

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

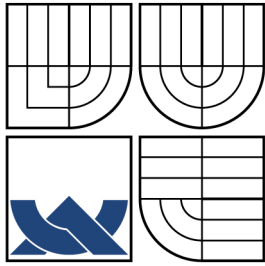
VYHODNOCENÍ VLIVU TLAKU V KOMOŘE VZORKU A VELIKOSTI  
CLONEK NA VÝSLEDNÝ TLAK U SCINTILÁTORU DETEKTORU  
POMOCÍ SYSTÉMU COSMOS FLOWWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

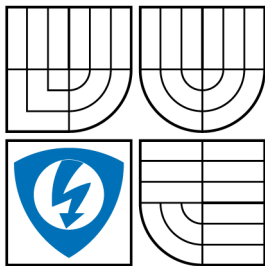
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETR BORDOVSKÝ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

# VYHODNOCENÍ VLIVU TLAKU V KOMOŘE VZORKU A VELIKOSTI CLONEK NA VÝSLEDNÝ TLAK U SCINTILÁTORU DETEKTORU POMOCÍ SYSTÉMU COSMOS FLOWWORKS

USING COSMOS FLOWWORKS FOR ANALYSE THE DETECTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

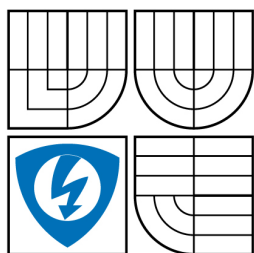
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETR BORDOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektrotechnická výroba a management

**Student:** Bc. Petr Bordovský

**ID:** 89677

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Vyhodnocení vlivu tlaku v komoře vzorku a velikosti clonek na  
výsledný tlak u scintilátoru detektoru pomocí systému Cosmos FloWorks**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Pomocí systému Cosmos FloWorks vyhodnoťte vliv velikosti tlaku v komoře vzorku enviromentálního rastrovacího elektronového mikroskopu a vliv velikosti otvorů ve clonkách u detektoru sekundárních elektronů pro EREM na velikost tlaku v komoře scintilátoru.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 27.5.2010

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt:**

Předkládaná práce se zabývá analýzou vlivu velikosti tlaku v komoře vzorku Enviromentálního rastrovacího elektronového mikroskopu a vlivu velikosti otvorů ve clonkách u scintilačního detektoru sekundárních elektronů pro EREM na výslednou velikost tlaku v komoře scintilátoru. Analýza probíhá na detektoru sekundárních elektronů vymodelovaném ve 3D CAD systému SolidWorks pomocí systému CAE Cosmos FloWorks.

## **Abstract:**

This work deal with the analysis of influence of pressure's sizes in vacuum chamber of specimen Environmental Scanning Electron Microscope and the influence of sizes of aperture diaphragm by scintillation detector. The analysis proceeds in detector of secondary electrons. The detector is modelled by system 3D CAD SolidWorks with the help of system CAE Cosmos FloWorks.

## **Klíčová slova:**

Detektor, clonky, nadzvukové proudění, sekundární elektrony, vakuum, vývěva, environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM), počítačová podpora návrhu (CAD), počítačová podpora inženýrských prací (CAE).

## **Keywords:**

Detector, aperture diaphragm, supersonic outflow, secondary electron, vacuum, vacuum pump, Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM), Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Engineering (CAE).

## Bibliografická citace díla:

BORDOVSKÝ, P. *Vyhodnocení vlivu tlaku v komoře vzorku a velikosti clonek na výsledný tlak u scintilátoru detektoru pomocí systému Cosmos FloWorks*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 100 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce a čas strávený při konzultacích.

Rovněž patří můj dík rodině za podporu při studiu a tvorbu potřebného zázemí. Děkuji také své přítelkyni za její trpělivost a podporu.

## Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>5</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Elektronové mikroskopy</b> .....	<b>7</b>
1.1. REM (SEM) .....	7
1.1.1. Princip REM.....	7
1.2. EREM.....	9
<b>2. Cosmos FloWorks</b> .....	<b>9</b>
<b>3. Proudění</b> .....	<b>10</b>
3.1. Druhy proudění .....	10
3.2. Viskozní turbulentní proudění.....	11
3.3. Skutečné kapaliny .....	11
3.4. Lavalova dýza .....	13
3.5. Vakuum.....	14
3.6. Systém rovnic pro proudění v komoře .....	15
3.7. Okrajové a počáteční podmínky.....	18
3.8. Srážky molekul.....	20
3.9. Střední volná dráha molekul .....	22
<b>4. Analýza detektoru</b> .....	<b>26</b>
4.1. Nastavení sítě v Cosmos FloWorks .....	26
4.2. Nastavení okrajových podmínek v Cosmos FloWorks.....	30
4.3. Nastavení cílů výpočtů v Cosmos FloWorks .....	30
<b>5. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 400 Pa ..</b> .....	<b>31</b>
5.1. Varianta: 400 6 – 6.....	31
5.2. Varianta: 400 8 – 6.....	34
5.3. Varianta: 400 6 – 8.....	37
5.4. Varianta: 400 8 – 8.....	40
5.5. Srovnání s experiment. měřením - varianta 6 – 6 .....	43
5.6. Shrnutí .....	45
<b>6. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 200 Pa ..</b> .....	<b>47</b>
6.1. Varianta: 200 6 – 6.....	47
6.2. Varianta: 200 8 – 6.....	50
6.3. Varianta: 200 6 – 8.....	52
6.4. Varianta: 200 8 – 8.....	54
6.5. Shrnutí .....	56
<b>7. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 600 Pa ..</b> .....	<b>57</b>
7.1. Varianta: 600 6 – 6.....	57
7.2. Varianta: 600 8 – 6.....	60

---

7.3. Varianta: 600 6 – 8 .....	62
7.4. Varianta: 600 8 – 8 .....	64
7.5. Shrnutí .....	66
<b>8. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 800 Pa ..</b>	<b>66</b>
8.1. Varianta: 800 6 – 6 .....	67
8.2. Varianta: 800 8 – 6 .....	69
8.3. Varianta: 800 6 – 8 .....	71
8.4. Varianta: 800 8 – 8 .....	73
8.5. Shrnutí .....	75
<b>9. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 1000 Pa</b>	<b>75</b>
9.1. Varianta: 1000 6 – 6 .....	76
9.2. Varianta: 1000 8 – 6 .....	78
9.3. Varianta: 1000 6 – 8 .....	80
9.4. Varianta: 1000 8 – 8 .....	82
9.5. Shrnutí .....	84
<b>10. Srovnání všech dosažených výsledků .....</b>	<b>84</b>
10.1. Fyzikální zdůvodnění nelinearity výsledků .....	85
10.2. Celkové shrnutí dosažených výsledků .....	87
<b>Závěr .....</b>	<b>90</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>91</b>
<b>Příloha A .....</b>	<b>92</b>

## Úvod

Jak a proč vlastně vznikl mikroskop? Lidské oko dokáže rozlišit dvě části vzdáleny od sebe 0,2 mm. Při větších vzdálenostech dochází ke zkreslení, ke splnutí částí. To vedlo ke vzniku mikroskopu. Na prvopočátku byla základem čočka, kterou sestrojili otec a syn Jensenovi, zabývající se broušením diamantů a skel. Tento vynález byl spíše jako lupa. Postupem času se stával mikroskop důmyslnějším, o to se postaral v 17.století Antonio van Leeuwenhoek. V dalším století se stal mikroskop nepostradatelným přístrojem v mnoha odvětvích (biologie, technika a podobně). Pro všechny měl vývoj mikroskopu za cíl jediný, a to několikanásobné zvětšení malých částí. Několikanásobné znamená až na několik řádů tisíců.

Od počátku uplynulo již mnoho let a v dnešní době je mnoho druhů mikroskopů pracujících na odlišných principech. Jedná se například o optický mikroskop, fluorescenční mikroskop, ultramikroskop, elektronový mikroskop, polarizační mikroskop, mikromanipulátor a další.

V této práci se dále budeme zabývat jen mikroskopy, které používají zdroj elektronů místo světla.

Cílem diplomové práce je analyzovat detektor sekundárních elektronů v oblasti proudění plynů, konkrétně systémem clonek s různými velikostmi otvorů, které hrají důležitou roli ve finální ostrosti obrazu. Práce se zabývá výpočtem optimální varianty velikosti otvorů v clonkách s ohledem na ztráty svazku sekundárních elektronů.

Konkrétní pojednání o tom, co detektor je a kde se v celku mikroskopu nachází a jak plní svoji funkci především s důrazem týkající se této práce, je uvedeno na následujících stranách diplomové práce.

## 1. Elektronové mikroskopy

### 1.1. *REM (SEM)*

REM znamená rastrovací elektronový mikroskop, což je česky řečeno, v literaturách se nachází i anglický název SEM (scanning). Kdo přišel na tento princip není přesně známo, ale našli se pánové, kteří princip upřesnili. Jednalo se o Američany Zworkin, Hiilier a Snijder. Jejich rastrovací mikroskop rozlišoval 50 nm při zvětšení až 8 000 krát. Pro srovnání, dnešní přístroje umí rozlišit 1 nm při zvětšení až 400 000 krát.

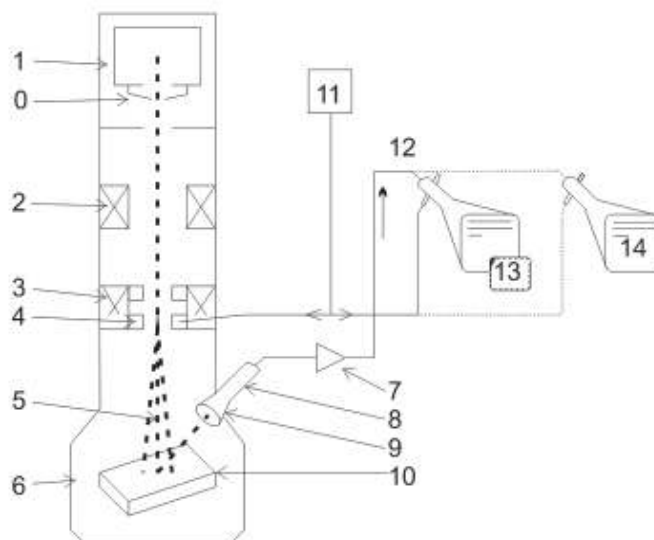
Kombinací systému TEM a REM vznikl rastrovací prozařovací elektronový mikroskop - STEM. Tento dnes dokáže rozlišit 1 nm při zvětšení až 1 milion krát.

#### 1.1.1. Princip REM

U tohoto modelu se obraz vytváří ostře fokusovaným svazkem elektronů, který dopadem na vzorek vytvoří fyzikální signál. Svazek se po vzorku pohybuje, tzv.rastruje,



tímto vytváří informaci o místě dopadu primárního elektronového vzorku. Blokově je tento princip zobrazen na obrázku 1.1.

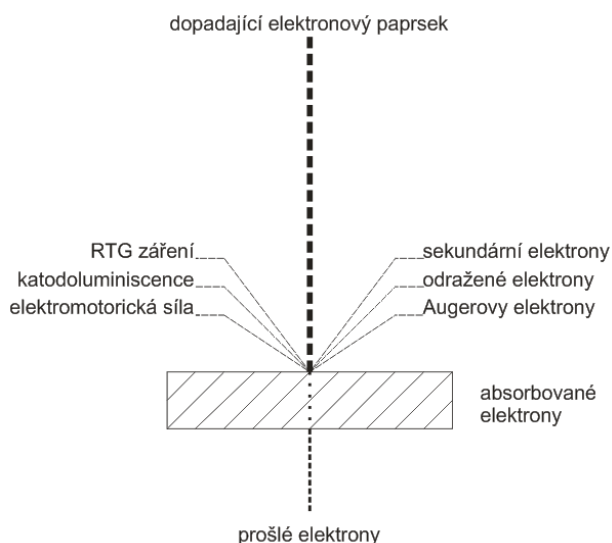


**Obrázek 1.1** Blokové schéma REM [15]

Na obrázku 3.1 najdeme tyto části: 0- elektronová tryska ; 1- Zdroj primárních elektronů; 2- kondenzorová čočka; 3- objektivová čočka; 4- vychylovací cívky řádkovacího systému; 5- primární svazek elektronů; 6- vakuový systém; 7- zesilovač; 8- detektor; 9- kolektor; 10- vzorek; 11- generátor řádkovacího systému; 12- obrazový signál; 13- obrazovka; 14- kamera.

Primární svazek elektronů dopadá na povrch vzorku, část elektronů se odrazí a část dále proniká do struktury vzorku, kde se elektrony rozptýlí, nebo jsou absorbovány. Některé elektrony vzorkem projdou skrz. Energie takového svazku primárních elektronů jsou tisíce elektronVoltů.

Při nárazu elektronů do vzorku nastávají následující jevy (viz.obrázek 1.2):



**Obrázek 1.2** Fyzikální signály vyvolané dopadem primárních elektronů [15]

---

Pro určitý případ zobrazení vzorku (chemické složení, fyzikální vlastnosti, topografie, atd.) je potřeba vybrat jeden nejvhodnější z fyzikálních signálů. To nám zajistí vhodný detekční systém.

## 3. Proudění

Nejprve je potřeba si ujasnit, co to vlastně proudění je. Jedná se o pohyb tekutiny, přesněji řečeno, pohyb částic v tekutině, které se pohybují chaotickým způsobem a posouvají se při tom ve směru proudění. Důležitá věc je, že proudění probíhá z míst s vyšším tlakem do míst s nižším tlakem a tím také dochází k jeho expanzi a změně teploty.

V případě zařízení elektronové mikroskopie jde velmi často o konstrukce s malými otvory a velkými tlakovými spády, kde vzniká tzv. kritické proudění.

Pojďme si tedy o proudění říci něco blíže, nejprve tedy o rozdělení proudění.

### 3.1. *Druhy proudění*

Dle fyzikálních vlastností je proudění:

- ideální kapaliny (dokonale nestlačitelná, nemá vnitřní tření),
- viskózní kapaliny (má vnitřní tření):
  - o laminární (jednotlivé dráhy částic jsou si navzájem rovnoběžné v obou osách),
  - o turbulentní (jedná se o přechody mezi jednotlivými vrstvami, tj. chaotické proudění),
- nestlačitelné kapaliny (nestlačitelná, tj. s konstantní hustotou),
- stlačitelné kapaliny (hustota se mění v závislosti na tlaku):
  - o podzvukové proudění,
  - o nadzvukové proudění.

Dle časových závislostí:

- ustálené proudění (na čase nezávislé),
- neustálené proudění (na čase závislé).

Dle způsobu pohybu:

- potencionálové proudění (jednotlivé části kapaliny se pouze posouvají, tj. nerotují kolem své osy),
- vířivé proudění (částice se jednak posouvají a zároveň rotují).

### 3.2. Viskózní turbulentní proudění

Představme si proudění jako plochy. Na ploše se jednotlivé částice pohybují mezi sebou a některé také mezi jednotlivými plochami. Turbulentní proudění je tedy chaotický pohyb částic. Turbulentní proudění popisují jisté rovnice a jde o prostorové struktury turbulentních vírů. Pro vysvětlení dynamiky turbulence jak při vzniku, průběhu, tak i při zániku vírů, používáme charaktery turbulencí jednotlivých struktur. Získání takových informací je velmi obtížné, výpočty provádí počítač pomocí numerické simulace.

Tedy, proudění obsahuje víry, nebo-li prostorové struktury. Velké víry se rozdělují na malé a jejich energie se rozptyluje na teplo.

### 3.3. Skutečné kapaliny

Tyto jsou považovány za viskózní kapaliny. Uvažujeme-li laminární proudění, hranici tvoří kritické Reynoldsovo číslo  $Re$ , které má následující vztah:

$$Re = \frac{v_s d}{\nu},$$

kde:  $v_s$  ... střední rychlost v potrubí,  $d$  ... průměr potrubí,  $\nu$  ... kinematická viskozita.

Kritická hodnota proudění v potrubí kruhového průřezu je  $Re_{krit}=2320$ . Tato hodnota rozděluje viskózní proudění, při menších hodnotách než kritických se jedná o laminární proudění, naopak při větších hodnotách pak o turbulentní. U laminárního proudění se částice pohybují po vrstvách a nepohybují se napříč průřezem, u turbulentního proudění je pohyb nahodilý. Vzniká pohyb kolmo ke stěně, který zvyšuje tok hybnosti a způsobuje pokles tlaku ve směru proudění. Dále bylo měřením zjištěno, že turbulentní proudění způsobuje na stěnách vrstva kapaliny, kde je pohyb laminární (laminární podvrstva), která je tlustá pár desetin milimetrů. Dále následuje přechodová vrstva a spolu s laminární podvrstvou tvoří vrstvu mezní. U povrchu desky se vlivem viskozity tekutina zabrzdí, tzn. rychlost od stěny narůstá až na hodnotu  $v_\infty$ . Přechod mezi laminární mezní vrstvou na turbulentní se udává jako Reynoldsovo číslo rovno hodnotě  $5 \cdot 10^5$ . Jeho hodnota je závislá na stupni turbulence proudu kapaliny.

Jinak řečeno, pohyb částic v turbulentním proudění je náhodný. Při pohybu z větších rychlostí do menší dochází při nárazu jedné částice do druhé ke zpomalení a odevzdání části hybnosti, tedy naražená částice zrychlí. Princip funguje i opačně. Z tohoto vyplývá, že hybnost je mezi oblastmi sdílená, toto se projeví rostoucím odporem proti proudění, tj. tření částic.

Turbulentní pohyb částic vyvolaný gradientem rychlosti (tj. změna připadající na jednotku délky) je zdrojem viskózních napětí a rozptýlených energií. Zvyšuje se vnitřní energie, ale s následkem menší kinetické energie turbulence. Z toho vyplývá, aby turbulence nezankla, je potřeba přísunu energie pro vykrytí těchto ztrát.

Skutečné proudění je klasifikováno dle fyzikálních vlastností na stlačitelné a nestlačitelné. Pro charakteristiku těchto druhů proudění kapalin používáme Machovo číslo  $M$ :

$$M = \frac{v}{c},$$

$$c = \sqrt{\kappa R T},$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v},$$

kde:  $v$  ... rychlost tekutiny,  $c$  ... rychlost zvuku,  $T$  ... teplota kapaliny nebo plynu,  $R$  ... všeobecná plynová konstanta,  $\kappa$  ... Poissonova konstanta (poměr měrných tepelných kapacit za stálého tlaku a stálého objemu).

Hodnota Poissonovy konstanty  $C$  je specifická pro každý plyn. V termodynamické rovnováze bývají odvozovány následující hodnoty: například pro plyny s molekulou jednoatomovou (He, Ar, ...) je  $\kappa = 1,67$ , u dvouatomových molekul ( $O_2$ ,  $N_2$ , ...) je  $\kappa = 1,40$ .

Za předpokladu Machova čísla  $M \leq (0,2 - 0,3)$  považujeme i proudění plynu za proudění nestlačitelné kapaliny. Hustota plynu  $\rho$  tak zůstává konstantní a její hodnotu určujeme z počátečních podmínek.

Naopak, neplatí-li předešlé rozmezí Machova čísla, proudění se pro nás stává stlačitelným. A hustota plynu není konstantní, což se projeví v rovnici pro stav ideálního plynu:

$$p = R \rho T.$$

Dle dělení podle fyzikálních vlastností je patrné, že stlačitelné proudění kapaliny dělíme dále na podzvukové a nadzvukové proudění. Opět se rozhoduje podle hodnoty Machova čísla, kde se kritická hodnota usadila na čísle  $M_{krit} = 1$ .

Uveďme si jednorozměrové spojitě proudění ideálního plynu v trubici průřezu  $S$ , tlaku  $p$ , hustoty  $\rho$ , rychlosti  $v$  a teploty  $T$ , při parametrické závislosti Poissonovy konstanty  $\kappa$  a Machova čísla  $M$ :

$$\frac{S}{S_{krit}} = \frac{1}{M} \left[ \frac{2}{\kappa + 1} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}},$$

$$\frac{p}{p_{krit}} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\kappa + 1} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}}},$$

$$\frac{\rho}{\rho_{krit}} = \frac{1}{\left[ \frac{2}{\kappa + 1} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}}},$$

$$\frac{v}{v_{krit}} = \frac{M}{\sqrt{\frac{2}{\kappa+1} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2\right)}},$$

$$\frac{T}{T_{krit}} = \frac{1}{\frac{2}{\kappa+1} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2\right)}.$$

Rozlišujeme tři stavy proudění jednorozměrného s proměnným průřezem: stav celkový (tzv. zbrzdění), kde  $M_0=0$  a  $v_0=0$ , stav kritický, kdy Machovo číslo je na kritické hodnotě ( $M_{krit}=1$ ) a stav mezní, při kterém je Machovo číslo rovno nekonečné hodnotě ( $M_m=\infty$ ) a tlak, hustota a teplota jsou nulové. Z těchto zákonitostí lze pak uvést další zjednodušené vztahy, týkající se zmíněných třech stavů (celkového, kritického a mezního):

$$\frac{p_0}{p_{krit}} = \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}},$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_{krit}} = \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}},$$

$$\frac{T_0}{T_{krit}} = \frac{\kappa+1}{2},$$

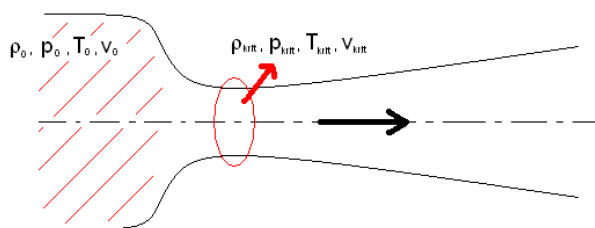
$$\frac{v_m}{v_{krit}} = \left(\frac{\kappa+1}{\kappa-1}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Tímto se dá dojít k závěru, že se při zmenšování průřezu  $S$ , který protéká kapalinou, či plynem, dochází ke kritickému stavu, naopak při zvětšování průřezu  $S$  se tento stav oddálí.

### 3.4. Lavalova dýza

Jedná se o rozšiřující se vyústění, kde rychlost pohybu stoupá od užší do širší části, tj. při zvětšování průřezu a snižování tlaku. V místě, kde je průřez nejmenší, je rychlost kapaliny rovna rychlosti zvuku, Machovo číslo je tedy rovno jedné. Při zvyšování průřezu dýzy toto číslo roste.

Konvergentní dýza je taková, kdy se trubice pouze zužuje, na výstupu dosahuje snížení tlaku na kritický stav. Je-li vyšší tlakový spád, za výstupem v nejužším místě dojde k expanzi z tlaku kritického na tlak, který má okolní prostředí.



Obrázek 3.1 Lavalova dýza [14]

### 3.5. Vakuum

Slovo pochází z latinského *vacuus*, což znamená prázdný. V praxi se to projevuje tím, že tlak v nějakém prostředí je o dost menší, než-li v normálním prostředí, na které působí tlak atmosférický.

Ve fyzice se používá pojem dokonalé vakuum. Jde o prostor, který nemá téměř žádnou energii, čili prostor opravdu prázdný. V takovém prostoru nenajdeme žádnou částici (elektrony...) a ani záření (fotony...).

V praxi ovšem dokonalé vakuum neexistuje. Dle kvantové teorie pole se ve vakuu objevují páry částic či antičástic, které různě zanikají a opět vznikají. Takový prostor vykazuje energii.

Jak vakuum vznikne? Tvoříme jej vývěvou, takový prostor má nějaký tlak, který se dá změřit vakuometrem. Pro zajímavost uvádím nejmenší laboratorně dosažený tlak  $1,33 \cdot 10^{-11}$  Pa.

Vakua se dělí na následující třídy:

- *Atmosférický tlak* – 1013,25 hPa
- *Hrubé vakuum* – 300 až 1 hPa – použití v elektrotechnice (výbojky, žárovky), jedná se o chemicky netečné prostředí, bránící oxidaci žhavých částí.
- *Jemné vakuum* – 1 až  $10^{-3}$  hPa – (vakuové a rentgenové výbojky), oproti předchozímu má delší střední volnou dráhu částic.
- *Vysoké vakuum* –  $10^{-3}$  až  $10^{-7}$  hPa – (elektronky a obrazovky), opět ještě větší střední volná dráha částic.
- *Ultravysoké vakuum* -  $10^{-7}$  až  $10^{-12}$  hPa – (urychlovač částic), výskyt ve vesmíru (průměrná hustota částic ve vesmírném prostoru je cca 1 atom na  $1 \text{ m}^3$ ).
- *Extrémně vysoké vakuum*.

### 3.6. Systém rovnic pro proudění v komoře

Pro usnadnění řešení této problematiky je vhodné použít software Cosmos FloWorks. Tento systém umožní řešení trojrozměrných rovnic proudění, která mají stlačitelnou, vazkou tekutinu a přívod tepla. To vše pomocí třech parciálních diferenciálních rovnic a jednou stavovou rovnicí.

Pro takový popis máme karteziánskou souřadnou soustavu, která se zabývá zákonem zachování hmotnosti, zákonem zachování pohybu a zákonem zachování energie doplněné čtvercovou rovnicí.

Následující rovnice spjitosti uvádím v pořadí vyjadřujících zákon zachování hmotnosti, Stokes - Navierovu rovnici (o změně hybnosti) a rovnici energie pro stlačitelnou tekutinu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \text{ kde složka } i=1,2,3,$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \text{ kde index } j=1,2,3,$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} (E + p) = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, E = e + \frac{v^2}{2}.$$

A v neposlední řadě jde o rovnici stavu, která váže určovací veličiny stavu tekutiny (ideální plyn):

$$\rho = \frac{p}{RT}.$$

Proměnné:  $i, j \dots$  indexy Einsteinovy sumace,  $\rho \dots$  hustota tekutiny,  $u \dots$  rychlost tekutiny,  $\tau_{i,j} \dots$  tensor vazkých napětí,  $p \dots$  tlak tekutiny,  $T \dots$  teplota tekutiny,  $e \dots$  vnitřní energie,  $S_i \dots$  vnější hmotnostní síly působící na jednotku hmotnosti,  $Q_H \dots$  přívod nebo odvod tepla vtažen na jednotku objemu,  $q_i \dots$  difusní tok tepla.

Základní rovnice, kde počítám i se třením, lze napsat obecnou konzervativní formou:

$$\frac{\partial (\rho \zeta)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \zeta) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \right) + S_\zeta,$$

kde:  $\zeta \dots$  proměnná,  
pravá strana rovnice  $\dots$  konvektivní, difúzní a zdrojový člen.



Věnujme se nyní jednotlivým částem. U zákona zachování hmotnosti, při  $\zeta=1$  a pravá strana má jen konvektivní člen, pak platí:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i), \text{ složka } i=1,2,3,$$

při  $\zeta=u_i$  a na pravé straně máme konvektivní, difúzní a zdrojový člen a tlak:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \text{ index } j=1,2,3,$$

U zákona zachování energie s proměnnou:

$$\zeta = E + p,$$

$$E = e + \frac{u^2}{2},$$

platí:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} = -\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}(E + p) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H,$$

*kde: e ... vnitřní energie pravá strana rovnice ... konvektivní, difúzní a zdrojový člen, turbulentní viskozita  $\mu_t$  a rychlost disipace  $\varepsilon$ .  $\zeta$  ... jako skalární veličina – lineární rovnice druhého řádu,  $\zeta$  ... jako složka rychlosti – nelineární rovnice druhého řádu, převaha difúzního členu ... eliptická rovnice, převaha vlivu konvektivního transportu ... parabolická rovnice, převaha vlivu významných tlakových změn ... hyperbolická rovnice.*

Vztah pro Newtonskou tekutinu tenzoru vazkových napětí:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right).$$

S řešením Reynoldsových vazkových napětí pomůže Boussinesquova hypotéza. Je zde zavedena turbulentní viskozita  $\mu_t$  a turbulentní kinetická energie  $k$ . Turbulentní viskozitu  $\mu_t$  určíme z modelu *k- $\varepsilon$  turbulence*, která má dvě základní vlastnosti, turbulentní kinetická energie  $k$  a turbulentní disipace  $\varepsilon$ . K výpočtu těchto dvou zmíněných vlastností použijeme dvě transportní rovnice, model, kdy se základní rovnice doplní o dvě parciální diferenciální rovnice.

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

kde:  $\delta_{ij}$  ... Kroneckerova delta funkce ( $i=j \Rightarrow 1$ ; ostatní případy  $\Rightarrow 0$ ),  
 $\mu$  ... dynamická viskozita (laminární proudění  $\Rightarrow \mu_t=k=0$ ).

Zmíněnou turbulentní viskozitu  $\mu_t$  vypočteme ze vztahu:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon},$$

$$\text{kde } f_\mu = [1 - \exp(-0.025 R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_T}\right), \text{ kde } R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}, R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu},$$

kde:  $f_\mu$  ... faktor turbulentní viskozity,  $y$  ... vzdálenost od stěny.

Dále vypočteme kinetickou energii  $k$  a rychlost disipace  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k,$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon,$$

$$\text{kde zdrojové členy jsou } S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon - \mu_t P_B$$

$$a \quad S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left( f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k},$$

$$\text{kde } P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i},$$

$$f_1 = 1 + \left( \frac{0,05}{f_\mu} \right)^3, \quad f_2 = 1 - \exp(-R_T^2),$$

kde:  $P_B$  ... generace turbulence způsobené vztakovými silami,  $g_i$  ... složka gravitačního zrychlení ve směru  $x_i$ ,  $\sigma_B$  ... konstanta (= 0,9),  $C_B$  ... konstanta ( $C_B=1$  pro  $P_B>0$  a  $C_B=0$  pro ostatní).

Dále jsou ve vztazích použity konstanty, které jsou dány tabulkou pro řešení se systémem COSMOS FloWorks:

$$C_\mu = 0,09, C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

Poslední veličina  $q_i$ , což je difúzní tok tepla, se vypočte následujícím vztahem (platí pro Lewisovo číslo  $L_e=1$ ):

$$q_i = \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i=1,2,3,$$

kde:  $\sigma_c$  ... konstanta (=0,09),  $P_r$  ... Prandtlovo číslo,  $h$  ... entalpie tekutiny.

Závěrem několik slov. Jak již bylo zmíněno v této práci, existuje laminární a turbulentní proudění. Výše popsané rovnice řeší tyto proudění, včetně jejich přechodu mezi sebou z jednoho stavu do druhého a naopak. Při čistě laminárním proudění jsou parametry turbulentní viskozita  $\mu_t$  a turbulentní kinetická energie  $k$  rovny nulové hodnotě.

### 3.7. Okrajové a počáteční podmínky

Okrajové a počáteční podmínky je potřeba znát, abychom mohli řešit parciální diferenciální rovnice s proměnnou  $\zeta$ . Dělení základních podmínek:

- 1) pro vstup a výstup proudu,
- 2) na stěně,
- 3) symetrie,
- 4) periodické (cyklické).

**Ad 1)** tuto podmínku definujeme pomocí tlaku nebo rychlosti. Nebo u speciálních druhů se definuje za pomoci podmínek prvního druhu (nulový normálový gradient).

**Ad 2)** odvíjí se od vlastností stěny (pohyblivá/nepohyblivá, rotující/klouzající, se třením/bez tření, hladká/drsná).

**Ad 3)** nulová normálová rychlost a nulové normálové gradienty všech hledaných veličin.

**Ad 4)** při opakujících se proudových útvarech a dělí se na rotační či translační typ.

Všechny podmínky můžou být závislé na čase.

Následující výčet podmínek se týká dalších veličin, se kterými přijdeme při výpočtu do styku (teplota, radiace, molové zlomky příměsí a další):

- a) podmínky vstupu a výstupu,
- b) tlak na vstupu,
- c) tlak na výstupu,
- d) odčerpávání (outflow),
- e) podmínky pro rovnici energie.

**Ad a)**

Můžou nastat následující situace. Na průtočných hranicích máme tři typy:

- vstup či výstup rychlosti,

- vstup či výstup tlaku,
- obecný výstup při nulovém gradientu, tzv.outlet.

Pro dvě takové průtočné hranice se situace mění, můžou nastat pouze následující:

- vstup rychlosti – výstup outlet,
- vstup rychlosti – výstup tlak,
- vstup tlak – výstup tlak.

Pro definování rychlosti a také skalárních veličin proudu na vstupu do oblasti používáme rychlostní podmínku, kde je potřeba myslet na směr proudění. Tím je také možno určit objemový průtok. Dále je potřeba nastavit turbulentní parametry, jako hodnoty turbulentní kinetické energie a rychlostí disipace.

#### Ad b)

Tuto podmínku lze použít při znalosti tlaku, potom průtok nebo rychlost jsou neznámou veličinou. Celkový relativní tlak na vstupu má následující vztah (odvození z Bernouliho rovnice, hustota je konstantní, nebo je funkcí teploty):

$$p = p_s + \frac{1}{2} \rho v^2.$$

Jednou z možností je také proudění vycházející z oblasti přes průtočnou hranici, zde je potřeba k zadání jen statického tlaku.

Stlačitelné proudění má následující vztah:

$$p = p_s \left[ 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}},$$

$$kde \quad M = \frac{\bar{u}}{c} = \frac{\bar{u}}{\sqrt{\kappa R T_s}},$$

$$kde \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v},$$

kde:  $p$  ... celkový tlak,  $p_s$  ... statický tlak,  $M$  ... Machovo číslo,  $c$  ... rychlost zvuku v tekutině,  $\kappa$  ... poměr měrných tepel.

Hustotu na vstupu lze určit z následující stavové rovnice:

$$\rho = \frac{P}{rT}$$

$$a \quad \frac{T_0}{T_s} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2,$$

kde:  $r$  ... měrná plynová konstanta,  $T_s$  ... statická teplota,  $T_0$  ... celková teplota.

#### Ad c)

Tuto podmínku zadáváme za pomoci statického tlaku, který je definován pouze v případě subsonického proudění. V případě proudění supersonického se tlak a další veličiny extrapolují z proudění uvnitř oblasti. Při proudění zpětném je třeba určit reálné okrajové podmínky ostatních veličin.

#### Ad d)

Neznáme-li výstupní rychlosti a tlaky před začátkem řešení, použijeme tuto podmínku odčerpávání. Vhodné pro případy, kde se rychlostní profily a profily dalších počítaných veličin nemění. Předpokladem jsou nulové normálové gradienty proměnných krom tlaku. Vhodnost metody je v případech stlačitelného proudění, nebo nestlačitelného nestacionárního proudění, kde se mění hustota a v neposlední řadě také případ zadaného tlaku na vstupu.

#### Ad e)

Tato podmínka je zvláštní v tom, že jde o doplňující vlastnosti definované matematickým modelem. Systém s rovnicí energie má okrajové podmínky teplotní na stěnách modelu a vodivostní na stěnách. Druhy podmínek pro přenos tepla konvekcí (prouděním):

- zadaná teplota na rozhraní stěny a živé buňky,
- zadaný tepelný tok na rozhraní stěny a živé buňky,
- zadaný součinitel přestupu tepla na rozhraní stěny a živé buňky.

Nebo jde o přenos tepla radiací, nebo kombinace radiace a konvekce:

- zadaná okrajová podmínka externí radiace na rozhraní stěny a buňky,
- kombinace externí radiace a externího konvekčního přenosu tepla na rozhraní stěny a živé buňky,
- zadaná radiace na stěnách (při řešení radiace).

### 3.8. Srážky molekul

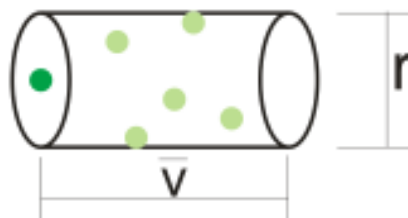
Systém Cosmos FloWorks vyhodnocuje optimální podmínky sekundárních elektronů při průchodu detektorem takovým způsobem, aby bylo co nejméně srážek s molekulami, které jsou odčerpávány.

Představme si molekuly jako koule o průměru  $d$  (efektivní srážkový průměr). Za srážku považujeme vzájemný dotek molekul a považujeme vždy jen jednu molekulu za

pohybující se vůči ostatním. Jde o molekuly stejného druhu pohybující se za jednotku času  $z_A$ .

$$z_A = \pi r^2 \bar{v} \frac{N}{V} \quad [s^{-1}],$$

kde:  $\bar{v}$  ... průměrná dráha molekul,  $v$  ... výška válce,  $r$  ... poloměr válce.

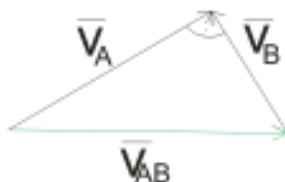


Obrázek 3.2 Srážky molekul

Když si tuto problematiku vezmeme přesněji, řekněme si, že jsou v pohybu všechny molekuly, tím pádem se zavádí vzájemná střední rychlost dvou rozdílných částic  $v_{AB}$ . Srážení částic je chaotické, čili v úhlu do  $180^\circ$ , my si v průměru tedy bereme hodnotu  $90^\circ$  a můžeme psát:

$$\bar{v}_{AB} = \sqrt{\bar{v}_A^2 + \bar{v}_B^2}$$

$$\bar{v}_{AB} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi} + \frac{8kT}{\pi} \left( \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B} \right)}$$



Vztah lze následně zjednodušit tím, že si vyjádříme redukovanou hmotnost dvou částic  $\mu$  a dosadíme:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B},$$

$$\bar{v}_{AB} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi\mu}}.$$

Pro částice stejné pak lze psát:

$$\bar{v}_{AA} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_A}} \sqrt{2},$$

$$\text{pak } \bar{v}_{AA} = \bar{v}\sqrt{2}.$$

Následně se mění i vztah pro vzájemné srážky molekul stejného druhu za jednotku času:

$$z_A = \pi r^2 \bar{v} \sqrt{2} \frac{N}{V} \quad [s^{-1}]$$

A vzájemné srážky všech takových stejných molekul za jednotku času v jednotce objemu:

$$z_{AA} = \frac{1}{2} \frac{N}{V} z_A \quad [m^{-3} s^{-1}],$$

$$\text{tedy } z_{AA} = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi r^2 \bar{v} \left( \frac{N}{V} \right)^2.$$

V neposlední řadě je potřeba zmínit vzájemné srážky molekul A s B za jednotku času v jednotce objemu:

$$z_{AB} = \frac{N_A}{V} z_A,$$

kde:  $z_A$  ... počet srážek jedné molekuly A s ostatními molekulami B za jednotku času,

$$z_{AB} = \frac{N_A}{V} \frac{N_B}{V} \pi r_{AB}^2 \bar{v}_{AB},$$

$$\text{kde } r_{AB} = \frac{r_A + r_B}{2}.$$

### 3.9. Střední volná dráha molekul

Jde o průměrnou dráhu  $l$ , kterou uletí částice mezi dvěma srážkami, vyjádřena vztahem:

$$\bar{l} = \frac{\bar{v}}{z_A} = \frac{1}{\frac{N}{V} \pi r^2 \sqrt{2}}.$$

Ze vztahu vyplývá, že pokud je počet částic v jednotce objemu dvojnásobný, tím střední volná dráha zůstane poloviční. Ze vztahu také vyplývá, že střední volná dráha nezávisí na teplotě.

Mezi jednotlivými srážkami urazí molekuly vždy nějakou přímočarou dráhu, která je vždy nějak dlouhá. Jejich průměrná hodnota se nazývá střední volná dráha  $\langle l \rangle$ :

$$\langle l \rangle = \frac{v_s}{\langle z \rangle} = \frac{v_s}{V n_0} = \frac{v_s}{\pi r^2 n_0 v_s} = \frac{1}{\pi r^2 n_0},$$

kde:  $\langle z \rangle$  ... průměrný počet srážek za jednotku času,  $v_s$  ... střední velikost rychlosti.

Při uvážení pohybu všech molekul se vztah pro střední volnou dráhu změní na následující:

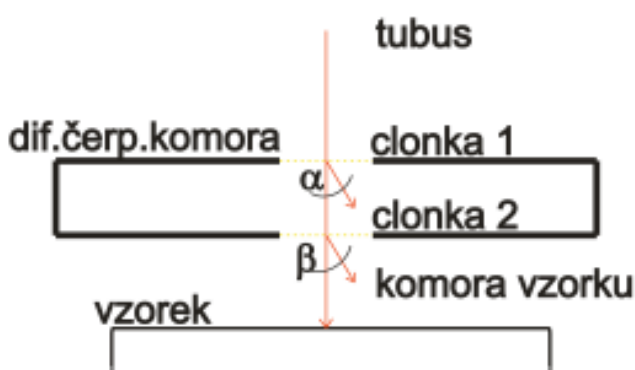
$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi r^2 n_0},$$

kde:  $n_0$  ... koncentrace molekul, která má, při nějakém množství a typu plynu, tlak plynu  $p$ :

$$p = \frac{1}{3} n_0 m_m v_k^2,$$

Závěrem je možno konstatovat, že závislost tlaku na pravděpodobnosti počtu srážek molekul odčerpávaného vzduchu z diferenciálně čerpané komory s elektrony primárního svazku je lineární. Tedy nejlepší tvar je aritmetický průměr tlaků a hustoty čerpaných částic zjištěných na dráze primárního svazku.

Také je potřeba brát v úvahu závislost rozptylu částic na počtu interakcí. Vraťme se k principu mikroskopu. Elektronový svazek letí svou stopou až ke vzorku, kde se odráží a míří k detektoru. Při tom nese informaci o obrazu a má obrovský vliv na rozlišení výsledného obrazu. V prostředí s vyšším tlakem dochází k mnoha srážkám primárních elektronů s plynem, pak tok elektronů ztrácí energii i směr pohybu a tím zhorší rozlišení obrazu. Jev lze zpřesnit silnějším tokem.



Obrázek 3.3 Rozptyl toku elektronů

Tok elektronů prochází clonkou 1 do diferenciálně čerpané komory a následně clonkou 2 do komory vzorku a naráží na vzorek. Ke zhoršení takového toku dochází při průchodu diferenciálně čerpanou komorou a také při průchodu komorou vzorku. Důvodem je vyšší tlak.

Přístupme opět k několika vzorcům. Při rozptylu je třeba řešit průměrný počet srážek  $M_L$  připadající na elektron pohybující se v diferenciálně čerpané komoře:



$$M_L = \sigma_T n_L L$$

a podobně i v komoře vzorku:

$$M_H = \sigma_T n_H H,$$

$$\text{kde } n_{L(H)} = \frac{P_{D(V)}}{kT}$$

kde:  $L$  ... vzájemná vzdálenost clonek,  $H$  ... vzdálenost clonky 2 a vzorku,  $n$  ... koncentrace částic plynu,  $\sigma$  ... celkový záchytný průřez plynu,  $p$  ... tlak plynu (D- v dif.komoře, V- v komoře vzorku),  $k$  ... Boltzmannova konstanta,  $T$  ... absolutní teplota.

Záchytný průřez plynu  $\sigma$  je závislý na druhu plynu a na urychlovacím napětí  $U$ . Dalšími zkoumáním bylo patrné, že pro co nejmenší počet srážek v daném záchytném průřezu plynu vyhovuje volbě napětí okolo 10 kV a víc.

Nyní se na chvíli zastavíme u pravděpodobnosti, kolikrát se elektron toku na své přímé dráze srazí s atomy plynu, kde pomůže Poissonovo rozložení:

$$P(x) = \frac{m^x e^{-M}}{x!},$$

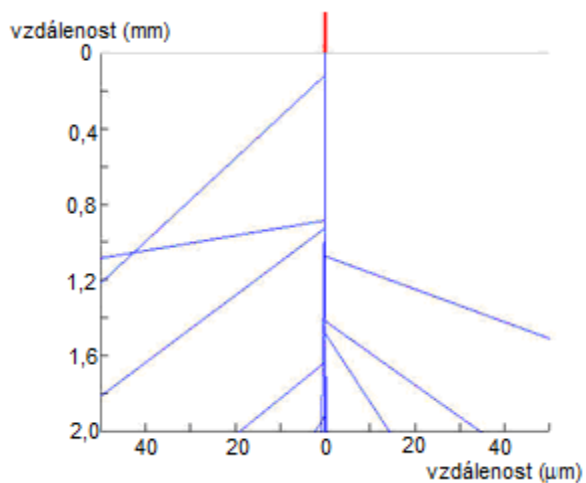
kde:  $x$  ... počet srážek,  $M$  ... průměrný počet srážek připadající na jeden elektron.

A pro pravděpodobnost, kolik elektronů toku se nesrazí a dopadnou na vzorek:

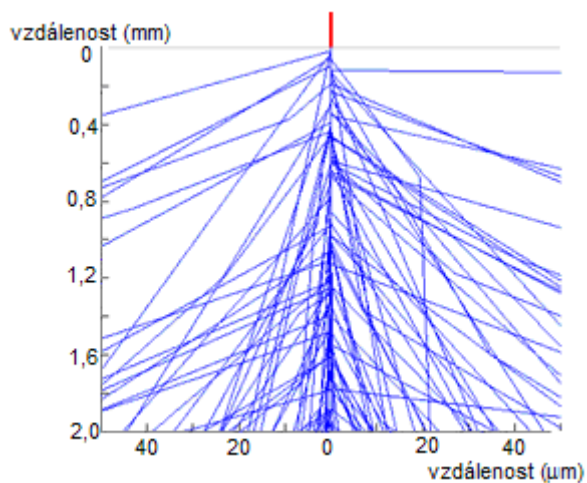
$$P(0) = e^{-M}.$$

Dle velikosti průměrného počtu srážek připadající na jeden elektron máme tři režimy:

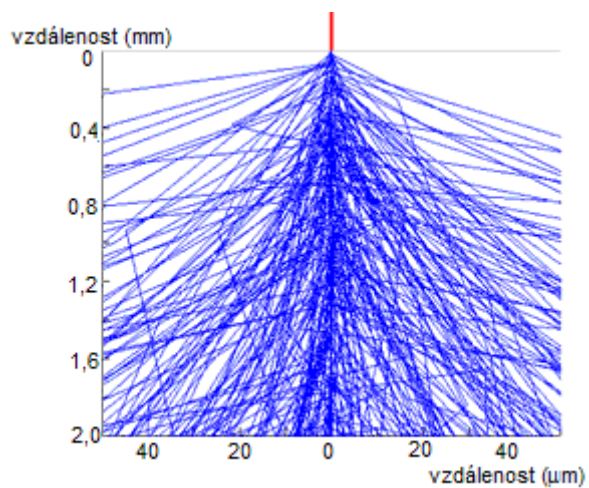
- *minimální rozptyl* –  $M < 0,05$ ; rozptyl  $< 5\%$ ; tlak 50 Pa;  
využívá se hlavně u REM metody,
- *částečný rozptyl* –  $M = 0,05$  až 3; rozptyl 5 až 95%; tlak 1000Pa,
- *úplný rozptyl* –  $M > 3$ ; rozptyl  $> 95\%$ ; tlak 3000Pa;  
rozptyl je co se týče zobrazení v mikroskopu zcela nevyhovující.



Obrázek 3.4 Minimální rozptyl svazku elektronů



Obrázek 3.5 Částečný rozptyl svazku elektronů



Obrázek 3.6 Úplný rozptyl svazku elektronů

## 4. Analýza detektoru

Analýza je provedena s využitím systému CAE z anglického „Computer Aided Engineering“ (počítačová podpora inženýrských prací). Všeobecně je tento systém návrhů velice flexibilní, jakýkoliv výrobek lze nasimulovat, odladit, odzkoušet a pak uvést do výroby. Systém představuje obrovskou úsporu nákladů.

V následující podkapitole uvádím nastavení systému Cosmos FloWorks pro analýzu proudění plynu při různých variantách a kombinací rozměrů clonek. To z důvodu, že v prostoru scintilátoru a na dráze sekundárních elektronů je požadován co nejnižší tlak, aby docházelo k co možná nejmenšímu rozptýlení paprsku a probíjení vysokého napětí u scintilátoru, což teoreticky vyžaduje malý rozměr clonek. Na druhou stranu platí, že čím menší clonka, tím dochází k oslabení proudu sekundárních elektronů, pro které tyto clonky fungují jako filtr.

Tato analýza umožní nalézt optimální variantu pro dosažení kompromisu mezi uvedenými protichůdnými požadavky.

### 4.1. Nastavení sítě v Cosmos FloWorks

Při řešení tohoto problému nelze využít nastavení sítě pro symetrické tvary, protože čerpání komory scintilátoru a komory mezi clonkami jsou vůči sobě otočeny o 90°. Nejprve nastavíme počet buněk základní sítě ve 3D rozměru, tj. v osách X, Y, Z. Detektor je v pomyslně velkém kvádru a ve třech osách rozdělen na menší prvky. V oblasti clonek provedeme zjemnění sítě, protože očekáváme složitější podmínky proudění kvůli malým otvorům ve clonkách. Zjemnění provedeme cca 4 násobek v kuželové části a cca 64 násobek ve válcové části oblast průchodu primárního svazku elektronů. Zjemnění znamená rozdělení jednotlivých základních prvků na menší. Počet prvků základní sítě a jejich rozměr je uveden v následující tabulce:

Počet čtverců v mřížce dle os			rozměry jedné krychle v mřížce		
X	Y	Z	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
65	65	100	81,2	101	154,9

Tabulka 4.1 Nastavení základní sítě

Dále provedeme nastavení sítě v oblasti zúžení kanálků, také v oblastí ostřejších přechodů, zakřivené plochy a podobně.

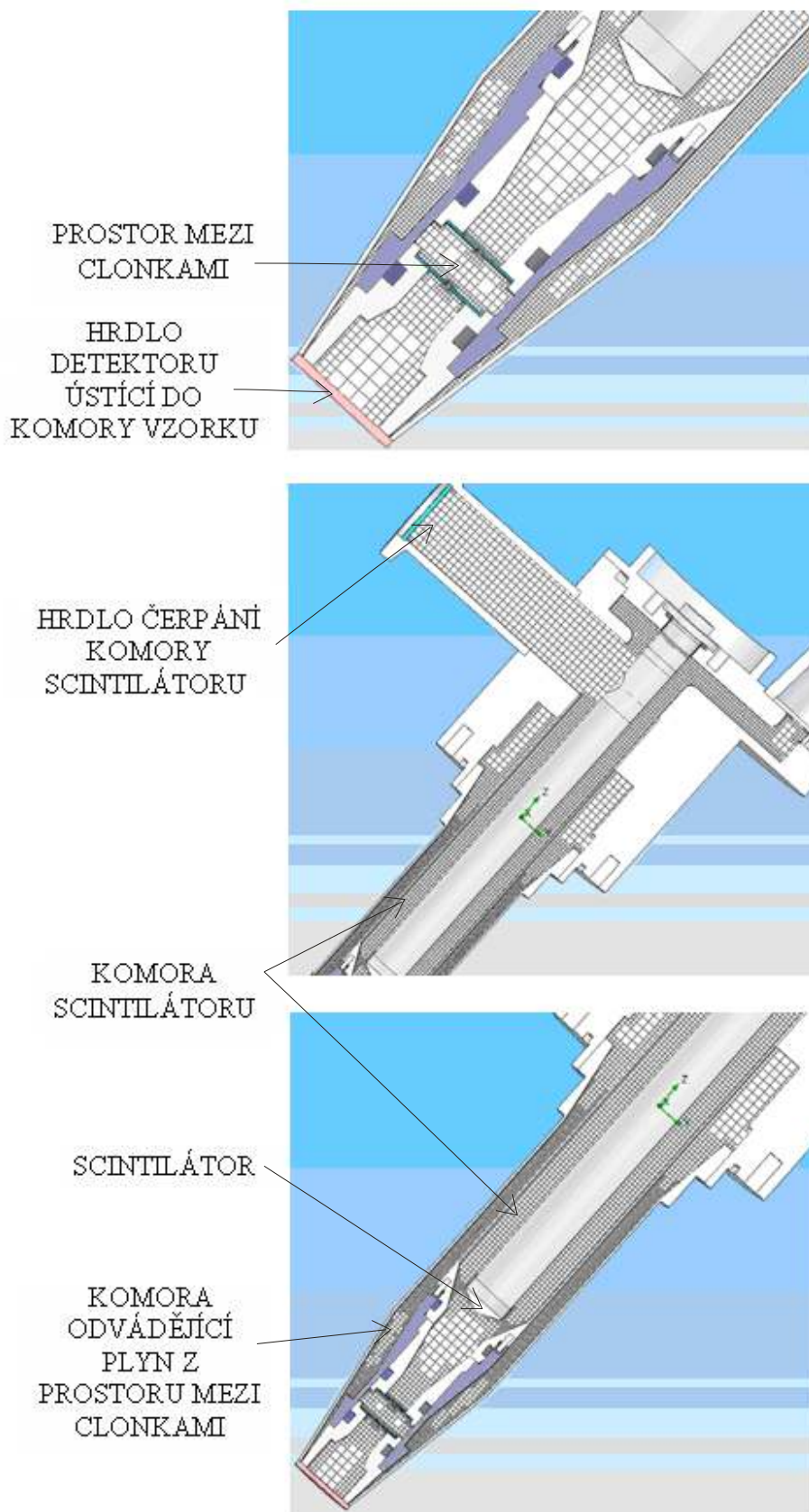
Solid/Fluid Interface	
Small solid features refinement level / Úroveň zjemnění v oblasti malých částic	1
Curvature refinement level / Úroveň zjemnění v oblasti zakřivených ploch	1
Curvature refinement criterion / Kriterium zjemnění v oblasti zakřivených ploch	0.15
Tolerance refinement level / Úroveň tolerance zjemnění	1
Tolerance refinement criterion / Kriterium tolerance zjemnění	3.289 mm
Narrow channels	
Advanced narrow channel refinement / Pokročilé zjemnění úzkých kanálků	On
Characteristic number of cells across a narrow channel / Charakteristický počet buněk v úzkém kanálku	5
Narrow channels refinement level / Úroveň zjemnění v úzkém kanálku	2
The minimum height of narrow channels / Minimální rozměr úzkého kanálku	Off
The maximum height of narrow channels / Maximální rozměr úzkého kanálku	Off

**Tabulka 4.2 Doplňující nastavení sítě**

V místech širokých kanálů je velikost buněk v původním nastavení, v užších částech je zjemnění doplňujícím nastavením a v okolí clonek jde o lokální nastavení. Je využito adaptivního zjemňování.

Refinement level / Úroveň zjemnění	1
Refinement criterion / Kriterium zjemnění	2
Unrefinement criterion / Kriterium rušení zjemnění	0.15
Adaptive refinement in fluid / Úroveň adaptivního zjemnění v oblasti proudění	On
Use global parameter variation / Využití globálního parametru kolísání	Off
Approximate maximum cells / Maximální počet buněk	750000
Refinement strategy / Nastavení strategie zjemňování sítě	Periodic
Units / Způsob ukončení výpočtu	Travels
Relaxation interval / Interval uvolnění	0.4
Periodic refinement options / Podmínky periodického zjemnění	Start: 1 Period: 0.5

**Tabulka 4.3 Nastavení adaptivního zjemnění**



**Obrázek 4.1** Nastavení mřížky ve výpočtové oblasti

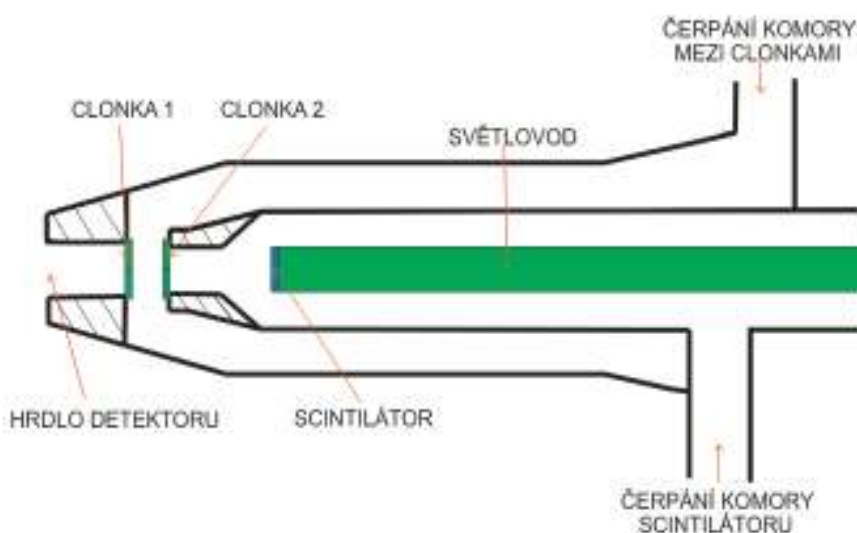
## 4.2. Nastavení okrajových podmínek v Cosmos FloWorks

Detektor sekundárních elektronů má tři otvory:

- *Hrdlo pro čerpání komory scintilátoru:* čerpání pomocí turbomolekulární vývěvy Pfeiffer TPD 011 s rychlostí čerpání  $0,0044 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- *Hrdlo pro čerpání mezi clonkami:* čerpání pomocí rotační vývěvy Lavat RV 40/21 s rychlostí čerpání  $0,01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- *Hrdlo pro vstup elektronů z komory vzorku:* počítá se s tlakem v komoře ve variantách 200, 400, 600, 800 a 1000 Pa.

Nastavení okrajových podmínek je tedy následující:

- *Komora scintilátoru:* Dle parametry turbomolekulární vývěvy je okrajová podmínka objemového čerpání  $0,0044 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- *Prostor mezi clonkami:* Dle parametru rotační vývěvy je okrajová podmínka objemového čerpání  $0,01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- *Hrdlo detektoru:* statický tlak v uvedených variantách tlaků.



Obrázek 4.2 Schéma detektoru sekundárních elektronů

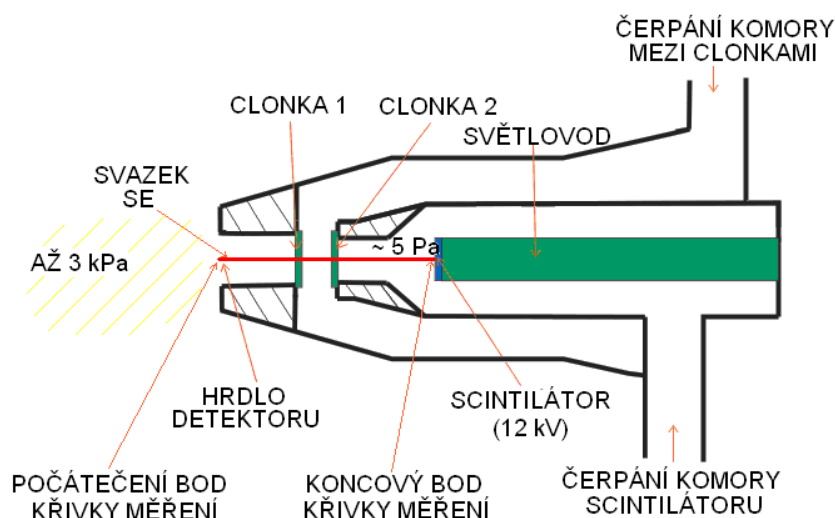
## 4.3. Nastavení cílů výpočtů v Cosmos FloWorks

V programu Cosmos FloWorks jsou sledovány následující průběhy veličin:

- statického tlaku v detektoru,
- hmotnostního toku na otvorech detektoru i čerpacích otvorů,
- rychlosti toku média v detektoru, včetně Machova čísla,
- teploty čerpaného plynu v detektoru.

## 5. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 400 Pa

Nejprve trochu opakování. Z komory vzorku se nasává vzduch do hrdla, kde je v této variantě nastaven tlak 400 Pa. Čerpaný vzduch prochází clonkou číslo 1 do samostatně čerpané komory, kde je rotační vývěvou udržován tlak cca 30 Pa. Dále vzduch prostoupí clonkou číslo 2 ke scintilátoru, prostor kolem je odsáván turbomolekulární vývěvou. Z provozních důvodů je snahou zde docílit tlak kolem 5 Pa (ne více jak 8 Pa). Celý tento postup je na následujícím obrázku.



Obrázek 5.1 Schéma detektoru SE

### 5.1. Varianta: 400 6 – 6

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **400 Pa**.

Nyní se budu věnovat dráze elektronů, která je znázorněna na obrázku (obr.5.1 – červená čára). Tato dráha je vedena od vstupu elektronů do detektoru – počáteční bod křivky měření, až po scintilátor – koncový bod křivky měření. Nulová hodnota dráhy je tedy na hrdle detektoru, průchod první clonkou je ve vzdálenosti 15 mm a druhou clonkou 19,1 mm. Konec dráhy je ve vzdálenosti 42.8 mm.

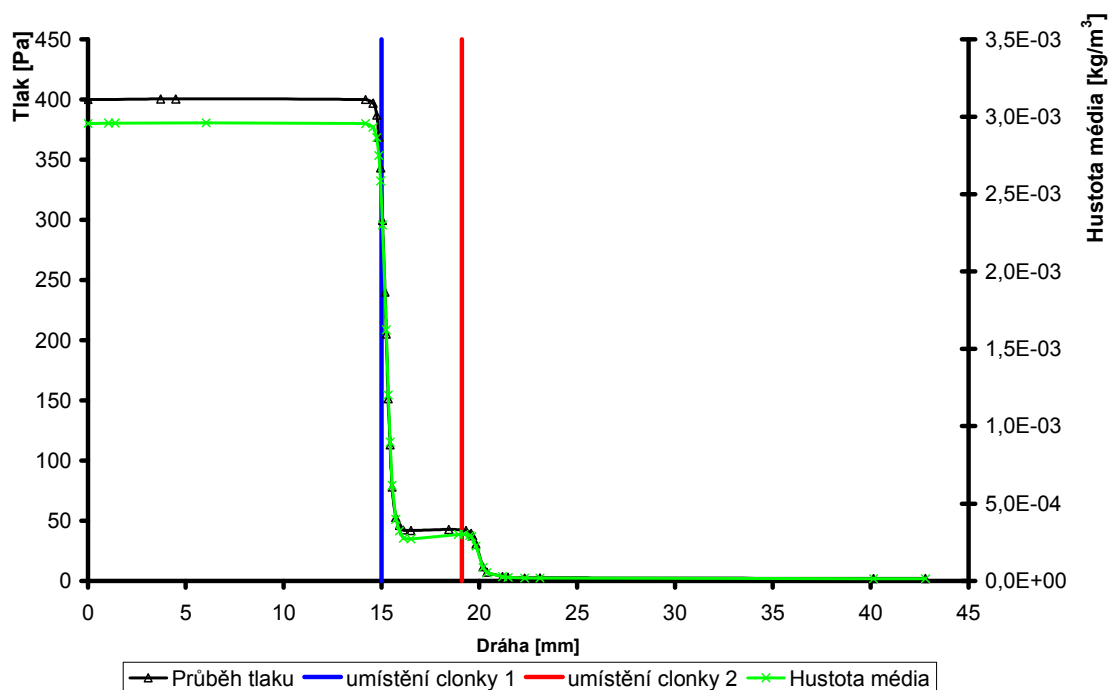
Na této dráze jsou zkoumány dva druhy veličin z rozdílných důvodů.

Z hlediska vlastního zkoumání pro optimální funkci detektoru je sledován průběh tlaku a průběh hustoty média na dráze sekundárních elektronů. Programem Cosmos FloWorks byly změřeny hodnoty, z kterých jsou sestaveny grafy, kde je pro přehlednost zobrazeno umístění clonek modrou a červenou barvou (viz graf 5.1).

Druhý typ zkoumaných veličin jsou průběhy rychlosti a Machova čísla na této dráze, které jsou potřeba pro vyhodnocení způsobu proudění plynu u jednotlivých variant (viz graf 5.2).

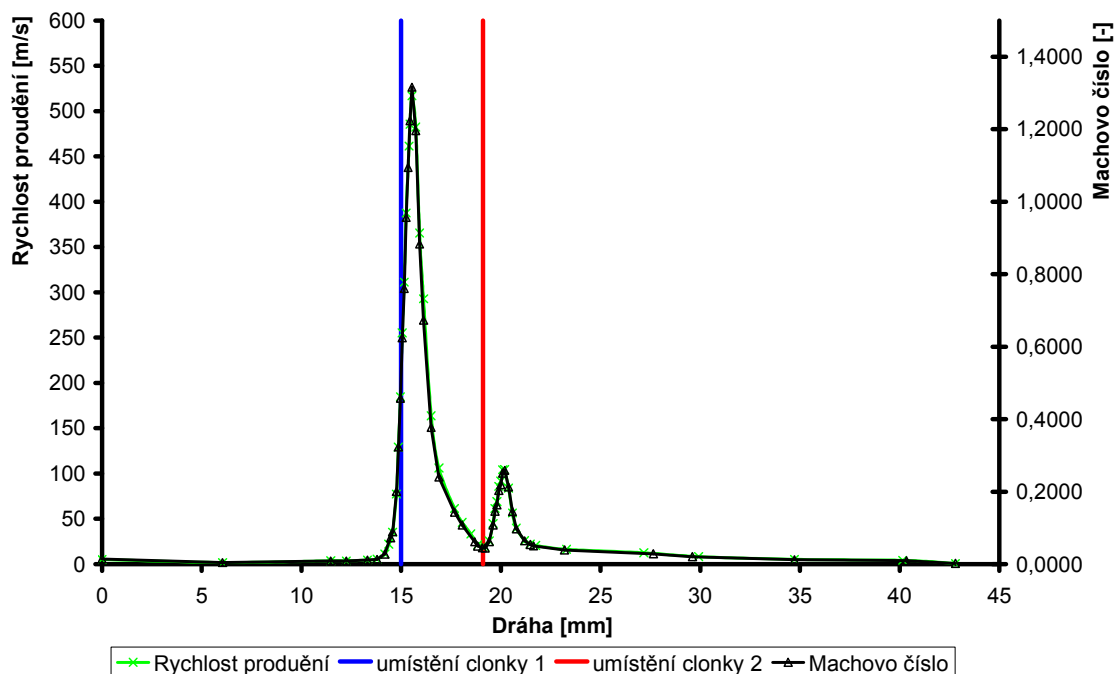


Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 148,2 Pa.

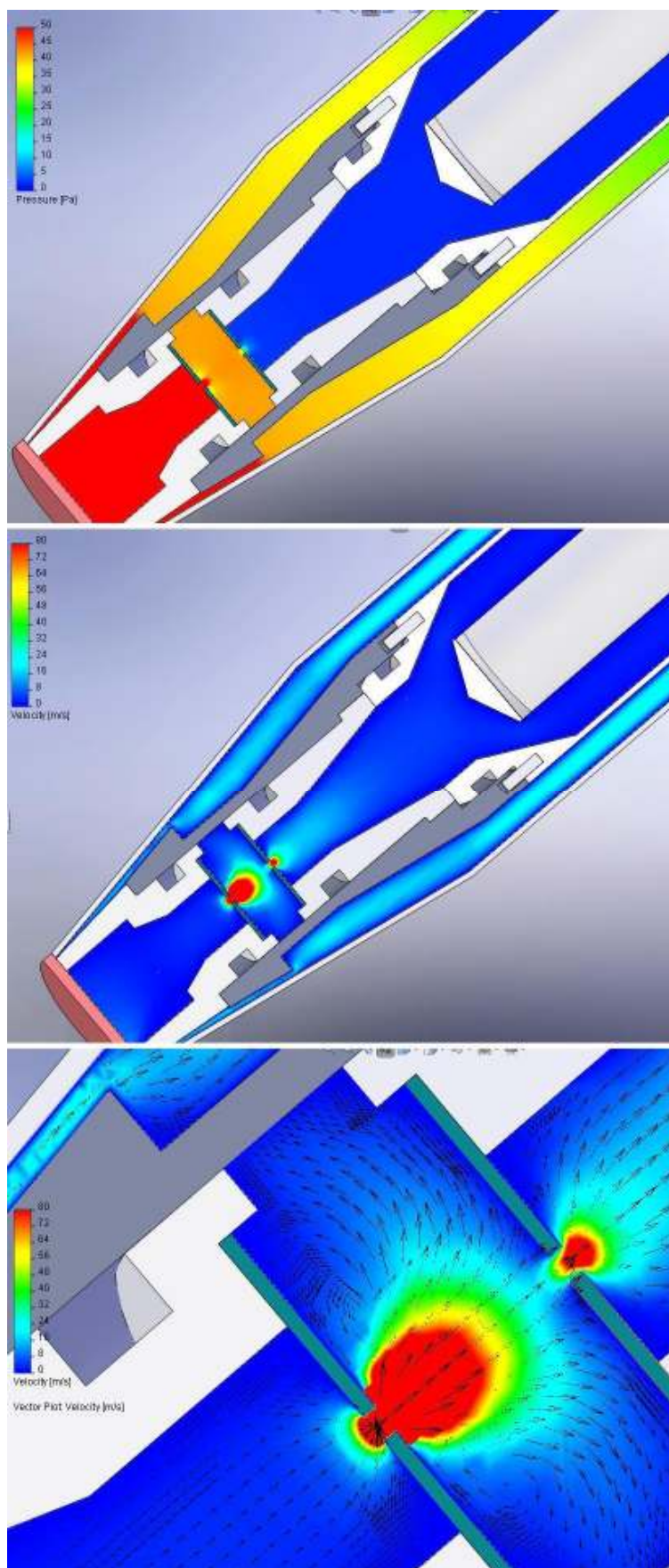


**Graf 5.1 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE**

Podobně je zobrazen i průběh Machova čísla a průběh rychlosti:



**Graf 5.2 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE**



**Obrázek 5.2** Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

V této variantě na clonce číslo 1 je dosahováno kritického proudění - na hraně clonky je dosaženo Machova čísla. Za clonkou vzniká kužel rozšiřující se v nadzvukové proudění a následně klesá na proudění podzvukové. Tento jev ale nastává až při určitém tlakovém spádu mezi komorou vzorku a prostorem mezi clonkami.

Na clonce 2 taktéž dochází k vytvoření rychlostního kužele, ale vzhledem k mnohem menšímu rozdílu tlaků není dosaženo kritického proudění.

## **5.2. Varianta: 400 8 – 6**

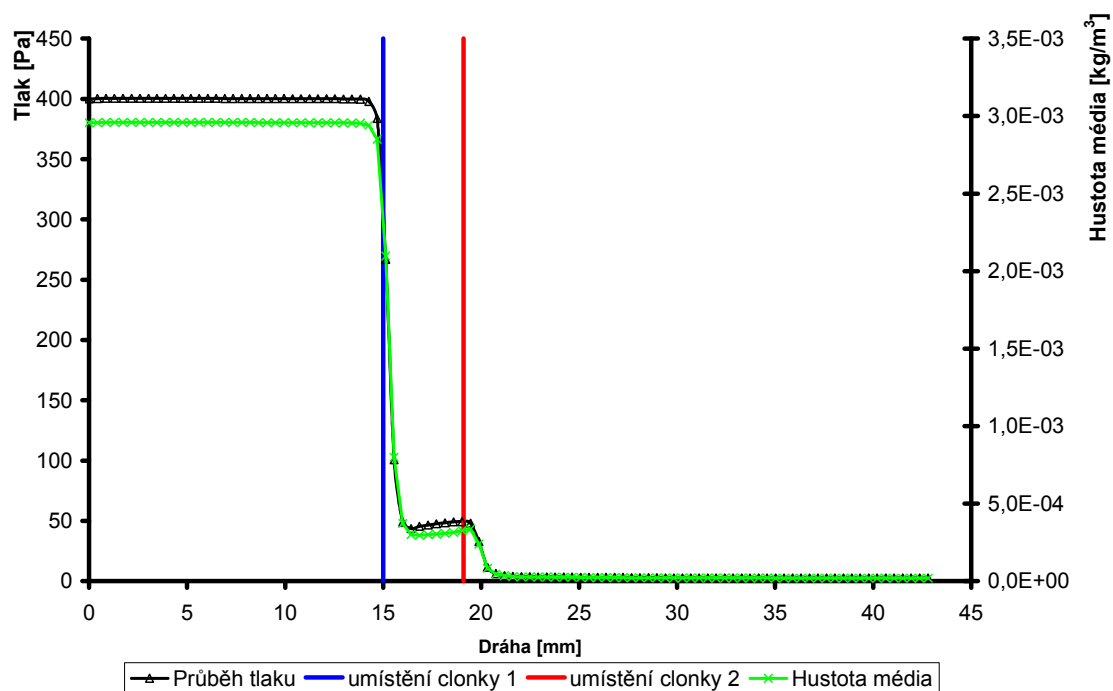
Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1 a 0,6 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **400 Pa**.

Další řešení je stejné jako v kapitole 5.1, tj. stejná dráha sekundárních elektronů, stejné nastavení vzdálenosti clonek.

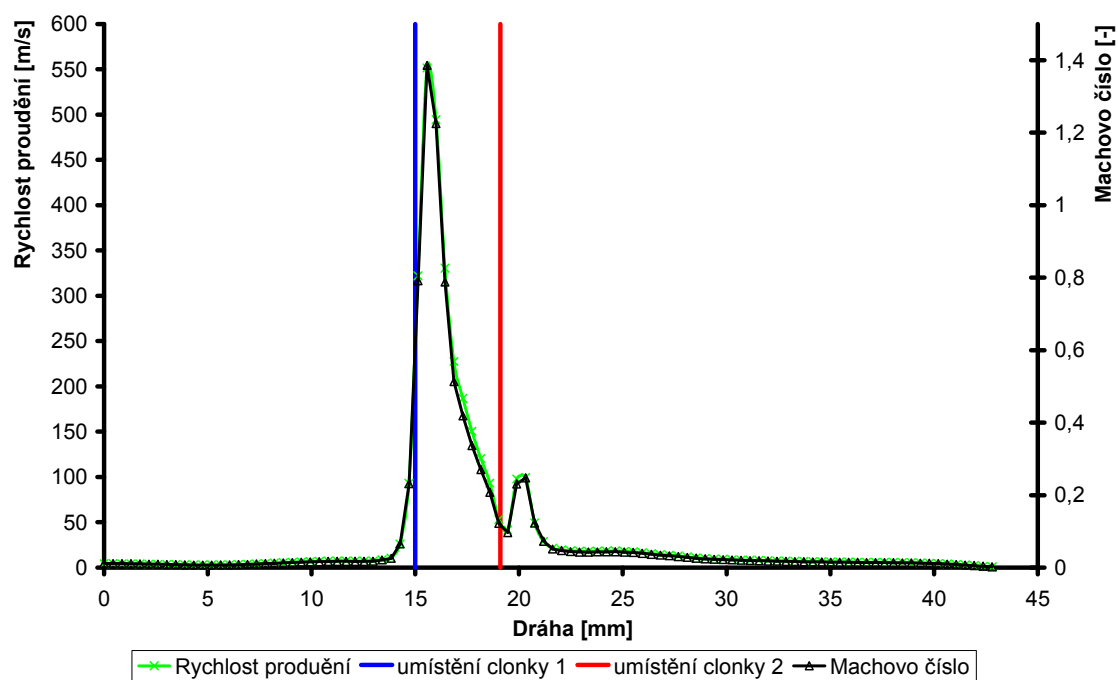
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 149,9 Pa.

V této variantě na clonce číslo 1 je dosahováno taktéž kritického proudění s větší následnou expanzí než při variantě 0,6 – 0,6 mm. Na hraně clonky je dosaženo rychlosti proudění v hodnotě Machova čísla.

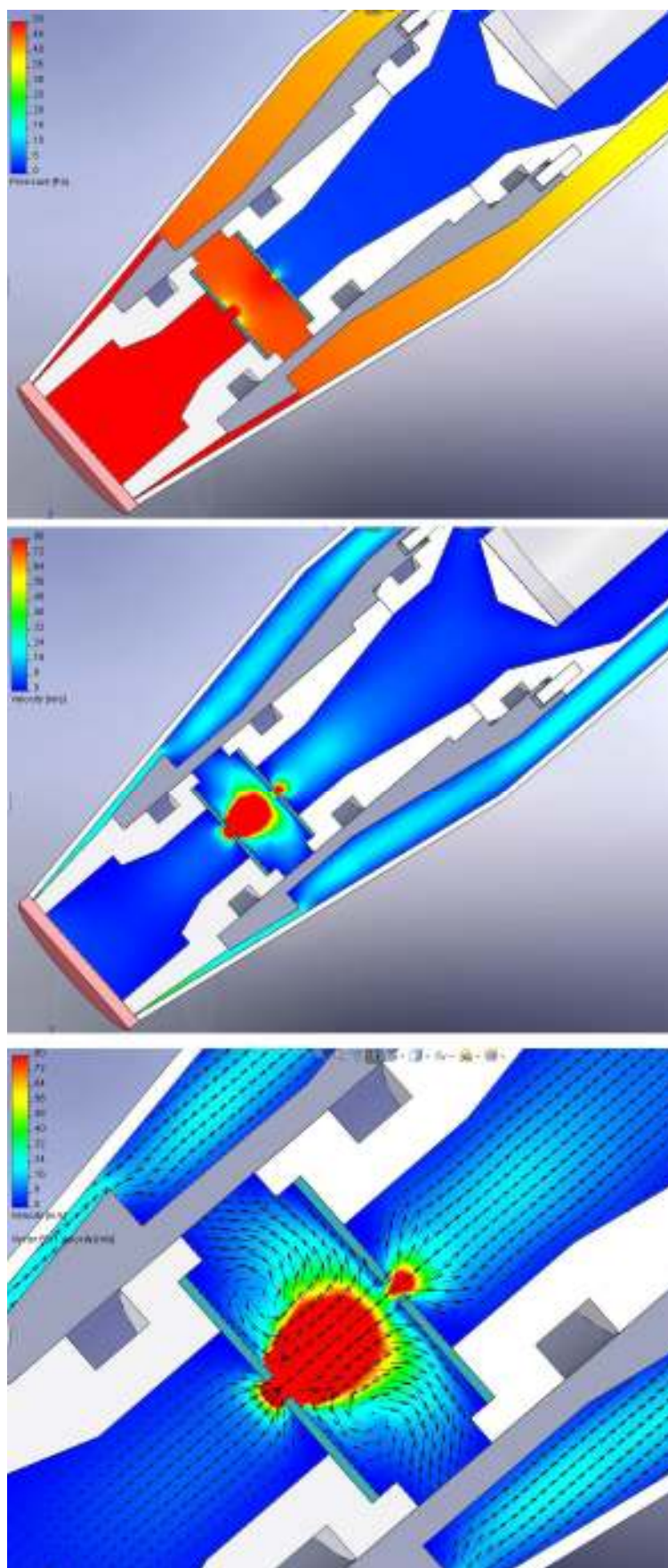
Na clonce 2 taktéž dochází k vytvoření rychlostního kužele, ale vzhledem k mnohem menšímu rozdílu tlaků není dosaženo kritického proudění.



Graf 5.3 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 5.4 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE



Obrázek 5.3 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

---

### 5.3. **Varianta: 400 6 – 8**

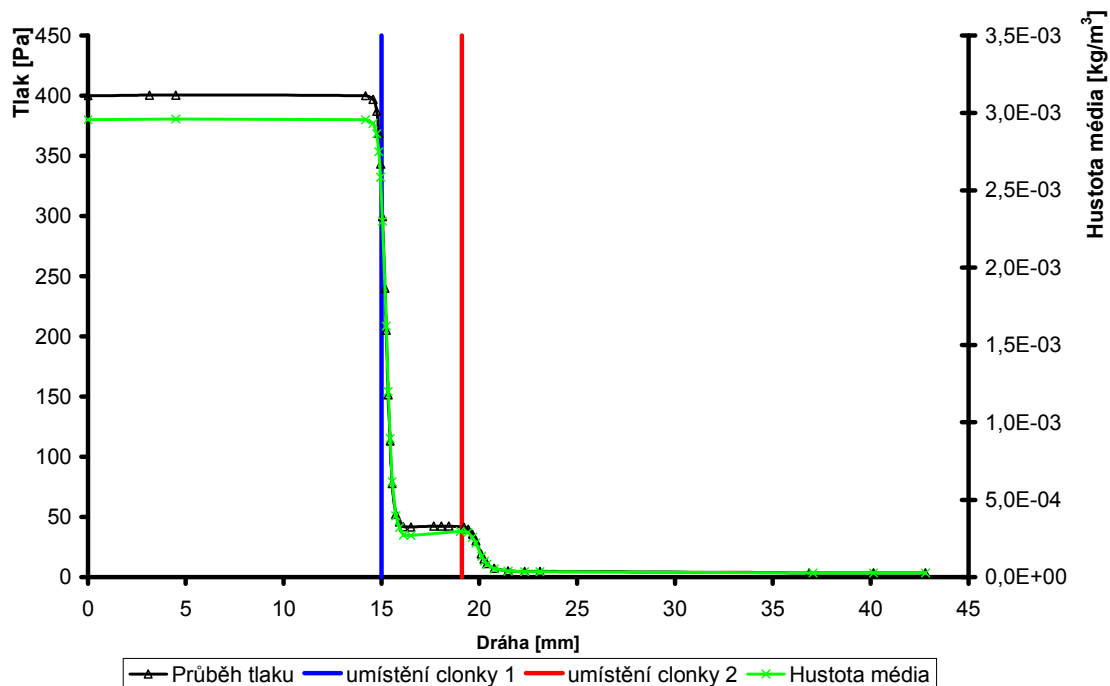
Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1 a 0,8 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **400 Pa**.

Další řešení je stejné jako v kapitole 5.1.

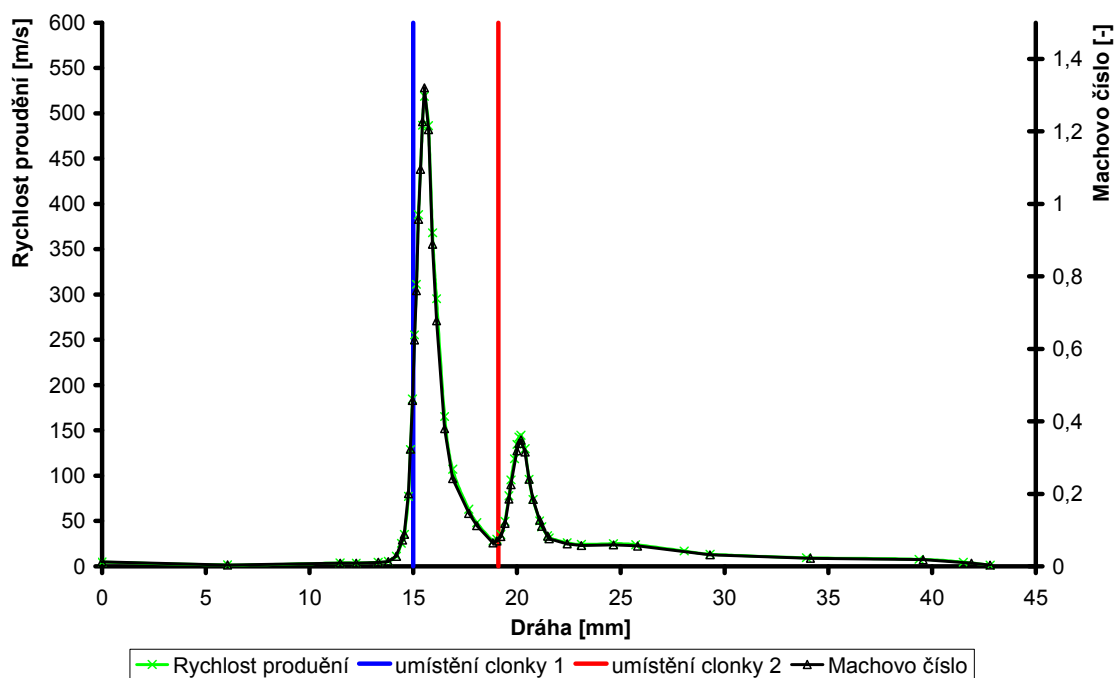
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 134,8 Pa.

V této variantě na clonce číslo 1 je dosahováno zhruba stejného kritického proudění jako při variantě 0,6 – 0,6 mm - na hraně clonky je dosaženo Machova čísla.

Na clonce 2 taktéž dochází k vytvoření rychlostního kužele, ovšem oproti variantě 0,6 – 0,6 mm je kužel větší, ale vzhledem k mnohem menšímu rozdílu tlaků není dosaženo kritického proudění.

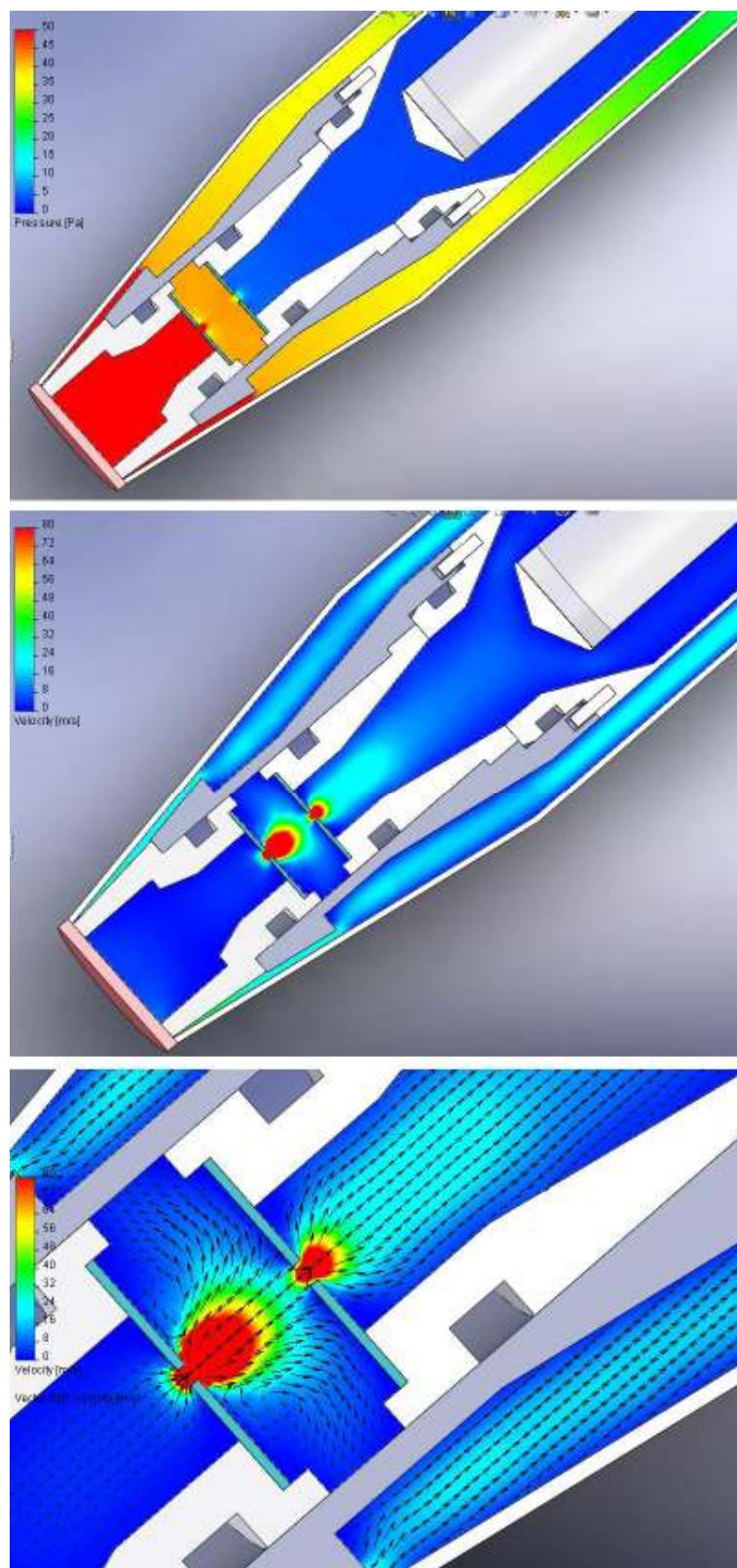


Graf 5.5 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 5.6 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE





**Obrázek 5.4 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění**



---

#### **5.4. Varianta: 400 8 – 8**

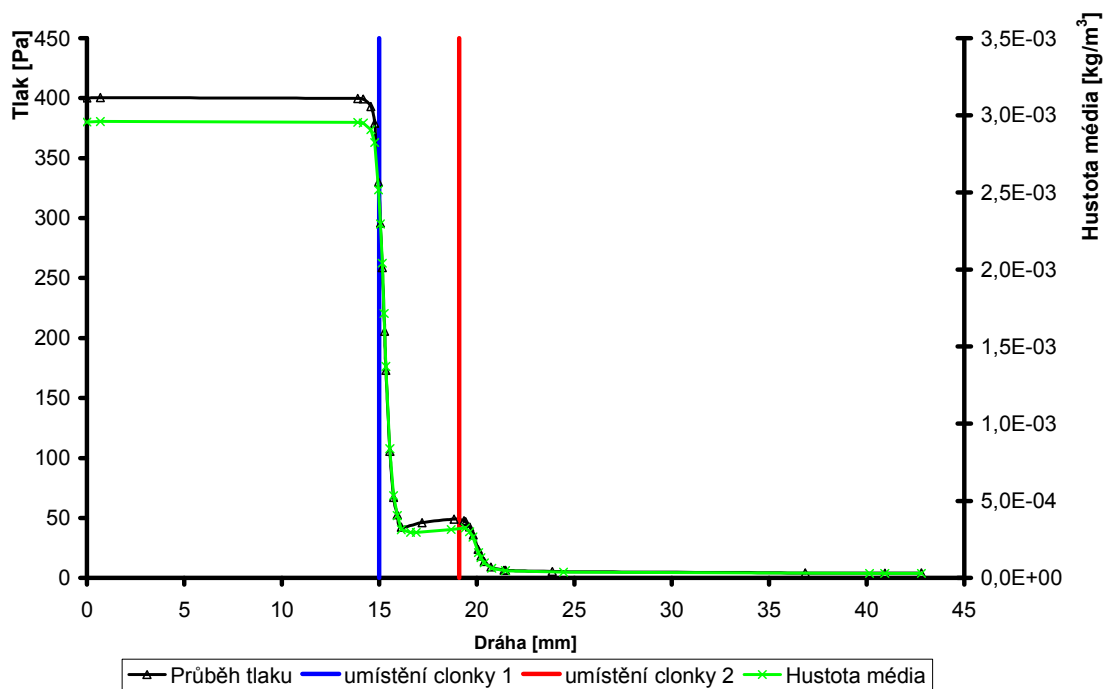
Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **400 Pa**.

Další řešení je stejné jako v kapitole 5.1.

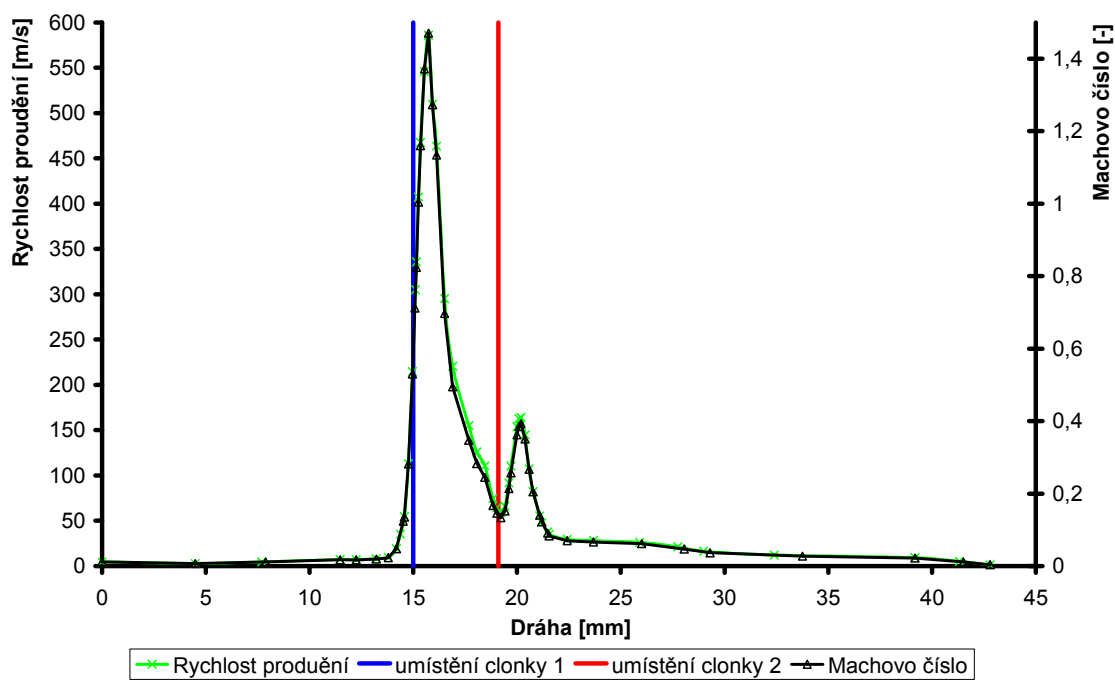
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 137,6 Pa.

Z logiky věci vyplývá, že v této variantě za clonkou číslo 1 je dosahováno větší expanze proudění než při variantě 0,6 – 0,6 mm - na hraně clonky je dosaženo Machova čísla.

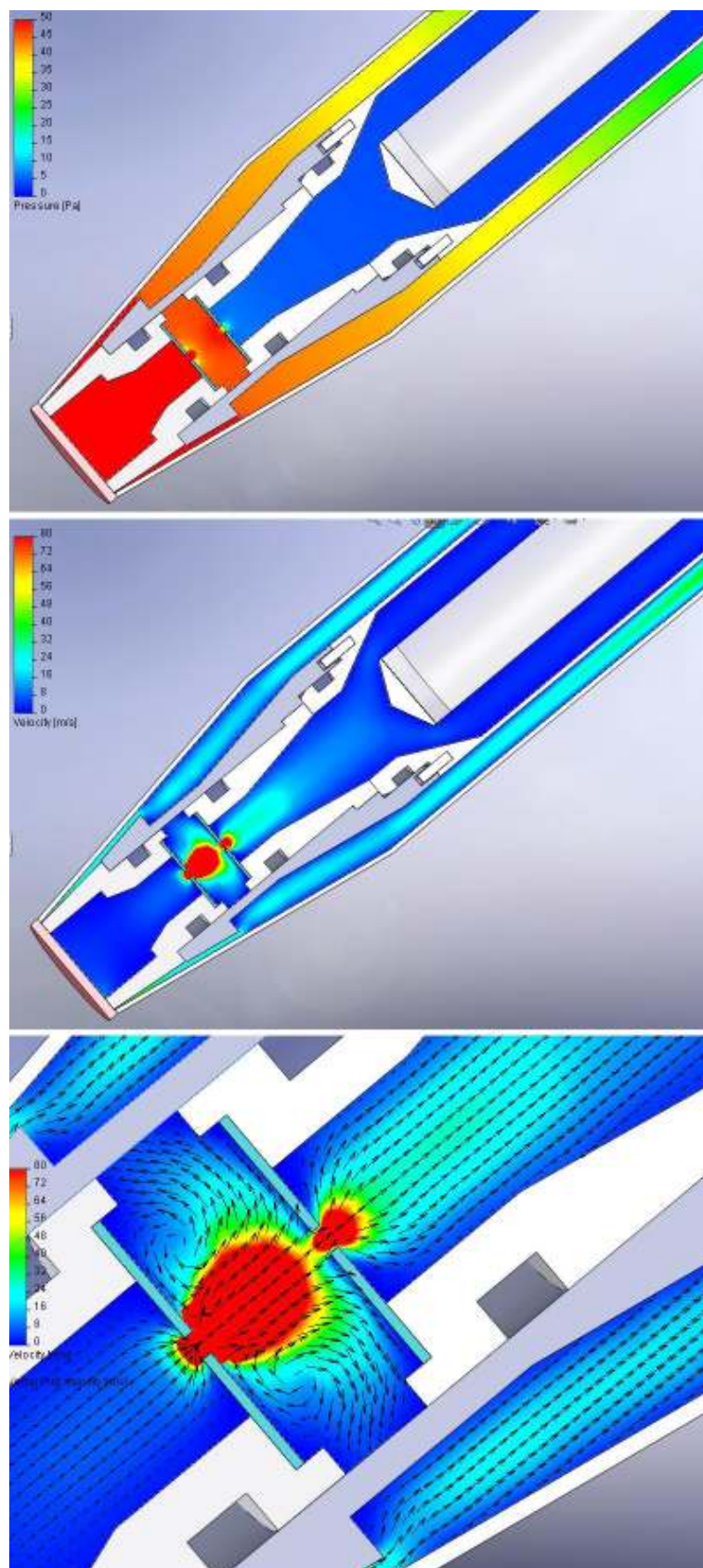
Na clonce 2 taktéž dochází ke většímu vytvoření rychlostního kužele než při variantě 0,6 – 0,6 mm, ale vzhledem k mnohem menšímu rozdílu tlaků není dosaženo kritického proudění.



**Graf 5.7 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE**



**Graf 5.8 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE**

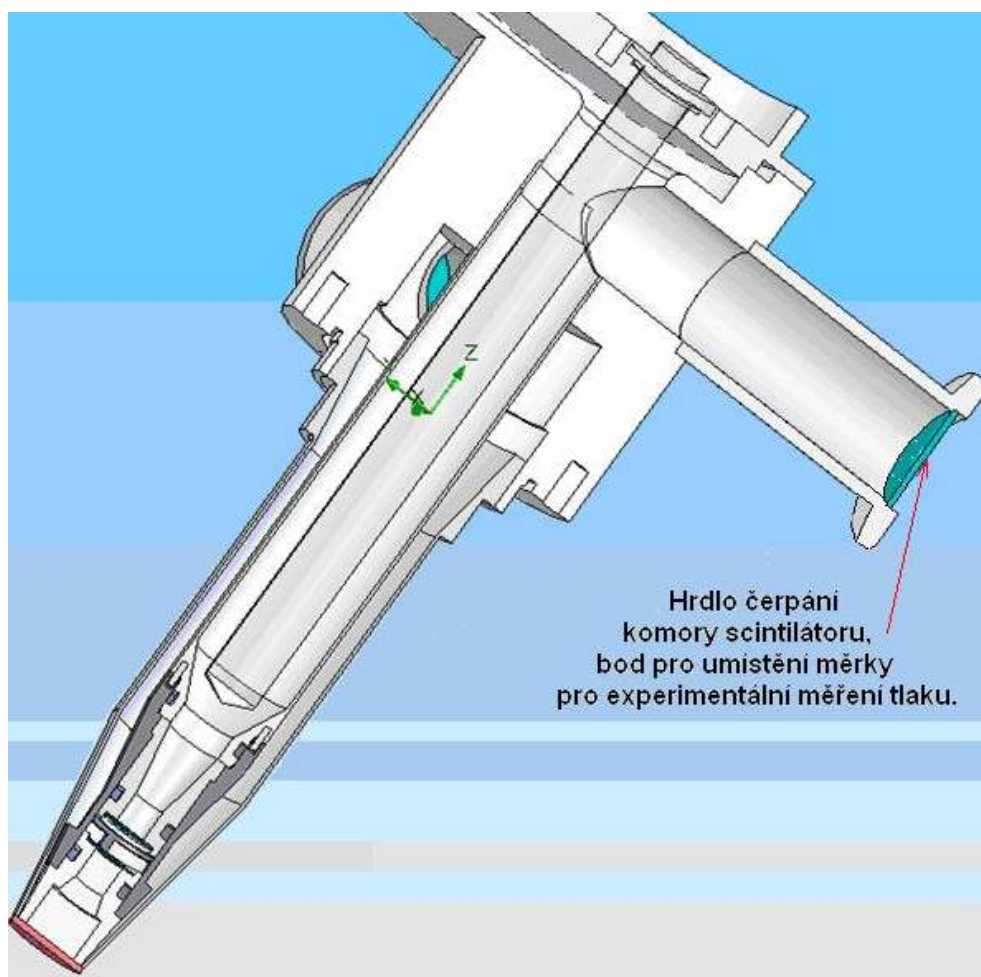


Obrázek 5.5 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

## 5.5. Srovnání s experiment. měřením - varianta 6 – 6

Pro srovnání výsledků jsem použil experimentálně změřené hodnoty tlaku v detektoru. Tyto hodnoty byly měřeny na ústavu přístrojové techniky na sestrojeném detektoru s clonkami, které mají otvory s rozměry **0,6 – 0,6 mm**.

V hrdle čerpání komory scintilátoru (viz obrázek 5.6) byla vložena měřka Pfeiffer typu CMR 264 s rozsahem měření do 100 Pa s přesností 0,2 %.

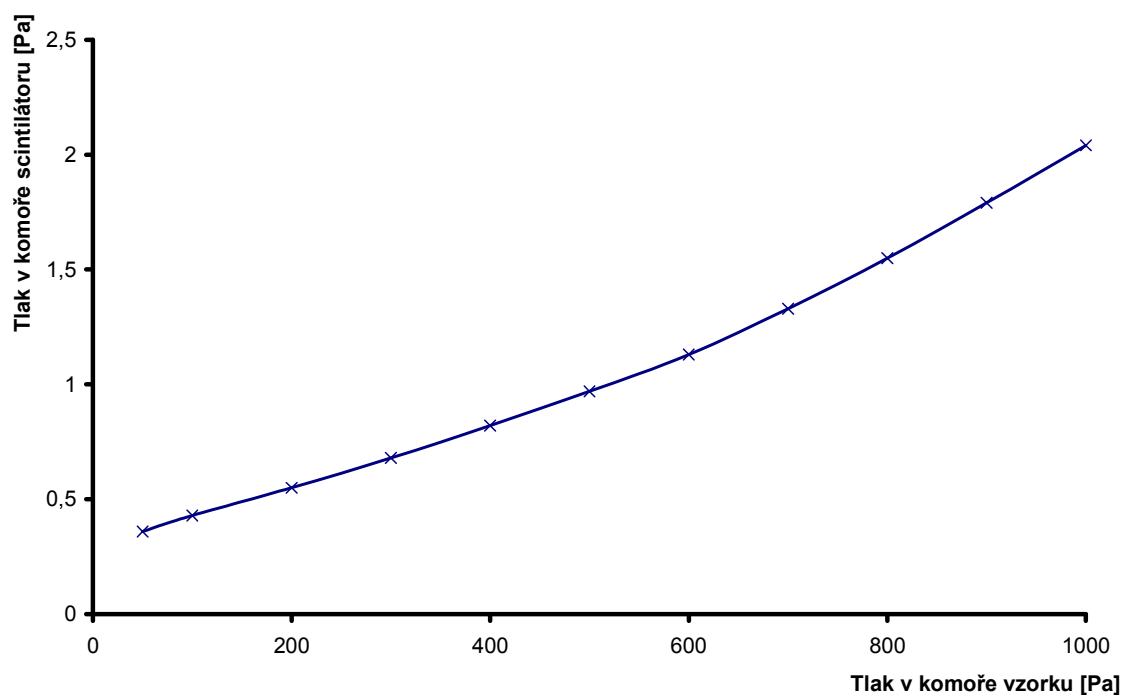


Obrázek 5.6 Detektor sekundárních elektronů

Takto naměřené hodnoty tlaku v hrdle pro čerpání komory scintilátoru a tlaku v komoře vzorku jsou vyneseny do grafu 5.9.

tlak v komoře vzorku [Pa]	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
tlak v komoře scintilátoru [Pa]	0,36	0,43	0,55	0,68	0,82	0,97	1,13	1,33	1,55	1,79	2,04

Tabulka 5.1 Experimentálně změřené tlaky pro clonky s otvory 0,6 - 0,6 mm

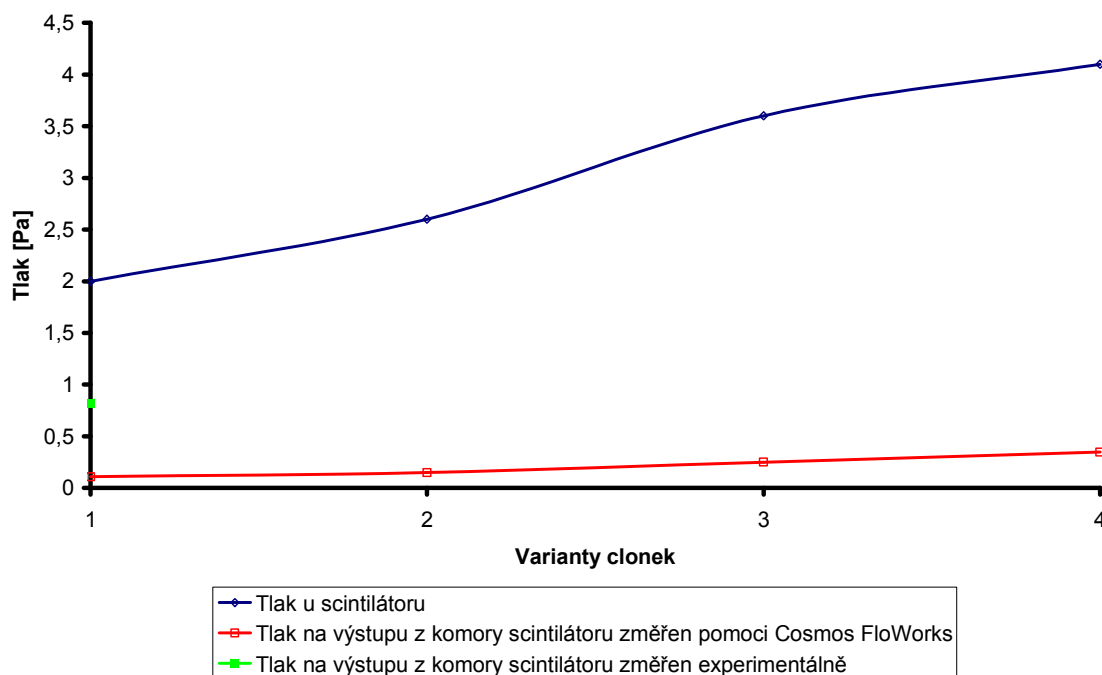


**Graf 5.9 Závislost tlaku v komoře scintilátoru na tlaku v komoře vzorku**

Tyto hodnoty jsou srovnány s hodnotami experimentálně naměřenými v systému Cosmos FloWorks. Dle těchto výsledků lze vyhodnotit i místa v detektoru, kde není možné umístit měрку, ale tyto místa jsou pro konstrukci a správnou funkci detektoru velice důležitá. Hlavní zaměření je u vstupu scintilátoru, zde se nachází velice vysoké napětí. To znamená, že maximální tlak v komoře u scintilátoru nesmí převýšit hodnotu 8 Pa, jinak by došlo k elektrickému oblouku a k následnému zničení scintilátoru a tudíž i detektoru.

	1	2	3	4
Varianty otvorů v clonkách 1 a 2 [mm]	0,6 - 0,6	0,8 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 0,8
Tlak u scintilátoru [Pa]	2	2,6	3,6	4,1
Tlak výstupu z komory scintilátoru změřený pomocí systému Cosmos FloWorks [Pa]	0,11	0,15	0,25	0,348
Tlak výstupu z komory scintilátoru změřený experimentálně [Pa]	0,82			

**Tabulka 5.2 Tlaky pro různé varianty otvorů**



Graf 5.10 Srovnání výsledků tlaků experimentálních a změřených systémem

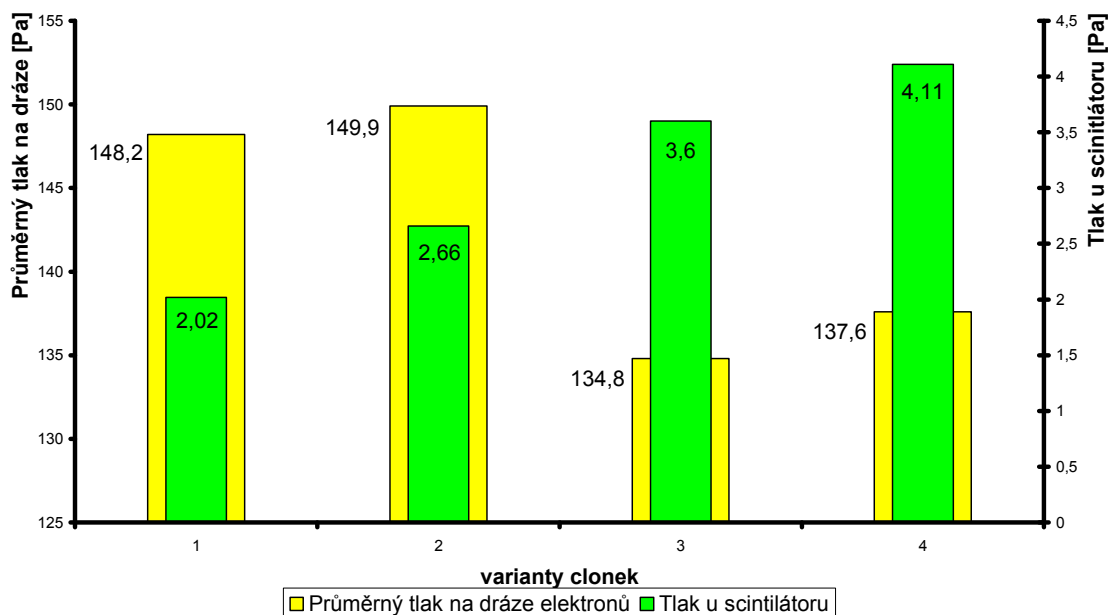
Jak je vidět z grafu 5.10, hodnota naměřená experimentálně je trochu vyšší. Důvodem je to, že Cosmos FloWorks pracuje v ideálním režimu, ale u varianty experimentální jde o například netěsnosti a různé tolerance rozměrů.

Srovnání tlaků na výstupu z komory mezi experimentálním a ideálním měřením je pouze pro variantu 1 (viz zelený bod v grafu 5.10), tedy clonky 0,6 – 0,6 mm. Pro ostatní varianty nebyly clonky vyrobeny a proto nejsou ani známy reálné hodnoty.

## 5.6. Shrnutí

	1	2	3	4
Varianty otvorů v clonkách 1 a 2 [mm]	0,6 - 0,6	0,8 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 0,8
Tlak u scintilátoru [Pa]	2,02	2,66	3,6	4,11
Průměrný tlak na dráze elektronů [Pa]	148,2	149,9	134,8	137,6

Tabulka 5.3 Srovnání tlaků (400 Pa v komoře)



**Graf 5.11 Srovnání tlaků (400 Pa v komoře)**

U všech variant dosahujeme v otvoru první clonky rychlosti proudění  $\text{mach} = 1$ . Je to jeden z důkazů správnosti výsledků. Proudění při vstupu do detektoru dosahuje hodnot jednotek  $\text{m/s}$ , v otvoru první clonky se prudce zvýší, na konci její hrany dosahuje rychlost 1 Mach. Za otvorem se vytváří kužel nadzvukového proudění a následně klesá až k hodnotě několika desítek  $\text{m/s}$ . Při průchodu otvorem ve druhé clonce stoupne proudění na hodnotu cca 100  $\text{m/s}$  až 500  $\text{m/s}$  dle varianty a opět vytvoří rychlostní kužel, který sice nedosahuje hodnoty nadzvukového proudění, ale jak vyplývá dále, pro nás má svůj význam. Toto proudění následně klesá až na hodnotu téměř jednotek  $\text{m/s}$  až u scintilátoru dosáhne okolo jednoho  $\text{m/s}$ .

Z grafu 5.11 je patrné, že varianta 1 s otvory ve clonkách 0,6 – 0,6 mm dosahuje nejnižšího tlaku u scintilátoru a tedy zde existuje nejmenší riziko vzniku výboje.

Průměrný tlak na dráze elektronů je však nejnižší v případě varianty 3 s otvory ve clonkách 0,6 – 0,8 mm. Důvodem je zrychlené (v první clonce vždy kritické) proudění v malých otvorech. Právě z tohoto důvodu jsme sledovali nejen průběh tlaku plynu, ale i jeho rychlost, neboť platí, že v oblastech vyšší rychlosti proudění plynu klesá tlak. V našem případě je možné tohoto jevu využít právě v oblastech clonek, které umožní v dráze sekundárních elektronů vytvářet oblast s nižším tlakem. Je tedy výhodná ta varianta, u které dochází v obou clonkách k co nejrychlejšímu proudění a vytvoření rychlostního kužele proudění, v němž je dle fyzikálních zákonů nižší tlak.

Z uvedených výsledků vyplývá, že na výsledný tlak u scintilátoru má větší vliv velikost druhé clonky, u které je výhodnější aby byla menší, ale na velikost tlaku v dráze sekundárních elektronů je výhodná kombinace menší první clonky a větší druhé. To z důvodu, že na kritické proudění u první clonky vzhledem ke velkým rozdílům tlaků u hrdla detektoru a v diferenciální komoře postačí malá clonka, zatímco pro větší kužel rychlého proudění u druhé clonky je vhodnější větší otvor.

---

Z výsledků tedy vyplývá, že optimální variantou je varianta 3 a to z uvedených důvodů:

1. Tlak u scintilátoru je ještě postačující pro jeho bezpečnou funkci.
2. Kombinace otvorů zajišťuje rychlostní kužel proudění – tedy nižší tlak - na nejdelší dráze sekundárních elektronů.
3. Alespoň jeden z otvorů je většího rozměru než 0.6 mm, tedy působí jako menší „filtr“ pro proud sekundárních elektronů.

## **6. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 200 Pa**

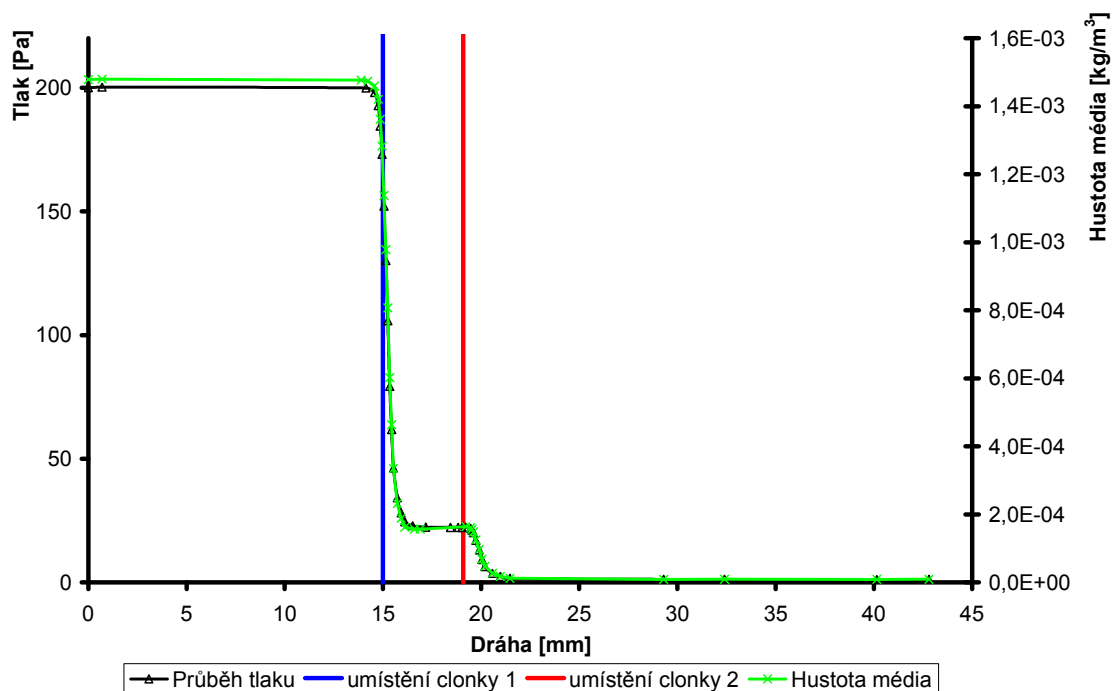
Analogicky, jako tomu je v kapitole 5 (viz obrázek 5.1) je na následujících stranách zpracována varianta pro tlak v komoře vzorku 200 Pa a opět jsou měněny kombinace otvorů ve clonkách.

### **6.1. Varianta: 200 6 – 6**

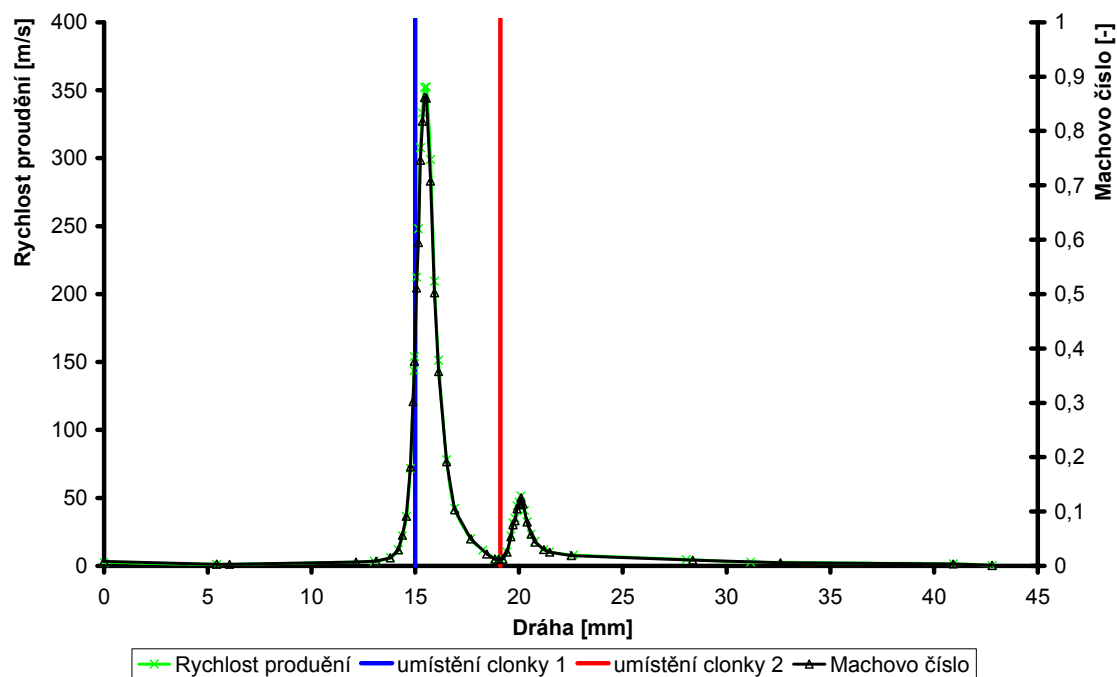
Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **200 Pa**.

Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 62,96 Pa.

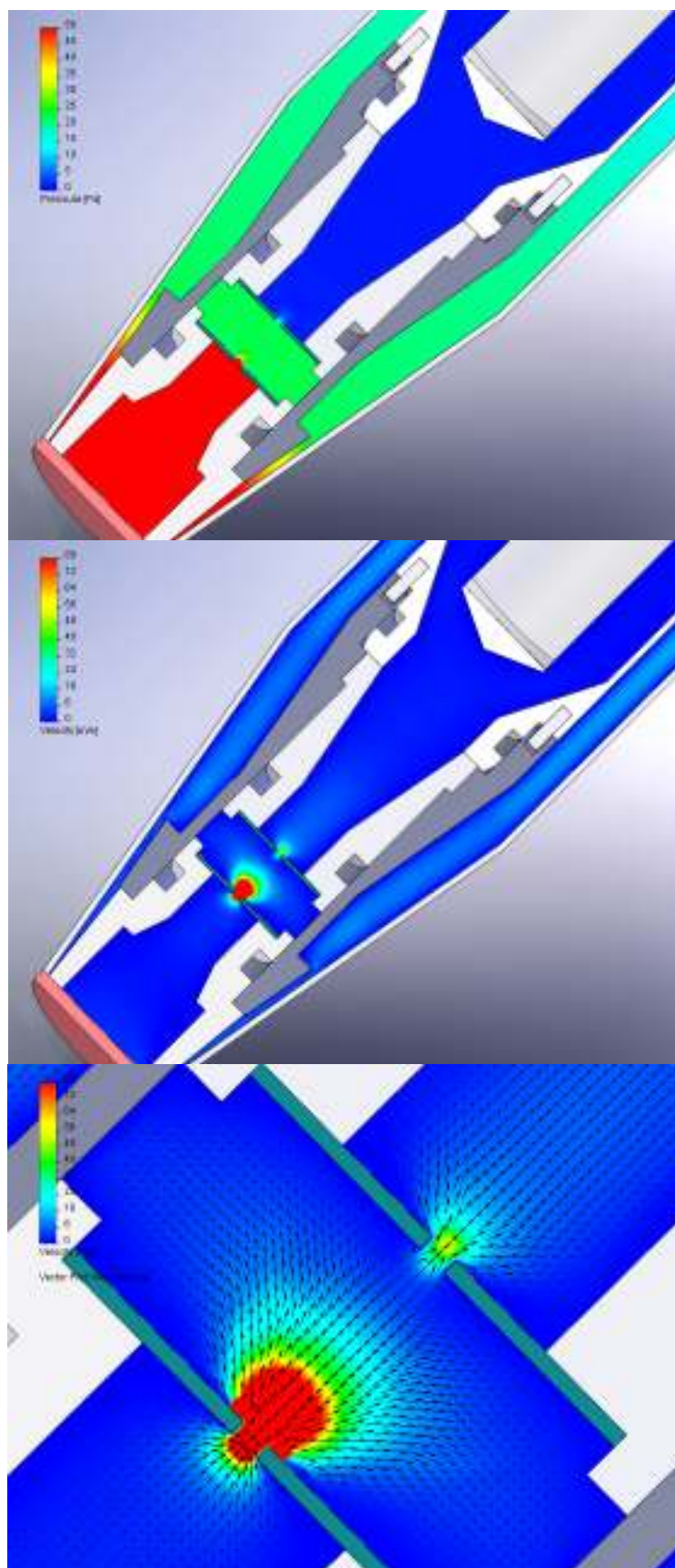




Graf 6.1 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 6.2 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

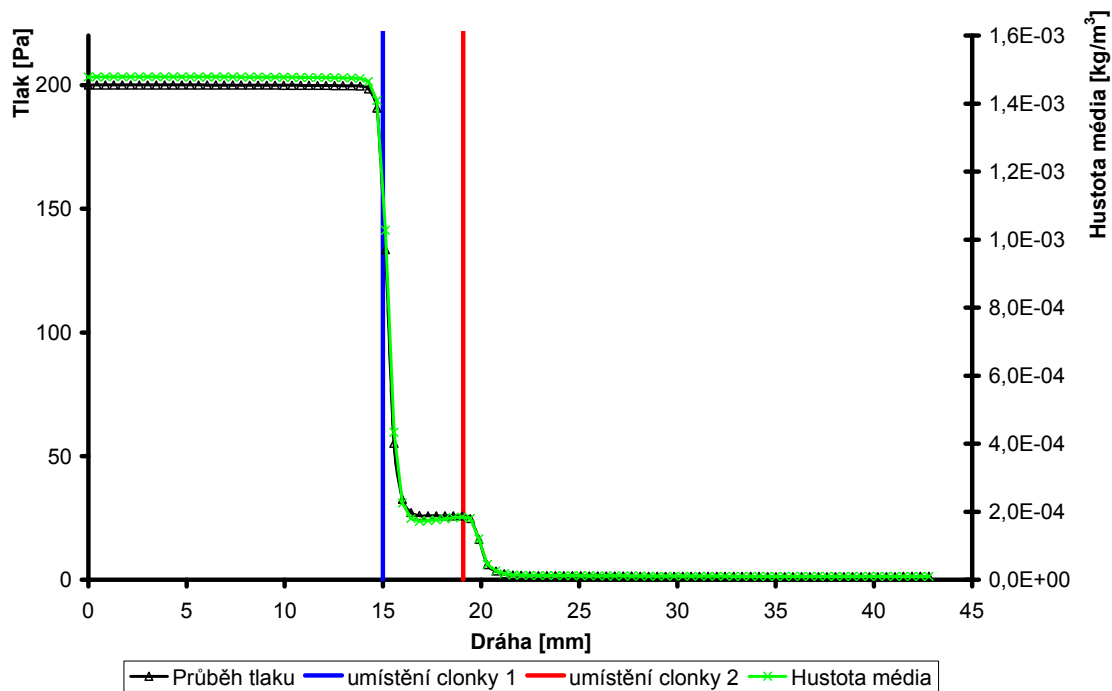


Obrázek 6.1 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

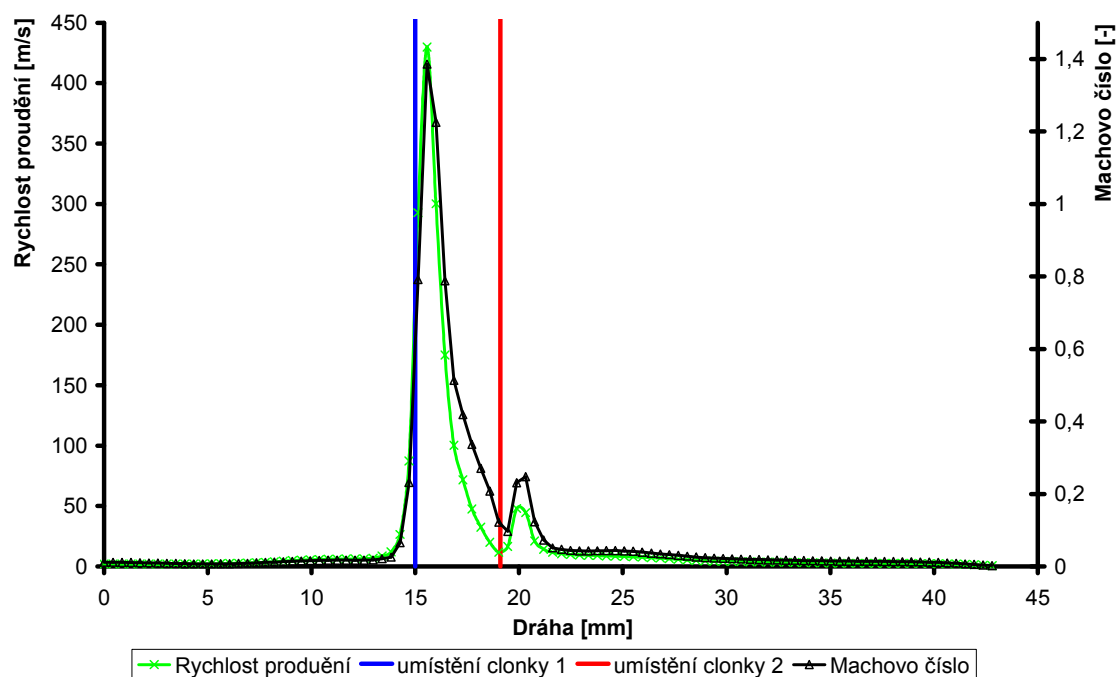
## 6.2. Varianta: 200 8 – 6

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1** a **0,6 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **200 Pa**.

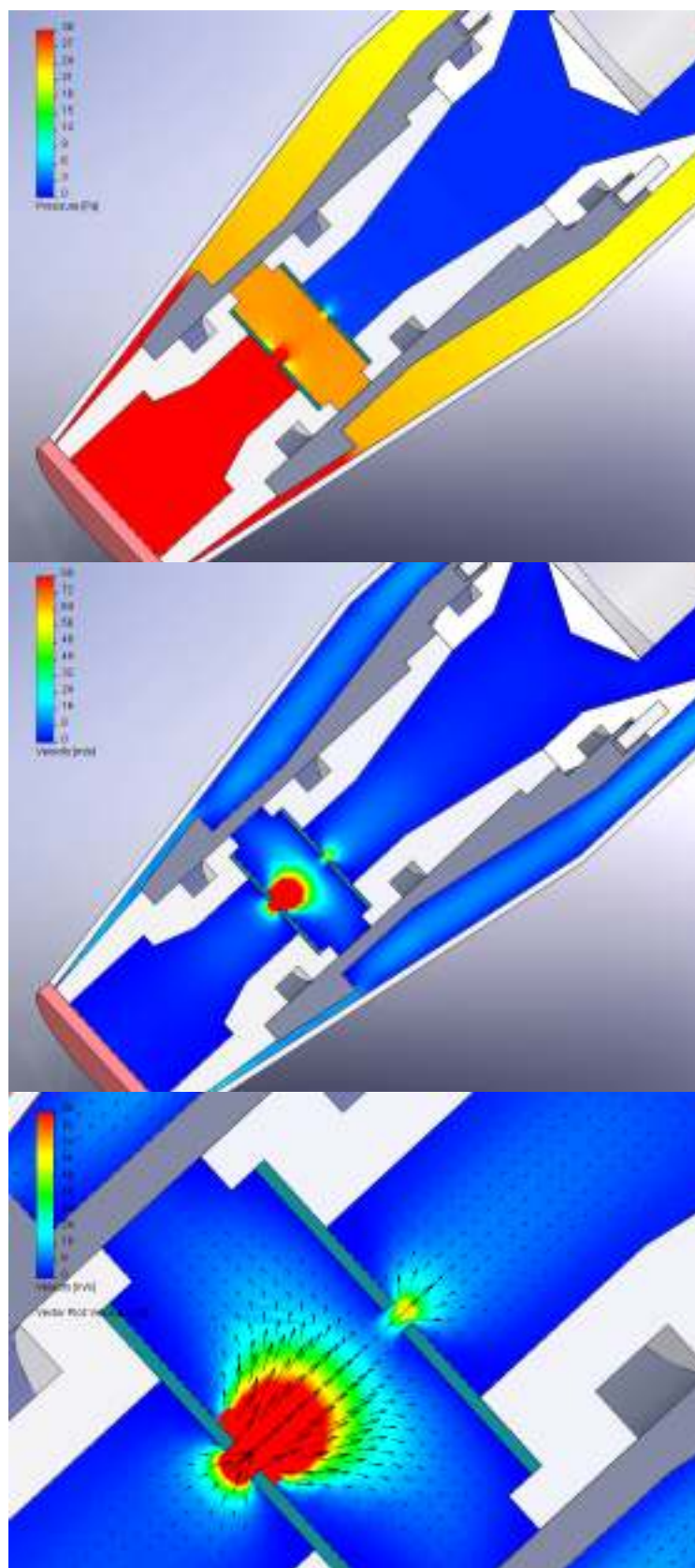
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 75,18 Pa.



Graf 6.3 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 6.4 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

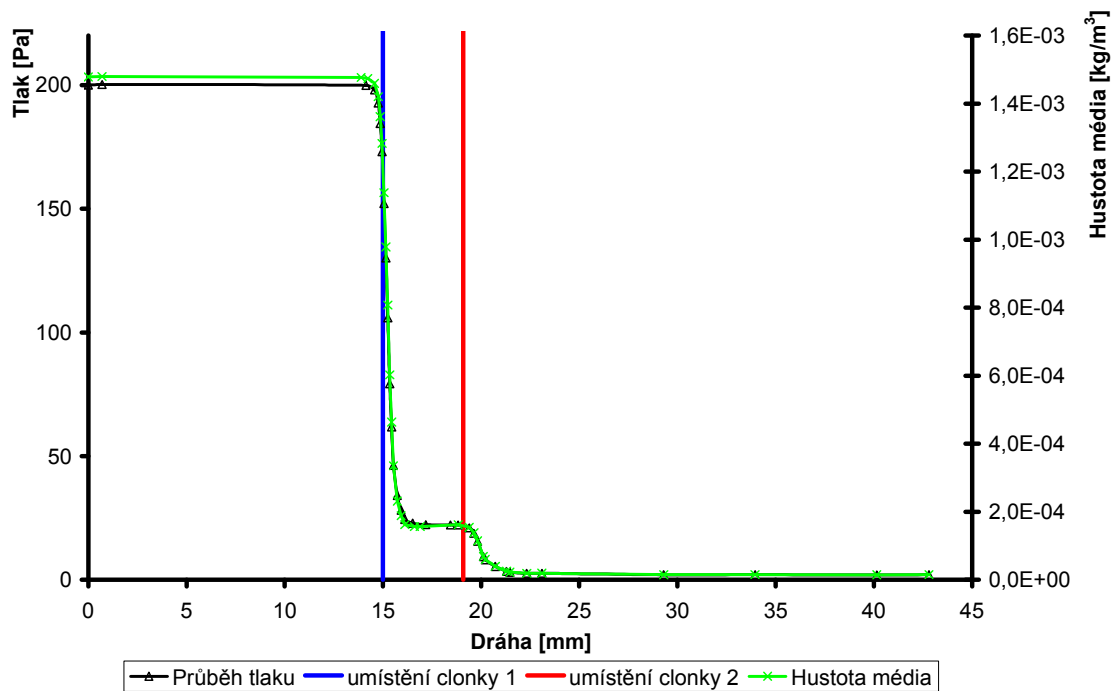


Obrázek 6.2 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

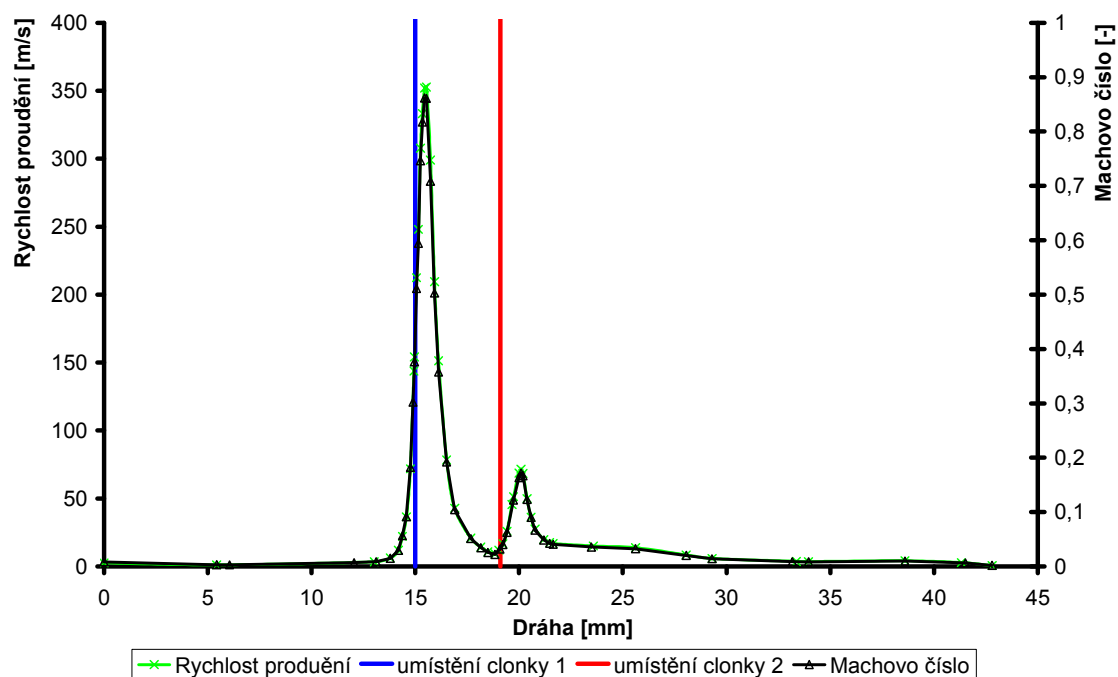
### 6.3. Varianta: 200 6 – 8

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1** a **0,8 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **200 Pa**.

Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 64,66 Pa.

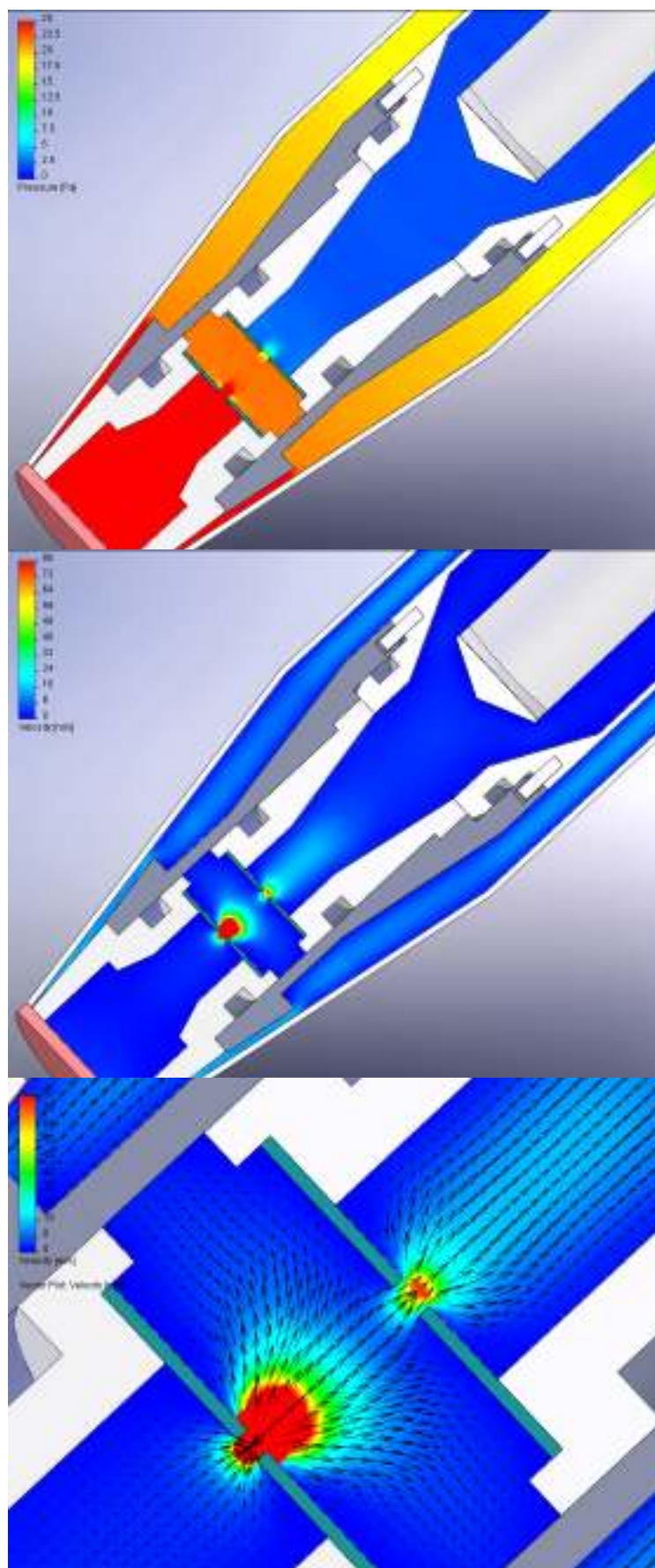


Graf 6.5 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 6.6 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE



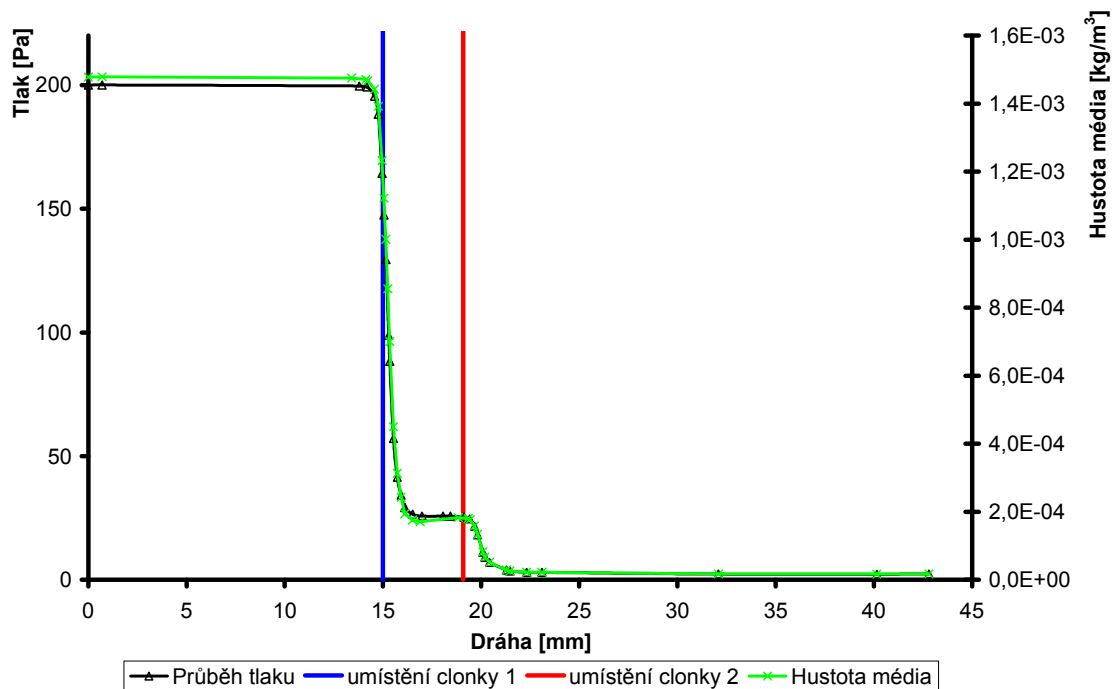


Obrázek 6.3 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

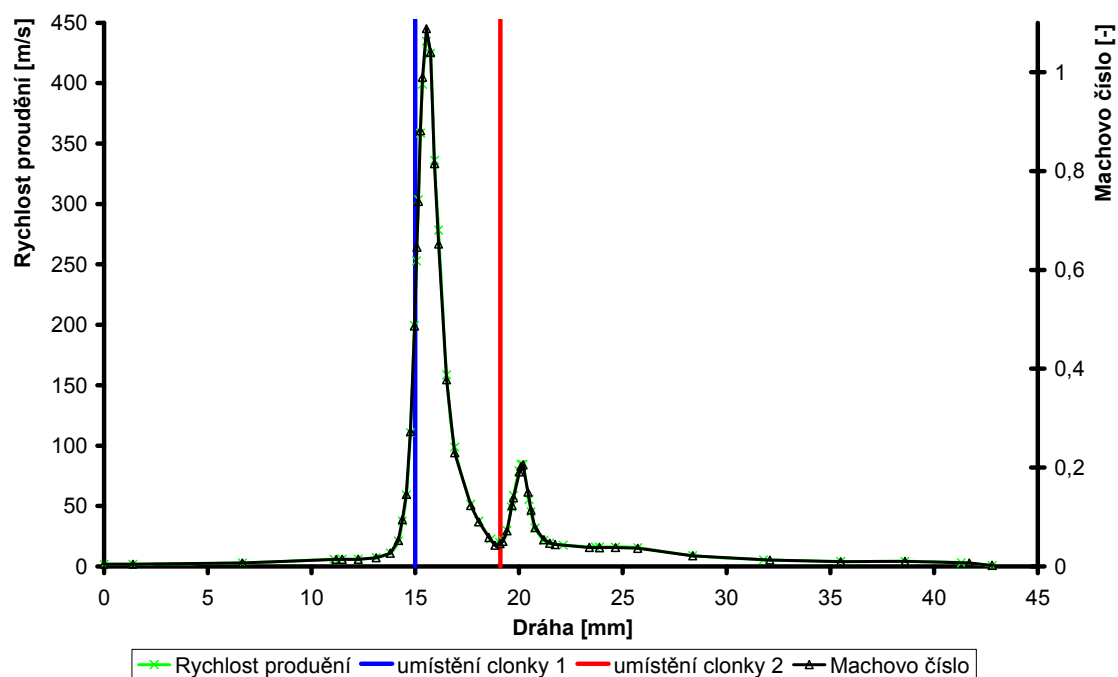
## 6.4. Varianta: 200 8 – 8

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **200 Pa**.

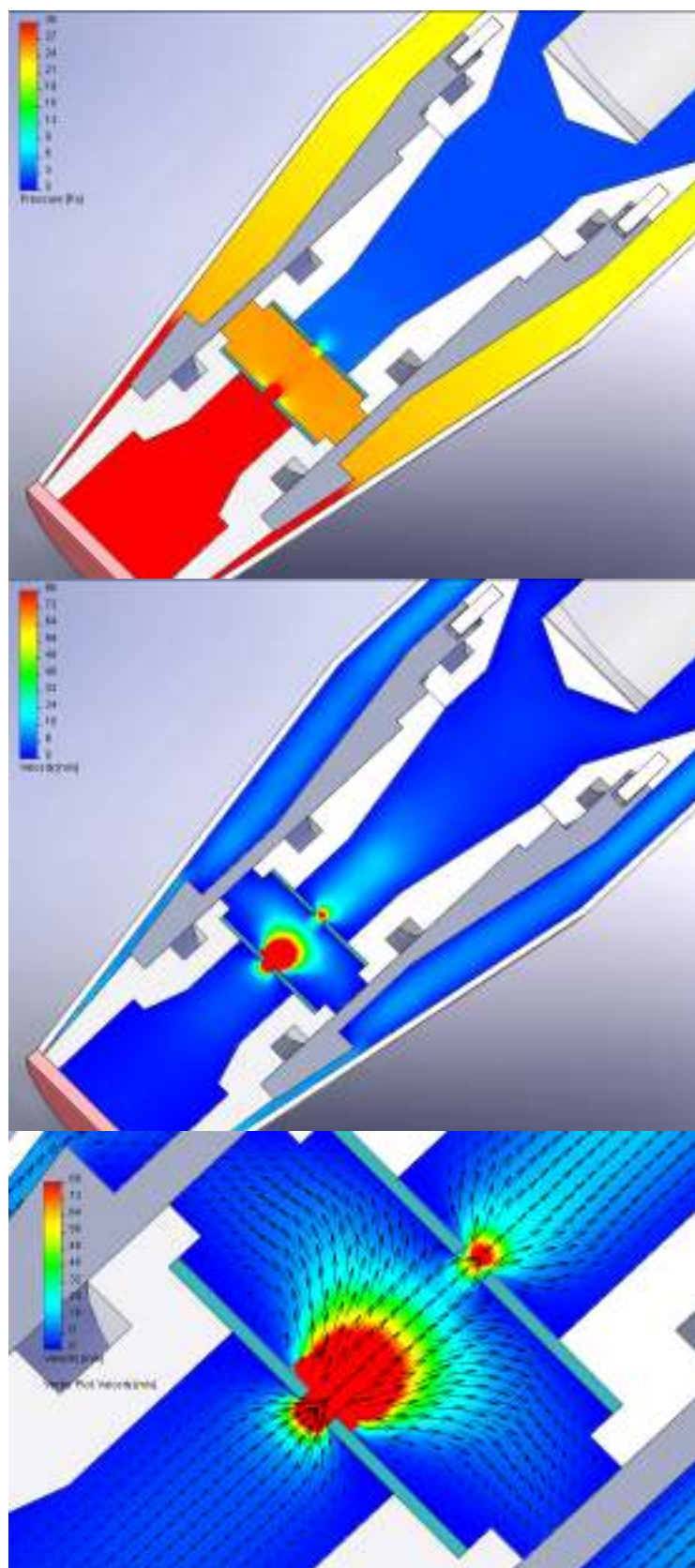
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 67,1 Pa.



Graf 6.7 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 6.8 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE



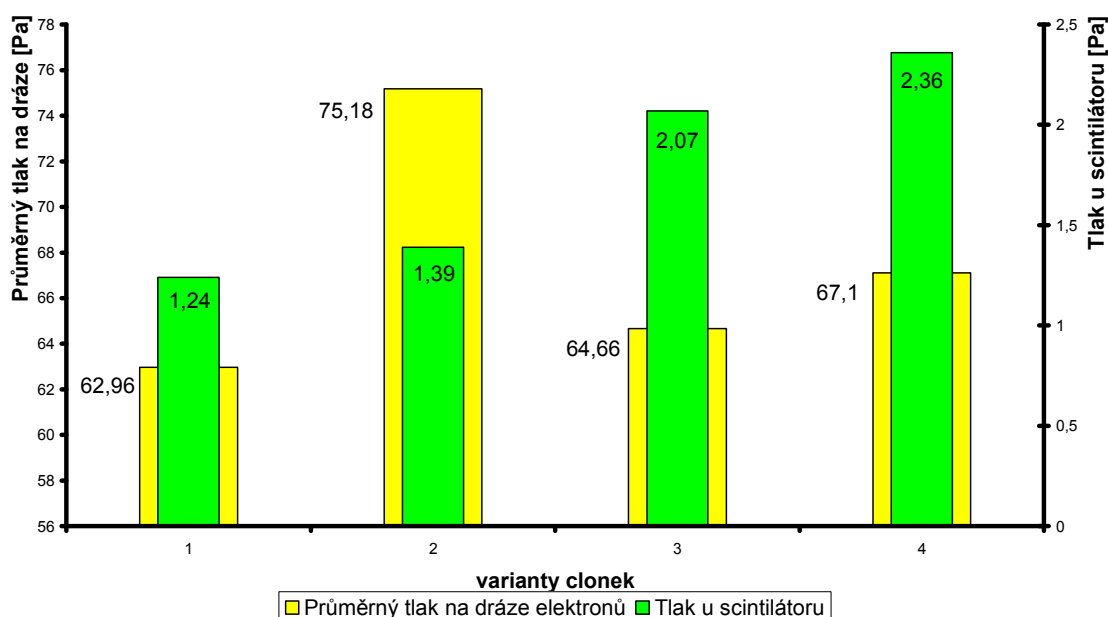
Obrázek 6.4 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění



## 6.5. Shrnutí

	1	2	3	4
Varianty otvorů v clonkách 1 a 2 [mm]	0,6 - 0,6	0,8 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 0,8
Tlak u scintilátoru [Pa]	1,24	1,39	2,07	2,36
Průměrný tlak na dráze elektronů [Pa]	62,96	75,18	64,66	67,1

Tabulka 6.1 Srovnání tlaků (200 Pa v komoře)



Graf 6.9 Srovnání tlaků (200 Pa v komoře)

Z výsledků naměřených v kapitole 6, tedy pro tlak v komoře vzorku 200 Pa vyplývá, že optimální variantou clonek je varianta 1, tedy oba otvory stejné, tj. 0,6 mm a to z uvedených důvodů:

1. tlak u scintilátoru je u všech variant sice malý, ale u této varianty je dokonce nejmenší.
2. průměrný tlak na celé dráze je také nejmenší.

Ale varianta 3, s první clonkou s menším otvorem a druhou s větším, zdá se být také vhodnou variantou, z důvodů, které byly zmíněny v kapitole 5.6.

Hlavní důvod:

Alespoň jeden z otvorů je většího rozměru než 0,6 mm, tedy menší „filtr“ pro proud sekundárních elektronů.

Zatím se tedy pro oba tlaky, tj. 200 i 400 Pa jeví vhodná varianta clonek s prvním otvorem 0,6 mm a druhým 0,8 mm. Uvidíme, jak se toto změnění v následujících kapitolách, tedy pro vyšší tlaky.

## 7. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 600 Pa

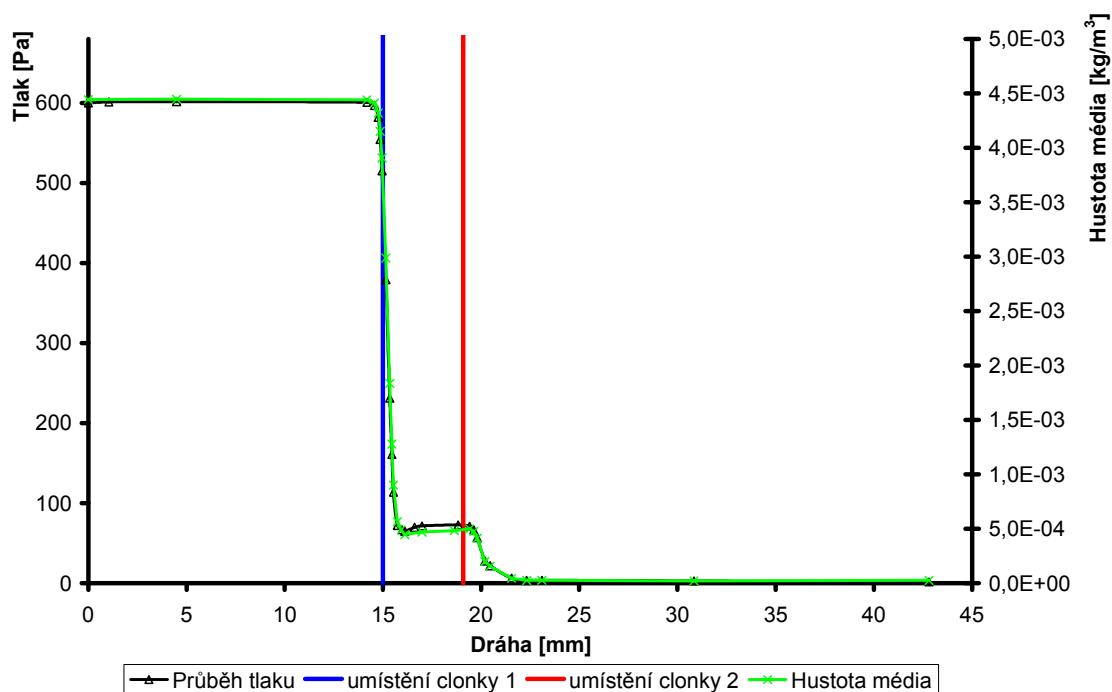
Stejně jako v kapitolách 5 a 6 dle obrázku 5.1 je řešena varianta pro tlak v komoře vzorku 600 Pa a analogicky pro varianty otvorů ve clonkách.

Na následujících stranách je vidět u varianty první clonky s otvorem 0,8 mm a druhé clonky s otvorem 0,6 mm u průběhu rychlosti proudění jisté zaváhání. Doposud rychlost za clonkou dosáhla kritického proudění a pozvolna rychlost klesala až ke clonce číslo 2. Nyní pozvolné klesání rychlosti je v určitém okamžiku přibrzděno, jako by chtělo dojít k opětovnému zvýšení. Tedy je zde náznak jakési začínající pulsace, jinak řečeno opětovné zrychlení.

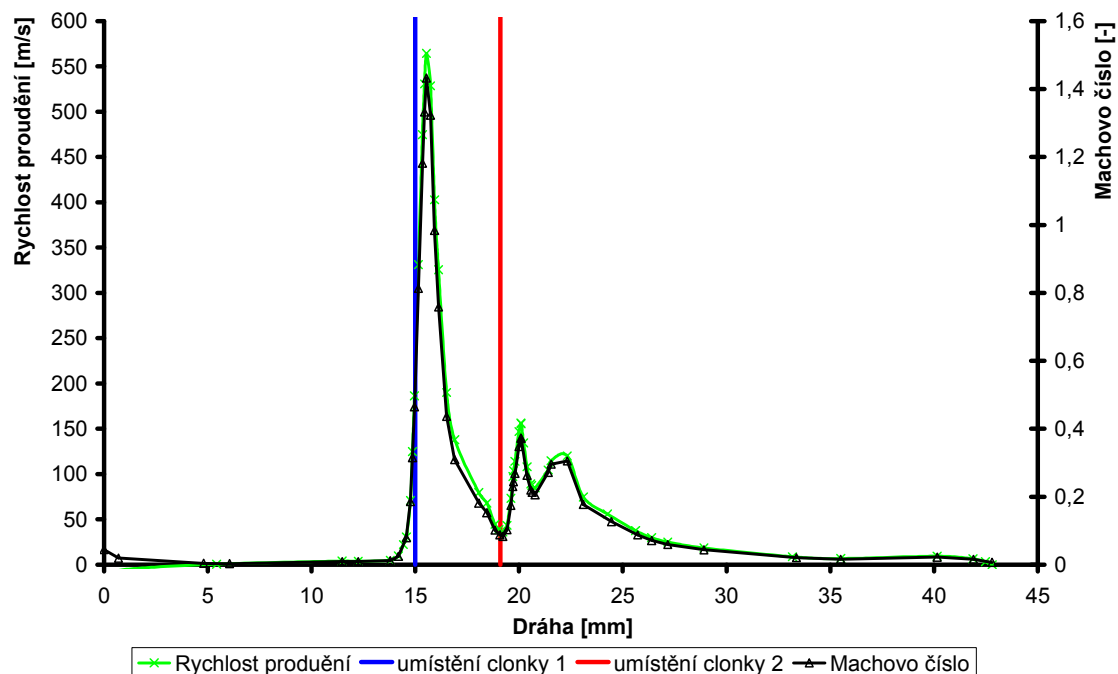
### 7.1. Varianta: 600 6 – 6

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **600 Pa**.

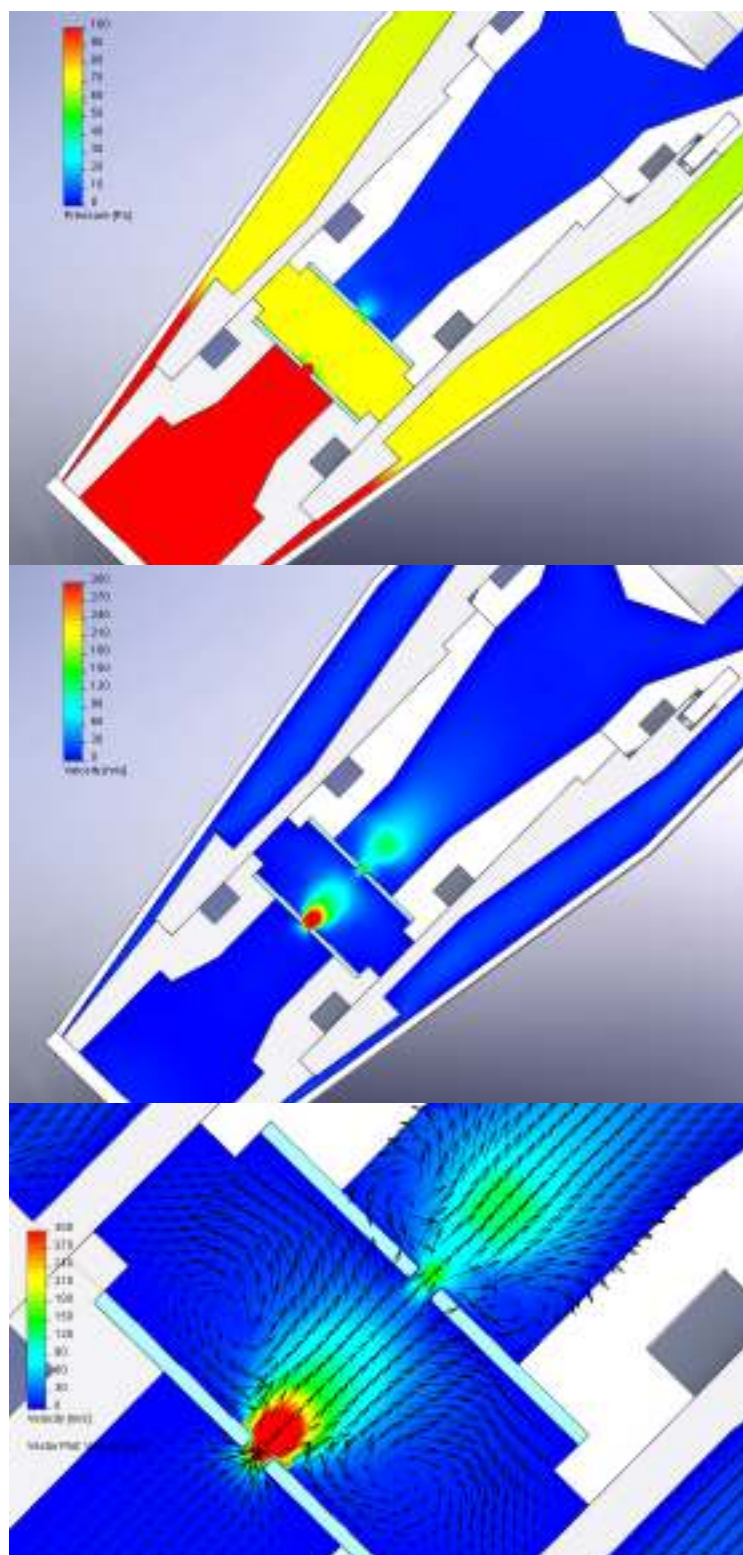
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 22,15 Pa.



Graf 7.1 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 7.2 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

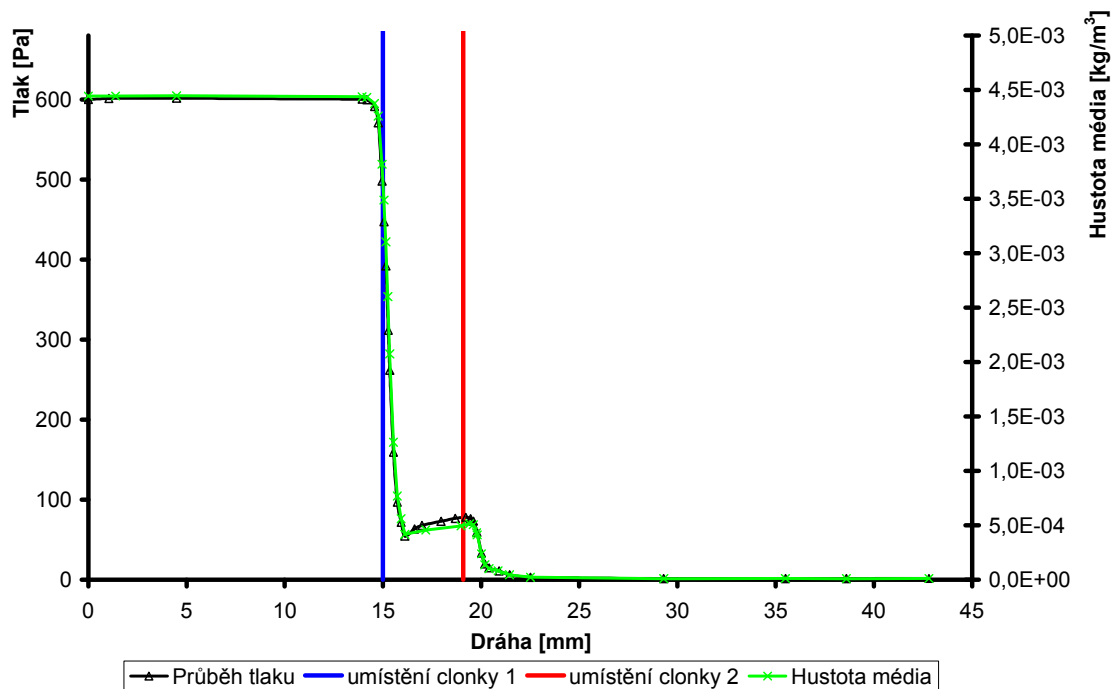


Obrázek 7.1 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

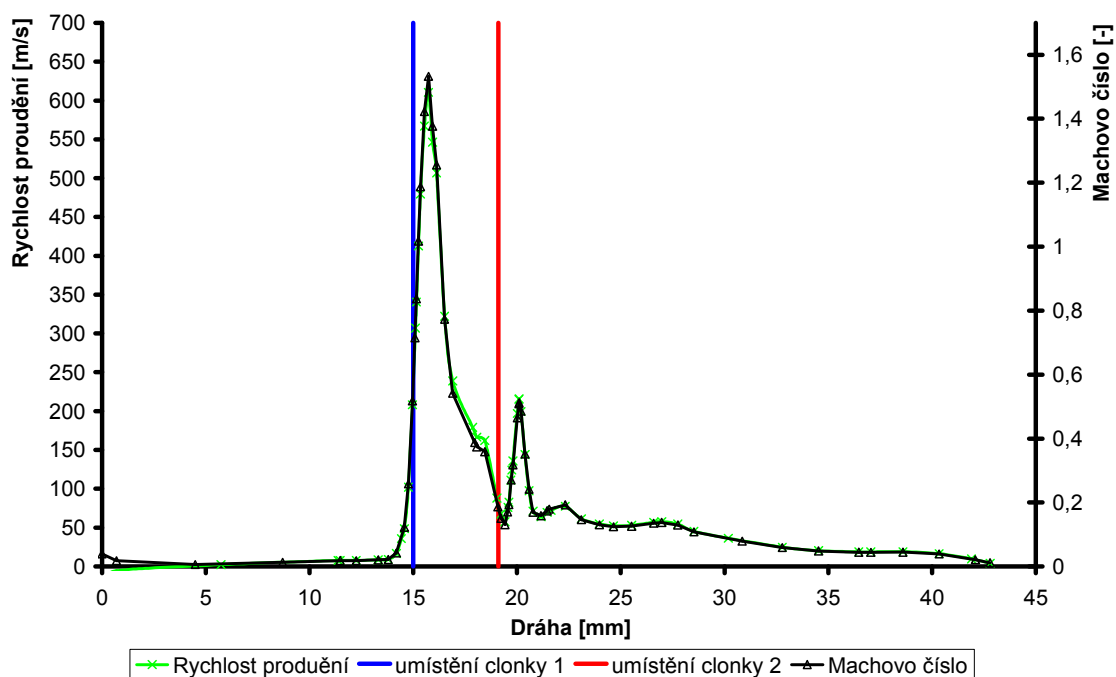
## 7.2. Varianta: 600 8 – 6

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1** a **0,6 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **600 Pa**.

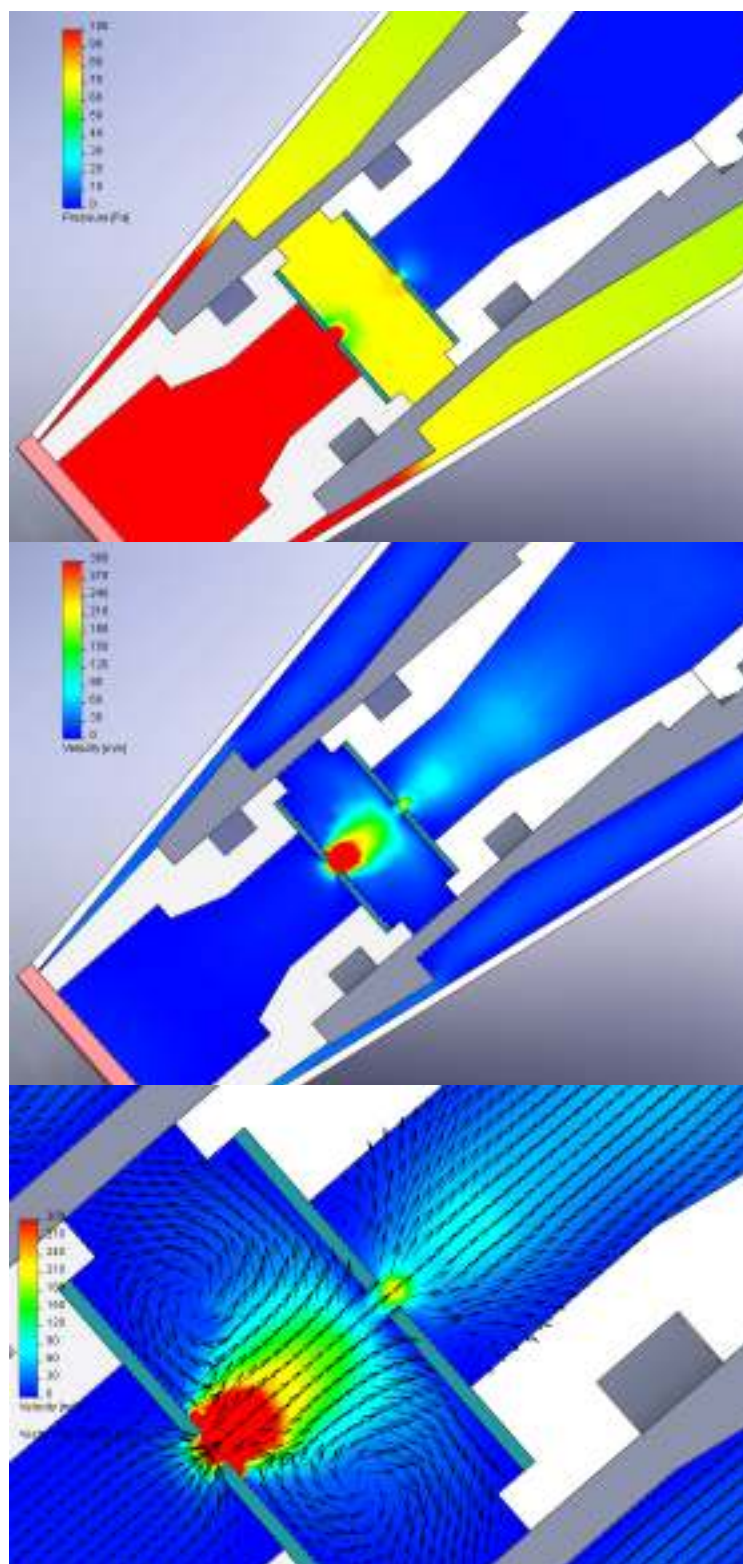
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 209,51 Pa.



Graf 7.3 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 7.4 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

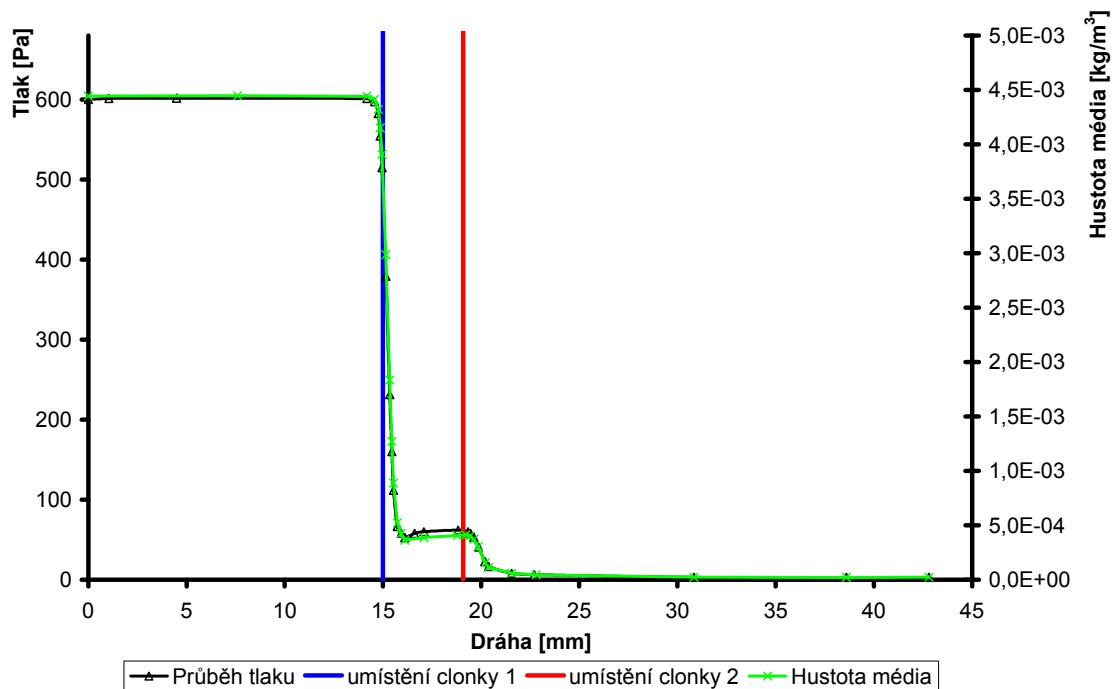


Obrázek 7.2 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

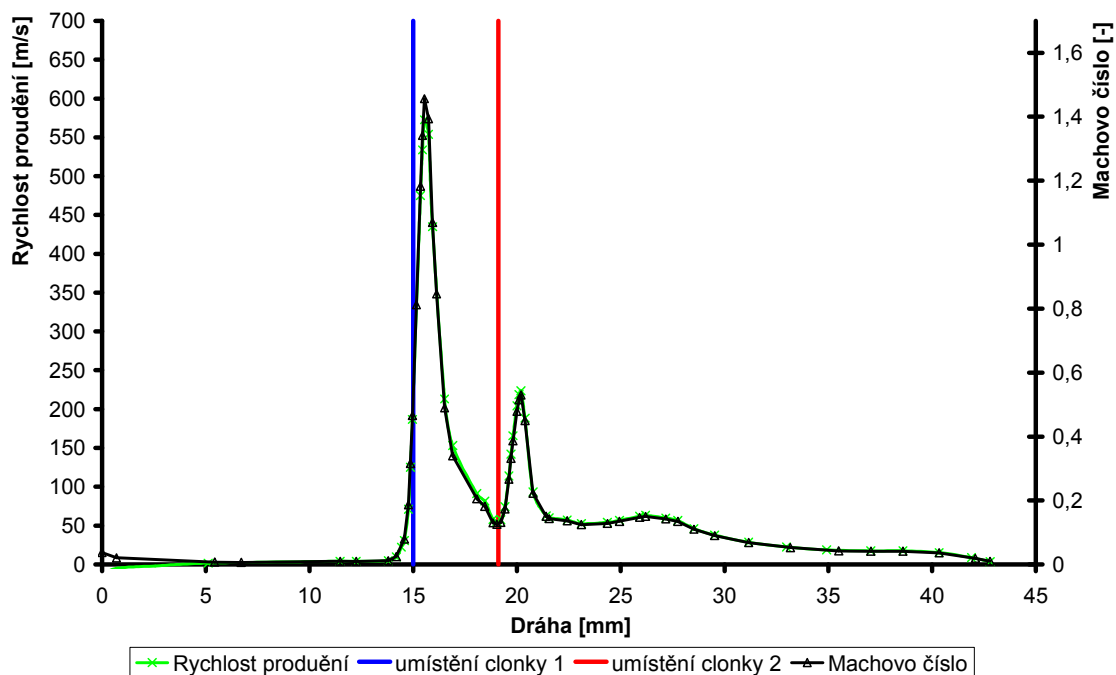
### 7.3. Varianta: 600 6 – 8

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1** a **0,8 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **600 Pa**.

Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 212,74 Pa.

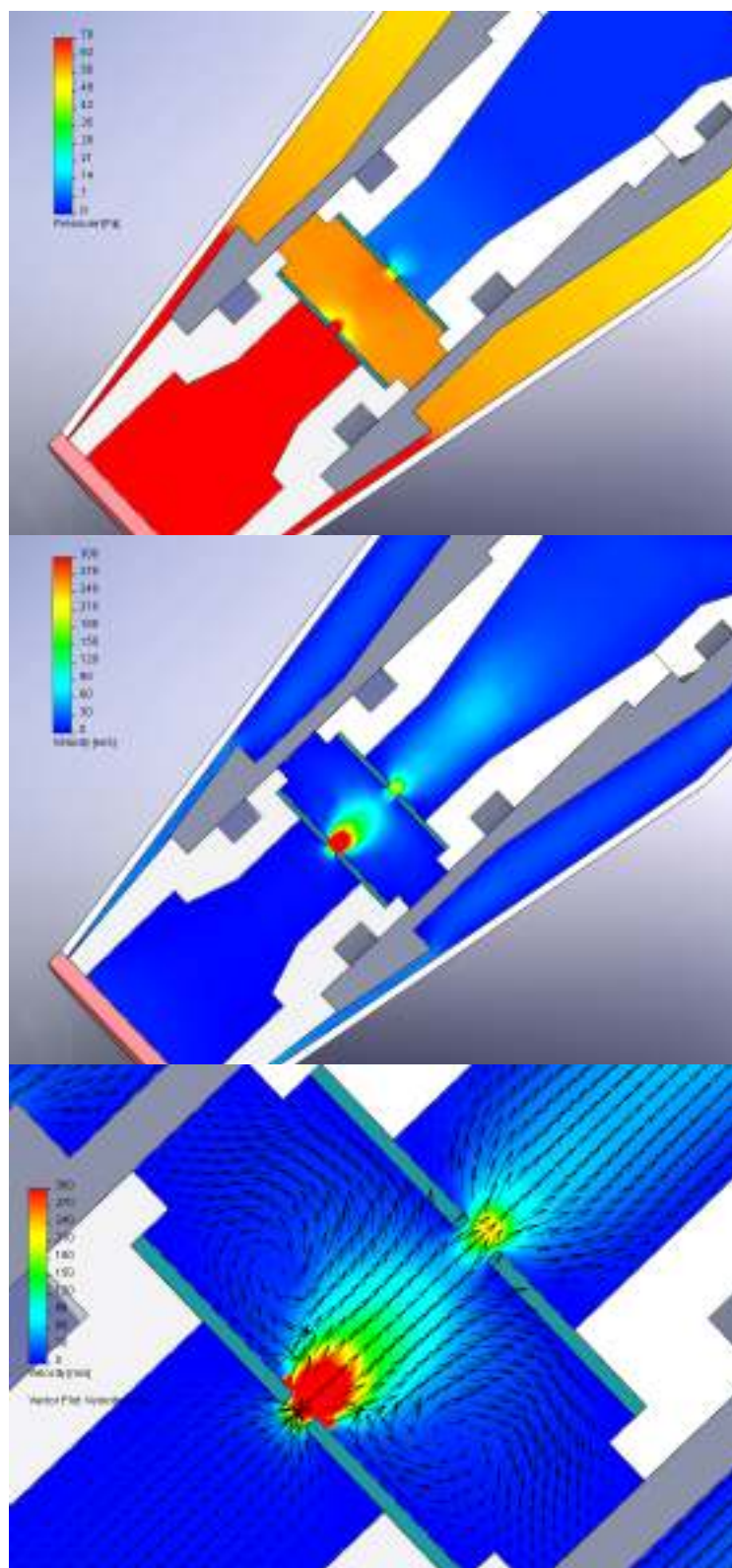


Graf 7.5 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 7.6 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE





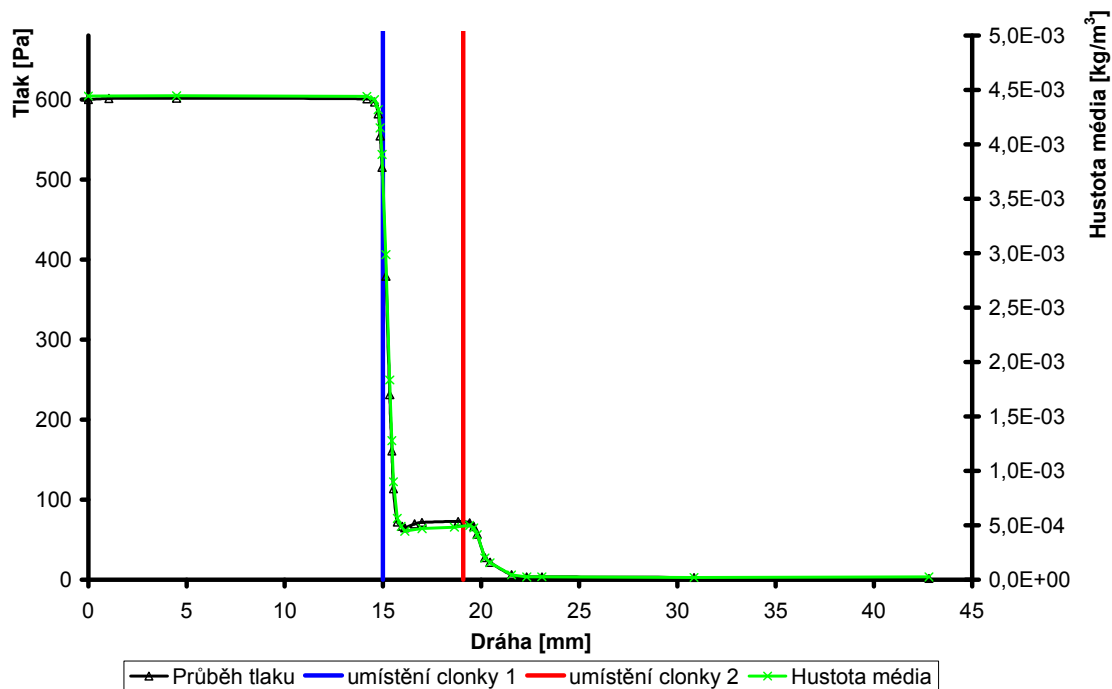
Obrázek 7.3 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění



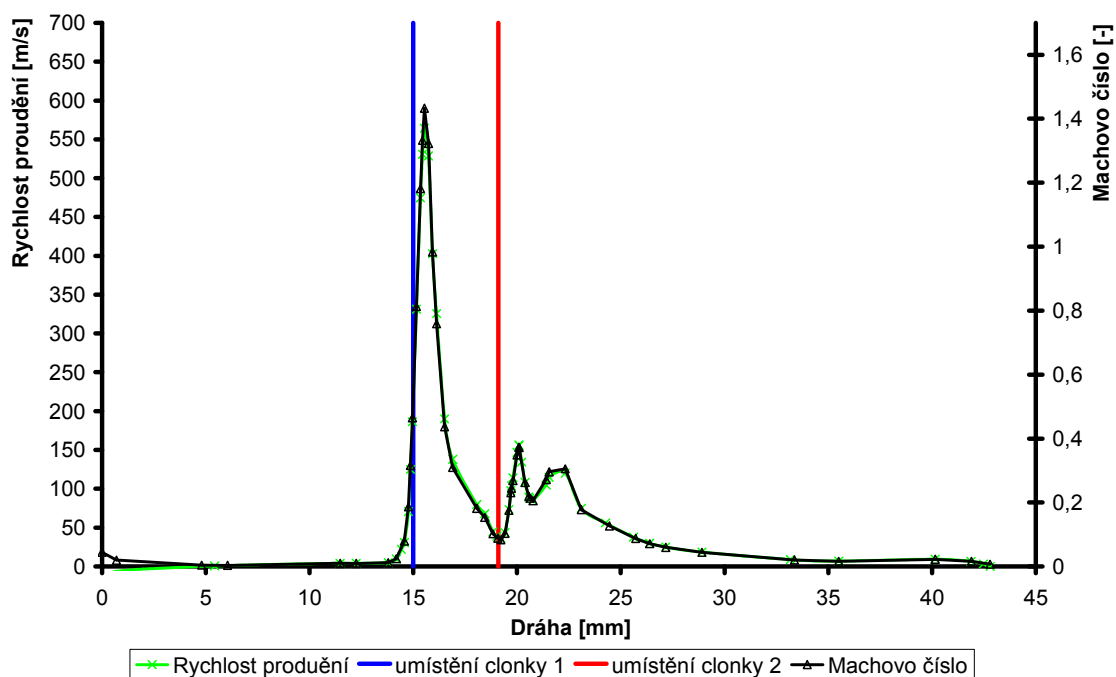
## 7.4. Varianta: 600 8 – 8

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **600 Pa**.

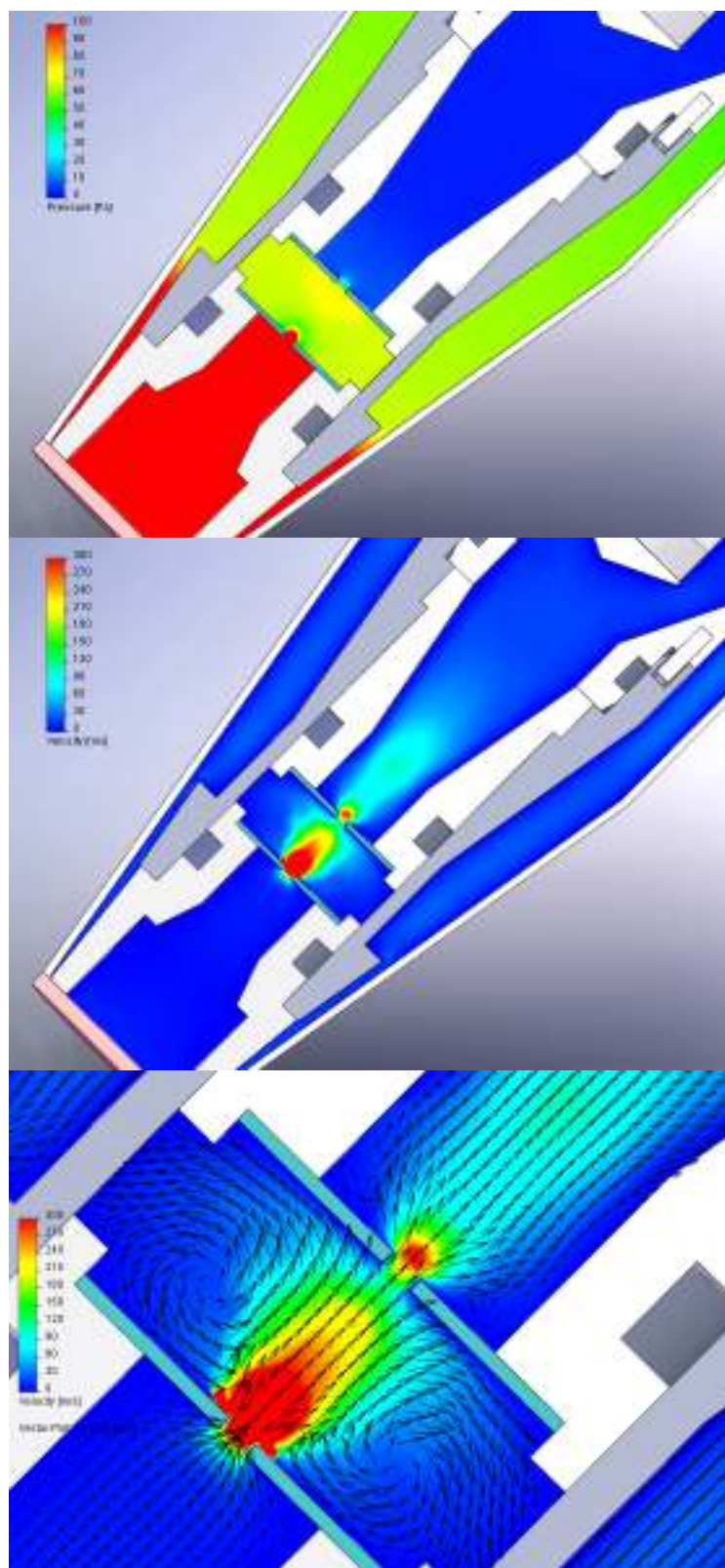
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 222,15 Pa.



Graf 7.7 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 7.8 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

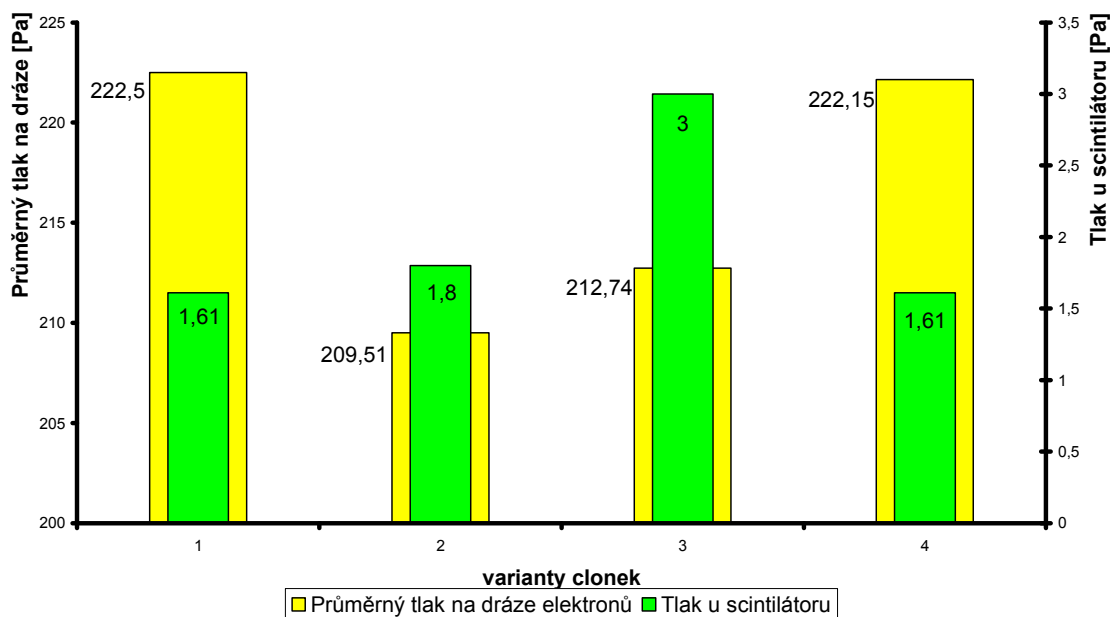


Obrázek 7.4 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

## 7.5. Shrnutí

	1	2	3	4
Varianty otvorů v clonkách 1 a 2 [mm]	0,6 - 0,6	0,8 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 0,8
Tlak u scintilátoru [Pa]	1,61	1,8	3	1,61
Průměrný tlak na dráze elektronů [Pa]	222,5	209,51	212,74	222,15

Tabulka 7.1 Srovnání tlaků (600 Pa v komoře)



Graf 7.9 Srovnání tlaků (600 Pa v komoře)

V grafu 7.9 je vidět, že tlak u scintilátoru je dostatečně malý, aby nezpůsobil žádný výboj a tím neohrozil funkci detektoru. Nejnižší průměrný tlak na dráze sekundárních elektronů je při variantě 2, a tedy je patrné, že tato varianta s otvory 0,8 mm – 0,6 mm je nejvhodnější při zkoumání v tlaku v komoře vzorku 600 Pa. Jistý podíl na této skutečnosti má zmíněná začínající pulsace za první clonkou.

V předchozích případech (tlaky 200 Pa a 400 Pa v komoře vzorku) bylo zřejmé, že i varianta 3 zdála se být optimální. Při tlaku 600 Pa se zdá být varianty 3 taktéž postačující, průměrný tlak na dráze je druhý nejmenší, i když tlak u scintilátoru je nejvyšší, ale k výboji zdaleka nedojde.

## 8. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 800 Pa

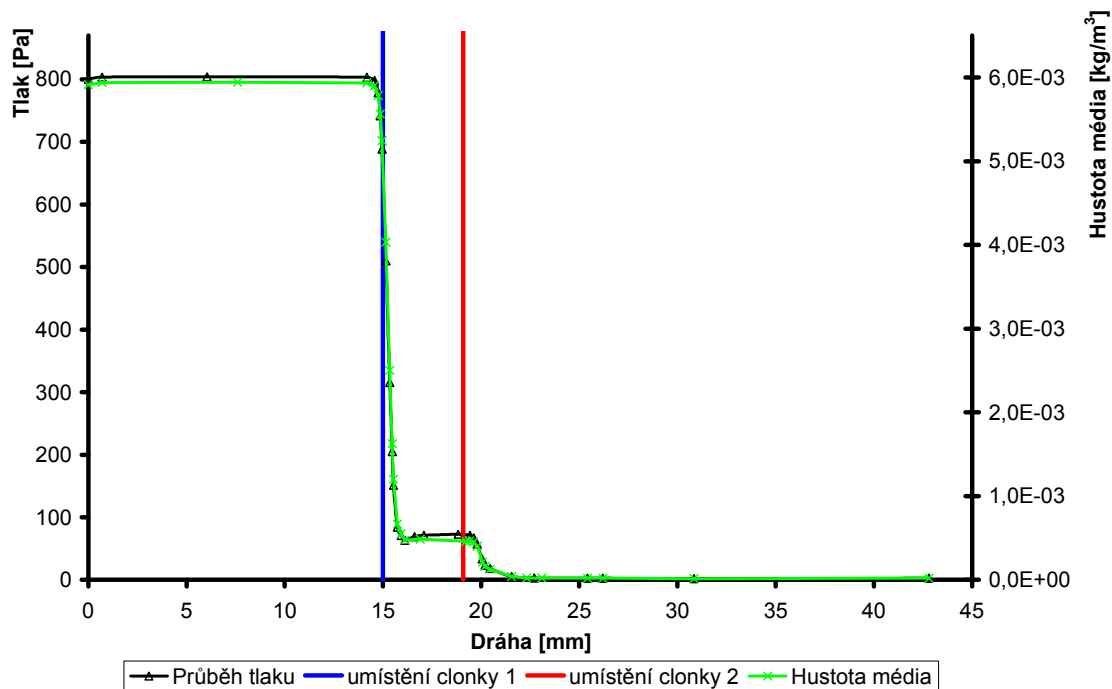
Další sada variant je pro tlak v komoře 800 Pa. Opět stejná zkoumaná dráha viz obrázek 5.1.

Můžeme si všimnout, že od tohoto zkoumaného tlaku již naplno propukla jistá pulsace ( fáze opětného zrychlení) mezi první a druhou clonkou. Tento jev je popsán podrobně v kapitole 10.

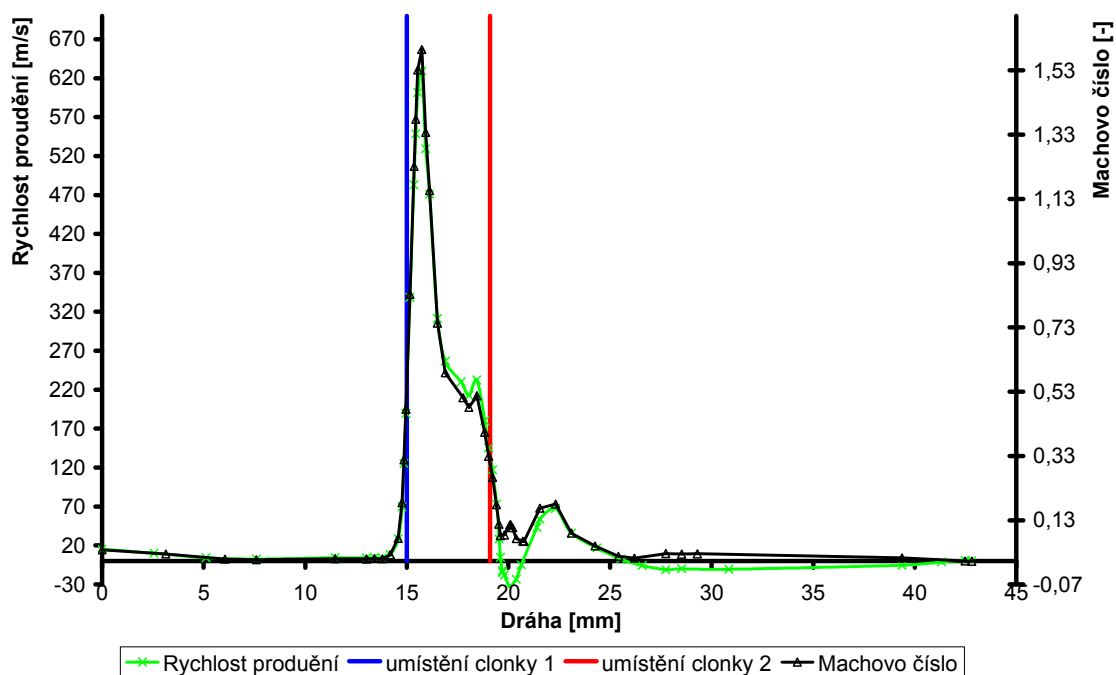
## 8.1. Varianta: 800 6 – 6

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1** a **0,8 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **400 Pa**.

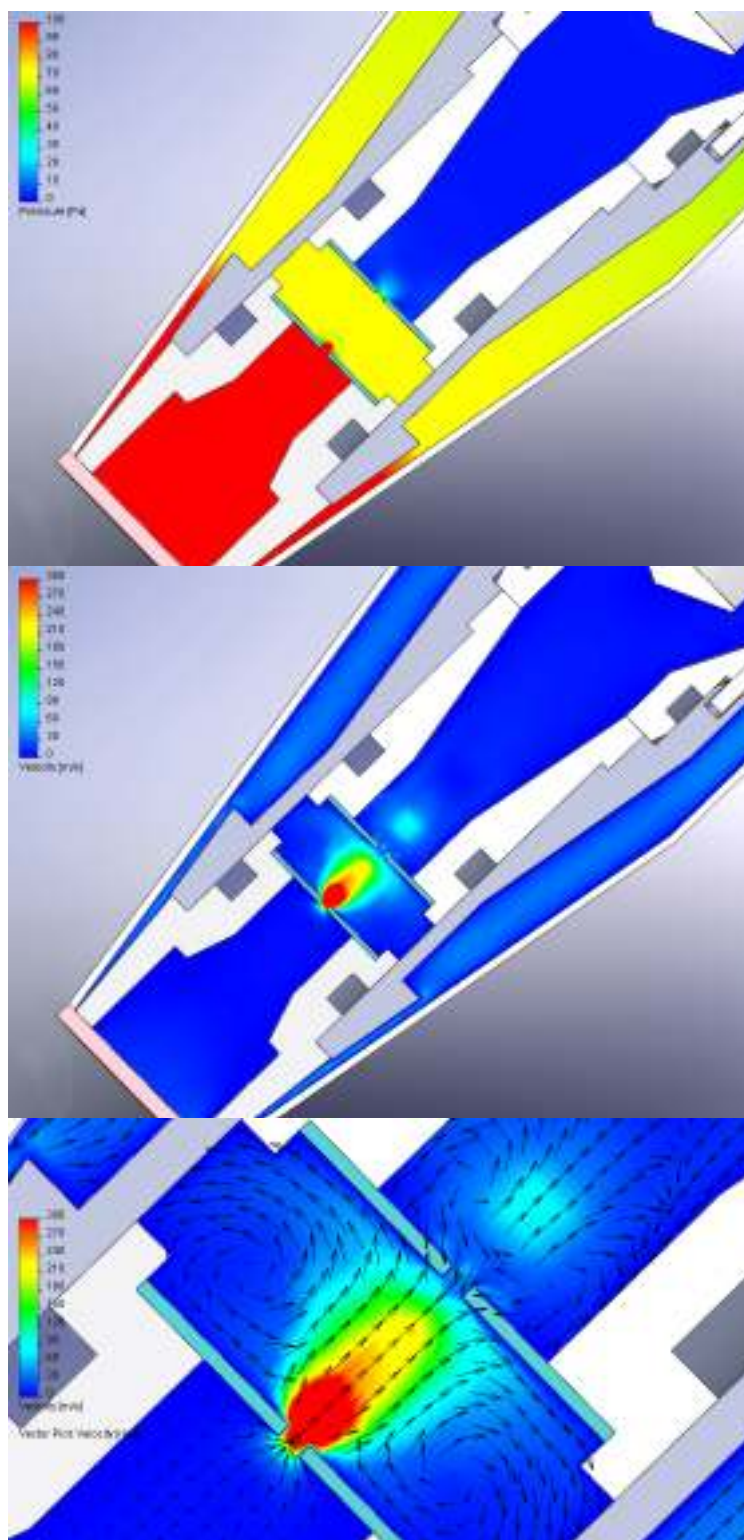
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 270,63 Pa.



Graf 8.1 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 8.2 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

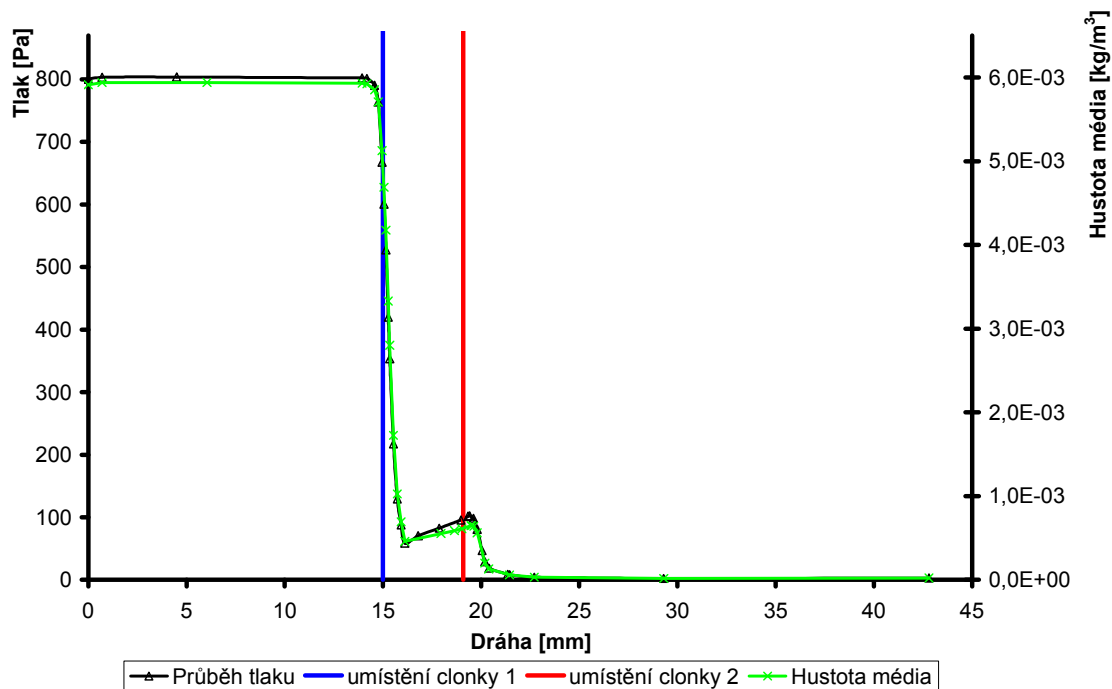


Obrázek 8.1 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

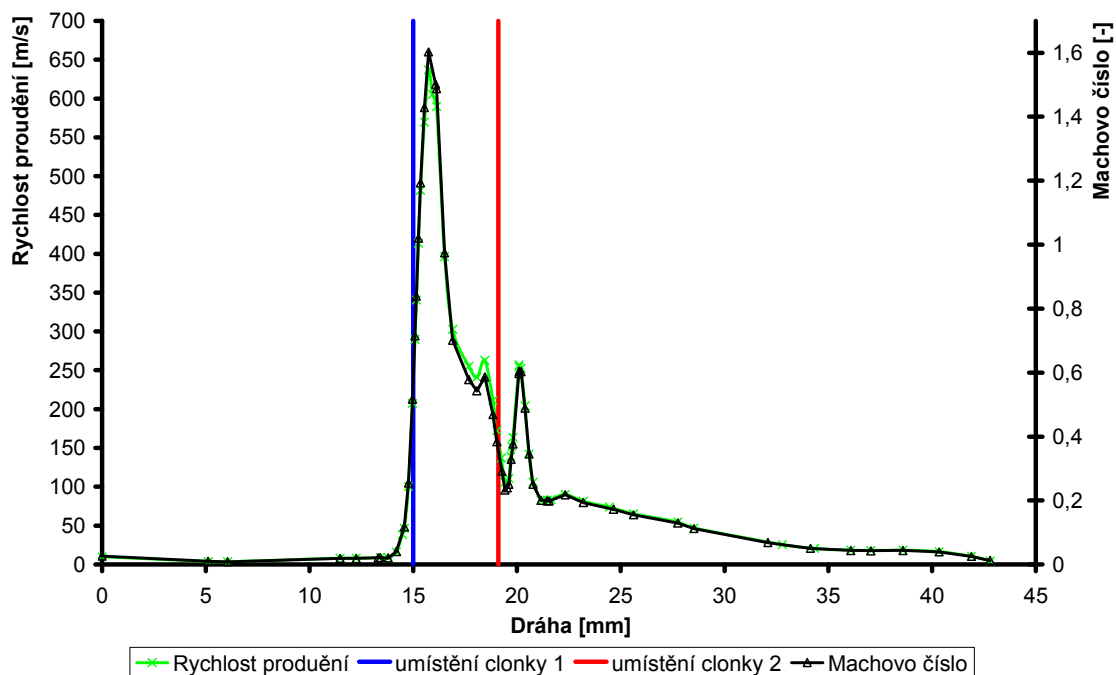
## 8.2. Varianta: 800 8 – 6

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1** a **0,6 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **800 Pa**.

Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 302,53 Pa.

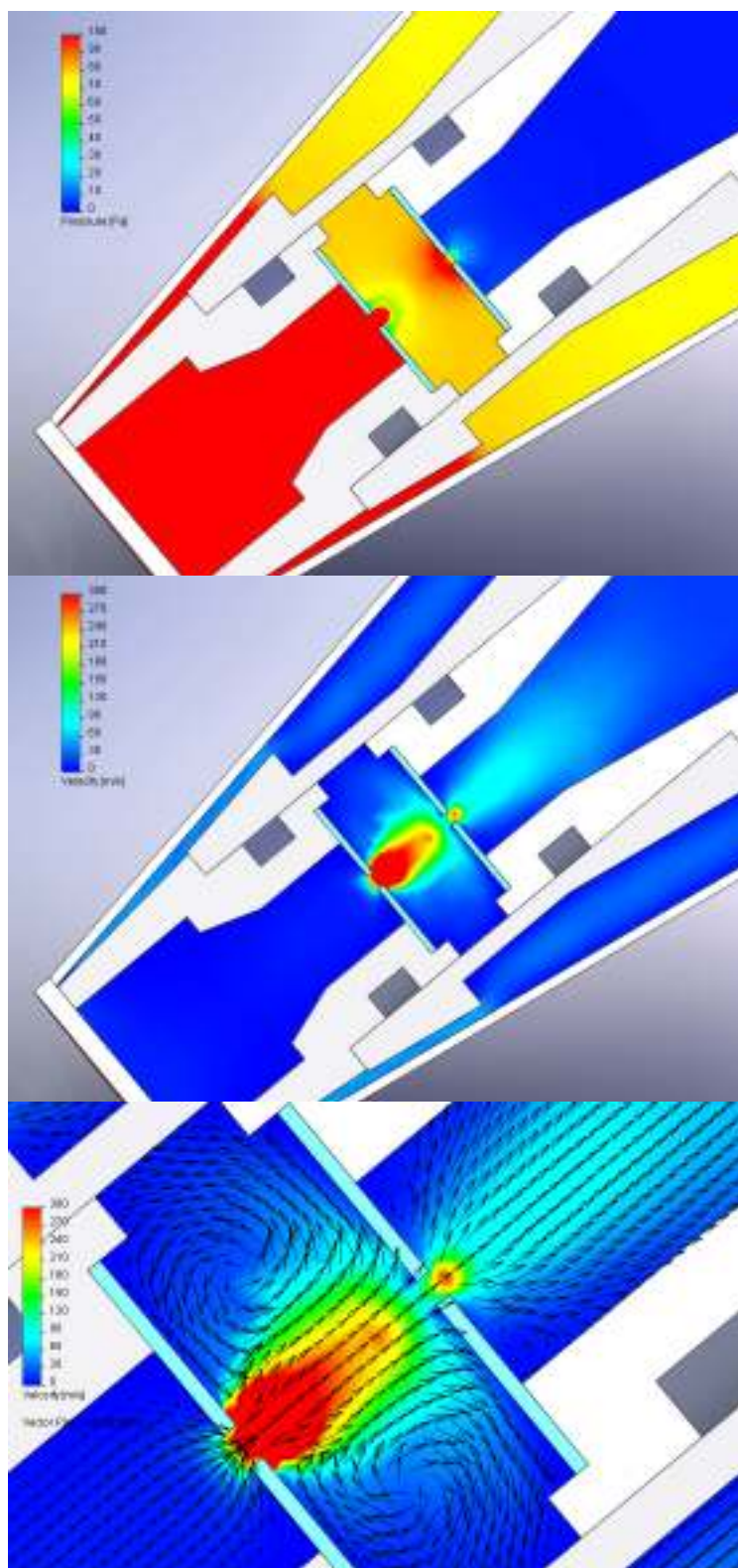


Graf 8.3 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 8.4 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE



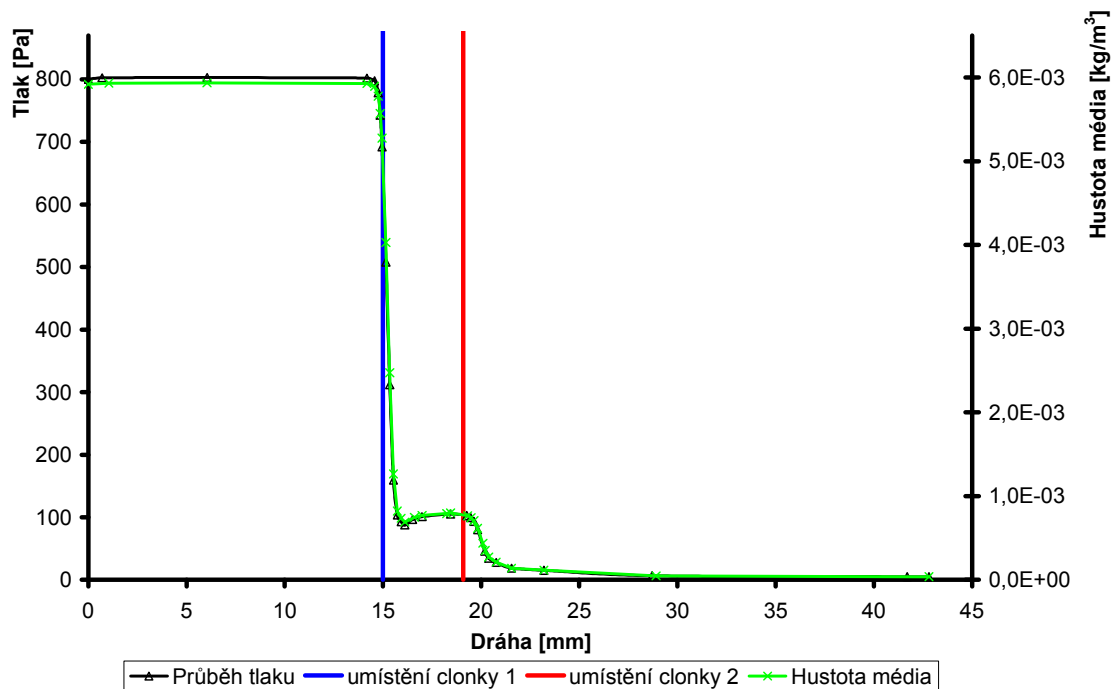


Obrázek 8.2 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

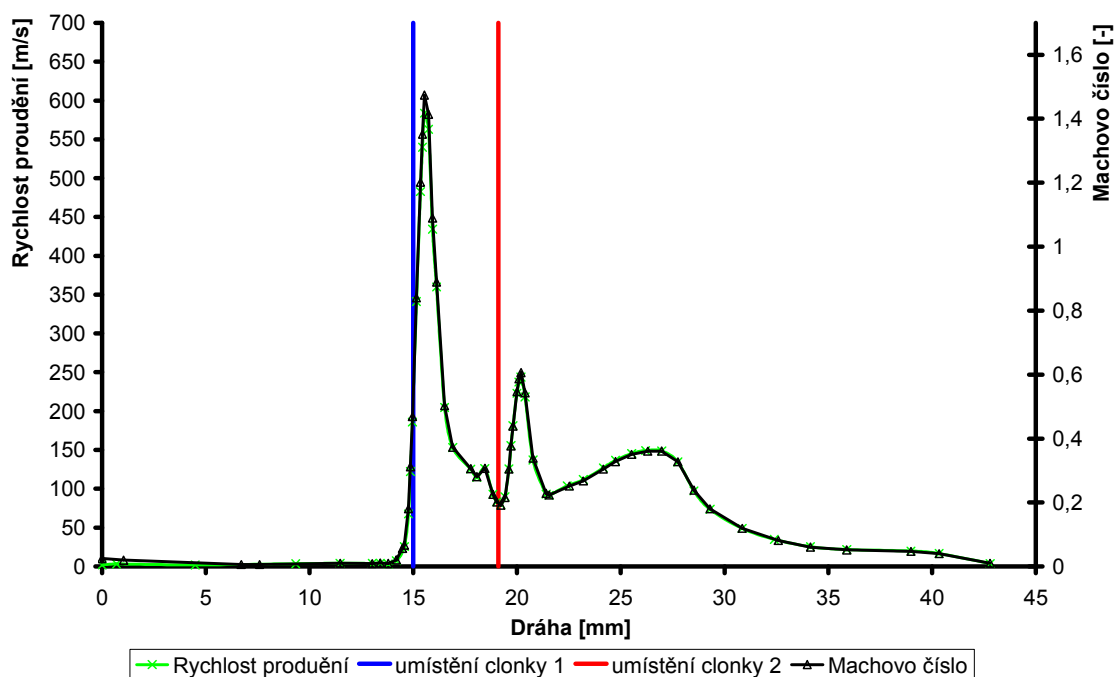
### 8.3. Varianta: 800 6 – 8

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1** a **0,8 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **800 Pa**.

Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 286,86 Pa.

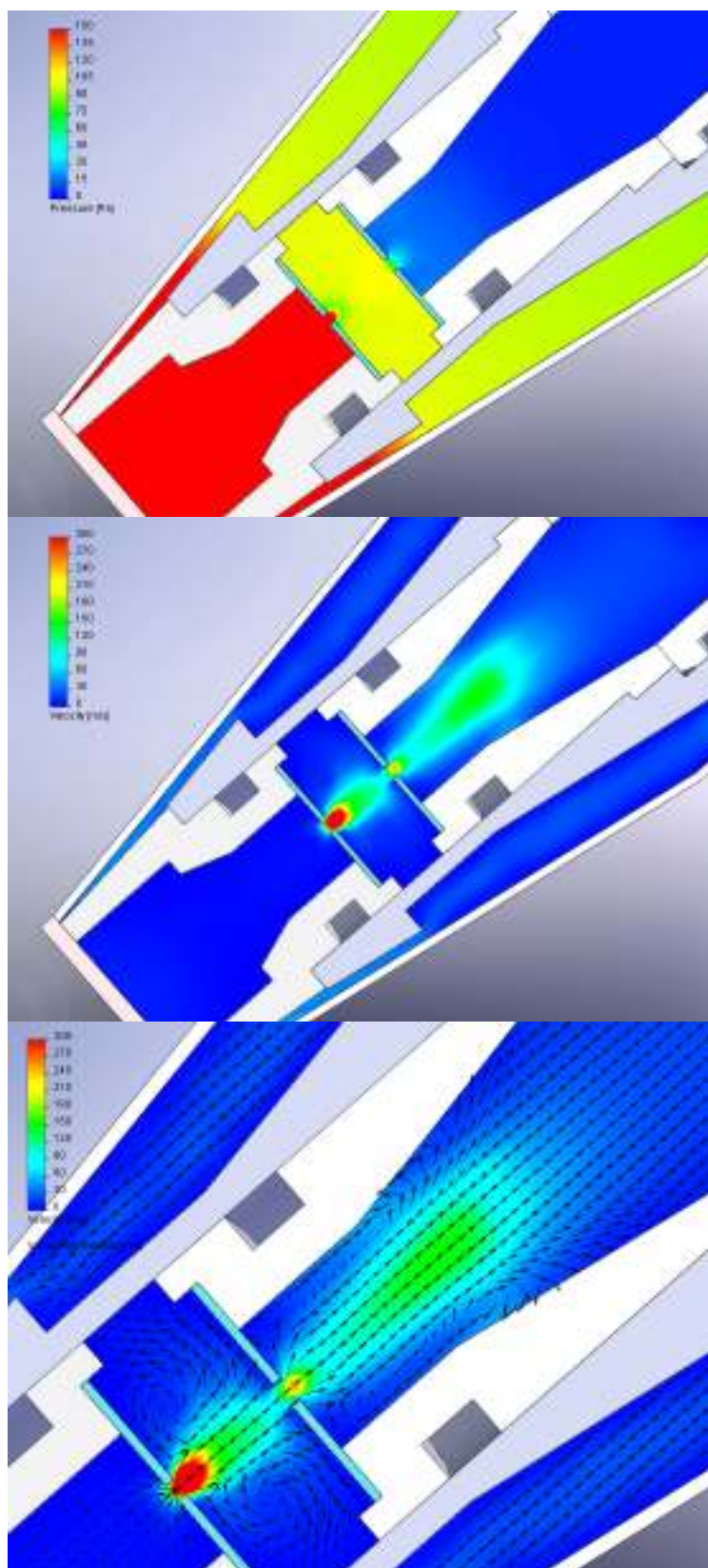


Graf 8.5 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 8.6 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE



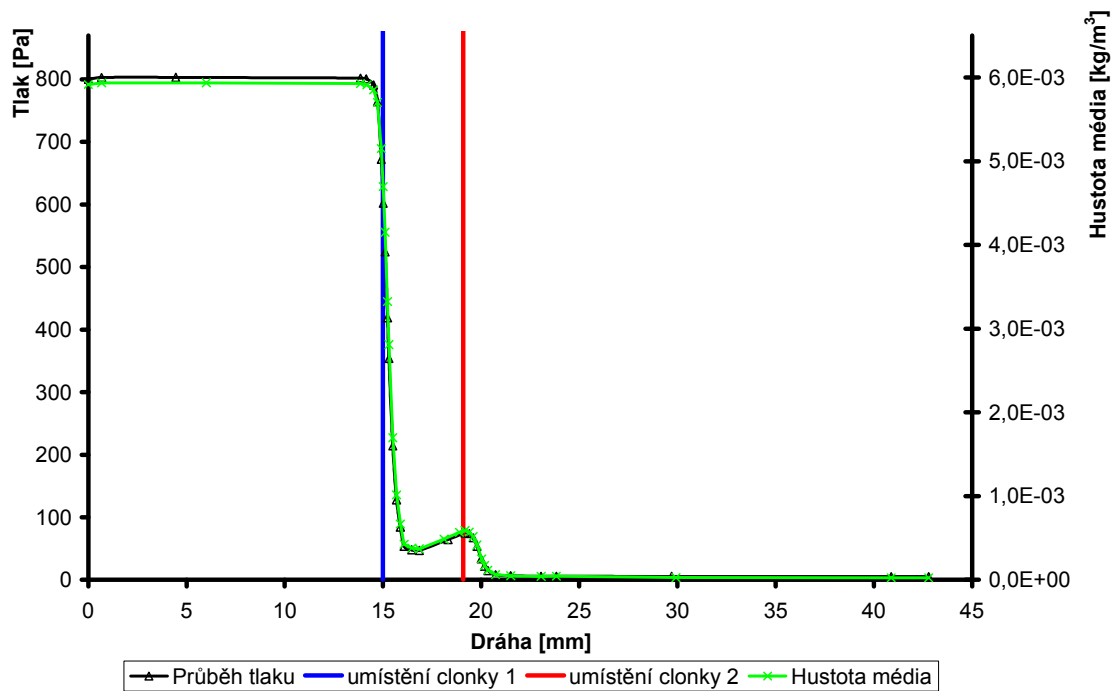


Obrázek 8.3 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

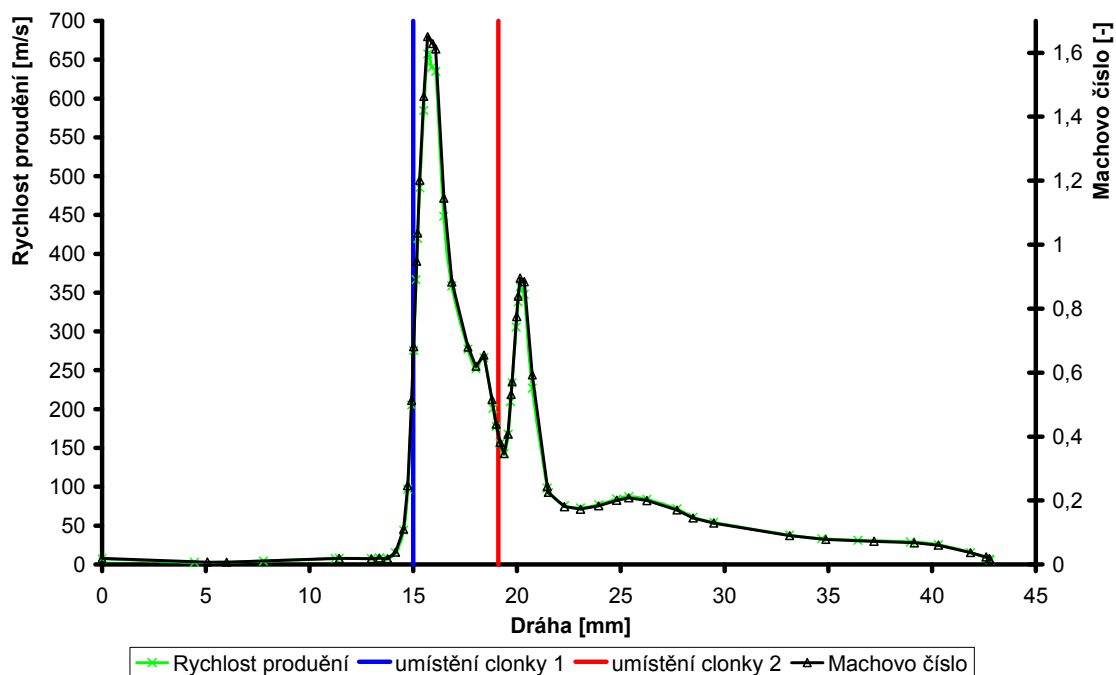
## 8.4. Varianta: 800 8 – 8

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **800 Pa**.

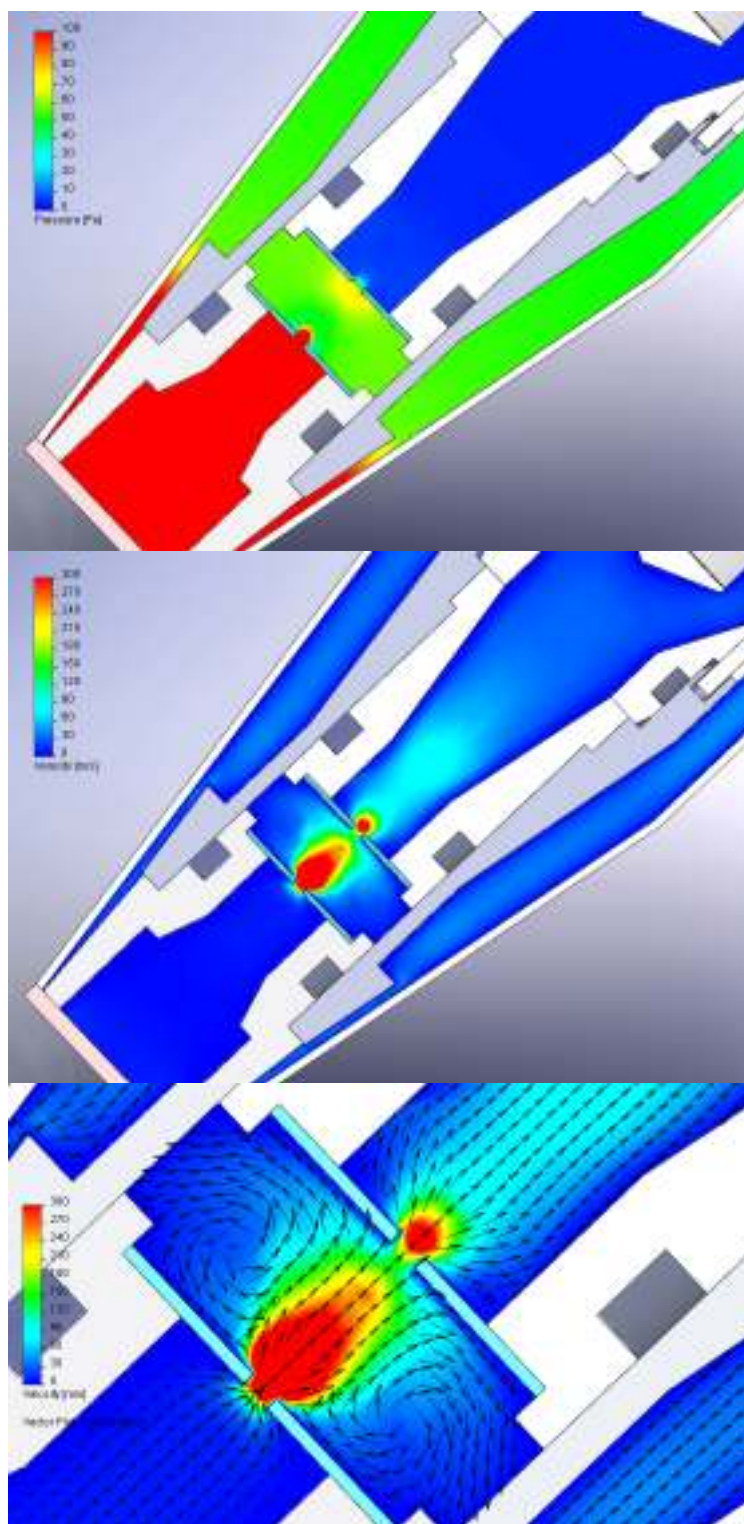
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 277,48 Pa.



Graf 8.7 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 8.8 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

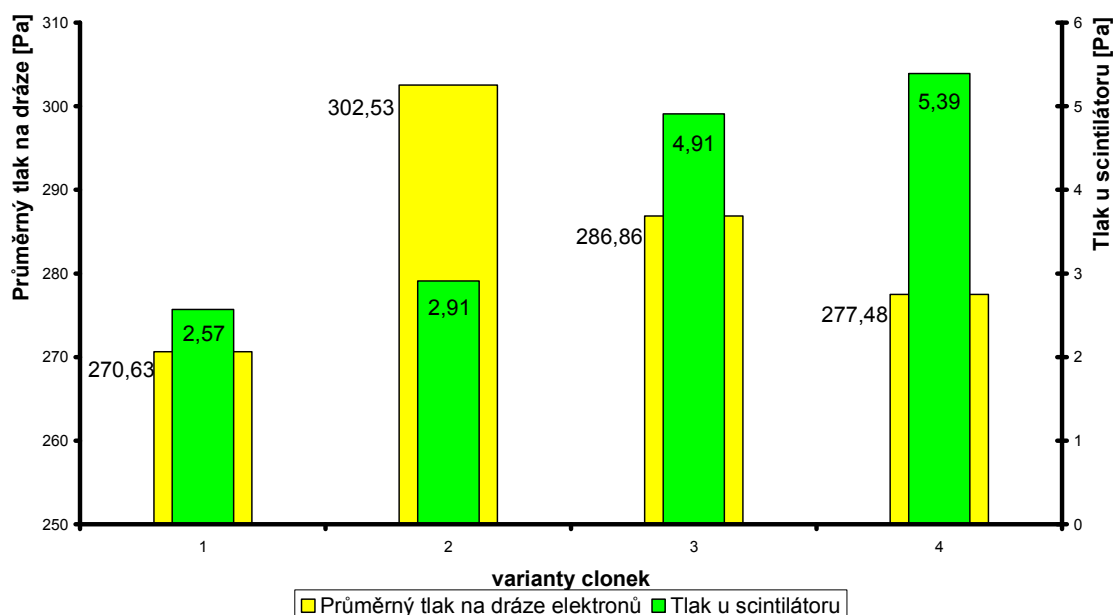


Obrázek 8.4 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

## 8.5. Shrnutí

	1	2	3	4
Varianty otvorů v clonkách 1 a 2 [mm]	0,6 - 0,6	0,8 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 0,8
Tlak u scintilátoru [Pa]	2,57	2,91	4,91	5,39
Průměrný tlak na dráze elektronů [Pa]	270,63	302,53	286,86	277,48

Tabulka 8.1 Srovnání tlaků (800 Pa v komoře)



Graf 8.9 Srovnání tlaků (800 Pa v komoře)

Jak se projevil tlak v komoře vzorku 800 Pa a jak se projevila zmíněná pulsace na výsledky? Průměrný tlak na dráze je u varianty rozdílný, nejmenší u varianty 1. Tlak u scintilátoru je nejmenší také u varianty 1, z toho vyplývá, že tato možnost, kdy jsou oba otvory 0,6 mm je nejlepší řešení. S přihlédnutím na předchozí výsledky se dá říci i o variantě 3 jako o postačující ke správné funkci, ale ne nejlepší.

## 9. Vyhodnocení dráhy sekundárních elektronů pro tlak v komoře vzorku 1000 Pa

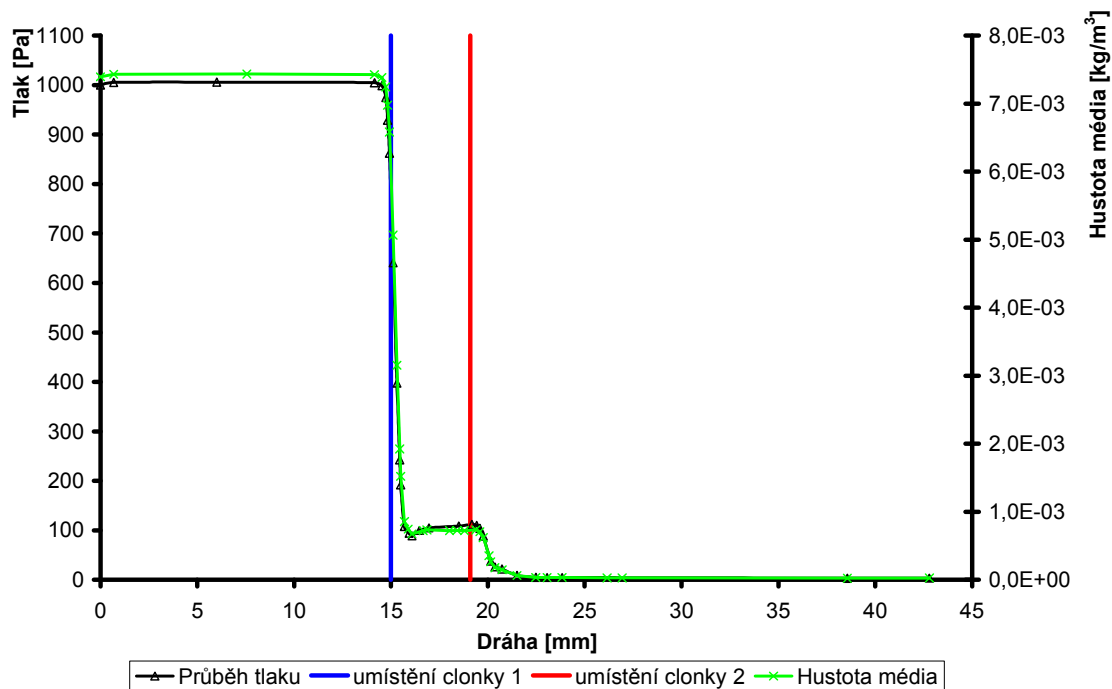
Jako poslední měření je uvedena varianta 1000 Pa v komoře vzorku. Analogicky jako v předchozích kapitolách jde o zkoumání dráhy sekundárních elektronů viz obrázek 5.1.

Jde o poslední zkoumanou sadu, kde se opět naplno projevuje pulsace mezi clonkami.

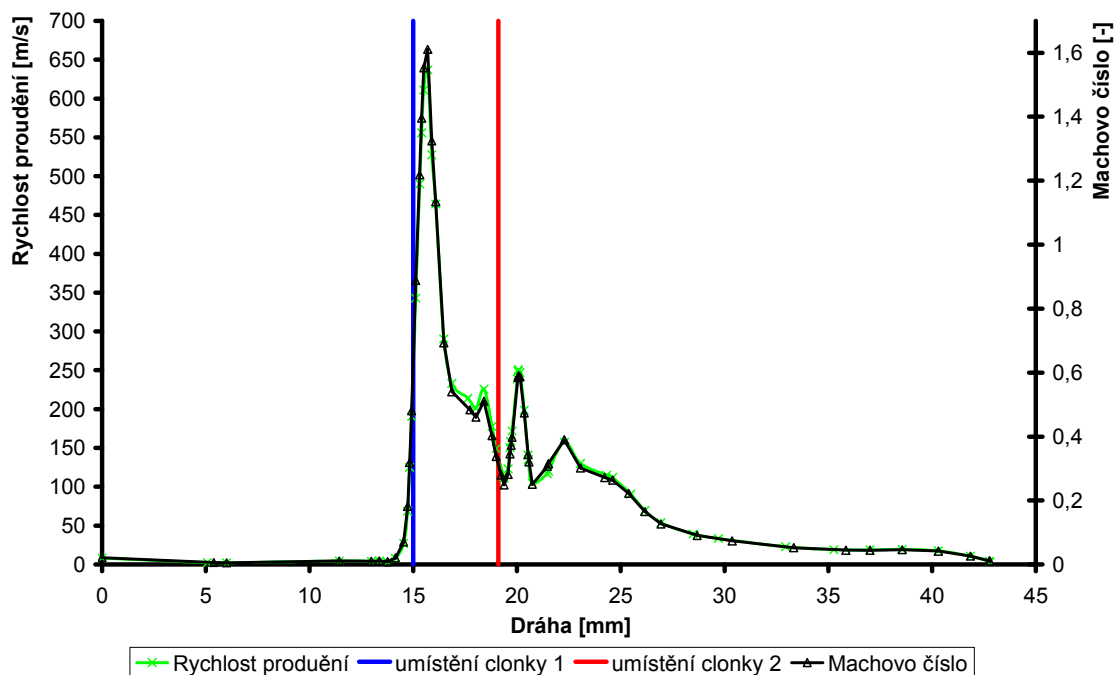
## 9.1. Varianta: 1000 6 – 6

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **1000 Pa**.

Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 335,08 Pa.

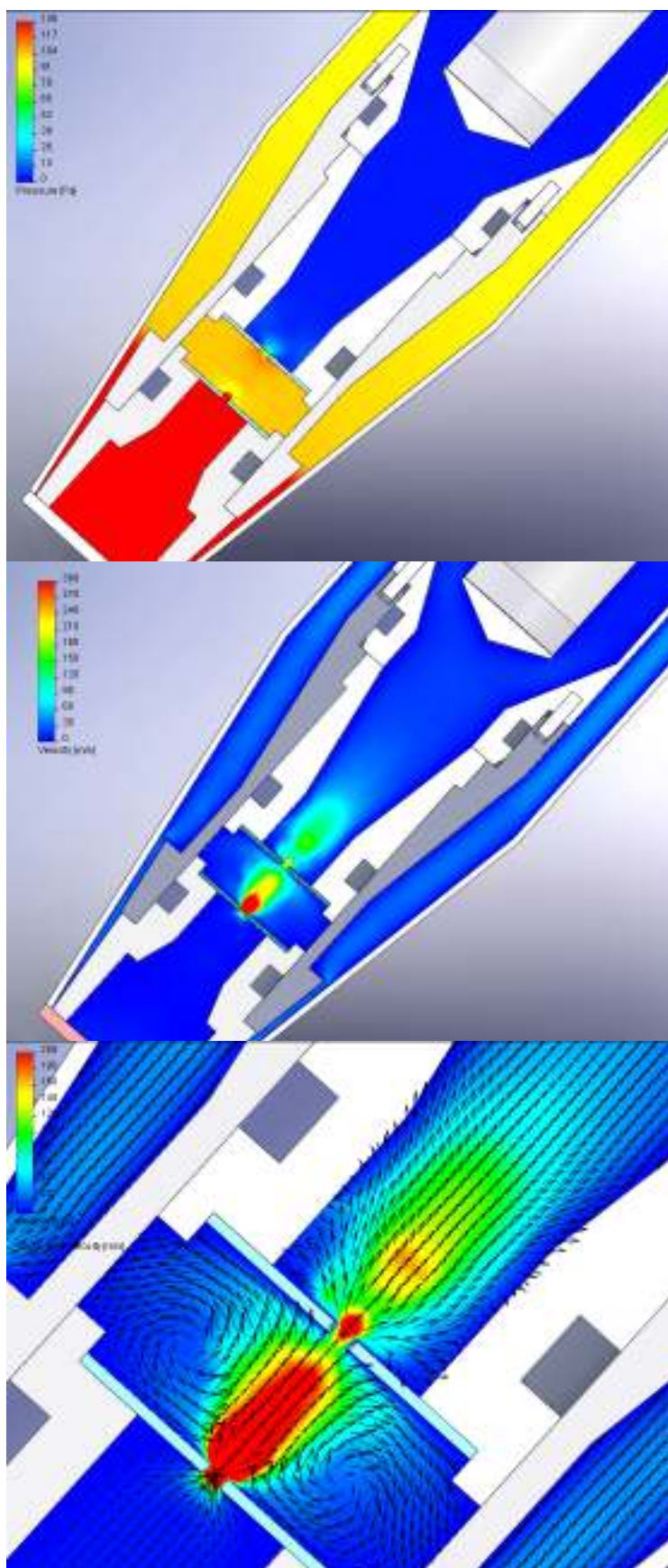


Graf 9.1 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 9.2 Rozložení rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE



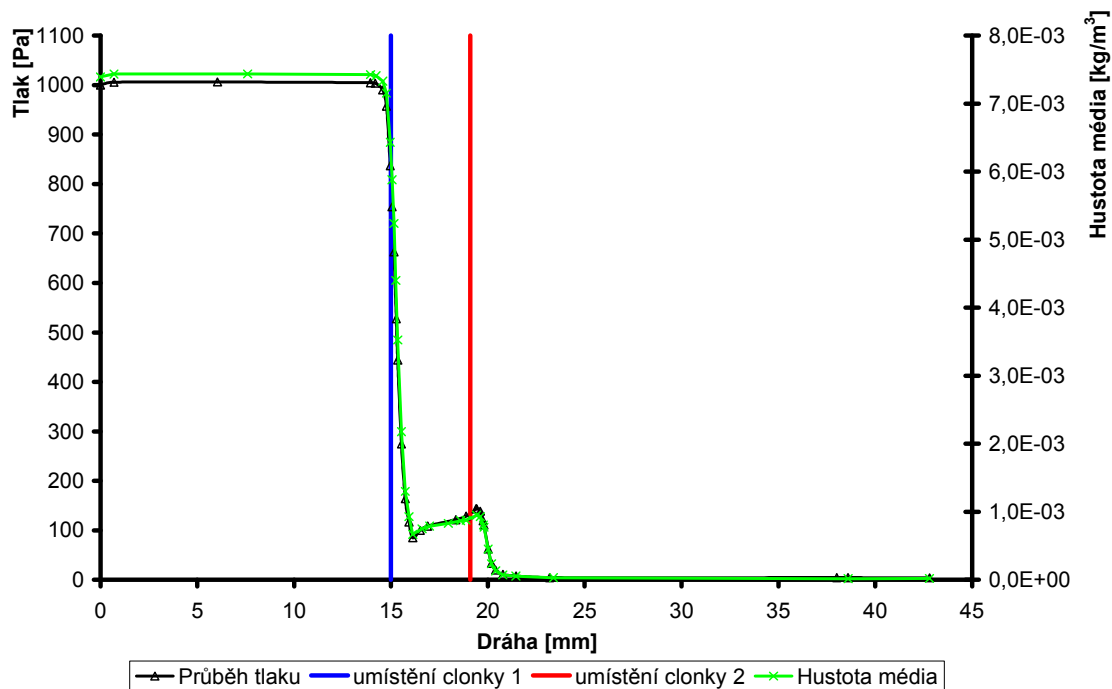


Obrázek 9.1 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

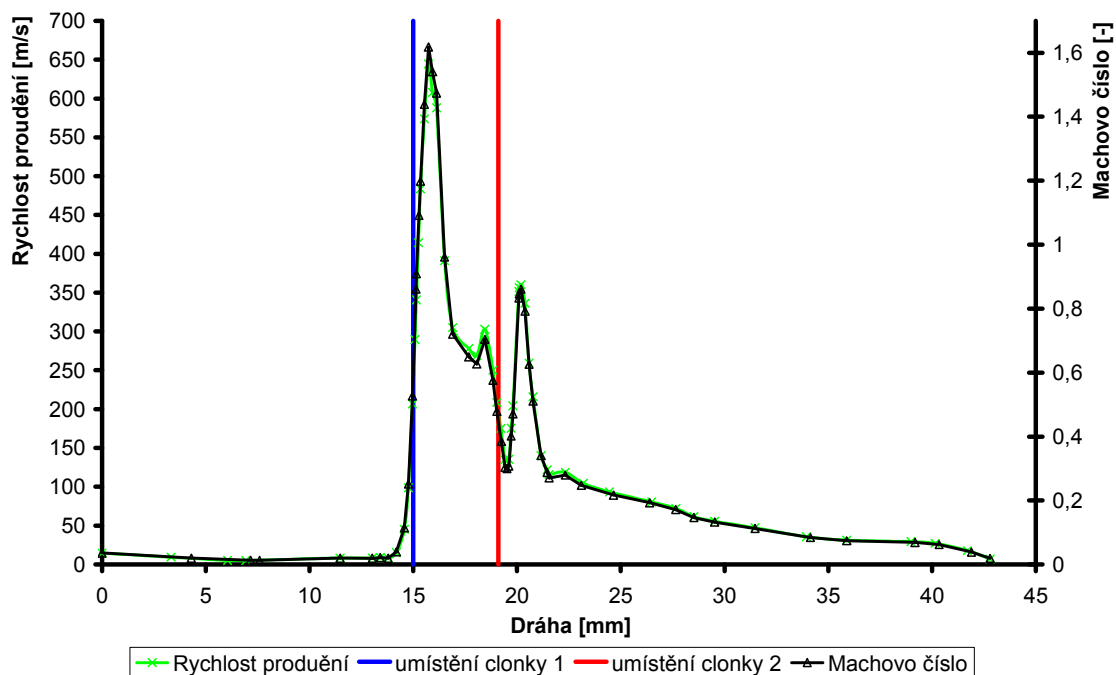
## 9.2. Varianta: 1000 8 – 6

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1** a **0,6 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **1000 Pa**.

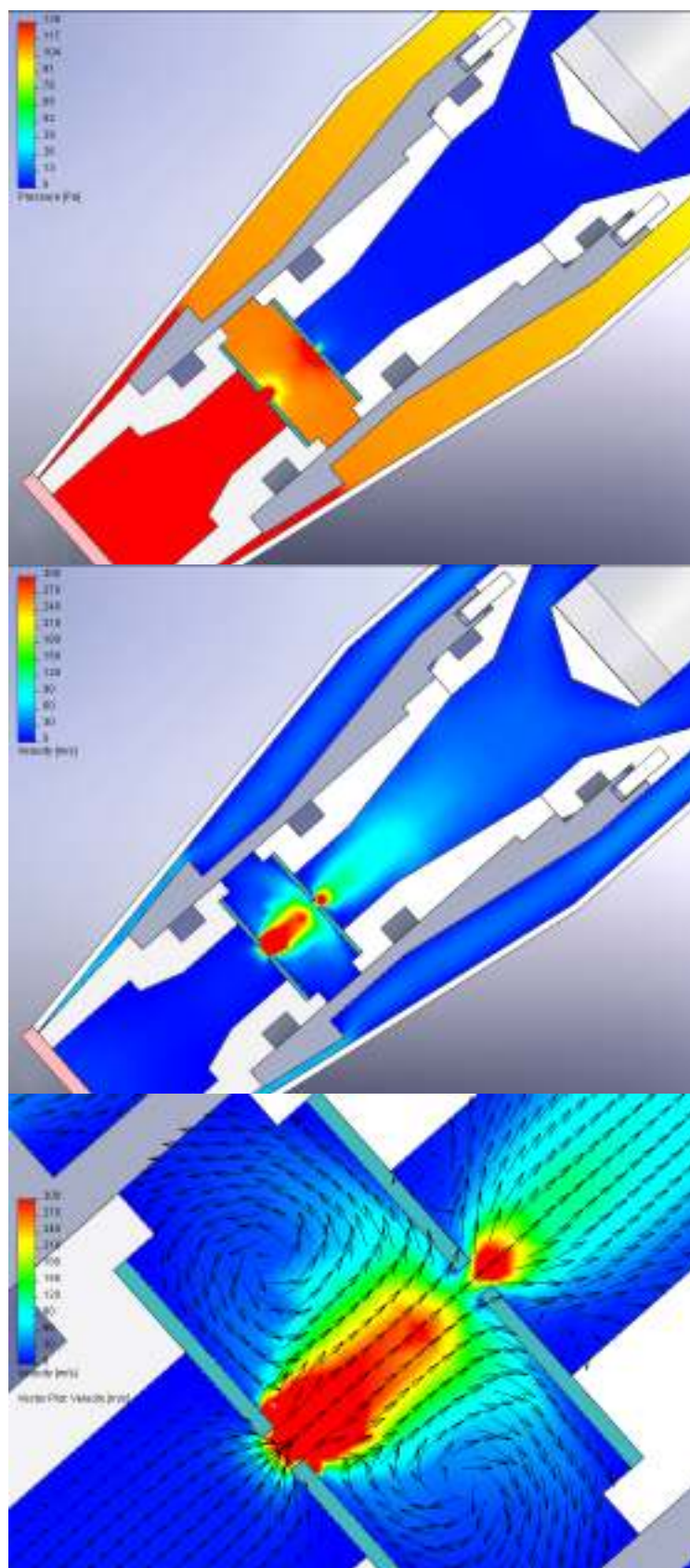
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 355,93 Pa.



Graf 9.3 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 9.4 rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE



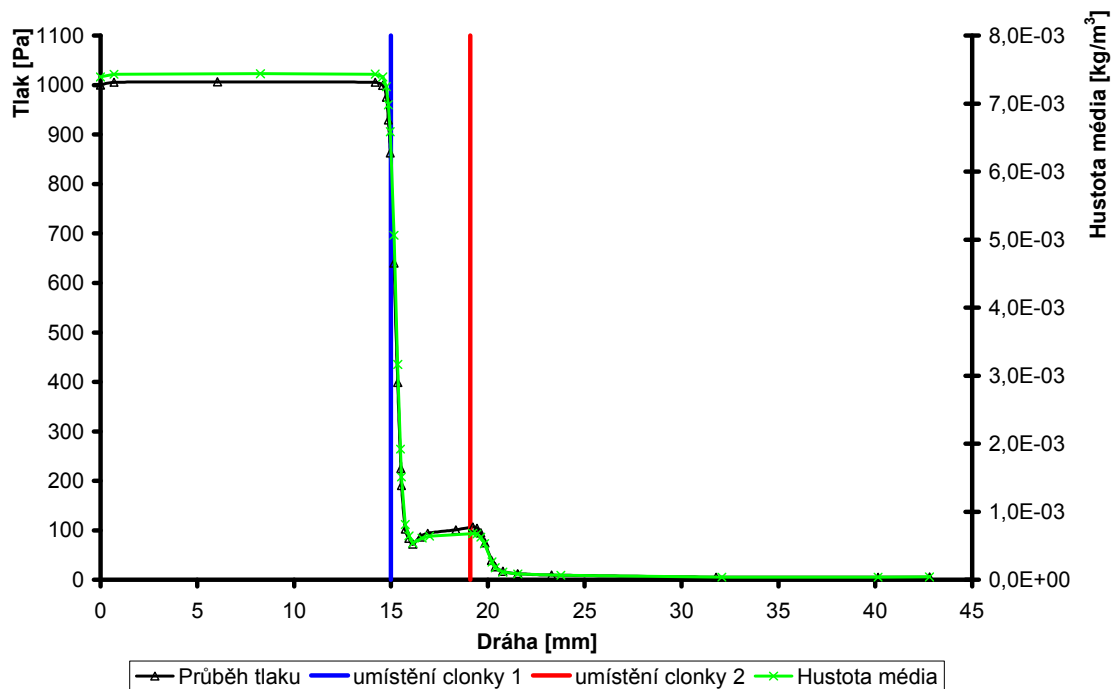
Obrázek 9.2 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění



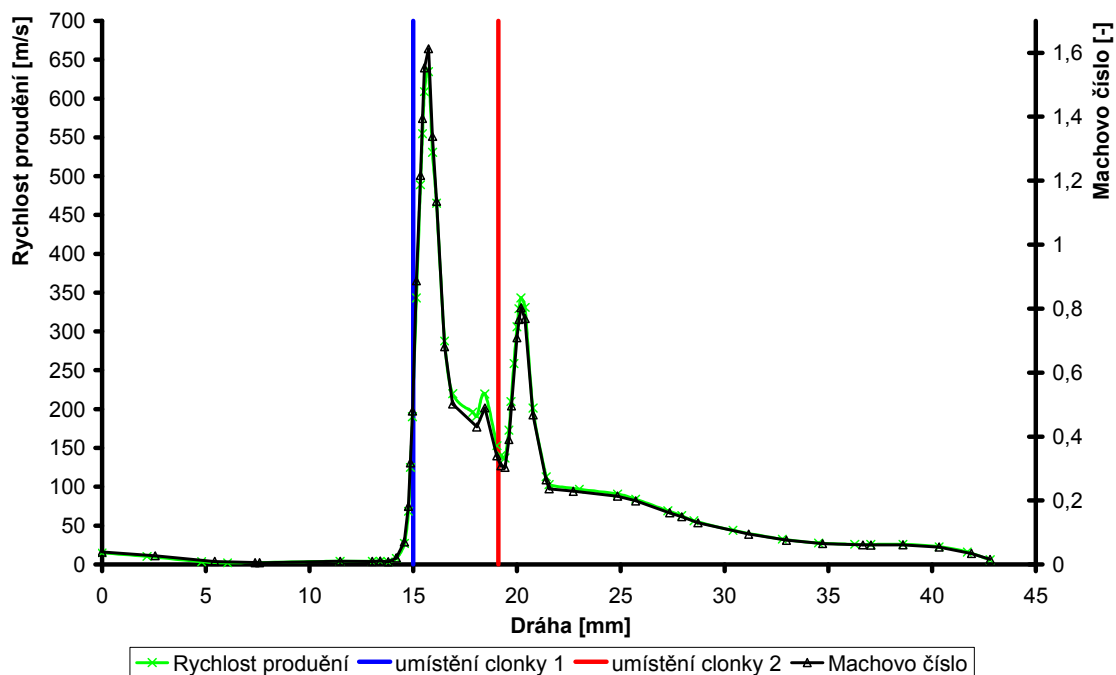
### 9.3. Varianta: 1000 6 – 8

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,6 mm pro clonku 1** a **0,8 mm pro clonku 2**. Tlak v komoře vzorku je **1000 Pa**.

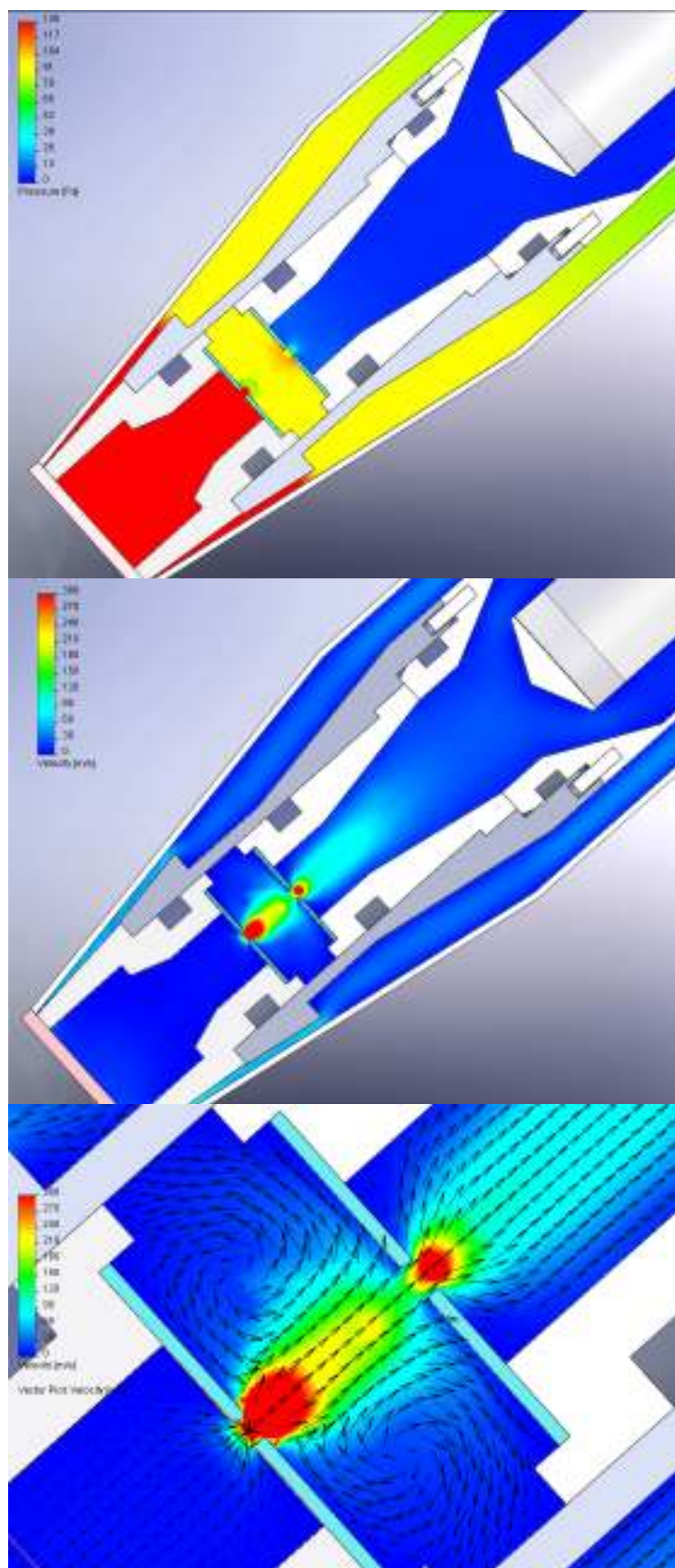
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 342,76 Pa.



Graf 9.5 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 9.6 rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

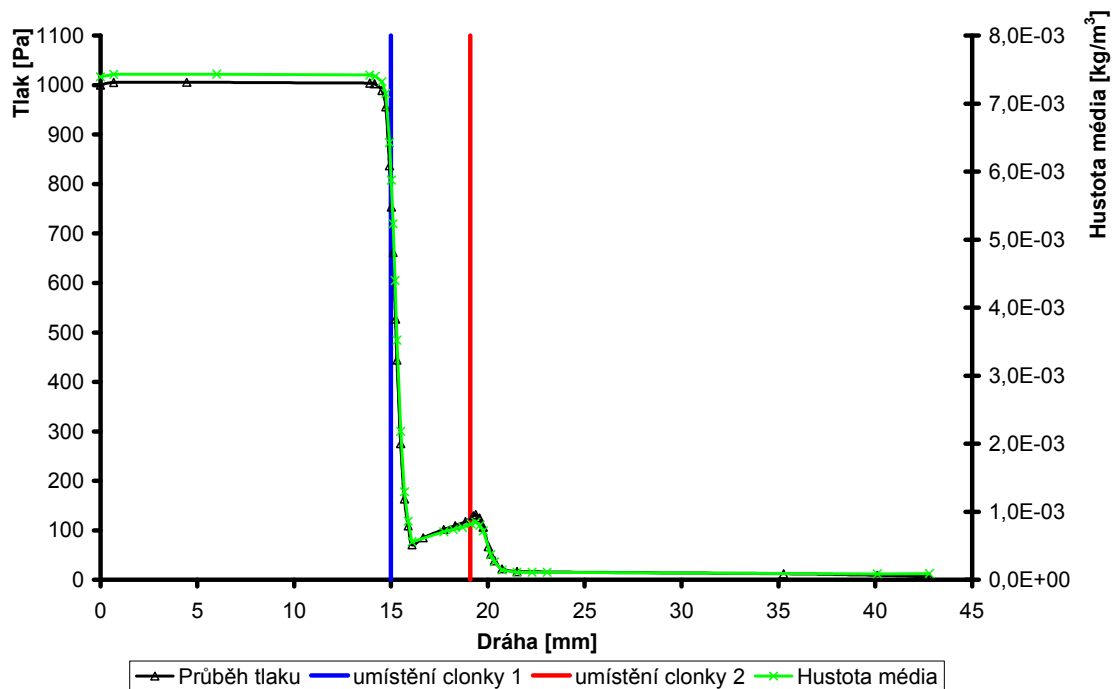


Obrázek 9.3 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

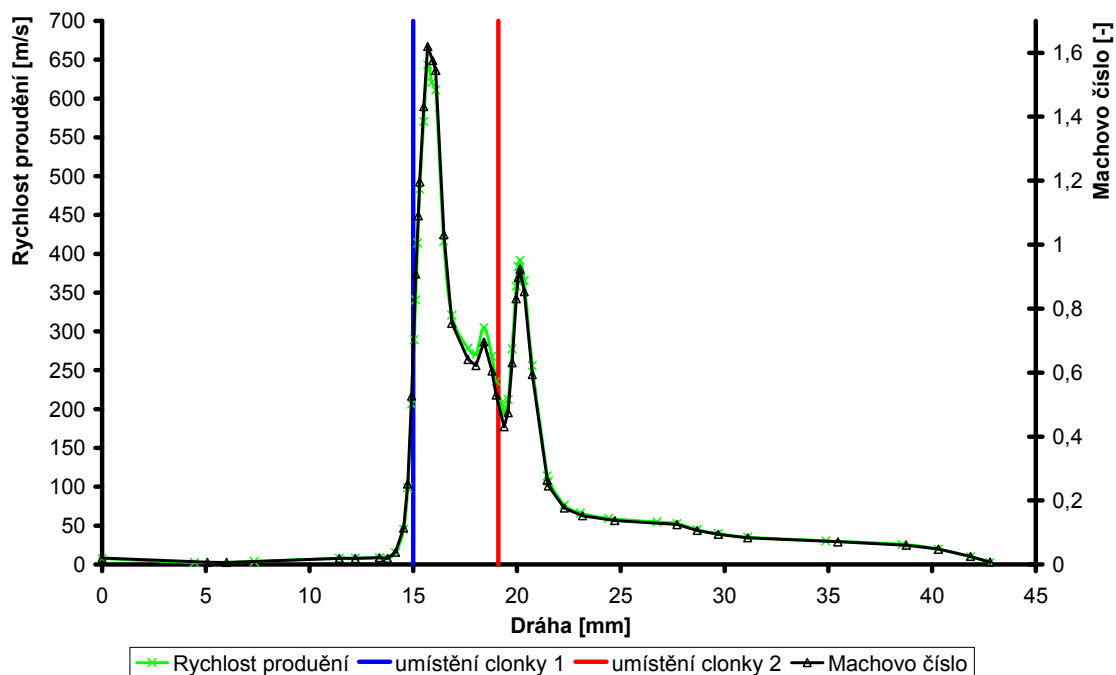
## 9.4. Varianta: 1000 8 – 8

Tato varianta zahrnuje clonky, které mají otvor ve velikosti **0,8 mm pro clonku 1 i 2**. Tlak v komoře vzorku je **1000 Pa**.

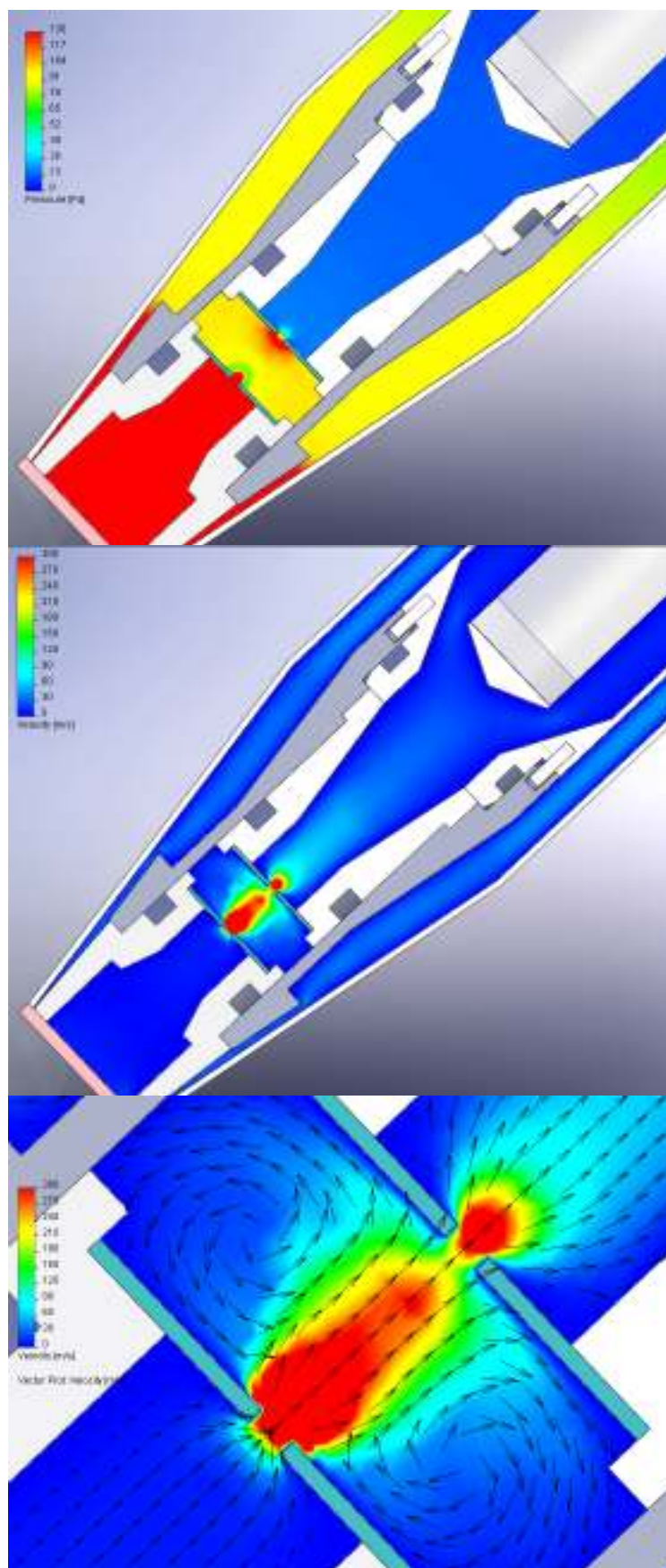
Na dráze sekundárních elektronů byl vyhodnocen průměrný tlak: 372,99 Pa.



Graf 9.7 Rozložení tlaku a hustoty média na dráze SE



Graf 9.8 rychlosti proudění a Machova čísla na dráze SE

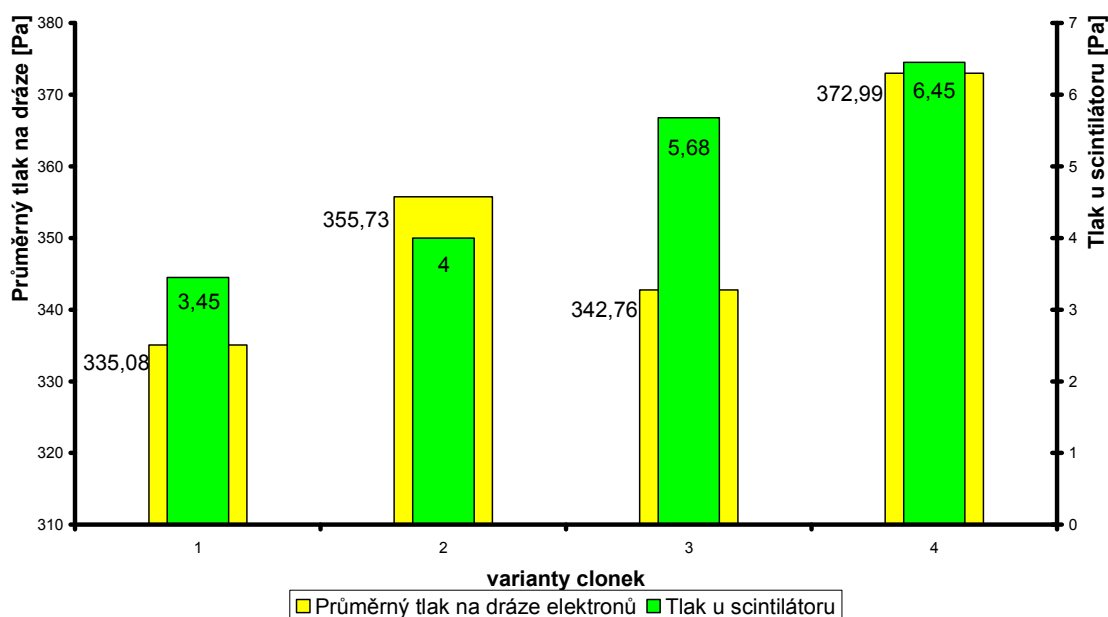


Obrázek 9.4 Průběh tlaku, rychlosti proudění s vektory proudění

## 9.5. Shrnutí

	1	2	3	4
Varianty otvorů v clonkách 1 a 2 [mm]	0,6 - 0,6	0,8 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 0,8
Tlak u scintilátoru [Pa]	3,45	4	5,68	6,45
Průměrný tlak na dráze elektronů [Pa]	335,08	355,73	342,76	372,99

Tabulka 9.1 Srovnání tlaků (1000 Pa v komoře)

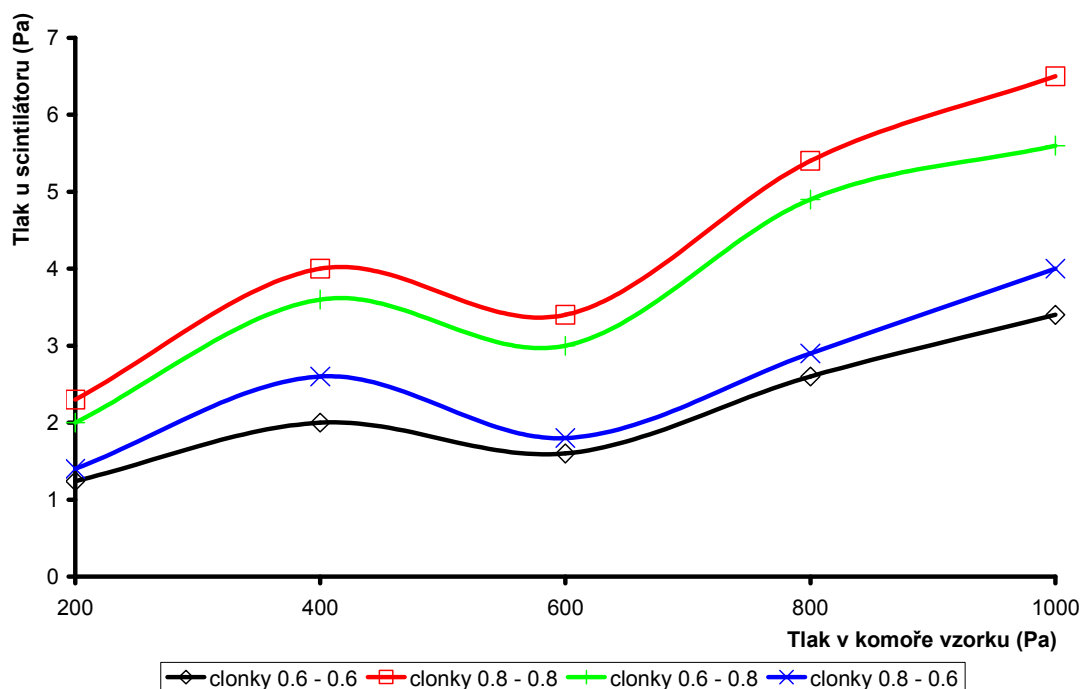


Graf 9.9 Srovnání tlaků (1000 Pa v komoře)

V tomto případě se projevil průměrný tlak na dráze menší u variant s první clonkou 0,6 mm. Varianta i s druhou clonkou 0,6 mm má i nejmenší tlak u scintilátoru, je tedy opět nejvhodnějším řešením. Ovšem oba otvory jsou 0,6 mm, tedy malé a to způsobí větší filtraci sekundárních elektronů, než u variant ostatních. S přihlédnutím k předchozím zkoumáním se dá říci, že varianta 3 je taktéž postačující, i když má tlak u scintilátoru vyšší, ale hranici maxima 8 Pa neatakuje. Výhodou oproti variantě 1 je, že jeden otvor je většího rozměru a tedy působí menší filtraci a tím se dá říci, že výsledný obraz bude ostřejší.

## 10. Srovnání všech dosažených výsledků

V průběhu postupného vyhodnocování výsledků začaly na povrch vystupovat jisté skutečnosti. U některých průběhů se objevuje jistá pulsace, tj. fáze opětného zrychlení v oblasti mezi první a druhou clonkou. To má za následek nelineární průběh v závislosti tlaku komory na tlaku u scintilátoru jak je vidět na následujícím obrázku.

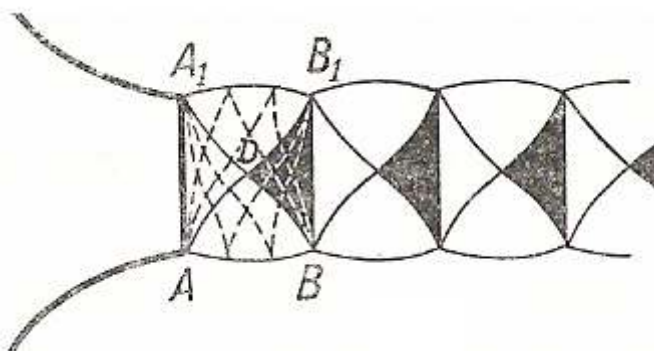


Graf 10.1 Celkové srovnání tlaků komory na tlacích u scintilátoru

Tuto nelinearitu si vysvětlíme fyzikálně v následující podkapitole 10.1.

### 10.1. Fyzikální zdůvodnění nelinearity výsledků

Zkoumáním různých druhů proudění v dýzách nebo malých otvorech, které oddělují velké tlakové spády má velký význam způsob, jakým se mění struktura proudu, který vytéká z takového otvoru. Při podzvukových režimech proudění v clonce změna parametrů na vstupu do clonky a ve výstupu ze clonky ovlivňuje jen málo tvar proudu za clonkou. Ale v oblasti velkých tlakových spádů, kdy dochází k proudění kritickému až nadkritickému, ve clonce přechází kritická rychlost proudu ve výstupním průřezu clonky v nadzvukovou rychlost ve volném proudu za ní.



Obrázek 10.1 Schématické znázornění proudění [7]

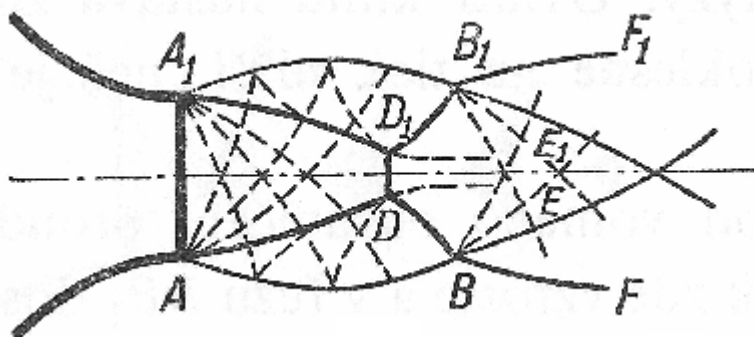
Popišme si tedy obrázek 10.1. Hrany výstupního průřezu A-A<sub>1</sub> jsou zdrojem rozruchu výstupního proudu. Za tímto průřezem působí na proud tlak okolí P<sub>ok</sub>, který je menší než tlak kritický P<sub>kr</sub>, tedy v této bráně se tlak P<sub>kr</sub> změní na P<sub>ok</sub>. Tím se začnou šířit



dvě expanze  $A-A_1-B$  a  $A_1-A-B_1$ , ty jsou tvořeny elementárními expanzními vlnami. Tyto expanze se protínají v bodě  $D$ . Další elementární expanzní vlny dopadající na hranici  $A-B$  a  $A_1-B_1$  se od této hranice odrážejí a expanze pak přecházejí v řadu elementárních kompresí.

Výsledkem tohoto je klín zředění  $A-A_1-D$ . Uvnitř takového klínu dochází ke značnému zmenšení tlaku, ten je nižší než tlak  $P_{ok}$ . Dále v druhém klínu  $D-B-B_1$  tlak vzroste a v řezu  $B-B_1$  dosáhne tlaku  $P_{kr}$ , čímž klín zředění přechází v klín zhuštění. V tomto řezu se začíná cyklus opakovat, dále tlak  $P_{kr}$  se opět mění na  $P_{ok}$ .

Pokud je tlakový spád účinkem intenzivního zmenšení tlaku plynu uvnitř kužele zředění přejdou jeho  $A-D$  a  $A_1-D_1$  do tvaru zakřivených rázových vln  $A-D$  a  $A_1-D_1$  a ve středu proudu vznikne příčná rázová vlna  $D-D_1$ , která zakřivené rázové vlny uzavírá. Ve vnějším proudu se tvoří zakřivené rázové vlny  $D-B$  a  $D_1-B_1$ .



Obrázek 10.2 Schématické znázornění proudění podrobněji [7]

Při průchodu pomyslnou branou  $D-D_1$  se rychlost proudu mění na podzvukovou a tlak intenzivně vzroste. Při průchodu rázovými vlnami  $D-B$  a  $D_1-B_1$  zůstává rychlost nadzvuková. Čáry  $D-E$  a  $D_1-E_1$  jsou tedy čarami tečného rychlostního skoku. Následkem vzájemného působení s vnějším nadzvukovým proudem se střed proudu urychluje a jeho průřezy se zmenšují až na minimum  $E-E_1$  kde střed rychlosti dosáhne rychlosti zvuku, tedy Machova čísla rovné 1. Za průřezem  $E-E_1$  je rychlost ve všech bodech proudu nadzvuková.

Tyto popsané jevy se v této práci objevují přibližně od 500 Pa u velikosti první clonky 0,6 mm a 700 Pa u clonek 0,8 mm. K porovnání uvádím dva příklady.

První: Průběh rychlosti v podzvukovém režimu, kdy v meziclonkovém prostoru nedochází k výše uvedené pulsaci a po první expanzi dochází ke kompresi a snížení rychlosti proudícího plynu. Jde o variantu s 200 Pa v komoře vzorku a obě clonky mají otvor o velikosti 0,8 mm.

Druhý: U rychlosti v nadzvukovém režimu je patrna zmíněná pulsace, kdy se objevuje fáze opětného zrychlení v oblasti mezi clonkami ve vzdálenosti 18,5 mm. Jde o variantu 1000 Pa v komoře vzorku s otvory ve clonkách 0,8 mm.

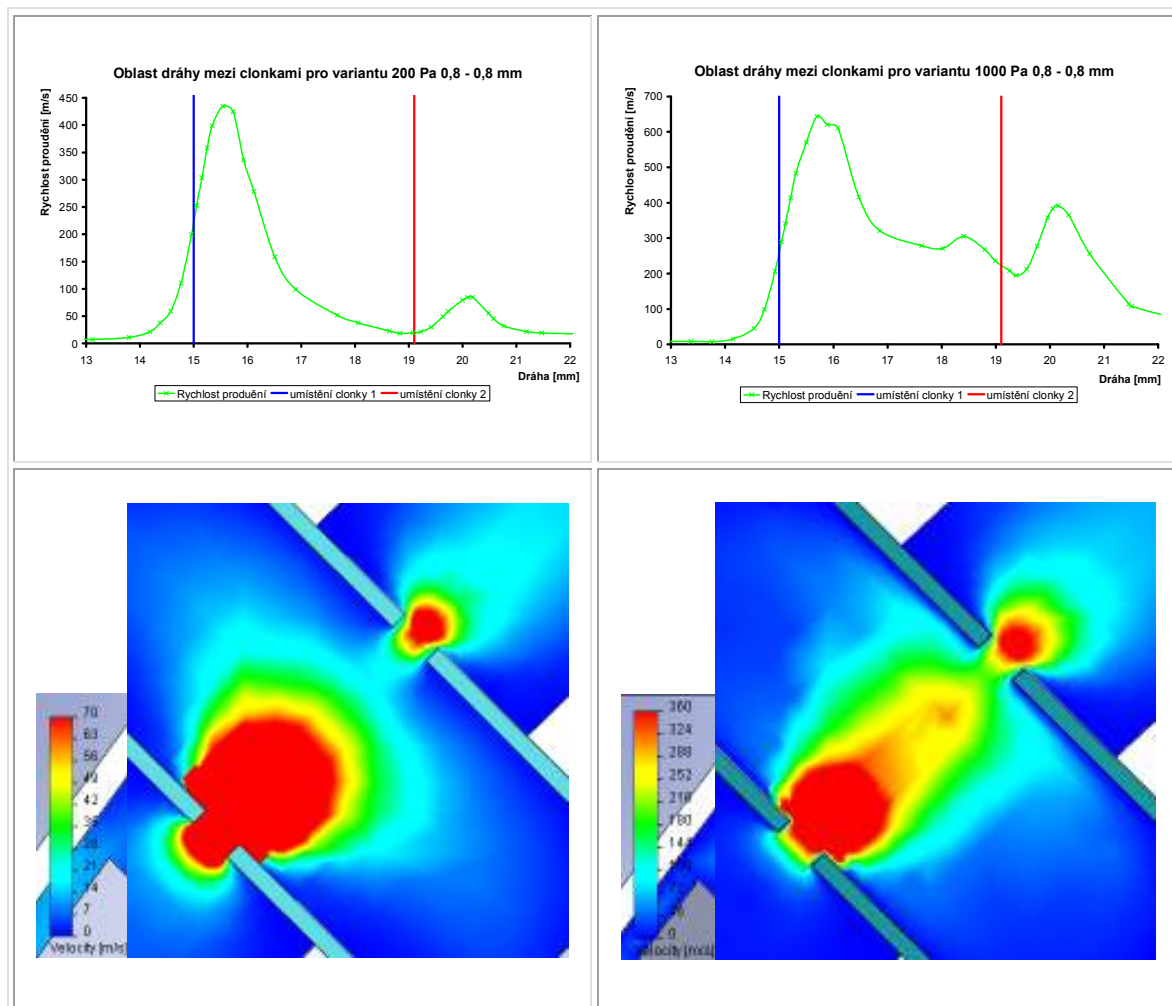
V mém případě tyto uvedené jevy mají výrazný vliv na proud plynu v ose sekundárních elektronů a především na tlakové a rychlostí poměry před vstupem do

druhé clonky, což má klíčový význam pro podmínky tlakového spádu na druhé clonce a tím na výsledný tlak.

Podívejme se nyní na obě varianty na obrázcích:

Příklad první:

Příklad druhý:



Obrázek 10.3 srovnání variant pro 200 Pa a 1000 Pa

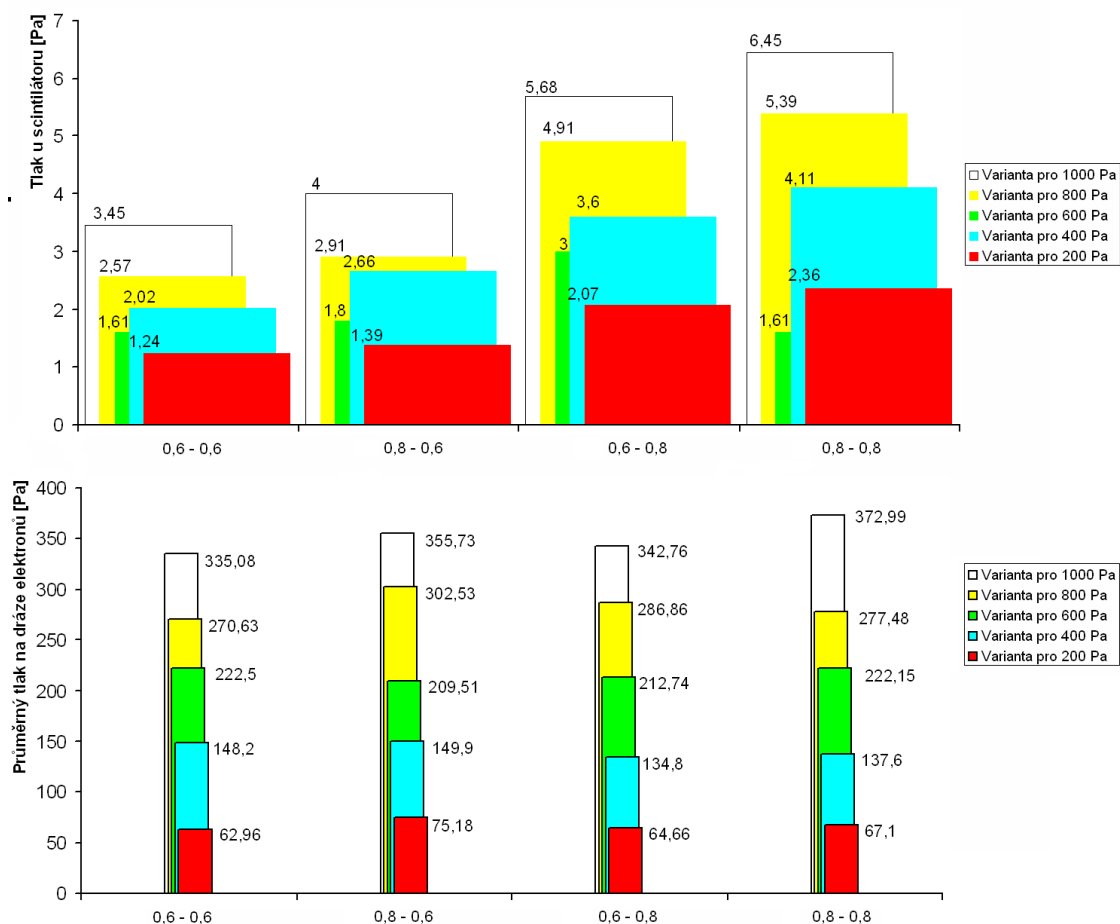
## 10.2. Celkové shrnutí dosažených výsledků

V grafu 10.2 je uveden souhrn důležitých hodnot. Jednak jsou to vyhodnocené tlaky u scintilátoru, kde je důležité, aby byl tlak maximálně 8 Pa. Tato hodnota nebyla překročena, ale je dobré, aby byla co nejmenší. Druhý neméně důležitý faktor je průměrný tlak na dráze sekundárních elektronů, tedy průměr hodnot tlaků od vstupu do detektoru až po scintilátor, což je konec dráhy. Dále elektrony putují světlovodem ve formě fotonů. Tato průměrná hodnota je taktéž žádoucí, aby byla co nejmenší.

Mějme také na paměti, že všechny hodnoty jsou teoreticky počítané systémem Cosmos FloWorks. V praxi se tedy hodnoty mohou nepatrně lišit, záleží na těsnosti celého zařízení a taktéž různé toleranci rozměrů.



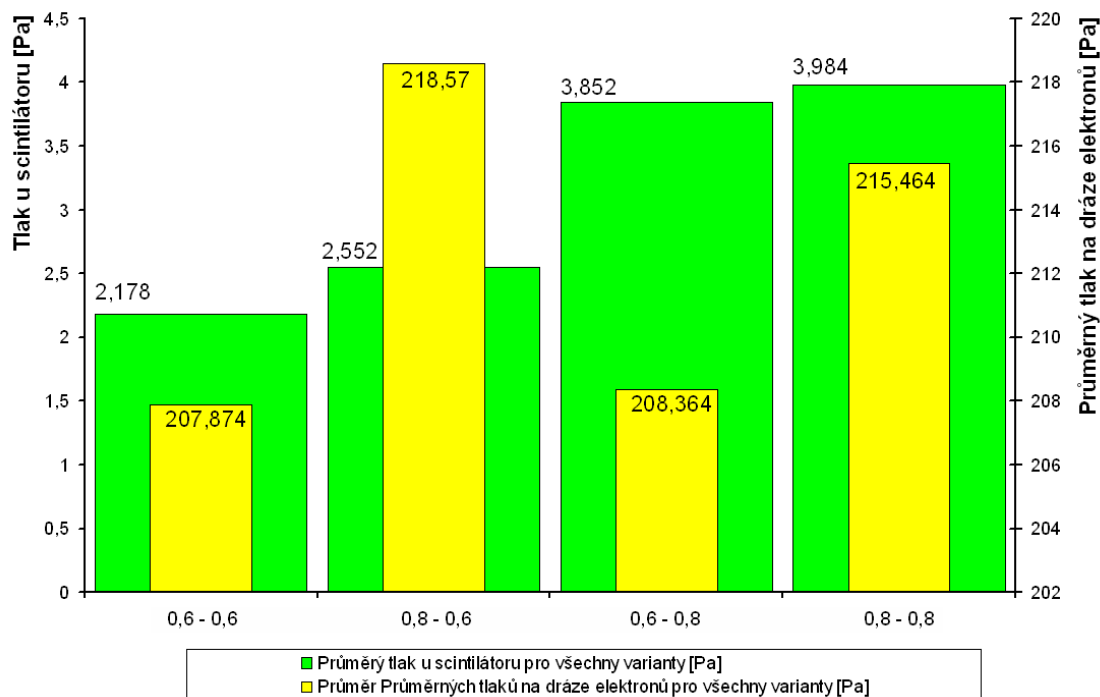
Podívejme se tedy na graf 10.2 a zhodnoťme situaci.



**Graf 10.2 Srovnání všech tlaků**

Pro správnost výsledků je také důležité, aby na hraně otvoru první clonky byla rychlost proudění plynu při kritickém tlakovém spádu rovna hodnotě  $\text{mach} = 1$ , což bylo splněno u všech měření. Jedná se o jeden z důkazů, že jsou výsledky správné. Za otvorem první clonky se tvoří jakýsi rychlostní kužel nadzvukového proudění a následně tlak klesá. Zde záleží na velikosti tlaku v komoře vzorku. Jak bylo zmíněno u vyšších hodnot dochází k pulsaci, tedy opětovnému zvýšení rychlosti proudění ještě před druhou clonkou. Za druhou clonkou se taktéž vytváří rychlostní kužel, který už ale nedosahuje takových rychlostí jako za clonkou první, ale i zde se tvoří menší rychlostní kužel.

Podívejme se na graf 10.3, který se dá nazvat za jakýsi průměr všech hodnot, které by mohly v detektoru nastat, při všech tlacích v komoře vzorku, které uživatel potřebuje při zkoumání.



**Graf 10.3 Srovnání průměrných tlaků pro všechny varianty**

Použitelné jsou všechny varianty. Na první pohled se zdá být nejlepší varianta s clonkami, kde je otvor u obou 0,6 mm. Tlak u scintilátoru je z průměrných hodnot nejmenší a průměrný tlak na dráze elektronů je jeden z menších.

Zde se dá konstatovat, že lepší varianty jsou ty, které mají otvor v první clonce menší. Tento fakt vyplývá z globálního pohledu, tedy z průměrné hodnoty, jaká při měření v detektoru nastala. Při postupném vyhodnocování se tento závěr takto nejevil.

Je ovšem dobré se zaměřit na variantu, která má alespoň jeden otvor ve clonce větší, protože tento otvor, jak již bylo několikrát zmíněno, je jakýsi filtr, který je dobré mít co největší, aby co nejvíce elektronů tímto filtrem prošlo. Tedy nabízí se varianta s první clonkou s otvorem menším a s druhou clonkou s otvorem větším. Zde je průměrný tlak nejmenší a hodnoty u scintilátoru jsou postačující. Z grafu 10.2 je vidět, že dosahovaná maximální hodnota u scintilátoru je o více než 2 Pa nižší, než je hranice (8 Pa), tedy k výboji a následnému zničení zařízení nedojde.

Tedy u varianty s clonkami 0,6 – 0,8 mm je tlak pro scintilátor bezpečný, kombinace otvorů zajišťuje rychlostní kužel proudění, tedy nižší tlak na nejdelší dráze sekundárních elektronů. A alespoň jeden otvor je větší, tedy působí jako menší filtr pro tok sekundárních elektronů, tedy výsledný obraz z mikroskopu by měl být ostřejší.

---

## Závěr

V předchozí kapitole (tj.kapitola 10) byly shrnuty výsledky diplomové práce.

Cílem této práce bylo zanalyzovat vliv velikosti tlaku v komoře vzorku a kombinace velikosti clonek na výsledný tlak u scintilátoru a na velikost tlaku v dráze sekundárních elektronů.

Z grafu 10.1 je vidět nelinearita výsledků, která je v podkapitole 10.1 vysvětlena.

Je jasné, že ideální varianta je taková, kdy máme k dispozici oba druhy clonek, tedy s průměry otvorů 0,6 mm a 0,8 mm a při zkoumání si dle velikosti tlaku v komoře vzorku měníme v detektoru clonky. Ovšem jednalo by se o drahou a časově náročnou záležitost. Případně by se dal měnit celý detektor, který by byl k dispozici s různými variantami otvorů ve clonkách. Ale opět by to stálo finance a delší čas, který by se trávil při výměně detektoru, protože se musí zastavit vývěvy a po výměně se čeká na vakuaci a stabilizaci systému, než se může započít měření.

Z práce tedy vyplývá, že lze nechat vyrobit detektor s otvorem 0,6 mm v první clonce a 0,8 mm v druhé. Tento detektor je zkoumán od tlaku 200 Pa po tlak 1000 Pa v komoře vzorku a naměřené hodnoty jsou ve správných mezích.

Všechny výsledky jsou teoretické, vyhodnocené nástrojem Cosmos FloWorks. Ovšem tento nástroj je propracovaný na vysoké úrovni a odchylky mezi teorií a praxí by měly být minimální. Hlavní příčinou případných odchylek může být nedokonalá těsnost systému v praxi.

## Použitá literatura

- [1] ŠTÁVA, P.; KOZUBOVÁ, M.: Aplikovaná mechanika tekutin. Skripta. VŠB-TU Ostrava, 1995. 102 stran
- [2] Cosmos FloWorks Tutorial
- [3] Cosmos FloWorks Fundamentals
- [4] NEDĚLA, V. MAXA, J.: Environmental Scanning Electron Microscope Aquasem II – the Design and Applications. In Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instruments. Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation, 10th Seminar. Brno: Institute of Scientific Instruments of AS CR, 2006, s. 55 - 56, ISBN 80-239-6285-X
- [5] NEDĚLA V.; AUTRATA R.: Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie, Československý časopis pro fyziku, (3) (2005) 251 stran
- [6] MAXA, J.: Třírozměrné modelování a simulace. VUT FEKT Brno: 2006
- [7] DEJČ M.E.: Technická dynamika plynů. 1967, SNTL Praha
- [8] SolidVision, s. r. o. [cit. 2009-05.]. Dostupné z WWW: <http://www.solidvision.cz>
- [9] FEI Company. [cit. 2009-05.]. Dostupné z WWW: <http://www.feicompany.com>
- [10] University of Maryland. [cit. 2009-04.]. Dostupné z WWW: <http://www.nanocenter.umd.edu>
- [11] The University of Iowa 2008, Nondiscrimination Statement .[cit. 2009-04.]. Dostupné z WWW: <http://www.uiowa.edu>
- [12] Masarykova univerzita, přírodovědecká fakulta. [cit. 2009-03.]. Dostupné z WWW: <http://www.sci.muni.cz>
- [13] Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze. [cit. 2009-03.]. Dostupné z WWW: <http://www.natur.cuni.cz>
- [14] JAHNS, J.: Průtok plynu. [cit. 2010-01.]. Dostupné z WWW: <http://www.stranypotapecske.cz/teorie/tryska.asp?str=200404212318530>
- [15] FRANK, L.; JIRÁK, J.; REK, A.; ROZSÍVALOVÁ, Z.: Speciální diagnostika. Skripta. VUT Brno, 79 stran

## Příloha A

Zde jsou k dispozici všechna data systému Cosmos FloWorks, ze kterých jsou tvořeny jednotlivé grafy tlaku a hustoty média, Machova čísla a rychlosti proudění, vše v závislosti na dráze.

Všechny tyto hodnoty jsou i na přiloženém CD.

200 Pa; 0,6 - 0,6 mm								200 Pa; 0,6 - 0,8 mm							
Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]
0	200	0	0,00148	0	0,00842	0	2,63926	0	200	0	0,00148	0	0,00842	0	2,63612
0,69788	200,202	0,69788	0,00148	5,426	0,00304	5,426	1,19115	0,0007	200,203	0,0007	0,00148	0,00543	0,00306	0,00543	1,1989
14,1356	199,841	13,8934	0,00148	6,04603	0,00294	13,0215	3,3957	0,01414	199,842	0,01389	0,00148	0,00605	0,00297	0,01302	3,39327
14,5715	197,995	14,2325	0,00147	12,1495	0,00693	13,7965	6,17462	0,01457	197,995	0,01423	0,00147	0,01205	0,00692	0,0138	6,17517
14,7653	192,762	14,5715	0,00146	13,1183	0,00886	14,184	11,8765	0,01477	192,759	0,01457	0,00146	0,01312	0,00886	0,01418	11,8853
14,8622	184,414	14,7653	0,00142	13,7965	0,01498	14,3778	22,1273	0,01486	184,411	0,01477	0,00142	0,0138	0,01498	0,01438	22,149
14,9591	173,069	14,8622	0,00136	14,184	0,02952	14,5715	36,5196	0,01496	173,065	0,01486	0,00136	0,01418	0,02954	0,01457	36,5436
15,056	152,121	14,9591	0,00128	14,3778	0,05641	14,7653	71,8591	0,01506	152,136	0,01496	0,00128	0,01438	0,05647	0,01477	71,8988
15,1528	130,091	15,056	0,00114	14,5715	0,09106	14,9349	143,701	0,01515	130,124	0,01506	0,00114	0,01457	0,09112	0,01493	143,767
15,2497	105,845	15,1528	0,00098	14,7653	0,18219	14,9591	154,076	0,01525	105,883	0,01515	0,00098	0,01477	0,18231	0,01496	154,146
15,3466	79,1902	15,2497	0,00081	14,8664	0,30239	15,056	212,432	0,01535	79,2446	0,01525	0,00081	0,01489	0,30255	0,01506	212,488
15,4435	61,863	15,3466	0,0006	14,9591	0,3762	15,1528	248,093	0,01544	61,8761	0,01535	0,0006	0,01496	0,37638	0,01515	248,064
15,5404	46,3354	15,4435	0,00046	15,056	0,51127	15,2497	307,76	0,01554	46,339	0,01544	0,00046	0,01506	0,51143	0,01525	307,742
15,7341	34,1821	15,5404	0,00034	15,1528	0,59459	15,3466	333,27	0,01573	34,1544	0,01554	0,00034	0,01515	0,59453	0,01535	333,2
15,9279	28,1613	15,7341	0,00023	15,2497	0,74648	15,4435	351,992	0,01593	28,1466	0,01573	0,00023	0,01525	0,74645	0,01544	351,992
16,1216	24,4715	15,9279	0,00019	15,3466	0,81793	15,5404	352,612	0,01612	24,4648	0,01593	0,00019	0,01535	0,81776	0,01554	352,7
16,5092	22,9432	16,1216	0,00016	15,4435	0,86165	15,7341	298,994	0,01651	22,8939	0,01612	0,00016	0,01544	0,8617	0,01573	299
17,1873	22,3726	16,606	0,00016	15,5404	0,86064	15,9279	209,489	0,01719	22,3056	0,01661	0,00016	0,01554	0,861	0,01593	209,496
18,4468	22,2404	16,8967	0,00016	15,7341	0,70811	16,1216	151,349	0,01845	22,1754	0,0169	0,00016	0,01573	0,70843	0,01612	151,329
18,8343	22,2514	19,2218	0,00016	15,9279	0,50261	16,5092	78,0754	0,01883	22,181	0,01883	0,00016	0,01593	0,50285	0,01651	78,3829
19,0281	22,24	19,464	0,00016	16,1216	0,35756	16,8967	42,4328	0,01939	20,9944	0,01939	0,00015	0,01612	0,35767	0,0169	42,8953
19,2218	22,3374	19,5367	0,00016	16,5092	0,19151	17,6717	20,0767	0,01963	18,7714	0,01963	0,00014	0,01651	0,19218	0,01767	20,8396
19,464	21,836	19,6094	0,00015	16,8967	0,10335	18,253	11,6624	0,01983	15,5537	0,01983	0,00011	0,0169	0,10426	0,01816	14,2406
19,5367	21,1956	19,7305	0,00013	17,6717	0,04968	18,8343	5,2435	0,02012	9,35879	0,02012	6,9E-05	0,01767	0,05121	0,0185	10,8692
19,6094	20,15	19,9	9,7E-05	18,4468	0,02189	19,0281	4,98104	0,02021	8,13841	0,02021	6E-05	0,01816	0,03457	0,01883	9,31826
19,7305	17,0179	20,0453	6,9E-05	18,8343	0,01259	19,2218	5,2406	0,02072	5,40725	0,02072	4E-05	0,0185	0,02571	0,01903	12,0287
19,9	13,1323	20,1906	4,7E-05	19,0281	0,01214	19,4156	10,2484	0,0213	3,39325	0,0213	2,5E-05	0,01883	0,02218	0,01922	16,6807
20,0453	9,29218	20,5782	2,7E-05	19,2218	0,01265	19,6094	22,075	0,02147	3,04675	0,02147	2,2E-05	0,01908	0,03194	0,01942	25,8869
20,1906	6,39353	20,9813	1,8E-05	19,4156	0,0253	19,7062	31,678	0,02232	2,61528	0,02232	1,9E-05	0,01922	0,04028	0,01966	45,5217
20,5782	3,66997	21,4735	1,2E-05	19,6094	0,05404	19,8031	35,114	0,0231	2,62939	0,0231	1,9E-05	0,01942	0,06275	0,01973	51,3931
20,9813	2,40125	29,2974	9,1E-06	19,7062	0,07573	19,9	44,2039	0,0293	2,04093	0,0293	1,5E-05	0,01973	0,12211	0,02	68,733
21,4735	1,62136	32,3976	9,3E-06	19,8031	0,0833	19,9969	46,9667	0,03395	2,0639	0,03395	1,5E-05	0,02	0,16356	0,02009	71,5888
29,2974	1,23236	40,1481	9E-06	19,9	0,10502	20,0938	51,4931	0,04015	1,99952	0,04015	1,5E-05	0,02009	0,17188	0,02019	68,389
32,3976	1,26154	42,8	9,2E-06	19,9969	0,11257	20,2633	40,7495	0,0428	2,07019	0,0428	1,5E-05	0,02019	0,16685	0,02038	49,9525
40,1481	1,21944			20,0938	0,12504	20,3844	32,5698					0,02038	0,12315	0,02058	36,1979
42,8	1,24884			20,1906	0,11414	20,5782	23,2984					0,02058	0,09023	0,02077	27,5932
				20,3844	0,08092	20,7719	18,1634					0,02077	0,06668	0,02119	19,8148
				20,5782	0,05868	21,1906	12,0384					0,02119	0,04869	0,02147	17,5412
				20,7719	0,04407	21,4735	10,2416					0,02147	0,0425	0,02164	16,8162
				21,1906	0,03007	22,6127	7,97157					0,02164	0,04053	0,02358	15,0805
				21,4735	0,02539	28,0574	4,75675					0,02348	0,03581	0,02562	13,7279
				22,5158	0,01911	31,1576	2,8016					0,02562	0,0326	0,02806	8,48843
				28,3674	0,01045	40,9231	1,50777					0,02806	0,02024	0,0293	5,90688
				32,5914	0,00583	42,8	0,3176					0,0293	0,01422	0,03337	3,68225
				40,9231	0,00366							0,03317	0,00887	0,03395	3,54502
				42,8	0,00099							0,03395	0,00842	0,0386	4,14549
												0,0386	0,00983	0,04131	2,78955
												0,0415	0,00641	0,0428	0,6627
												0,0428	0,00204		

200 Pa; 0,8 - 0,6 mm								200 Pa; 0,8 - 0,8 mm							
Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
0	200	0	0,00148	0	0,0046	0	1,94145	0	200	0	0,00148	0	0,00448	0	1,88681
0,00043	200,037	0,00043	0,00148	0,00043	0,00458	0,00043	1,93148	0,69788	200,057	0,69788	0,00148	1,39575	0,00445	1,39575	1,8752
0,00086	200,059	0,00086	0,00148	0,00086	0,00456	0,00086	1,92396	13,7965	199,611	13,409	0,00148	6,66607	0,00683	6,66607	2,85702
0,0013	200,057	0,0013	0,00148	0,0013	0,00456	0,0013	1,92072	14,184	199,199	14,1356	0,00147	11,1807	0,01437	11,0838	6,04881
0,00173	200,055	0,00173	0,00148	0,00173	0,00455	0,00173	1,91871	14,5715	195,514	14,2325	0,00147	11,4714	0,01448	11,4714	6,10791
0,00216	200,052	0,00216	0,00148	0,00216	0,00455	0,00216	1,91831	14,7653	188,211	14,5715	0,00144	12,2464	0,01447	12,2464	6,10752
0,00259	200,05	0,00259	0,00148	0,00259	0,00455	0,00259	1,91813	14,9591	164,235	14,7653	0,00139	13,1183	0,01756	13,1183	7,32772
0,00303	200,047	0,00303	0,00148	0,00303	0,00457	0,00303	1,92512	15,056	147,434	14,9591	0,00123	13,7965	0,02677	13,7965	11,0722
0,00346	200,045	0,00346	0,00148	0,00346	0,00466	0,00346	1,96335	15,1528	129,451	15,056	0,00112	14,184	0,05233	14,184	21,1377

Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
0,00389	200,043	0,00389	0,00148	0,00389	0,00475	0,00389	2,00183	15,2982	98,7417	15,1528	0,001	14,3778	0,0948	14,3778	37,6636
0,00432	200,04	0,00432	0,00148	0,00432	0,00485	0,00432	2,04056	15,3466	88,3314	15,2497	0,00086	14,5715	0,14569	14,5715	59,1769
0,00476	200,037	0,00476	0,00148	0,00476	0,00506	0,00476	2,12799	15,5404	57,098	15,3466	0,0007	14,7653	0,27274	14,7653	110,801
0,00519	200,034	0,00519	0,00148	0,00519	0,00535	0,00519	2,24779	15,7341	41,4632	15,5404	0,00045	14,9591	0,4865	14,9591	199,414
0,00562	200,03	0,00562	0,00148	0,00562	0,00564	0,00562	2,36764	15,9279	34,1963	15,7341	0,00031	15,0802	0,64593	15,056	252,942
0,00605	200,026	0,00605	0,00148	0,00605	0,00594	0,00605	2,48895	16,1216	29,2459	15,9279	0,00024	15,1528	0,73867	15,1528	303,558
0,00648	200,019	0,00648	0,00148	0,00648	0,00646	0,00648	2,70339	16,5092	26,539	16,1216	0,00019	15,2497	0,88154	15,2497	358,633
0,00692	200,011	0,00692	0,00148	0,00692	0,00701	0,00692	2,93032	16,9936	25,7601	16,5092	0,00018	15,3466	0,98981	15,3466	399,103
0,00735	200,003	0,00735	0,00148	0,00735	0,00764	0,00735	3,19607	18,0593	25,7158	16,8967	0,00017	15,5404	1,08806	15,5404	434,796
0,00778	199,994	0,00778	0,00148	0,00778	0,00839	0,00778	3,51305	18,4468	25,7259	18,8343	0,00018	15,7341	1,04058	15,7341	424,705
0,00821	199,982	0,00821	0,00148	0,00821	0,00929	0,00821	3,89702	19,125	25,3697	19,3429	0,00018	15,9279	0,81491	15,9279	336,317
0,00865	199,967	0,00865	0,00148	0,00865	0,0104	0,00865	4,37052	19,4156	24,6294	19,4398	0,00018	16,1216	0,65258	16,1216	278,4
0,00908	199,951	0,00908	0,00148	0,00908	0,01163	0,00908	4,89503	19,6578	21,6388	19,6578	0,00016	16,5092	0,37758	16,5092	158,539
0,00951	199,933	0,00951	0,00148	0,00951	0,0125	0,00951	5,26651	19,8273	18,2555	19,8273	0,00013	16,8967	0,23027	16,8967	98,9335
0,00994	199,914	0,00994	0,00148	0,00994	0,0133	0,00994	5,60387	20,0938	11,2393	20,0938	8,3E-05	17,6717	0,12319	17,6717	51,703
0,01038	199,894	0,01038	0,00148	0,01038	0,01383	0,01038	5,83247	20,1906	9,12358	20,1906	6,7E-05	18,0593	0,09012	18,0593	37,716
0,01081	199,874	0,01081	0,00148	0,01081	0,01428	0,01081	6,02202	20,4328	7,04496	20,4328	5,2E-05	18,5437	0,05863	18,6405	22,856
0,01124	199,851	0,01124	0,00148	0,01124	0,01446	0,01124	6,09952	21,2953	3,92991	21,2953	2,9E-05	18,8343	0,04283	18,8343	18,2835
0,01167	199,829	0,01167	0,00148	0,01167	0,01458	0,01167	6,15403	21,4735	3,55665	21,4735	2,6E-05	19,0765	0,04592	19,0765	19,3885
0,01211	199,808	0,01211	0,00148	0,01211	0,01465	0,01211	6,18217	22,322	3,01155	22,322	2,2E-05	19,2218	0,0505	19,2218	21,2909
0,01254	199,784	0,01254	0,00148	0,01254	0,01527	0,01254	6,43056	23,0971	3,02678	23,0971	2,2E-05	19,4156	0,07189	19,4156	29,9506
0,01297	199,759	0,01297	0,00148	0,01297	0,01616	0,01297	6,78595	32,0876	2,29221	32,0876	1,7E-05	19,6578	0,12326	19,6336	49,3256
0,0134	199,679	0,0134	0,00148	0,0134	0,0211	0,0134	8,63392	40,1481	2,26277	40,1481	1,7E-05	19,7305	0,139	19,7305	58,6477
0,01383	199,573	0,01383	0,00147	0,01383	0,02929	0,01383	12,0225	42,8	2,36084	42,8	1,7E-05	20,0211	0,19145	19,9969	79,0724
0,01427	198,48	0,01427	0,00147	0,01427	0,06695	0,01427	26,5506					20,0938	0,20205	20,0938	84,3131
0,0147	190,711	0,0147	0,00141	0,0147	0,21626	0,0147	87,2545					20,1906	0,20563	20,1906	84,5219
0,01513	133,418	0,01513	0,00103	0,01513	0,71256	0,01513	292,827					20,4328	0,15021	20,4813	55,3917
0,01556	55,2075	0,01556	0,00043	0,01556	1,07038	0,01556	429,975					20,5782	0,11405	20,5782	45,2748
0,016	32,5232	0,016	0,00023	0,016	0,71741	0,016	300,193					20,7719	0,07823	20,7719	31,7375
0,01643	27,2062	0,01643	0,00018	0,01643	0,41488	0,01643	174,975					21,1906	0,05403	21,1906	21,5657
0,01686	25,9509	0,01686	0,00017	0,01686	0,23297	0,01686	100,308					21,4735	0,04715	21,4735	19,2112
0,01729	25,8787	0,01729	0,00017	0,01729	0,16742	0,01729	71,7587					21,7407	0,04443	22,1283	17,5673
0,01773	25,8745	0,01773	0,00018	0,01773	0,11291	0,01773	47,5389					23,3877	0,03831	23,6784	16,0785
0,01816	25,8588	0,01816	0,00018	0,01816	0,07739	0,01816	32,4639					23,8721	0,038	23,8721	16,0319
0,01859	25,8763	0,01859	0,00018	0,01859	0,04693	0,01859	19,9412					24,6472	0,03819	24,6472	16,1142
0,01902	25,7601	0,01902	0,00019	0,01902	0,02802	0,01902	11,729					25,7129	0,03675	25,7129	15,4807
0,01945	24,7586	0,01945	0,00018	0,01945	0,04047	0,01945	16,5735					28,3674	0,02162	28,3674	9,08119
0,01989	16,341	0,01989	0,00012	0,01989	0,11402	0,01989	47,9603					32,0876	0,01282	31,7776	5,9381
0,02032	6,10617	0,02032	4,5E-05	0,02032	0,11062	0,02032	44,576					35,4978	0,00967	35,4978	4,07823
0,02075	3,56815	0,02075	2,6E-05	0,02075	0,05189	0,02075	21,1449					38,598	0,01015	38,598	4,27827
0,02118	2,40771	0,02118	1,8E-05	0,02118	0,03548	0,02118	14,2227					41,6982	0,0069	41,3107	3,13352
0,02162	1,91406	0,02162	1,4E-05	0,02162	0,02784	0,02162	11,6047					42,8	0,00228	42,8	0,65363
0,02205	1,81837	0,02205	1,3E-05	0,02205	0,02515	0,02205	10,5318								
0,02248	1,74379	0,02248	1,3E-05	0,02248	0,02316	0,02248	9,74129								
0,02291	1,70558	0,02291	1,3E-05	0,02291	0,0224	0,02291	9,43321								
0,02335	1,67693	0,02335	1,2E-05	0,02335	0,02178	0,02335	9,17691								
0,02378	1,65537	0,02378	1,2E-05	0,02378	0,02126	0,02378	8,95897								
0,02421	1,63884	0,02421	1,2E-05	0,02421	0,02065	0,02421	8,70342								
0,02464	1,62373	0,02464	1,2E-05	0,02464	0,02002	0,02464	8,43794								
0,02507	1,6078	0,02507	1,2E-05	0,02507	0,01942	0,02507	8,18349								
0,02551	1,58982	0,02551	1,2E-05	0,02551	0,0188	0,02551	7,92331								
0,02594	1,56341	0,02594	1,2E-05	0,02594	0,01812	0,02594	7,63493								
0,02637	1,54121	0,02637	1,1E-05	0,02637	0,0173	0,02637	7,28759								
0,0268	1,52523	0,0268	1,1E-05	0,0268	0,01626	0,0268	6,85219								
0,02724	1,51265	0,02724	1,1E-05	0,02724	0,01521	0,02724	6,40667								
0,02767	1,50224	0,02767	1,1E-05	0,02767	0,01414	0,02767	5,95585								
0,0281	1,48557	0,0281	1,1E-05	0,0281	0,01294	0,0281	5,44976								
0,02853	1,46753	0,02853	1,1E-05	0,02853	0,01173	0,02853	4,93714								
0,02897	1,45108	0,02897	1,1E-05	0,02897	0,01103	0,02897	4,6385								
0,0294	1,43693	0,0294	1,1E-05	0,0294	0,01041	0,0294	4,37851								
0,02983	1,43039	0,02983	1,1E-05	0,02983	0,01009	0,02983	4,24318								
0,03026	1,42384	0,03026	1,1E-05	0,03026	0,00976	0,03026	4,10795								
0,03069	1,4173	0,03069	1E-05	0,03069	0,00944	0,03069	3,97284								
0,03113	1,412	0,03113	1E-05	0,03113	0,00916	0,03113	3,85415								
0,03156	1,40739	0,03156	1E-05	0,03156	0,0089	0,03156	3,74439								
0,03199	1,40277	0,03199	1E-05	0,03199	0,00864	0,03199	3,63464								
0,03242	1,39816	0,03242	1E-05	0,03242	0,00837	0,03242	3,52382								
0,03286	1,39355	0,03286	1E-05	0,03286	0,00807	0,03286	3,39659								
0,03329	1,38893	0,03329	1E-05	0,03329	0,00777	0,03329	3,26941								
0,03372	1,38432	0,03372	1E-05	0,03372	0,00746	0,03372	3,14227								
0,03415	1,38094	0,03415	1E-05	0,03415	0,00719	0,03415	3,02647								
0,03459	1,37893	0,03459	1E-05	0,03459	0,00694	0,03459	2,92311								
0,03502	1,37691	0,03502	1E-05	0,03502	0,00669	0,03502	2,81975								
0,03545	1,3749	0,03545	1E-05	0,03545	0,00644	0,03545	2,71641								
0,03588	1,37348	0,03588	1E-05	0,03588	0,00634	0,03588	2,67266								
0,03632	1,37213	0,03632	1E-05	0,03632	0,00625	0,03632	2,63624								

Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]
0,03891	1,36272	0,03891	1E-05	0,03891	0,00591	0,03891	2,49177
0,03934	1,36213	0,03934	1E-05	0,03934	0,00577	0,03934	2,4311
0,03977	1,36154	0,03977	1E-05	0,03977	0,00563	0,03977	2,3705
0,04021	1,3618	0,04021	1E-05	0,04021	0,00545	0,04021	2,29236
0,04064	1,36748	0,04064	1E-05	0,04064	0,00503	0,04064	2,1006
0,04107	1,37395	0,04107	1E-05	0,04107	0,0046	0,04107	1,90454
0,0415	1,38194	0,0415	1E-05	0,0415	0,00411	0,0415	1,70023
0,04194	1,38817	0,04194	1E-05	0,04194	0,00341	0,04194	1,38707
0,04237	1,39294	0,04237	1E-05	0,04237	0,00252	0,04237	0,98409
0,0428	1,39396	0,0428	1E-05	0,0428	0,00163	0,0428	0,60152

400 Pa; 0,6 - 0,6 mm								400 Pa; 0,6 - 0,8 mm							
Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]
0,0000	400,000	0,00	2,96E-03	0	0,0145	0	5,1381	0	400	0	0,00296	0	0,0126	0	4,79073
0,0037	400,508	0,00	2,96E-03	0,00043	0,0043	0,00605	1,7785	0,00314	400,525	0,00043	0,00296	0,00605	0,00393	0,00605	1,56403
0,0045	400,511	0,00	2,96E-03	0,00086	0,0088	0,01147	3,7074	0,0045	400,53	0,00086	0,00296	0,01147	0,00874	0,01147	3,68961
0,0142	399,997	0,01	2,96E-03	0,0013	0,0086	0,01225	3,6272	0,01418	400,016	0,0013	0,00293	0,01225	0,00856	0,01225	3,61334
0,0146	397,112	0,01	2,96E-03	0,00173	0,0110	0,01331	4,5356	0,01457	397,127	0,00173	0,00287	0,01331	0,01091	0,01331	4,51344
0,0148	386,996	0,01	2,93E-03	0,00216	0,0133	0,0138	5,4930	0,01477	387,011	0,00216	0,00275	0,0138	0,01321	0,0138	5,47266
0,0149	368,758	0,01	2,87E-03	0,00259	0,0280	0,01418	11,2334	0,01486	368,769	0,00259	0,00259	0,01418	0,02797	0,01418	11,2294
0,0150	343,201	0,01	2,75E-03	0,00303	0,0729	0,01438	22,0305	0,01496	343,206	0,00303	0,0023	0,01447	0,07286	0,01443	25,3603
0,0151	299,531	0,01	2,59E-03	0,00346	0,0891	0,01457	35,4256	0,01506	299,473	0,00346	0,00162	0,01457	0,08907	0,01457	35,3983
0,0152	240,112	0,02	2,30E-03	0,00389	0,2005	0,01477	77,3559	0,01518	240,022	0,00389	0,0012	0,01477	0,20039	0,01477	77,3069
0,0152	205,338	0,02	1,62E-03	0,00432	0,3234	0,01486	129,0342	0,01525	205,203	0,00432	0,0009	0,01486	0,32327	0,01486	128,996
0,0153	151,440	0,02	1,20E-03	0,00476	0,4577	0,01496	184,7683	0,01535	151,356	0,00476	0,00062	0,01496	0,45755	0,01496	184,703
0,0154	113,143	0,02	8,97E-04	0,00519	0,6246	0,01506	255,2929	0,01544	113,004	0,00519	0,0004	0,01506	0,62474	0,01506	255,34
0,0155	77,964	0,02	6,17E-04	0,00562	0,7603	0,01515	311,1692	0,01554	77,8043	0,00562	0,00032	0,01515	0,76072	0,01515	311,317
0,0157	52,603	0,02	3,99E-04	0,00605	0,9564	0,01525	387,5736	0,01573	52,393	0,00605	0,00027	0,01525	0,9576	0,01525	388,056
0,0159	46,035	0,02	3,22E-04	0,00648	1,0948	0,0154	461,4234	0,01593	45,7964	0,00648	0,00027	0,01535	1,09575	0,01544	466,796
0,0161	42,210	0,02	2,75E-04	0,00692	1,2240	0,01544	485,5705	0,01612	41,9336	0,00692	0,00029	0,01544	1,22683	0,01554	518,784
0,0165	41,948	0,02	2,72E-04	0,00735	1,3162	0,01554	516,8677	0,01651	41,632	0,00735	0,00029	0,01554	1,32055	0,01573	486,441
0,0184	42,775	0,02	2,99E-04	0,00778	1,1962	0,01573	482,3879	0,01767	42,361	0,00778	0,00026	0,01573	1,20536	0,01593	368,197
0,0193	41,938	0,02	3,02E-04	0,00821	0,8836	0,01593	365,5176	0,01806	42,3398	0,00821	0,00022	0,01593	0,8892	0,01612	295,304
0,0196	39,614	0,02	2,94E-04	0,00865	0,6731	0,01612	292,9569	0,01845	42,4132	0,00865	0,00014	0,01612	0,67787	0,01651	165,26
0,0197	37,517	0,02	2,86E-04	0,00908	0,3770	0,01651	163,7435	0,01922	41,5257	0,00908	0,0001	0,01651	0,37997	0,0169	107,215
0,0198	30,636	0,02	2,25E-04	0,00951	0,2400	0,0169	106,1733	0,01944	40,0141	0,00951	8,2E-05	0,0169	0,24191	0,01767	63,0193
0,0202	11,805	0,02	8,65E-05	0,00994	0,1436	0,01767	61,5392	0,01966	35,5402	0,00994	5,3E-05	0,01767	0,14621	0,01806	48,1446
0,0204	7,315	0,02	5,34E-05	0,01038	0,1081	0,01806	45,9712	0,01983	30,2566	0,01038	3,9E-05	0,01806	0,11214	0,01883	28,0589
0,0212	3,685	0,02	2,71E-05	0,01081	0,0615	0,0185	33,2933	0,02009	19,4242	0,01081	3,5E-05	0,01883	0,06475	0,01903	29,871
0,0215	3,060	0,02	2,25E-05	0,01124	0,0501	0,01883	21,3724	0,02024	14,8127	0,01124	3,5E-05	0,01903	0,06987	0,01922	35,0515
0,0223	2,533	0,02	1,87E-05	0,01167	0,0452	0,01908	19,1682	0,02038	11,2452	0,01167	2,6E-05	0,01922	0,08238	0,01942	49,7791
0,0231	2,556	0,02	1,89E-05	0,01211	0,0447	0,01922	18,9533	0,02077	7,22528	0,01211	2,6E-05	0,01942	0,1185	0,01961	77,8886
0,0401	1,974	0,04	1,46E-05	0,01254	0,0622	0,01942	25,7258	0,02147	5,29528	0,01254	2,7E-05	0,01961	0,18535	0,01971	95,4284
0,0428	2,018	0,04	1,49E-05	0,01297	0,1081	0,01961	44,8406	0,02232	4,70326	0,01297	0,01971	0,22557	0,01988	0,01988	118,669
				0,0134	0,1462	0,01971	61,5014	0,0231	4,72441			0,02	0,31885	0,02	134,611
				0,01383	0,1635	0,0198	69,1341	0,03685	3,58932			0,02009	0,33972	0,02009	142,58
				0,01427	0,2037	0,0199	85,8813	0,04015	3,52473			0,02019	0,34829	0,02019	144,692
				0,0147	0,2194	0,02	91,6723	0,0428	3,60248			0,02038	0,31552	0,02038	129,807
				0,01513	0,2513	0,02009	104,2458					0,02058	0,24058	0,02058	96,187
				0,01556	0,2588	0,02019	104,4413					0,02077	0,1851	0,02077	73,8332
				0,016	0,2127	0,02038	83,8570					0,02109	0,12743	0,02109	50,2241
				0,01643	0,1452	0,02058	56,5830					0,02119	0,1109	0,02119	43,6435
				0,01686	0,0978	0,02077	39,6765					0,02147	0,08344	0,02147	33,9918
				0,01729	0,0644	0,02119	25,8553					0,02155	0,07631	0,02155	31,4846
				0,01773	0,0542	0,02147	22,2290					0,02242	0,06208	0,02242	25,9705
				0,01816	0,0506	0,02174	20,6031					0,0231	0,05736	0,0231	24,2136
				0,01859	0,0391	0,02329	16,4212					0,02465	0,05912	0,02465	24,9463
				0,01902	0,0285	0,02717	12,5670					0,02581	0,0563	0,02571	23,9559
				0,01945	0,0206	0,02992	8,3161					0,0293	0,03181	0,02806	16,9596
				0,01989	0,0125	0,03472	5,2703					0,03414	0,02233	0,0293	13,3691
				0,02032	0,0096	0,04015	4,2356					0,03957	0,0182	0,03395	9,47194
				0,02075	0,0022	0,0428	0,7453					0,04189	0,00915	0,03937	7,82285
												0,0428	0,00373	0,0415	4,62432
														0,0428	1,25739

400 Pa; 0,8 - 0,6 mm								400 Pa; 0,8 - 0,8 mm							
Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]
0	400	0	0,00296	0	0,01173	0	4,4483	0	400	0	0,00296	0	0,0119	0	4,67582
0,00043	400,271	0,00043	0,00296	0,00043	0,0114	0,00043	4,35786	0,0007	400,473	0,0007	0,00296	0,0045	0,00695	0,0045	2,87621
0,00086	400,437	0,00086	0,00296	0,00086	0,01113	0,00086	4,26407	0,01389	399,719	0,01389	0,00295	0,00789	0,01129	0,00789	4,57927
0,0013	400,435	0,0013	0,00296	0,0013	0,01086	0,0013	4,18854	0,01418	399,179	0,01418	0,00295	0,01147	0,01738	0,01147	7,33463
0,00173	400,432	0,00173	0,00296	0,00173	0,01038	0,00173	3,98589	0,01457	393,057	0,01457	0,00291	0,01225	0,01697	0,01225	7,16133
0,00216	400,43	0,00216	0,00296	0,00216	0,00978	0,00216	3,80753	0,01477	379,041	0,01477	0,00282	0,01322	0,01954	0,01322	8,15996
0,00259	400,428	0,00259	0,00296	0,00259	0,00918	0,00259	3,6292	0,01496	330,04	0,01496	0,00252	0,0138	0,0231	0,0138	9,59404
0,00303	400,426	0,00303	0,00296	0,00303	0,00862	0,00303	3,4541	0,01506	295,841	0,01506	0,0023	0,01418	0,0476	0,01418	19,1545
0,00346	400,425	0,00346	0,00296	0,00346	0,00818	0,00346	3,29625	0,01515	258,819	0,01515	0,00204	0,01452	0,12409	0,01438	35,3738

Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]
0,00389	400,423	0,00389	0,00296	0,00389	0,00775	0,00389	3,14605	0,01527	205,665	0,01525	0,00171	0,01457	0,13548	0,01457	54,5361
0,00432	400,422	0,00432	0,00296	0,00432	0,00731	0,00432	3,00484	0,01535	172,914	0,01535	0,00137	0,01477	0,28189	0,01477	113,085
0,00476	400,419	0,00476	0,00296	0,00476	0,00721	0,00476	2,97193	0,01554	105,564	0,01554	0,00084	0,01496	0,53068	0,01496	214,575
0,00519	400,415	0,00519	0,00296	0,00519	0,00732	0,00519	3,01795	0,01573	67,2307	0,01573	0,00053	0,01508	0,71239	0,0151	305,118
0,00562	400,411	0,00562	0,00296	0,00562	0,00743	0,00562	3,07857	0,01593	52,6057	0,01593	0,0004	0,01515	0,82461	0,01515	335,785
0,00605	400,406	0,00605	0,00296	0,00605	0,00755	0,00605	3,15495	0,01612	42,3399	0,01612	0,00031	0,01525	1,00457	0,01525	407,325
0,00648	400,395	0,00648	0,00296	0,00648	0,00824	0,00648	3,43955	0,01719	46,1489	0,01661	0,0003	0,01535	1,15993	0,01535	467,602
0,00692	400,384	0,00692	0,00296	0,00692	0,00903	0,00692	3,77723	0,01883	49,1353	0,0169	0,0003	0,01554	1,37202	0,01554	545,916
0,00735	400,373	0,00735	0,00296	0,00735	0,01006	0,00735	4,2255	0,01934	47,8071	0,01869	0,00031	0,01573	1,47075	0,01573	585,97
0,00778	400,36	0,00778	0,00296	0,00778	0,01106	0,00778	4,65604	0,01944	46,8915	0,01942	0,00032	0,01593	1,27346	0,01593	509,778
0,00821	400,345	0,00821	0,00296	0,00821	0,01199	0,00821	5,0455	0,01963	42,572	0,01963	0,0003	0,01612	1,13393	0,01612	463,626
0,00865	400,327	0,00865	0,00296	0,00865	0,01302	0,00865	5,48051	0,01983	35,7292	0,0198	0,00026	0,01651	0,69698	0,01651	295,152
0,00908	400,308	0,00908	0,00296	0,00908	0,0141	0,00908	5,94136	0,02007	23,9107	0,02009	0,00017	0,0169	0,4945	0,0169	220,551
0,00951	400,282	0,00951	0,00296	0,00951	0,01508	0,00951	6,35657	0,02021	18,2114	0,02021	0,00013	0,01767	0,34729	0,01767	155,064
0,00994	400,256	0,00994	0,00296	0,00994	0,01602	0,00994	6,7559	0,02038	13,6311	0,02038	9,8E-05	0,01806	0,28312	0,01806	125,904
0,01038	400,227	0,01038	0,00296	0,01038	0,01663	0,01038	7,01708	0,02072	9,17913	0,02077	6,3E-05	0,01845	0,24486	0,01845	110,61
0,01081	400,199	0,01081	0,00296	0,01081	0,01713	0,01081	7,22931	0,0214	6,5514	0,02147	4,7E-05	0,01883	0,16744	0,01883	74,4686
0,01124	400,171	0,01124	0,00296	0,01124	0,0173	0,01124	7,30113	0,02147	6,38926	0,02445	3,9E-05	0,01903	0,14571	0,01903	64,5136
0,01167	400,143	0,01167	0,00296	0,01167	0,01728	0,01167	7,2931	0,02387	5,41775	0,04015	3E-05	0,01922	0,13357	0,01922	59,0477
0,01211	400,117	0,01211	0,00296	0,01211	0,01705	0,01211	7,1935	0,03685	4,17695	0,04092	3E-05	0,01942	0,15235	0,01942	66,2817
0,01254	400,087	0,01254	0,00296	0,01254	0,01722	0,01254	7,26524	0,04092	4,07727	0,0428	3E-05	0,01961	0,21438	0,01961	91,8435
0,01297	400,055	0,01297	0,00296	0,01297	0,01761	0,01297	7,42025	0,0428	4,11045			0,01971	0,25766	0,01971	110,403
0,0134	399,945	0,0134	0,00296	0,0134	0,02126	0,0134	8,80843					0,02	0,36264	0,02	153,895
0,01383	399,794	0,01383	0,00295	0,01383	0,02544	0,01383	10,5047					0,02009	0,3856	0,02009	162,617
0,01427	397,927	0,01427	0,00294	0,01427	0,02653	0,01427	26,0622					0,02019	0,39312	0,02019	164,056
0,0147	383,803	0,0147	0,00285	0,0147	0,23174	0,0147	93,0255					0,02038	0,35063	0,02038	144,883
0,01513	267,055	0,01513	0,0021	0,01513	0,79133	0,01513	322,147					0,02058	0,26721	0,02058	107,195
0,01556	100,846	0,01556	0,0008	0,01556	1,38576	0,01556	551,538					0,02077	0,20546	0,02077	82,1965
0,016	49,003	0,016	0,00037	0,016	1,22589	0,016	494,412					0,02109	0,14028	0,02109	55,5199
0,01643	43,7239	0,01643	0,0003	0,01643	0,78793	0,01643	330,461					0,02119	0,12166	0,02119	48,1213
0,01686	45,5367	0,01686	0,0003	0,01686	0,51303	0,01686	227,507					0,02147	0,09113	0,02147	37,557
0,01729	46,6542	0,01729	0,0003	0,01729	0,41857	0,01729	186,802					0,02155	0,0832	0,02155	34,8128
0,01773	47,6612	0,01773	0,0003	0,01773	0,33727	0,01773	150,412					0,02242	0,07014	0,02242	29,5305
0,01816	48,4246	0,01816	0,00031	0,01816	0,27066	0,01816	120,455					0,02368	0,06655	0,02368	28,0951
0,01859	49,2887	0,01859	0,00031	0,01859	0,20826	0,01859	93,2402					0,026	0,06172	0,02591	26,2088
0,01902	49,4544	0,01902	0,00033	0,01902	0,12186	0,01902	53,2772					0,02806	0,04717	0,02775	21,3157
0,01945	48,2125	0,01945	0,00034	0,01945	0,09676	0,01945	41,6081					0,0293	0,03699	0,02899	16,409
0,01989	32,8383	0,01989	0,00024	0,01989	0,23112	0,01989	97,8251					0,03375	0,02736	0,0324	12,2703
0,02032	11,39	0,02032	8,3E-05	0,02032	0,24752	0,02032	99,5053					0,03918	0,02211	0,03918	9,2769
0,02075	6,30307	0,02075	4,6E-05	0,02075	0,12322	0,02075	49,2801					0,0415	0,01158	0,04131	5,19638
0,02118	4,69328	0,02118	3,4E-05	0,02118	0,07311	0,02118	29,0104					0,0428	0,00382	0,0428	1,344
0,02162	4,00872	0,02162	3E-05	0,02162	0,05128	0,02162	21,4391								
0,02205	3,8157	0,02205	2,8E-05	0,02205	0,04721	0,02205	19,8018								
0,02248	3,67347	0,02248	2,7E-05	0,02248	0,04423	0,02248	18,6088								
0,02291	3,61872	0,02291	2,7E-05	0,02291	0,04313	0,02291	18,1813								
0,02335	3,56491	0,02335	2,6E-05	0,02335	0,04287	0,02335	18,0844								
0,02378	3,5118	0,02378	2,6E-05	0,02378	0,04321	0,02378	18,2321								
0,02421	3,43483	0,02421	2,5E-05	0,02421	0,04348	0,02421	18,3388								
0,02464	3,3512	0,02464	2,5E-05	0,02464	0,04372	0,02464	18,434								
0,02507	3,24858	0,02507	2,4E-05	0,02507	0,04286	0,02507	18,0588								
0,02551	3,15716	0,02551	2,3E-05	0,02551	0,0417	0,02551	17,5585								
0,02594	3,11248	0,02594	2,3E-05	0,02594	0,03934	0,02594	16,5667								
0,02637	3,07576	0,02637	2,3E-05	0,02637	0,03698	0,02637	15,5708								
0,0268	3,0508	0,0268	2,3E-05	0,0268	0,03458	0,0268	14,5687								
0,02724	3,02116	0,02724	2,2E-05	0,02724	0,03255	0,02724	13,7129								
0,02767	2,98853	0,02767	2,2E-05	0,02767	0,03073	0,02767	12,9516								
0,0281	2,94835	0,0281	2,2E-05	0,0281	0,02836	0,0281	11,9455								
0,02853	2,90784	0,02853	2,1E-05	0,02853	0,02603	0,02853	10,9597								
0,02897	2,87185	0,02897	2,1E-05	0,02897	0,02429	0,02897	10,2243								
0,0294	2,84085	0,0294	2,1E-05	0,0294	0,02288	0,0294	9,62776								
0,02983	2,82245	0,02983	2,1E-05	0,02983	0,02204	0,02983	9,27403								
0,03026	2,80404	0,03026	2,1E-05	0,03026	0,0212	0,03026	8,92039								
0,03069	2,78563	0,03069	2,1E-05	0,03069	0,02035	0,03069	8,56689								
0,03113	2,77145	0,03113	2E-05	0,03113	0,01964	0,03113	8,2662								
0,03156	2,75957	0,03156	2E-05	0,03156	0,01899	0,03156	7,99431								
0,03199	2,7477	0,03199	2E-05	0,03199	0,01835	0,03199	7,72243								
0,03242	2,736	0,03242	2E-05	0,03242	0,01771	0,03242	7,45398								
0,03286	2,72687	0,03286	2E-05	0,03286	0,01719	0,03286	7,23742								
0,03329	2,71774	0,03329	2E-05	0,03329	0,01668	0,03329	7,02087								
0,03372	2,70861	0,03372	2E-05	0,03372	0,01616	0,03372	6,80433								
0,03415	2,70023	0,03415	2E-05	0,03415	0,01573	0,03415	6,62622								
0,03459	2,69269	0,03459	2E-05	0,03459	0,0154	0,03459	6,4904								
0,03502	2,68514	0,03502	2E-05	0,03502	0,01508	0,03502	6,35457								
0,03545	2,67759	0,03545	2E-05	0,03545	0,01475	0,03545	6,21875								
0,03588	2,67082	0,03588	2E-05	0,03588	0,01458	0,03588	6,14653								
0,03632	2,66416	0,03632	2E-05	0,03632	0,01442	0,03632	6,08213								
0,03675	2,65749	0,03675	2E-05	0,03675	0,01427	0,03675	6,01772</								



Dráha [m]	Tlak [Pa]	Dráha [m]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [m]	Machovo číslo [-]	Dráha [m]	Rychlost proudění [m/s]
0,03891	2,62639	0,03891	1,9E-05	0,03891	0,01301	0,03891	5,47533
0,03934	2,62091	0,03934	1,9E-05	0,03934	0,01239	0,03934	5,20568
0,03977	2,61542	0,03977	1,9E-05	0,03977	0,01178	0,03977	4,93605
0,04021	2,61133	0,04021	1,9E-05	0,04021	0,01109	0,04021	4,63106
0,04064	2,61626	0,04064	1,9E-05	0,04064	0,00992	0,04064	4,09767
0,04107	2,62213	0,04107	1,9E-05	0,04107	0,00867	0,04107	3,54721
0,0415	2,6298	0,0415	1,9E-05	0,0415	0,00725	0,0415	2,96382
0,04194	2,63959	0,04194	2E-05	0,04194	0,00566	0,04194	2,26471
0,04237	2,65115	0,04237	2E-05	0,04237	0,00392	0,04237	1,47038
0,0428	2,65716	0,0428	2E-05	0,0428	0,00243	0,0428	0,83632

600 Pa; 0,6 - 0,6 mm								600 Pa; 0,6 - 0,8 mm							
Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
0	600	0	0,00444	0	0,04435	0	-17,631	0	600	0	0,00444	0	0,03733	0	-13,305
1,04681	601,367	4,49594	0,00445	0,69788	0,01955	0,69788	-6,2369	1,04681	601,428	7,59613	0,00445	0,69788	0,02083	0,69788	-5,0353
4,49594	601,626	14,184	0,00444	4,80596	0,00402	5,426	0,60293	4,49594	601,784	14,184	0,00444	5,426	0,00744	2,55832	-1,8697
14,184	600,942	14,5715	0,00441	6,04603	0,00341	11,4714	4,04951	14,184	601,122	14,5715	0,00441	6,71036	0,00633	5,11598	1,64967
14,5715	597,044	14,7653	0,00432	11,4714	0,00959	12,2464	3,95517	14,5715	597,196	14,7653	0,00432	11,4714	0,00967	11,4714	4,08401
14,7653	582,277	14,8622	0,00415	12,2464	0,00937	13,7965	4,81065	14,7653	582,365	14,8622	0,00415	12,2464	0,00941	12,2464	3,97204
14,8622	554,584	14,9591	0,00391	13,7965	0,0117	14,184	9,65758	14,8622	554,587	14,9591	0,00391	13,7965	0,01162	13,7965	4,77705
14,9591	515,17	15,1528	0,00299	14,184	0,0244	14,8622	22,1752	14,9591	515,082	15,1528	0,00299	14,184	0,02443	14,184	9,6651
15,1528	379,287	15,3466	0,00184	14,5715	0,07895	14,5715	30,7577	15,1528	379,223	15,3466	0,00184	14,5715	0,0792	14,4262	22,2477
15,3466	231,417	15,4596	0,00128	14,7653	0,18615	14,7653	70,8217	15,3466	231,384	15,4596	0,00127	14,7653	0,18664	14,5715	30,8627
15,4596	161,104	15,5404	0,0009	14,8622	0,31528	14,8622	124,891	15,4596	160,297	15,5404	0,00089	14,8622	0,3159	14,7653	71,0052
15,5404	113,588	15,7341	0,00056	14,9591	0,46488	14,9591	186,4	15,5404	111,964	15,7341	0,00052	14,9591	0,46553	14,8622	125,147
15,7341	72,3876	15,9279	0,00049	15,1528	0,81305	15,1528	331,235	15,7341	66,6821	15,9279	0,00043	15,1528	0,81239	14,9591	186,688
15,9279	66,9747	16,1216	0,00045	15,3466	1,18149	15,3466	474,604	15,9279	58,0796	16,1216	0,00036	15,3466	1,18286	15,3466	475,007
16,1216	64,9697	16,9936	0,00047	15,4435	1,33218	15,4435	530,758	16,1216	52,8224	17,0905	0,00039	15,4435	1,34149	15,4435	533,84
16,9936	69,8516	18,6405	0,00048	15,5404	1,43267	15,5404	564,374	16,9936	57,9704	18,7859	0,00041	15,5404	1,45674	15,5404	572,461
18,6405	71,7215	19,4156	0,0005	15,7341	1,32282	15,7341	528,576	17,0905	60,1911	19,2218	0,00041	15,7341	1,39377	15,7341	553,866
18,8343	73,0024	19,627	0,00048	15,9279	0,98372	15,9279	402,74	18,8343	62,1376	19,4398	0,0004	15,9279	1,06973	15,9279	434,802
19,4156	71,3626	19,8031	0,00041	16,1216	0,75869	16,1216	325,635	19,3429	59,9169	19,6336	0,00037	16,1216	0,84596	16,5092	213,053
19,627	66,6722	20,1906	0,0002	16,5092	0,43697	16,5092	190,04	19,464	57,9844	19,8516	0,0003	16,5092	0,49034	16,8967	153,079
19,8031	57,0752	20,4528	0,00016	16,8967	0,30936	16,8967	137,928	19,6336	53,0234	20,2149	0,00015	16,8967	0,33995	18,0593	91,2078
20,1906	27,7806	21,547	4,6E-05	18,0593	0,18168	18,0593	79,6638	19,8758	40,9645	20,3844	0,00012	18,0593	0,20529	18,4468	81,5995
20,4528	21,8264	22,322	2,7E-05	18,4468	0,15316	18,4468	68,0597	20,1906	22,6835	21,547	5,9E-05	18,4468	0,18154	18,8343	57,8445
21,547	6,27943	23,0971	2,7E-05	18,8343	0,10194	18,8343	44,5447	20,3844	16,7014	22,8064	4,7E-05	18,8343	0,13021	19,0281	55,3598
22,322	3,67367	30,8475	2,1E-05	19,0765	0,08795	19,0281	38,8918	21,547	8,18738	30,8475	2,3E-05	19,0281	0,1258	19,2218	57,5268
23,0971	3,76697	42,8	2,7E-05	19,2218	0,08341	19,2218	36,1991	22,7095	6,38369	38,598	2,3E-05	19,2218	0,1314	19,4156	74,4033
30,8475	2,90756			19,4156	0,1029	19,4156	43,5107	30,8475	3,14711	42,8	2,4E-05	19,4156	0,173	19,6094	113,906
42,8	1,60977			19,6094	0,17501	19,6094	73,2567	38,598	3,06576			19,6094	0,26701	19,7062	142,042
				19,6974	0,23006	19,6974	97,379	42,8	3,00279			19,7062	0,33168	19,8031	165,592
				19,7327	0,24454	19,7327	103,697					19,8031	0,3864	19,969	204,34
				19,8031	0,26848	19,8031	114,11					19,969	0,47877	20,0938	218,753
				19,969	0,34841	19,969	146,908					20,0938	0,51442	20,1906	223,567
				20,085	0,37276	20,085	156,358					20,1906	0,53033	20,3844	188,414
				20,1026	0,37184	20,1026	155,663					20,3844	0,45002	20,7719	93,2607
				20,3844	0,26294	20,2205	134,437					20,7719	0,22266	21,4	62,6261
				20,5668	0,2195	20,3844	108,146					21,4	0,15056	21,547	60,1266
				20,6352	0,21344	20,5668	89,2891					21,547	0,14334	22,4189	57,226
				20,7719	0,20542	20,6124	87,5493					22,4189	0,13658	23,0971	52,6442
				21,4	0,27122	20,7719	84,9304					23,0971	0,12453	24,3565	54,2838
				21,547	0,29593	21,4	104,65					24,3565	0,12848	24,9378	56,8702
				22,322	0,30529	21,547	114,807					24,9378	0,13469	25,9066	61,9851
				23,0971	0,17753	22,322	120,208					25,9066	0,14704	26,1973	63,1763
				24,4534	0,12674	23,0971	74,7618					26,1973	0,14995	27,1661	59,8525
				25,7129	0,0874	24,2596	55,9339					27,1661	0,14232	27,7473	56,5265
				26,391	0,07116	25,616	37,6998					27,7473	0,13449	28,5224	46,0917
				27,1661	0,05951	26,391	29,9046					28,5224	0,11024	29,5189	37,7863
				28,9099	0,04402	27,1661	25,0499					29,5189	0,09045	31,1576	28,7034
				33,3664	0,02053	28,9099	18,4358					31,1576	0,06844	32,9789	22,541
				35,4978	0,01617	33,1727	8,86353					33,1727	0,0525	34,9165	18,7324
				40,1481	0,02237	35,4978	6,80403					35,4978	0,04252	37,0479	17,4606
				41,892	0,01601	40,1481	9,39938					37,0479	0,0414	38,598	17,564
				42,8	0,00692	41,8767	6,45072					38,598	0,04165	40,3419	15,2994
						42,4732	3,33578					40,3419	0,0366	41,892	8,79387
						42,8	0,01483					42,0857	0,01906	42,8	3,60888
												42,8	0,00986		

600 Pa; 0,8 - 0,6 mm								600 Pa; 0,8 - 0,8 mm							
Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
0	600	0	0,00444	0	0,03908	0	-15,503	0	600	0	0,00444	0	0,04435	0	-17,631
1,04681	601,345	1,39575	0,00444	0,69788	0,01805	0,69788	-5,3906	1,04681	601,367	4,49594	0,00445	0,69788	0,01955	0,69788	-6,2369
4,49594	601,57	4,49594	0,00445	4,49594	0,00571	5,73601	2,33494	4,49594	601,626	14,184	0,00444	4,80596	0,00402	5,426	0,60293
13,9418	600,445	13,9418	0,00444	8,70334	0,01311	11,3745	7,76904	14,184	600,942	14,5715	0,00441	6,04603	0,00341	11,4714	4,04951
14,184	599,787	14,184	0,00443	11,4714	0,01847	11,4714	7,79832	14,5715	597,044	14,7653	0,00432	11,4714	0,00959	12,2464	3,95517

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
14,5715	591,271	14,5715	0,00438	12,2464	0,01822	12,2464	7,69336	14,7653	582,277	14,8622	0,00415	12,2464	0,00937	13,7965	4,81065
14,7653	570,973	14,7653	0,00426	13,3121	0,02068	13,3121	8,60214	14,8622	554,584	14,9591	0,00391	13,7965	0,0117	14,184	9,65758
14,9591	498,156	14,9591	0,00382	13,7965	0,02176	13,7965	9,02983	14,9591	515,17	15,1528	0,00299	14,184	0,0244	14,4262	22,1752
15,056	447,469	15,056	0,00349	14,184	0,04216	14,184	16,7678	15,1528	379,287	15,3466	0,00184	14,5715	0,07895	14,5715	30,7577
15,1528	392,273	15,1528	0,0031	14,5715	0,1225	14,4262	35,8852	15,3466	231,417	15,4596	0,00128	14,7653	0,18615	14,7653	70,8217
15,2739	311,574	15,2497	0,0026	14,7653	0,25838	14,5715	48,6696	15,4596	161,104	15,5404	0,0009	14,8622	0,31528	14,8622	124,891
15,3466	261,579	15,3466	0,00208	14,9591	0,51756	14,7653	102,008	15,5404	113,588	15,7341	0,00056	14,9591	0,46488	14,9591	186,4
15,404	159,399	15,404	0,00126	15,0802	0,71518	14,9591	208,282	15,7341	72,3876	15,9279	0,00049	15,1528	0,81305	15,1528	331,235
15,7341	97,0518	15,7341	0,00077	15,1528	0,83758	15,1044	306,936	15,9763	66,9747	16,1216	0,00045	15,3466	1,18149	15,3466	474,604
15,9279	71,908	15,9279	0,00056	15,2497	1,01759	15,1528	340,399	16,1216	64,9697	16,9936	0,00047	15,4435	1,33218	15,4435	530,758
16,1216	54,701	16,1216	0,00042	15,3466	1,18752	15,2497	412,647	16,606	69,8516	18,6405	0,00048	15,5404	1,43267	15,5404	564,374
16,606	63,5816	17,1873	0,00046	15,5404	1,42267	15,3466	479,583	16,9936	71,7215	19,4156	0,0005	15,7341	1,32282	15,7341	528,576
16,9936	68,0041	18,9796	0,0005	15,7341	1,53274	15,5404	567,077	18,8343	73,0024	19,627	0,00048	15,9279	0,98372	15,9279	402,74
17,9624	73,1331	19,4156	0,00052	15,9279	1,37725	15,7341	610,424	19,4156	71,3626	19,8031	0,00041	16,1216	0,75869	16,1216	325,635
18,689	76,6844	19,6094	0,00051	16,1216	1,25602	15,9279	546,291	19,627	66,6722	20,1906	0,0002	16,5092	0,43697	16,5092	190,04
19,2218	78,1831	19,7679	0,00043	16,5092	0,77279	16,1216	506,849	19,8031	57,0752	20,4528	0,00016	16,8967	0,30936	16,8967	137,928
19,464	76,4854	19,8031	0,00041	16,8967	0,54179	16,5092	322,136	20,1906	27,7806	21,547	4,6E-05	18,0593	0,18168	18,0593	79,6638
19,6094	73,3608	20,0145	0,00024	17,9624	0,3875	16,8967	238,8	20,4528	21,8264	22,322	2,7E-05	18,4468	0,15316	18,4468	68,0597
19,7855	59,4038	20,1906	0,00014	18,0593	0,37391	17,8655	178,984	21,547	6,27943	23,0971	2,7E-05	18,8343	0,10194	18,8343	44,5447
20,0145	33,5247	20,4086	0,0001	18,4468	0,359	18,0593	166,546	22,322	3,67367	30,8475	2,1E-05	19,0765	0,08795	19,0281	38,8918
20,1906	19,7228	20,8686	8,3E-05	19,0765	0,18625	18,4468	162,2	23,0971	3,76697	42,8	2,7E-05	19,2218	0,08341	19,2218	36,1991
20,4086	14,8009	21,449	4,6E-05	19,2218	0,15087	19,0281	87,9431	30,8475	2,90756			19,4156	0,1029	19,4156	43,5107
20,9169	11,1278	22,5158	2,3E-05	19,4156	0,13067	19,2218	67,4635	42,8	1,60977			19,6094	0,17501	19,6094	73,2567
21,449	6,36857	29,2974	1,1E-05	19,5448	0,17085	19,4156	57,5745					19,6974	0,23006	19,6974	97,379
22,5158	3,13157	35,4978	1,2E-05	19,6094	0,19351	19,5609	75,9166					19,7327	0,24454	19,7327	103,697
29,2974	1,46391	38,598	1,2E-05	19,715	0,27003	19,6094	82,6556					19,8031	0,26848	19,8031	114,11
35,4978	1,57126	42,8	1,3E-05	19,8031	0,31713	19,6974	111,095					19,9969	0,34841	19,9969	146,908
38,598	1,5619			20,0145	0,46442	19,7503	123,944					20,085	0,37276	20,085	156,358
42,8	1,79765			20,085	0,50934	19,8031	135,95					20,1026	0,37184	20,1026	155,663
				20,1026	0,51228	20,0145	197,109					20,3844	0,26294	20,2205	134,437
				20,1906	0,48552	20,085	215,119					20,5668	0,2195	20,3844	108,146
				20,3844	0,35141	20,1026	215,745					20,6352	0,21344	20,5668	89,2891
				20,5782	0,24109	20,1906	199,499					20,7719	0,20542	20,6124	87,5493
				20,7719	0,16951	20,3844	143,928					21,4	0,27122	20,7719	84,9304
				21,1584	0,15862	20,5782	97,4702					21,547	0,29593	21,4	104,65
				21,449	0,17391	20,7719	71,2233					22,322	0,30529	21,547	114,807
				21,547	0,1791	21,1584	63,9533					23,0971	0,17753	22,322	120,208
				22,322	0,19273	21,449	69,5565					24,4534	0,12674	23,0971	74,7618
				23,0971	0,14604	21,6439	72,2101					25,7129	0,0874	24,2596	55,9339
				23,969	0,12999	22,322	77,4665					26,391	0,07116	25,616	37,6998
				24,6472	0,12427	23,0971	61,4202					27,1661	0,05951	26,391	29,9046
				25,5191	0,12565	23,969	54,7824					28,9099	0,04402	27,1661	25,0499
				26,5848	0,13522	24,6472	52,3776					33,3664	0,02053	28,9099	18,4358
				26,9723	0,1373	25,5191	52,9238					35,4978	0,01617	33,1727	8,86353
				27,7473	0,12951	26,5848	56,9427					40,1481	0,02237	35,4978	6,80403
				28,5224	0,10815	26,9723	57,8252					41,892	0,01601	40,1481	9,39938
				30,8475	0,07917	27,7473	54,5692					42,8	0,00692	41,8767	6,45072
				32,7852	0,05904	28,5224	45,3416							42,4732	3,33578
				34,529	0,04848	30,1832	36,3305							42,8	0,01483
				36,4666	0,04456	32,7852	24,7701								
				37,0479	0,04428	34,529	20,3909								
				38,598	0,04481	36,4666	18,7861								
				40,3419	0,03927	37,0479	18,6713								
				42,0857	0,02093	38,598	18,8915								
				42,8	0,01131	40,3419	16,4482								
						41,892	9,69564								
						42,8	4,222								

800 Pa; 0,6 - 0,6 mm							800 Pa; 0,6 - 0,8 mm								
Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
0	800	0	0,00591	0	0,03796	0	15,1897	0	800	0	0,00592	0	0,0245	0	1,7848
0,69788	803,471	0,69788	0,00594	3,13961	0,02474	2,55832	10,1245	0,69788	802,524	1,04681	0,00593	1,04681	0,01958	0,69788	3,1671
6,04603	804,091	7,59613	0,00594	6,04603	0,00903	5,11598	4,3796	6,04603	802,93	6,04603	0,00593	6,71036	0,00616	4,49594	1,90307
14,184	803,263	14,184	0,00594	7,59613	0,00677	7,59613	2,79633	14,184	802,033	14,184	0,00593	7,59613	0,00595	9,33998	3,51725
14,5715	798,245	14,5715	0,0059	11,4714	0,01035	11,4714	4,36885	14,5715	797,718	14,5715	0,00589	11,4714	0,00981	11,4714	4,14374
14,7653	778,733	14,7653	0,00578	13,0215	0,00969	13,0215	4,08705	14,7653	778,674	14,7653	0,00578	13,0215	0,00903	13,0215	3,8026
14,8622	741,622	14,8622	0,00556	13,409	0,011	13,409	4,52433	14,8622	742,744	14,8622	0,00557	13,409	0,01055	13,409	4,114
14,9591	688,435	14,9591	0,00524	13,7965	0,00989	13,7965	4,05532	14,9591	691,864	14,9591	0,00528	13,7965	0,00943	13,7965	3,04467
15,1528	509,842	15,1528	0,00403	14,184	0,02213	14,184	8,66835	15,1528	508,12	15,1528	0,00403	14,184	0,0205	14,184	7,33826
15,3466	315,254	15,3466	0,0025	14,5715	0,07442	14,5715	28,7941	15,3466	311,835	15,3466	0,00247	14,4747	0,05577	14,5715	25,5994
15,4758	205,071	15,4758	0,00163	14,7653	0,18468	14,7653	69,8089	15,5404	159,319	15,5404	0,00126	14,5715	0,06632	14,7653	67,4846
15,5404	151,4	15,5404	0,0012	14,8622	0,31828	14,8622	125,55	15,7341	103,438	15,7341	0,00082	14,7653	0,17999	14,8622	122,21
15,7341	84,0488	15,7341	0,00067	14,9591	0,47524	14,9591	189,773	15,9279	92,9633	15,9279	0,00073	14,8622	0,31194	14,9591	185,852
15,9279	71,1013	15,9279	0,00055	15,1528	0,83295	15,1528	338,587	16,1216	87,4988	16,1216	0,00069	14,9591	0,46878	15,1528	341,146
16,1216	63,133	16,1216	0,00048	15,3627	1,23167	15,3466	483,147	16,5092	96,403	16,606	0,00075	15,1528	0,84013	15,3466	482,671
16,606	69,0934	16,8967	0,00049	15,4435	1,37854	15,4435	548,622	16,9936	101,082	16,9936	0,00077	15,3466	1,20134		

Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
19,4317	71,2455	19,627	0,00045	15,9279	1,33725	15,9279	529,414	19,464	99,6305	19,3187	0,00077	15,7341	1,4142	15,9279	434,338
19,627	67,1674	19,8031	0,0004	16,1216	1,15636	16,1216	470,997	19,6336	93,6036	19,4883	0,00074	15,9279	1,08977	16,1216	359,985
19,8031	56,9966	20,085	0,00021	16,5092	0,74342	16,5092	311,384	19,8273	80,1571	19,6336	0,00071	16,1216	0,88938	16,5092	204,669
20,0497	33,5264	20,2055	0,00016	16,8967	0,58876	16,8967	256,946	20,1906	45,7282	19,8273	0,00061	16,5092	0,50268	16,8967	153,298
20,2055	23,3725	20,4528	0,00013	17,7686	0,51097	17,7617	230,091	20,3844	34,5761	20,0938	0,00044	16,8967	0,37311	17,7686	125,332
20,4528	18,1422	21,547	3,8E-05	18,0593	0,48098	18,0593	212,817	20,7719	27,8641	20,2149	0,00035	17,7686	0,30594	18,0593	114,581
21,547	5,32945	22,322	2,1E-05	18,4468	0,51756	18,4468	232,583	21,547	18,7031	20,3844	0,00027	18,0593	0,2807	18,4468	126,21
22,7095	2,93759	23,0971	2,1E-05	18,8343	0,40416	18,8343	180,225	23,1939	15,3168	20,7719	0,00021	18,4468	0,30691	18,8343	92,9031
25,4222	2,51464	25,4222	1,8E-05	19,0281	0,3292	19,0281	145,559	28,7162	6,37171	21,547	0,00014	18,8343	0,22574	19,0281	83,1766
26,1973	2,51511	26,1973	1,9E-05	19,2218	0,26377	19,2218	117,236	41,6982	4,93889	23,1939	0,00011	19,0281	0,20126	19,2218	79,7942
30,8475	1,96241	30,8475	1,4E-05	19,4156	0,17821	19,4156	73,2243	42,8	4,914	28,9099	4,7E-05	19,2218	0,19142	19,4156	89,8336
42,8	2,57174	42,8	1,9E-05	19,5286	0,11769	19,5448	28,4374					42,8	3,6E-05	19,4156	125,707
				19,6094	0,08207	19,6094	4,76317					19,6094	0,30419	19,7062	155,857
				19,8031	0,08413	19,6974	-12,365					19,7062	0,37713	19,8031	181,248
				20,0673	0,11471	19,715	-14,411					19,8031	0,43891	19,9969	222,959
				20,1026	0,1165	19,8031	-17,752					19,9969	0,54668	20,0938	237,557
				20,2055	0,10684	19,9969	-30,769					20,0938	0,58653	20,1906	243,869
				20,3844	0,07277	20,085	-32,414					20,1906	0,60644	20,3844	218,408
				20,7035	0,06471	20,3844	-23,373					20,3844	0,54319	20,7719	137,069
				20,7719	0,06387	20,6352	-4,7649					20,7719	0,33863	21,4	93,1236
				21,547	0,16735	21,4	43,244					21,4	0,22873	21,547	91,5204
				22,322	0,18045	21,547	53,965					21,547	0,22324	22,4189	103,86
				23,0971	0,08999	22,322	67,3978					22,5158	0,25114	23,1939	111,795
				24,2596	0,04981	23,0971	36,1264					23,1939	0,26729	24,1628	127,005
				25,4222	0,01764	24,3565	16,9782					24,1628	0,30446	24,744	136,601
				26,1973	0,01173	25,5191	2,63077					24,744	0,32808	25,5191	145,423
				27,7473	0,02643	26,5848	-5,5211					25,5191	0,3502	26,1973	149,241
				28,5224	0,02458	27,7473	-10,92					26,2941	0,36048	26,9723	148,678
				29,2974	0,02551	28,5224	-9,8057					26,9723	0,36068	27,7473	134,577
				39,3731	0,01297	30,8475	-10,483					27,7473	0,32741	28,5224	97,206
				42,4732	0,00311	39,3731	-5,3214					28,5224	0,23843	29,2974	73,5278
				42,8	0,00259	41,3107	-1,0469					29,2974	0,18036	30,8475	49,0475
						42,4732	0,91811					30,8475	0,11908	32,3976	34,8278
						42,8	0,65366					32,5914	0,08111	34,1415	25,3866
												34,1415	0,06056	35,8853	21,7649
												35,8853	0,05166	38,9855	19,8118
												38,9855	0,04712	40,3419	16,6356
												40,3419	0,04	42,8	3,69119
												42,8	0,01011		

800 Pa; 0,8 - 0,6 mm							800 Pa; 0,8 - 0,8 mm								
Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	
0	800	0	0,00591	0	0,02598	9,85132	0	800,165	0	0,00591	0	0,01885	0	7,21713	
0,69788	803,402	0,69788	0,00594	5,11598	0,00961	5,11598	3,71907	0,67845	802,99	0,67845	0,00594	5,07712	0,00736	4,45708	2,78819
4,49594	803,715	6,04603	0,00594	6,04603	0,00852	6,04603	3,46649	4,45708	803,239	6,00718	0,00594	6,00718	0,00707	7,77871	4,38867
13,9418	802,337	13,9418	0,00593	11,4714	0,0191	11,4714	8,06695	13,8545	802,01	13,8545	0,00593	11,4325	0,01875	11,2387	7,87243
14,184	801,45	14,184	0,00592	12,2464	0,01886	12,2464	7,96263	14,1452	800,815	14,1936	0,00591	12,9826	0,01797	11,4325	7,91961
14,5715	790,458	14,5715	0,00585	13,3121	0,02078	13,409	8,88387	14,5327	791,119	14,5327	0,00585	13,3701	0,02026	12,9826	7,57806
14,7653	763,868	14,7653	0,00571	13,409	0,02139	13,7965	8,50273	14,7265	764,555	14,7265	0,0057	13,7576	0,01816	13,3701	8,40054
14,9591	667,469	14,9591	0,00513	13,7965	0,02045	14,184	15,9561	14,9202	672,033	14,9202	0,00515	14,1452	0,03841	13,7576	7,5305
15,056	600,515	15,056	0,00469	14,184	0,04024	14,4747	38,5845	15,0171	602,234	15,0171	0,0047	14,5327	0,11069	14,1452	15,1335
15,1528	527,335	15,1528	0,00418	14,5715	0,11756	14,5715	46,6454	15,114	524,221	15,114	0,00415	14,7265	0,24662	14,5327	44,0962
15,2739	419,706	15,2739	0,00333	14,7653	0,25457	14,7653	100,109	15,2351	418,966	15,2351	0,00332	14,9202	0,51295	14,7265	96,849
15,3466	353,082	15,3466	0,0028	14,9591	0,51687	14,9591	207,418	15,3077	354,055	15,3077	0,00281	15,0171	0,68118	14,9202	205,287
15,5404	217,402	15,5404	0,00172	15,0802	0,71544	15,0802	289,79	15,5015	213,98	15,5015	0,0017	15,1624	0,9485	15,0171	275,372
15,7341	129,308	15,7341	0,00103	15,1528	0,83902	15,1528	340,563	15,6953	127,937	15,6953	0,00101	15,2109	1,03617	15,1382	366,846
15,9279	87,6808	15,9279	0,00069	15,2497	1,01999	15,2497	413,447	15,889	84,002	15,889	0,00067	15,3077	1,20151	15,2109	419,832
16,1216	58,4441	16,1216	0,00046	15,3466	1,19296	15,3466	481,795	16,0828	53,674	16,0828	0,00043	15,5015	1,46385	15,3077	484,997
16,7998	70,3559	17,9624	0,00055	15,5404	1,4289	15,5404	569,517	16,4703	48,0005	16,4703	0,00038	15,6953	1,65065	15,5015	584,536
17,8655	82,5761	18,6405	0,00059	15,7341	1,60283	15,7341	636,915	16,8578	47,0521	16,8578	0,00037	15,9375	1,62859	15,6953	657,45
18,9796	95,6683	19,0281	0,00061	16,0732	1,50222	15,9279	605,355	18,311	64,4743	18,1173	0,00049	16,0828	1,61197	15,889	640,238
19,3429	101,573	19,4802	0,00065	16,1216	1,48835	16,1216	589,751	19,183	75,1198	18,8923	0,00057	16,4703	1,14589	16,0828	634,776
19,4156	102,289	19,5125	0,00065	16,5092	0,97458	16,5092	396,461	19,401	73,797	19,183	0,00059	16,8578	0,88339	16,4703	448,477
19,6094	98,3647	19,627	0,00064	16,8967	0,70145	16,8967	302,717	19,5947	67,0663	19,401	0,00057	17,6329	0,68018	16,8578	358,687
19,8031	80,8891	19,8031	0,00056	17,6717	0,57791	17,6717	255,197	19,7885	53,3247	19,5947	0,00052	18,0204	0,61952	17,6329	277,278
20,0497	46,5739	20,1906	0,0002	18,0593	0,54289	18,0593	240,62	20,0065	33,4667	19,7885	0,00042	18,4079	0,65446	18,0204	251,93
20,1906	28,8558	20,3844	0,00013	18,4468	0,58612	18,4468	262,749	20,176	21,6172	20,0307	0,00025	18,7955	0,51625	18,4079	266,022
20,4086	18,732	21,449	5,8E-05	18,8343	0,46896	18,8343	211,159	20,3455	14,7417	20,176	0,00017	18,9892	0,43856	18,8439	200,93
21,3517	8,83834	22,7095	3,1E-05	19,0281	0,38343	19,0281	172,498	20,7331	8,06478	20,3455	0,00012	19,183	0,38221	18,9892	177,679
21,449	8,16199	29,2974	1,6E-05	19,2703	0,29172	19,2461	137,075	21,5081	6,57545	20,7331	6,2E-05	19,3767	0,3463	19,183	155,874
22,7095	4,23367	42,8	2,1E-05	19,4156	0,23303	19,4156	105,856	23,0582	5,61619	21,5081	4,9E-05	19,5705	0,40814	19,3767	142,387
29,2974	2,22153			19,5286	0,23937	19,5286	107,291	23,8333	5,65312	23,0582	4,2E-05	19,7158	0,53215	19,5705	167,546
42,8	2,90573			19,6094	0,25064	19,6094	110,885	29,7015	5,58426	23,8333	4,2E-05	19,7643	0,57196	19,6916	209,735
				19,715	0,32817	19,6974	139,19	40,8843	5,3251	29,9229	2,6E-05	19,9822	0,77573	19,7643	233,864

Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
20,3844	0,48847	20,1906	252,541
20,5782	0,34603	20,3844	204,125
20,7719	0,2506	20,5782	141,924
21,1584	0,20074	20,7719	105,883
21,449	0,19878	21,1584	82,5544
21,547	0,19817	21,2067	82,4984
22,322	0,21785	21,449	82,5254
23,1939	0,19364	21,6439	83,5066
24,6472	0,17241	22,322	90,2986
25,616	0,15488	23,1939	81,3597
27,7473	0,12957	24,4534	73,921
28,5224	0,1122	25,616	65,2572
32,0876	0,06838	27,7473	54,633
34,1415	0,05	28,5224	47,0914
36,0791	0,04356	32,7852	25,5045
37,0479	0,04279	34,3352	20,6401
38,598	0,04352	36,0791	18,3528
40,3419	0,03928	37,0479	18,0328
41,892	0,02528	38,598	18,3397
42,8	0,01228	40,3419	16,4832
		41,892	10,4203
		42,8	4,59546

Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
21,4551	0,24346	20,7331	226,881
21,5081	0,22516	21,4551	98,3778
22,2832	0,18107	21,5081	92,4901
23,0582	0,17289	22,2832	75,8222
23,9301	0,18328	23,0582	72,6984
24,8021	0,20064	23,9301	77,0444
25,3834	0,20837	24,8021	84,2051
26,2553	0,20002	25,3834	87,304
27,7085	0,1702	26,2553	83,7722
28,4835	0,1452	27,7085	71,4848
29,48	0,12944	28,4835	60,8835
33,1338	0,09009	29,48	54,2056
34,8777	0,0781	33,1338	37,8082
37,2028	0,07248	34,8777	33,2786
39,1404	0,06789	36,4278	31,0185
40,303	0,06043	38,9467	28,9615
41,8531	0,03709	40,303	25,2232
42,5966	0,02341	41,8531	15,2546
42,7628	0,01839	42,7628	6,79687
42,794	0,01478	42,794	5,4633

1000 Pa; 0,6 - 0,6 mm								1000 Pa; 0,6 - 0,8 mm							
Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
0	1000,3	0	0,00739	0	0,02091	0	8,18043	0	1000	0	0,00739	0	0,03862	0	14,9428
0,67845	1005,39	0,67845	0,00743	5,38714	0,00597	5,07712	2,26384	0,69788	1005,52	0,69788	0,00743	2,55832	0,02684	2,1708	10,3624
6,00718	1005,82	7,55727	0,00743	6,00718	0,00511	6,00718	1,98632	6,04603	1006,56	8,26045	0,00744	5,426	0,00946	4,80596	3,50329
14,1452	1004,79	14,1452	0,00743	11,4325	0,01054	11,4325	4,45185	14,184	1005,55	14,184	0,00743	7,37468	0,00553	6,04603	2,01481
14,5327	998,712	14,5327	0,00739	12,9826	0,00969	12,9826	4,08634	14,5715	999,478	14,5715	0,00739	7,59613	0,00536	11,4714	4,19517
14,7265	974,796	14,7265	0,00724	13,3701	0,01074	13,3701	4,36363	14,7653	975,58	14,7653	0,00725	11,4714	0,00994	13,0215	3,93402
14,8233	928,651	14,8233	0,00698	13,7576	0,00878	13,7576	3,40047	14,8622	929,447	14,8622	0,00698	13,0215	0,00933	13,409	4,24278
14,9202	862,247	14,9202	0,00658	14,1452	0,0206	14,1452	7,84594	14,9591	863,054	14,9591	0,00659	13,409	0,01049	13,7965	3,28935
15,114	640,677	15,114	0,00507	14,5327	0,07043	14,5327	27,1033	15,1528	640,508	15,1528	0,00507	13,7965	0,0086	14,184	7,81366
15,3077	397,548	15,3077	0,00315	14,7265	0,18189	14,7265	68,4898	15,3466	398,811	15,3466	0,00316	14,184	0,0206	14,5715	27,0765
15,4531	242,479	15,4531	0,00192	14,8233	0,31823	14,8233	124,955	15,5081	224,994	15,4919	0,00192	14,5715	0,07034	14,7653	68,4237
15,5015	191,693	15,5015	0,00152	14,9202	0,48021	14,9202	190,423	15,5404	190,726	15,5404	0,00151	14,7653	0,18174	14,8622	124,813
15,6953	107,992	15,6953	0,00086	15,114	0,88772	15,114	342,987	15,7341	102,335	15,7341	0,00081	14,8622	0,31789	14,9591	190,192
15,9375	94,3191	15,889	0,00074	15,3077	1,21826	15,3077	489,897	15,9279	83,7511	15,9279	0,00065	14,9591	0,47968	15,1528	343,221
16,0828	88,7087	16,0828	0,00067	15,4046	1,39548	15,4046	555,853	16,1216	72,1716	16,1216	0,00054	15,1528	0,8871	15,3466	488,884
16,4703	99,7348	16,6641	0,00072	15,5015	1,553	15,5015	610,874	16,5092	86,7875	16,606	0,00061	15,3466	1,21625	15,4435	554,686
16,9547	104,891	16,8578	0,00073	15,6953	1,61055	15,6953	636,98	16,8967	94,0491	16,9936	0,00064	15,4435	1,39465	15,5404	608,869
18,5048	108,586	18,0204	0,00072	15,889	1,32461	15,889	527,493	18,3499	101,176	19,2218	0,00068	15,5404	1,55289	15,7341	634,608
19,183	111,789	18,4079	0,00073	16,0828	1,13475	16,0828	464,161	19,2218	106,73	19,4398	0,00067	15,7341	1,61256	15,9279	530,591
19,4252	109,974	18,7955	0,00072	16,4703	0,69342	16,4703	290,572	19,4398	104,316	19,6336	0,00063	15,9279	1,33863	16,1216	465,219
19,5881	104,107	19,3767	0,00073	16,8578	0,54031	16,8578	233,141	19,6336	94,8579	19,8273	0,00053	16,1216	1,13578	16,5092	287,713
19,7643	88,2766	19,5881	0,00071	17,298	0,4834	17,6329	214,072	19,8516	75,013	20,2149	0,00026	16,5092	0,68147	16,8967	219,836
20,1518	37,8401	19,7643	0,00062	18,0204	0,46081	18,0204	201,231	20,1906	39,3554	20,3844	0,00018	16,8967	0,50149	17,8655	196,086
20,3683	26,1628	20,0637	0,00035	18,4079	0,51072	18,4079	225,678	20,3844	26,2874	20,7719	0,00011	18,0593	0,42991	18,0593	190,792
20,7331	21,7812	20,1518	0,00026	18,7955	0,40245	18,7955	177,667	20,7719	17,2778	21,547	8,6E-05	18,4468	0,48933	18,4468	219,624
21,5081	9,13027	20,3683	0,00018	18,9892	0,33775	18,9892	149,257	21,547	12,4968	23,7752	6,8E-05	19,0281	0,33939	19,0281	152,876
22,4769	4,93121	20,7331	0,00015	19,2314	0,27977	19,3525	113,305	23,2908	9,54197	32,0876	4E-05	19,2218	0,30846	19,2218	139,92
23,0582	4,79593	21,5081	6,4E-05	19,3767	0,24889	19,3767	111,007	31,7776	5,49013	40,1481	3,9E-05	19,4156	0,30387	19,4156	137,042
23,8333	4,80463	22,4769	3,4E-05	19,5705	0,28145	19,5705	123,137	40,1481	5,27893	42,8	4,2E-05	19,6094	0,39023	19,6094	172,883
38,5591	3,21573	23,0582	3,4E-05	19,6586	0,34579	19,6586	150,5	42,8	5,68277			19,7305	0,49574	19,7062	209,806
42,794	3,44555	23,8333	3,4E-05	19,7114	0,37299	19,6938	158,323					19,9969	0,70905	19,8516	258,641
		26,1584	2,7E-05	19,7643	0,3979	19,7643	171,888					20,0938	0,76658	19,9969	306,016
		26,9334	2,7E-05	20,0461	0,58428	20,0109	239,023					20,1906	0,80308	20,0938	329,38
		38,5591	2,4E-05	20,0637	0,5899	20,0461	249,022					20,3844	0,76906	20,1906	343,247
		42,794	2,5E-05	20,1518	0,58644	20,0637	251,117					20,7719	0,46794	20,3844	330,902
				20,3455	0,47379	20,1518	247,072					21,4	0,2643	20,7719	201,374
				20,5279	0,34371	20,3455	198,72					21,547	0,23639	21,4	113,093
				20,5735	0,32055	20,5279	140,755					22,7095	0,22898	21,547	102,748
				20,7331	0,25044	20,5507	135,22					24,8409	0,21365	23,0002	96,861
				21,4551	0,30658	20,7331	104,613					25,7129	0,1987	24,8409	90,5893
				21,5081	0,31489	21,4551	116,81					27,3598	0,16174	25,7129	84,0632
				22,2832	0,3896	21,5081	120,292					27,9411	0,14929	27,2629	69,0935
				23,0582	0,3017	22,2832	157,488					28,7162	0,13015	27,9411	63,0139
				24,2208	0,27194	23,0582	130,071					31,1576	0,0946	28,5224	56,2014
				24,6083	0,26362	24,3177	114,911					32,9789	0,07568	30,4047	43,9184
				25,3834	0,22205	24,6083	111,78					34,7228	0,06508	32,7852	32,4466
				26,1584	0,16526	25,4802	90,4864					36,6604	0,06119	34,529	27,7412
				26,9334	0,12693	26,1584	69,6278					37,0479	0,06093	36,2729	25,9139
				28,6773	0,09065	26,9334	53,6293					38,598	0,06128	37,0479	25,7023
				30,3658	0,07362	28,4835	39,1889					40,3419	0,05435	38,598	25,8471
				33,3276	0,05242	29,7015	33,3136					41,892	0,03444	40,3419	22,7758
				35,8465	0,04463	32,9401	22,9306					42,8	0,01618	41,6982	15,8557
				37,0091	0,04457	35,2652	19,0509							42,8	5,92435

Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
38,5591	0,04594	37,0091	18,7919
40,303	0,04174	38,5591	19,3697
41,8531	0,0261	40,303	17,4772
42,7628	0,01145	41,8531	10,5338
42,794	0,00927	42,7628	4,1579
		42,794	3,36695

1000 Pa; 0,8 - 0,6 mm								1000 Pa; 0,8 - 0,8 mm							
Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]	Dráha [mm]	Tlak [Pa]	Dráha [mm]	Hustota média [kg/m <sup>3</sup> ]	Dráha [mm]	Machovo číslo [-]	Dráha [mm]	Rychlost proudění [m/s]
0	1000	0	0,00739	0	0,03572	0	14,5301	0	1000,28	0	0,00739	0	0,01779	0	5,90482
0,69788	1005,76	0,69788	0,00743	4,30218	0,01958	3,33337	9,39163	0,67845	1004,93	0,67845	0,00743	6,00718	0,00859	4,45708	3,23619
6,04603	1006,37	7,59613	0,00744	7,15324	0,01291	6,04603	5,23326	4,45708	1005,08	6,00718	0,00743	11,4325	0,01902	8,2216	5,02377
13,9418	1004,75	13,9418	0,00743	7,59613	0,01267	6,9318	5,03992	13,8545	1003,59	13,8545	0,00742	12,9826	0,01836	11,4325	8,03501
14,184	1003,62	14,2325	0,00741	11,4714	0,01958	11,4714	8,27263	14,1936	1000,67	14,1936	0,0074	13,3701	0,02028	12,9826	7,74634
14,5715	990,091	14,5715	0,00733	13,0215	0,01939	13,0215	8,18317	14,5327	990,105	14,5327	0,00732	13,7576	0,01705	13,3701	8,42872
14,7653	957,147	14,7653	0,00715	13,409	0,02144	13,409	8,9229	14,7265	957,144	14,7265	0,00714	14,1452	0,03692	13,7576	7,08459
14,9591	837,238	14,9591	0,00643	13,7965	0,01946	13,7965	8,10088	14,9202	841,811	14,9202	0,00645	14,5327	0,10718	14,1452	14,5042
15,056	753,967	15,056	0,00588	14,184	0,03895	14,184	15,4005	15,0171	755,387	15,0171	0,00588	14,7265	0,2432	14,5327	42,6561
15,1528	662,591	15,1528	0,00524	14,5715	0,11453	14,5715	45,416	15,114	658,575	15,114	0,00521	14,9202	0,52153	14,7265	95,2871
15,2739	527,692	15,2497	0,0044	14,7653	0,25184	14,7653	98,8291	15,2835	470,788	15,2593	0,00395	15,0171	0,71604	14,9202	204,225
15,3466	444,424	15,3466	0,00353	14,9591	0,52696	14,9591	206,633	15,3077	443,669	15,3077	0,00352	15,114	0,9211	15,0171	273,631
15,5404	274,443	15,5404	0,00218	15,1286	0,86101	15,0802	289,581	15,5015	270,508	15,5015	0,00215	15,3077	1,20748	15,2109	421,105
15,7341	163,912	15,7341	0,0013	15,1528	0,9092	15,1528	340,849	15,6953	162,262	15,6953	0,00129	15,5015	1,46474	15,3077	487,241
15,9279	117,23	15,9279	0,00093	15,2739	1,09172	15,2497	414,257	15,889	109,152	15,889	0,00087	15,6953	1,66385	15,5015	585,02
16,1216	85,0472	16,1216	0,00067	15,3466	1,19826	15,3466	483,688	16,0828	73,463	16,0828	0,00058	15,889	1,64901	15,6953	662,628
16,5092	99,8949	16,606	0,00075	15,5404	1,4393	15,5404	573,882	16,4703	71,9316	16,4703	0,00057	16,0828	1,6187	15,889	645,869
16,8967	108,646	16,9936	0,00079	15,7341	1,61812	15,7341	644,362	16,7955	80,0023	16,6986	0,00063	16,4703	1,18367	16,0828	636,711
18,3499	121,633	17,9624	0,00083	15,9279	1,5411	15,9279	607,804	19,3767	87,6505	19,3767	0,00069	16,8578	0,944	16,4703	642,886
18,8827	128,699	18,5921	0,00087	16,1216	1,47425	16,1216	588,024	19,5947	85,1992	19,5947	0,00067	17,6329	0,83633	16,8578	381,092
19,3914	143,429	18,8827	0,00088	16,5092	0,9609	16,5092	391,205	19,7885	77,0355	19,7885	0,00061	18,0204	0,7943	17,6329	339,121
19,4156	143,987	19,4156	0,00095	16,8967	0,72026	16,8967	305,088	20,0065	60,4244	20,0065	0,00048	18,4079	0,84843	18,0204	321,718
19,6094	138,613	19,6094	0,00093	17,6717	0,64891	17,6717	278,004	20,176	44,1493	20,176	0,00035	18,7955	0,73066	18,4079	344,559
19,7503	119,377	19,7679	0,0008	18,0593	0,62656	18,0593	269,027	20,3455	32,4055	20,3455	0,00026	18,9892	0,6509	18,7955	296,189
19,8031	110,932	19,8031	0,00077	18,4468	0,70367	18,4468	302,898	20,7331	19,2447	20,7331	0,00015	19,3767	0,55948	18,9892	264,01
20,0145	62,7287	20,0145	0,00045	18,8343	0,5762	18,8343	250,222	21,5081	11,6399	21,5081	8,9E-05	19,5705	0,61155	19,3767	227,331
20,1906	33,5179	20,1906	0,00024	19,0281	0,47851	19,0281	208,448	23,3489	7,57949	23,3489	5,8E-05	19,74	0,73903	19,5705	247,845
20,4086	19,5983	20,4086	0,00013	19,2461	0,38503	19,2218	175,151	34,2964	4,25988	33,9089	3,2E-05	19,958	0,90544	19,74	300,168
20,7719	10,8412	20,7719	7,1E-05	19,4156	0,30307	19,4156	134,799	37,0091	4,22812	37,0091	3,1E-05	20,0549	0,95883	19,958	367,443
21,449	7,91917	21,449	5,4E-05	19,5125	0,29994	19,5125	133,042	42,794	4,56502	42,794	3,4E-05	20,1518	0,98892	20,0549	387,069
23,1939	4,51154	23,3877	3,2E-05	19,6094	0,30746	19,6094	135,38					20,3455	0,94827	20,1518	395,676
38,0167	2,47274	38,598	1,8E-05	19,715	0,40147	19,715	175,366					20,7331	0,66894	20,3455	376,251
38,598	2,47239	42,8	2E-05	19,8031	0,47131	19,8031	204,169					21,4551	0,38603	20,7331	262,208
42,8	2,7026			20,085	0,83326	20,085	351,421					21,5081	0,37367	21,4551	156,078
				20,1026	0,84609	20,1026	356,464					22,2832	0,377	21,5081	152,219
				20,1906	0,86086	20,1906	360,322					23,0582	0,35959	22,2832	154,243
				20,3844	0,79229	20,3844	336,401					24,027	0,31798	23,0582	148,271
				20,5782	0,62549	20,5782	259,125					24,7052	0,29486	24,1239	130,755
				20,7719	0,51102	20,7719	216,133					25,5771	0,2761	24,7052	122,86
				21,1584	0,34086	21,1584	140,201					26,9334	0,25586	25,5771	115,291
				21,449	0,28801	21,449	122,042					27,7085	0,25685	26,9334	107,092
				21,547	0,27028	21,547	115,965					28,4835	0,23858	27,7085	107,498
				22,322	0,27943	22,322	118,865					29,48	0,22754	28,4835	99,7625
				23,0971	0,24747	23,1939	104,601					30,8087	0,20619	29,48	94,9856
				24,6472	0,21693	24,4534	93,4039					32,7463	0,16262	30,8087	86,0038
				26,391	0,19289	26,4879	80,5358					34,1026	0,13795	32,7463	67,9882
				27,6505	0,17149	27,6505	72,2613					35,6527	0,12186	34,1026	57,8305
				28,5224	0,14656	28,5224	61,6055					39,3342	0,10774	35,6527	51,283
				29,5189	0,13248	29,5189	55,6247					40,1092	0,10328	39,1404	45,7636
				31,4676	0,11242	31,4676	47,2278					41,6593	0,07463	40,1092	43,2813
				34,1415	0,08389	33,9477	35,7888					42,5986	0,04334	41,6593	31,2031
				35,8853	0,07434	35,8853	31,3346					42,7628	0,03383	42,4344	18,3279
				39,1793	0,06882	38,9855	29,3327					42,794	0,02718	42,5986	16,4197
				40,3419	0,06225	40,1481	27,2185							42,7628	12,5056
				41,892	0,03861	41,6982	17,8176							42,794	10,0464
				42,8	0,01892	42,8	7,02305								