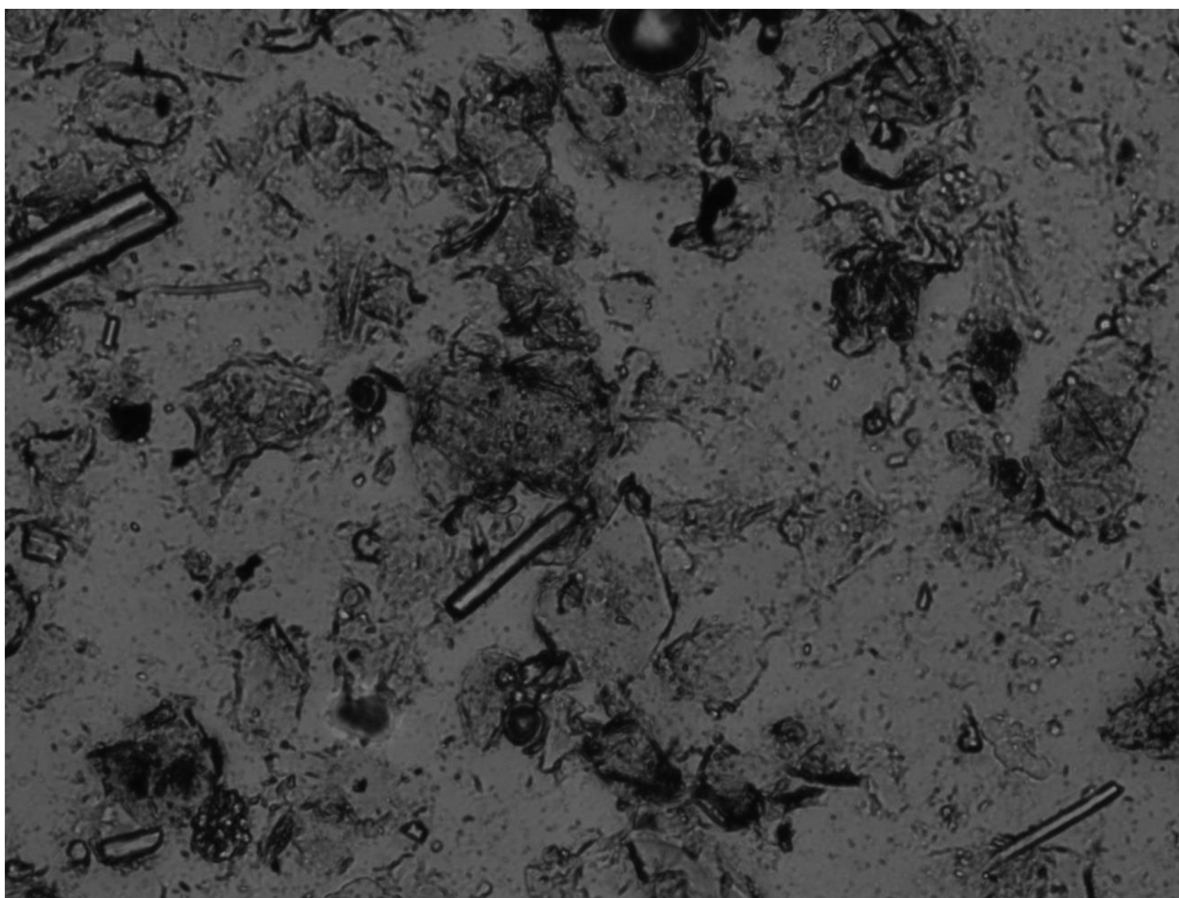
Na následujících obrázcích jsou ukázky jednotlivých filtrů. Na obr. 4.18 je vidět, jak vypadá výstupní filtr 15 po 50 minutách expozice vláknům na snímku s celkovým přibližným  $\times 200$  a rozměrem hran 680 na 520  $\mu\text{m}$ . Znečištěnější filtr je vyfocen na obr. 4.19, přičemž se jedná o výplachový filtr ze segmentu základního stromu s číslem 11. Obdobný výplachový filtr, tentokrát ale z přípojitelného segmentu k základnímu stromu s číslem 17, je ukázán na obr. 4.20



Obrázek 4.18 Výstupní filtr 15 vyměněný po 50minutové expozici,  $\times 200$ , rozměr 680 $\times$ 520  $\mu\text{m}$



Obrázek 4.19 Výplachový filtr 11,  $\times 200$ , rozměr 680 $\times$ 520  $\mu\text{m}$



Obrázek 4.20 Výplachový filtr 17,  $\times 200$ , rozměr  $680 \times 520 \mu\text{m}$

Jak je možné si povšimnout, výstupní filtry jsou oproti výplachovým čistější, díky čemuž jsou i snáze vyhodnotitelné (u rozsáhlejších měření lze analyzovat automaticky s použitím výpočetní techniky).

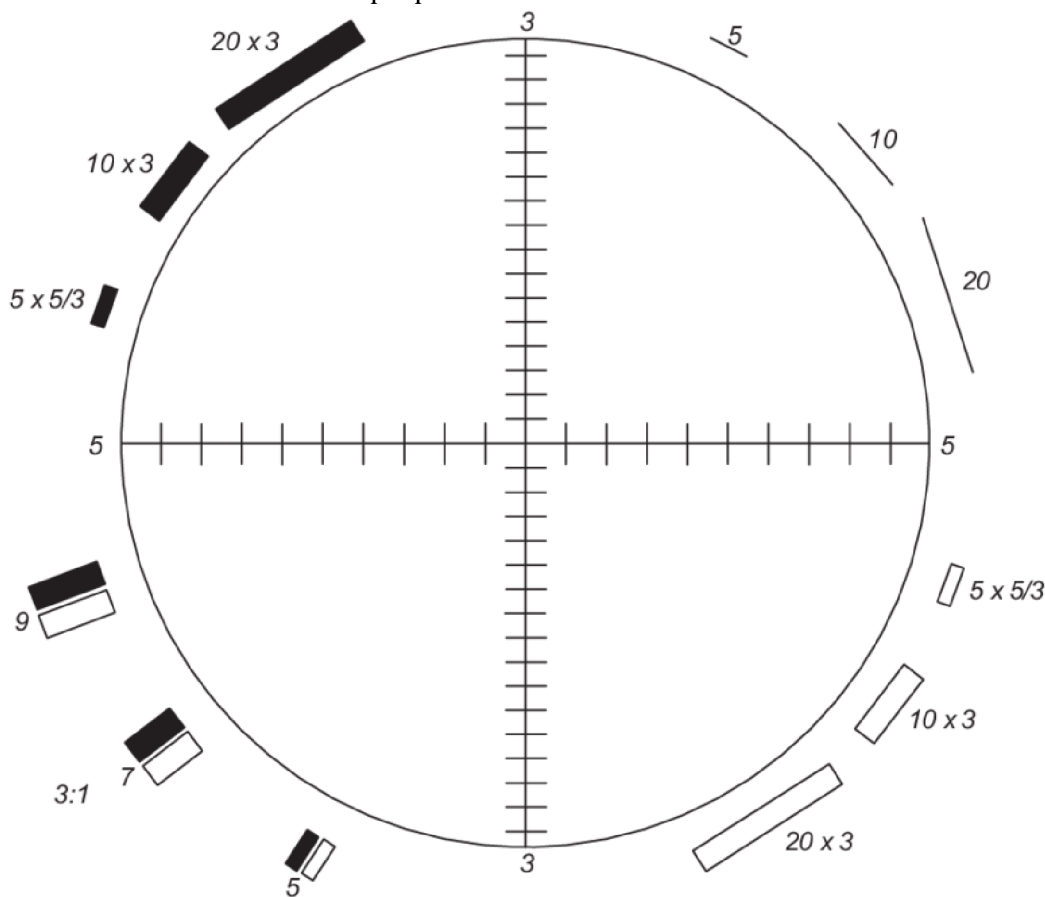
Pravý okulár mikroskopu měl zabudované Walton-Beckettovo měřítko, viz obr. 4.21, díky němuž je možné vyhodnotit kvantitativní depozici vláken na filtru. Měřítka se vztahuje k zvětšení  $\times 400$ , přičemž dílky na svislé ose značí  $3 \mu\text{m}$  a na horizontální  $5 \mu\text{m}$ . Celá oblast měřítka má průměr  $100 \mu\text{m}$ . V mikroskopu Nikon Eclipse na OTTP je však nainstalována rozšířená verze Walton-Beckettova měřítka, kde má vodorovná osa rozměr  $300 \mu\text{m}$ . Toto měřítko bylo využito při zvětšení  $\times 200$  i při hodnocení znečištěných výplachových filtrů, u kterých při zvětšení  $\times 400$  není možné zaostřit na jednotlivá vlákna. Potom se jeden dílek na vodorovné ose zvětší na  $10 \mu\text{m}$  a celková plocha při zvětšení  $\times 200$  vychází rovna  $282\,743 \mu\text{m}^2$ . Pro zvětšení  $\times 400$  je plocha rozšířeného měřítka  $70\,686 \mu\text{m}^2$ .

Piktogramy v jednotlivých kvadrantech měřítka značí při zvětšení  $\times 400$  příklady velikosti různých vláken. Například ve 4. kvadrantu se nachází okénka, podle kterých lze určit průměry a délky vláken, kde např.  $20 \times 3$  značí délku vlákna  $20 \mu\text{m}$  a jeho průměr  $3 \mu\text{m}$ .

Samotná metodika PCM, tedy manuálního počítání vláken, upravená podle používaných vláken, vycházela z následujících pravidel: [75]

- Započte se každé vlákno delší než  $5 \mu\text{m}$  ležící v oblasti měřítka
- Vlákno musí mít poměr délky k průměru stejný nebo vyšší než  $3 : 1$
- Pro vlákna ležící na hranici oblasti měřítka platí, že se počítají jako  $1/2$  vlákna, pokud splňují první dvě podmínky

- Vláknó, které překročí hranici oblasti více než jednou, se nezapočítává
- Všechna ostatní vlákna za hranicí se neuvažují
- Shluky vláken se počítají jako jedno, pokud nelze rozlišit jednotlivá vlákna
- Počítání končí v okamžiku, kdy se napočítá 100 vláken, přičemž musí být prozkoumáno minimálně 20 oblastí
- Počítání taktéž končí při prozkoumání 100 oblastí

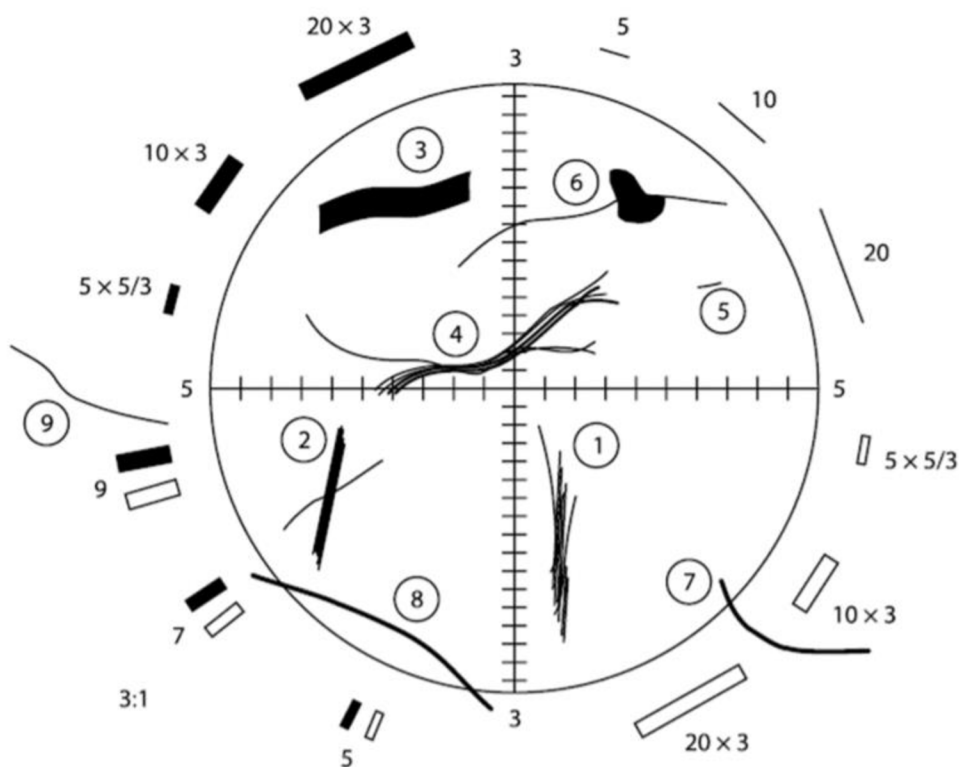


Obrázek 4.21 Walton-Beckettovo měřítko [76]

Podle metodiky je důležité vybírat zkoumané oblasti náhodně, ale aby reprezentativně pokryly celý filtr. Pokud je ve zkoumané oblasti nečistota, která zakryje 1/8 oblasti, potom se přejde k další oblasti, aniž by se tato započítávala. Mezi dalšími poznámkami udávanými metodikou je, že se každá oblast má zkoumat nejméně 15 sekund a při hledání vláken hýbat s kolečkem pro ostření, protože tenká vlákna mohou být v jiné rovině na filtru a zobrazí se až při přeostrění do oné roviny. Není vhodné zkoumat oblasti v blízkosti kraje filtru. Na záznamový arch se zapisuje název filtru, datum, celkový počet vláken a zkoumaných oblastí a vhodné je také uvést poznámky k filtru. Ze zaznamenaných počtů se následně určí průměrný počet vláken na oblast, také hustota vláken a další parametry. [75]

Aby se zamezilo přehlednutí při počítání, je nutné dbát na přestávky. Dle [12] má následovat po hodině prozkoumávání oblastí 10-20 minut přestávky, přičemž průzkum jednoho filtru trval cca 15-20 minut, takže za jeden časový úsek lze stihnout 3-4 filtry, celkem je denně doporučeno strávit při vyhodnocování filtrů nejvýše 6 hodin.

Při přestávce po hodině analyzování je vhodné se dívat do dále a zaostřit zrak na zelené předměty či stromy.



Obrázek 4.22 Příklady hodnocení filtrů [75]

Na obrázku č. 4.22 jsou znázorněny různé případy, které mohou nastat při hodnocení filtru. Následující tabulka 4.6 vysvětluje vyhodnocení oblasti z obrázku 4.22.

Tabulka 4.6 Vyhodnocení oblasti na obr. 4.22 [75]

Číslo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hodnocení	1 vlákno	2 vlákna	1 vlákno	1 vlákno	NE	1 vlákno	1/2 vlákna	NE	NE

## 4.2 Výsledky měření

Experiment probíhal od 31. 10. 2019 do 3. 12. 2019, přičemž přípravné práce trvaly několik měsíců před začátkem měření a v rámci nich byla přichystána dostatečná zásoba směsi vláken, kompletně vyčištěn klasifikátor a ostatní díly, načež následovalo sestavení aparatury a modelu plic. Jednalo se o experiment při konstantním průtoku vláken do modelu přes nosní dutinu.

### 4.2.1 Nevýhodnotitelné filtry

Při vyhodnocování nastal problém s výplachovými filtry 1 a 2 ze segmentů úst a průdušnice. Tyto filtry byly natolik znečištěné, že je nebylo možné vyhodnotit. Proto bylo bráno v úvahu několik možných řešení:

- Prohlásit celý experiment za zmařený
- Vyhodnotit všechny ostatní segmenty a vynechat segmenty 1 a 2
- Odhadnout depozici v segmentech 1 a 2

První možnost byla zamítnuta, protože vyhodnotit nešly pouze dva vstupní segmenty a tím pádem nebyl problém dopočítat depoziční účinnost<sup>9</sup> 3. až 32. segmentu a provést srovnání s měřeními ostatních výzkumníků. Řešením také mohlo být zopakovat celý experiment. To však nebylo možné z řady důvodů, mezi něž lze zařadit i pandemii viru a uzavření fakulty pro studenty, což znemožnilo zopakovat několikátýdenní měření. To se spolu s nakonec zvoleným řešením projevilo na nemožnosti odhadnout nejistotu měření pro všechny depoziční parametry. Nastínění odhadu nejistoty je přesto provedeno alespoň pro počet vláken usazených v segmentu. Druhá možnost by byla aplikovatelná, ale stále by chyběla představa o depoziční frakci<sup>10</sup>. Proto byla zvolena třetí možnost, přičemž se nabízely dvě různá řešení. Obě vycházela z naměřených dat Bělky a kol v [6], přičemž první spočívalo v tom, že se dopočítají depoziční účinnosti vyhodnotitelných filtrů, ty se dají do poměru s depozičními účinnostmi měření Bělky, a z těchto poměrů se poté vytvoří průměr (který značí, kolikrát byla depoziční účinnost tohoto měření větší nebo menší než měření Bělky a kol.). Takto vzniklým průměrem (konstantou) se vynásobí depoziční účinnost pro segmenty 1 a 2 u Bělky a kol., čímž vznikne odhad pro chybějící data z nevyhodnotitelných segmentů. Přesnější, a nakonec zvolené, však bylo druhé řešení, a to takové, že budou nejprve vypočtena Stokesova čísla pro jednotlivé větve a depoziční účinnosti vyhodnotitelných segmentů, a tyto hodnoty budou vyneseny do grafu spolu s hodnotami od Bělky a kol. [6]. Pokud se ukáže závislost mezi naměřenými daty, bude možné odhadnout depoziční účinnosti pro segmenty 1 a 2 z rovnice přímky, která vznikne při proložení dat.

Dodatečné experimenty provedené na jednotlivých komponentech experimentální aparatury ukázaly, že zanesení filtrů je způsobené použitým silikonem na utěsnění spojů. Ten při rozebrání a vypláchnutí modelu uvolňuje nečistoty, které zanesou filtr, a ten je nevyhodnotitelný.

#### 4.2.2 Stanovení množství vláken na filtru

Množství vláken  $F_i$  (případně  $N_i$ ) na filtru bylo stanoveno z rovnice 4.1:

$$F_i = \frac{A_i \cdot C_i}{a_i \cdot n_i} \quad (4.1)$$

kde  $A_i$  odpovídá celkové ploše filtru, na níž se mohou usadit vlákna,  $C_i$  je množství všech vláken, která jsou napočítána na všech zaznamenávaných oblastech  $n_i$ , přičemž  $a_i$  značí plochu sledované oblasti ohraničenou Walton-Beckettovým měřítkem.

Plochy  $a$  s průměrem  $r$  již byly naznačeny, pro úplnost jsou shrnuty v následující tabulce:

Tabulka 4.7 Rozměry ploch ohraničených Walton-Beckettovým měřítkem

Přiblížení	-	×400	×200	×200
<b>Průměr sledované oblasti <math>r</math></b>	mm	0,3	0,2	0,6
<b>Plocha sledované oblasti <math>a</math></b>	mm <sup>2</sup>	0,071	0,031	0,283

Další plochou potřebnou do rovnice 4.1 je účinná plocha filtru. Jedná se o takovou část filtru, která je přímo vystavena vláknům. Krajní oblasti jsou totiž přikryty těsněním. Tato plocha byla určena Bělkou v [77] tak, že se na filtr pouštěl tmavý prach a po rozebrání držáku byla

<sup>9</sup> Depoziční účinnost je definována v podkapitole 4.2.4

<sup>10</sup> Depoziční frakce je definována v podkapitole 4.2.6

znečištěná část filtru přeměřena. Z tohoto naměřeného průměru byla podle rovnice pro obsah kruhu dopočtena účinná plocha filtru, viz tab. 4.8. Z poměru čisté ke znečištěné části byla tato plocha dopočtena i pro větší filtr.

Tabulka 4.8 Účinná plocha filtrů

Průměr filtru	mm	25	47
Průměr účinné plochy filtru	mm	21,7	40,7
Obsah účinné plochy filtru	mm <sup>2</sup>	368,8	1 302,9

### 4.2.3 Stokesovo číslo

Pro výpočet Stokesova čísla podle rovnice 2.5 je nejprve nutné stanovit a definovat použité konstanty a proměnné, mezi něž se řadí aerodynamický ekvivalentní průměr, hustota vody, rychlost proudění v trubici, dynamickou viskozitu a průměr trubice:

- **Aerodynamický ekvivalentní průměr vláken  $d_{ae}$  [m]**

Vychází se z rovnice 2.2, do které je ještě potřeba dopočítat objemově ekvivalentní průměr  $d_{ve}$  z rovnice 4.2, kde  $d_v = 3,8 (\pm 1,4) \mu\text{m}$  a  $l_v = 34,1 (\pm 19,0) \mu\text{m}$  (jedná se o hodnoty určené Lízalem a kol. v [7] pro totožný výchozí materiál a stejný postup drcení vláken, který byl použit i v této práci)

$$d_{ve} = \left(\frac{3}{2} d_v^2 l_v\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3}{2} \cdot 3,8^2 \cdot 34,1\right)^{\frac{1}{3}} \doteq 9,0 \mu\text{m} \quad (4.2)$$

Poté je určen dynamický součinitel tvaru  $\chi$  z rovnice 2.5, do jehož dílčích vzorců se dosazuje poměr délky  $l_v$  ku průměru  $d_v$  vlákna označený  $\beta$  z rovnice 4.3:

$$\beta = \frac{l_v}{d_v} = \frac{34,1}{3,8} \doteq 9 \quad (4.3)$$

Hodnota  $\chi$ , jak již bylo uvedeno ve druhé kapitole, se skládá ze dvou dílčích hodnot, a to  $\chi_{\parallel}$  při orientaci vlákna paralelně s proudem (rovnice 2.3) a  $\chi_{\perp}$  při orientaci vlákna kolmo na směr proudu (rovnice 2.4). Po jejich zkombinování vznikne hodnota pro libovolně natočené vlákno  $\chi$ , tedy dynamický součinitel tvaru, viz rovnice 2.5. [5]

$$\begin{aligned} \chi_{\parallel} &= \frac{\frac{4}{3}(\beta^2 - 1)\beta^{-\frac{1}{3}}}{(2\beta^2 - 1)(\beta^2 - 1)^{-\frac{1}{2}}(\ln(\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})) - \beta} = \\ &= \frac{\frac{4}{3} \cdot (9^2 - 1) \cdot 9^{-\frac{1}{3}}}{(2 \cdot 9^2 - 1) \cdot (9^2 - 1)^{-\frac{1}{2}} \cdot (\ln(9 + \sqrt{9^2 - 1})) - 9} \doteq 1,2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \chi_{\perp} &= \frac{\frac{8}{3}(\beta^2 - 1)\beta^{-\frac{1}{3}}}{(2\beta^2 - 1)(\beta^2 - 1)^{-\frac{1}{2}}(\ln(\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})) + \beta} = \\ &= \frac{\frac{8}{3} \cdot (9^2 - 1) \cdot 9^{-\frac{1}{3}}}{(2 \cdot 9^2 - 1) \cdot (9^2 - 1)^{-\frac{1}{2}} \cdot (\ln(9 + \sqrt{9^2 - 1})) + 9} \doteq 1,7 \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\chi = \frac{1}{\frac{1}{3\chi_{\parallel}} + \frac{2}{3\chi_{\perp}}} = \frac{1}{\frac{1}{3 \cdot 1,2} + \frac{2}{3 \cdot 1,7}} \doteq 1,5 \quad (2.5)$$

Jak je možné vidět z výsledku rovnice 2.5,  $\chi = 1,5$ , což koresponduje s tabulkou 2.2 pro vlákna s poměrem délky ku průměru 10, což téměř odpovídá použitým vláknům v této práci.

V rovnici 2.2 pro aerodynamický ekvivalentní průměr vlákna se ještě navíc vyskytují hustota vody  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$  a hustota vláken  $\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$ :

$$d_{ae} = d_{ve} \left( \frac{\rho_p}{\rho_0 \cdot \chi} \right)^{\frac{1}{2}} = 9,0 \cdot 10^{-6} \left( \frac{2500}{1000 \cdot 1,5} \right)^{\frac{1}{2}} \doteq 11,7 \text{ } \mu\text{m} \quad (2.2)$$

Jak tedy vychází z rovnice 2.2,  $d_{ae} = 11,7 \text{ } \mu\text{m}$ . Znamená to, že se vlákno chová jako kulová částice o průměru  $11,7 \text{ } \mu\text{m}$  s hustotou  $1000 \text{ kg/m}^3$  a obě částice mají stejnou pádovou rychlost.

- **Dynamická viskozita vzduchu  $\mu$  [kg/m·s]**

Lízal a kol. v [7] stanovili pro jejich měření v laboratoři aerosolů na OTTP při teplotě vzduchu 20–21 °C hodnoty kinematické viskozity  $\nu = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  a hustoty vzduchu  $\rho_V = 1,21 \text{ kg/m}^3$ . Z těchto hodnot je dopočítána dynamická viskozita z rovnice 4.7:

$$\mu = \nu \cdot \rho_V = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,21 \doteq 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s} \quad (4.7)$$

- **Průměry trubic  $D_i$  [m]**

U průměrů jednotlivých trubic, pro něž jsou počítána Stokesova čísla, dochází u různých autorů k rozkolu. Je možné používat buď vstupní průměry do jednotlivých segmentů, kdy lze vstupním průměrem popsat proudění celou trubicí v segmentu. Problém s tímto přístupem však nastane u segmentů 13–22, které obsahují několik rozdvojení, a u zužujících se segmentů 2 a 4 (průdušnice a první levá průduška).

V tomto případě je zaveden ekvivalentní průměr trubice, který lze spočítat jako průměrnou hodnotu všech průměrů výstupních trubic ze segmentu a následně z této průměrné hodnoty a vstupního průměru vytvořit ještě jednu průměrnou hodnotu, která již odpovídá ekvivalentnímu průměru daného segmentu a lépe v něm charakterizuje proudění (použité ekvivalentní průměry jsou v tabulce 4.9).

- **Rychlost proudění v trubici  $U_i$  [m/s]**

Rychlost v rovnici pro Stokesovo číslo odpovídá střední rychlosti v jednotlivých segmentech, která se dopočítává z rovnice kontinuity ze známého průtoku daným segmentem (v případě segmentů s bifurkací<sup>11</sup> se bere průtok před rozdvojením) a z plochy příčného průřezu, respektive průměru trubice  $D_i$ , viz rovnice 4.8, kde je uveden výpočet pro průdušnici s průtokem  $Q_2 = 30,4 \text{ l/min}$  a ekvivalentním průměrem  $D_2 = 16,3 \text{ mm}$ . Ostatní dopočítané rychlosti jsou uvedeny v tabulce 4.9.

$$U_2 = \frac{4Q_2}{\pi D_2^2} = \frac{4 \cdot \frac{30,4}{60} \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (16,3 \cdot 10^{-3})^2} \doteq 2,4 \text{ m/s} \quad (4.8)$$

Stokesovo číslo se dopočítává z obecné rovnice 2.5, která je uvedena níže s právě definovanými veličinami, a kde  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ . Ukázkový výpočet je proveden pro segment č. 2:

<sup>11</sup> Jako bifurkace se označuje rozdvojení

$$Stk = \frac{\rho_0 d_{ae}^2 U_i}{18\mu D_i} = \frac{\rho_0 d_{ae}^2 U_2}{18\mu D_2} = \frac{1000 \cdot (11,7 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2,4}{18 \cdot 1,82 \cdot 10^{-5} \cdot 16,3 \cdot 10^{-3}} \doteq 6,3 \cdot 10^{-2} \quad (2.5)$$

Problematictější pro výpočet Stokesova čísla je segment 1, tedy ústní dutina, pro kterou se ekvivalentní průměr spočte z objemu dutiny ústní a délky myšlené střední křivky od začátku úst po krk [6] [78]. Ekvivalentní průměr potom vychází  $D_1 = 20$  mm a rychlost proudění a Stokesovo číslo se dopočítá stejně jako pro segmenty 2–22.

Dalším problematickým segmentem z hlediska Stokesova čísla je 0, tedy nosní dutina. Pro tu uvádí Wang a kol. v [68] vzorec 4.9. Při použití vzorce mohou vyvstat nejasnosti ohledně dosazovaného průtoku  $Q$  a průřezu  $A_{ent}$ . Zatímco  $Q$  je definován jako průtok skrz celou nosní dutinu (*flow rate through nasal model*), tak  $A_{ent}$  je definována jako plocha příčného průřezu jedné nosní dírky (*cross-sectional area of nostril*), tedy vstupní plocha do jedné poloviny nosní dutiny. V této práci je počítáno s  $Q_0 = 30,4$  l/min,  $\rho_0$ ,  $\mu$ ,  $d_{ae}$  jsou definovány výše a  $A_{ent} = 54,55$  mm<sup>2</sup>, přičemž celková plocha obou nosních dírek je 109,1 mm<sup>2</sup>.

$$Stk = \frac{\rho_0 d_{ae}^2 Q_0}{\mu A_{ent}^{\frac{3}{2}}} = \frac{1000 \cdot (11,7 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \frac{30,4}{60} \cdot 10^{-3}}{1,82 \cdot 10^{-5} \cdot (54,55 \cdot 10^{-6})^{\frac{3}{2}}} = 9,5 \quad (4.9)$$

Tabulka 4.9 Výsledná Stokesova čísla a rychlosti, použité ekvivalentní průměry a průtoky

<b>Segment</b>	-	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Průměr</b>	mm	x	20,0	16,3	14,7	10,2	7,0
<b>Průtok</b>	l/min	30,4	30,4	30,4	30,4	9,1	9,1
<b>Rychlost</b>	m/s	x	1,6	2,4	3,0	1,9	3,9
<b>Stokesovo číslo</b>	-	9,5E+0	3,4E-2	6,3E-2	8,5E-2	7,7E-2	2,4E-1
<b>Segment</b>	-	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Průměr</b>	mm	5,5	6,0	12,1	7,8	8,5	6,5
<b>Průtok</b>	l/min	5,7	3,4	21,3	6,9	14,4	6,7
<b>Rychlost</b>	m/s	4,0	2,0	3,1	2,4	4,2	3,4
<b>Stokesovo číslo</b>	-	3,1E-1	1,4E-1	1,1E-1	1,3E-1	2,1E-1	2,2E-1
<b>Segment</b>	-	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
<b>Průměr</b>	mm	7,0	3,0	3,3	3,3	2,5	3,6
<b>Průtok</b>	l/min	7,7	1,4	1,7	4,0	2,0	3,6
<b>Rychlost</b>	m/s	3,3	3,3	3,3	7,8	6,8	5,9
<b>Stokesova číslo</b>	-	2,0E-1	4,6E-1	4,2E-1	9,9E-1	1,1E+0	6,9E-1
<b>Segment</b>	-	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	
<b>Průměr</b>	mm	4,1	3,6	2,6	3,4	3,4	
<b>Průtok</b>	l/min	4,7	3,8	3,1	3,1	3,0	
<b>Rychlost</b>	m/s	5,9	6,2	9,7	5,7	5,5	
<b>Stokesova číslo</b>	-	6,1E-1	7,3E-1	1,6E+0	7,0E-1	6,8E-1	

V tabulce 4.9 jsou uvedena všechna Stokesova čísla pro jednotlivé segmenty modelu od nosní dutiny až po segmenty s průduškami, spolu s ekvivalentními průměry a rychlostmi v každém z nich. Číslování segmentů odpovídá obr. 4.14, ke kterému navíc patří nosní dutina označená číslem 0, viz obr. 4.15.

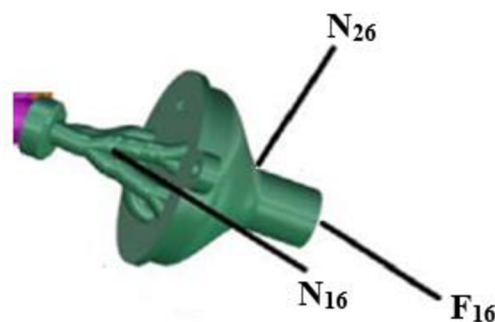


#### 4.2.4 Depoziční účinnost

Jedná se o parametr vyjadřující poměr počtu částic, které se v daném segmentu usadí, k celkovému počtu částic, které do onoho segmentu vstupují. Tento parametr je možné z vyhodnotitelných dat dopočítat, protože rovnice depoziční účinnosti daného segmentu nezávisí na počtu usazených vláken v předchozích segmentech nebo na celkovém množství vláken vstupujících do modelu. Vzorový výpočet depoziční účinnosti  $DE$  pro 16. segment je:

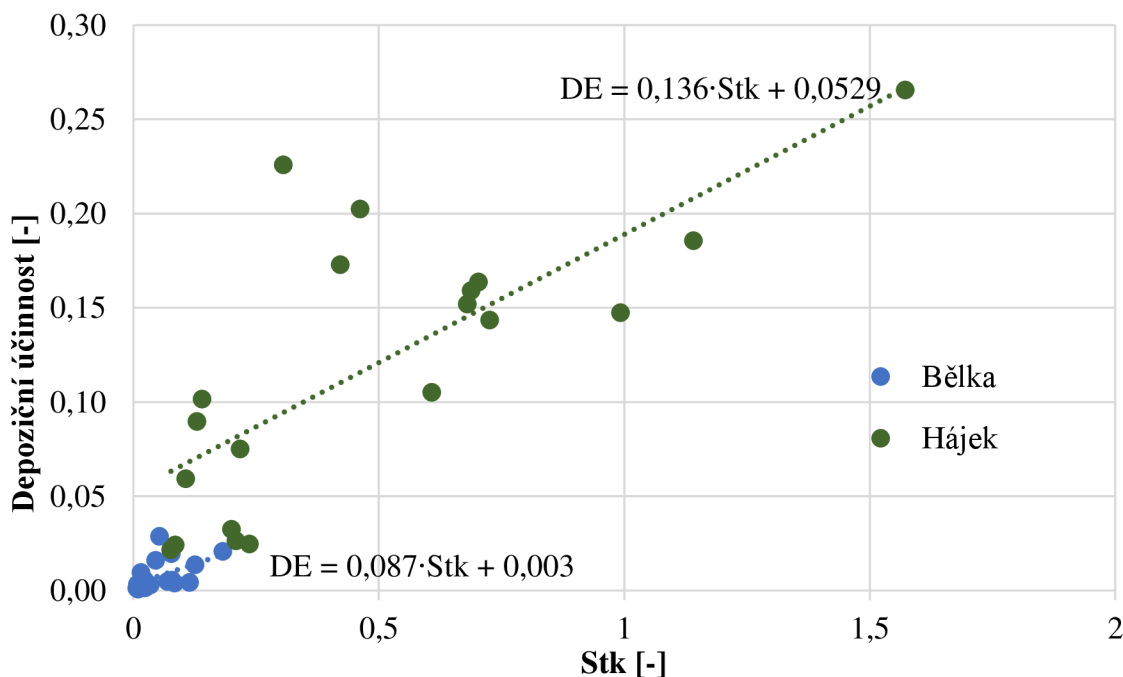
$$DE_{16} = \frac{N_{16}}{N_{16} + N_{26} + F_{16}} \cdot 100 = \frac{14739,9}{14739,9 + 6184,9 + 58416,2} \cdot 100 \doteq 18,6 \% \quad (4.10)$$

Jednotlivé počty vláken jsou uvedeny až v kompletních tabulkách 4.11 a 4.12 i s dopočítanými počty pro 1. a 2. segment. V rovnici 4.10  $N_{16}$ , resp.  $N_{26}$  značí počet vláken na výplachových filtrech ze segmentu 16, resp. svodu 26. Označení  $F_{16}$  je pro počet vláken na výstupních filtrech za segmentem 16, resp. svodovým segmentem 26, viz obr. 4.23:



Obrázek 4.23 Znárodnění dopočtu depoziční účinnosti, převzato a upraveno z [6]

Takto dopočítané depoziční účinnosti (bez nosní dutiny) lze zakreslit do grafu, viz obr. 4.24, kde na ose x jsou vynesena Stokesova čísla a na ose y jsou depoziční účinnosti.



Obrázek 4.24 Srovnání depoziční účinnosti měření Bělky a kol. [6] a Hájka

K výsledkům na obr. 4.24 jsou přidána Stokesova čísla a depoziční účinnosti z měření Bělky a kol. v [6]. Jak je možné z grafu vypočítat, pokud dojde k proložení výsledků přímkami, mají tyto přímky téměř totožný sklon. Pearsonův korelační koeficient ze Stokesových čísel měření Bělky a měření této práce je roven jedné, tedy Stokesova čísla vzájemně korelují. Tím pádem je možné vzít rovnici proložení přímkami daty tohoto měření a ze známých Stokesových čísel pro segmenty 1 a 2 alespoň odhadnout depoziční účinnosti pro nevyhodnotitelné filtry z rovnice 4.11:

$$DE_1 = (0,136 \cdot Stk + 0,0529) = (0,136 \cdot 3,4 \cdot 10^{-2} + 0,0529) = 0,058 \quad (4.11)$$

Stejně tak se dopočítá segment 2, kde je  $Stk = 6,3 \times 10^{-2}$ . Výsledné depoziční účinnosti v procentech pro celé měření jsou uvedeny v tabulce 4.10. Světle modře jsou znázorněny dopočtené segmenty. Grafické znázornění je spolu s ostatními výsledky v podkapitole 4.2.9.

Tabulka 4.10 Výsledná depoziční účinnost segmentů 0–22

<b>Segment</b>	-	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Depoziční účinnost</b>	%	24,4	5,8	6,2	2,4	2,2	2,5	22,6	10,2
<b>Segment</b>	-	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
<b>Depoziční účinnost</b>	%	5,9	9,0	2,6	7,5	3,3	20,2	17,3	14,8
<b>Segment</b>	-	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	
<b>Depoziční účinnost</b>	%	18,6	15,9	10,5	14,4	26,6	16,4	15,2	

#### 4.2.5 Celkový počet vláken

Díky výše uvedenému odhadu depoziční účinnosti segmentů 1 a 2 je nyní možné reverzně přes vzorec depoziční účinnosti dopočítat počty vláken na filtrech pro tyto segmenty. Výpočet ostatních deponovaných vláken na filtrech byl proveden pomocí rovnice 4.1 a ukázkové dosažení do rovnice je pro 16. výstupní filtr pro měření od 250. do 300. minuty měření:

$$F_{16} = \frac{A_{16} \cdot C_{16}}{a_{16} \cdot n_{16}} = \frac{368,8 \cdot 105}{0,071 \cdot 100} = 5478,5 \quad (4.1)$$

Takto byly dopočteny všechny další filtry, přičemž v tabulce 4.11 jsou uvedeny segmenty 0–22 (základní strom), na nichž se usadila vlákna o počtu  $N_i$  získaná z výplachových filtrů. V další tabulce 4.12 jsou segmenty 23–32 (sběrné komory), u nichž počty odpovídají součtu vláken  $N_i$  na výplachových filtrech a vláken na výstupních filtrech o počtu  $F_i$ . Součet je použit proto, že se jedná o všechna vlákna, která projdou celým segmentem a usadí se až dál v plicích.

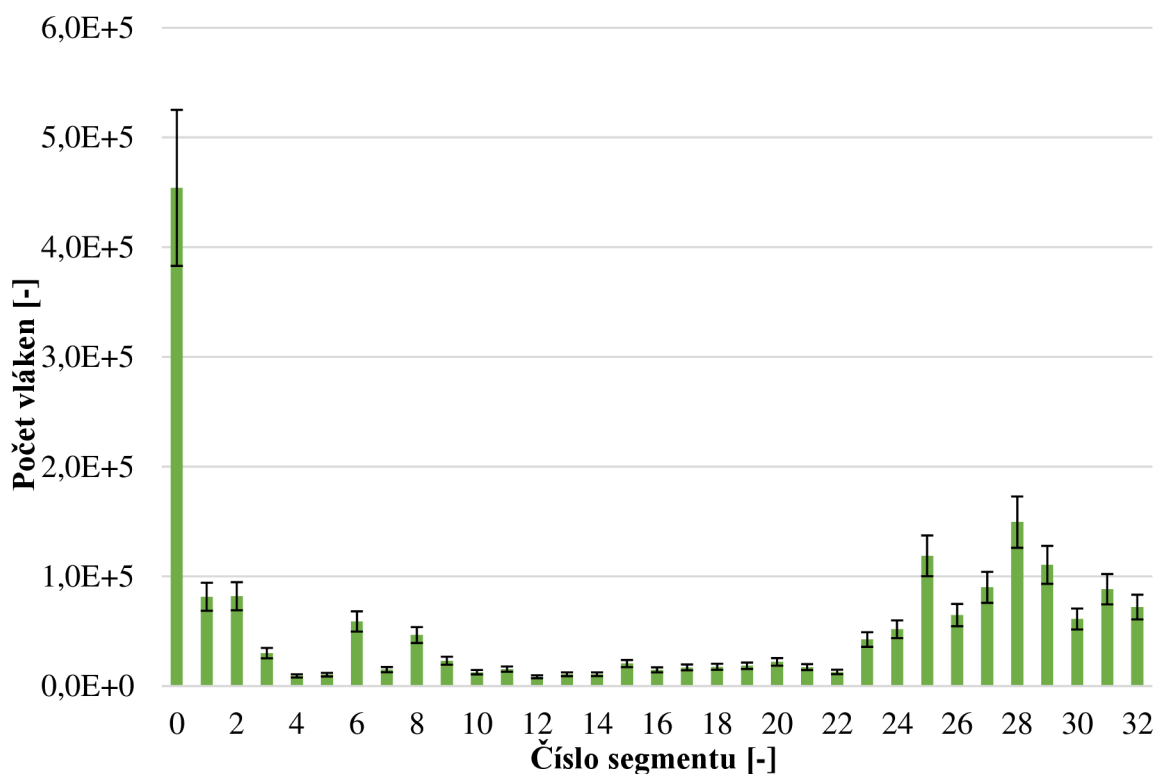
Tabulka 4.11 Počet vláken na výplachových filtrech ze segmentů 0–22

<b>Segment</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Počet vláken <math>N_i</math></b>	454 132,9	81 394,8	81 893,7	30 065,1	9 261,3	10 370,1
<b>Segment</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Počet vláken <math>N_i</math></b>	58 894,3	15 000,8	46 507,4	23 134,2	12 652,8	15 457,3
<b>Segment</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
<b>Počet vláken <math>N_i</math></b>	8 478,7	10 761,4	10 826,6	20 544,5	14 739,9	17 022,6
<b>Segment</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	
<b>Počet vláken <math>N_i</math></b>	17 577,0	18 522,7	22 109,8	17 283,5	12 913,7	

Tabulka 4.12 Počet vláken na výplachových a výstupních filtrech ze segmentů 23–32

Segment	23	24	25	26	27
Počet vláken $N_i$	5 322,0	14 152,9	8 739,6	6 284,9	10 174,4
Počet vláken $F_i$	37 097,5	37 668,9	109 987,2	58 416,2	79 811,8
<b>Celkem</b>	<b>42 419,5</b>	<b>51 821,8</b>	<b>118 726,7</b>	<b>64 701,1</b>	<b>89 986,2</b>
Segment	28	29	30	31	32
Počet vláken $N_i$	9 978,8	5 929,2	7 924,3	7 500,4	8 478,7
Počet vláken $F_i$	139 459,4	104 589,4	53 201,9	80 808,8	63 561,8
<b>Celkem</b>	<b>149 438,2</b>	<b>110 518,5</b>	<b>61 126,3</b>	<b>88 309,2</b>	<b>72 040,5</b>

Celkové počty vláken z tabulek 4.11 a 4.12 jsou i s procentuální nejistotou měření uvedeny na obr. 4.25 :



Obrázek 4.25 Celkový počet vláken v jednotlivých segmentech

Nezbytnou součástí vyhodnocování je také stanovení nejistoty měření. Ta je v případě tohoto experimentu závislá na zkušenostech laboranta, který vyhodnocuje výsledky, na volbě oblastí, na kterých jsou počítána vlákna atd. Protože se tímto zabýval Bělka ve svojí diplomové práci [77], budou použita vstupní data z jeho práce a bude dopočtena nejistota typu A. Jelikož nebyly použity přístroje, které by se projevíly v nejistotě typu B, bude tato nejistota považována po vynásobení koeficientem rovným 2 jako rozšířená nejistota  $U(d)$  při spolehlivosti výsledku 95 %.

Byli zvoleni 3 laboranti, kteří měli za úkol na každém z 10 filtrů analyzovat 20 oblastí. Tímto způsobem byla spočtena pomocí rovnice 4.1 celková množství vláken na jednotlivých filtrech. Od každého laboranta tak vyšlo celkově 10 hodnot pro 10 filtrů. Byl stanoven průměr

pro každý filtr, přičemž podle výpočtů Bělky lze tento průměr považovat za typickou hodnotu datového souboru díky nízké variabilitě souboru dat. [77]

Z rovnice 4.12 byla dopočtena nejistota  $u_A(d)$  pro jednotlivé filtry. Příklad výpočtu nejistoty je pro filtr č. 1, přičemž  $\bar{d}$  je průměrný počet vláken na filtru,  $d_i$  značí jednotlivé počty vláken na  $i$ -tém filtru a  $n$  je rovno 3, byla

$$u_A(d)_1 = s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{3 \cdot (3-1)} \cdot ((144665 - 153002)^2 + \dots + (176859 - 153002)^2} = 12107$$
(4.12)

Tato nejistota značila nejistotu typu A na filtru č. 1. Při převedení na procentuální vyjádření vůči průměrnému počtu vláken napočítaných na 1. filtru je rovna 7,9 %. Pokud se takto dopočítá zbylých 9 filtrů a procentuální vyjádření se zprůměrují a nejistota se rozšíří, vychází odhad nejistoty pro 10 filtrů  $U(d) = 15,7$  %.

#### 4.2.6 Depoziční frakce

Dalším parametrem, který je podobný již definované depoziční účinnosti, je depoziční frakce. Jedná se poměr počtu vláken usazených na segmentu ku celkovému množství vláken vstupujících do modelu. Celkové množství ( $N_c = 1\ 858\ 633,0$ ) je prostý součet všech napočítaných vláken. Je ovlivněn, stejně jako depoziční frakce, nepřesností při dopočtu nevyhodnotitelných filtrů.

Depoziční frakci lze spočítat z následující rovnice 4.13, kdy vzorový výpočet je pro segment 16:

$$DF_{16} = \frac{N_{16}}{N_c} \cdot 100 = \frac{14739,9}{1858633,0} \cdot 100 \doteq 0,8 \%$$
(4.13)

Výsledky všech depozičních frakcí pro segmenty 0–32 jsou uvedeny v tabulce 4.13 a poté na v grafu v podkapitole 4.2.9.

Tabulka 4.13 Výsledná depoziční frakce segmentů 0–32

<b>Segment</b>	-	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Depoziční frakce</b>	%	24,4	4,4	4,4	1,6	0,5	0,6	3,2
<b>Segment</b>	-	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Depoziční frakce</b>	%	0,8	2,5	1,2	0,7	0,8	0,5	0,6
<b>Segment</b>	-	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<b>Depoziční frakce</b>	%	0,6	1,1	0,8	0,9	0,9	1,0	1,2
<b>Segment</b>	-	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>
<b>Depoziční frakce</b>	%	0,9	0,7	2,3	2,8	6,4	3,5	4,8
<b>Segment</b>	-	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>		
<b>Depoziční frakce</b>	%	8,0	5,9	3,3	4,8	3,9		

Depoziční frakce se uvádí, na rozdíl od depoziční účinnosti, také pro segmenty 23–32. Protože zatímco pro depoziční frakci má toto vyjádření smysl, depoziční účinnost by vycházela pro uvedené segmenty rovna jedné.

#### 4.2.7 Depoziční hustota

V literatuře [6] se lze setkat i s vyjádřením poměru depoziční frakce daného segmentu na jeho ploše, zvaným depoziční hustota, která se dopočítává z rovnice 4.14. Uvedený příklad je pro depoziční hustotu segmentu č. 16:

$$DH_{16} = \frac{DF_{16}}{S_{16}} = \frac{0,008}{10,7} \doteq 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \quad (4.14)$$

V rovnici 4.14 značí  $DF_{16}$  depoziční frakci segmentu 16 a  $S_{16}$  plochu téhož segmentu z tabulky 4.14. Ve stejné tabulce jsou i celkové výsledky depoziční hustoty.

Tabulka 4.14 Výsledná depoziční hustota segmentů 0–22

<b>Segment</b>	-	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Plocha</b>	cm <sup>2</sup>	134,8	174,2	60,2	9,7	9,2	3,6	5,7	4,0
<b>Depoziční hustota</b>	cm <sup>-2</sup>	1,8E-3	2,5E-4	7,3E-4	1,7E-3	5,4E-4	1,5E-3	5,6E-3	2,0E-3
<b>Segment</b>	-	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
<b>Plocha</b>	cm <sup>2</sup>	8,6	6,0	4,9	6,1	4,1	10,1	16,1	25,2
<b>Depoziční hustota</b>	cm <sup>-2</sup>	2,9E-3	2,1E-3	1,4E-3	1,4E-3	1,1E-3	5,7E-4	3,6E-4	4,4E-4
<b>Segment</b>	-	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	
<b>Plocha</b>	cm <sup>2</sup>	10,7	14,4	17,7	21,9	5,9	21,0	10,6	
<b>Depoziční hustota</b>	cm <sup>-2</sup>	7,4E-4	6,4E-4	5,3E-4	4,5E-4	2,0E-3	4,4E-4	6,6E-4	

#### 4.2.8 Impaktní parametr

Farkas a kol. ve své práci [79] ještě používají podobnostní číslo podobné Stokesovu, které se nazývá impaktní parametr a určí se např. pro 16. segment podle rovnice 4.15, kde  $d_{ae}$  je výše dopočtený aerodynamický průměr v  $\mu\text{m}$  a  $Q_{16}$  je průtok segmentem v  $\text{cm}^3/\text{s}$ .

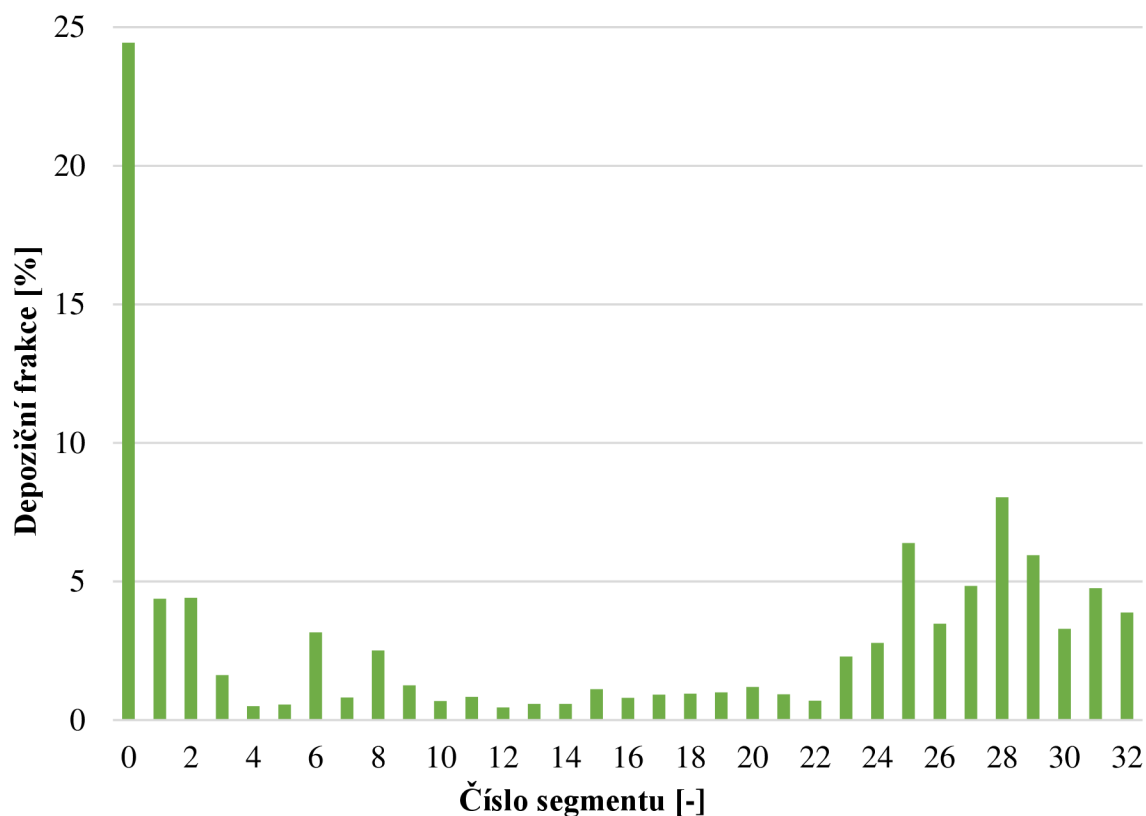
$$IP_{16} = d_{ae}^2 Q_{16} = 11,7^2 \cdot \left(2 \cdot \frac{1000}{60}\right) = 4,6 \cdot 10^3 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s} \quad (4.15)$$

Tabulka 4.15 Impaktní parametr pro segmenty 0–22

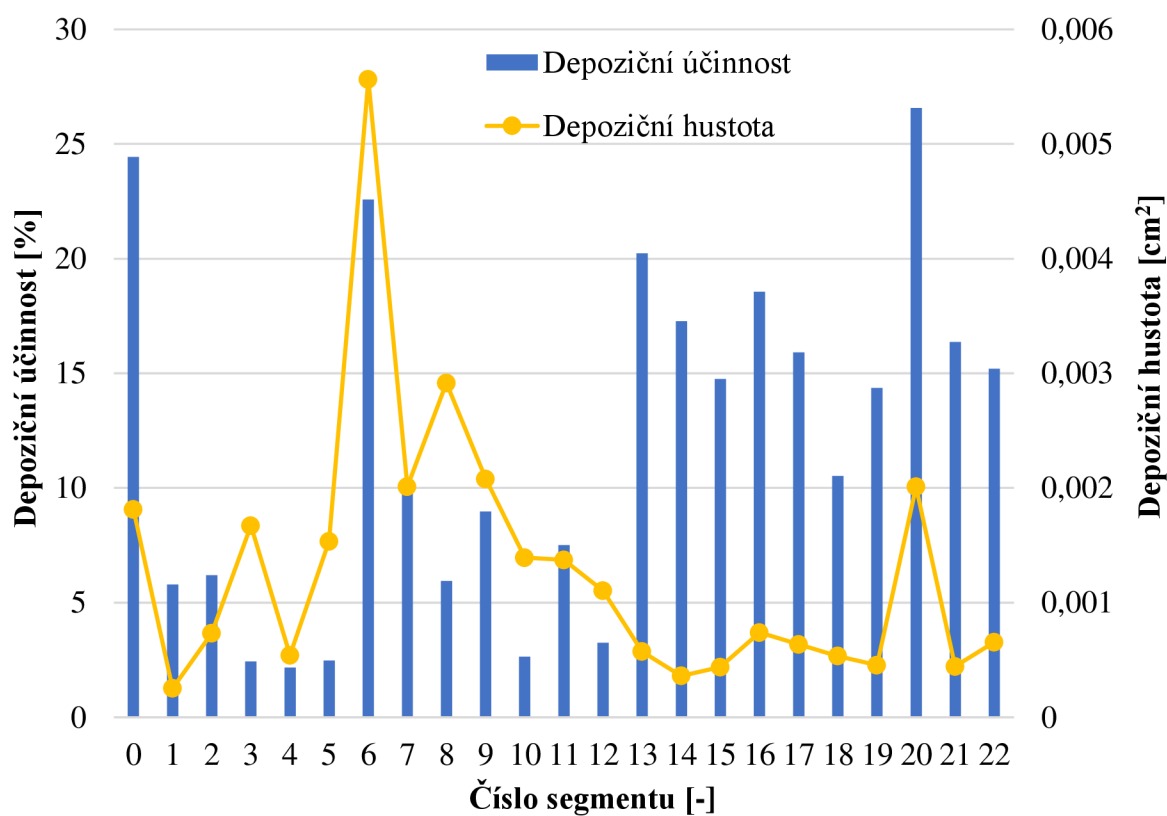
<b>Segment</b>	-	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Impaktní parametr</b>	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$	7,0E+4	7,0E+4	7,0E+4	7,0E+4	2,1E+4	2,1E+4	1,3E+4	7,8E+3
<b>Segment</b>	-	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
<b>Impaktní parametr</b>	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$	4,9E+4	1,6E+4	3,3E+4	1,5E+4	1,8E+4	3,2E+3	3,9E+3	9,2E+3
<b>Segment</b>	-	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	
<b>Impaktní parametr</b>	$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$	4,6E+3	8,2E+3	1,1E+4	8,7E+3	7,1E+3	7,1E+3	6,9E+3	

#### 4.2.9 Grafy depozičních parametrů

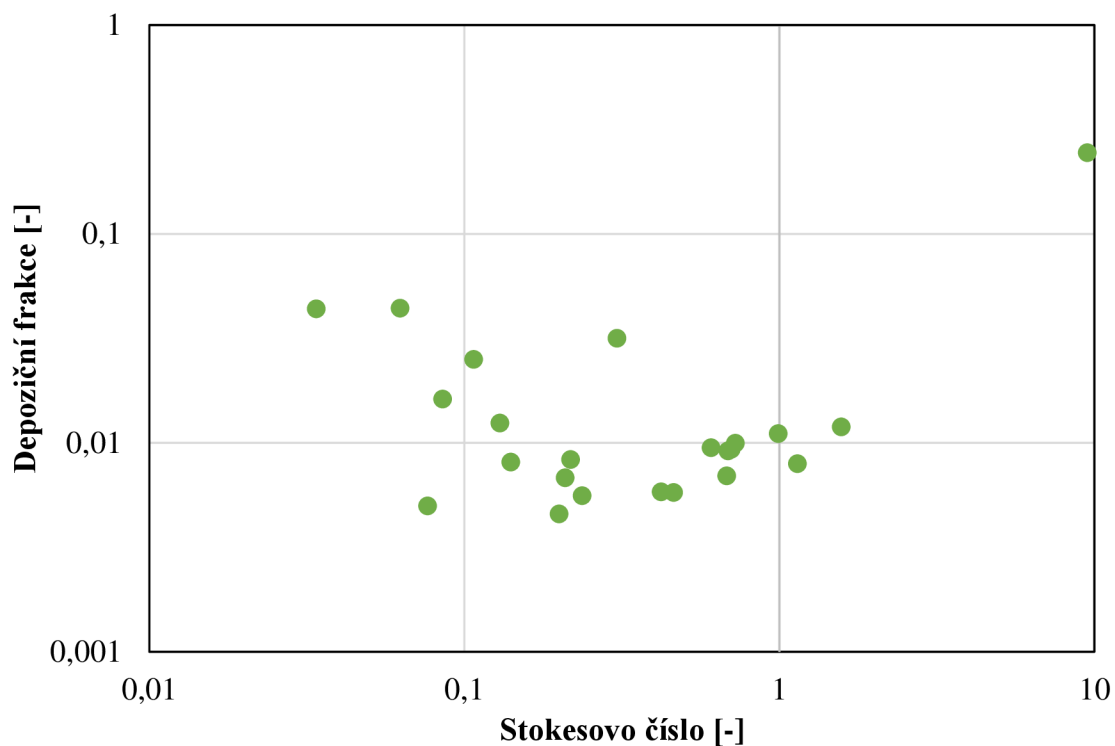
Na následujících grafech je možné vidět celkové výstupy této práce. Jedná se o graf závislosti depoziční frakce na segmentech 0–32 (obr. 4.26), graf závislosti depoziční účinnosti a depoziční hustoty na segmentech 0–22 (obr. 4.27), o grafy se závislostmi depoziční frakce na Stokesově čísle (obr. 4.28) a depoziční účinnosti na Stokesově čísle (obr. 4.29). Grafy jsou vytvořeny z tabulek 4.9, 4.10, 4.13 a 4.14.



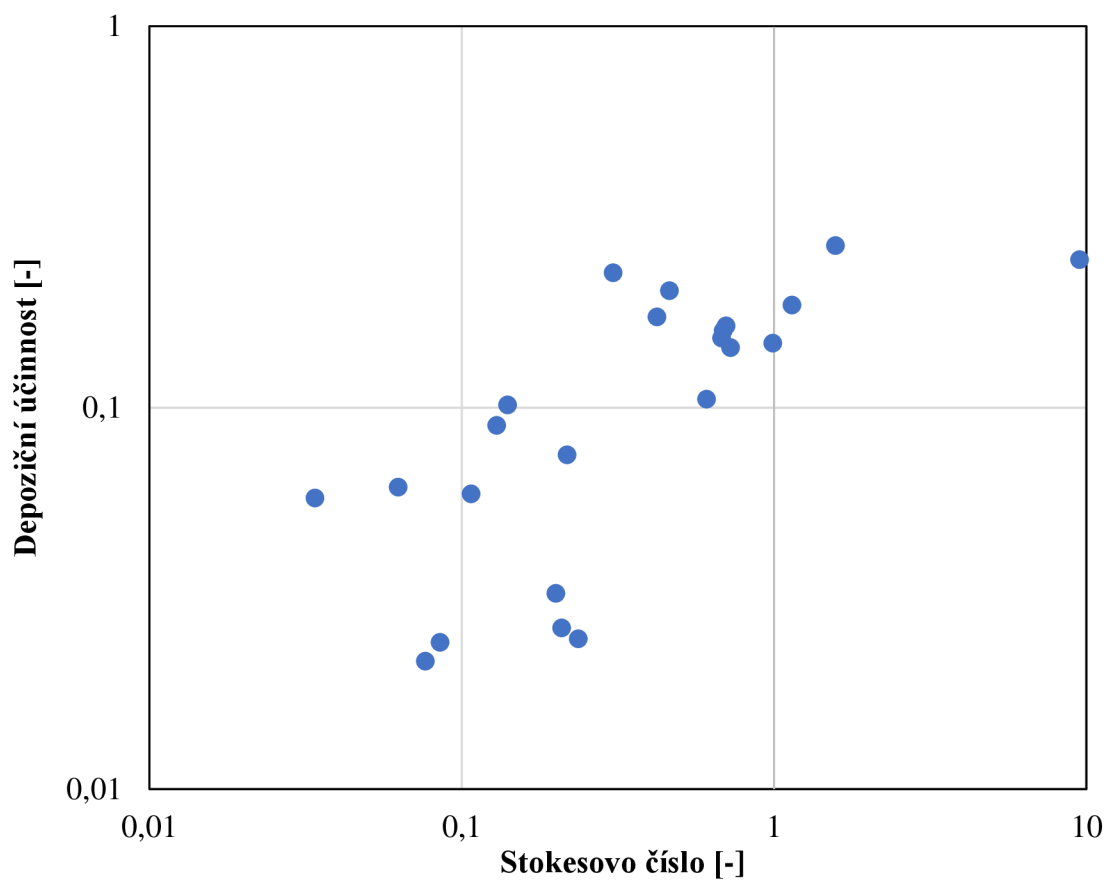
Obrázek 4.26 Depoziční frakce pro segmenty 0–32



Obrázek 4.27 Depoziční účinnost a hustota pro segmenty 0–22



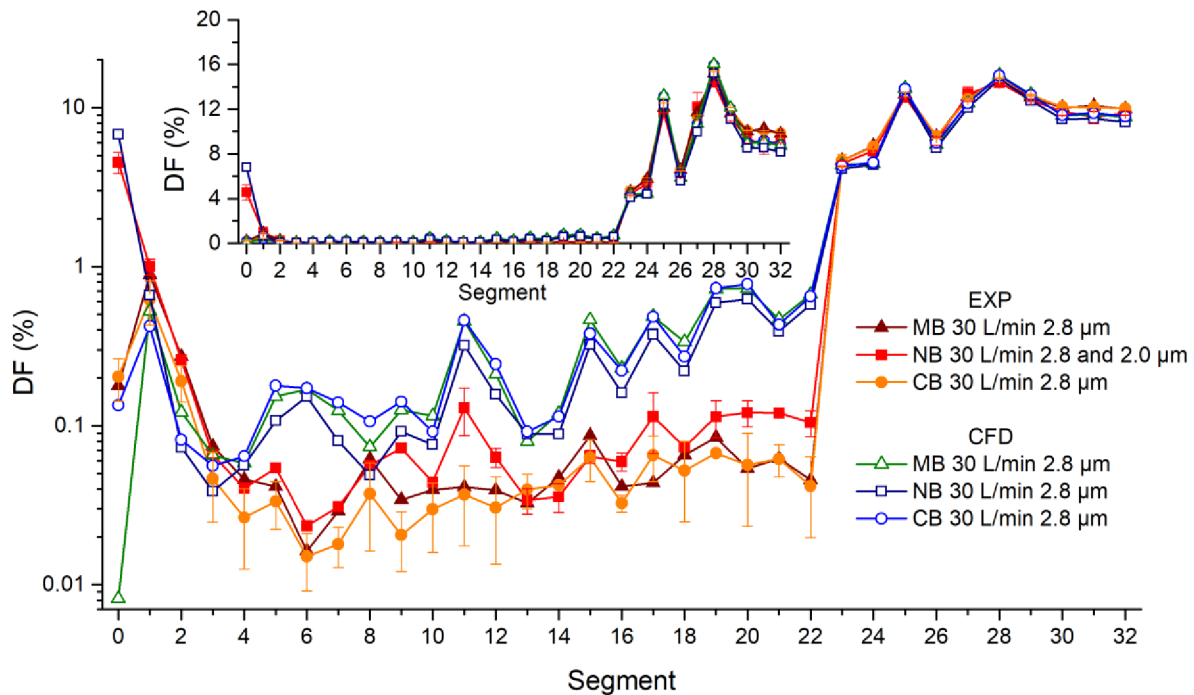
Obrázek 4.28 Závislost depoziční frakce na Stokesově čísle



Obrázek 4.29 Závislost depoziční účinnosti na Stokesově čísle

### 4.3 Srovnání

Z důvodu nádechu nosem se nabízí otázka, zdali je vůbec možné, aby se v segmentu úst usadila vlákna tak, jak vychází z uvedeného dopočtu. Proto je pro ověření správnosti dopočtu nejprve důležité srovnání s měřením na stejném modelu pro nádech nosem při průtoku 30 l/min. Takovéto měření provedl s kulovými částicemi Lízal a kol. v článku [80], který je prozatím v recenzním řízení. Na obr. 4.30 je vidět červená čára s čtverečky, která odpovídá stejnému nastavení experimentální aparatury, jaké bylo použito v této práci, s jediným rozdílem, a tím jsou použité částice. Z obrázku je tedy patrné, že i přes nádech nosem dojde k usazení 1 % všech částic v ústní dutině.

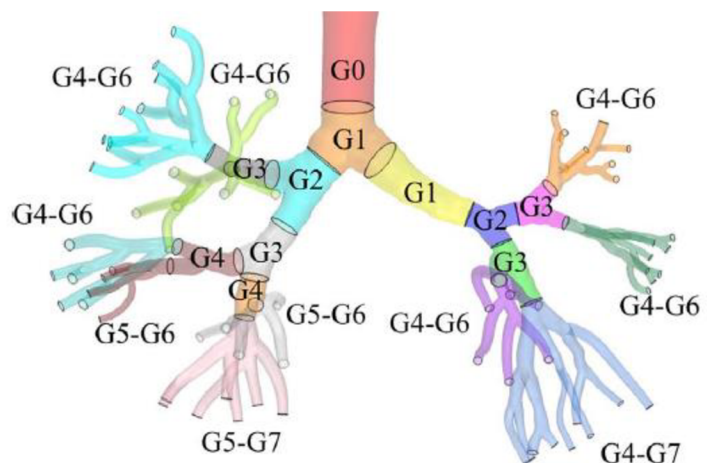


Obrázek 4.30 Výsledky experimentů Lízala a kol. [80]

#### 4.3.1 První generace větvení

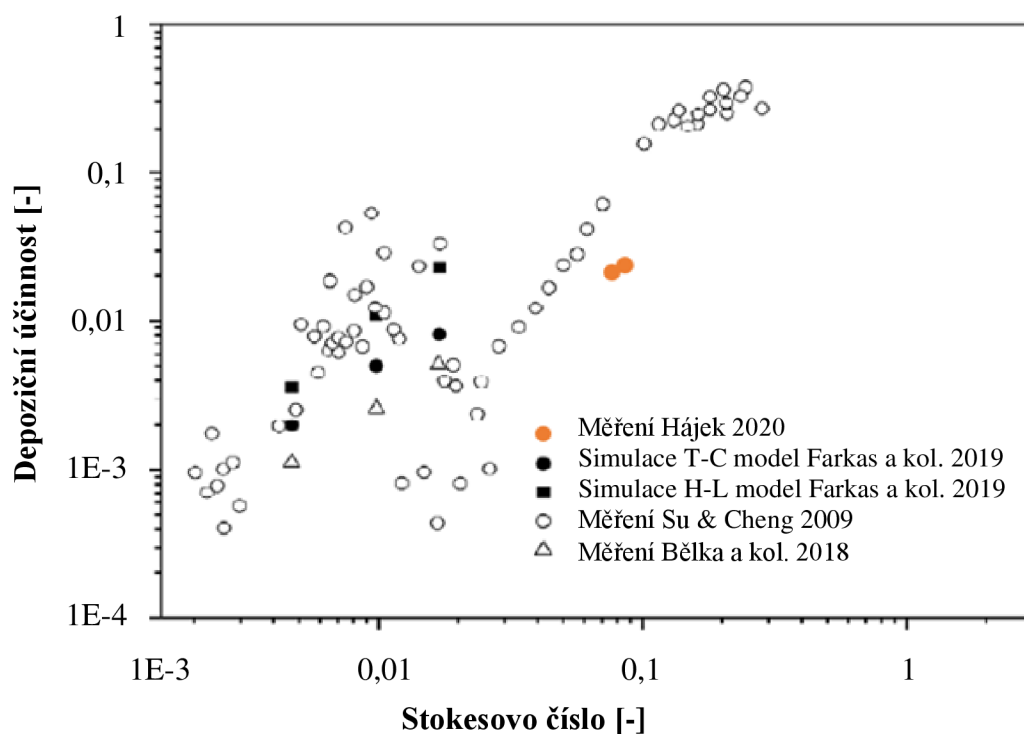
Srovnání pomocí Stokesových čísel a depoziční účinnosti je uvedeno až od 1. generace větvení právě z důvodu dopočítání segmentů úst a průdušnice a tím pádem zanesení určité chyby do výsledku depoziční účinnosti.

Na obrázku 4.32 je znázorněna první generace větvení (rozdělení průdušnice), které odpovídá segment č. 3 a segment č. 4. Jednotlivé generace větvení jsou na obr. 4.31. Data pro srovnání první generace větvení jsou z měření Bělky a kol. a simulace Farkase a kol. Další data z grafu jsou z měření Su a Chenga z roku 2009 z [78] pro uhlíková, skelná a  $\text{TiO}_2$  vlákna.



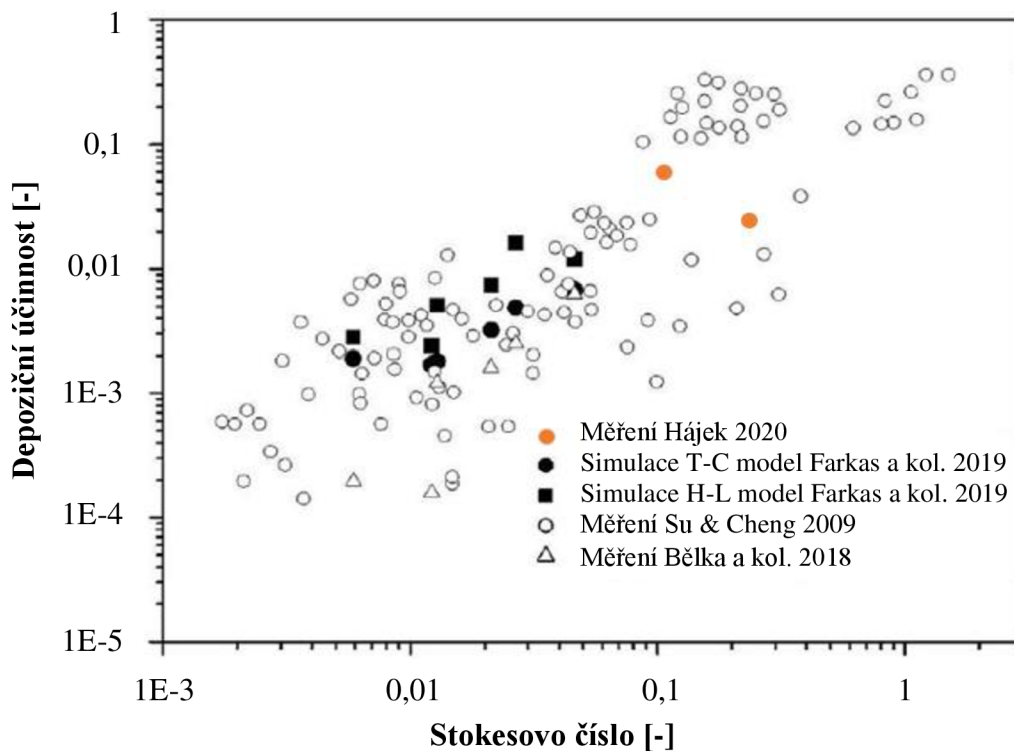
Obrázek 4.31 Generace větvení [6]





Obrázek 4.32 Srovnání závislosti depoziční účinnosti na Stokesově čísle pro první generaci větvení od různých autorů

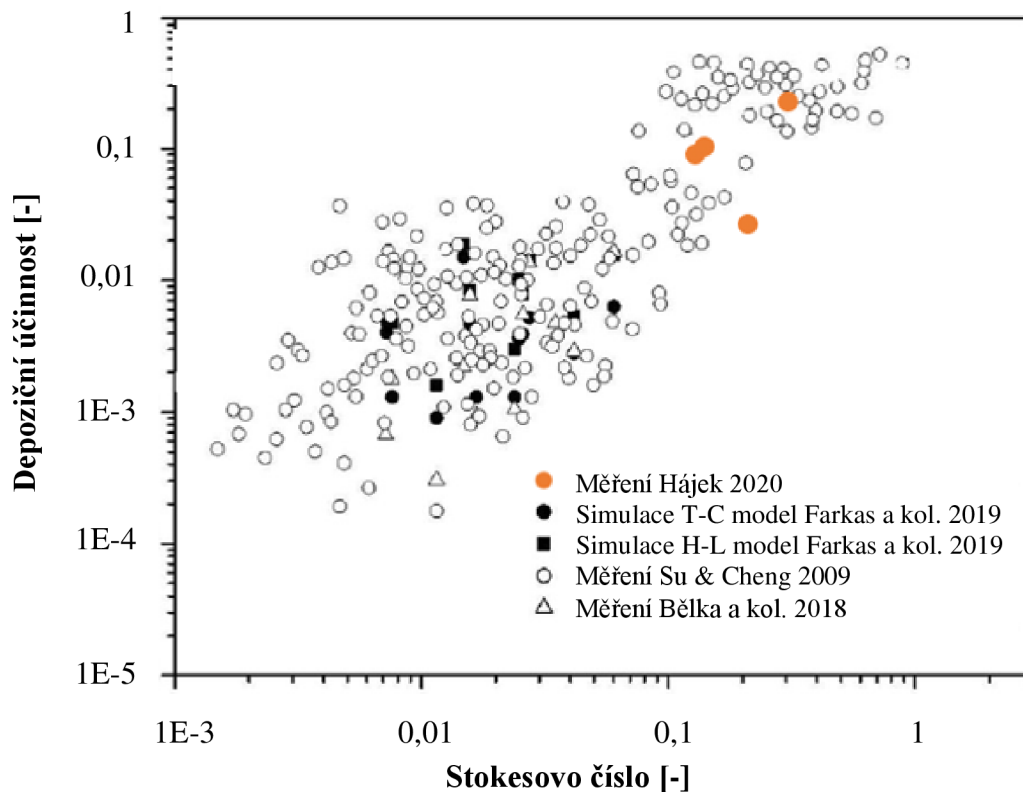
#### 4.3.2 Druhá generace větvení



Obrázek 4.33 Srovnání závislosti depoziční účinnosti na Stokesově čísle pro druhou generaci větvení od různých autorů

Na obrázku 4.33 je porovnání pro druhou generaci větvení, tedy segmenty 5 a 8. V této generaci větvení je patrné, že naměřená data leží v předpokládané oblasti.

### 4.3.3 Třetí generace větvení

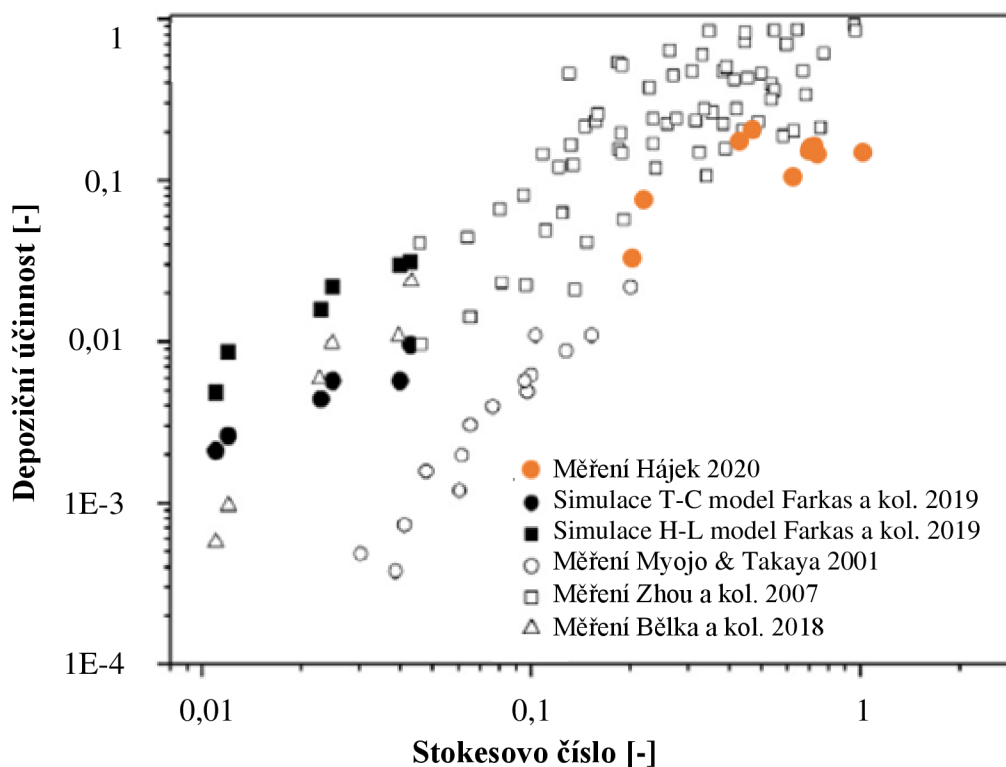


Obrázek 4.34 Srovnání závislosti depoziční účinnosti na Stokesově čísle pro třetí generaci větvení od různých autorů

U třetí generace větvení je opět dobře vidět, jak naměřená data korelují s prací dřívějších výzkumníků. Do této generace se řadí segmenty s čísly 6, 7, 9, 10.

### 4.3.4 Čtvrtá až sedmá generace větvení

Pro srovnání čtvrté až sedmé generace větvení byla použita data kromě Bělky a kol. a Farkase ještě od Myojo & Takaya [81] a Zhou a kol. [82]. Data z aktuálního měření jsou v oblasti pod hodnotou 1 Stokesova čísla a kolem 10 % depoziční účinnosti. Segmenty, které odpovídají tomuto členění, mají čísla 11–22.



Obrázek 4.35 Srovnání závislosti depoziční účinnosti na Stokesově čísle pro segmenty od čtvrté po sedmou generaci od různých autorů

#### 4.4 Vyhodnocení

Měření bylo provedeno pro stacionární nádech nosem, který odpovídal 30,4 l/min. Kvůli mnoha výše uvedeným faktorům nebylo možné vyhodnotit dva segmenty. Aby nebylo nutné prohlásit celé měření za neplatné, došlo alespoň k odhadu vývoje depoziční účinnosti díky vyhodnotitelným filtrům a datům od Bělky a kol. ze [6]. Z tohoto důvodu není vhodné odhadovat hodnoty nejistoty měření, nicméně i pro ty byl proveden alespoň odhad nejistoty počtu vláken v segmentu a určité stanovení mantinelů, ve kterých by se mohla nejistota měření pohybovat. Dopočet nejistoty byl možný díky práci Bělky v [77], kdy provedl statistiku měření z vyhodnocování 3 různých laborantů.

Z naměřených výsledků je při prvním pohledu patrné, že nosní dutina zachytila téměř čtvrtinu všech vláken, což se ale na druhou stranu nejeví jako tolik výrazný výsledek při zohlednění faktu, že aerodynamický průměr vláken byl 11,7  $\mu\text{m}$ . Dalo by se očekávat, že by takto velké částice neměly přes nosní dutinu vůbec projít. Roli v tomto případě může sehrát výpočet dynamického součinitele tvaru  $\chi$ . Pokud by byla pro výpočet použita rovnice 2.6, vycházel by aerodynamický ekvivalentní průměr cca třetinový, než s jakým bylo ve výpočtech počítáno. Na druhou stranu ale kvůli dopočtu chybějících segmentů bylo důležité zvolit podobný postup jako Bělka v [6].

Dalším segmentem s velkým záchytem vláken je díl číslo 6, tedy 3. větvení levé plic. Zde není tento výsledek tolik očekávaný, protože Stokesovo číslo nebylo větší než 1, a přestože se jedná o segment s rozdvojením, ostatní podobné segmenty takto účinné v záchyty vláken nebyly. Možnou roli sehrává intercepce, kterou by bylo možné ověřit počítačovou simulací. U tohoto segmentu je v porovnání s ostatními také vysoká depoziční hustota. Ta je vyšší též

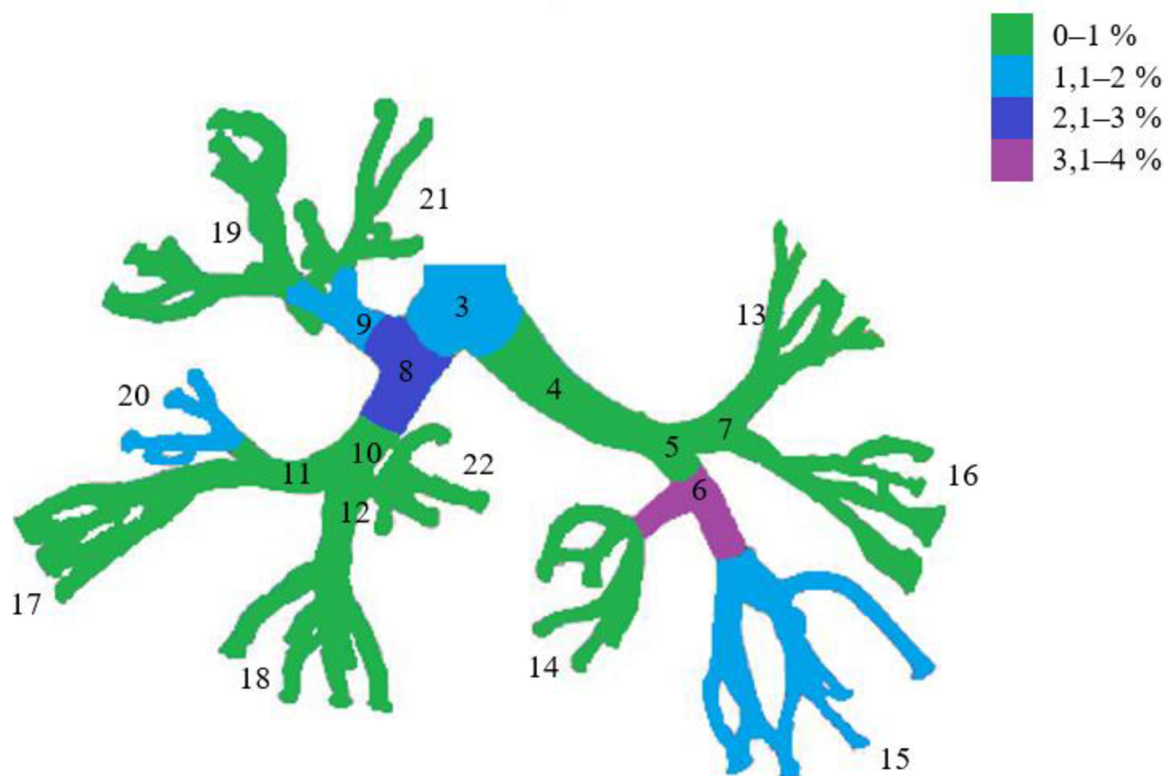
pro segment 20, kde byla díky Stokesově číslu většímu než 1 vysoká depoziční účinnost. Tento segment byl dokonce neúčinnější v záchytu ze všech.

Co se týče depoziční účinnosti u ostatních segmentů, tu měly kromě nosní dutiny vysokou hlavně segmenty od 4. generace větvení. Ty samé segmenty mají však velmi malou depoziční frakci.

Jak je ale vidět z grafu na obrázku 4.25, velké množství vláken se v modelu vůbec neusadí a projdou jím dále do hlubších oblastí plic. Kvantitativně se jedná o téměř 850 tisíc vláken, vyjádřeno jako depoziční frakce je to 45,7 %, tedy necelá polovina vláken. Tento fenomén souvisí s tvrzením Bělky a kol. v [6] a také dalších autorů, že vlákna se zorientují paralelně s proudem vzduchu a jsou tak schopny penetrovat hlouběji do plic.

Nezbytné je srovnání s ostatními experimenty a také se simulacemi. To bylo provedeno na závěr s daty z měření Bělky a kol. [6], Farkase a kol. [79], Su & Chenga [78], Myojo & Takayy [81] a Zhou a kol. [82]. Naměřené hodnoty pro všechny generace větvení vychází v oblastech vyššího Stokesova čísla a žádné hodnoty nevyšly výrazně mimo oblasti, kde se nachází data ostatních vědců. Lze tedy konstatovat, že existuje určitá míra korelace mezi daty a že výsledky mohou sloužit jako podklad pro další experimenty a simulace.

Zajímavý obrázek 4.36 se naskytne po vykreslení depoziční účinnosti na jednotlivých segmentech přímo v modelu.



Obrázek 4.36 Depoziční frakce od 3. do 22. segmentu

## 5 ZÁVĚR

Prvním cílem diplomové práce bylo zhodnotit, jaké existují normy a jak se světové organizace staví vůči uměle vytvořeným minerálním, resp. skelným vláknům. Závěr je těžké jednoznačně zkonstatovat, protože se každá organizace k této problematice staví z jiného úhlu pohledu a využívá jiná data. Společným jmenovatelem téměř všech je, že tvoří své závěry na výzkumech laboratorních zvířat a na rozsáhlých studiích provedených na pracovnících ve výrobě těchto vláken. Studie ale nemají jednoznačné výsledky, a právě tato nejednoznačnost může být způsobena faktem, že velkou roli v analyzování dat sehrává, pokud pracovníci kouří tabák, případně byli v minulosti vystaveni azbestu. Přesto existuje pár společných závěrů všech studií, a to ty, že izolační skelná vlákna nejsou považována podle dostupných poznatků za karcinogenní, ačkoliv mohou způsobit jiné obtíže a záněty, a že speciální skelná vlákna a žáruvzdorná keramická vlákna jsou pravděpodobně karcinogenní.

Obecně lze konstatovat, že vždy záleží na koncentraci, které je člověk vystaven, dále na rozměrech vláken a na jejich odolnosti. Světové organizace odhadují početní nebo hmotnostní limity vláken na jednotku objemu, i když v tuto chvíli není zřejmé, jak přesně může podlimitní množství působit na lidské zdraví. Zajímavostí také je, že v průběhu let probíhá vývoj vláken, která jsou méně odolná a lépe se v lidském těle rozpadnou, což dává do budoucna naději pro lidi, jež jsou tomuto materiálu vystaveni.

Popisem dýchacího traktu a také popisem fyziologických účinků částic, blíže pak vláken, se zabývala další kapitola. Existuje řada nemocí, jež se váží k nadlimitním koncentracím škodlivých látek v ovzduší. Počínaje astmatem a záněty, konče karcinogenním bujením. Obecně záleží na každém jednotlivci, jak se jeho tělo dokáže se škodlivinami vypořádat a kde leží kritická hodnota koncentrace škodliviny.

Na tyto teoretické kapitoly navazovala experimentální část. V rámci ní byl cíl provést depozici vláken z izolační skelné vaty v modelu lidských plic. Tento experiment byl jedinečný z toho hlediska, že se jednalo o depozici v modelu lidských plic s nosní dutinou. Experiment byl dlouhodobý, skládající se z mnoha nezbytných úkonů, jako například příprava směsi vláken, vyčištění a sestavení celé měřicí aparatury, samotné provedení depozice a závěrečné vyhodnocování. Při posledním kroku nastal problém při vyhodnocování filtrů z oblasti ústní dutiny a průdušnice. Vzhledem k ostatním datům bylo rozhodnuto pokračovat s celým souborem výsledků a nevyhodnotitelné oblasti odhadnout z pravděpodobného vývoje depoziční účinnosti a Stokesova čísla pro tyto segmenty. Díky tomuto odhadu bylo možné stanovit depoziční parametry jako depoziční frakce, účinnost, či hustota a impaktní faktor pro všechny segmenty modelu, a tyto výsledky na závěr kapitoly díky Stokesovu podobnostnímu číslu srovnat s výsledky předchozích experimentů s různými typy vláken. Z grafů srovnání je patrné, že vyhodnotitelná data pro první až sedmou generaci větvení korelují s trendy ostatních měření.

Jistý vliv na výsledky má výpočet dynamického součinitele tvaru, pro který se v literatuře udává několik odlišných rovnic a který bude nutné v následujících letech ještě důkladněji prozkoumat. S tím souvisí přesný popis chování vlákna v proudu, jestli se pohybuje paralelně s proudem, nebo naopak kolmo na proud, či se pohyb skládá z různých natočení, z čehož poté vyplývá nutnost zjistit, jak často je vlákno v určitých polohách vůči směru proudu. A právě k tomu by mohlo v budoucnu posloužit počítačové modelování a využití simulací.

V této práci byla taktéž odhadnuta nejistota měření, a to díky experimentům kolegů z dřívějších let, kteří se touto problematikou taktéž zabývali a kteří udělali dostatečný počet měření, ze kterých je nejistota možné odhadnout.

Tato diplomová práce může sloužit jako podrobný návod pro provedení podobných experimentů, které by posloužily jako validace naměřených výsledků, či podklad pro počítačové modelování, a také jako příručka o tom, jaké postupy zvolit tak, aby bylo možné bezproblémové vyhodnocení celého měření. Mezi důležité faktory, jež právě toto ovlivňují, se řadí kvalita použitých materiálů, především silikonového těsnění, a délka trvání experimentu, tedy doba, po kterou je model na stanovišti a je vystaven působení okolí.

## 6 ZDROJE

- [1] HINDS, William. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1999. ISBN 978-047-1194-101.
- [2] HÁJEK, Ondřej. *Jemné částice emitované při laboratorním spalování biomasy*. Brno, 2018.. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.
- [3] BARON, Paul, Pramod KULKARNI a Klaus WILLEKE. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. 3. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. ISBN 978-0-470-38741-2.
- [4] FUCHS, N. A., C.N. DAVIES, ed., R.E. DAISLEY, Marina FUCHS. *The Mechanics of Aerosols*. 1. Oxford: Pergamon Press, 1964.
- [5] BARON, Paul a Klaus WILLEKE. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. 2. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001. ISBN 0-471-35636-0.
- [6] BĚLKA, Miloslav, František LÍZAL, Jan JEDELSKÝ, Jakub ELCNER, Philip HOPKE a Miroslav JÍCHA. Deposition of glass fibers in a physically realistic replica of the human respiratory tract. *Journal of Aerosol Science*. 2018, **2018**(117), 149-163. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2017.11.006. ISSN 0021-8502.
- [7] LÍZAL, František, Milan MALÝ, Matouš CABALKA et al. Visualization of the flow of micrometre-sized glass fibres in a replica of the human trachea. In: *EFM19: Experimental Fluid Mechanics*. Franzensbad, 2019.
- [8] TSUDA, Akira, Frank HENRY a James BUTLER. Particle Transport and Deposition: Basic Physics of Particle Kinetics. *Comprehensive Physiology*. 2013, **3**(4), 1437-1471. DOI: 10.1002/cphy.c100085. ISSN 2040-4603.
- [9] LIPPMANN, M., D. YEATES a R. ALBERT. Deposition, retention, and clearance of inhaled particles. *British Journal of Industrial Medicine*. 1980, **37**(4), 337-362. DOI: 10.1136/oem.37.4.337. ISSN 0007-1072.
- [10] LIDDELL, Douglas a Klara MILLER. *Mineral Fibers and Health*. 1. Boca Raton: CRC Press, Inc., 1991. ISBN 0-8493-6646-1.
- [11] LÍZAL, František, Miloslav BĚLKA, Jan ADAM, Jan JEDELSKÝ a Miroslav JÍCHA. A method for in vitro regional aerosol deposition measurement in a model of the human tracheobronchial tree by the positron emission tomography. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H Journal of Engineering in Medicine*. 2015, **229**(10), 750-757. DOI: 10.1177/0954411915600005. ISSN 0954-4119.
- [12] LÍZAL, František. *Experimentální výzkum transportu a depozice aerosolů v dýchacím traktu člověka*. Brno, 2012.. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Miroslav Jícha.



- [13] IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to human: *Man-made Vitreous Fibres*. 81. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2002. ISBN 92 832 1281 9.
- [14] EVROPSKÁ UNIE. Směrnice komise 97/69/ES ze dne 5. prosince 1997: kterou se po dvacáté třetí přizpůsobuje technickému pokroku směrnice Rady 67/548/EHS o sblížení právních a správních předpisů týkajících se klasifikace, balení a označování nebezpečných látek. In: *Úřední věstník*. 1997, ročník 1997, číslo 69. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:31997L0069&from=EN>
- [15] *Bezpečnostní list: Foukaná izolace z minerální skelné vlny*. Simbach am Inn: Knauf Insulation GmbH, 2013.
- [16] Asbestos (tremolite) silky fibres on muscovite from Bernera, Outer Hebrides. <https://en.wikipedia.org/> [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Asbestos#/media/File:Asbestos\\_with\\_muscovite.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Asbestos#/media/File:Asbestos_with_muscovite.jpg)
- [17] BARBALACE, Roberta. Asbestos, its Chemical and Physical Properties. *EnvironmentalChemistry.com* [online]. 2004 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://environmentalchemistry.com/yogi/environmental/asbestosproperties2004.html>
- [18] *Man-made Vitreous Fibers: Nomenclature, Chemical, and Physical Properties*. 4. Stamford: TIMA, Inc., 1993.
- [19] UTELL, Mark a L. MAXIM. Refractory ceramic fibers: Fiber characteristics, potential health effects and clinical observations. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2018, **2018**(361), 113-117. DOI: 10.1016/j.taap.2018.06.011. ISSN 0041-008X.
- [20] HARBISON, Raymond., Marie. BOURGEOIS a Giffe. JOHNSON. *Hamilton & Hardy's Industrial Toxicology*. 6. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2015. ISBN 978-0-470-92973-5.
- [21] EVROPSKÁ UNIE. Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for man made-mineral fibres (MMMf) with no indication for carcinogenicity and not specified elsewhere: SCOEL/SUM/88. In: *Scientific Committee on Occupational Exposure Limits*. 2012, ročník 2012, číslo 88.
- [22] MOSSMAN, Brooke a Andrew CHURG. Mechanisms in the Pathogenesis of Asbestosis and Silicosis. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 1998, **157**(5), 1666–1680. DOI: 10.1164/ajrccm.157.5.9707141. ISSN 1073-449X.
- [23] LIPWORTH, Loren, Carlo LA VECCHIA, Cristina BOSETTI a Joseph MCLAUGHLIN. Occupational Exposure to Rock Wool and Glass Wool and Risk of Cancers of the Lung and the Head and Neck: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2009, **51**(9), 1075-1087. DOI: 10.1097/JOM.0b013e3181b35125. ISSN 1076-2752.

- [24] Certain Glass Wool Fibers (Inhalable). In: *14th Report on Carcinogens* [online]. U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/content/profiles/glasswoolfibers.pdf>
- [25] *Fibrous glass dust: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards* [online]. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2019 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0288.html>
- [26] *Mineral wool fiber: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards* [online]. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2019 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0288.html>
- [27] EVROPSKÁ UNIE. Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Refractory Ceramic Fibres: SCOEL/SUM/165. In: *Scientific Committee on Occupational Exposure Limits*. 2011, ročník 2011, číslo 165.
- [28] EVROPSKÁ UNIE. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) o klasifikaci, označování a balení látek a směsí, o změně a zrušení směrnic 67/548/EHS a 1999/45/ES a o změně nařízení (ES) č. 1907/2006. In: *Úřední věstník*. 2008, ročník 2008, číslo 1272. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32008R1272>
- [29] VISSER, M., L. DE WIT-BOS, PALMEN a P. BOS. *Overview of Occupational Exposure Limits within Europe: RIVM Letter report 2014-0151* [online]. 1. Holandsko: National Institute for Public Health and the Environment, 2014 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2014-0151.pdf>
- [30] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.: Nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. In: *Pracovní právo*. 2007. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361/zneni-20200301>
- [31] *Ochranné prostředky dýchacích orgánů - Filtrační polomasky k ochraně proti částicím - Požadavky, zkoušení a značení*. 1. Česká republika: Výzkumný ústav bezpečnosti práce Praha, 2009.
- [32] *Význam tříd ochrany FFP* [online]. b.r. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <https://www.uvex-safety.cz/cs/vedet/normy-asmernice/masky-na-ochranu-dychacich-organu/vyznam-trid-ochrany-ffp/>
- [33] RENGASAMY, Samy, Benjamin EINER a Ronald SHAFFER. Comparison of Nanoparticle Filtration Performance of NIOSH-approved and CE-Marked Particulate Filtering Facepiece Respirators. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2009, **53**(2), 117–128. DOI: 10.1093/annhyg/men086. ISSN 0003-4878.
- [34] SANDARADURA, Indy, Emma GOEMAN, Giulietta PONTIVIVO et al. A close shave? Performance of P2/N95 respirators in health care workers with facial hair: results of the BEARDS (Adequate Respiratory DefenceS) study. *Journal of Hospital Infection* [online]. [cit. 2020-02-15]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.01.006>. ISSN 0195-6701.

- [35] *Anatomy & Physiology: The Respiratory System - Introduction* [online]. Houston, Texas: OpenStax CNX, 2013 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://openstax.org/books/anatomy-and-physiology/pages/22-introduction>
- [36] *Anatomy & Physiology: The Respiratory System - Organs and Structures of the Respiratory System* [online]. Houston, Texas: OpenStax CNX, 2013 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://openstax.org/books/anatomy-and-physiology/pages/22-1-organs-and-structures-of-the-respiratory-system>
- [37] *Základy anatomie: Dýchací soustava (apparatus respiratorius, systema respiratorium)* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2013 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/do/fsp/s/e-learning/zaklady\\_anatomie/zakl\\_anatomieIII/pages/dychaci\\_soustava.html](https://is.muni.cz/do/fsp/s/e-learning/zaklady_anatomie/zakl_anatomieIII/pages/dychaci_soustava.html)
- [38] WIDDICOMBE, J. Relationships among the composition of mucus, epithelial lining liquid, and adhesion of microorganisms. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 1995, **151**(6), 2088-2093. DOI: 10.1164/ajrcm.151.6.7767562. ISSN 1073-449X.
- [39] FAHY, John a Burton DICKEY. Airway Mucus Function and Dysfunction. *The New England Journal of Medicine*. 2010, **363**(23), 2233-2247. DOI: 10.1056/NEJMra0910061. ISSN 0028-4793.
- [40] Medical gallery of Blausen Medical 2014. In: *WikiJournal of Medicine* [online]. Blausen.com staff, 2014 [cit. 2020-02-12]. DOI: 10.15347/wjm/2014.010.
- [41] RUBINS, Jeffrey. Alveolar macrophages: wielding the double-edged sword of inflammation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 2003, **167**(2), 103-104. DOI: 10.1164/rccm.2210007. ISSN 1073-449X.
- [42] NICOD, Laurent. Lung defences: an overview. *European Respiratory Review*. 2005, **14**(95), 45-50. DOI: 10.1183/09059180.05.00009501. ISSN 0903-1936.
- [43] FANG, Ferric. Antimicrobial reactive oxygen and nitrogen species: concepts and controversies. *Nature Reviews Microbiology*. 2004, **2**(10), 820-832. DOI: 10.1038/nrmicro1004. ISSN 1740-1534.
- [44] PADMORE, Trudy, Carahline STARK, Leonid TURKEVICH a Julie CHAMPION. Quantitative analysis of the role of fiber length on phagocytosis and inflammatory response by alveolar macrophages. *Biochimica et Biophysica Acta*. 2017, **1861**(2), 58-67. DOI: 10.1016/j.bbagen.2016.09.031. ISSN 0304-4165.
- [45] ZEIDLER-ERDELY, Patti, William CALHOUN, Bill AMEREDES et al. In vitro cytotoxicity of Manville Code 100 glass fibers: Effect of fiber length on human alveolar macrophages. *Particle and Fibre Toxicology*. 2006, **3**(5), 1-7. DOI: 10.1186/1743-8977-3-5. ISSN 1743-8977.
- [46] BROWN, Robert a Paul HARRISON. Alkaline earth silicate wools – A new generation of high temperature insulation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2012, **64**(2), 296-304. DOI: 10.1016/j.yrtph.2012.08.020. ISSN 0273-2300.

- [47] OBERDÖRSTER, Gunter. Determinants of the pathogenicity of man-made vitreous fibers (MMVF). *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2000, **2000**(73), 60-68. DOI: 10.1007/PL00014628. ISSN 0340-0131.
- [48] CAMPOPIANO, Antonella, Annapaola CANNIZZARO, Federica ANGELOSANTO, Maria ASTOLFI, Deborah RAMIRES, Angelo OLORI, Silvia CANEPARI a Sergio IAVICOLI. Dissolution of glass wool, rock wool and alkaline earth silicate wool: Morphological and chemical changes in fibers. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2014, **70**(1), 393-406. DOI: 10.1016/j.yrtph.2014.05.023. ISSN 0273-2300.
- [49] PERLMAN, David a Lisa MAIER. Occupational Lung Disease. *Medical Clinics of North America*. 2019, **103**(3), 535-548. DOI: 10.1016/j.mcna.2018.12.012. ISSN 0025-7125.
- [50] *Asthma* [online]. b.r. [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.nhlbi.nih.gov/health-topics/asthma>
- [51] LEMIÉRE, C. a O. VANDENPLAS. Asthma in the Workplace. *Murray and Nadel's Textbook of Respiratory Medicine*. 6. 2016, s. 1295-1306. ISBN 978-1-4557-3383-5.
- [52] *COPD* [online]. Mayo Clinic, 2017 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/copd/symptoms-causes/syc-20353679>
- [53] COWIE, R. a M. BECKLAKE. Pneumoconioses. *Murray and Nadel's Textbook of Respiratory Medicine*. 6. 2016, 1307-1330.e12. ISBN 978-1-4557-3383-5.
- [54] *Pneumoconiosis* [online]. The Johns Hopkins University, The Johns Hopkins Hospital, and Johns Hopkins Health System, 2020 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/pneumoconiosis>
- [55] *Learn About Silicosis* [online]. American Lung Association, 2018 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.lung.org/lung-health-and-diseases/lung-disease-lookup/silicosis/learn-about-silicosis.html>
- [56] *Pulmonary Fibrosis Overview* [online]. Chicago: Pulmonary Fibrosis Foundation, 2019 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.pulmonaryfibrosis.org/life-with-pf/about-pf>
- [57] CULLINAN, Paul, Xavier MUNOZ, Hille SUOJALEHTO et al. Occupational lung diseases: from old and novel exposures to effective preventive strategies. *The Lancet Respiratory Medicine*. 2017, **5**(5), 445-455. DOI: 10.1016/S2213-2600(16)30424-6. ISSN 2213-2600.
- [58] *Occupational Lung Diseases* [online]. The Johns Hopkins University, The Johns Hopkins Hospital, and Johns Hopkins Health System, 2020 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/occupational-lung-diseases>

- [59] About Malignant Mesothelioma [online]. The American Cancer Society, 2018 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://www.cancer.org/cancer/malignant-mesothelioma/about/malignant-mesothelioma.html>
- [60] BĚLKA, Miloslav. *In vitro* výzkum vlivu vlastností částic a průtoku vzduchu na regionální depozici v dýchacích cestách člověka. Brno, 2018.. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jan Jedelský.
- [61] HANTON, D., H. FURTAK a H. GRIMM. Preparation and Handling Conditions of MMVF for In-Vivo Experiments. *Aerosol Science and Technology*. 1998, **29**(5), 449-456. DOI: 10.1080/02786829808965583. ISSN 0278-6826.
- [62] BARON, Paul. Measurement of airborne fibers: a review. *Industrial Health*. 2001, **39**(2), 39-50. DOI: 10.2486/indhealth.39.39. ISSN 0019-8366.
- [63] WANG, Zuocheng, Philip HOPKE, Paul BARON, Goodarz AHMADI, Yung-Sung CHENG, Gregory DEYE a Wei-Chung SU. Fiber Classification and the Influence of Average Air Humidity. *Aerosol Science and Technology*. 2005, **39**(11), 1056-1063. DOI: 10.1080/02786820500380198. ISSN 0278-6826.
- [64] BARON, Paul, Gregory DEYE, Vitaly AIZENBERG a Vincent CASTRANOVA. Generation of Size-selected Fibers for a Nose-Only Inhalation Toxicity Study. *Annals of Occupational Hygiene*. 2002, **46**(1), 186-190. DOI: 10.1093/annhyg/46.suppl\_1.186.
- [65] HAN, R., O. MOSS a B. WONG. Airborne Fiber Separation by Electrophoresis and Dielectrophoresis: Theory and Design Considerations. *Aerosol Science and Technology*. 1994, **21**(3), 241-258. DOI: 10.1080/02786829408959713. ISSN 0278-6826.
- [66] LIPOWICZ, Peter a Hsu YEN. Fiber Dielectrophoresis. *Aerosol Science and Technology*. 1989, **11**(3), 206-212. DOI: 10.1080/02786828908959313. ISSN 0278-6826.
- [67] DRS, Jakub. *Čtyřsektorové elektrodové pole pro dielektroforézu*. Praha, 2012.. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Jiří Zemánek.
- [68] WANG, Zuocheng, Philip HOPKE, Goodarz AHMADI, Yung-Sung CHENG a Paul BARON. Fibrous particle deposition in human nasal passage: The influence of particle length, flow rate, and geometry of nasal airway. *Journal of Aerosol Science*. 2008, **39**(12), 1040-1054. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2008.07.008. ISSN 0021-8502.
- [69] SCHMIDT, Andreas, Stephan ZIDOWITZ, Andres KRIETE, Thorsten DENHARD, Stefan KRASS a Heinz-Otto PEITGEN. A digital reference model of the human bronchial tree. *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2004, **28**(4), 203-211. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2004.01.001. ISSN 0895-6111.
- [70] LÍZAL, František, Jakub ELCNER, Philip HOPKE, Jan JEDELSKÝ a Miroslav JÍCHA. Development of a realistic human airway model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in*

- Medicine*. 2012, **226**(3), 197-207. DOI: 10.1177/0954411911430188. ISSN 2041-3033.
- [71] LIN, Ching-Long, Merryn TAWHAI, Geoffrey MCLENNAN a Eric HOFFMAN. Characteristics of the turbulent laryngeal jet and its effect on airflow in the human intra-thoracic airways. *Respiratory Physiology & Neurobiology*. 2007, **157**(2-3), 295-309. DOI: 10.1016/j.resp.2007.02.006. ISSN 1569-9048.
- [72] ZHOU, Yue a Yung-Sung CHENG. Particle Deposition in a Cast of Human Tracheobronchial Airways. *Aerosol Science and Technology*. 2005, **39**(6), 492-500. DOI: 10.1080/027868291001385. ISSN 0278-6826.
- [73] ZHOU, Yue, Jinxiang XI, Justin SIMPSON, Hammad IRSHAD a Yung-Sung CHENG. Aerosol Deposition in a Nasopharyngolaryngeal Replica of a 5-Year-Old Child. *Aerosol Science and Technology*. 2013, **47**(3), 275-282. DOI: 10.1080/02786826.2012.749341. ISSN 0278-6826.
- [74] SU, Wei-Chung a Yung-Sung CHENG. Estimation of carbon Nanotubes deposition in a Human respiratory tract replica. *Journal of Aerosol Science*. 2015, **26**(2), 72-85. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2014.09.005. ISSN 0021-8502.
- [75] *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Fifth Edition: ASBESTOS and OTHER FIBERS by PCM*. 3. National Institute for Occupational Safety and Health, 2019.
- [76] *An Inter-Laboratory Study to Determine the Effectiveness of Procedures for Discriminating Amphibole Asbestos Fibers from Amphibole Cleavage Fragments in Fiber Counting by Phase-Contrast Microscopy - Scientific Figure on ResearchGate* [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Walton-Beckett-graticule\\_fig4\\_223135909](https://www.researchgate.net/figure/Walton-Beckett-graticule_fig4_223135909)
- [77] BĚLKA, Miloslav. *Depozice prachových částic z ovzduší*. Brno, 2012.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jan Jedelský.
- [78] SU, Wei-Chung a Yung CHENG. Deposition of man-made fibers in human respiratory airway casts. *Journal of Aerosol Science*. 2009, **40**(3), 270-284. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2008.11.003. ISSN 0021-8502.
- [79] FARKAS, Árpád, František LÍZAL, Jakub ELCNER, Jan JEDELSKÝ a Miroslav JÍCHA. Numerical simulation of fibre deposition in oral and large bronchial airways in comparison with experiments. *Journal of Aerosol Science*. 2019, **2019**(136), 1-14. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2019.06.003. ISSN 0021-8502.
- [80] LÍZAL, František, Jakub ELCNER, Jan JEDELSKÝ et al. The effect of oral and nasal breathing on the deposition of inhaled particles in upper and tracheobronchial airways. *Journal of Aerosol Science*. b.r. ISSN 0021-8502 (In Review).
- [81] MYOJO, Toshihiko a Mitsutoshi TAKAYA. Estimation of Fibrous Aerosol Deposition in Upper Bronchi Based on Experimental Data with Model Bifurcation. *Industrial Health*. 2001, **39**(2), 141-149. DOI: <https://doi.org/10.2486/indhealth.39.141>. ISSN 0019-8366.

- [82] ZHOU, Yue, Wei-Chung SU a Yung-Sung CHENG. Fiber deposition in the tracheobronchial region: experimental measurements. *Inhalation Toxicology*. 2007, **19**(13), 1071-1078. DOI: 10.1080/08958370701626634. ISSN 0895-8378.
- [83] DRISCOLL, Kevin, Daniel COSTA, Gary HATCH, Rogene HENDERSON, Gunter OBERDORSTER, Harry SALEM a Richard SCHLESINGER. Intratracheal Instillation as an Exposure Technique for the Evaluation of Respiratory Tract Toxicity: Uses and Limitations. *Toxicological Sciences*. 2000, **55**(1), 24-35. ISSN 1096-6080.
- [84] *Intraperitoneal* [online]. USA: ILPI, 2020 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <http://www.ilpi.com/msds/ref/intraperitoneal.html>
- [85] *Velký lékařský slovník: neoplastický* [online]. Česká republika: Maxdorf, 2020 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <http://lekarske.slovniky.cz/pojem/neoplasticky>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$d_{ae}$	Aerodynamický ekvivalentní průměr	m
$d_{ve}$	Ekvivalentní objemový průměr	m
$\rho_0$	Hustota vody	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_p$	Hustota nepravidelné částice	kg/m <sup>3</sup>
$\chi$	Dynamický součinitel tvaru	-
$l_v$	Délka vlákna	m
$d_v$	Průměr vlákna	m
$m_p$	Hmotnost částice	kg
$\vec{v}_p$	Rychlost částice	m/s
$t$	Čas, za který částice urazí určitou vzdálenost	s
$f_{ric}$	Odporový součinitel	-
$\vec{v}_f$	Rychlost nosného média	m/s
$\vec{g}$	Gravitační zrychlení	m/s <sup>2</sup>
$\vec{F}(t)$	Síla popisující Brownův pohyb částice	N
$Kn$	Knudsenovo číslo	-
$l_m$	Střední dráha molekul	m
$d_e$	Průměr kulovité částice	m
$Stk$	Stokesovo číslo	
$d_p$	Charakteristický průměr částice	m
$\bar{V}$	Charakteristická rychlost	m/s
$\mu$	Dynamická viskozita	kg/m·s
$L$	Charakteristický rozměr	m
$V_g$	Usazovací rychlost	m/s
$F$	Síla	N
$F$	Síla (kilopond)	kp
$DE_i$	Depoziční účinnost <i>i</i> -tého segmentu	-
$Q_{AER}$	Průtok s částicemi	l/min
$Q_{S1}$	I-tý krycí proud	l/min
$Q_D$	Odpadní vzduch	l/min
$Q_{CELK}$	Celkový průtok vzduchu přes model	l/min
$Q_E$	Vyrovnávací průtok	l/min
$U_n$	Napětí	V
$f$	Frekvence	Hz
$Q_{CLASS}$	Proud vzduchu s vyklasifikovanými vlákny	l/min
$F_i, N_i$	Počet vláken na filtru	-
$A_i$	Celková využitelná plocha <i>i</i> -tého filtru	m <sup>2</sup>
$C_i$	Monžství všech vláken na <i>i</i> -tém filtru	-

$a_i$	Plocha oblasti ohraničené W-B měřítkem	$m^2$
$r_i$	Průměr oblasti ohraničené W-B měřítkem	m
$n_i$	Počet vláken na ploše $a$	-
$\beta$	Poměr délky vlákna k jeho průměru	-
$\chi_{\parallel}$	$\chi$ při orientaci vlákna paralelně s proudnicemi	-
$\chi_{\perp}$	$\chi$ při orientaci vlákna kolmo na proudnice	-
$\nu$	Kinematická viskozita	$m^2/s$
$\rho_V$	Hustota vzduchu	$kg/m^3$
$D_i$	Průměr $i$ -té trubice	m
$U_i$	Rychlost proudění v $i$ -té trubici	m/s
$Q_i$	Průtok $i$ -tou trubicí	l/min
$A_{ent}$	Vstupní průřez nozdry	$m^2$
$\bar{d}$	Průměr počtu vláken	-
$d_i$	Počet vláken na filtru pro měření Bělky	-
$n$	Počet opakování	-
$u_A(d)$	Nejistota typu A	-
$DF_i$	Depoziční frakce $i$ -tého segmentu	-
$s_{\bar{d}}$	Směrodatná odchylka	-
$DH_i$	Depoziční hustota $i$ -tého segment	$cm^{-2}$
$S_i$	Plocha $i$ -tého segmentu	$m^2$
$IP$	Impaktní parametr	$\mu m^2/cm^3 \cdot s$

### Zkratka

### Význam

$PM$	<i>Particulate matter</i> – Tuhé znečišťující látky
$MMVFs$	<i>Man-made vitreous fibres</i> – Skelná vlákna
$MMMFs$	<i>Man-made mineral fibres</i> – Minerální vlákna
$SiO_2$	Oxid křemičitý
$Al_2O_3$	Oxid hlinitý
$MgO$	Oxid hořečnatý
$CaO$	Oxid vápenatý
$EEC$	<i>European Economic Community</i> – Evropské hospodářské společenství
$ES$	Evropské společenství
$Na_2O$	Oxid sodný
$K_2O$	Oxid draselný
$BaO$	Oxid barný
$IARC$	<i>International Agency for Research on Cancer</i> – Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny
$WHO$	<i>World Health Organization</i> – Světová zdravotnická organizace
$NTP$	<i>National Toxicology Program</i> – Národní toxikologický program

---

<i>NIOSH</i>	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> – Národní instituce pro bezpečnost a ochranu zdraví na pracovišti
<i>OSHA</i>	<i>Occupational Safety and Health Administration</i> – Správa bezpečnosti a ochrany zdraví při práci
<i>ACGIH</i>	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i> – Americká konference vládních průmyslových hygieniků
<i>REL</i>	<i>Recommended exposition limits</i> – Doporučené expoziční limity
<i>PEL</i>	<i>Permissible exposition limits</i> – Přípustné expoziční limity
<i>TWA</i>	<i>Time weighted average</i> – Časově vážený průměr
<i>NOAEL</i>	<i>No-observed-adverse-effect level</i> – Taková koncentrace, při které nejsou pozorovány nežádoucí účinky
<i>OEL</i>	<i>Occupational exposure limits</i> – Limit pro pracovní prostředí
<i>OOP</i>	Ochranné osobní pomůcky
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
<i>CE</i>	<i>Conformité Européen</i> – Evropská shoda
<i>FFP</i>	<i>Filtering face piece</i> – Filtrační maska na obličej
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid železitý
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid boritý
pH	<i>Potential of hydrogen</i> – Vodíkový exponent
USA	<i>United States of America</i> – Spojené státy americké
EU	Evropská unie
CHOPN	Chronická obstrukční plicní nemoc
<i>WRA</i>	<i>Work-related asthma</i> – Astma spojené s pracovním prostředím
<i>OA</i>	<i>Occupational asthma</i> – „Astma z povolání“
<i>WEA</i>	<i>Work-exacerbated asthma</i> – Práci zhoršené astma
OTTP	Odbor termomechaniky a techniky prostředí
FSI	Fakulta strojního inženýrství
<i>SI</i>	<i>Le Système International d'Unités</i> – Mezinárodní soustava jednotek
<i>CT</i>	<i>Computed tomography</i> – Počítačová tomografie
3D	Trojdimenzionální
<i>PCM</i>	<i>Phase contrast microscopy</i> – Fázová kontrastní mikroskopie
W-B	Walton-Beckett

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Srovnání depozice vláken a kulových částic [6] .....	22
Obrázek 2.2 Skelná vata [15] .....	24
Obrázek 2.3 Tremolít, druh azbestu [16].....	24
Obrázek 2.4 Princip výroby výplňových skelných vláken [18] .....	25
Obrázek 2.5 Princip výroby skelných vláken [18] .....	25
Obrázek 2.6 Vážený poločas rozpadu různých vláken [19] .....	26
Obrázek 3.1 Nosní dutina, převzato a upraveno z [36] .....	33
Obrázek 3.2 Hrtan, průdušnice a další dělení, převzato a upraveno z [36] .....	35
Obrázek 3.3 Detail na plicní vāčky, převzato a upraveno z [36].....	36
Obrázek 3.4 Znázornění obranného mechanismu plic, převzato a upraveno z [40] .....	37
Obrázek 3.5 Zobrazení úspěšné (A) a frustrované (B) fagocytózy během 3 hodin, měřítko 20 $\mu\text{m}$ [44].....	38
Obrázek 3.6 Rozpad vláken ve fyziologickém pH [48] .....	38
Obrázek 3.7 Shrnutí působení vláken, upraveno z [13] .....	39
Obrázek 4.1 Ukázka nadrcené směsi 1, $\times 200$ , rozměr plochy obrázku $680 \times 520 \mu\text{m}$ ....	41
Obrázek 4.2 Ukázka nadrcené směsi 2, $\times 200$ , rozměr plochy obrázku $680 \times 520 \mu\text{m}$ ....	41
Obrázek 4.3 Nenadrcená směs.....	42
Obrázek 4.4 Uzavřená nádobka.....	42
Obrázek 4.5 Nádobka v lisu .....	42
Obrázek 4.6 Směs po prvním stlačení .....	42
Obrázek 4.7 Výsledná směs.....	42
Obrázek 4.8 Znázornění měřicí aparatury, obrázek převzat a upraven z [6] a [62] .....	43
Obrázek 4.9 Násypka a podavač z čelní strany .....	45
Obrázek 4.10 Podavač i s řízením z boční strany .....	45
Obrázek 4.11 Princip klasifikátoru, obrázek převzat a upraven z [62] .....	46
Obrázek 4.12 Počítačový model od části průdušnice po 17. generaci větvení [69] .....	47
Obrázek 4.13 Počítačový model od části hltanu po 7. generaci větvení [70].....	47
Obrázek 4.14 Reálný model s ústní dutinou [6] .....	48
Obrázek 4.15 Napojení nosní dutiny .....	48
Obrázek 4.16 Spojení průdušnice se segmenty po 3. generaci větvení .....	49
Obrázek 4.17 Spojení průdušek 4. až 7. generace větvení se sběrnými komorami, segmenty 13-32 .....	49
Obrázek 4.18 Výstupní filtr 15 vyměněný po 50minutové expozici, $\times 200$ , rozměr $680 \times 520 \mu\text{m}$ .....	51
Obrázek 4.19 Výplachový filtr 11, $\times 200$ , rozměr $680 \times 520 \mu\text{m}$ .....	51
Obrázek 4.20 Výplachový filtr 17, $\times 200$ , rozměr $680 \times 520 \mu\text{m}$ .....	52
Obrázek 4.21 Walton-Beckettovo měřítko [76] .....	53
Obrázek 4.22 Příklady hodnocení filtrů [75].....	54
Obrázek 4.23 Znázornění dopočtu depoziční účinnosti, převzato a upraveno z [6] .....	59
Obrázek 4.24 Srovnání depoziční účinnosti měření Bělky a kol. [6] a Hájka .....	59
Obrázek 4.25 Celkový počet vláken v jednotlivých segmentech.....	61
Obrázek 4.26 Depoziční frakce pro segmenty 0–32.....	64
Obrázek 4.27 Depoziční účinnost a hustota pro segmenty 0–22.....	64
Obrázek 4.28 Závislost depoziční frakce na Stokesově čísle.....	65

Obrázek 4.29 Závislost depoziční účinnosti na Stokesově čísle.....	65
Obrázek 4.30 Výsledky experimentů Lízala a kol. [80] .....	66
Obrázek 4.31 Generace větvení [6].....	66
Obrázek 4.32 Srovnání závislosti depoziční účinnosti na Stokesově čísle pro první generaci větvení od různých autorů.....	67
Obrázek 4.33 Srovnání závislosti depoziční účinnosti na Stokesově čísle pro druhou generaci větvení od různých autorů.....	67
Obrázek 4.34 Srovnání závislosti depoziční účinnosti na Stokesově čísle pro třetí generaci větvení od různých autorů .....	68
Obrázek 4.35 Srovnání závislosti depoziční účinnosti na Stokesově čísle pro segmenty od čtvrté po sedmou generaci od různých autorů .....	69
Obrázek 4.36 Depoziční frakce od 3. do 22. segmentu .....	70

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Dělení aerosolů [1] .....	18
Tabulka 2.2 Vybrané hodnoty faktoru $\chi$ , kde $lv$ je délka vlákna a $dv$ jeho průměr [3] 19	
Tabulka 2.3 Řazení dle IARC [13] .....	28
Tabulka 2.4 Limity v USA [24] [25] [26] .....	29
Tabulka 2.5 Vybrané limity v Evropě [29] .....	30
Tabulka 2.6 Limity v České republice [30] .....	31
Tabulka 4.1 Vstupní průtoky .....	44
Tabulka 4.2 Výstupní průtoky .....	44
Tabulka 4.3 Nastavení klasifikátoru .....	47
Tabulka 4.4 Průtoky větvemi modelu .....	49
Tabulka 4.5 Časové kroky expozice .....	50
Tabulka 4.6 Vyhodnocení oblasti na obr. 4.22 [75] .....	54
Tabulka 4.7 Rozměry ploch ohraničených Walton-Beckettovým měřítkem .....	55
Tabulka 4.8 Účinná plocha filtrů .....	56
Tabulka 4.9 Výsledná Stokesova čísla a rychlosti, použité ekvivalentní průměry a průtoky .....	58
Tabulka 4.10 Výsledná depoziční účinnost segmentů 0–22 .....	60
Tabulka 4.11 Počet vláken na výplachových filtrech ze segmentů 0–22 .....	60
Tabulka 4.12 Počet vláken na výplachových a výstupních filtrech ze segmentů 23–32 61	
Tabulka 4.13 Výsledná depoziční frakce segmentů 0–32 .....	62
Tabulka 4.14 Výsledná depoziční hustota segmentů 0–22 .....	63
Tabulka 4.15 Impaktní parametr pro segmenty 0–22 .....	63