



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

# ANALÝZA VLIVU ROZMĚRŮ ČERPACÍCH KANÁLŮ PŘI KONSTRUKCI NOVÉ VERZE SCINTILAČNÍHO DETEKTORU

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Kryll

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

BRNO 2016

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Josef Kryll

**ID:** 106569

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

## **Analýza vlivu rozměrů čerpacích kanálů při konstrukci nové verze scintilačního detektoru**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte základy elektronové mikroskopie a základy problematiky proudění plynů v nízkých tlacích a proudění otvory malých dimenzí oddělující oblasti s velkými tlakovými spády. Seznamte se se systémy SolidWorks, Ansys Fluent. V systému SolidWorks vymodelujte 3D model původní varianty detektoru a varianty s většími průřezy čerpacích kanálů, které umožňuje nová koncepce mikroskopu. Proveďte analýzu a na základě výsledků proveďte optimalizaci rozměrů s ohledem na funkci zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 26.5.2016

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

**Konzultant diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D., 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.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## Abstrakt:

Cílem této práce je nastudovat tematiku environmentální elektronové skenovací mikroskopie a čerpání plynu pro vytvoření vakua v nově navrženém scintilačním detektoru. Dále vytvořením modelu navrženého detektoru a simulací a analýzou proudění plynu v diferenciallyně čerpané komoře detektoru a porovnáním výsledků se stávajícím modelem detektoru.

Teoretická část je věnována elektronové mikroskopii, zdrojům elektronů a detektorům sekundárních elektronů. Dále typy signálů, které se vytvářejí při interakci elektronového svazku se vzorkem. V této části je také věnována pozornost rovnicím popisujícím proudění v popisované komoře a dopad změny rozměrů na vlastnosti sledovaného detektoru.

Praktická část se skládá z vytvoření modelu scintilačního detektoru a analýzy proudění plynu s následným porovnáním výsledků se stávající verzí detektoru. Výstupem této práce je model navrženého detektoru s vizuálními výsledky.

## Abstract:

The aim of this thesis is to study the issue of environmental scanning electron microscopy and pumping gas to create a vacuum in the newly designed scintillation detector. Further, creating a model of recently proposed scintillation detector and simulating and analyzing pumping gas in differentially pumped chamber of detector and the results compare with the previous model.

The theoretical part deals with electron microscopy, electron sources, electron optics and secondary electrons detectors. It is also presented which signals are generated by the electron beam on the surface of a solid.

Further fluid flow issues and equations describing the flow in the solved chamber are dismantled. Furthermore, the impact of gaseous environment on the trajectory of primary electrons, because there are collisions of primary beam with atoms and molecules of gas.

The following section discusses creating, quality and importance of the network in mathematical modelling. A method of a final volume used to calculate the differential equations describing the flow of gas at the premises of the microscope is described.

The practical part consists in creating a model of scintillation detector and analyzing the gas flow in drawing a vacuum in the newly designed scintillation detector. Furthermore, the simulation results are compared with the results of simulations on the older type of scintillation detector.

The output of this thesis is model of recently proposed scintillation detector with visualized simulation results.

## Klíčová slova:

Elektronová mikroskopie, scintilační detektor, diferenciallyně čerpaná komora, modelování proudění tekutin, metoda konečných objemů

## Keywords:

Electron microscopy, scintillation detector, differentially pumped chamber, the fluid flow modelling, finite volume method

## Bibliografická citace díla:

KRYLL, J. *Analýza vlivu rozměrů čerpacích kanálů při konstrukci nové verze scintilačního detektoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2016. 93 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza vlivu rozměrů čerpacích kanálů při konstrukci nové verze scintilačního detektoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Maxovi Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů. Mé manželce Elišce Kryllové a mé matce Janě Rushilové za podporu při studiu.

## Obsah:

Úvod: .....	8
1. Elektronová mikroskopie.....	9
1.1 Historie .....	9
1.2 Interakce elektronů a chování elektronu .....	10
1.3 Scintilační detektor.....	11
1.3.1 Princip scintilačního detektoru.....	11
1.3.2 Popis částí scintilačního detektoru.....	12
2. Typy elektronových mikroskopů .....	15
2.1 Transmisní (prozařovací) elektronový mikroskop (TEM) .....	16
2.2 Rastrovací (skenovací) elektronový mikroskop (REM, SEM) .....	18
2.2.1 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM) .....	19
3. Popis modelu proudění tekutiny .....	21
3.1 Základní rovnice popisující proudění v řešené komoře.....	23
3.1.1 Rovnice kontinuity.....	23
3.1.2 Zákon zachování hybnosti .....	24
3.1.3 Navier-Stokesovy rovnice .....	26
3.1.3.1 Vlastnosti Navier-Stokesovo rovnice.....	28
3.1.3.2 Symetrie Navier-Stokesovo rovnic .....	29
3.1.3.3 Rovnice pro tlak.....	29
3.1.3.4 Formulace pro pole vířivosti.....	30
4. Kritické proudění .....	31
4.1 Teplotní parabola .....	31
4.2 Tlaková hora .....	32
4.3 Machovo číslo.....	34
4.4 Hugoniotův teorém .....	35
5. Použité systémy:.....	37
5.1 SolidWorks.....	37
5.2 Fluent.....	38
6. Popis řešeného problému .....	41
7. Vyhodnocení výsledků analýz.....	43

Závěr:.....	52
Literatura:.....	53
Seznam obrázků:.....	56
Seznam grafů:.....	57
Seznam příloh:.....	58
Přílohy: .....	62

## Úvod:

Uvedená práce řeší problematiku proudění plynu v sacích kanálech scintilačního detektoru pro environmentální rastrovací elektronový mikroskop. Byl řešen vliv velikosti průřezu sacího kanálku ve spojitosti se vzájemnou vzdáleností clon v scintilačním detektoru. Byl také vyhodnocen vliv uvedených variant na průměrný tlak plynu v dráze sekundárních elektronů procházejících scintilačním detektorem ke scintilátoru.

V první části práce byla popsána tematika environmentální elektronové skenovací mikroskopie, teorie zdrojů elektronů a detektory sekundárních elektronů. Dále typy signálů, které se vytvářejí při interakci elektronového svazku se vzorkem. Také byla nastudována problematika teorie čerpání plynu ve vakuových komorách v nově navrženém scintilačním detektoru.

Dále byla studována problematika rovnic popisující proudění stlačitelného média.

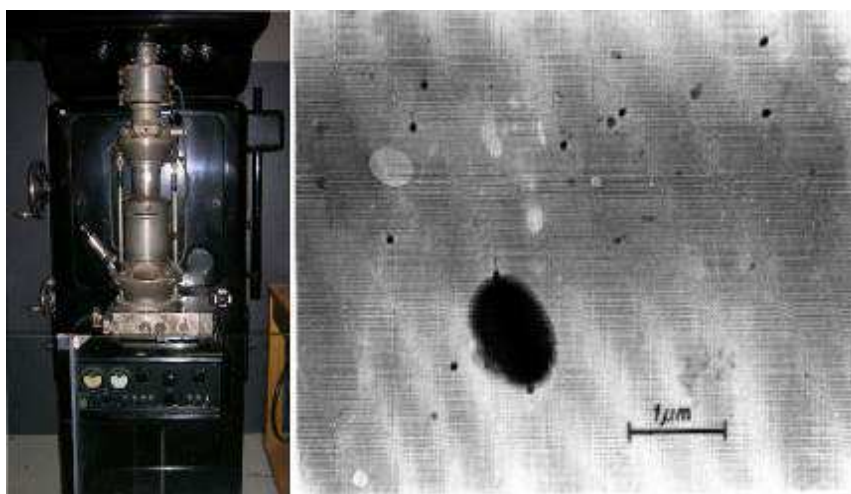
V Praktická část byl vymodelován model scintilačního detektoru ve variantách s různými průřezy sacích kanálků a vzájemných vzdáleností clonek v detektoru. Na závěr byly vyhodnoceny výsledky simulací daných variant pomocí programu ANSYS fluent.

# 1. Elektronová mikroskopie

Slovo mikroskopie je odvozeno z řeckého mikros (malý) a skopeo (pozorovat). Účelem každého zvětšování v mikroskopii je zvýšit počet informací o pozorovaném objektu, které jsou jinak lidskému oku nedostupné. [1]

## 1.1 Historie

První použitelný mikroskop byl sestaven již roku 1590 Zachariasem Jansenem. Světelné mikroskopy využívají pro svou funkci elektromagnetické vlnění ve viditelné oblasti. Toto vlnění tvoří přibližně polovina vlnové délky použitého světelného záření. Svého vrcholu dosáhly světelné mikroskopy ve třicátých letech devatenáctého století. Maximální zvětšení světelného mikroskopu je 2 000 při rozlišení 0,2  $\mu\text{m}$ . Naproti tomu elektronové mikroskopy využívají pro svou funkci elektrony, jejichž vlnová délka je 105 krát kratší než u světla. Vznik elektronové mikroskopie umožnil objev Luise de Broglieho, který navrhl, že rychle se pohybující částice mají částicový, ale i vlnový charakter jako světlo používané zobrazování ve světelné mikroskopii. Vlnová povaha elektronů byla později potvrzena elektronovou difrakcí. První elektronový mikroskop (obr. 1a) sestavil tým vedený Maxem Knollem a Ernstem Ruskou v roce 1931 a prezentovali i první snímek pořízený touto novou technologií (obr. 1b). První komerční skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop představila firma Cambridge Scientific Instruments v roce 1965.



Obrázek 1: a) první elektronový mikroskop v muzeu v Mnichově b) první snímek bakterie

První pozorované vzorky byly biologické materiály jako krevní buňky, rostlinné tkáně a chitinové schránky hmyzu. Jejich pozorování bylo limitováno prostupností urychlených elektronů. Z tohoto důvodu musely být preparáty dostatečně tenké a zbavené veškeré vlhkosti. U prvních vzorků byl pozorován spíše obrys, než vnitřní struktura.

---

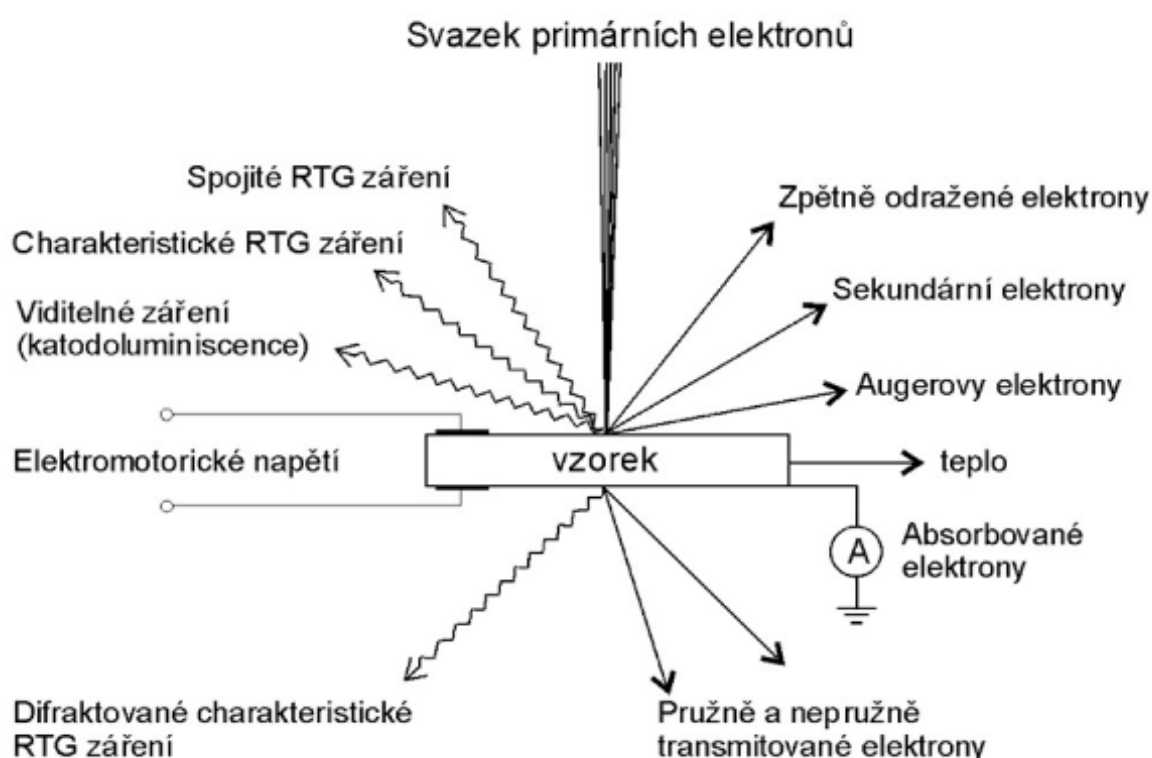
<sup>1</sup> nejmenší vzdálenost mezi dvěma částicemi, při které je dokážeme rozlišit

Pokud pro stanovení rozlišovací meze elektronového mikroskopu použijeme vztah, který odvodil Ernest Abbe ( $dm = 0,61 \cdot \lambda / (n \cdot \sin \alpha)$ ) dostaneme rozlišení teoreticky o pět řádů lepší než v případě optického mikroskopu. Ve skutečnosti je však lepší pouze o dva až tři řády z důvodu vad zobrazení. I to však stačí na zobrazení jednotlivých atomů a k rutinnímu pozorování organel buněk v transmisním elektronovém mikroskopu. Běžné laboratorní elektronové mikroskopy mají v současné době rozlišovací schopnost v řádu desetin nm, která postačuje k pozorování např. bílkovinných makromolekul.

Z matematických vztahů vyplývá, že kratší vlnové délky a tím i menší hodnoty rozlišovací meze dosáhneme volbou vyšších urychlovacích napětí. Tento způsob vedl dříve ke konstrukci mikroskopů enormně velkých, pro něž musely být stavěny speciální budovy (délka tubusu byla přes dvě patra budovy). V dnešní době přichází vědci se stále dokonaleji korigovanými vadami elektromagnetických čoček (tzv. Cs korekce), které potom umožní dosáhnout lepších rozlišení při zachování běžné velikosti elektronového mikroskopu.

## 1.2 Interakce elektronů a chování elektronu

Na každé místo vzorku je zaměřen úzký paprsek elektronů. Interakcí dopadajících elektronů s materiálem vzorku vznikají různě detekovatelné složky znázorněné na obrázku 2. Jak paprsek putuje po vzorku, mění se podle charakteru povrchu úroveň signálu v detektoru. Z těchto signálů je pak sestavován výsledný obraz.



Obrázek 2: Interakce elektronového svazku při dopadu na vzorek[3]

### 1.3 Scintilační detektor

Scintilační detektor je zařízení pro detekci ionizujícího záření založené na principu excitace elektronu do vyššího energetického stavu zářením, přičemž návrat elektronu do základního stavu se projeví jako světelný záblesk (scintilace).

Tyto detektory představují svými vlastnostmi jedny z nejdůležitějších přístrojů používaných v nukleární fyzice pro detekci radioaktivního záření. Vhodná volba detekčního prostředí (scintilátoru) umožňuje detekovat s vysokou účinností všechny druhy radioaktivního záření. Největším praktickým přínosem scintilačních detektorů je podstatné zvýšení detekční účinnosti pro záření gama oproti jiným detektorům a to až 30 – 60 krát.

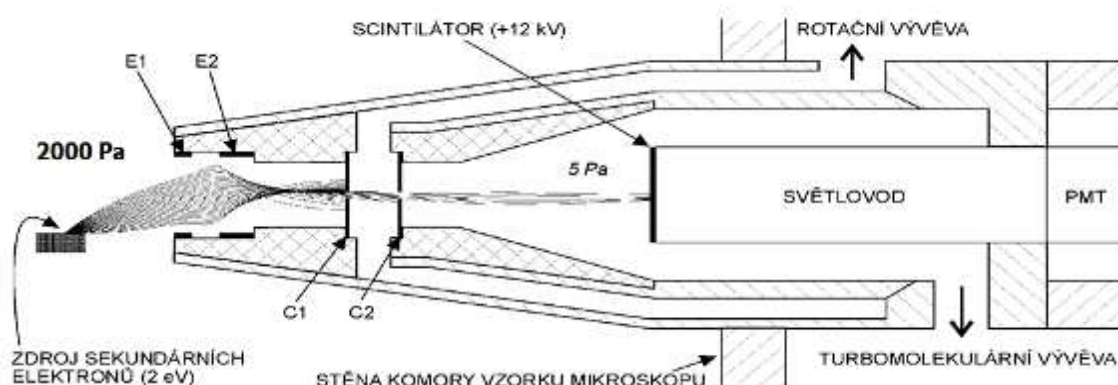
Vysoká rozlišovací schopnost scintilačních detektorů umožňuje měření intenzit radioaktivního záření v širokém rozmezí, aniž by při vysokých intenzitách nastávaly větší scintilační chyby. Rozlišovací schopnost scintilačního detektoru je teoreticky dána zhášecí dobou scintilátoru, která je u anorganických krystalů  $10^{-5} - 10^{-7}$  s a u organických scintilátorů  $10^{-8} - 10^{-9}$  s. [25]

#### 1.3.1 Princip scintilačního detektoru

Funkce scintilačního detektoru zahrnuje několik procesů

- absorpci energie detekovaného záření scintilátorem
- převod absorbované energie na fotony emisního spektra
- soustředění vzniklých fotonů na fotokatodu fotonásobiče
- absorpci fotonů fotokatodou a emise fotoelektronů
- násobení elektronů zesilovacím systémem fotonásobiče.

Základní uspořádání scintilačního detekčního systému je patrné z obrázku 28. Vlastní čidlo detektoru představuje scintilátor, v němž dopadající zařízení způsobuje ionizaci a excitaci jeho atomů a molekul. Jejich návrat do základního stavu je doprovázen emisí světelného záření. Aby se mohly světelné fotony maximálně využít, obklopuje se scintilátor reflektorem. Sebrané fotony po průchodu optickým kontaktem působí pak na fotokatodu fotonásobiče. Nejlepší přenos světelné energie nastává tehdy, je-li prostor mezi scintilátorem a fotonásobičem vyplněn prostředím s velkou světelnou vodivostí. Dobré optické vazby se nejčastěji dosáhne minerálními nebo silikonovými oleji, které na rozhraní krystalu a vstupního skleněného okna fotonásobiče vytvoří velmi tenkou transparentní vrstvu. Kromě tohoto přímého optického kontaktu vyžaduje některé speciální aplikace oddělení krystalu od fotonásobiče. V takovém případě je světlo ze scintilátoru vedeno světlovodem, obvykle ve tvaru válce. Světlovod se zpravidla vyrábí ze syntetického skla (Polymethylmethakrylát), křemene nebo dalších materiálů s velkou průhledností. Výstupní signál se obvykle odebírá z anody a fotonásobiče. Někdy je však výhodnější zpracovat signál z některé z posledních dynod nebo použít další vyhodnocení oba signály současně.



Obrázek 3: Scintilační detektor [28]

Všechny procesy, vystupující při detekci radioaktivního záření scintilačním detektorem, ovlivňují základní charakteristiky celého detektoru. Nevhodná volba součástky, špatně volené geometrické uspořádání, neúčinný elektrooptický systém atd. mohou vést k podstatnému zhoršení vlastností přístroje. Záleží proto jak na výběru co nejvhodnějších součástí, tak na konstrukci přístroje, aby výsledné charakteristiky celého detektoru byly co nejlepší.

### 1.3.2 Popis částí scintilačního detektoru

#### Reflektor

Pokrytím ostatních stěn reflexním materiálem lze po několikanásobných odrazech dosáhnout toho, že téměř všechny fotony emitované v celém objemu detektoru nakonec vystupují jeho podstavou. Vzhledem k průhlednosti vícesložkových organických a aktivovaných anorganických scintilátorů pro jejich luminiscenční spektrum nedoprovází podstatné prodloužení délky dráhy fotonů významné zvýšení ztrát samoabsorpcí.

Označme  $n_s$  index lomu scintilátoru,  $n_0$  index lomu jej obklopujícího prostředí. Jestliže svazek fotonů dopadá ze scintilátoru na jejich rozhraní pod úhlem  $\Phi$  (měřeným od normály k rozhraní) větším než je tzv. mezní úhel  $\Phi_m$ , pro který platí:

$$\Phi_m = \arcsin \frac{n_0}{n_s} \quad (1.1)$$

Při tomto úhlu dochází k takzvanému totálnímu odrazu. To znamená, že rozhraním neprojde žádný foton do prostředí obklopujícího scintilátor a plných 100 % se jich odrazí zpět do jeho objemu. Po opakovaných odrazech vystupují nakonec všechny emitované fotony jedinou reflektorem neopatřenou stěnou. Jako reflektory mohou být použity leštěné kovové povrchy. Lepších výsledků je však dosahováno s difusními reflektory, kterými jsou nejčastěji práškové kysličníky hořčíku nebo hliníku, u NaI (Tl) krystalů se obvykle používá vysoušeného MgO, který je umístěn do mezery mezi scintilátorem a pouzdrům. V některých případech se používá i speciálního bílého laku. U organických plastových scintilátorů se

povrch buď leští, nebo naopak zdrsňuje podle tvaru a velikosti scintilátoru. Mezi scintilátorem a reflektorem bývá malá vzduchová mezera.

### **Světlovody**

V případech, kdy je třeba fotonásobič chránit před vlivy teploty nebo silných magnetických polí, případně převést scintilace ze scintilátoru velkého průměru na fotonásobič s menším průměrem nebo z jiných důvodů oddělit scintilátor od fotonásobiče, se používá takzvaných světlovodů. Jejich funkce je založena na totálním odrazu od stěn podle vztahu pro totální odraz. Pro výrobu světlovodů se používá nejčastěji organických skel nebo polystyrenu. Křemenné sklo, které je transparentní i pro UV záření již od vlnových délek 160 nm je sice nejlepším materiálem, ale pro vysokou cenu a obtížnou opracovatelnost se jej používá jen v nezbytných případech. I správně navržené světlovody mají významné ztráty, v důsledku kterých převedou na fotokatodu pouze asi 30 - 70 % do nich vstupujících fotonů.

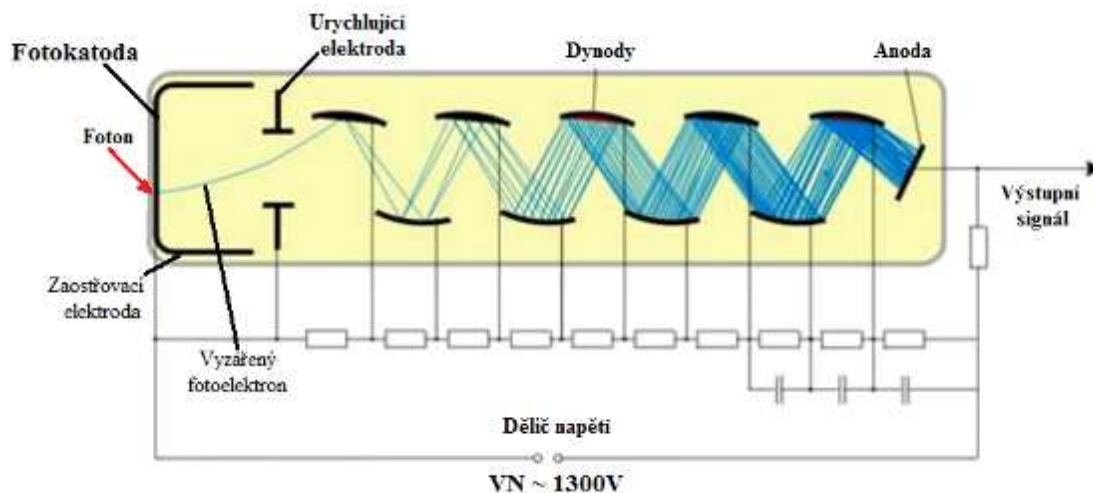
### **Optický kontakt**

Na optických rozhraních scintilátor - světlovod (nutné pro hygroskopické scintilátory) nesmí dojít k reflexi, která by zmenšila počet fotonů dopadajících na fotokatodu. Vzhledem k tomu, že materiály tvořící rozhraní mají blízké indexy lomu ( $n \sim 1,5$ ), nemělo by k odrazům docházet. Z technologických příčin ale nejsou všechny plochy dokonalé rovinné a jsou mezi nimi vzduchové mezery, na jejichž rozhraní dochází k nežádoucím reflexím. Ty zhoršují přechod světla ze scintilátoru do fotonásobiče a snižují účinnost sběru fotonů na fotokatodu. Aby se tomu předešlo, vkládá se mezi detektor a čelo fotonásobiče vrstvička materiálu s blízkým indexem lomu, která mezery zaplní. V rozebíratelných scintilačních sondách se používá viskózních silikonových olejů, u nerozebíratelně spojených párů scintilátor - fotonásobič (tzv. scintibloků) se používají transparentní silikonové gely. Ty se vyznačují dobrou časovou stálostí. Optický kontakt vytvořený silikonovým olejem závislosti na orientaci v prostoru totiž časem steče, to se projeví posuvem spektra a zhoršením energetické rozlišovací schopnosti. Vedle vhodného indexu lomu je dalším požadavkem kladeným na vlastnosti materiálu dobrá a pokud možno konstantní propustnost světla v celém oboru vlnových délek emitovaných detektorem. Pokud jsou tyto podmínky splněny je světelné spektrum dopadající na fotokatodu totožné s luminiscenčním spektrem a optický systém je "spektrálně přizpůsoben" ke scintilátoru.

### **Fotonásobič**

Fotonásobič (PhotoMultiplier Tube - PMT) je zařízení, které přeměňuje velmi slabý záblesk elektromagnetického záření (např. ze scintilátoru) na měřitelný elektrický proud. Fotonásobič byl vynalezen v polovině 20. století a od té doby je stále zdokonalován. Jeho základní princip zůstal téměř neměnný.

Fotonásobič se skládá z fotokatody konvertující fotony na fotoelektrony, dynodového násobícího systému (elektronového násobiče) a anody, z níž je odebírán výsledný elektrický proud. Schéma fotonásobiče je znázorněno na obrázku 4.



Obrázek 4: Princip fotonásobiče [26]

### Fotokatoda

Činnost fotokatody je založena na vnějším fotoelektrickém jevu (fotoefektu), při němž je uvolněný elektron emitován do vakua. Aby k jevu došlo, je třeba, aby energie fotonu byla stejná nebo větší než vazebná energie elektronu materiálu fotokatody. Velikost vazebné energie tedy určuje dlouhovlnnou hranici spektrální charakteristiky fotokatody. Krátkovlnná mez je určena v podstatě spektrální propustností vstupního okénka baňky fotokatody. Jsou známy tři typy fotokatod vykazujících maximální emisi fotoelektronů ve spektrální oblasti 350 - 500 nm, do které spadají luminiscenční spektra většiny významných scintilátorů:

- a) Sb - Cs (s11) - klasická fotokatoda, citlivá v ultrafialové a viditelné oblasti
- b) Cs - K - Sb, Cs - Rb - Sb tzv. bialkalické fotokatody, nahrazující často typ S11. Vyznačují se větší modrou odezvou a nižším šumem a jsou velmi vhodné pro scintilační techniku
- c) Na - K - Sb - vysokoteplotní bialkalická fotokatoda s odezvou blízkou bialkalickým, díky malé termické emisi schopná provozu až do teplot 150 °C a vhodná pro měření malých světelných intenzit.

### Elektronový násobící systém

K zesílení proudu fotokatody se ve fotonásobičích využívá jevu sekundární emise. Při něm primární elektron s jistou nad prahovou kinetickou energií při svém dopadu na povrch kovu vyráží více než jeden sekundární elektron. Střední počet vyražených sekundárních elektronů je úměrný energii dopadajícího elektronu a je číselně roven proudovému zesílení jednoho násobícího stupně, platí pro něj vztah

$$\delta \approx A \cdot V \quad (1.2)$$

;A - konstanta,

V - potenciál, kterým byl urychlen primární elektron

s - součinitel sekundární emise závislý na materiálu a struktuře povrchu

Opakováním popsaného procesu v elektronovém násobícím systému je možno dosáhnout velkého zesílení  $G$  (až 108) proudu fotokatody. Násobící systém se skládá z  $n$  (obvykle 8 - 12) dynod opatřených povlakem z materiálu s velkým součinitelem sekundární emise  $s$ , zakončen je sběrnou elektrodou - anodou s nejvyšším kladným potenciálem. Na katodu a dynody je přiváděno vysoké napětí, které je na jednotlivé dynody rozděleno pomocí děliče napětí. Časové rozlišení dosažitelné pomocí fotonásobiče se pohybuje v řádu nanosekund.

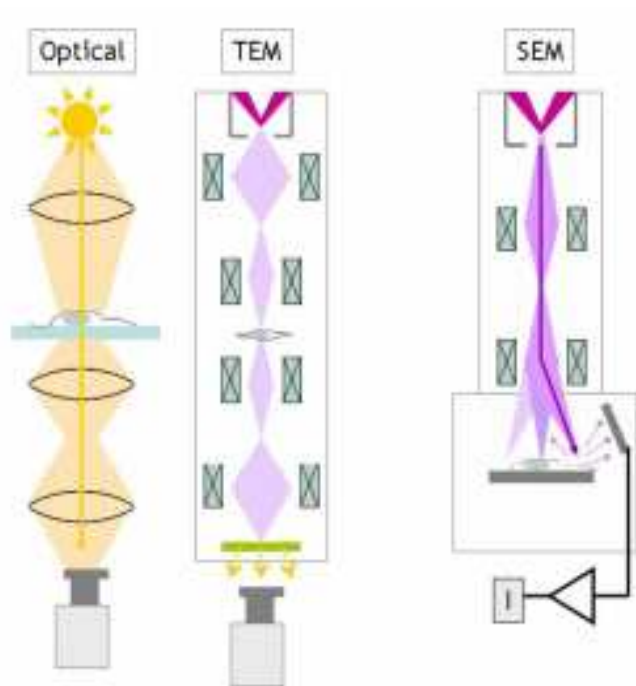
To znamená, že fotonásobič pracuje v pulsním režimu. Určitou dobu (oněch několik nanosekund) trvá, než „namnožené“ elektrony projdou přes kaskádu dynod. Teprve potom je fotonásobič připraven zpracovat další foton a přeměnit ho na proud elektronů.

Fotonásobič tedy rozliší dva po sobě jdoucí fotony (resp. elektrony), které mají časový odstup v řádu nanosekund. Toto časové rozlišení je dáno především fluktuacemi dob průchodu elektronů od fotokatody k anodě. Závisí také na typu dynod (materiál, tvar, uspořádání, ...) a také na napětí mezi fotokatodou a anodou. Jeho zvýšení způsobí rychlejší průchod elektronů fotonásobičem a tím i menší rozdíly mezi dobami průchodu jednotlivých elektronů.

## 2. Typy elektronových mikroskopů

Vědecké zkoumání fyzikálních a chemických pochodů v živé i neživé hmotě, je předmětem základního výzkumu, i moderních technologií a vyžaduje, aby byly sledovány děje, které se odehrávají v mikroskopických a submikroskopických rozměrech. Výhodné jsou metody dovolující sledovat tyto děje bez porušení integrity celku, ve kterém probíhají, neboť tak lze získat ucelenější obraz o charakteru uvedených procesů. Elektronový mikroanalýzátor a skenovací elektronový mikroskop představují moderní výkonné přístroje pro lokální mikroanalýzu, pomocí níž lze charakterizovat heterogenní materiály a jejich povrchové vrstvy tenkým svazkem elektronů. Elektronový svazek je v obou přístrojích základním prostředkem k získání potřebných informací. [12]

Elektronový mikroanalýzátor je určen především k detekci a spektroskopii charakteristického rentgenového záření, zatímco skenovací mikroskop byl vyvíjen původně pro detekci sekundárních elektronů. Toto rozdělení je však dáno historickým vývojem a dnes je někdy velmi obtížné daný typ přístroje jednoznačně specifikovat, neboť jsou často oba přístroje sloučeny v jeden celek. V současnosti se používají dva typy elektronových mikroskopů. Jsou to elektronové mikroskopy s pevným svazkem elektronů, označované jako transmisní (prozařovací) elektronové mikroskopy (TEM), (Obr. 5) a elektronové mikroskopy s řádkujícím svazkem elektronů, označované jako řádkovací nebo skenovací elektronové mikroskopy (SEM), (Obr. 5). V současnosti toto dělení není úplně přesné, protože moderní typy elektronových mikroskopů umožňují pracovat jak jedním, tak i druhým způsobem. [12]



Obrázek 5: Srovnání TEM, SEM a optického mikroskopu [12]

Výhody SEM a TEM [12]:

- Vysoká rozlišovací schopnost
- Trojrozměrný vzhled pozorovaných objektů
- Vysoká hloubka ostrosti
- Možnost pozorování reálných vnějších tvarů objektů
- Možnost rychlého přechodu na velký rozsah zvětšení
- Poměrně jednoduchá obsluha při nových typech přístrojů

Nevýhody SEM a TEM [12]:

- Potřeba vakua
- Nemožnost zobrazit vnitřní detail materiálu
- Vysoká cena zařízení

## 2.1 Transmisní (prozařovací) elektronový mikroskop (TEM)

Transmisní elektronový mikroskop (TEM) zobrazí vnitřní struktury vzorku pomocí prošlých elektronů (TE). První TEM vynalezl a zkonstruoval Ernst Ruska v roce 1931 a v roce 1986 získal za svůj objev Nobelovu cenu. TEM byl první komerčně vyráběný typ elektronového mikroskopu. Lze se setkat i s názvem prozařovací elektronový mikroskop. Slovo "transmisní" v názvu je odvozeno z toho, že elektrony procházejí najednou skrz vzorek a až pak jsou detekovány na fluorescenčním stínítku. Z toho plyne, že [12]:

- urychlovací napětí musí být dostatečně vysoké, aby elektrony měly dostatečnou energii projít vzorkem a nebyly vzorkem zcela pohlceny
- je nutné používat velmi tenké vzorky (10 - 500 nm).

Transmisní elektronový mikroskop je v současnosti jedním z velmi často preferovaných mikroskopů určených pro sledování a studování nanometrických objektů. Jejich rozlišovací schopnost se díky difrakčnímu kontrastu pohybuje okolo 1 – 2 nm a rozlišovací mez dosahuje cca 0,194 nm. Urychlovací napětí je volitelné v rozsahu 80 - 200 kV a zvětšení 50 - 1,500 000x. Rovněž informace o chemickém složení, lze spolehlivě analyzovat u jednotlivých nanomateriálů o rozměrech 5 - 10 nm. [14]

Nutným předpokladem pro získání vhodných výstupů je správná příprava vzorku. Vzorky jsou umísťovány na sítky (mřížky) s definovanou velikostí. [13]

- práškový vzorek - bývá dispergován do vodného roztoku, nakápnut na sítku a vysušen
- biologický vzorek - je připraven preparát řezem - vzorek je fixován, odvodněn a zalit do bločku akrylátu nebo pryskyřice. Z takových preparátů jsou následně krájeny ultratenké řezy o tloušťce cca 50 nm.

Vzhledem k příbuznosti paprskových diagramů lze TEM považovat za analogii světelného mikroskopu v procházejícím světle (obr. 5). Oba přístroje mají společnou i řadu součástí - zdroje světla nebo elektronů, čočky skleněné nebo elektromagnetické a v obou se preparát umísťuje na mechanický stolek. TEM potřebuje ke své činnosti i mnoho dalších systémů, které u světelného mikroskopu nejsou, např. vysokonapěťové zdroje, elektroniku k řízení mikroskopu a výkonný vakuový systém pro vyčerpání jeho vnitřních prostor mikroskopu na hodnotu, která zabezpečí střední volnou dráhu elektronu alespoň v délce 3 m. [18]

Princip činnosti transmisní elektronové mikroskopie je následující. Zrychlený a současně usměrněný proud elektronů emitovaný zdrojem (kovovou katodou) je veden vakuem. Proud elektronů prochází tzv. elektronovou čočkou, kterou tvoří el. pole zvláštního kondenzátoru, nebo mag. pole cívk. Tato elektronová čočka soustřeďuje elektrony na pozorovaný materiál, který musí být velmi tenký (cca 0,5 - 1 μm), aby nepohlcoval elektrony. [13]

Proud elektronů pak prochází další elektronovou čočkou – objektivem a vytvoří první elektronový obraz. Část tohoto obrazu se elektronovou čočkou – projektivem – znovu zvětší a výsledný obrazec se promítá buď na stínítko pokryté vrstvou luminoforu, nebo se zachytí na fotografické desce či filmu. V současné době jsou filmy nahrazeny digitální kamerou, která následně umožňuje příslušné zvětšení popř. jinou manipulaci se získanými informacemi [15, 16].

K reálným výstupům transmisní elektronové mikroskopie se řadí rozměry (stanovení velikosti a distribuce částic), morfologie, vizualizace povrchových vrstev, určení fázového složení anebo potvrzení krystalického či amorfního charakteru vzorku.

Doposud jednou z relativně nejvyspělejších mikroskopických technik, které jsou schopny charakterizovat vzorky/materiály, je transmisní elektronová mikroskopie s vysokým rozlišením (HRTEM). Vzhledem k velmi vysoké rozlišovací schopnosti pracující na úrovni několika nanometrů, se jedná o mikroskop nejčastěji využívaný pro studium nanostrukturovaných krystalických materiálů. Díky vysokému rozlišení umožňují tyto mikroskopy sledovat uspořádání jednotlivých atomů anebo krystalické vady materiálu. Výsledkem jsou následně 3D (trojdimenzionální) struktury a mapy. [13]

Princip metody HRTEM je mikroskop využívající jako zdroj elektrony, rovněž zde jsou při jeho konstrukci využívány soustavy elektronových optik. Jako elektronová optika je chápána soustava cívek, které vytváří vhodné magnetické pole, které mění dráhu elektronů. Elektronový svazek reaguje s elektronovým obalem atomů ve vzorku a dochází k jeho rozptylu (odražení). Vlny rozptýlených elektronů spolu následně interferují a zobrazují se na

fluorescenčním stínítku. Na stínítku také můžeme zobrazit difraktované svazky, které jsou následně využívány pro stanovení orientace krystalové mřížky krystalických materiálů [17].

## 2.2 Rastrovací (skenovací) elektronový mikroskop (REM, SEM)

V literatuře se kromě názvu rastrovací používá i označení skenovací nebo český název řádkovací elektronový mikroskop. Slovo "rastrovací" je odvozeno z toho, že elektronový svazek se pohybuje po vzorku řádek po řádku v jakémsi neviditelném rastru a výsledný obraz se vytváří postupným skenováním. Jednoduchá příprava vzorků a snadná interpretace obrazu (na rozdíl od TEM) činí SEM velmi populárním a rozšířeným. [12]

Dodnes není zcela jasné, kdo prvně navrhl princip skenovacího snímání povrchu preparátu pomocí přesně zaostřeného elektronového paprsku, kterým se získal obraz povrchu. První popis publikoval Max Knoll v roce 1935. Teprve v roce 1942 Zworykin, Hillier a Snijder prvně popsali skutečný skenovací elektronový mikroskop s rozlišovací schopností 50 nm a zvětšením 8 000x. Rozlišovací schopnost současných mikroskopů dosahuje 1 nm a zvětšení přes 400 000x [19].

REM se používá především k zobrazení povrchu "tlustých" vzorků. Primární elektronový paprsek skenuje (rastruje) povrch vzorku řádek po řádku synchronně s úzkým svazkem elektronového paprsku. Podle režimu zobrazení se tak bod po bodu vytváří celkový obraz. Elektrony interagují se vzorkem a uvolňují další signály, které nesou informaci o složení vzorku, podílející se na tvorbě obrazu. Výsledný obraz vzniká složením obrazů jednotlivých bodů předmětu. Z každého bodu jsou primárním svazkem vybuzeny [14]:

- sekundární elektrony - uvolňovány z tenké povrchové vrstvy po dopadu primárního svazku, mají mnohem menší energii než primární svazek a přináší informaci o *povrchové topografii* (prostorový obraz s velkou hloubkou ostrosti).
- zpětně odražené elektrony - vystupují z větší hloubky, mají energii srovnatelnou s energií primárního elektronového svazku a přináší informaci o *lokálních změnách materiálu*.
- charakteristické rentgenové záření - je buzeno vysokoenergetickými elektronovými svazky a nese informaci o chemickém složení. Detekcí rentgenového záření buď s rozkladem podle energie (polovodičové detektory) nebo vlnové délky (krystalové detektory) je možná *kvalitativní i kvantitativní mikroanalýza vzorku*

Skenovací elektronový mikroskop je možné do jisté míry považovat za analogii světelného mikroskopu v dopadajícím světle, na rozdíl od něho je výsledný obraz tvořen pomocí sekundárního signálu - odražených nebo sekundárních elektronů (Obr.5). Díky tomu je zobrazení ve skenovacím elektronovém mikroskopu považováno za nepřímou metodu. [13]

Velkou předností REM v porovnání se světelným mikroskopem je jeho velká hloubka ostrosti, v důsledku které lze v dvojrozměrných fotografiích nalézt jistý trojrozměrný aspekt. Další předností těchto mikroskopů je, že v komoře preparátů vzniká při interakci urychlených elektronů s hmotou vzorku kromě výše zmíněných signálů k řadě dalších, např. rentgenové záření, Augerovy elektrony, či ke katodoluminiscenci, které nesou mnoho dalších informací o vzorku, např. prvkové složení preparátu v dané oblasti [15, 18, 20].

K faktorům, které ovlivňují kvalitu elektronového obrazu, se řadí dostačující volba urychlovacího napětí, náklon vzorku (resp. jeho správné umístění), nabíjení vzorku, pracovní vzdálenost, kvalitní pokovení.

Významnou podmínkou pro získání přesných dat je správná příprava vzorků. Vzorek nesmí obsahovat vodu nebo jiné těkavé látky, musí být stabilní v elektronovém záření a měl by být vodivý, aby nedocházelo k nabíjení elektrony a současně docházelo k vyzáření sekundárních elektronů. Zajištění vodivosti bývá realizováno pomocí vakuového napařování, které se provádí v silném vakuu ( $10^{-7}$  Pa), avšak častěji je aplikováno vakuové napařování, které probíhá při nižším vakuu ( $10^{-4}$  Pa). Méně častěji bývají vzorky chemicky fixovány na terčik pomocí inertního materiálu jako je glutaraldehyd anebo oxid osmičelý [21].

REM mimo možnosti studování struktury a morfologie materiálů umožňuje rovněž elektronovou mikroanalýzu. Poskytuje informaci o chemickém složení materiálu. Elektronová mikroanalýza zahrnuje dva způsoby jak získat informaci o složení a struktuře vzorku prostřednictvím rentgenového záření s využitím [15, 21]:

- WDS (Wavelength Dispersive Spectrometr, vlnově disperzního spektrometru) - bývá sledován rozklad záření podle vlnových délek, kdy úzké svazky rentgenových paprsků dopadají na krystalový detektor a jejich  $\lambda$  (energie) je dána Braggovým vztahem.
- EDS (Energy Dispersive Spectrometer, energiově dispersní analýza/spektroskopie) - využívá rentgenové záření k excitaci vnitřních elektronů, kdy se vyhodnocuje celé spektrum rentgenového záření emitovaného ze vzorku. Detektor EDS je pevnolátkový (podle energie rentgenového záření generuje dvojice elektron-díra). Slouží hlavně ke stanovení těžších prvků. Prvky jako H, He a Li nelze detekovat.

Na základě volby detektorů pro analýzu vzorků v objemu několika  $\mu\text{m}^3$  (proto mikroanalýza) jsou získávány výsledky [13]:

- kvalitativní analýzy - zastoupení chemických prvků ve vzorku (rentgenové mapování);
- kvantitativní analýza – porovnávání výsledky se standardy (vysoké čistoty). Tato analýza je využívána pro lehké a stopové prvky (pod 100 ppm).
- semikvantitativní analýza – porovnáním intenzit spektrálních čar (při stejné energii svazku za stejný čas).

## 2.2.1 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM)

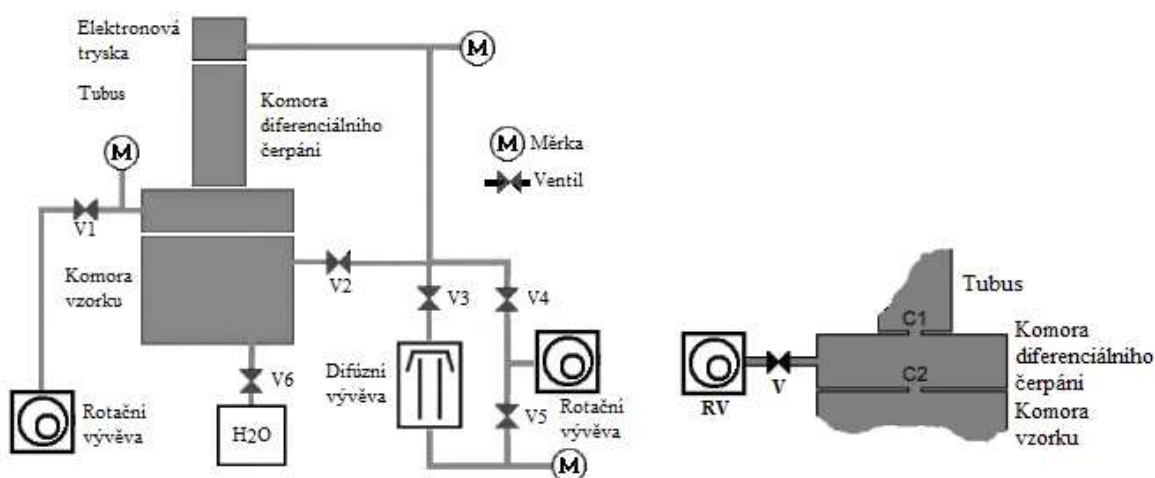
Environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM) / environmental scanning electron microscope (ESEM) reprezentuje jeden z posledních vývojových trendů elektronové mikroskopické metod. Umožňuje zkoumání širokého spektra vzorků z oblastí živé či neživé přírody v podmínkách vysokého tlaku plynů, stejně jako v podmínkách tlaku pod 0,001 Pa, jako v klasickém rastrovacím elektronovém mikroskopu. Pro tlak v komoře vzorku EREM v řádu stovek pascalů se v důsledku ionizačních srážek atomů a molekul plynu s elektrony neprojevuje povrchový náboj na elektricky izolačních vzorcích, neboť tento náboj je v elektrostatickém poli speciálních detektorů účinně kompenzován ionizovanými molekulami plynů v komoře vzorku EREM. Kompenzace elektrického náboje umožňuje pozorování elektricky nevodivých vzorků bez nutnosti pokrytí jejich povrchu elektricky vodivou vrstvou. Při vyšším tlaku plynů (nejlépe vodní páry) v komoře vzorku EREM (více než 611 Pa pro 0 °C) lze pozorovat vzorky obsahující menší či větší množství vody v podmínkách termodynamické rovnováhy, vzorky na rozhraní přechodu jejich skupenství, tekuté vzorky, vzorky v procesu sublimace, kondenzace, vypařování, nebo v různých fyzikálních podmínkách zmrzlé vzorky. Po úpravách lze v EREM studovat také vzorky chemicky aktivní, pozorovat průběh různých chemických reakcí či biologických procesů. [23]

Možnosti EREM [23]:

- Studium struktury povrchu elektricky vodivých i nevodivých vzorku živé i neživé přírody a objektů o rozměrech od nanometrů až po milimetry.
- Studium vlhkých vzorků a vzorků na fázovém rozhraní jejich skupenství (kondenzace, vypařování, tání, tuhnutí, atd.)
- Studium vzorků v podmínkách mechanického i tepelného namáhání v prostředí vakua, nebo různých druhů plynů s jejich volitelnou vlhkostí a složením.
- Studium materiálového, topografického, napětového, popřípadě jiného typu kontrastu (napětový kontrast umožňuje zobrazit nahromadění a rozložení elektrického náboje, například na hradlech tranzistoru).
- Možnost studia reakcí různých chemických látek v komoře vzorku mikroskopu.
- Možnost studia chemicky agresivních látek, například bateriových hmot.
- Studium různých druhů vzorků v podmínkách blízkých se atmosférickému tlaku.
- Studium některých biologických vzorků bez potřeby jejich fixace a dalších úprav.
- Studium některých malých živých, experiment přežívajících živočichů.

EREM je postaven na základech klasického REM viz. obr. 6a. EREM se odlišuje tím, že v komoře vzorku je přítomen pracovní plyn (nejčastěji vodní pára) a tlak dosahuje hodnot jednotek Pa až 2 kPa. Toto prostředí v komoře vzorku dovoluje pozorovat izolanty i organické vzorky, ale stou nevýhodou, že je sníženo celkové rozlišení. [22]

Proces čerpání oblasti elektronové trysky a tubusu je shodný s REM (obr. 6a). Mezi tubus a komoru vzorku je umístěna tzv. komora diferenciálního čerpání. Ta je oddělena dvěma clonami C1 a C2 (obr. 6b) a je neustále čerpána rotační vývěvou. Clony jsou opět velice malé otvory, zabraňují rychlému vyrovnávání tlaku mezi jednotlivými segmenty. Molekuly pracovního plynu se tak nedostanou do tubusu, kde by způsobovali výše zmíněné nežádoucí účinky. Přes ventil V6 je připojena nádobka s vodou, která slouží jako zdroj vodních par připouštěných do komory vzorku. K dosažení prostředí nasycených vodních par v komoře vzorku je třeba provést cyklus několika připouštění vodních par přes ventil V6 a následného odčerpání komory vzorku pomocí systému rotační a difúzní vývěvy. Při napouštění je dosaženo hodnoty tlaku okolo 1 kPa a desítek Pa při vyčerpání. Tento cyklus je třeba provést minimálně 6x, pro dosažení prostředí nasycených vodních par v komoře vzorku, které je nezbytné pro správnou funkčnost EREM. [22]



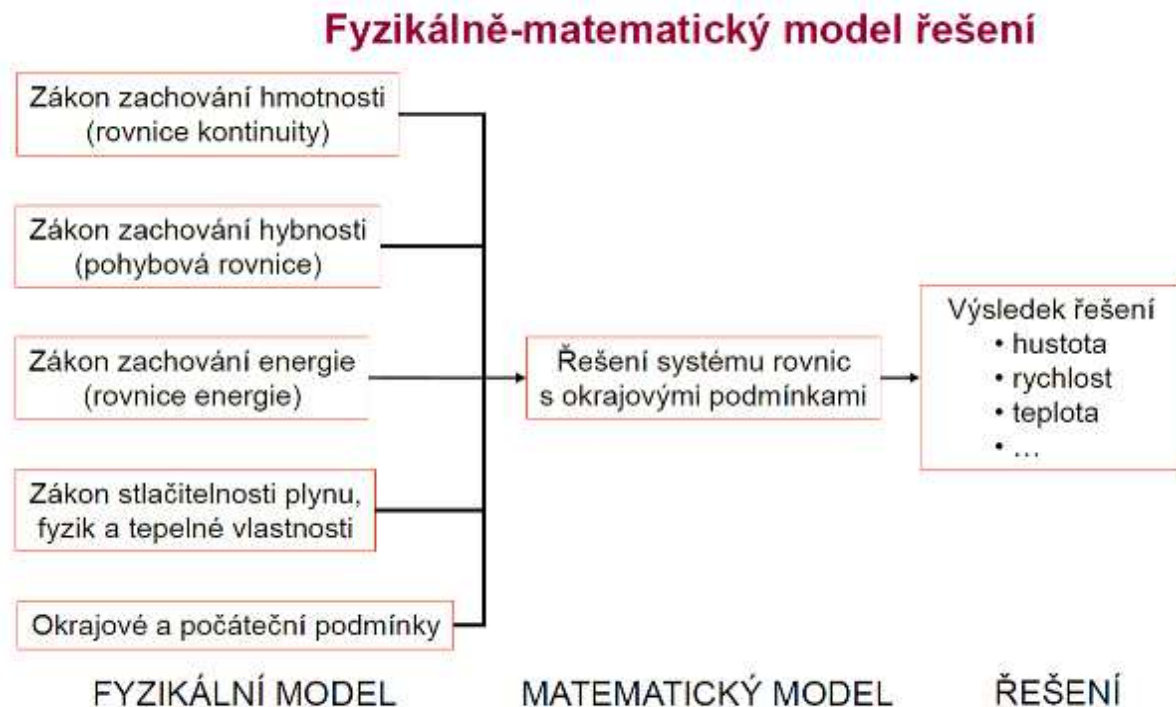
Obrázek 6: 6a) Vakuový systém EREM 6b) Komora diferenciálního čerpání [22]

### 3. Popis modelu proudění tekutiny

Proudění tekutin může mít vliv na mnoho výrobních a provozních parametrů. Proto je potřeba vědět, jaký je tento vliv a jaký má dopad v konkrétních případech. Znalost charakteru proudění nám dává možnost učinit opatření, která umožňují odstranit negativní vlivy proudění tekutin a naopak maximálně využít vlivy pozitivní.

Existují dva přístupy k řešení:

- experimentálně - značně časově i finančně nákladné a v případech, kde se vyskytují složité fyzikální jevy, to může být dokonce nemožné.
- simulací neboli matematicko-fyzikálním numerickým řešením proudění tekutin - umožňuje problematiku proudění řešit v mnohem kratším času a při nižších nákladech. Princip matematicko –fyzikálního numerického řešení je znázorněn na obrázku 7.



Obrázek 7: Fyzikálně – matematický model řešení popisu proudění tekutiny

Pohyb tekutiny, tedy její kinematiku, lze studovat pomocí Eulerova a Langerova popisu. Při prvním způsobu si zvolíme z objemu tekutiny libovolnou elementární částici ve smyslu hypotézy o spojitě tekutině a sledujeme její pohyb. Při druhém způsobu sledujeme změny kinematických veličin v jednotlivých bodech oblasti proudění.

Při použití Lagrangeovy metody (obr 8a) si zvolíme v počátečním čase  $t_0$  částici určenou polohovým vektorem  $x_0$ . Polohu částice v následujících okamžicích můžeme popsat rovnicí:

$$x = x(x_0, t) \quad (3.1)$$

Nezávisle proměnné veličiny v této rovnici nazýváme Lagrangeovými proměnnými. Jelikož se jedná o spojité prostředí, musí být tato funkce spojitou funkcí času, spojitost vzhledem k poloze v prostoru není nutná. Rychlost  $v$  a zrychlení  $a$  částice lze vyjádřit jednoduše derivací podle času.

$$v = \frac{\partial x}{\partial t}, \quad a = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (3.2)$$

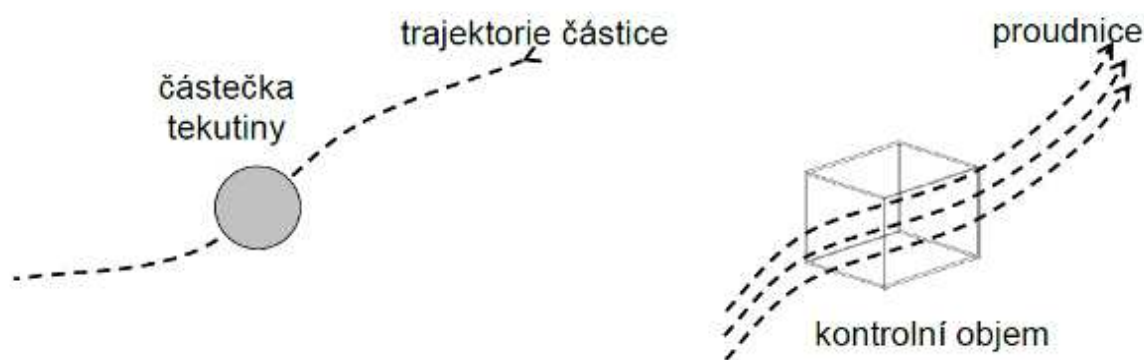
Při aplikaci Eulerovy metody (obr 8b) zkoumáme stav proudící tekutiny v daném bodě oblasti  $x$ . Eulerovými proměnnými nazýváme vektor polohy zkoumaného bodu a čas. Kinematický stav tekutiny ve zkoumaném pevném bodě charakterizujeme vektorem rychlosti  $v(x, t)$ .

S Lagrangeovým způsobem popisu chování kontinua je přímo spojen pojem „trajektorie, dráhy částice“. Trajektorie jsou přímo popsány parametrickou vektorovou rovnicí (3.1), respektive (3.2) a určují trajektorii neboli dráhu částice oblastí v čase.

Naopak s Eulerovým způsobem popisu úzce souvisí pojem „proudnice“ nebo „proudová čára“. Proudnice je definována jako množina bodů, v nichž jsou vektory rychlosti tekutiny v daném časovém okamžiku tečné. Parametrické rovnice proudnice můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{dx_1}{u_1(x,t)} = \frac{dx_2}{u_2(x,t)} = \frac{dx_3}{u_3(x,t)} \quad (3.3)$$

kde  $x_i$  a  $u_i$  jsou složky vektoru polohy, resp. rychlosti v daném bodě a čas je zde konstantním parametrem. Lze ukázat, že pokud funkce nenabývají současně nulových hodnot a jsou-li jednoznačné a spojitě včetně prvních derivací podle souřadnic, pak každým bodem vektorového pole prochází právě jedna proudnice.



Obrázek 8: 8a) Langerova metoda 8b) Eulerova metoda [28]

Proudnice představují obraz proudění v určitém časovém okamžiku, zatímco trajektorie charakterizují pohyb zkoumané částice v časovém intervalu. Obecně je pole rychlostí funkcí

času, obraz proudění se tedy mění. Potom jsou zřejmě proudnice a trajektorie představovány vzájemně odlišnými soustavami křivek. Povšimněme si, že v případě stacionárního neboli ustáleného proudění, které se nemění v čase a jeho lokální zrychlení pole rychlostí je nulové, obě soustavy čar (trajektorie a proudnice) splývají. Složky rychlosti pak totiž nejsou explicitními funkcemi času, proudnice se potom nemění a tekutinová částice postupně prochází všemi body jedné a téže proudnice.

Bohužel, základním atributem turbulentního proudění je jeho nestacionárnost, to znamená, že trajektorie a proudnice se v turbulentním proudovém poli vždy odlišují.

Oba představené pohledy na proudící tekutinu, tedy Lagrangeův a Eulerův, které jsou znázorněny na obr. 8, popisují celou oblast proudící tekutiny a existuje mezi nimi jasná vazba. Lagrangeovy tekutinové souřadnice lze ztotožnit s integračními konstantami Eulerova popisu trajektorií.

### 3.1 Základní rovnice popisující proudění v řešené komoře

System ANSYS, řeší výpočty pomocí následujících tří parciálních diferenciálních rovnic, doplněný stavovou rovnicí. Jde o trojrozměrný typ proudění stlačitelné, vazké tekutiny s přívodem tepla.

Základní rovnice pro popis proudění jsou:

- zákon zachování hmotnosti
- zákon zachování hybnosti
- zákon zachování energie doplněné rovnicí stavu.

Z faktu existence symetrií vyplývají pro dynamické systémy zákony zachování různých veličin. V dynamice tekutin hrají klíčovou roli zákony zachování hmotnosti a hybnosti, v termodynamice potom ještě přistupuje zachování energie.

#### 3.1.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity, též rovnice spjitosti představuje aplikaci zákona zachování hmoty na oblast mechaniky tekutin.

Pro kontrolní objem, kterým proudí tekutina, musí být hmotnost tekutiny konstantní, a tedy její celková změna nulová. U kontrolního objemu mohou vzniknout dvě změny hmotnosti, a to lokální v kontrolním objemu samém (tekutina se stlačuje nebo rozpíná) a konvektivní změna hmotnosti, způsobená rozdílem přiteklé a vyteklé hmotnosti z kontrolního objemu. Obě změny musí dávat nulovou změnu hmotnosti, což je možné jen tehdy, když jsou obě dílčí změny stejně velké, ale opačného znaménka, tj. jedna znamená zvětšení a druhá zmenšení hmotnosti. Rovnici kontinuity je možné definovat také tak, že rozdíl vstupující hmotnosti do kontrolního objemu a vystupující hmotnosti z kontrolního objemu je roven hmotnosti, která se v tomto kontrolním objemu akumuluje.

Uvažujme dále elementární částici tekutiny o objemu  $\delta V$  a hmotnosti  $\delta m = \rho \delta V$ . Molekulární difúze hmoty napříč hranicí elementární částice je v rámci makroskopických časových měřítek nulová, proto lze hmotnost částice považovat za konstantní. To znamená, že její totální Lagrangeova derivace podle času je identicky rovna nule.

$$\frac{D\delta m}{Dt} = \frac{D(\rho\delta V)}{Dt} = \frac{D\rho}{Dt} \cdot \delta V + \rho \cdot \frac{D\delta V}{Dt} = 0 \quad (3.4)$$

Vydělení rovnice součinem  $\rho\delta V$  dostáváme:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{D\rho}{Dt} + \frac{1}{\delta V} \cdot \frac{D\delta V}{Dt} = 0 \quad (3.5)$$

Divergenci rychlosti lze vyjádřit následujícím způsobem:

$$\nabla \cdot u = \frac{1}{\delta V} \cdot \frac{D\delta V}{Dt} \quad (3.6)$$

Potom rovnici (x), která představuje podmínku kontinuity, můžeme zapsat ve tvaru:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot u = 0 \quad (3.7)$$

V případě proudění nestlačitelné tekutiny se obecně platná rovnice (3.7) dále redukuje na dvě samostatné rovnice:

$$\nabla \cdot u = 0, \quad \frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3.8)$$

První rovnice vyjadřuje vlastnost vektorového pole rychlostí, které musí vykazovat nulovou divergenci. Říkáme, že vektorové pole rychlostí je solenoidální<sup>2</sup> (nezřídlové). Všechny tyto úvahy se týkají nestlačitelných tekutin. Podmínka nestlačitelnosti neznamená, že hustota je v celé oblasti konstantní. Závěry lze proto aplikovat i na nehomogenní stratifikovanou tekutinu.

### 3.1.2 Zákon zachování hybnosti

Zákon o zachování hybnosti spočívá v tom, že celková hybnost všech těles v izolované soustavě se zachovává. To znamená, že součet hybností všech těles je stálý. Důležitou podmínkou platnosti zákona zachování hybnosti je izolovaná soustava. Pokud soustava, v níž budeme vyšetřovat pohyb, izolovaná nebude, zákon o zachování hybnosti neplatí. Izolovaná

---

<sup>2</sup> V každém bodě platí  $\text{div } \vec{a} = 0$

soustava je soustava, na kterou nepůsobí žádné vnější síly. Respektive soustava, v níž je výslednice všech vnějších sil působících na soustavu nulová.

Zkoumejme chování elementární částice tekutiny z hlediska druhého Newtonova pohybového zákona (zákonu síly).

Stav částice tekutiny je charakterizován zrychlením částice, povrchovými silami a objemovými silami působícími na částici. Zrychlení částice je nutné uvažovat v Lagrangeovském smyslu  $Du/Dt$ . Povrchové síly mají svůj původ v molekulárních pohybech a lze je popsat pomocí tenzoru smykových napětí  $\tau_{ij}(x, t)$ , který je symetrický, to znamená, že platí:  $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ . Objemovou silou je typicky gravitační síla, ve speciálních případech mohou působit i jiné objemové síly jako je např. odstředivá síla. Gravitační sílu můžeme charakterizovat gravitačním potenciálem  $\Psi$ , potom se gravitační síla působící na jednotku hmoty dá vyjádřit jako:

$$g = -ge_3 = -\nabla\Psi \quad (3.9)$$

Pro konstantní gravitační pole platí, že  $\Psi = gx_3$ , kde  $g$  je gravitační zrychlení,  $x_3$  je souřadnice ve svislém směru a  $e_3$  je jednotkový vektor v tomto směru.

Rovnováhu částice ve směru  $x_i$  můžeme tedy vyjádřit rovnicí:

$$\rho \cdot \frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial \tau_{ki}}{\partial x_k} - \rho \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial x_i} \quad (3.10)$$

Pro případy, kdy pro smykové napětí v tekutině platí Newtonův zákon (newtonovská tekutina) a zatížení elementu charakterizováno tenzorem napětí  $\tau_{ik}$ , potom napětí  $\tau_{si}$  na obecné elementární ploše charakterizované normálovým vektorem  $n_k$  lze vyjádřit ve tvaru:

$$\tau_{Si} = \tau_{ik} n_k \quad (3.11)$$

Celkovou sílu působící na danou plochu  $S$  z objemu  $V$  můžeme potom vyjádřit pomocí Greenovy věty:

$$\int_S \tau_{Si} dS = \int_S \tau_{ik} n_k dS = \int_V \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} dV \quad (3.12)$$

Tenzor smykových napětí pro nestlačitelnou newtonskou tekutinu lze potom vyjádřit jako:

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.13)$$

kde  $p$  je tlak a  $\mu$  je součinitel dynamické viskozity. Za předpokladu platnosti rovnice kontinuity je pro nestlačitelnou tekutinu pole rychlostí solenoidální, výraz (3.13) potom představuje tenzor napětí rozdělený na izotropní část ( $-p\delta_{ij}$ ) a deviátor.

Dosadíme-li výraz pro tenzor smykových napětí do rovnice (3.10), dostáváme Navierovy- Stokesovy rovnice pro složku ve směru  $x_i$  v základním tvaru:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \mu \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \quad (3.14)$$

K Navier- Stokesovo rovnicím pro všechny tři složky musíme ještě připojit rovnici kontinuity, předpokládáme, že  $\rho$  a  $\mu$  jsou konstantní.

N-S rovnice můžeme dále upravovat zavedením modifikovaného tlaku  $p$

$$p = P + \rho \psi \quad (3.15)$$

Vektorovým zápisem potom dostaneme vztah:

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \nu \nabla^2 u \quad (3.16)$$

Máme k dispozici 3 N-S rovnice a rovnici kontinuity. K jejich vyřešení potřebujeme počáteční a okrajové podmínky. Existuje-li se v proudu tekutiny nepohyblivá stěna, pak na jejím povrchu platí podmínka neprostupnosti stěny

$$n \cdot u = 0 \quad (3.17)$$

kde  $n$  je vektor normály ke stěně v daném místě. Dále platí podmínka nulového, která říká, že složka rychlosti tečná k povrchu je na stěně nulová:

$$u - n \cdot (n \cdot u) = 0 \quad (3.18)$$

Spojíme-li tyto dvě podmínky do jedné, získáme:

$$u = 0 \quad (3.19)$$

V některých případech ideální neviskozové tekutiny obsahuje tenzor smykového napětí pouze izotropní část  $\tau_{ij} = P\delta_{ij}$

Rovnováha hybností má potom tvar Eulerových rovnic

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p \quad (3.20)$$

Eulerovy rovnice, na rozdíl od N-S rovnic neobsahují druhou derivaci rychlosti, vyžadují proto také odlišný tvar okrajových podmínek. Například na nepohyblivé stěně lze použít pouze podmínku nepropustnosti stěny (3.17), nikoli však podmínku nulového skluzu (3.18). Řešení Eulerových rovnic obecně není totožné s řešením N-S rovnic pro případ  $\nu \rightarrow 0$

### 3.1.3 Navier-Stokesovy rovnice

Navierova-Stokesova rovnice je rovnice popisující proudění nestlačitelné Newtonské tekutiny. Rovnici odvodili Claude Louis Marie Henri Navier a George Gabriel Stokes nezávisle na sobě.

N-S rovnice v sobě obsahují všechny aspekty skutečného chování tekutin včetně jevu turbulence, nasvědčují tomu doposud experimentálně ověřované případy. Přesto je nutné stále pohlížet na N-S rovnice jako na matematický model a neustále je konfrontovat s experimentálními daty. Uvědomme si také, že hypotéza o platnosti N-S rovnic je založena na platnosti dalších hypotéz, jako je hypotéza spojitosti tekutiny, či hypotéza, že tekutina je Newtonská. Nejsou-li tyto hypotézy platné, nelze úspěšně aplikovat ani matematický model založený na N-S rovnicích.

Navier- Stokesovy rovnice zapsané ve složkovém tvaru:

$$\frac{Du_i}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_I + \underbrace{u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k}}_{II} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{III} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k}}_{IV} \quad (3.21)$$

Fyzikální význam jednotlivých členů N-S rovnice je následující:

- I* proměnnost proudového pole v čase
- II* charakterizuje konvekci
- III* gradient tlaku
- IV* vliv viskozity

N-S rovnice (3.21) jsou uvedeny ve složkovém tvaru, můžeme je napsat také ve vektorovém tvaru

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \cdot u = - \frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \nu \nabla^2 u \quad (3.22)$$

Levá strana N-S rovnic představuje derivaci rychlosti podle času, zatímco pravou stranu můžeme vyjádřit jednodušeji pomocí tenzoru smykových napětí

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + d_{ij} \quad (3.23)$$

Kde  $d_{ij}$  je deviator tenzoru smykových napětí

$$d_{ij} = 2\mu S_{ij} \quad (3.24)$$

Kde  $\mu$  je součinitel dynamické viskozity a  $S_{ij}$  je tenzor rychlosti derivace

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.25)$$

N-S rovnice lze potom zapsat v jednoduchém tvaru

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \quad (3.26)$$

Tato rovnice je nazývána Cauchyho a představuje obecný tvar rovnice popisující pohyb libovolného spojitého média. Někdy bývá žádoucí vyjádřit N-S v bezrozměrných

souřadnicích. Uvažujeme-li  $L$  jako charakteristický rozměr oblasti a  $V$  jako charakteristickou rychlost můžeme zavést bezrozměrné souřadnice.

$$X_i = \frac{x_i}{L}, \quad U_i = \frac{u_i}{V}, \quad P = \frac{p}{\rho V^2}, \quad \tau = \frac{vt}{L^2} = \frac{v}{LV} \quad (3.27)$$

Potom lze N-S rovnice ze složkového tvaru přepsat v bezrozměrných souřadnicích

$$\frac{\partial U_i}{\partial \tau} + \text{Re} \left( U_k \cdot \frac{\partial U_i}{\partial X_k} + \frac{\partial P}{\partial X_i} \right) = \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_k \partial X_k} \quad (3.28)$$

Kde  $\text{Re}$  udává Reynoldsovo číslo  $\text{Re} = LV/v$

V případě, ve kterém neuvažujeme vnější objemové síly působící na tekutinu, lze její chování plně popsat jediným parametrem – Reynoldsovým číslem

### 3.1.3.1 Vlastnosti Navier-Stokesovo rovnice

Rovnice kontinuity je hyperbolická parciální rovnice prvního řádu. N-S rovnice jsou parciální nelineární diferenciální rovnice druhého řádu eliptického typu pro případ stacionárního proudění a parabolického typu pro proudění nestacionární. Parabolický nebo eliptický charakter soustavy je dán vazkými členy. Tam, kde lze tyto členy zanedbat se ztrácí i parabolická resp. eliptičnost. Soustava Eulerových rovnic pro nestacionární proudění je vždy hyperbolického typu.

Pro N-S rovnice je třeba zadat počáteční a okrajové podmínky. Okrajové podmínky se zadávají na vstupu (rychlosti a Neumannova podmínka pro tlak) a výstupu (hodnota tlaku a Neumannova podmínka) a na stěnách (nulové rychlosti).

Přes formální jednoduchost nám matematická teorie říká pouze velmi málo o vlastnostech N-S rovnic. Nejen že neznáme obecné řešení těchto rovnic v analytickém tvaru, ale do dnešní doby ani nebyl podán důkaz o nejzákladnějších vlastnostech tohoto řešení jako je jeho existence, hladkost a jednoznačnost, případně stabilita v obecném prostorovém případě.

Klíčovou vlastností N-S rovnic je jejich nelineárnost, která je zdrojem všech obtíží. Souvisí s tím vlastností řešení, které může být charakterizováno jako fraktální, zahrnuje jevy jako deterministický chaos a samoorganizace, vznik koherentních struktur. Další vlastností je nelokálnost N-S rovnic, jedná se totiž ve své podstatě o integrodiferenciální rovnice pro pole rychlosti a toto pole je nelokální. Můžeme rozlišit dva aspekty této nelokálnosti:

- Dynamická nelokálnost – tlak v bodě je definován pomocí celého rychlostního pole. Tlak má nelagrangeovskou povahu, s tím souvisí nelokálnost turbulence v čase („paměť“). Při vyloučení tlaku (rovnice pro vířivost) zavádí nelokálnost definice vířivosti, existuje obou-stranná vazba mezi rychlostním polem a polem vířivosti (vířivost se nechová jako pasivní veličina).
- Reynoldsův rozklad – existuje vzájemná vazba mezi polem středních rychlostí a fluktuací, která není lokalizovaná v čase a prostoru – má charakter funkcionálu. Fluktuace v daném místě a čase jsou funkcí středního pole v celém prostoru a naopak.

Výsledkem těchto skutečností je, že N-S rovnice jsou neintegrovatelné – neexistuje analytické řešení v uzavřené formě. Jedním z důsledků může být chaotické chování řešení. Další velmi důležitou vlastností N-S rovnic jsou jejich symetrie.

### 3.1.3.2 Symetrie Navier-Stokesovo rovnic

Každý z fyzikálních zákonů zachování, který známe, je založen na nějaké neměnnosti – to znamená, že existuje soubor změn tvořící grupu symetrie, který ponechává tyto zákony beze změny a vede tak k příslušnému zákonu zachování. Například zachování energie je ekvivalentní neměnnosti zákonů pohybu k posunům v čase, jinými slovy výsledek experimentu nezáleží na okamžiku, kdy byl realizován, pokud jsou všechny ostatní podmínky identické. Zachování hybnosti je ekvivalentní neměnnosti zákonů pohybu vzhledem k poloze laboratoře v prostoru, zachování momentu hybnosti je potom ekvivalentní neměnností vzhledem ke směrové orientaci laboratoře. Symetrie jsou základními vlastnostmi dynamického systému, které musí být inherentně obsaženy v matematickém modelu tohoto systému.

### 3.1.3.3 Rovnice pro tlak

V dynamice tekutin je tlakové pole propojeno s polem rychlostí. Divergence N-S rovnice vyjádřená vynásobením operátorem nabla  $\nabla$

$$\left( \frac{D}{Dt} - \nu \nabla^2 \right) \cdot \nabla \cdot u = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla^2 p - \frac{\partial u_k}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x_k} \quad (3.29)$$

Pole rychlosti je však solenoidální, proto s ohledem na (3.8) se levá strana rovnice (3.28) rovná nule. Nule se musí rovnat i strana pravá, platí tedy:

$$\nabla^2 p = -\rho \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x_k} \quad (3.30)$$

Tímto jsme dostali Poissonovu rovnici pro tlak. Její splnění je nutnou podmínkou pro to, aby nezřídlové pole rychlostí nadále nezřídlové zůstalo. Pro řešení této rovnice potřebujeme okrajové podmínky. Na tuhé stěně dostáváme Neumanovu okrajovou podmínku ve tvaru

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \mu \cdot \frac{\partial^2 u_n}{\partial n^2} \quad (3.31)$$

Kde  $n$  je vzdálenost ve směru normály k povrchu a  $u_n$  je složka rychlosti kolmá ke stěně. Poissonova rovnice vyjadřuje nelokálnost problému. Tlak v libovolném bodě je podle této rovnice totiž funkcí rozložení rychlosti v celé oblasti. Tlak tak představuje velmi veličinu, která je vhodnou diagnostickou veličinou pro celou oblast proudění.

K řešení Poissonovy rovnice lze použít např. metody Greenovy funkce, výsledkem je pole rozložení tlaků v oblasti proudění.

### 3.1.3.4 Formulace pro pole vířivosti

Základní vlastností turbulentního proudového pole je jeho vířivá povaha. Vířivost nebo také vír rychlosti je definována jako rotace vektoru rychlosti:

$$\omega = \nabla \times u = \text{rot } u \quad (3.32)$$

Vířivost nabývá v turbulentním poli nenulových hodnot. Modul vířivosti se číselně rovná dvojnásobku rychlosti rotace elementu tekutiny v daném bodě. Vířivost identicky splňuje rovnici kontinuity. N-S rovnici přepíšme do „rotačního tvaru“ užitím vektorové identity:

$$\frac{\nabla u^2}{2} = (u \cdot \nabla) \cdot u + [u \times \text{rot } u] \quad (3.33)$$

N-S rovnice potom jsou:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - [u \times \omega] + \nabla \cdot \left( \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) = \nu \cdot \nabla^2 u \quad (3.34)$$

Rovnici pro vířivost můžeme získat vektorovým vynásobením N-S rovnice operátorem nabra zleva, po úpravě dostáváme:

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial \omega}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \cdot \omega = \nu \cdot \nabla^2 \cdot \omega + (\omega \cdot \nabla)u \quad (3.35)$$

Člen obsahující tlak  $-\nabla \times \nabla p / \rho$  je pro tekutinu s konstantní hustotou nulový, je to důsledek vektorové identity. Z rovnice pro vířivost tedy vypadl tlak.

Rovnice pro vířivost obsahuje také složky rychlosti a to jak na levé straně (v konvektivním členu obsaženém v substanciální derivaci) tak i na straně pravé. Fyzikální význam prvního členu na pravé straně je vazká difúze vířivosti, druhého potom generování neboli produkce vířivosti vlivem nehomogenity rychlostního pole.

Rovnice bývá nazývána Helmholtzovou rovnicí. Řešení této rovnice vyžaduje uzavření systému přidáním vztahu mezi rychlostí a vířivostí. Jednou z možností je vyjádření rychlosti jako integrálu pole vířivosti. Získáme tak soustavu nelineárních integro-diferenciálních rovnic. Integrální vlastnost těchto rovnic odráží nelokální charakter N-S rovnic. Helmholtzovy rovnice jsou však značně složitější než původní N-S rovnice, přesto se tento přístup hojně používá zejména v dynamice nevazkých tekutin. Výhodou této formulace je skutečnost, že vířivost je často koncentrována v omezených oblastech (jádra vírů), jinde je prakticky nulová. Další výhodou je absence tlaku.

Pro nevazkou tekutinu vypadne člen s kinematickou viskozitou a dostáváme vyjádření Eu-lerových rovnic s vířivostí

$$\frac{D\omega}{Dt} = \omega \cdot \nabla u \quad (3.36)$$

Tato rovnice dostatečně přesně popisuje chování velkých vírových struktur v omezených časových intervalech. Vírové struktury mají často rovinný charakter, to znamená, že složka rychlosti  $u_3 = 0 = \omega_1 = \omega_2$ , nenulové jsou pouze složky rychlosti  $u_1$  a  $u_2$  a složka vířivosti  $\omega_3$ . Z toho vyplývá, že pro toto proudění je člen na pravé straně rovnice identicky roven 0 a platí:

$$\frac{D\omega}{Dt} = 0 \quad (3.37)$$

kde  $\omega = \omega_3$

Pro ustálené proudění rovnice nabývá ještě jednoduššího tvaru

$$(u \cdot \nabla)\omega = 0 \quad (3.38)$$

Důsledkem je skutečnost, že rovinné proudění kolem hladce obtékaných těles je vždy nevířivé.

## 4. Kritické proudění

Pro popis zákonitostí kritického proudění je třeba vyjít ze základních rovnic. Jednorozměrné proudění ideálního plynu v trubici proměnného průtočného průřezu je popsáno rovnicí stavu a třemi zákony zachování a to zákonem zachování hmotnosti, zákonem zachování pohybu a zákonem zachování energie.

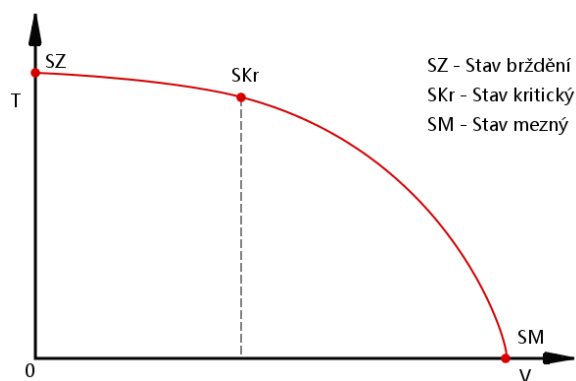
Uvedené vztahy platí pro řešení časově ustáleného proudění stlačitelného prostředí v proudové trubici se změnou jejího průtočného průřezu. Předpokládá se, že není přívod jak tepelné tak mechanické energie a je zanedbán vliv tření [27]. Z uvedených rovnic získáme důležité závislosti stavových veličin, ze kterých budou vyvozeny klíčové závěry.

### 4.1 Teplotní parabola

Z rovnice energie vyplývá průběh teploty v závislosti na rychlosti – takzvaná teplotní parabola.

Rovnice energie:

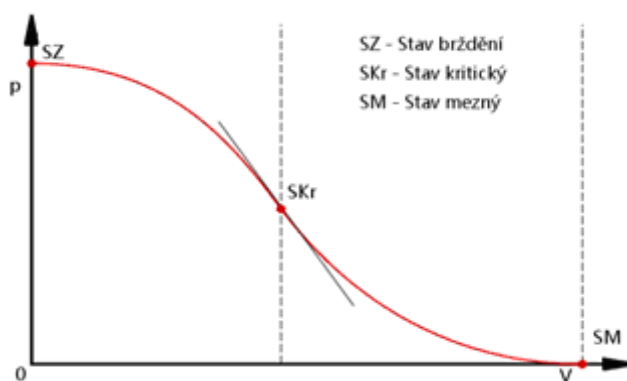
$$e = \frac{v^2}{2} + c_p T = c_p T_0 \quad (4.1)$$



Graf 1: Tři základní rozptylové režimy svazku primárních elektronů [30]

## 4.2 Tlaková hora

Z Bernouliho (pohybové) rovnice, rovnice, vyplývá závislost tlaku na rychlosti – tlaková hora.



Graf 2: Tlaková hora [30]

Bernouliho rovnice:

$$e = \frac{v^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \left( \frac{p}{p_0} \right) = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \quad (4.2)$$

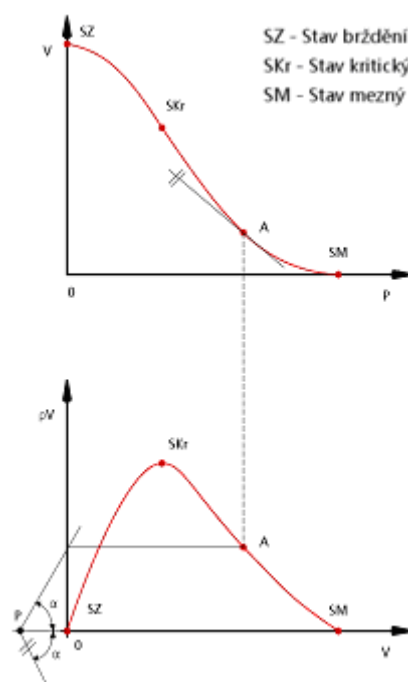
Derivace tlakové hory tj. závislosti tlaku na rychlosti vede k závislosti hustoty proudu  $\rho_v$  na rychlosti  $v$ . Případně průtočného průřezu  $A$  na rychlosti  $v$ , což vyplývá z rovnice spojitosti.

$$v dv + \frac{dp}{\rho} = 0 \quad (4.3)$$

$$\rho v = -\frac{dp}{dv} \quad (4.4)$$

$$A = \frac{Q_m}{\rho \cdot v} \quad (4.5)$$

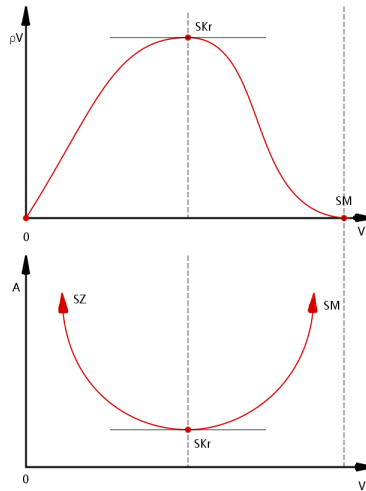
Derivace tlakové hory tedy vede k závislosti hustoty proudu  $\rho v$  na rychlosti  $v$ .



Graf 3: Hustota proudu [30]

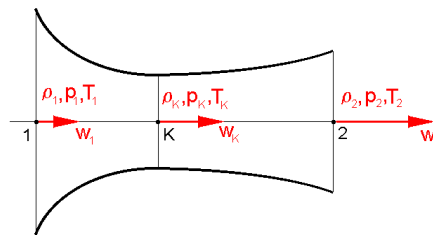
Z předchozích poznatků vyplývá, že hustota proudu nabývá své maximální hodnoty v kritickém stavu proudění a naopak průtočný průřez v tomto kritickém stavu je minimální.

Rozbor základních výpočtových rovnic nám tedy vypovídá o tom, že přechod z podzvukového do nadzvukového proudu vzduchu je možný přes kritický stav proudění pouze zmenšováním průtočného průřezu do kritického stavu a následným zvětšováním průtočného průřezu za kritickým stavem proudění.



Graf 4: Závislost průtočného průřezu na rychlosti [30]

Tato skutečnost je aplikována ve tvaru známé Lavalovy dýzy.



Graf 5: Lavalova dýza [30]

V návaznosti jsou definovány tři charakteristické stavy proudění:

- Stav celkový, stav zbrzdění rychlost  $v = 0$ ,
- Stav kritický hustota proudu  $\rho_v$  dosahuje svého maxima a to v minimálním průtočném průřezu  $A$ ,
- Stav mezní, kdy rychlost  $v$ , dosahuje svého maxima, proudění do vakua  $p = 0$ ,  $\rho = 0$  a  $T = 0$ .

V uvedených charakteristických stavech proudění můžeme vyjádřit celkovou měrnou energii  $e$  prostřednictvím určovacích veličin stavu proudu  $v$ ,  $p$ ,  $\rho$  a  $T$  v těchto stavech.

### 4.3 Machovo číslo

Při popisu proudění o vysokých rychlostí se často používá Machovo číslo, které je definováno jako poměr mezi rychlostí tělesa nebo proudění v daném prostředí a rychlostí zvuku v tomto prostředí:

$$Ma = \frac{c}{a}; \quad a = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T} \quad (4.6)$$

$c$  - [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] rychlost tělesa nebo proudění;

$a$  - [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] **rychlost šíření zvuku** v daném prostředí (proudu)

$r$  - [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] individuální plynová konstanta

$T$  - [K] absolutní teplota plynu (statická teplota, pouze v případech malých  $c$  lze vycházet z celkové teploty).

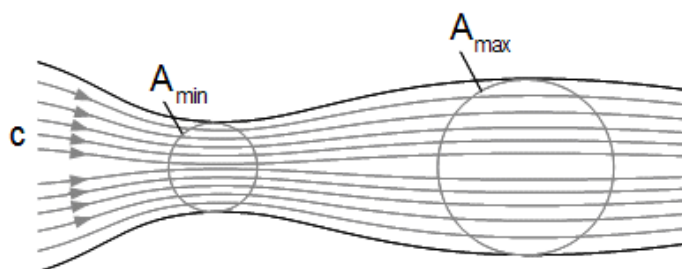
Z definice je zřejmé, že pokud je rychlost  $c$  menší, než rychlost šíření zvuku v daném prostředí je  $Ma < 1$ . Pokud je rychlost  $c$  stejná, jako rychlost šíření zvuku v tomto prostředí je  $Ma = 1$ . Pokud je rychlost  $c$  větší, než rychlost šíření zvuku v tomto prostředí je  $Ma > 1$ .

Pro rychlost stlačitelného proudění před obtékaným tělesem se používají tyto názvy: podzvuková, subsonická - v žádném bodě proudového pole kolem tělesa nedosáhne rychlosti zvuku; transonická - jsou rychlosti v intervalu rychlosti, při které se místně v proudovém poli kolem tělesa dosáhne rychlosti zvuku až do rychlosti, při které je v celém sledovaném proudovém poli kolem tělesa rychlost zvuková či nadzvuková (nejčastěji rychlosti  $0,8 < Ma < 1,3$ ). Machovo číslo, při kterém proudění spadá do transonické oblasti se nazývá **kritické Machovo číslo**. Při supersonické rychlosti ve všech bodech proudového pole obtékaného tělesa je rychlost nadzvuková. Při hypersonické rychlosti proudění před obtékaným tělesem je Machovo číslo větší jak 5.

#### 4.4 Hugoniotův teorém

Vlastnosti proudu plynu jsou závislé na rychlosti proudění, jak dokazuje Hugoniotův teorém (obr. 9). Tento teorém definuje vztah mezi Machovým číslem proudu, jeho rychlostí a průtočným průřezem, kterým plyn proudí. Pro proudění dokonale stlačitelného plynu v proudové trubici\* lze odvodit pomocí rovnice pro První zákon termodynamiky pro otevřený systém a rovnice kontinuity jeho vlastnosti (bez uvažování tření):

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c}(1 - Ma^2) = 0 \quad (4.7)$$



Obrázek 9: Hugoniotův teorém [27]

$A$  [m] průtočný průřez.

Tato rovnice se také označuje jako **charakteristická rovnice proudění stlačitelné látky**.

Podle Hugoniotova teorému bude vztah pro změnu rychlosti proudu a průtočného průřezu proudové trubice záviset na Machovu číslu následovně:

$Ma < 1$  – podzvukové proudění

Při zmenšení průtočného průřezu (zúžení proudové trubice) dochází k nárůstu rychlosti a naopak.

$Ma = 1$  – zvukové proudění

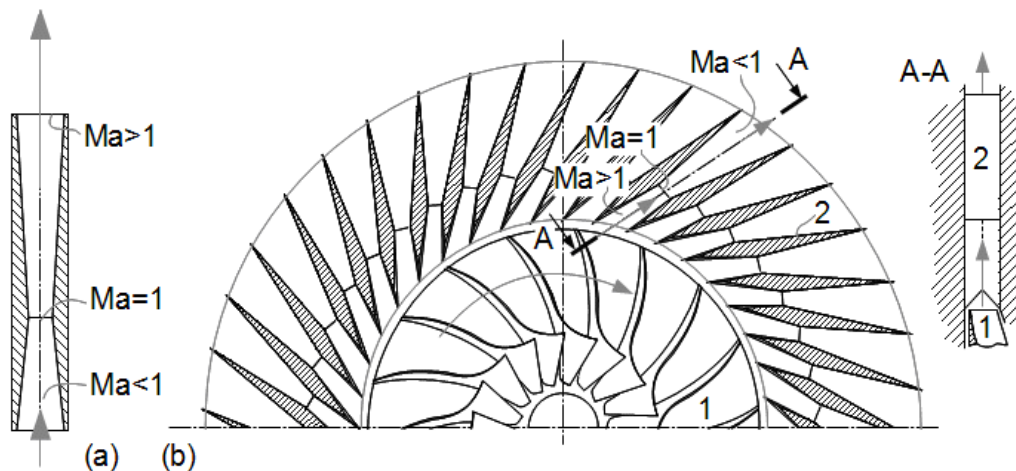
$dA/A=0$ , to znamená, že v místě trubice, ve kterém dosáhne proud rychlosti zvuku je extrémem funkce změny průřezu trubice (derivace změny průřezu je rovna nule).

Zbývá určit, zda se jedná o minimální nebo o maximální průtočný průřez trubice. Z předchozího případu plyne, že proud dosáhne zvukové rychlosti pouze zmenšováním průtočného průřezu, proto rychlosti zvuku dosáhne proud v nejužším místě trubice, jedná se o nejužší místo v trubici. Zde dosáhne proudění lokální rychlosti zvuku, respektive nastane tak zvaná kritická rychlost proudění označovaná  $a^*$ . Při kritické rychlosti plynu je výsledný chaotický tepelný pohyb molekul plynu roven rychlosti proudění a proto jakákoliv molekula z druhé strany nejužšího pohybu se již nemůže vrátit před průřez.

$Ma > 1$  – nadzvukové proudění

Při zvětšování průtočného průřezu roste i rychlost proudění a naopak. Nadzvukové proudění se chová obráceně než podzvukové proudění.

Chování nadzvukového proudění je tedy přesné opačné od proudění podzvukového jak znázorňuje tento příklad, ze kterého je patrné, že dva tvarově totožné kanály fungují zcela odlišně díky odlišným vlastnostem nadzvukového a podzvukového proudění na vstupu:



Obrázek 10: Vliv vstupní rychlosti na funkci kanálu průřezu [27]

(a) supersonická tryska\*; (b) nadvukový difuzor radiálního kompresoru\*\*.

1 oběžné kolo radiálního kompresoru; 2 lopatky difuzoru se supersonickým profilem.

## 5. Použité systémy:

Pro tuto práci byl použit CAD systém SolidWorks. CAD, z angličtiny Computer-Aided Design (počítačem podporované projektování) nebo míněno na obecný CAD systém jako Computer-Aided Drafting - počítačem podporované kreslení. Je velká oblast IT, která zastřešuje širokou činnost navrhování. Jednoduše lze říct, že se jedná o používání pokročilých grafických programů pro projektování, místo rýsovacího prkna.

CAD aplikace obsahují grafické, geometrické, matematické a inženýrské nástroje pro kreslení plošných výkresů, modelování objektů a dějů reálného světa. Pokročilejší nástroje řeší výpočty, analýzy a řízení systémů.

3D CAD systémy pomáhají uživateli sestojit 3D digitální prototyp, simulovat, vyhodnocovat a analyzovat funkčnosti produktu ještě před sestrojením prototypu [5].

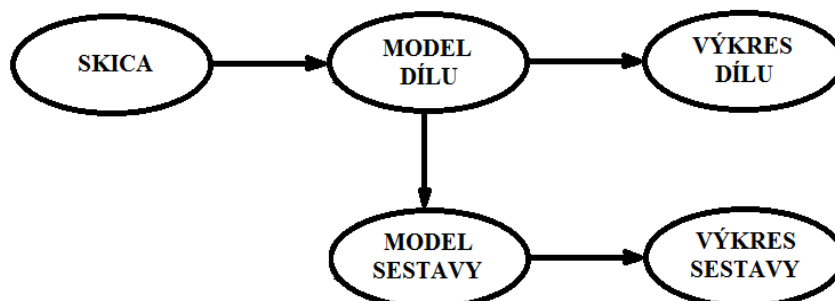
### 5.1 SolidWorks

Systém SolidWorks je počítačový systém primárně vyvinutý pro OS Windows<sup>3</sup>, který byl vyvinut společností SolidWorks Corporation – nyní dceřiná společnost Dassault Systèmes, S. A. (Vélizy, Francie). Jedná se o CAD systém druhé generace.

SolidWorks má k dispozici celou škálu základních, specializovaných i rozšiřujících nástrojů. Počínaje elementárními nástroji pro vytváření objemových těl a ploch, přes nástroje pro analýzu (úkosů, podřezání, úhlových odchylek, křivosti atd.), produktivní nástroje (pole a zrcadlení prvků, dílů i komponentů, variantní modelování a tabulky variant, automatické a pokročilé tvarové funkce, podpora přechodu ze 2D do 3D, knihovny materiálů, realistické zobrazení atd.) až po specializované návrhářské nástroje.

Program umožňuje spojení mezi modelováním dílu, sestavy a vytvořením výkresu. Asociativita mezi dílem, sestavou a výkresem zajišťuje, že změny provedené ve výkresu se

ihned promítne do modelu či sestavy. Při práci začínáme skicou, následně vytvoříme model dílu, na něm provedeme úpravy a definujeme vlastnosti. Na základě vymodelovaného dílu vytvoříme výkres dílu. Z vymodelovaných dílů vytvoříme model sestavy a z něj výkres sestavy (Obr. 11). [5,7]



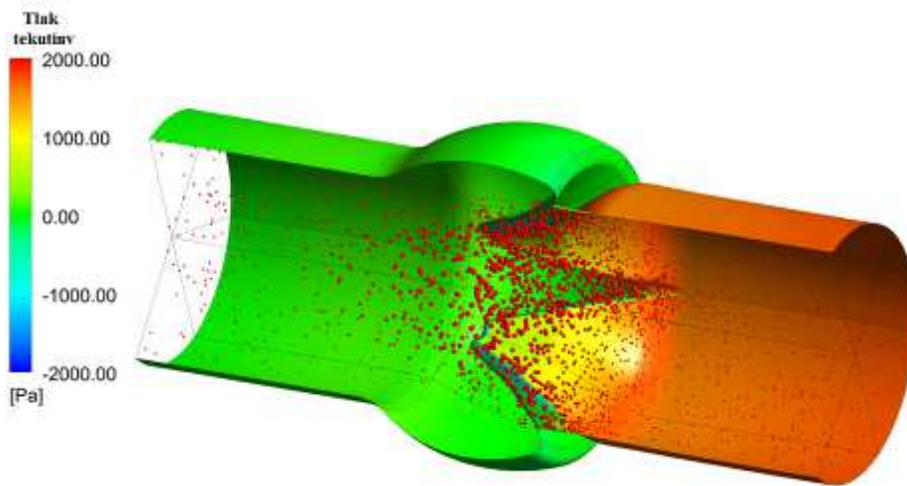
Obrázek 11: Základní koncept modelování v systému SolidWorks

<sup>3</sup> Dnes existuje verze i pro OS MAC

SolidWorks umožňuje modelovat díly, sestavy i mechanické simulace, v objemovém i plošném prostředí. V programu s můžeme vytvářet plechové díly, svařence, nebo formy pro odlitky. Dále je možné pro každý díl individuálně zvolit materiál. U navrženého dílu, nebo sestavy lze simulovat různá namáhání, nebo zatížení a tím zvýšit výslednou efektivitu výrobku. Program také dokáže automaticky generovat výrobní výkresy dílů i celých sestav.[6]

## 5.2 Fluent

Software ANSYS Fluent patří do skupiny programů ANSYS používaných pro CFD<sup>4</sup> simulace. Program obsahuje širokou škálu úloh fyzikálního modelování potřebných pro simulaci proudění, turbulence a přenos tepla. Simulace mají také uplatnění v průmyslových aplikacích od proudění vzduchu přes křídlo letadla, proudění tepla ve spalovací peci, přes aplikace v polovodičové výrobě až po proudění krve v žilách (obr. 12). [8,9]

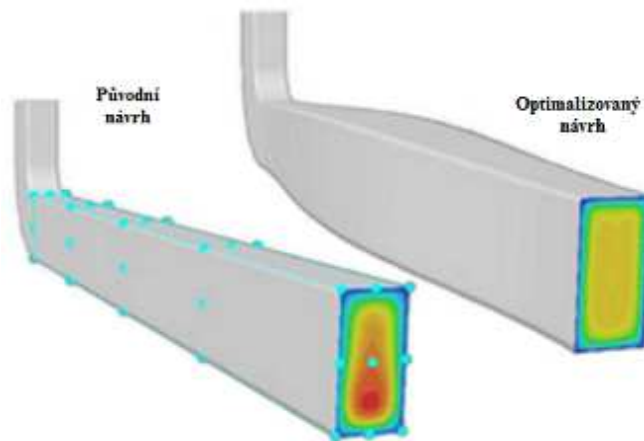


*Obrázek 12: Ukázka analýzy toku krve v mitrální (dvojcípé) chlopni vytvořená pomocí programu ANSYS Fluent [10]*

Díky kombinaci tohoto množství fyzických možností modelování a rychlé a přesné řešení úloh je software ANSYS Fluent jeden z nejkompaktnějších programových řešení pro CFD simulace na světě. Nativní obousměrné propojení všech ANSYS produktů umožňuje zachycení i těch nejsložitějších interakcí mezi tekutinou a strukturou. Jedná se o výkonný, přesný, rychlý a robustní nástroj. Jeho síla je nejen v jednom prostředí ANSYS Workbench pro řešení všech typů CFD analýz, ale i možnost analyzovat vzájemnou interakci proudění, strukturální mechaniky a magnetismu v tomto prostředí. Navíc umožňuje automatizovaný simulační proces (obr. 13). [10,11]

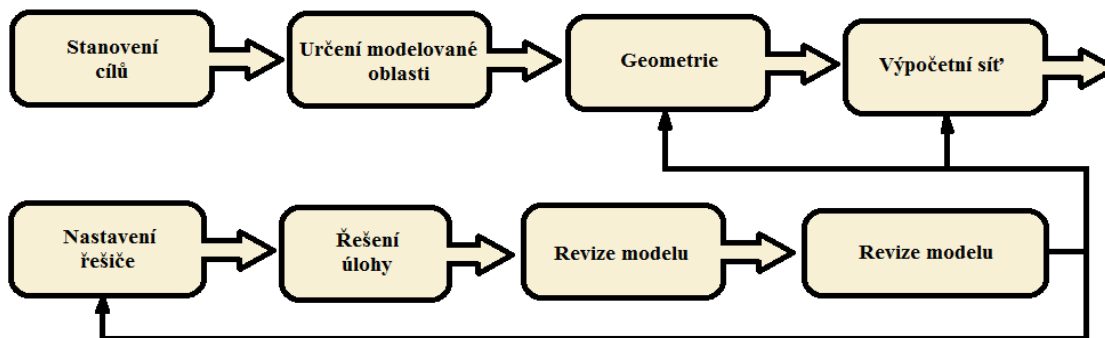
---

<sup>4</sup> Computational Fluid Dynamics (matematicko-fyzikální numerické řešení proudění tekutin)



Obrázek 13: Ukázka optimalizace tvaru potrubí pomocí ANSYS softwaru [11]

Další předností je rychlá simulace rozsáhlých komplexních systémů. Nástroje ANSYS CFD poskytují velké množství turbulentních modelů od stacionárních až po vysoce sofistikované nestacionární modely. Stejně tak velký výběr modelů pro vícefázové proudění a jedny z nejpokročilejších modelů spalování. Jejich vysoká přesnost je zaručena kvalitní a důkladnou validací. Postup při výpočtu proudění tekutiny je znázorněn na Obr. 14.



Obrázek 14: Postup při výpočtech proudění tekutiny pomocí simulačních nástrojů

## Simulace proudění tekutin pomocí CFD a její význam v praxi

Základní otázka při tvorbě modelů zní: Proč bychom se měli o proudění tekutin zajímat? Uvažujme na jednoduchém příkladu cyklisty, který se snaží dokončit závod. Cyklista musí nejen překonávat třecí odpor pneumatik kola při styku s vozovkou a sílu gravitační, odpor mu ale také klade i vzduch, kterým je cyklista obtékán. Tento odpor rozhodně není zanedbatelný a může tvořit až 50 % z celkové hodnoty odporu, který musí náš závodník překonat. Zde je vidět jak významnou roli hraje proudění tekutiny při rutinní činnosti jako je jízda na kole. A stejně tak to platí ve všech oblastech průmyslu.

Proudění tekutin může mít vliv na mnoho výrobních a provozních parametrů (tlakové ztráty, opotřebení, hluk, atd.). Z tohoto důvodu je nutné vědět, o jaký vliv se jedná a jaký má dopad v konkrétních případech. Znalost charakteru proudění nám dává možnost učinit opatření, která umožňují odstranit negativní vlivy proudění tekutin a naopak maximálně využít vlivy pozitivní. Obecně lze říci, že existují dva přístupy k řešení. Jednou z možností je zjišťovat chování proudění experimentálně, což je v mnoha případech značně časově i

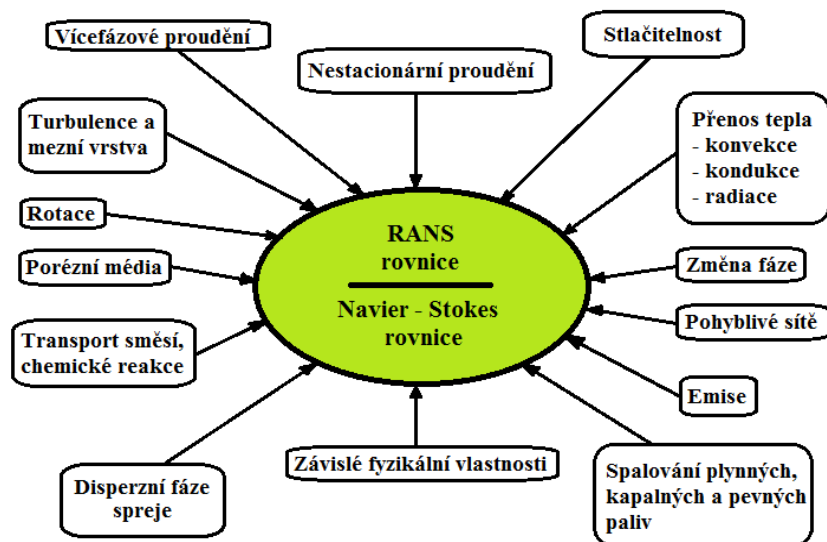
finančně nákladné a v případech, kde se vyskytují složité fyzikální jevy, to může být dokonce nemožné. Druhou možností jsou CFD simulace neboli matematicko-fyzikální numerické řešení proudění tekutin, které umožňují problematiku proudění řešit v mnohem kratším časovém horizontu a při nižších nákladech. [10,11]

Pomocí virtuálních prototypů jsme schopni odhalit kritické oblasti a provést příslušné změny v návrhu ještě před zahájením příprav na výrobu a samotné výroby. Za jejich pomoci lze zvýšit účinnost, kvalitu, životnost, bezpečnost, ale i snížit dopad na životní prostředí, a to jak u nových, tak i stávajících zařízení.

## Principy a možnosti CFD

Numerické simulace vycházejí z fyzikálního popisu pohybu tekutiny, který je dán základními zákony zachování: zákon zachování hmoty, hybnosti a energie. Tyto zákony lze matematicky vyjádřit pomocí rovnice kontinuity, rovnice přenosu hybnosti a rovnice přenosu energie. Poslední dvě rovnice se souhrnně nazývají Navier – Stokesova rovnice. Získáváme tak soustavu nelineárních parciálních diferenciálních rovnic. Tato soustava je ještě doplněna o konstituční vztahy, které popisují termodynamické vlastnosti proudící tekutiny. V případě turbulentního proudění jsou jednotlivé členy rozděleny na střední hodnotu a okamžitou flukтуаční složku. Tím se nám v soustavě rovnic objevují další neznámé (korelace fluktuací tlaku a rychlosti). Takto upravené rovnice mají označení RANS rovnice (Reynolds–Average Navier–Stokes rovnice). Stejný problém nastává i v případech, kdy se kromě samotného proudění objeví další fyzikální jevy spojené například se spalováním, s chemickými reakcemi atd. Navíc v technické praxi se převážně setkáváme s turbulentním prouděním a složitými fyzikálními jevy. [7,11]

Jak tedy řešit takto komplexní problémy? Simulační nástroje ANSYS nabízejí celou řadu matematických modelů pro popis různých fyzikálních jevů a tyto modely lze mezi sebou vzájemně kombinovat. Jejich souhrn je uveden na obrázku (obr. 15).



Obrázek 15: ANSYS Matematické modely pro výpočty komplexních problémů proudění tekutin

Tyto modely pak uzavírají výše zmíněnou soustavu rovnic a je možné ji vyřešit.

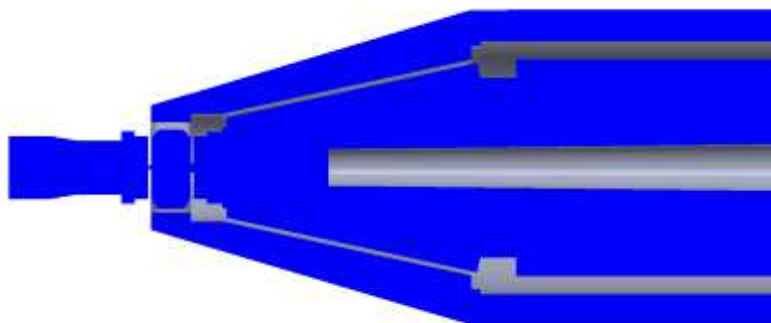
## 6. Popis řešeného problému

Tato práce se zabývá optimalizací tvaru sacích kanálů a komor u nově navržené varianty scintilačního detektoru. Bude navržena nová koncepce tohoto detektoru a jeho tvaru. Dále pak dojde ke srovnání nového návrhu se stávajícím, zejména pak vlivu tvaru a velikosti sacích kanálů na funkci. Z dosažených výsledků chci určit, zda je výhodné tvar kanálků zúžit, či rozšířit. Tohoto docílím vyhodnocením tlaku, rychlosti a orientací vektorů ve zkoumaném detektoru pomocí simulací v programu ANSYS.

### **Menší tvar:**

Průřez sacího kanálu pro turbomolekulární vývěvu:  $414 \text{ mm}^2$

Průřez sacího kanálu pro rotační vývěvu:  $346 \text{ mm}^2$

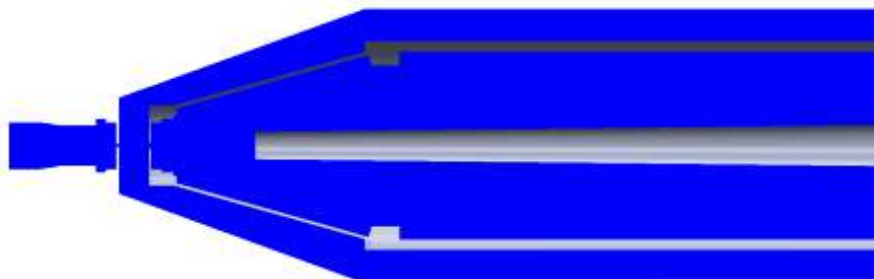


*Obrázek 16: Větší tvar sacího kanálu*

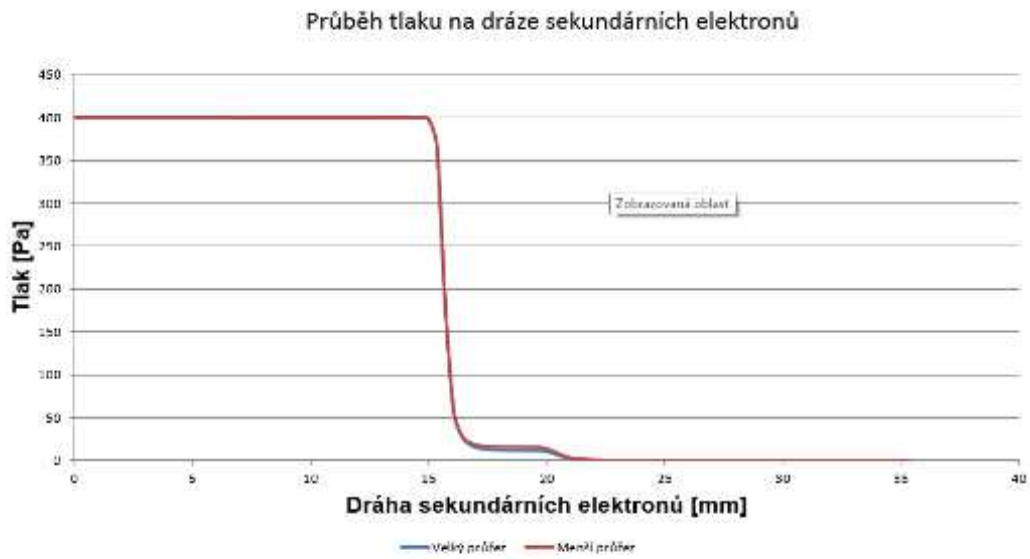
### **Větší tvar:**

Průřez sacího kanálu pro turbomolekulární vývěvu:  $578 \text{ mm}^2$

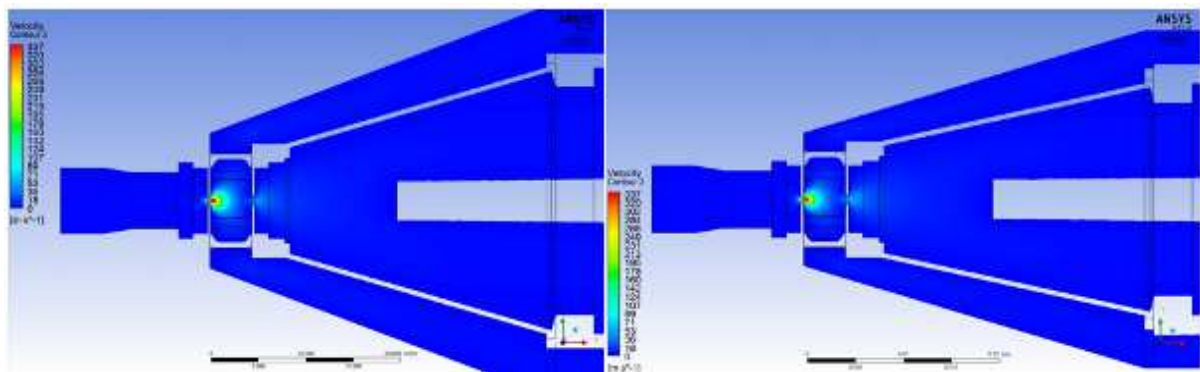
Průřez sacího kanálu pro rotační vývěvu:  $566 \text{ mm}^2$



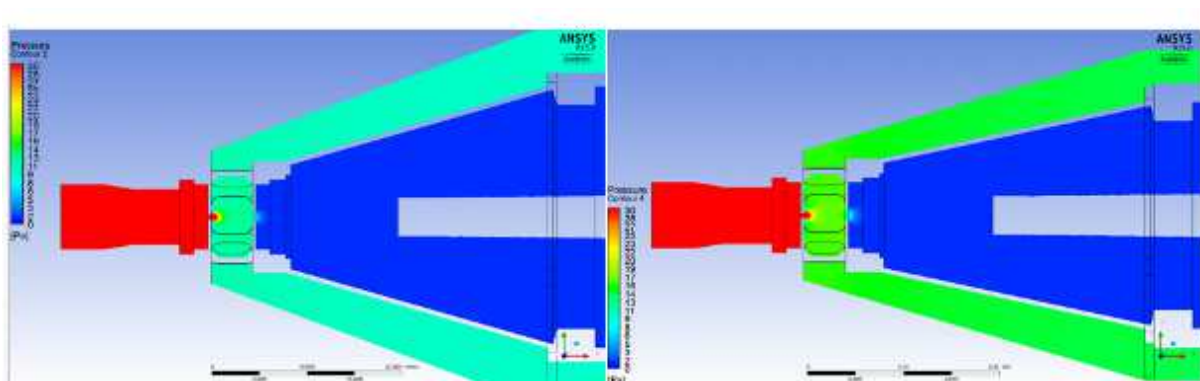
*Obrázek 17: Menší tvar sacího kanálu*



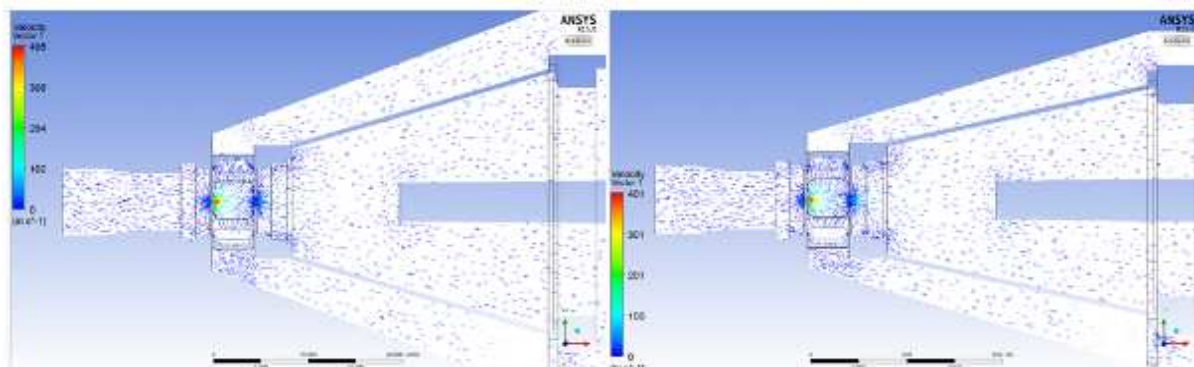
*Graf 6: Průběh tlaku na dráze sekundárních elektronů*



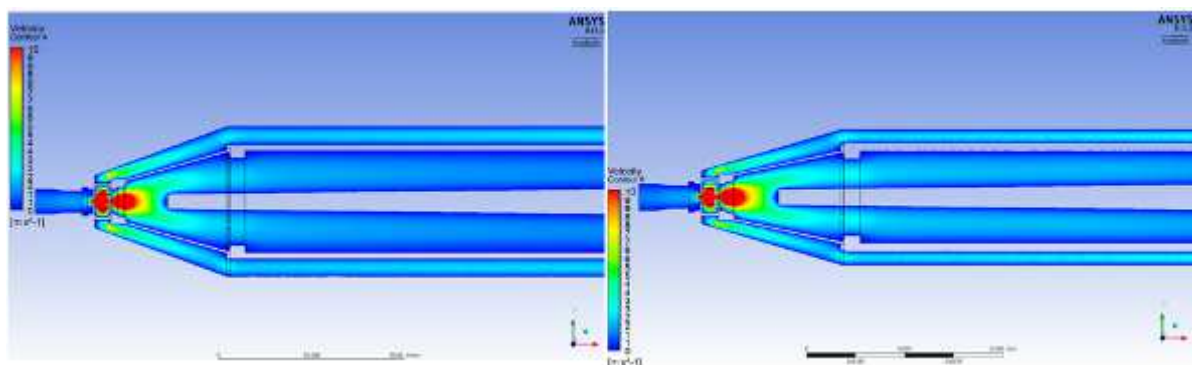
*Obrázek 18: Rozložení rychlosti a) Většího průřezu b) menšího průřezu*



*Obrázek 19: Rozložení tlaku a) Většího průřezu b) menšího průřezu*



Obrázek 20: Rozložení tlaku a) Většího průřezu b) menšího průřezu



Obrázek 21: Rozložení tlaku a) Většího průřezu b) menšího průřezu

## 7. Vyhodnocení výsledků analýz

Pro podrobnější analýzy byly použity 2d osově symetrické výpočty, které umožňuje program ANSYS Fluent. Na obrázku 22 je zobrazen výřez zjednodušeného modelu detektoru v oblasti clonek. Žlutou čarou je zde znázorněna vyhodnocovaná dráha sekundárních elektronů, která je zároveň osou symetrie.

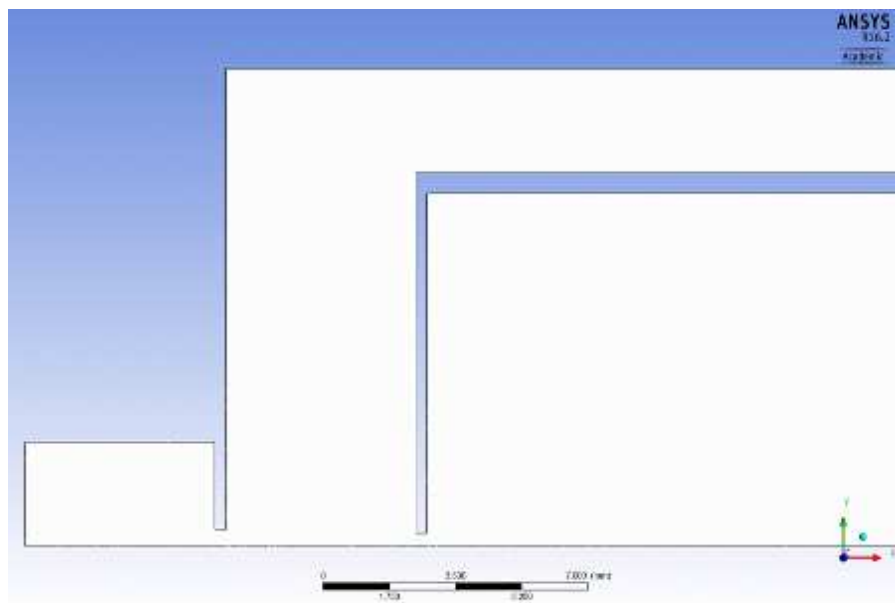
Byly vytvořeny dvě základní varianty dále popsané jako verze jedna a verze dva, které se liší průřezem sacího kanálku meziclonkového prostoru.

Obě základní varianty byly modelovány ještě každá z nich ve třech variantách lišících se ve vzájemné vzdálenosti clonek.

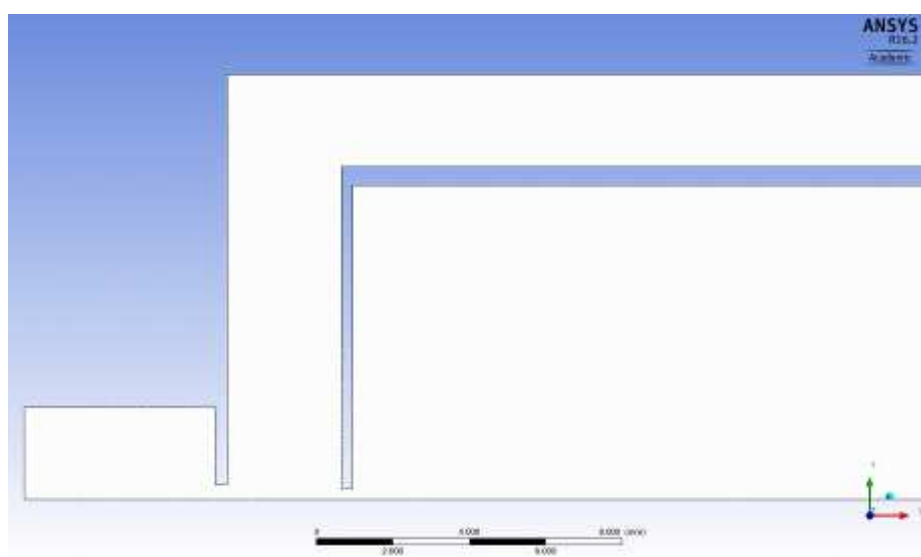
- Varianta 1a – střední vzdálenost clonek, užší průřez sacího kanálu (obrázek 23).
- Varianta 1b malá vzdálenost clonek, užší průřez sacího kanálu (obrázek 24).
- Varianta 1c velká vzdálenost clonek, užší průřez sacího kanálu (obrázek 25).
- Varianta 2a – střední vzdálenost clonek, širší průřez sacího kanálu (obrázek 26).
- Varianta 2b malá vzdálenost clonek, širší průřez sacího kanálu (obrázek 27).
- Varianta 2c velká vzdálenost clonek, širší průřez sacího kanálu (obrázek 28).



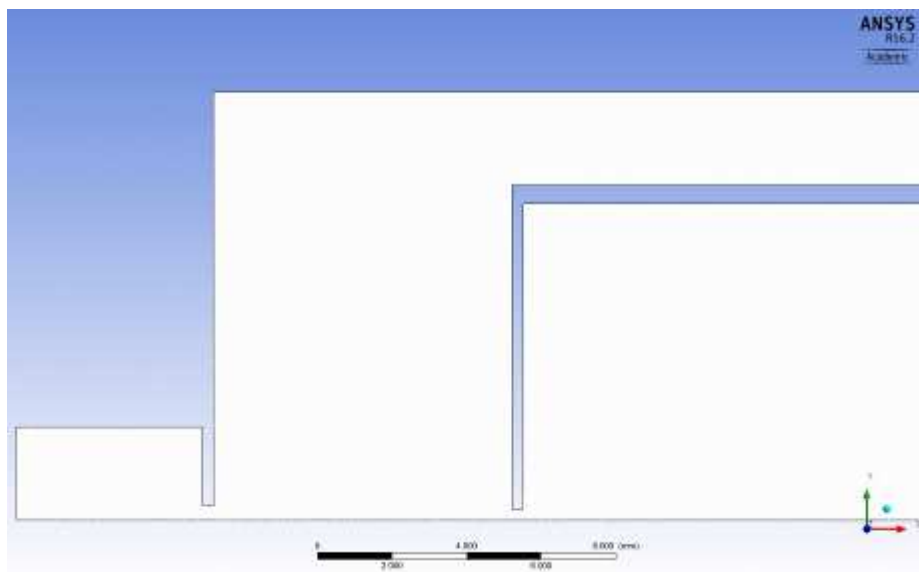
Obrázek 22: Vyhodnocovaná dráha elektronů



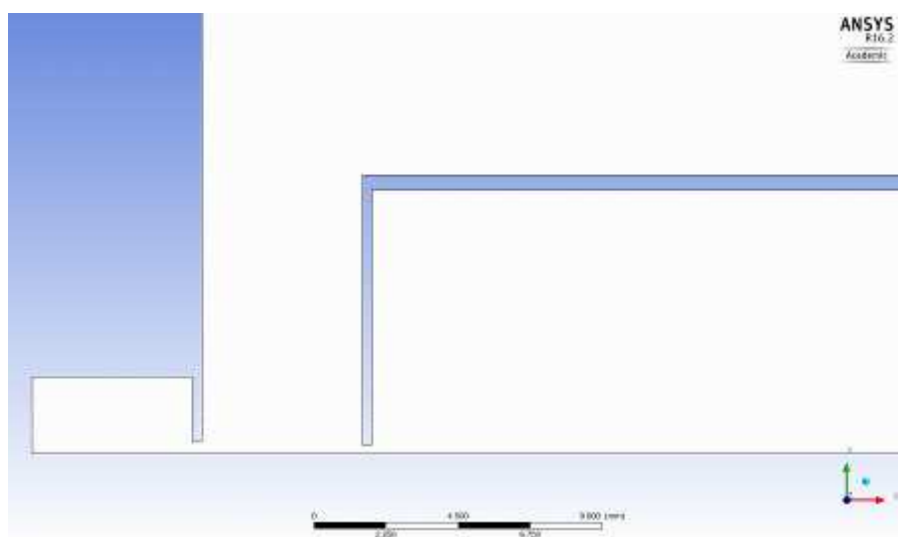
Obrázek 23: Verze 1a tvar



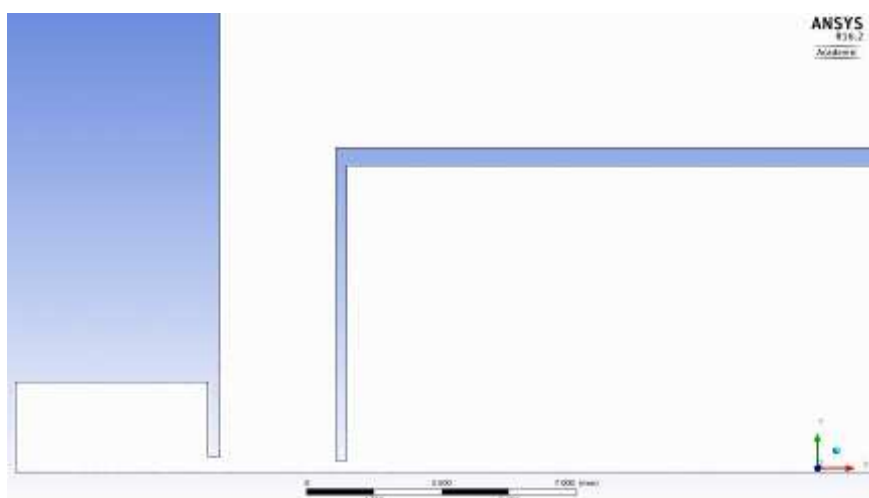
Obrázek 24: Verze 1b tvar



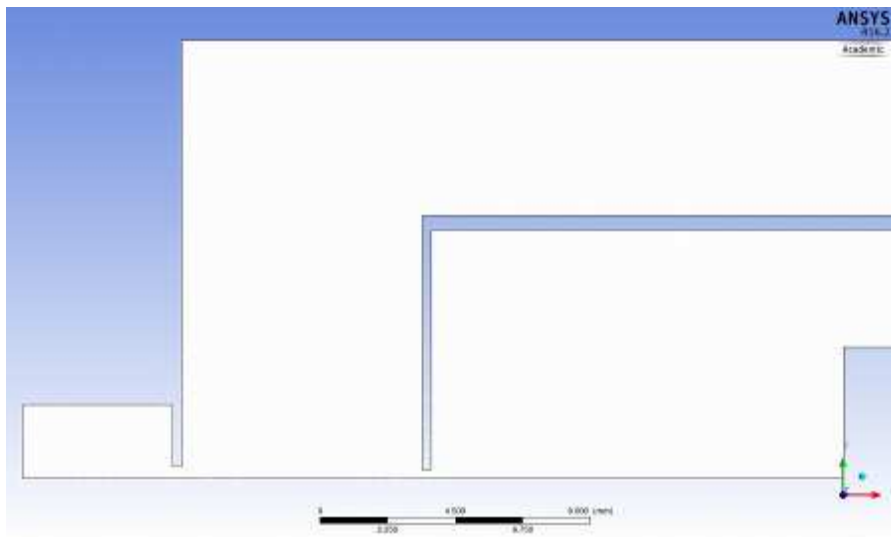
Obrázek 25: Verze 1c tvar



Obrázek 26: Verze 2a tvar



Obrázek 27: Verze 2b tvar



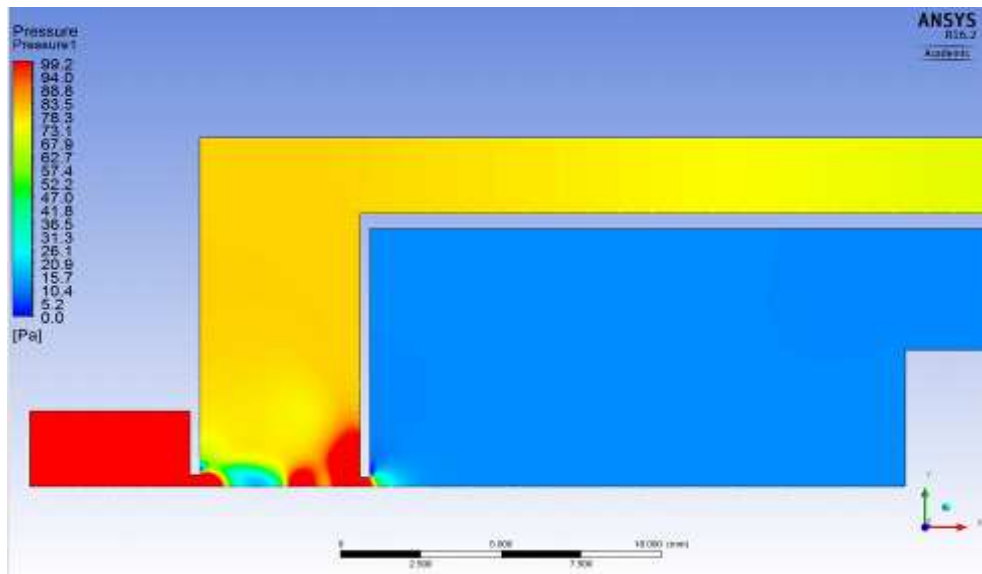
Obrázek 28: Verze 2c tvar

Vyhodnocovány byly především veličiny průměrného tlaku na dráze sekundárních elektronů, neboť platí úměra: Čím vyšší průměrný tlak, tím vyšší je pravděpodobnost srážky elektronu s molekulou vzduchu a tedy rozptylu elektronu a tím zhoršení požadovaného signálu.

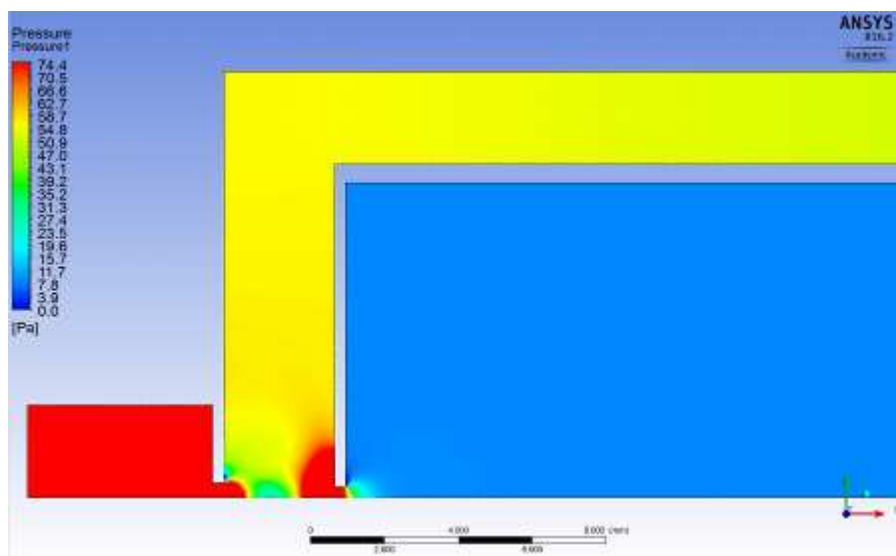
Druhou vyhodnocovanou veličinou je rychlost, dle které můžeme vyhodnotit charakter proudění, jež má svá specifika díky nadzvukovému proudění vznikajícího za první clonkou.

Výsledky zobrazené na sloupcových grafech ukazují, že zvětšení průřezu sacího kanálu meziclonkového prostoru má skutečně vliv na průměrný tlak sekundárních elektronů a to až o 20 Pascalů. Co se týká vzdálenosti clonek má tato vzdálenost vliv pro verze s užším sacím kanálem, zatímco u širšího sacího kanálu je tento vliv nevýznamný. Důvodem je rozdílný charakter proudění, což je patrné jak na grafech, tak na obrázcích rozložení tlaku a rychlosti.

Na následujících grafech je patrný jiný průběh rychlosti pro srovnávané varianty zúženého a širšího sacího kanálu pro střední a vyšší vzdálenost clonek, zatímco u nejužší je shodný. Můžeme to srovnat na průběhu rychlosti v následujících grafech, kde u varianty s užšími sacími kanálky je patrná pulzace rychlosti a tím i kolísání tlaku, neboť tyto veličiny jsou ve vzájemné vazby, jak vyplývá ze stavové rovnice plynu. Jak je patrné z obrázků 29 a 30 u větší vzdálenosti clonek je dost prostoru pro vznik pulzace plynu, která je charakteristická v oblasti nadzvukového proudění, které vzniká za clonou kritické proudění. U menší vzdálenosti nestihne k tak výrazné pulzaci dojít.

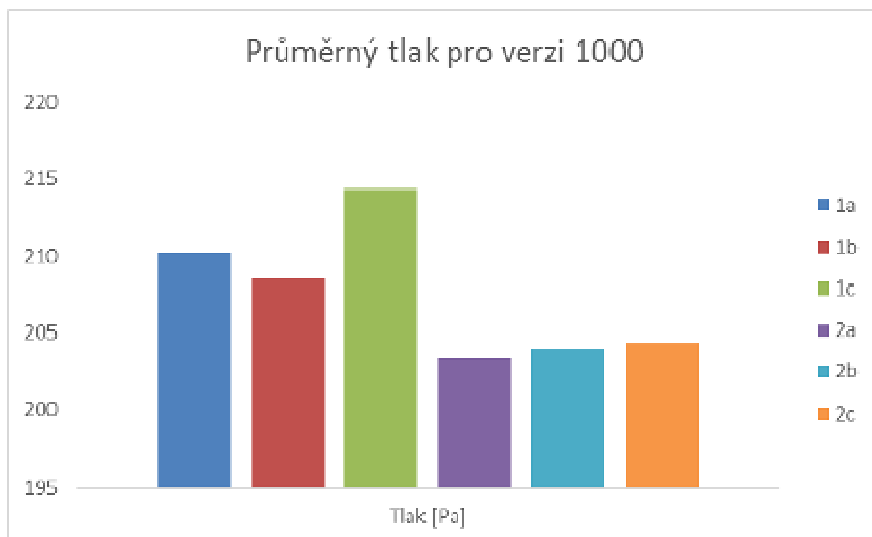


Obrázek 29: Rozložení tlaku pro verzi 1a

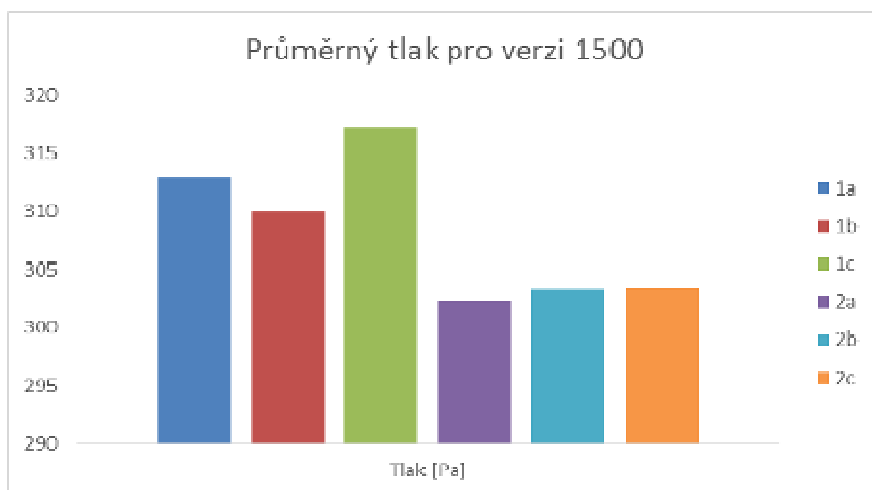


Obrázek 30: Rozložení tlaku pro verzi 1b

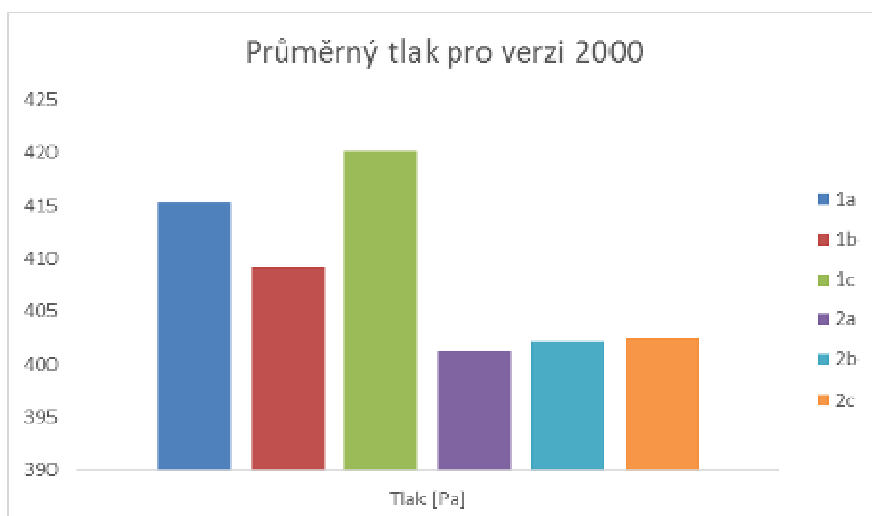
U širších kanálků dochází k takovému rozložení nadzvukového proudění, že puls za první clonou má výrazně delší charakter, který vyplní i celou délku i u nejdelší varianty. Z tohoto důvodu je varianta s širšími sacími kanály výhodnější, neboť právě v této oblasti nadzvukového proudění je z fyzikálního hlediska oblast nižšího tlaku.



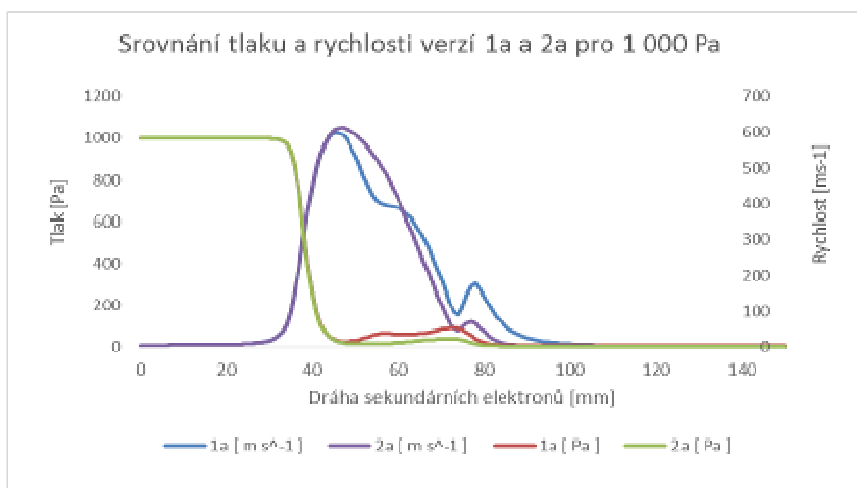
*Graf 7: Průměrný tlak pro verzi 1000*



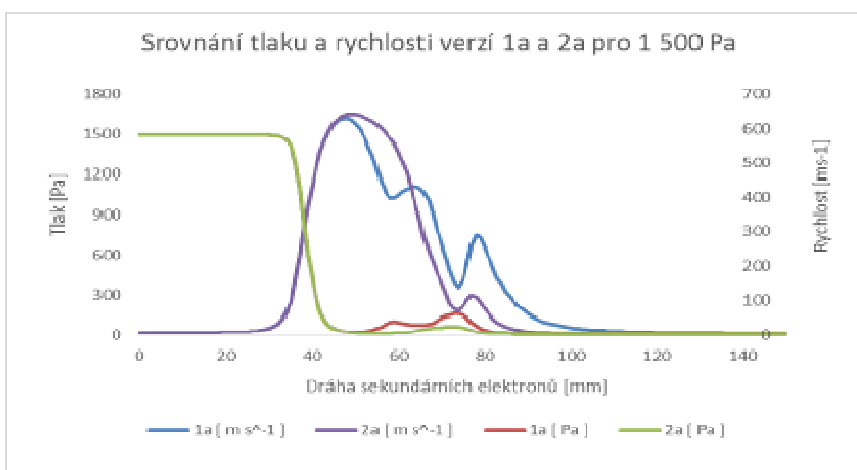
*Graf 8: Průměrný tlak pro verzi 1500*



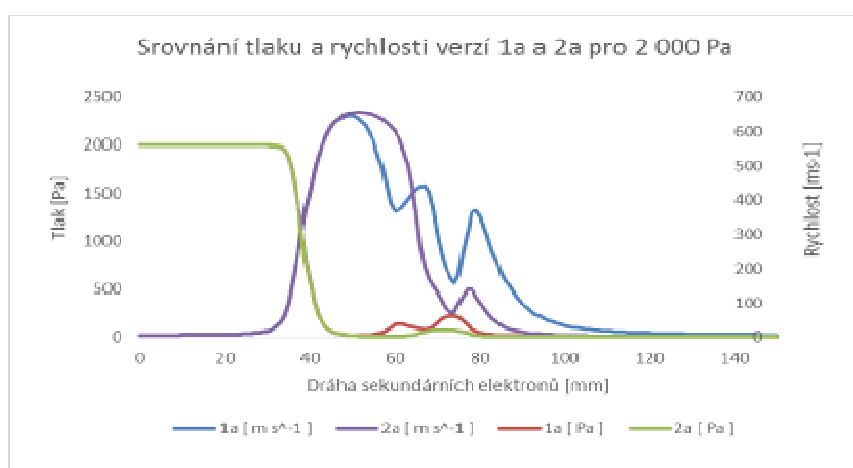
*Graf 9: Průměrný tlak pro verzi 2000*



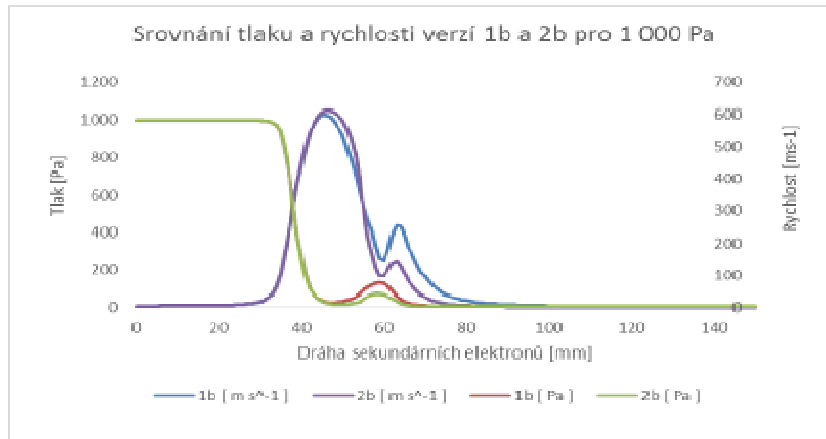
Graf 10: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1a a 2a pro 1000 Pa



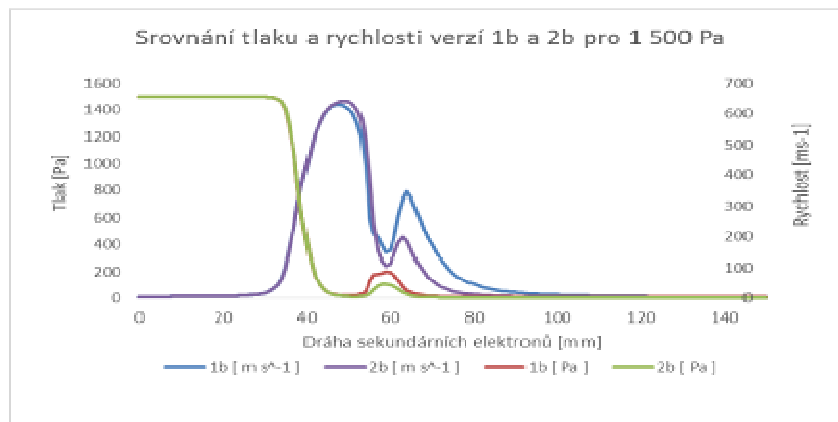
Graf 11: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1a a 2a pro 1500 Pa



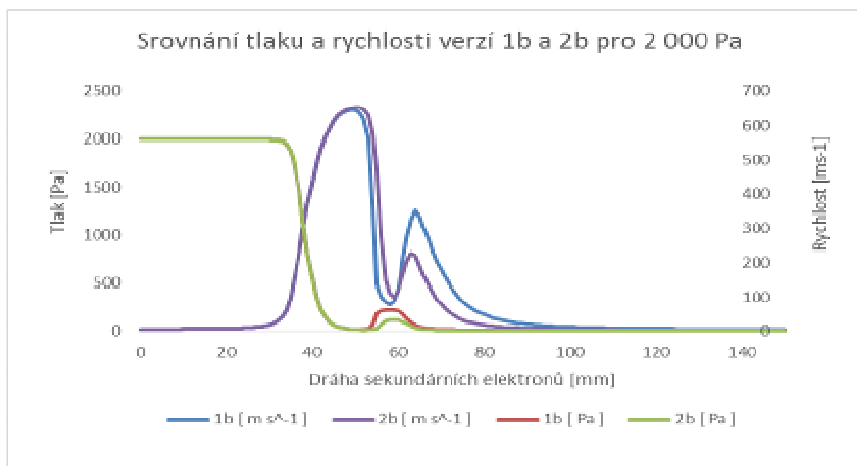
Graf 12: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1a a 2a pro 2000 Pa



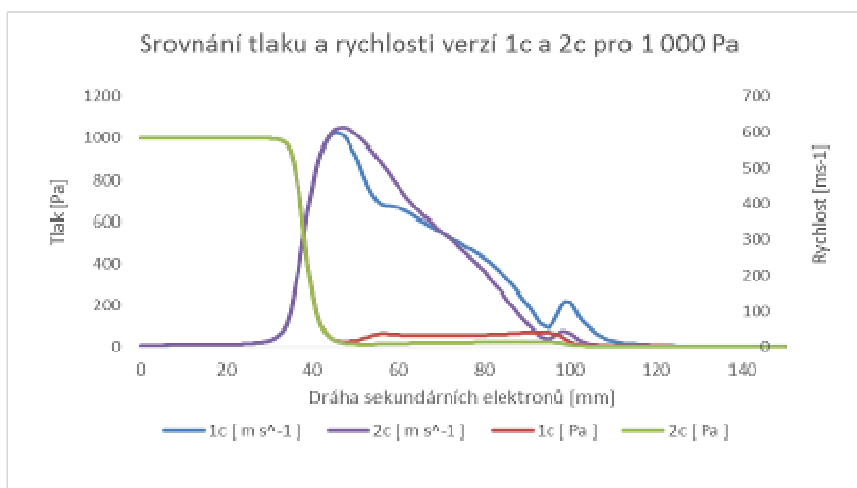
Graf 13: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1b a 2b pro 1000 Pa



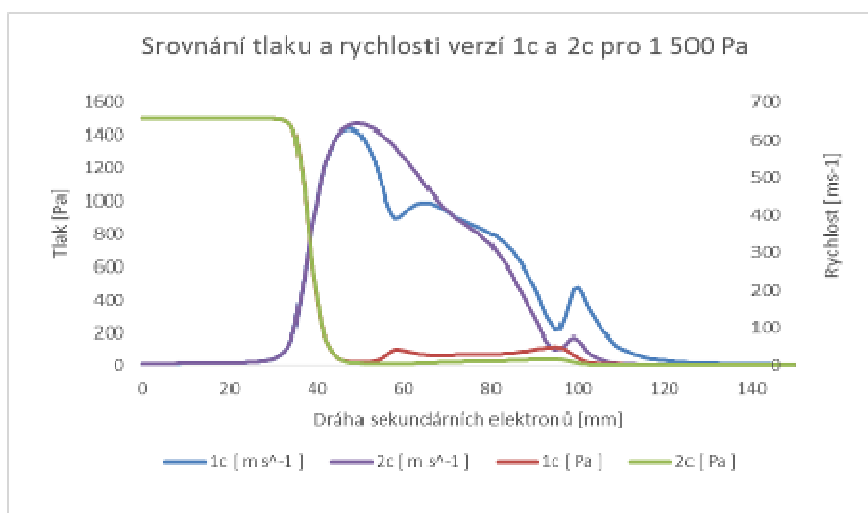
Graf 14: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1b a 2b pro 1500 Pa



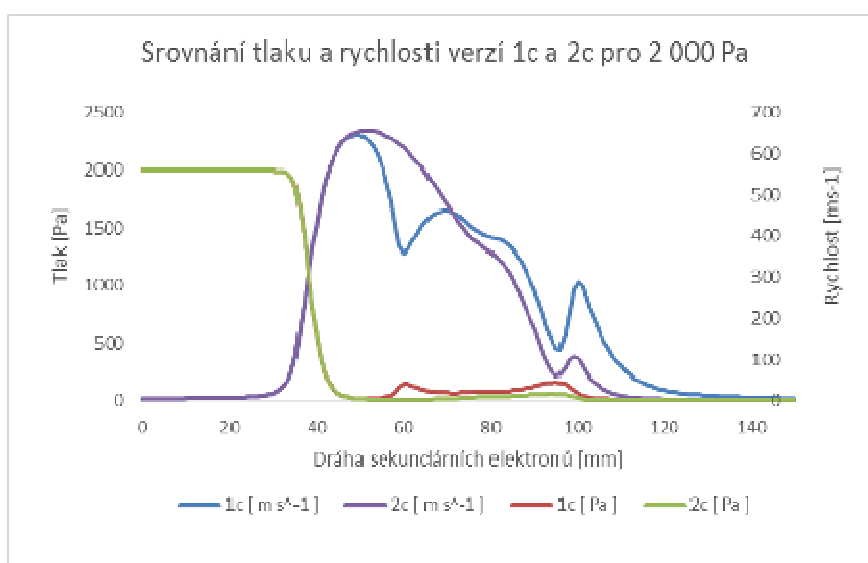
Graf 15: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1b a 2b pro 2000 Pa



Graf 16: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1c a 2c pro 1000 Pa



Graf 17: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1c a 2c pro 1500 Pa



Graf 18: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1c a 2c pro 2000 Pa

## **Závěr:**

Uvedená práce řeší problematiku proudění plynu v sacích kanálech scintilačního detektoru pro environmentální rastrovací elektronový mikroskop. Byl řešen vliv velikosti průřezu sacího kanálu ve spojitosti se vzájemnou vzdáleností clon v scintilačním detektoru. Byl vyhodnocen vliv uvedených variant na průměrný tlak plynu v dráze sekundárních elektronů procházejících scintilačním detektorem ke scintilátoru.

V první části práce byla popsána tematika environmentální elektronové skenovací mikroskopie a teorie zdrojů elektronů a detektory sekundárních elektronů. Dále typy signálů, které se vytvářejí při interakci elektronového svazku se vzorkem. Také byla nastudována problematika teorie čerpání plynu ve vakuových komorách v nově navrženém scintilačním detektoru.

Byly také studována problematika rovnic popisující proudění stlačitelného média.

V Praktická část byl vymodelován model scintilačního detektoru ve variantách s různými průřezy sacích kanálků a vzájemných vzdáleností clonek v detektoru. Na závěr byly vyhodnoceny výsledky simulací daných variant.

Výsledky získané analýzami pomocí systému ANSYS fluent prokázaly, vliv zvětšení průřezu sacího kanálu meziclونkového prostoru na charakter proudění v oblasti meziclونkového prostoru. Dochází ke změně délky pulzování nadzvukového proudění, které vzniká za první clonou. Na toto pulzování má i vliv vzdálenost clon. Z dosažených výsledků vychází jako nejvýhodnější varianta širšího sacího kanálu meziclونkového prostoru, která prokazuje snížení průměrného tlaku na dráze sekundárních elektronů až o 20 Pascalů. V případě, kdy konstrukční možnosti neumožní provést variantu s rozšířeným sacím kanálem meziclونkového prostoru z variant užšího kanálu nejvýhodněji vychází varianta s nejužším vzdáleností meziclونkového prostoru. Důvody, které k tomu vedou jsou dané charakterem nadzvukového proudění a byly popsány v této práci.

## Literatura:

- [1] *Elektronová mikroskopie*, VŠCHT PRAHA [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/nmr/mol\\_model\\_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf](http://old.vscht.cz/nmr/mol_model_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf)
- [2] KUBÍNEK, R., ŠAFÁŘOVÁ, K., VUJTEK, M., *Elektronová mikroskopie*. [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/elmikro.pdf>
- [3] ŠAFÁŘOVÁ, K., *Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie*. Centrum pro výzkum nanomateriálů, Olomouc [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: [http://nanosystemy.upol.cz/download/2009/12-ws/safarova\\_sem.pdf](http://nanosystemy.upol.cz/download/2009/12-ws/safarova_sem.pdf)
- [4] Electron microscope constructed by Ernst Ruska in 1933 [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_microscope#/media/File:Ernst\\_Ruska\\_Electron\\_Microscope\\_-\\_Deutsches\\_Museum\\_-\\_Munich-edit.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope#/media/File:Ernst_Ruska_Electron_Microscope_-_Deutsches_Museum_-_Munich-edit.jpg)
- [5] FAZEKAS, T. *Využití programu SolidWorks v silnoproudé elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. František Veselka, CSc.
- [6] HANKOVEC, T. *Tvorba sestav v CAD systému SolidWorks*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta-Katedra aplikované fyziky a techniky, 2013. 59 s. Vedoucí bakalářské práce PaedDr. Alena Poláchová, Ph.D.
- [7] HLAVATÁ, P. *Návrh tvaru diferenciálně čerpané komory pro EREM*. Klasické a španělské gymnázium, Brno-Bystrc, Vejrostova 2 Brno 2014
- [8] *ANSYS Fluent*, TechSoft Engineering, spol. s r. [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/ansys-2/proudeni/ansys-fluent-2/>
- [9] *ANSYS Fluent* [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS+Fluent>
- [10] *ANSYS Fluent software* [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent>
- [11] SOUČKOVÁ, N., KOLÁŘ, P., TUČEK, A., *Simulace proudění tekutin pomocí CFD* [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3604-simulace-proudeni-tekutin-pomoci-cfd.html>

- [12] CAIS, J. Metodická příručka. *Elektronová mikroskopie a EDS analýza*. [online]. [cit.2.11.2015]. Dostupné z: [http://www.csvs.cz/projekty/2014\\_veda\\_pro\\_zivot/data/11\\_KA3\\_Jaromir\\_Cais\\_2\\_Elektro\\_nova\\_%20mikroskopie\\_a\\_%20EDS\\_%20analyza\\_metodicka\\_prirucka.pdf](http://www.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/11_KA3_Jaromir_Cais_2_Elektro_nova_%20mikroskopie_a_%20EDS_%20analyza_metodicka_prirucka.pdf)
- [13] *Metody-analyzy-materialu-a-nanomaterialu-I*. [online]. [cit.2.11.2015]. Dostupné z: <https://www.vsb.cz/9360/cs/publikacni-cinnost/Metody-analyzy-materialu-a-nanomaterialu-I.pdf>
- [14] POWNCEBY, M.I., MACRAE, C.M. *Advances in the characterization of Industrial Minerals: Chapter 7: Electron microbeam analysis techniques used for the characterization of industrial minerals*. Editor G.E. Christidis. *Emu notes in mineralogy*. vol. 9, 2011. ISBN 978-0-903056-28-1.
- [15] WATT, IAN M. *The Principles and Practice of Electron Microscopy*. Second edition. Cambridge: Press Syndicate of the university of Cambridge, 1997. ISBN 0-521-43591-9.
- [16] JINN, H., CHO, H., KWON, S., SHIN, CH., KWON, J. *Modified preparation technique of TEM sample for various TEM analyses of structural materials*. *Materials Letters*. 2012, vol. 89, s. 133-136.
- [17] KARLÍK, M. *Úvod do transmisní elektronové mikroskopie*. ČVUT Praha. 321 s. ISBN 8001047296.
- [18] NEBESÁŘOVÁ, J. *Elektronová mikroskopie pro biology*. [online]. [cit.2.11.2015]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/>
- [19] FEI COMPANY. *All you wanted to know about Electron Microscopy*. [online]. [cit.19.10.2015]. Dostupné z: [http://www.fei.com/uploadedfiles/documents/content/2006\\_06\\_allyouwanted\\_pb.pdf](http://www.fei.com/uploadedfiles/documents/content/2006_06_allyouwanted_pb.pdf).
- [20] Atmilab. *Jiné metody studia povrchů látek*. [online]. [cit. 19.10.2015]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/vys/JineMet.html>.
- [21] ALMEIDA, J. D. *Uses and abuses of diagnostic electron microscopy*. *Curr. Top Microbiol. Immun.* 1983; 104:147-57.
- [22] KOZELSKÝ, A. *Scintilační detektor sekundárních elektronů pro REM pracující při vyšším tlaku v komoře vzorku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 45 s
- [23] *Environmentální elektronová mikroskopie*. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.. [online]. [cit.2.11.2015]. Dostupné z: [http://eem.isibrno.cz/?page\\_id=8](http://eem.isibrno.cz/?page_id=8)
- [24] KREJČÍ, V. *Scintilační detektory*. České Budějovice: Jihočeská universita v Českých Budějovicích Pedagogická fakulta, 2002. 18s

- [25] ŠILAR, J. *Scintilační detektory*. Přemýšlení u Prahy: Tesla-Liberec Výzkumný závod, 1960. 182s
- [26] *Fotonásobič*, Encyklopedie fyziky [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/747-fotonasobic>
- [27] ŠKORPÍK, J. *Efekty při proudění vysokými rychlostmi* [online]. [cit.9.12.2015]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/efekty-pri-proudeni-vysokymi-rychlostmi.html>
- [28] MAXA, J. *Výpočetní síť*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. 6s
- [29] MAXA, J. *Základní rovnice – Laminární tok*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 14s
- [30] HLADKÝ, D. *Analýza proudění plynu v diferenciallyně čerpané komoře v závislosti na tvaru vstupní trysky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2014. 59 s., bez příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

## Seznam obrázků:

Obrázek 1: a) první elektronový mikroskop v muzeu v Mnichově b) první snímek bakterie .....	9
Obrázek 2: Interakce elektronového svazku při dopadu na vzorek [3] .....	10
Obrázek 3: Scintilační detektor [28] .....	12
Obrázek 4: Princip fotonásobiče [26] .....	14
Obrázek 5: Srovnání TEM, SEM a optického mikroskopu [12] .....	16
Obrázek 6: 6a) Vakuový systém EREM 6b) Komora diferenciálního čerpání [22] .....	20
Obrázek 7: Fyzikálně – matematický model řešení popisu proudění tekutiny .....	21
Obrázek 8: 8a) Langerova metoda 8b) Eulerova metoda [28] .....	22
Obrázek 9: Hugoniotův teorém [27] .....	35
Obrázek 10: Vliv vstupní rychlosti na funkci kanálu průřezu [27] .....	36
Obrázek 11: Základní koncept modelování v systému SolidWorks .....	37
Obrázek 12: Ukázka analýzy toku krve v mitrální (dvojčipé) chlopni vytvořená pomocí programu ANSYS Fluent [10] .....	38
Obrázek 13: Ukázka optimalizace tvaru potrubí pomocí ANSYS softwaru [11] .....	39
Obrázek 14: Postup při výpočtech proudění tekutiny pomocí simulačních nástrojů .....	39
Obrázek 15: ANSYS Matematické modely pro výpočty komplexních problémů proudění tekutin .....	40
Obrázek 16: Větší tvar sacího kanálu .....	41
Obrázek 17: Menší tvar sacího kanálu .....	41
Obrázek 18: Rozložení rychlosti a) Většího průřezu b) menšího průřezu .....	42
Obrázek 19: Rozložení tlaku a) Většího průřezu b) menšího průřezu .....	42
Obrázek 20: Rozložení tlaku a) Většího průřezu b) menšího průřezu .....	43
Obrázek 21: Rozložení tlaku a) Většího průřezu b) menšího průřezu .....	43
Obrázek 22: Vyhodnocovaná dráha elektronů .....	44
Obrázek 23: Verze 1a 1000 tvar .....	44
Obrázek 24: Verze 1b 1000 tvar .....	44
Obrázek 25: Verze 1c 1000 tvar .....	45
Obrázek 26: Verze 2a 2000 tvar .....	45
Obrázek 27: Verze 2b tvar .....	45
Obrázek 28: Verze 2c 1000 tvar .....	46
Obrázek 29: Rozložení tlaku pro verzi 1a .....	47
Obrázek 30: Rozložení tlaku pro verzi 1b .....	47

## Seznam grafů:

Graf 1: Tři základní rozptylové režimy svazku primárních elektronů [30].....	32
Graf 2: Tlaková hora [30].....	32
Graf 3: Hustota proudu [30] .....	33
Graf 4: Závislost průtočného průřezu na rychlosti [30].....	34
Graf 5: Lavalova dýza [30] .....	34
Graf 6: Průběh tlaku na dráze sekundárních elektronů .....	42
Graf 7: Průměrný tlak pro verzi 1000 .....	48
Graf 8: Průměrný tlak pro verzi 1500 .....	48
Graf 9: Průměrný tlak pro verzi 2000 .....	48
Graf 10: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1a a 2a pro 1000 Pa.....	49
Graf 11: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1a a 2a pro 1500 Pa.....	49
Graf 12: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1a a 2a pro 2000 Pa.....	49
Graf 13: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1b a 2b pro 1000 Pa.....	50
Graf 14: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1b a 2b pro 1500 Pa.....	50
Graf 15: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1b a 2b pro 2000 Pa.....	50
Graf 16: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1c a 2c pro 1000 Pa .....	51
Graf 17: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1c a 2c pro 1500 Pa .....	51
Graf 18: Srovnání tlaku a rychlosti verzí 1c a 2c pro 2000 Pa .....	51

## Seznam příloh:

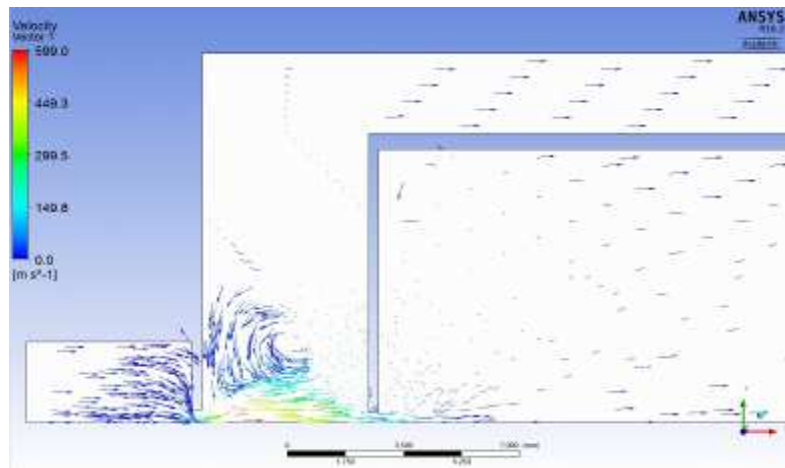
Příloha 1: Verze 1a 1000 vektor .....	62
Příloha 2: Verze 1a 1000 rychlost.....	62
Příloha 3: Verze 1a 1000 tlak.....	62
Příloha 4: Verze 1a 1500 vektor .....	63
Příloha 5: Verze 1a 1500 rychlost.....	63
Příloha 6: Verze 1a 1500 tlak.....	63
Příloha 7: Verze 1a 2000 vektor .....	64
Příloha 8: Verze 1a 2000 rychlost.....	64
Příloha 9: Verze 1a 2000 tlak.....	64
Příloha 10: Verze 1b 1000 vektor .....	65
Příloha 11: Verze 1b 1000 rychlost.....	65
Příloha 12: Verze 1b 1000 tlak .....	65
Příloha 13: Verze 1b 1500 vektor .....	66
Příloha 14: Verze 1b 1500 rychlost.....	66
Příloha 15: Verze 1b 1500 tlak .....	66
Příloha 16: Verze 1b 2000 vektor .....	67
Příloha 17: Verze 1b 2000 rychlost.....	67
Příloha 18: Verze 1b 2000 tlak .....	67
Příloha 19: Verze 1c 1000 vektor .....	68
Příloha 20: Verze 1c 1000 rychlost.....	68
Příloha 21: Verze 1c 1000 tlak.....	68
Příloha 22: Verze 1c 1500 vektor .....	69
Příloha 23: Verze 1c 1500 rychlost.....	69
Příloha 24: Verze 1c 1500 tlak.....	69
Příloha 25: Verze 1c 2000 vektor .....	70
Příloha 26: Verze 1c 2000 rychlost.....	70
Příloha 27: Verze 1c 2000 tlak.....	70
Příloha 28: Verze 2a 1000 vektor .....	71
Příloha 29: Verze 2a 1000 rychlost.....	71

Příloha 30: Verze 2a 1000 tlak.....	71
Příloha 31: Verze 2a 1500 vektor .....	72
Příloha 32: Verze 2a 1500 rychlost.....	72
Příloha 33: Verze 2a 1500 tlak.....	72
Příloha 34: Verze 2a 2000 vektor .....	73
Příloha 35: Verze 2a 2000 rychlost.....	73
Příloha 36: Verze 2a 2000 tlak.....	73
Příloha 37: Verze 2b 1000 vektor .....	74
Příloha 38: Verze 2b 1000 rychlost.....	74
Příloha 39: Verze 2b 1000 tlak .....	74
Příloha 40: Verze 2b 1500 vektor .....	75
Příloha 41: Verze 2b 1500 rychlost.....	75
Příloha 42: Verze 2b 1500 tlak .....	75
Příloha 43: Verze 2b 2000 vektor .....	76
Příloha 44: Verze 2b 2000 rychlost.....	76
Příloha 45: Verze 2b 2000 tlak .....	76
Příloha 46: Verze 2c 1000 vektor .....	77
Příloha 47: Verze 2c 1000 rychlost.....	77
Příloha 48: Verze 2c 1000 tlak.....	77
Příloha 49: Verze 2c 1500 vektor .....	78
Příloha 50: Verze 2c 1500 rychlost.....	78
Příloha 51: Verze 2c 1500 tlak.....	78
Příloha 52: Verze 2c 2000 vektor .....	79
Příloha 53: Verze 2c 2000 rychlost.....	79
Příloha 54: Verze 2c 2000 tlak.....	79
Příloha 55: Graf rychlosti pro verzi 1a 1000.....	80
Příloha 56: Graf rychlosti pro verzi 1a 1500.....	80
Příloha 57: Graf rychlosti pro verzi 1a 2000.....	80
Příloha 58: Graf rychlosti pro verzi 1a.....	80
Příloha 59: Graf rychlosti pro verzi 1b 1000.....	81
Příloha 60: Graf rychlosti pro verzi 1b 1500.....	81

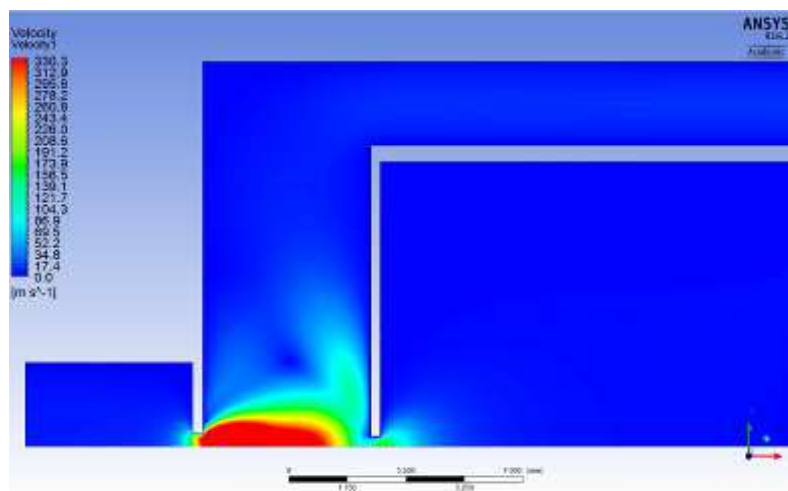
Příloha 61: Graf rychlosti pro verzi 1b 2000.....	81
Příloha 62: Graf rychlosti pro verzi 1b.....	81
Příloha 63: Graf rychlosti pro verzi 1c 1000 .....	82
Příloha 64: Graf rychlosti pro verzi 1c 1500 .....	82
Příloha 65: Graf rychlosti pro verzi 1c 2000 .....	82
Příloha 66: Graf rychlosti pro verzi 1c .....	82
Příloha 67: Graf rychlosti pro verzi 2a 1000.....	83
Příloha 68: Graf rychlosti pro verzi 2a 1500.....	83
Příloha 69: Graf rychlosti pro verzi 2a 2000.....	83
Příloha 70: Graf rychlosti pro verzi 2a .....	83
Příloha 71: Graf rychlosti pro verzi 2b 1000.....	84
Příloha 72: Graf rychlosti pro verzi 2b 1500.....	84
Příloha 73: Graf rychlosti pro verzi 2b 2000.....	84
Příloha 74: Graf rychlosti pro verzi 2b.....	84
Příloha 75: Graf rychlosti pro verzi 2c 1000 .....	85
Příloha 76: Graf rychlosti pro verzi 2c 1500 .....	85
Příloha 77: Graf rychlosti pro verzi 2c 2000 .....	85
Příloha 78: Graf rychlosti pro verzi 2c .....	85
Příloha 79: Graf tlaku pro verzi 1a 1000.....	86
Příloha 80: Graf tlaku pro verzi 1a 1500.....	86
Příloha 81: Graf tlaku pro verzi 1a 2000.....	86
Příloha 82: Graf tlaku pro verzi 1a.....	86
Příloha 83: Graf tlaku pro verzi 1b 1000 .....	87
Příloha 84: Graf tlaku pro verzi 1b 1500 .....	87
Příloha 85: Graf tlaku pro verzi 1b 2000 .....	87
Příloha 86: Graf tlaku pro verzi 1b .....	87
Příloha 87: Graf tlaku pro verzi 1c 1000.....	88
Příloha 88: Graf tlaku pro verzi 1c 1500.....	88
Příloha 89: Graf tlaku pro verzi 1c 2000.....	88
Příloha 90: Graf tlaku pro verzi 1c.....	88
Příloha 91: Graf tlaku pro verzi 2a 1000.....	89

Příloha 92: Graf tlaku pro verzi 2a 1500.....	89
Příloha 93: Graf tlaku pro verzi 2a 2000.....	89
Příloha 94: Graf tlaku pro verzi 2a.....	89
Příloha 95: Graf tlaku pro verzi 2b 1000 .....	90
Příloha 96: Graf tlaku pro verzi 2b 1500 .....	90
Příloha 97: Graf tlaku pro verzi 2b 2000 .....	90
Příloha 98: Graf tlaku pro verzi 2b .....	90
Příloha 99: Graf tlaku pro verzi 2c 1000.....	91
Příloha 100: Graf tlaku pro verzi 2c 1500.....	91
Příloha 101: Graf tlaku pro verzi 2c 2000.....	91
Příloha 102: Graf tlaku pro verzi 2c.....	91
Příloha 103:Graf průměrného tlaku pro verzi 1a .....	92
Příloha 104:Graf průměrného tlaku pro verzi 1b .....	92
Příloha 105:Graf průměrného tlaku pro verzi 1c .....	92
Příloha 106:Graf průměrného tlaku pro verzi 2a .....	93
Příloha 107:Graf průměrného tlaku pro verzi 2b .....	93
Příloha 108:Graf průměrného tlaku pro verzi 2c .....	93

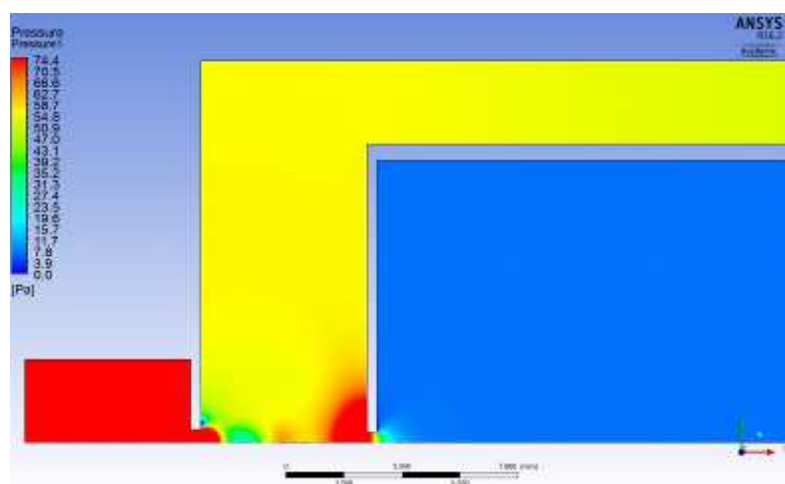
## Přílohy:



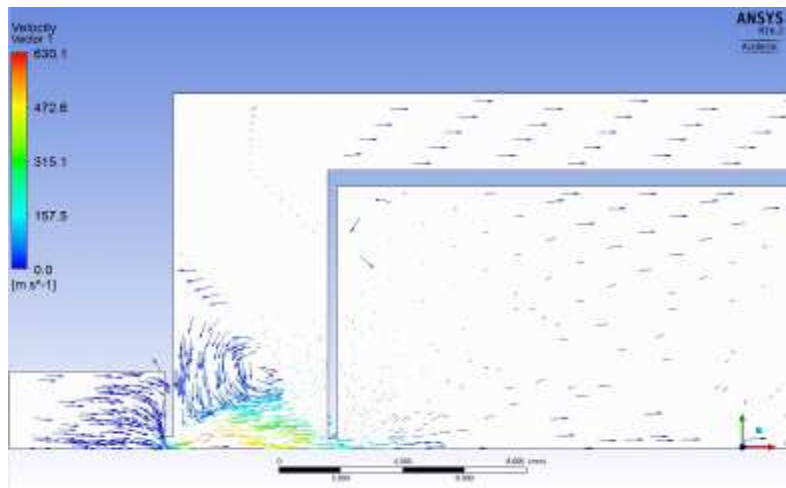
*Příloha 1: Verze 1a 1000 vektor*



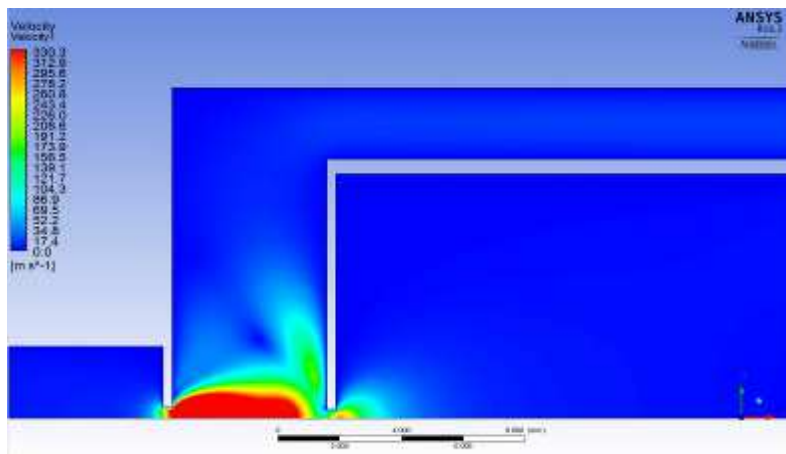
*Příloha 2: Verze 1a 1000 rychlost*



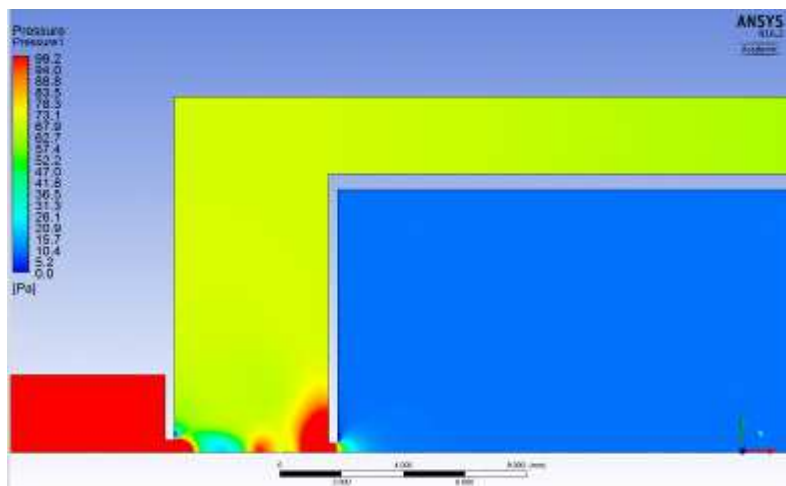
*Příloha 3: Verze 1a 1000 tlak*



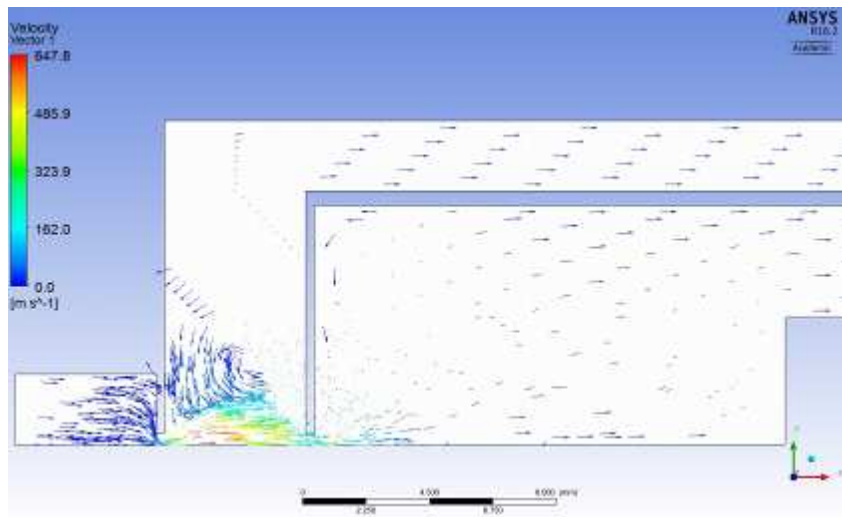
*Příloha 4: Verze 1a 1500 vektor*



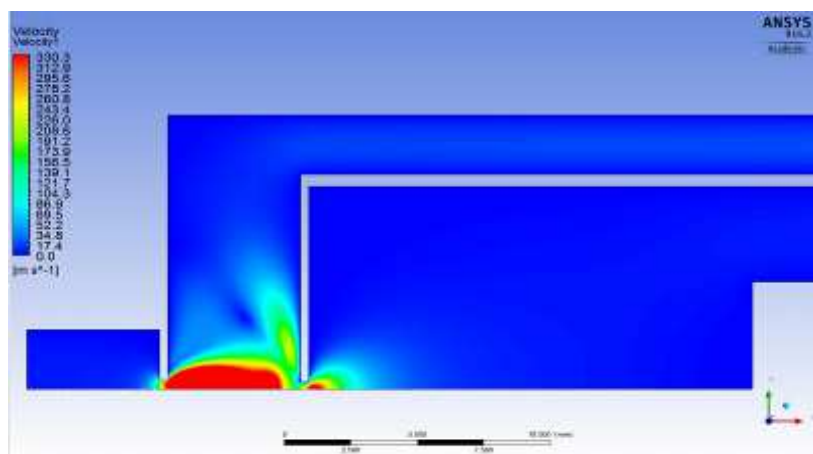
*Příloha 5: Verze 1a 1500 rychlost*



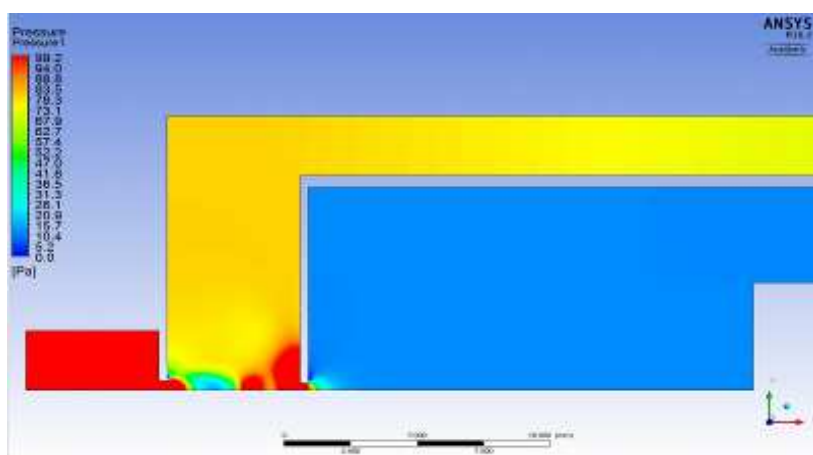
*Příloha 6: Verze 1a 1500 tlak*



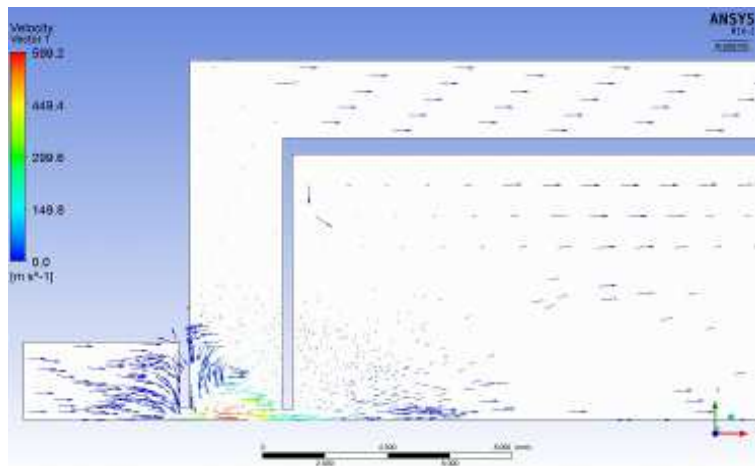
*Příloha 7: Verze 1a 2000 vektor*



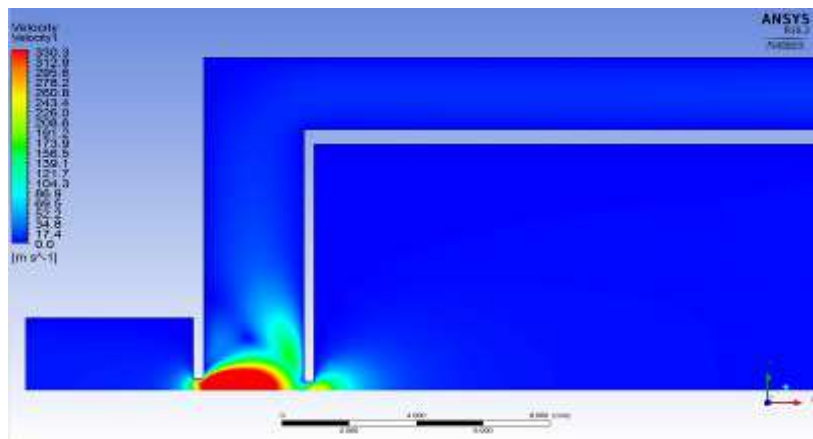
*Příloha 8: Verze 1a 2000 rychlost*



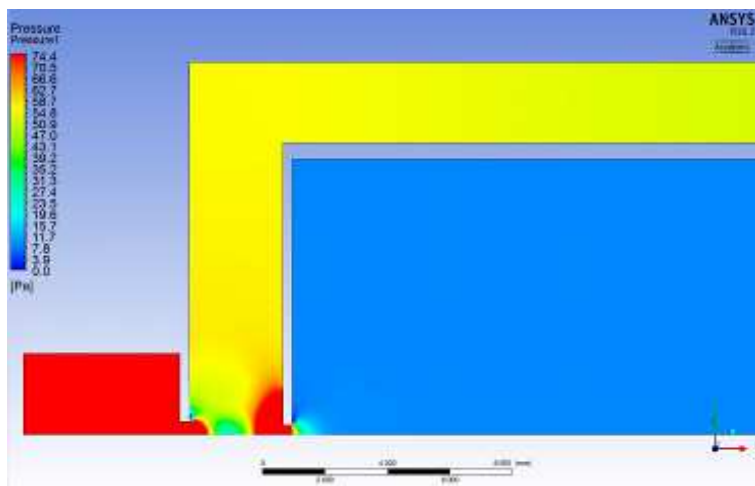
*Příloha 9: Verze 1a 2000 tlak*



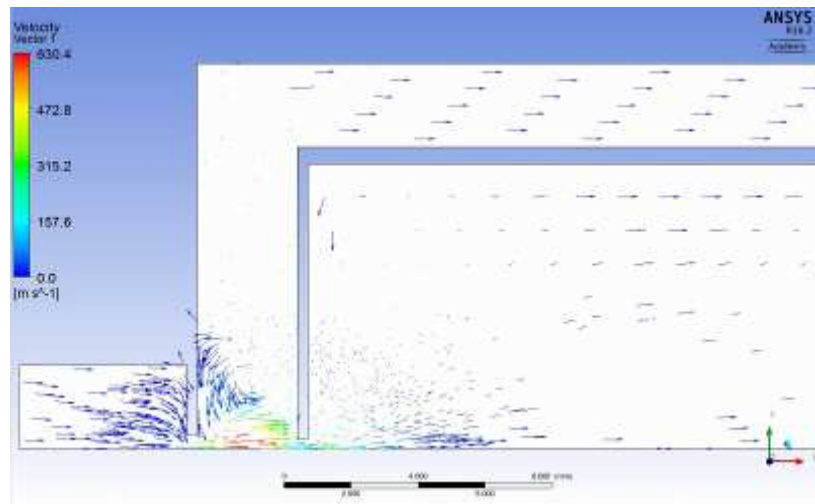
*Příloha 10: Verze 1b 1000 vektor*



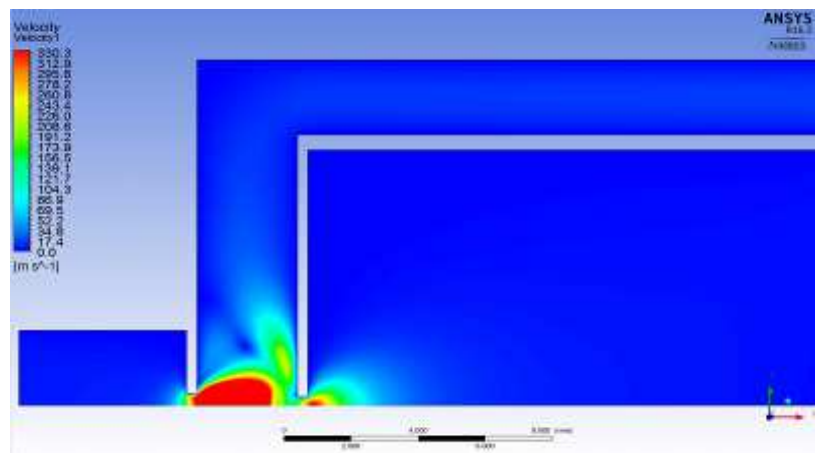
*Příloha 11: Verze 1b 1000 rychlost*



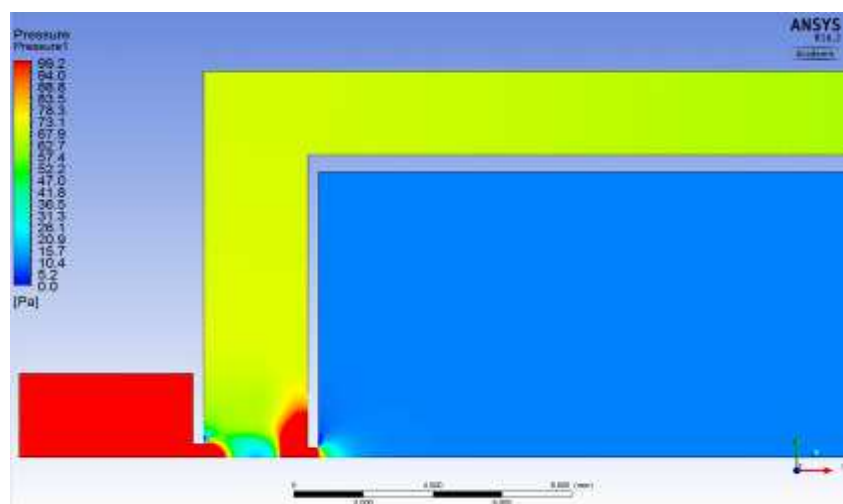
*Příloha 12: Verze 1b 1000 tlak*



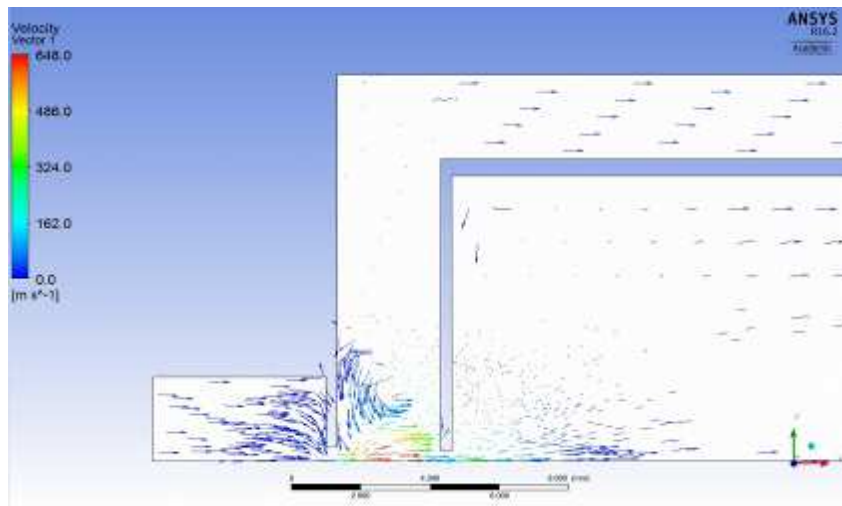
*Příloha 13: Verze 1b 1500 vektor*



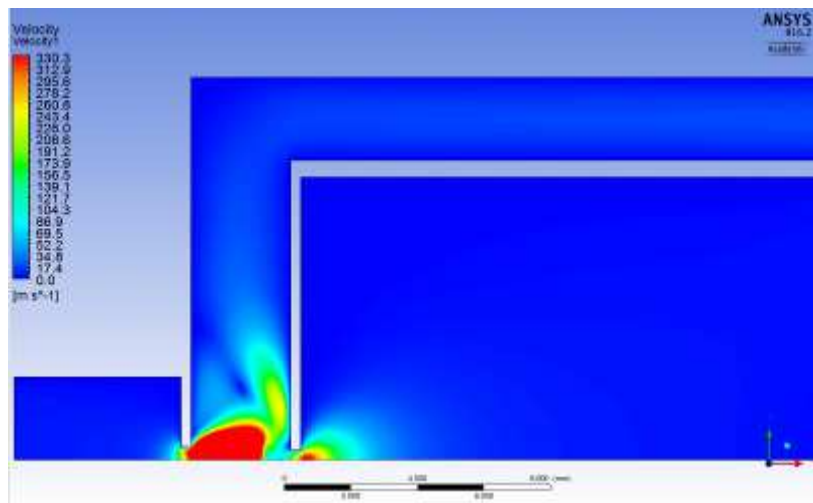
*Příloha 14: Verze 1b 1500 rychlost*



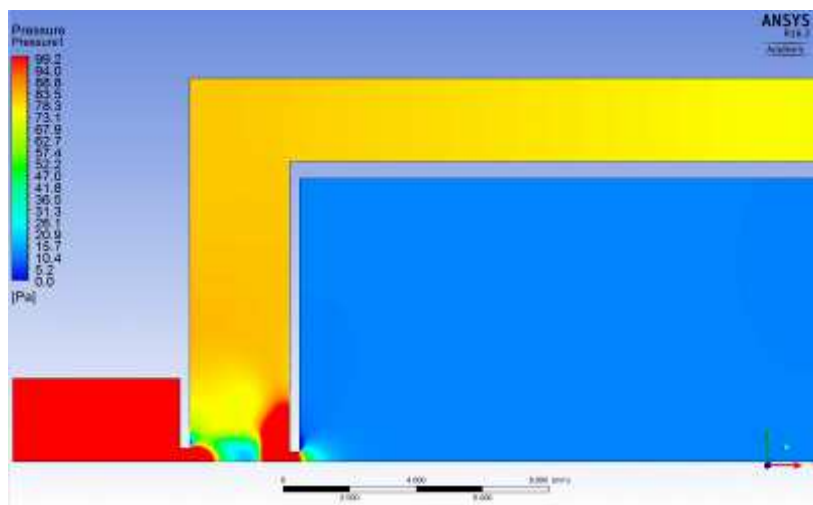
*Příloha 15: Verze 1b 1500 tlak*



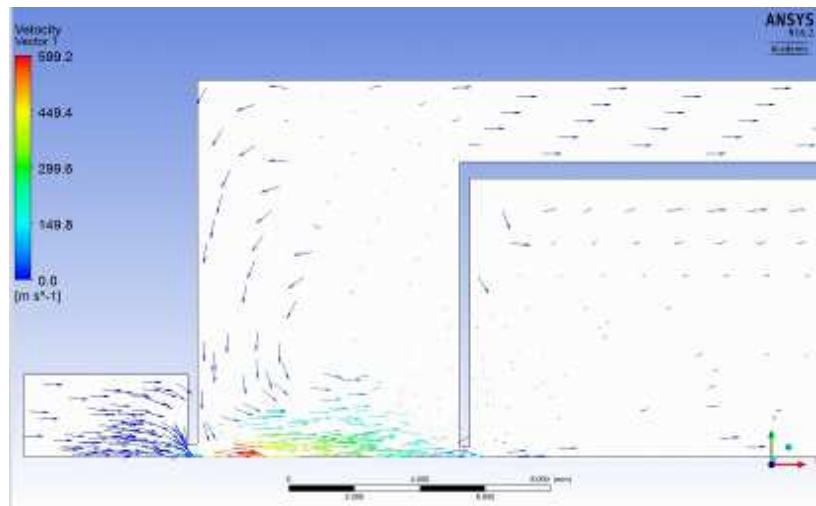
*Příloha 16: Verze 1b 2000 vektor*



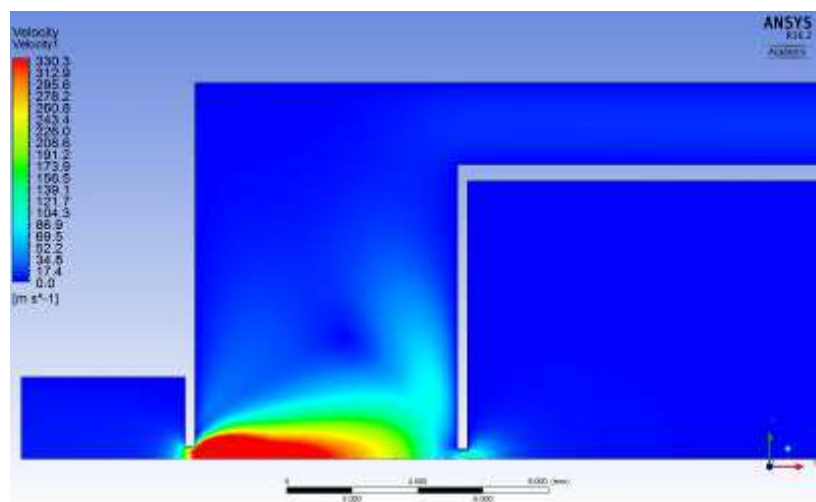
*Příloha 17: Verze 1b 2000 rychlost*



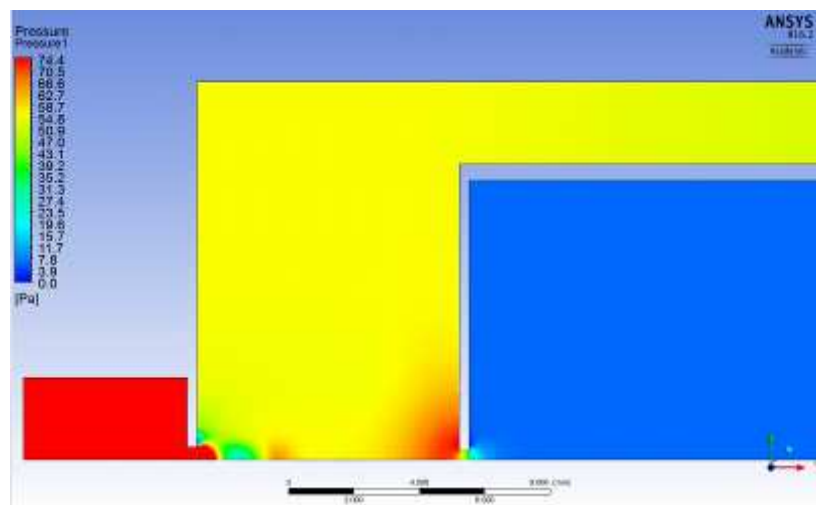
*Příloha 18: Verze 1b 2000 tlak*



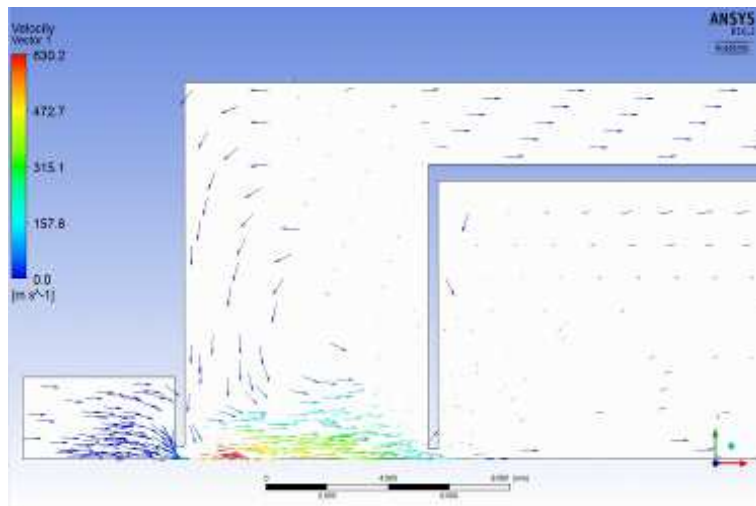
*Příloha 19: Verze 1c 1000 vektor*



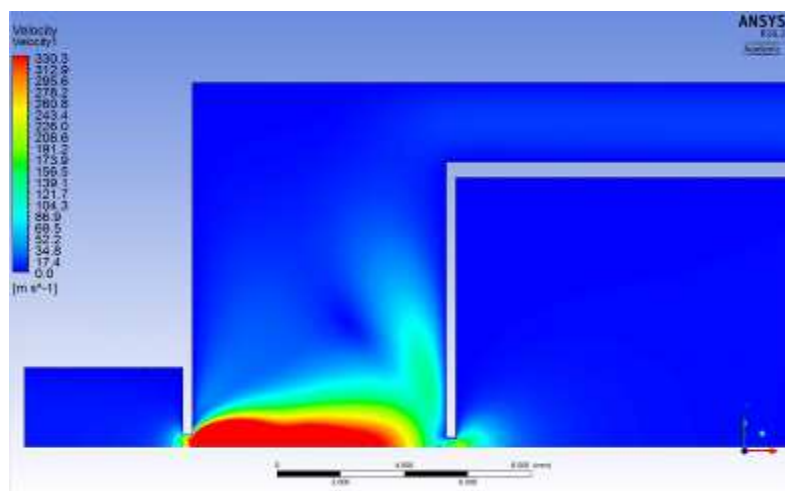
*Příloha 20: Verze 1c 1000 rychlost*



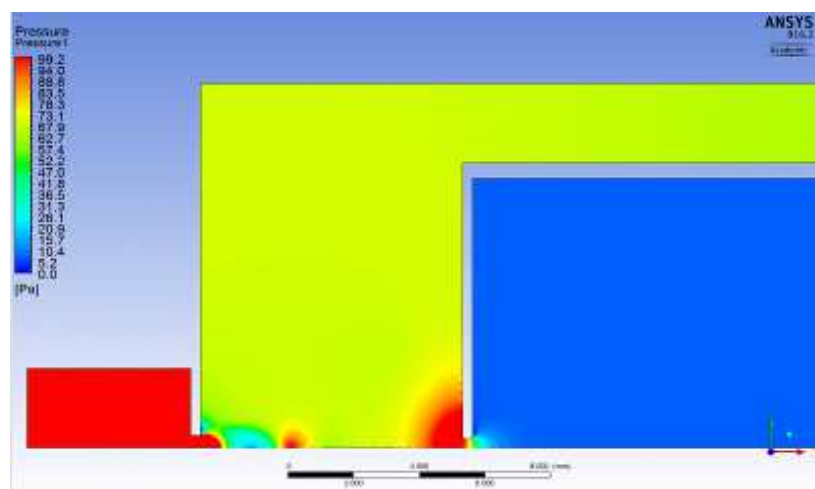
*Příloha 21: Verze 1c 1000 tlak*



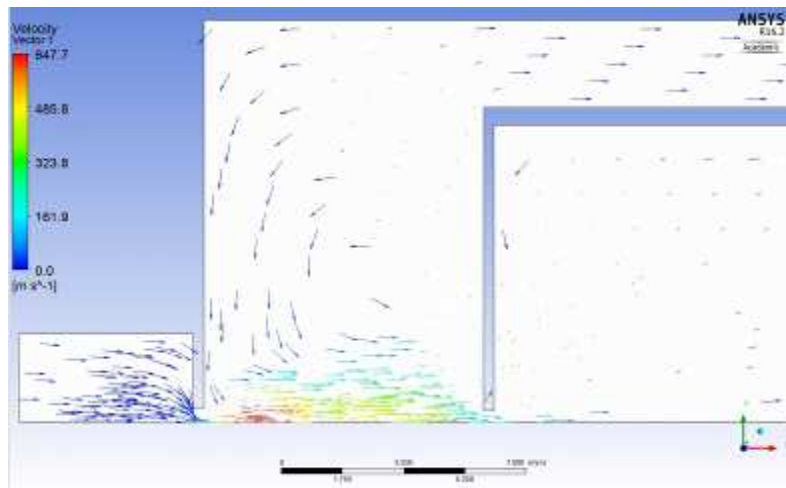
*Příloha 22: Verze 1c 1500 vektor*



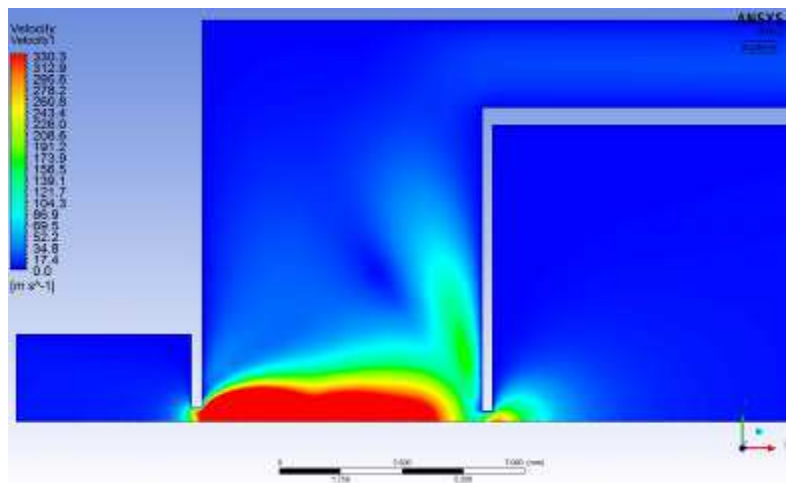
*Příloha 23: Verze 1c 1500 rychlost*



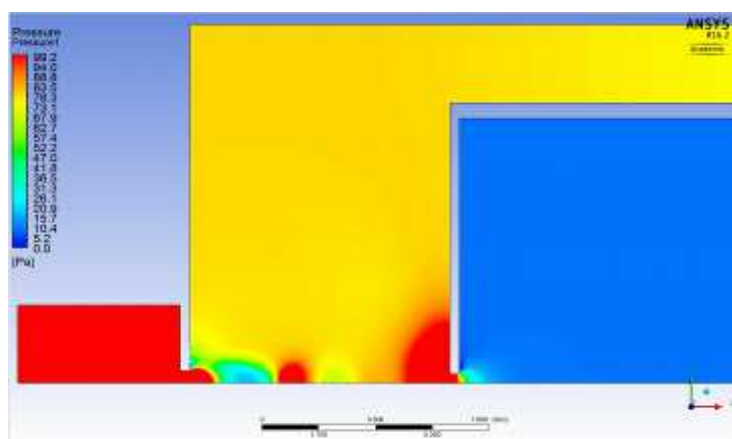
*Příloha 24: Verze 1c 1500 tlak*



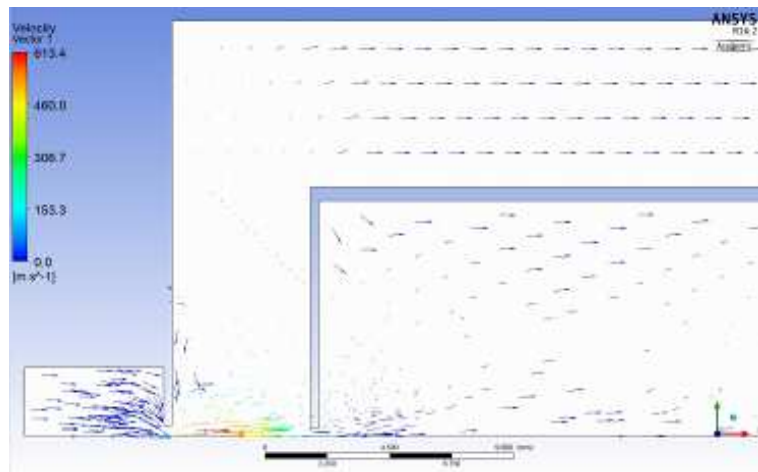
*Příloha 25: Verze 1c 2000 vektor*



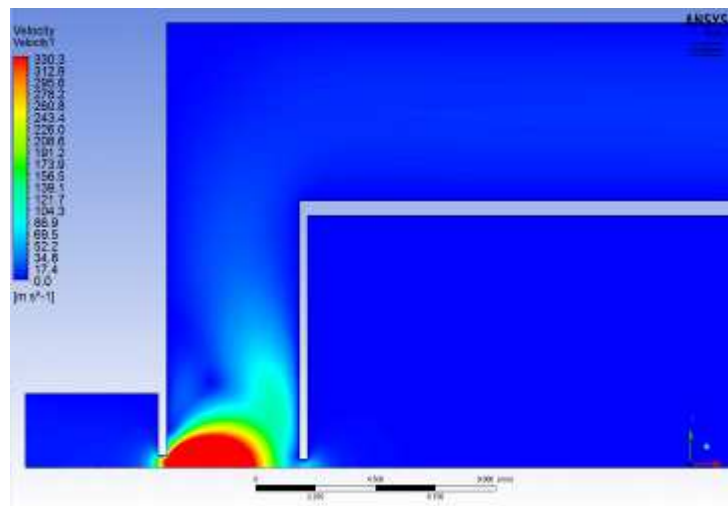
*Příloha 26: Verze 1c 2000 rychlost*



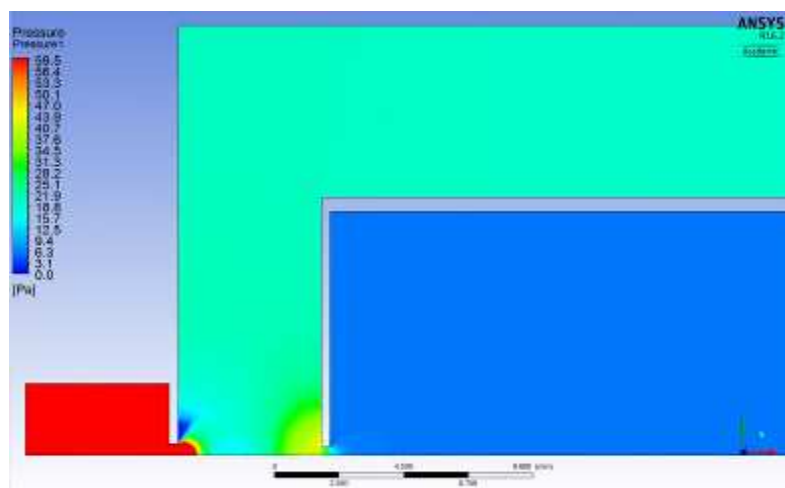
*Příloha 27: Verze 1c 2000 tlak*



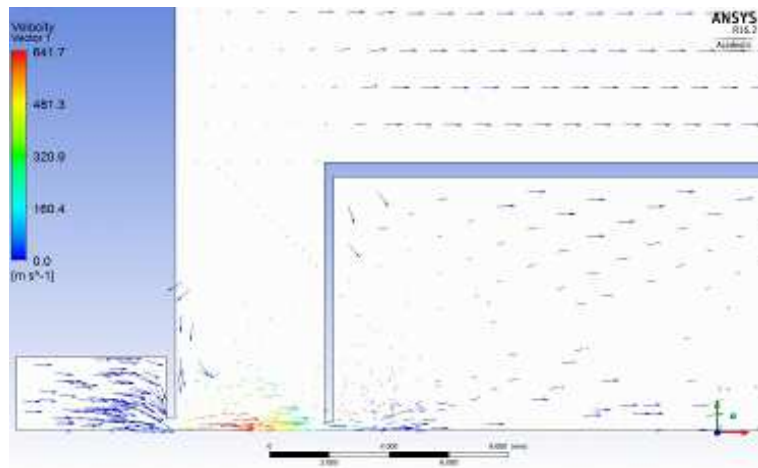
*Příloha 28: Verze 2a 1000 vektor*



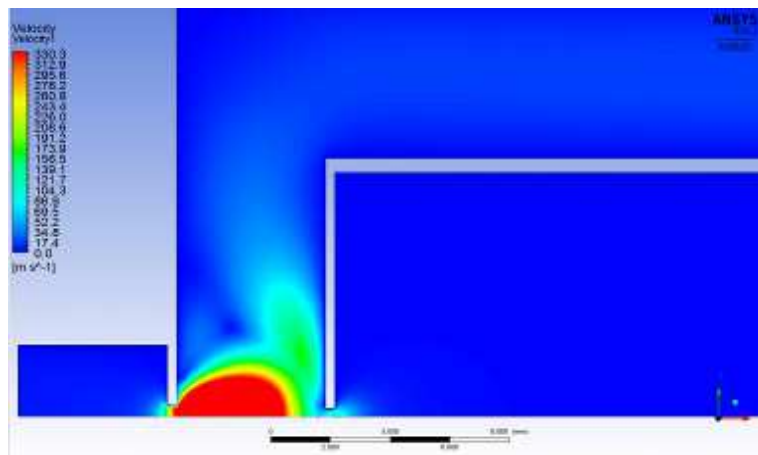
*Příloha 29: Verze 2a 1000 rychlost*



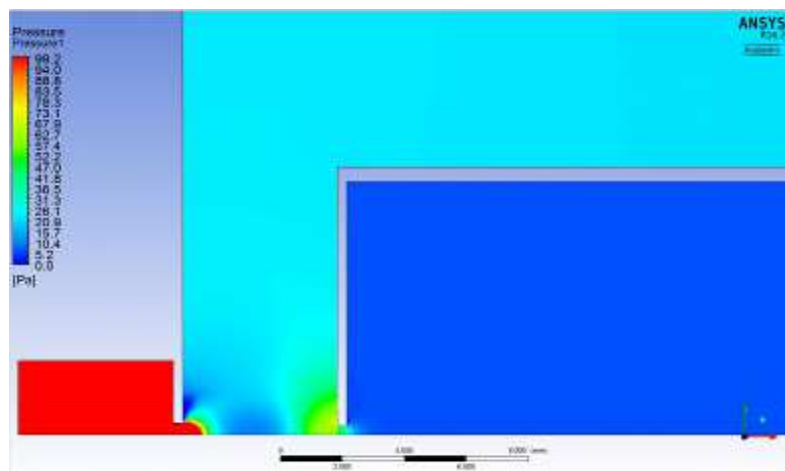
*Příloha 30: Verze 2a 1000 tlak*

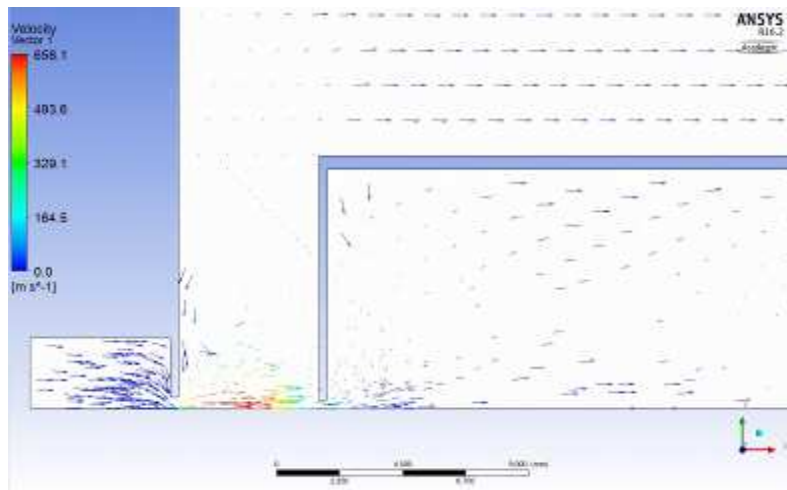


*Příloha 31: Verze 2a 1500 vektor*

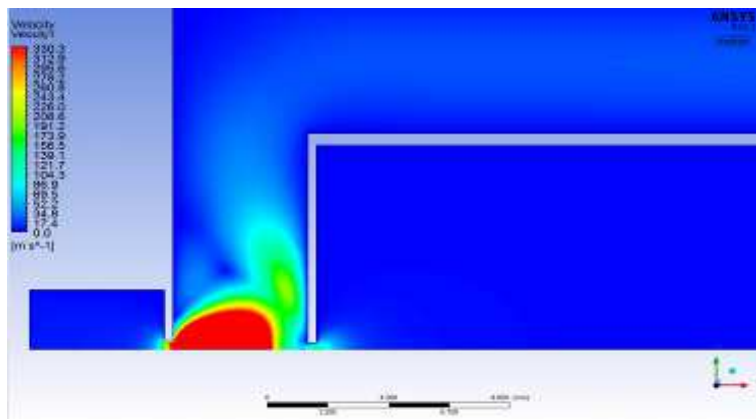


*Příloha 32: Verze 2a 1500 rychlost*

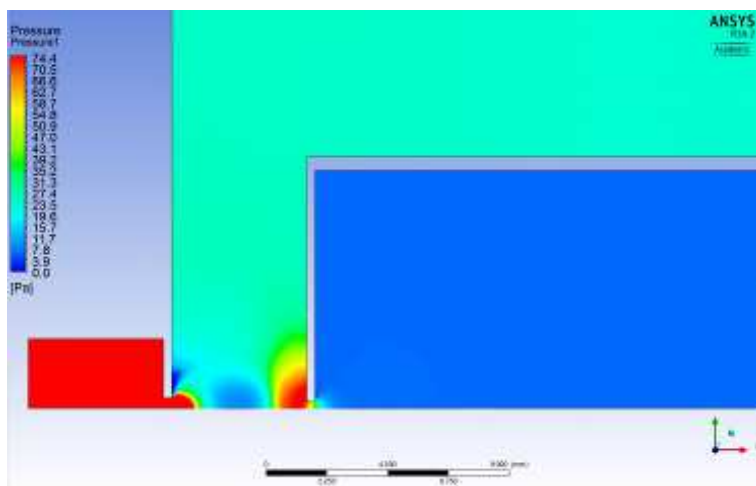




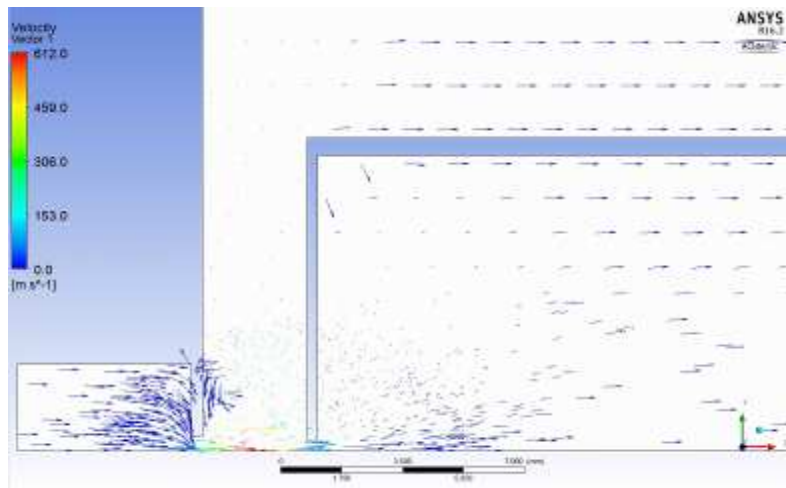
*Příloha 34: Verze 2a 2000 vektor*



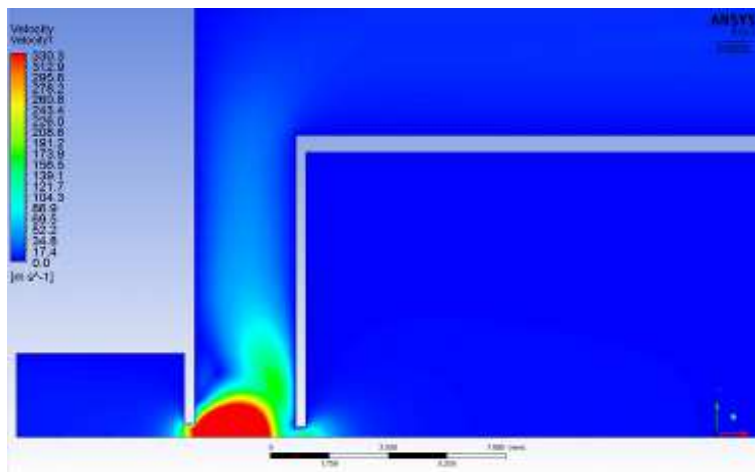
*Příloha 35: Verze 2a 2000 rychlost*



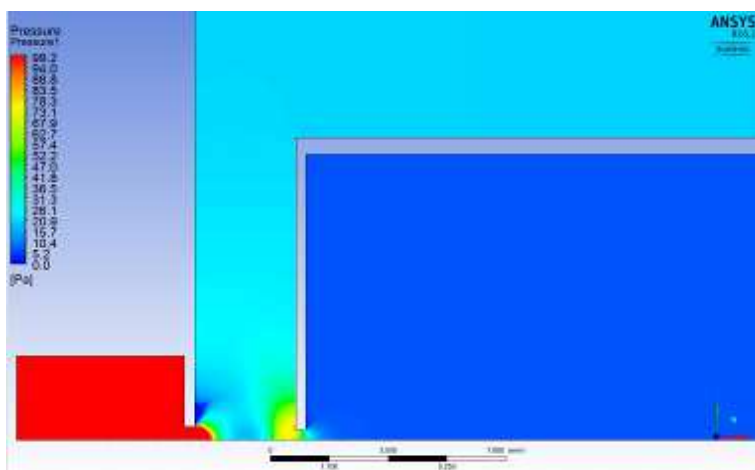
*Příloha 36: Verze 2a 2000 tlak*



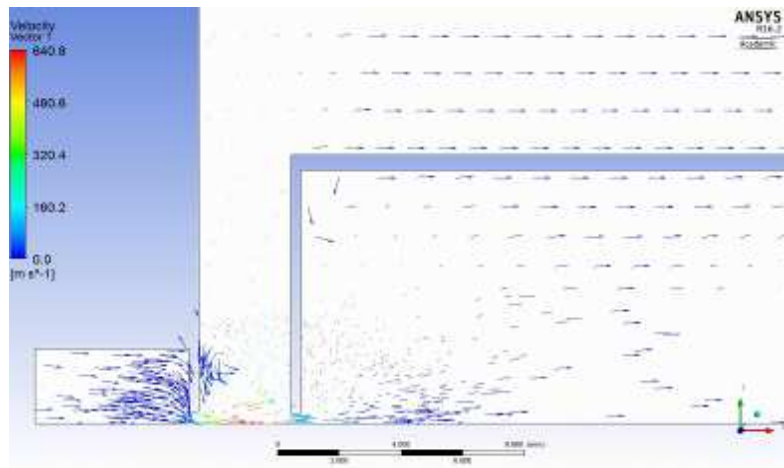
*Příloha 37: Verze 2b 1000 vektor*



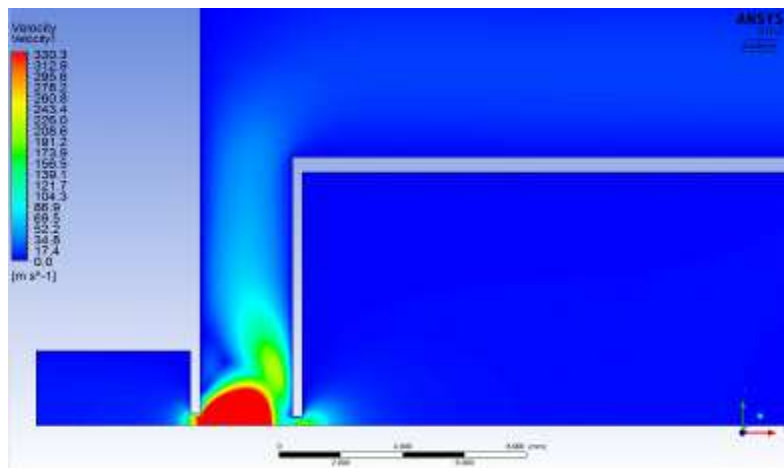
*Příloha 38: Verze 2b 1000 rychlost*



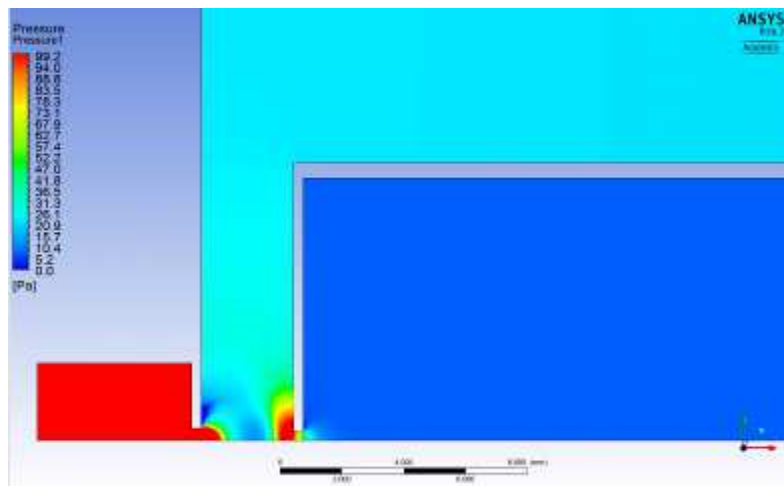
*Příloha 39: Verze 2b 1000 tlak*



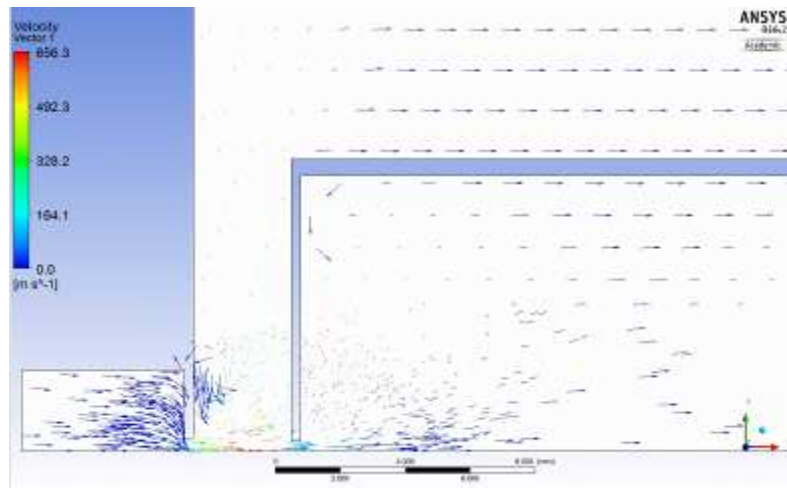
*Příloha 40: Verze 2b 1500 vektor*



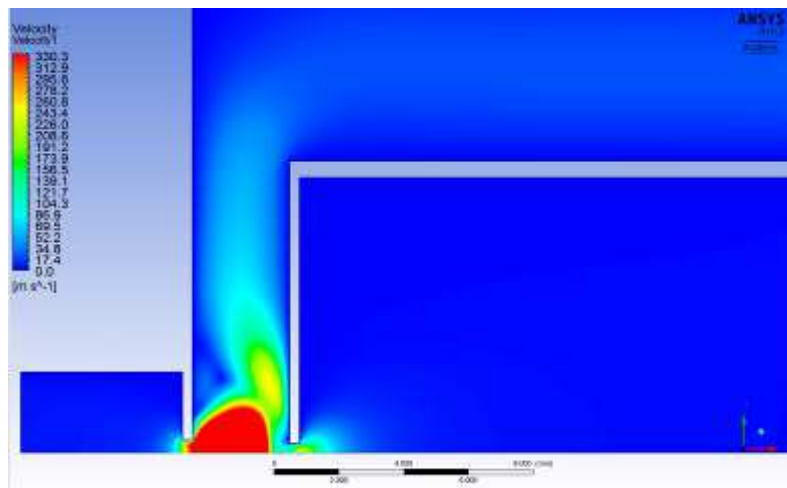
*Příloha 41: Verze 2b 1500 rychlost*



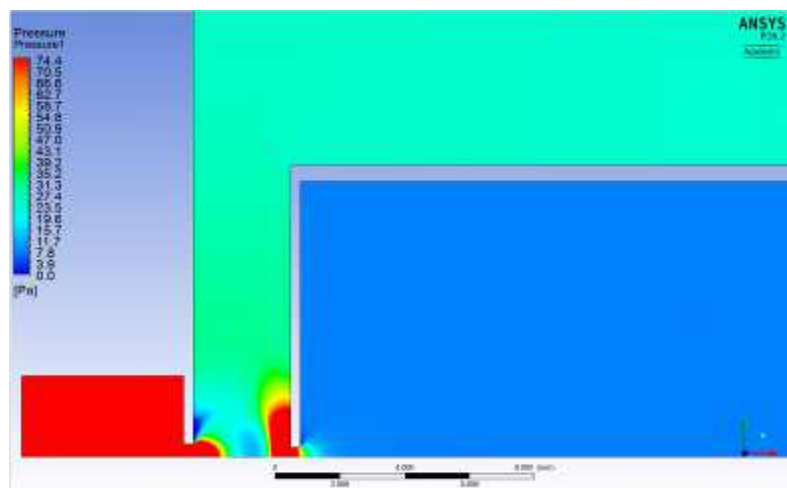
*Příloha 42: Verze 2b 1500 tlak*



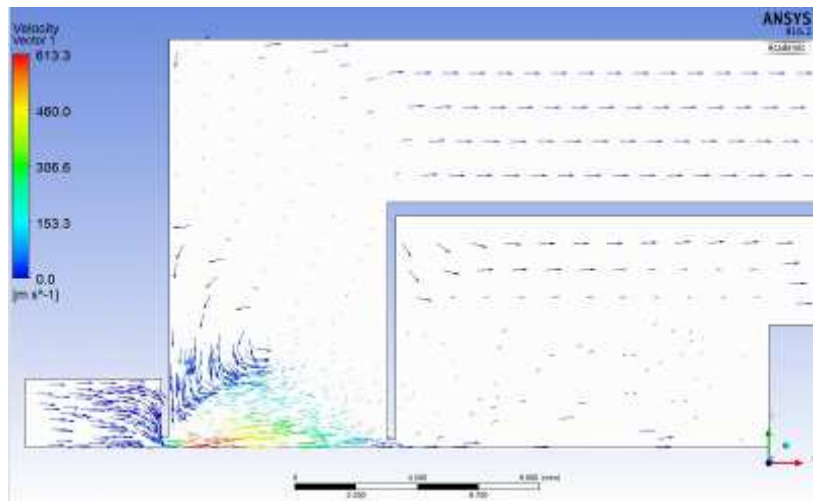
*Příloha 43: Verze 2b 2000 vektor*



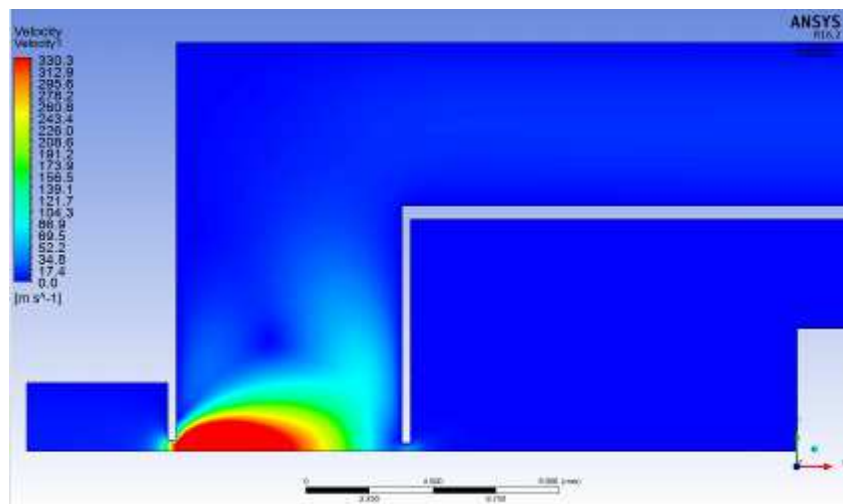
*Příloha 44: Verze 2b 2000 rychlost*



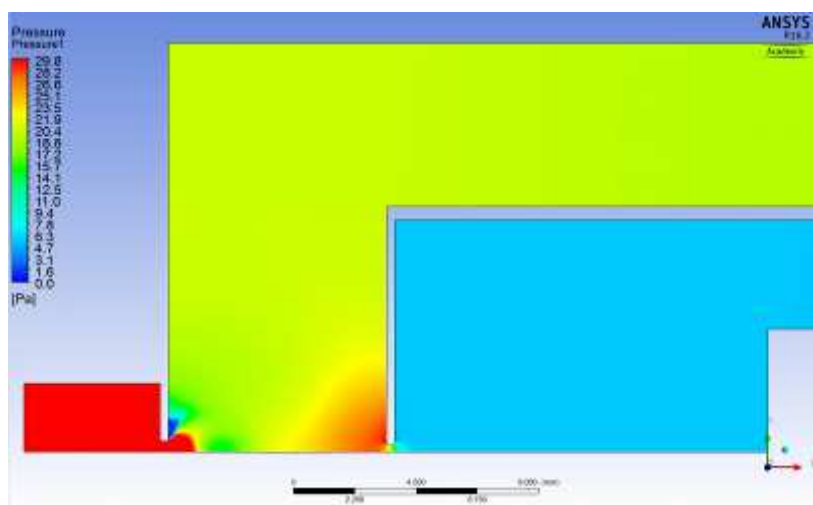
*Příloha 45: Verze 2b 2000 tlak*



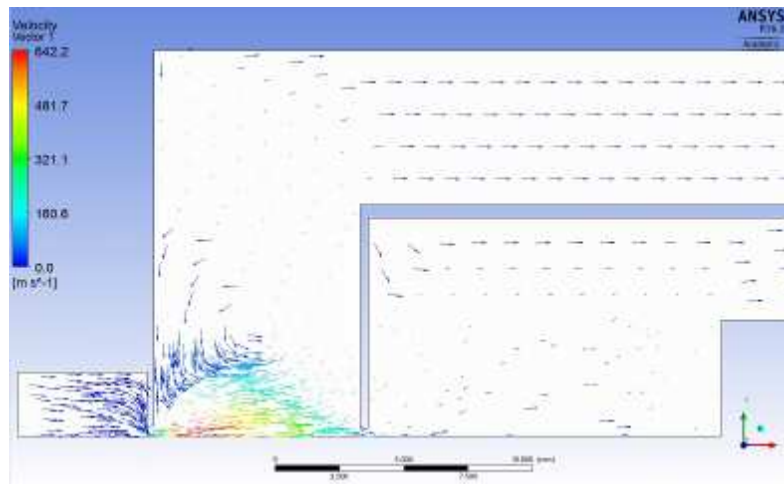
*Příloha 46: Verze 2c 1000 vektor*



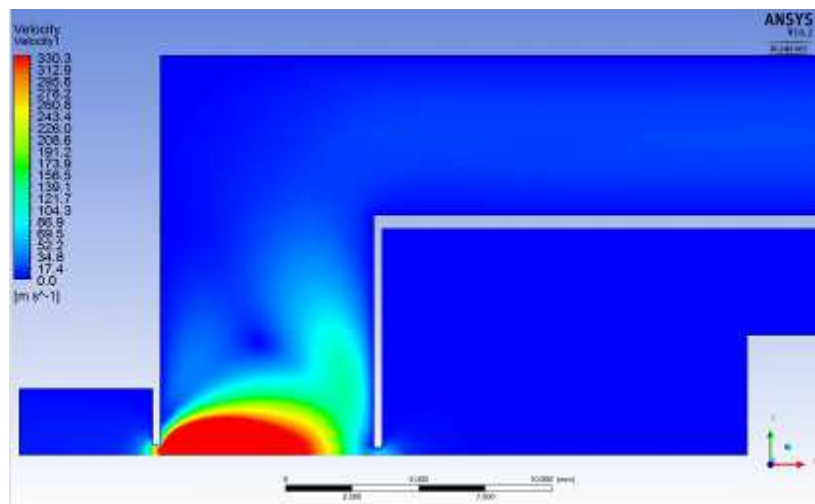
*Příloha 47: Verze 2c 1000 rychlost*



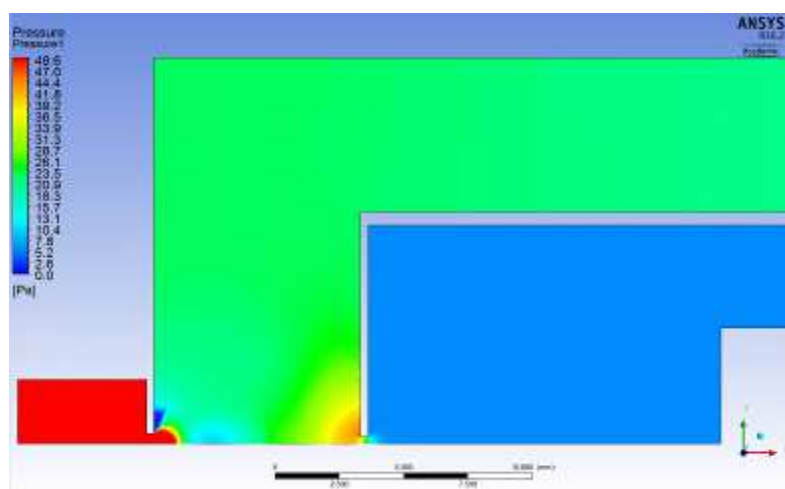
*Příloha 48: Verze 2c 1000 tlak*



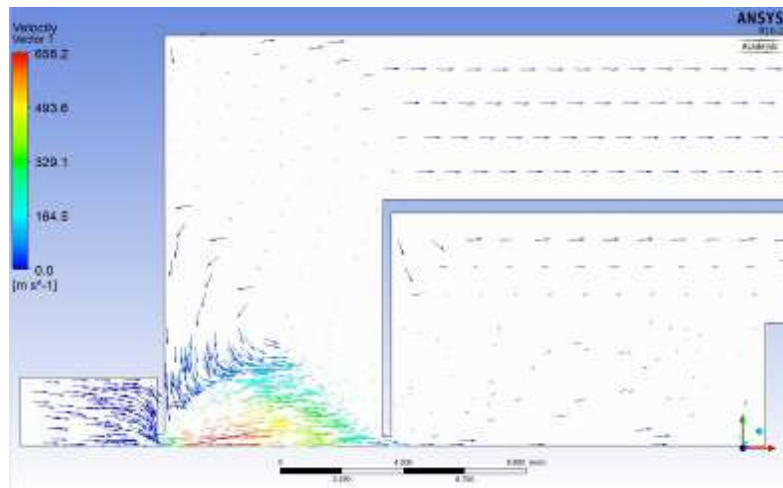
*Příloha 49: Verze 2c 1500 vektor*



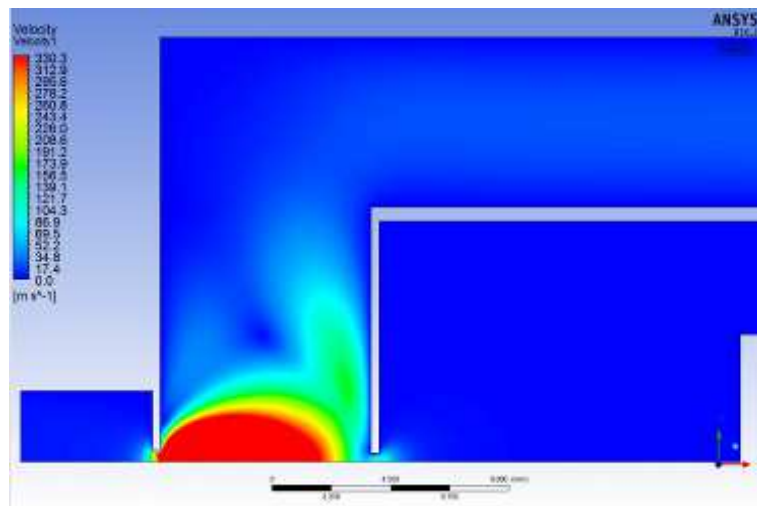
*Příloha 50: Verze 2c 1500 rychlost*



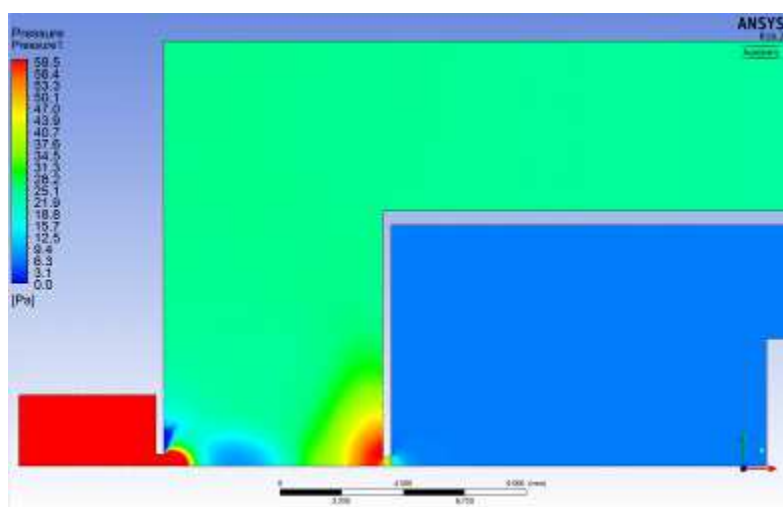
*Příloha 51: Verze 2c 1500 tlak*



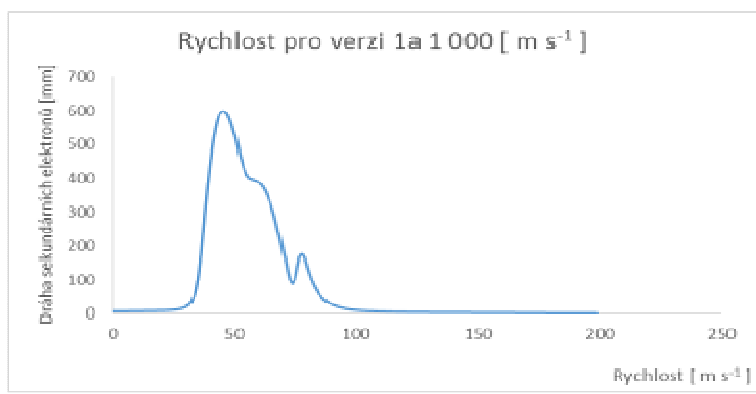
*Příloha 52: Verze 2c 2000 vektor*



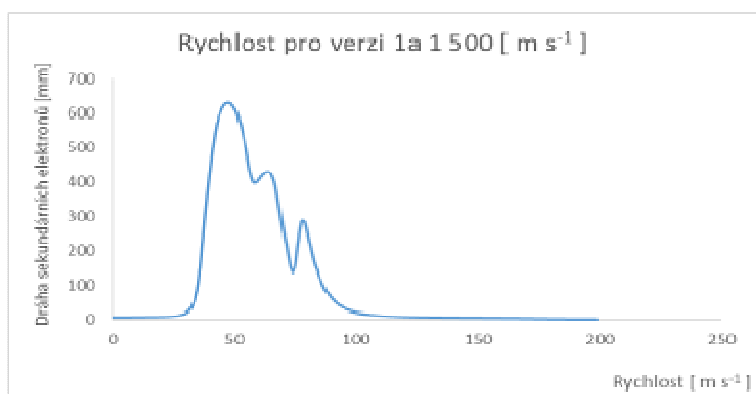
*Příloha 53: Verze 2c 2000 rychlost*



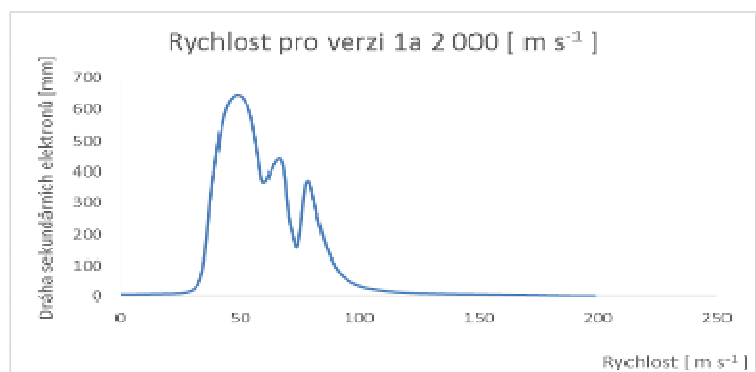
*Příloha 54: Verze 2c 2000 tlak*



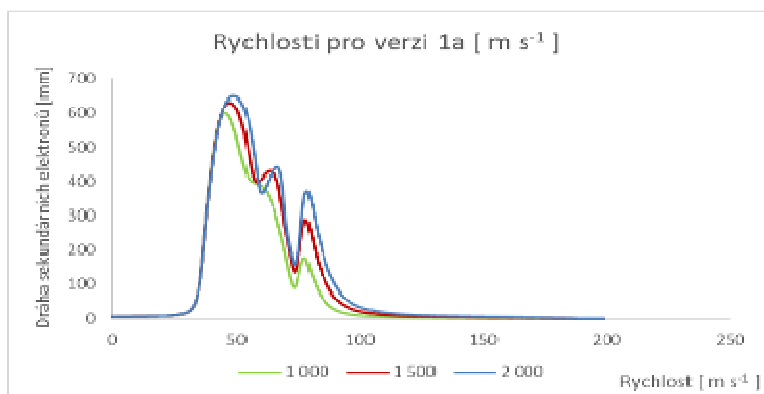
*Příloha 55: Graf rychlosti pro verzi 1a 1000*



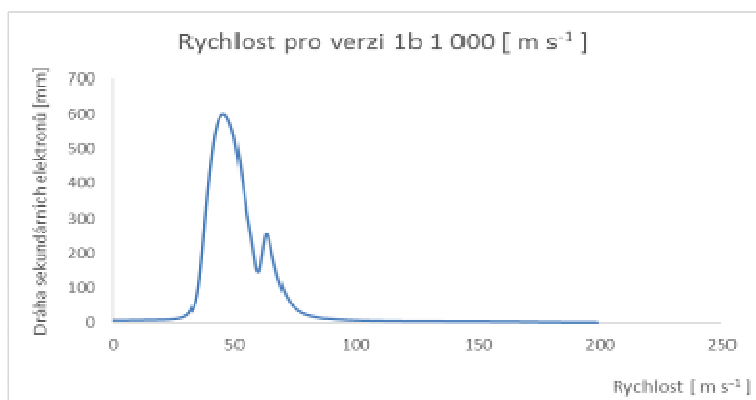
*Příloha 56: Graf rychlosti pro verzi 1a 1500*



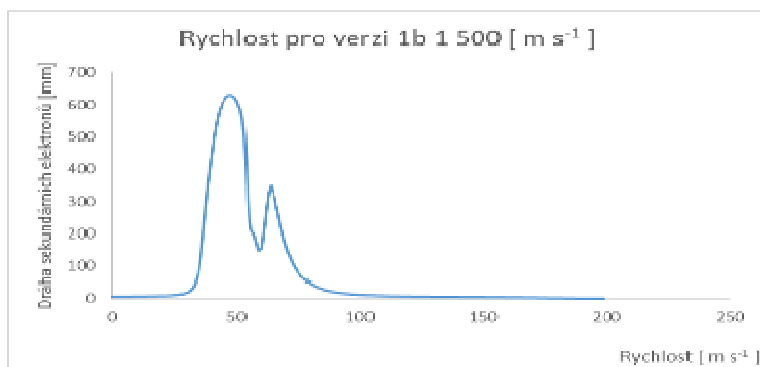
*Příloha 57: Graf rychlosti pro verzi 1a 2000*



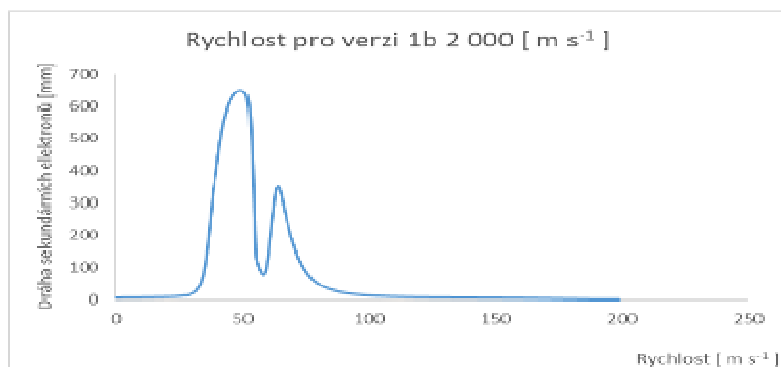
*Příloha 58: Graf rychlosti pro verzi 1a*



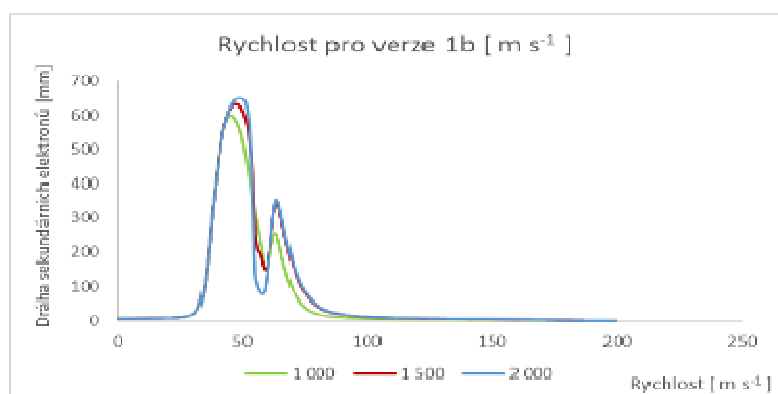
Příloha 59: Graf rychlosti pro verzi 1b 1000



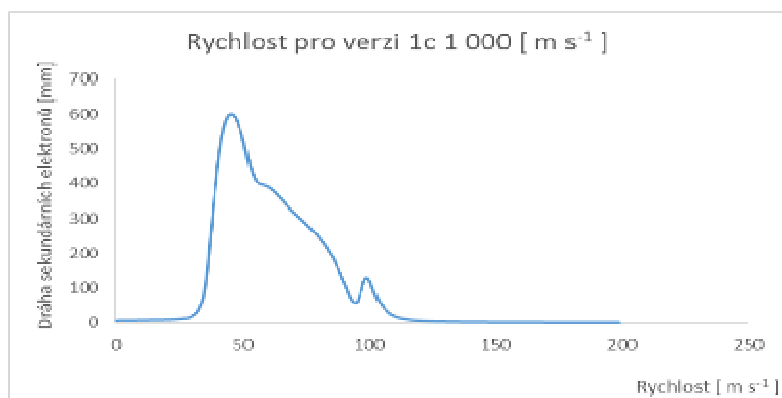
Příloha 60: Graf rychlosti pro verzi 1b 1500



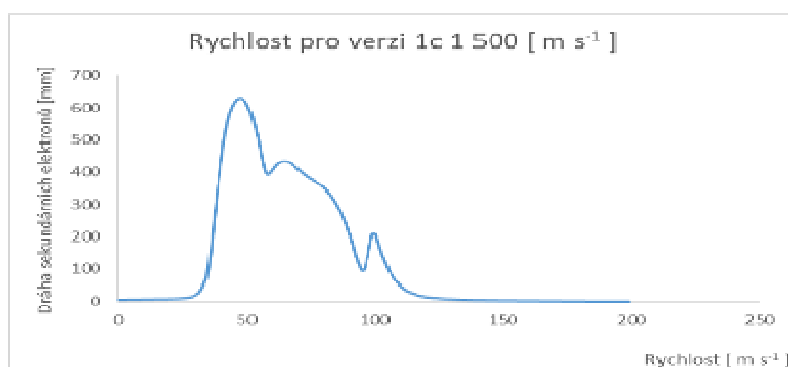
Příloha 61: Graf rychlosti pro verzi 1b 2000



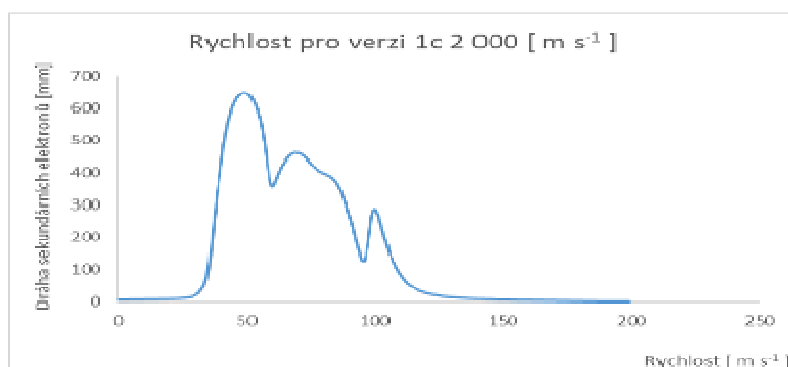
Příloha 62: Graf rychlosti pro verzi 1b



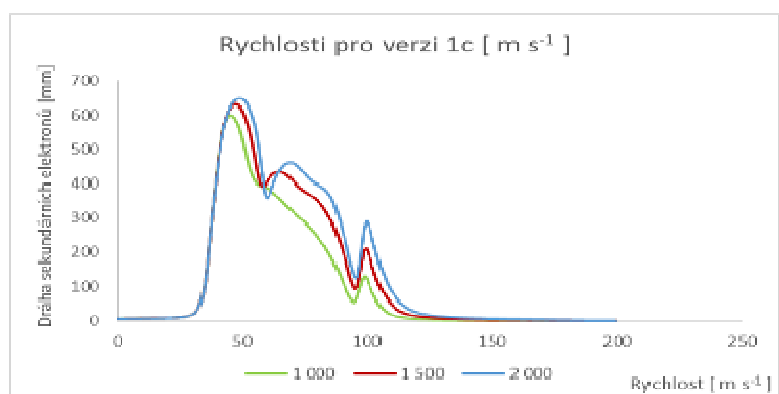
Příloha 63: Graf rychlosti pro verzi 1c 1000



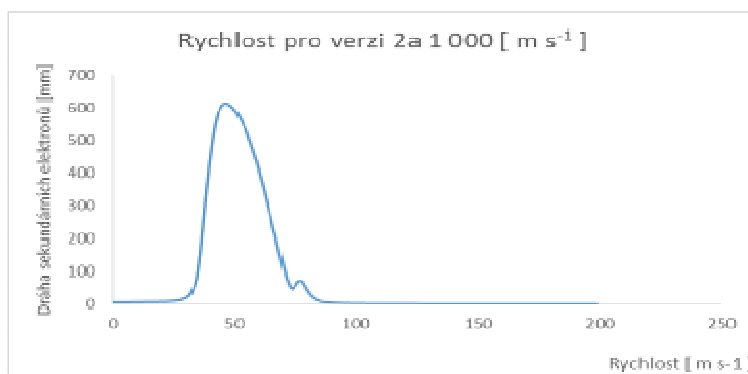
Příloha 64: Graf rychlosti pro verzi 1c 1500



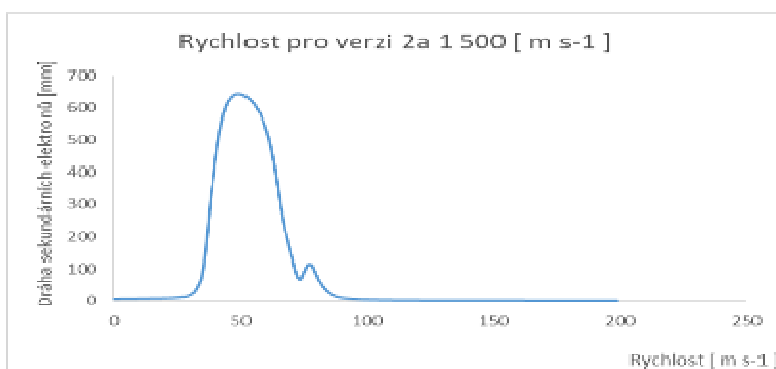
Příloha 65: Graf rychlosti pro verzi 1c 2000



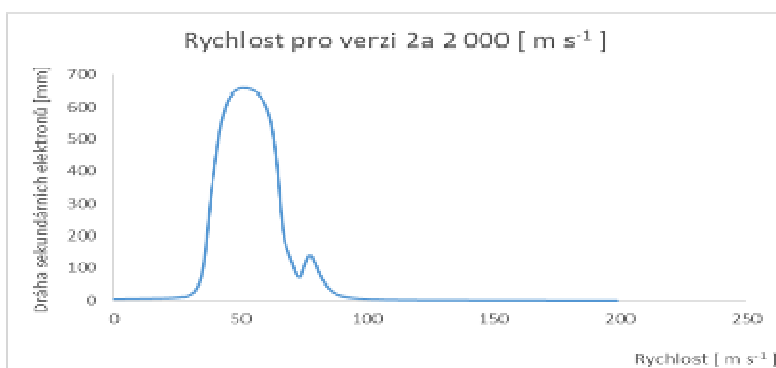
Příloha 66: Graf rychlosti pro verzi 1c



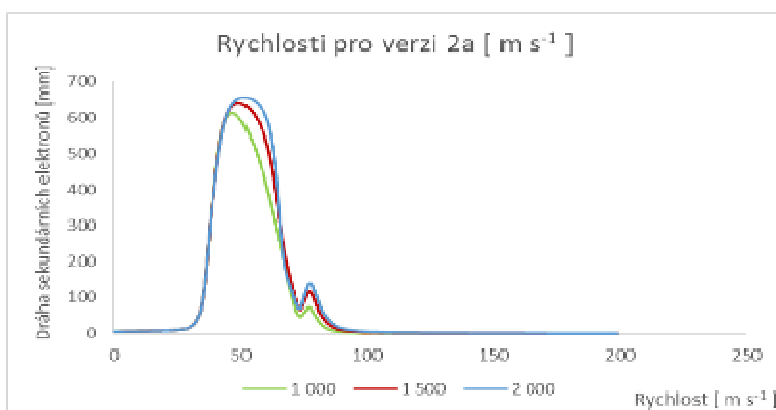
*Příloha 67: Graf rychlosti pro verzi 2a 1000*



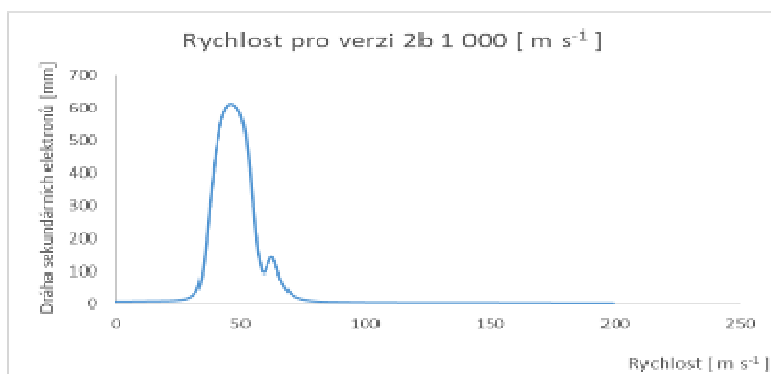
*Příloha 68: Graf rychlosti pro verzi 2a 1500*



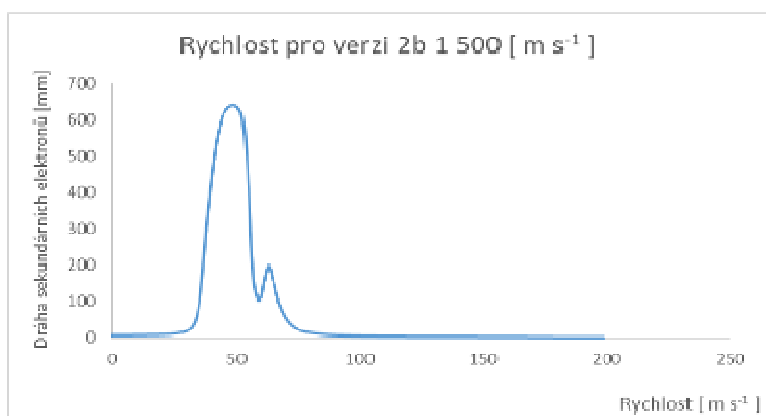
*Příloha 69: Graf rychlosti pro verzi 2a 2000*



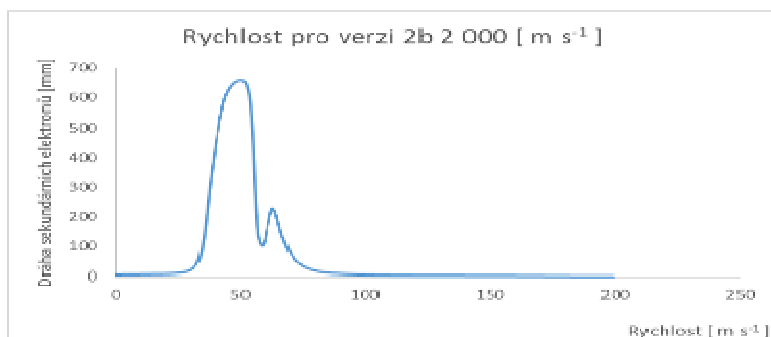
*Příloha 70: Graf rychlosti pro verzi 2a*



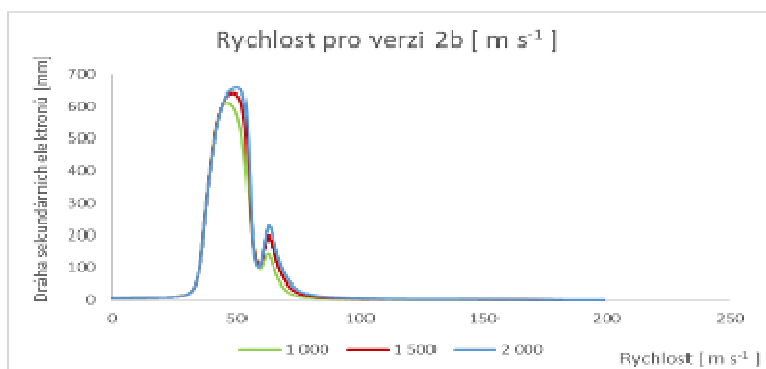
*Příloha 71: Graf rychlosti pro verzi 2b 1000*



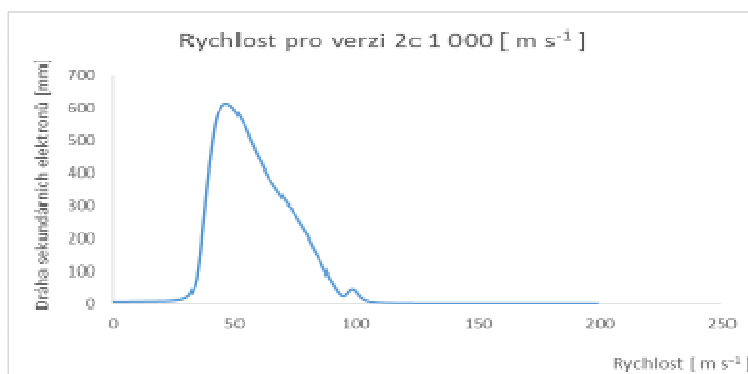
*Příloha 72: Graf rychlosti pro verzi 2b 1500*



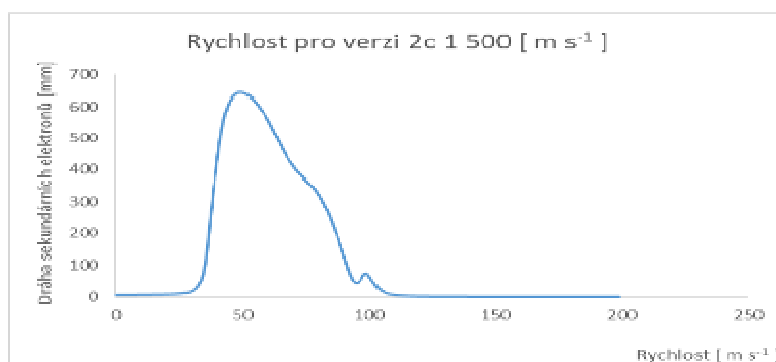
*Příloha 73: Graf rychlosti pro verzi 2b 2000*



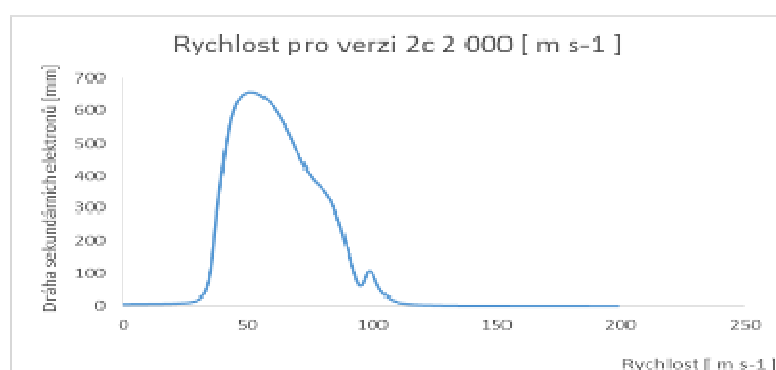
*Příloha 74: Graf rychlosti pro verzi 2b*



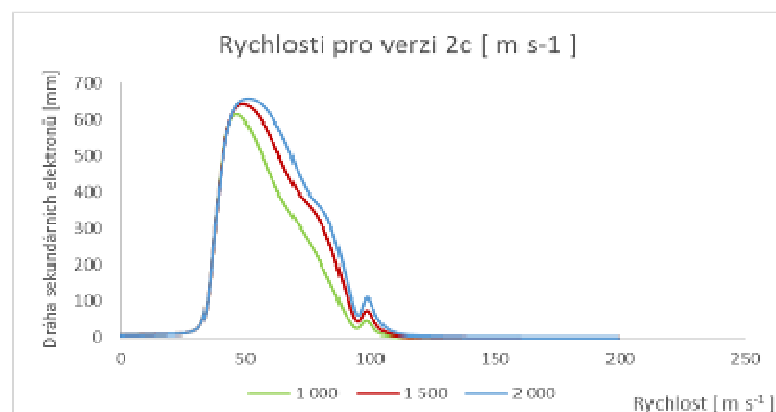
*Příloha 75: Graf rychlosti pro verzi 2c 1000*



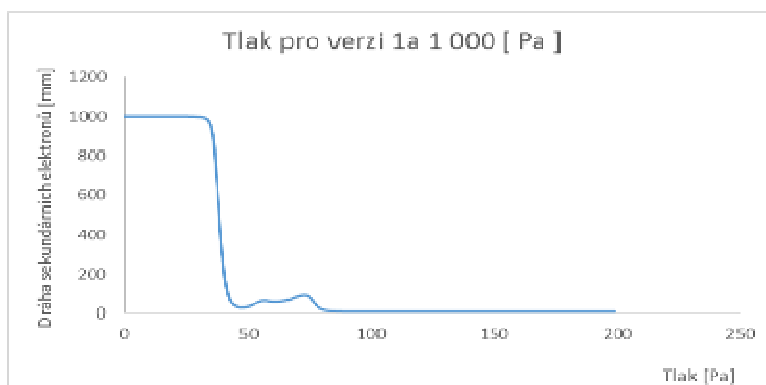
*Příloha 76: Graf rychlosti pro verzi 2c 1500*



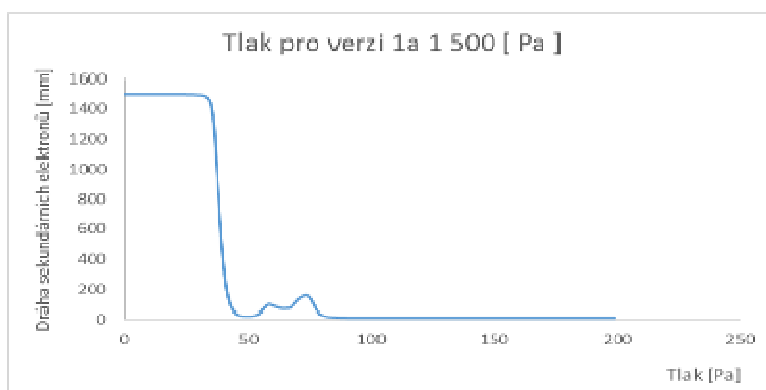
*Příloha 77: Graf rychlosti pro verzi 2c 2000*



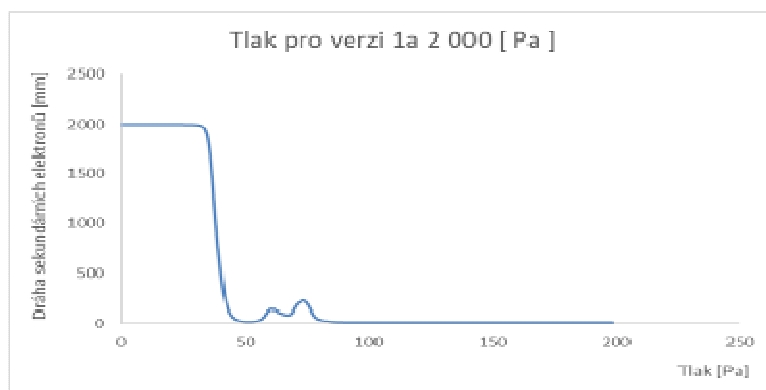
*Příloha 78: Graf rychlosti pro verzi 2c*



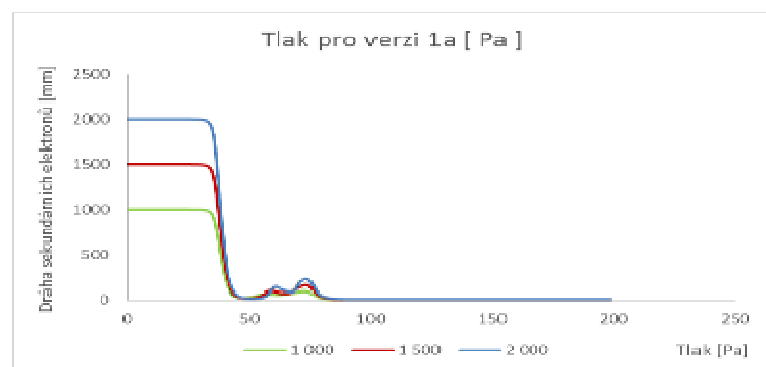
*Příloha 79: Graf tlaku pro verzi 1a 1000*



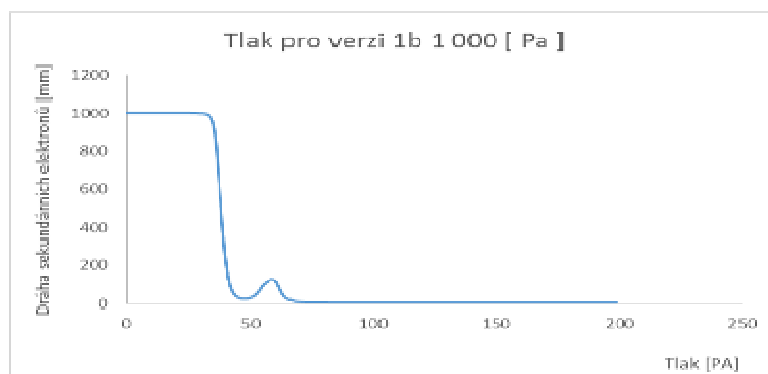
*Příloha 80: Graf tlaku pro verzi 1a 1500*



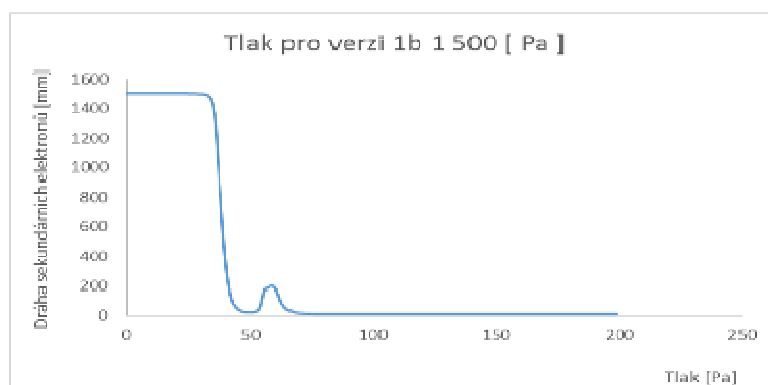
*Příloha 81: Graf tlaku pro verzi 1a 2000*



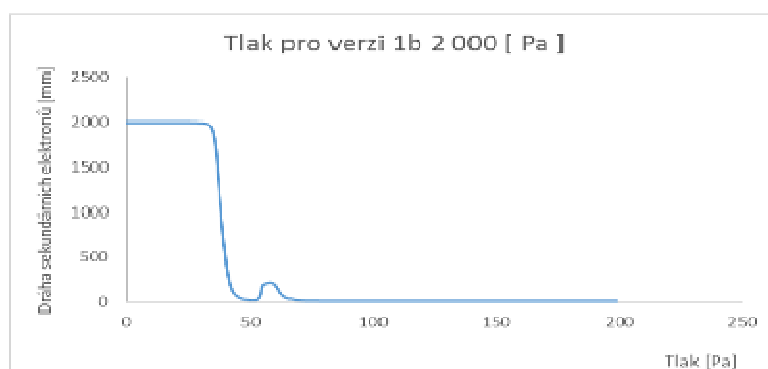
*Příloha 82: Graf tlaku pro verzi 1a*



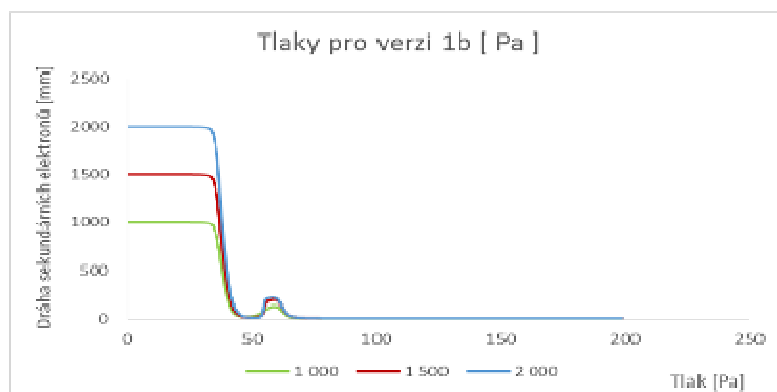
*Příloha 83: Graf tlaku pro verzi 1b 1000*



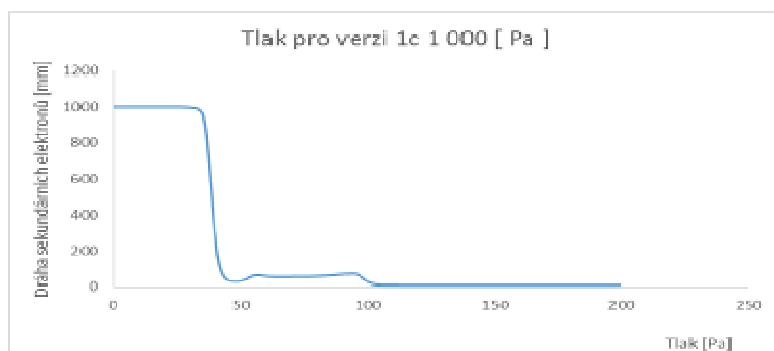
*Příloha 84: Graf tlaku pro verzi 1b 1500*



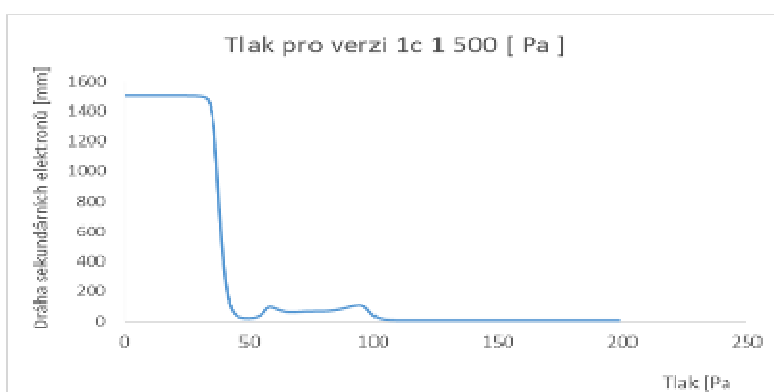
*Příloha 85: Graf tlaku pro verzi 1b 2000*



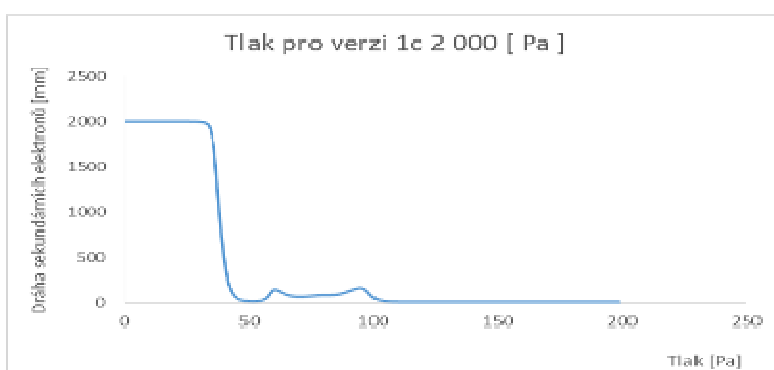
*Příloha 86: Graf tlaku pro verzi 1b*



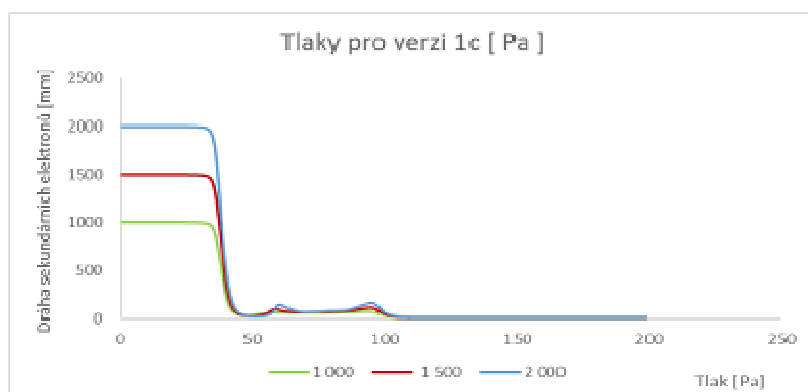
*Příloha 87: Graf tlaku pro verzi 1c 1000*



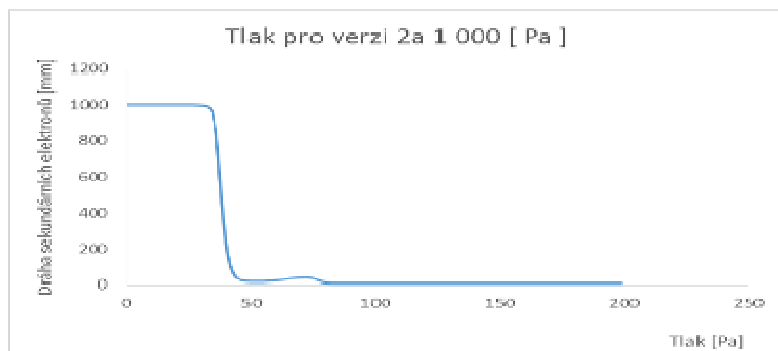
*Příloha 88: Graf tlaku pro verzi 1c 1500*



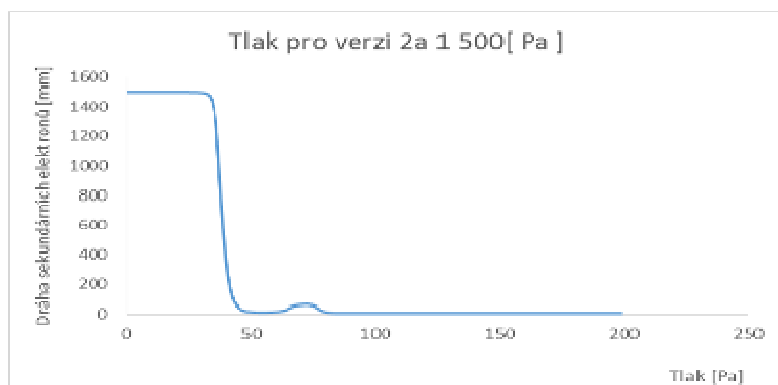
*Příloha 89: Graf tlaku pro verzi 1c 2000*



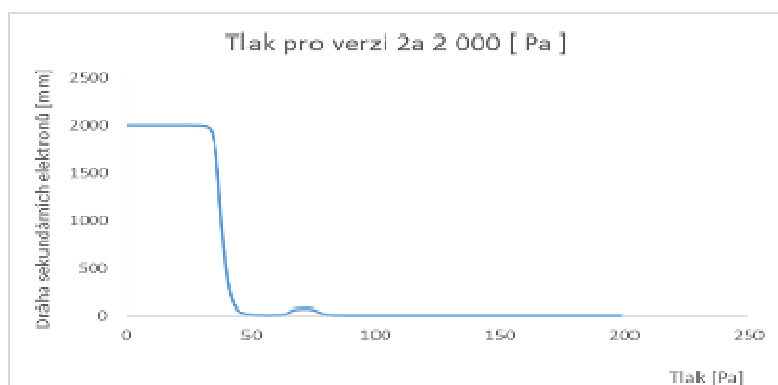
*Příloha 90: Graf tlaku pro verzi 1c*



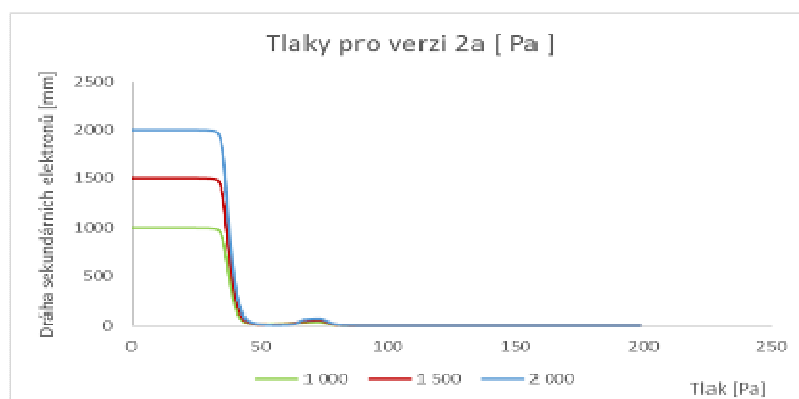
*Příloha 91: Graf tlaku pro verzi 2a 1000*



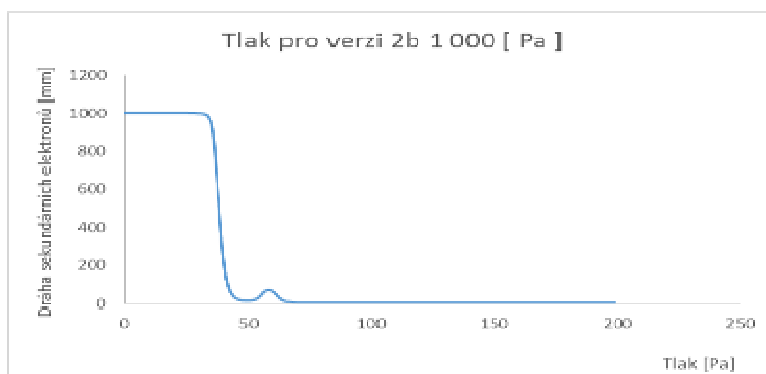
*Příloha 92: Graf tlaku pro verzi 2a 1500*



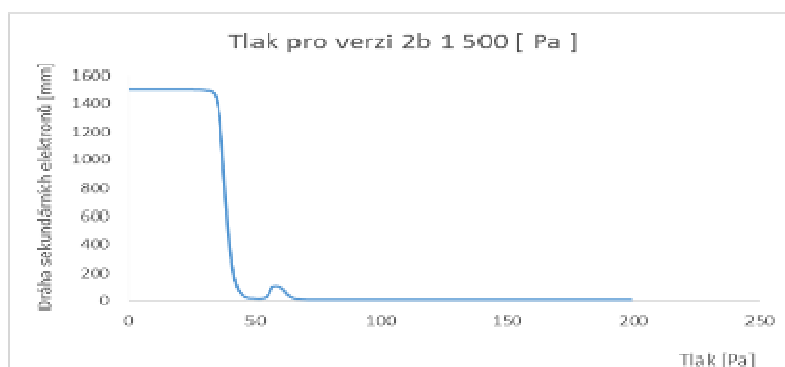
*Příloha 93: Graf tlaku pro verzi 2a 2000*



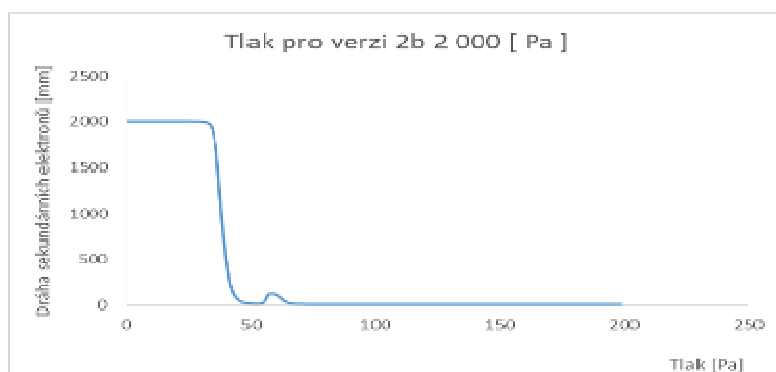
*Příloha 94: Graf tlaku pro verzi 2a*



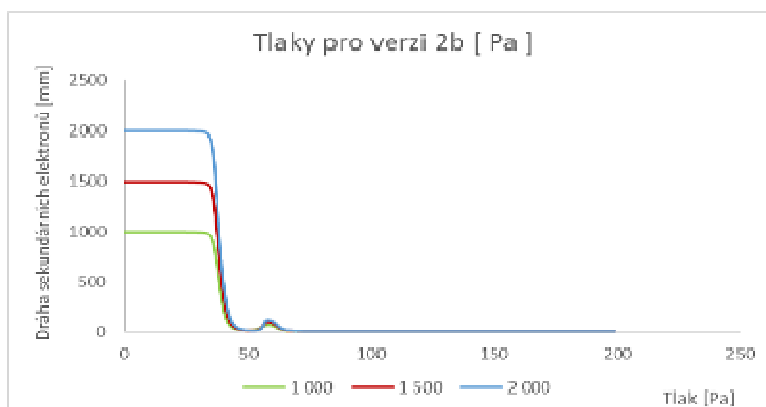
*Příloha 95: Graf tlaku pro verzi 2b 1000*



*Příloha 96: Graf tlaku pro verzi 2b 1500*



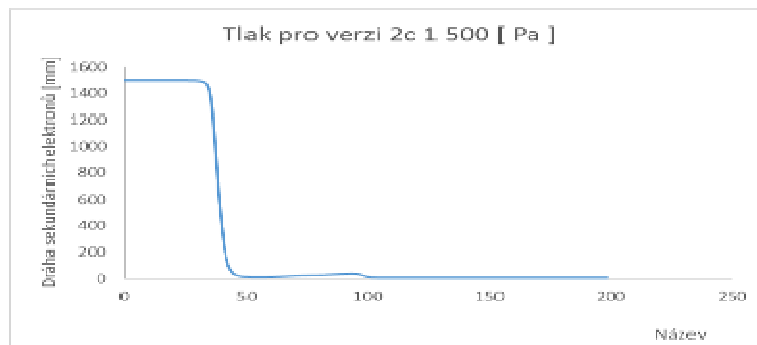
*Příloha 97: Graf tlaku pro verzi 2b 2000*



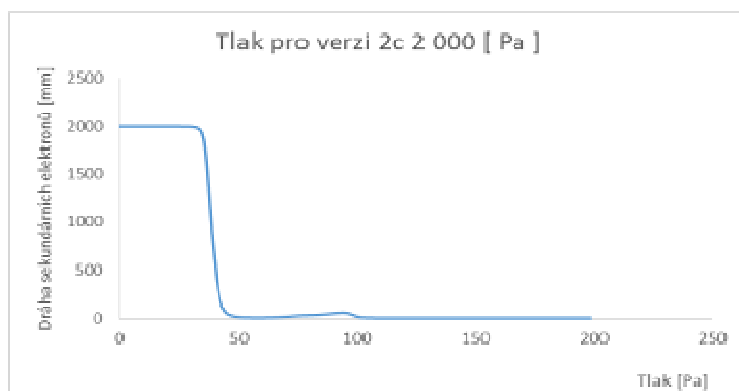
*Příloha 98: Graf tlaku pro verzi 2b*



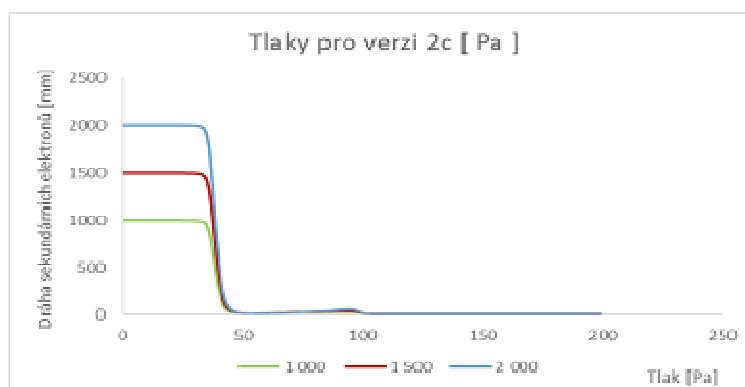
*Příloha 99: Graf tlaku pro verzi 2c 1000*



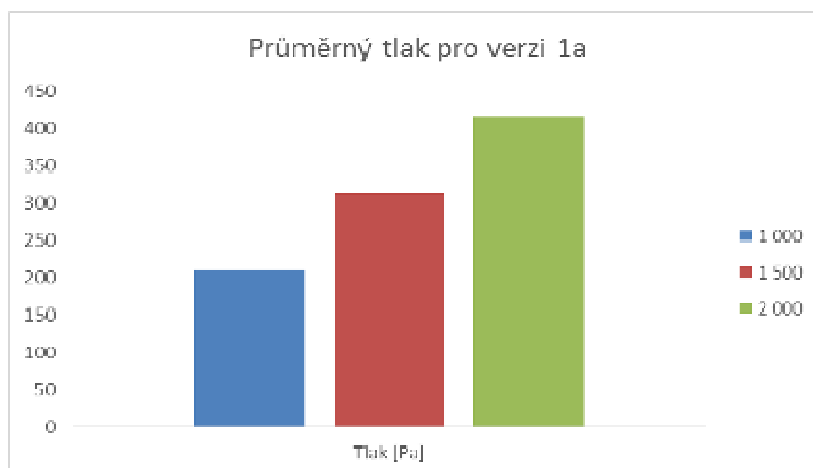
*Příloha 100: Graf tlaku pro verzi 2c 1500*



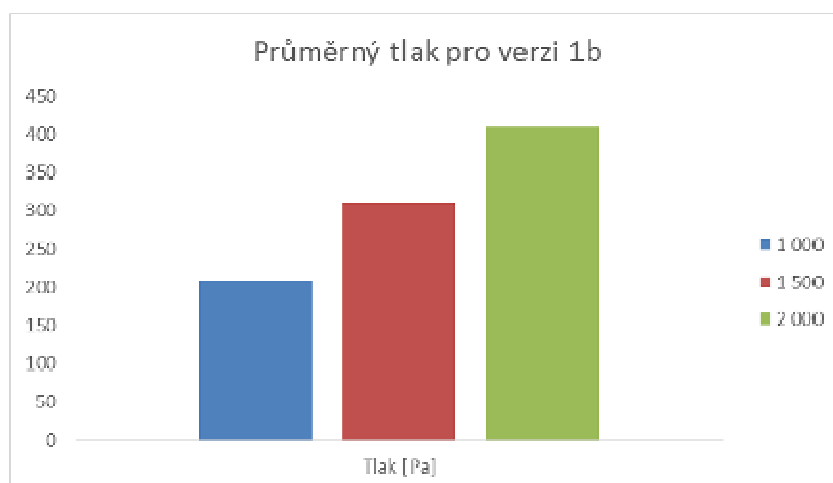
*Příloha 101: Graf tlaku pro verzi 2c 2000*



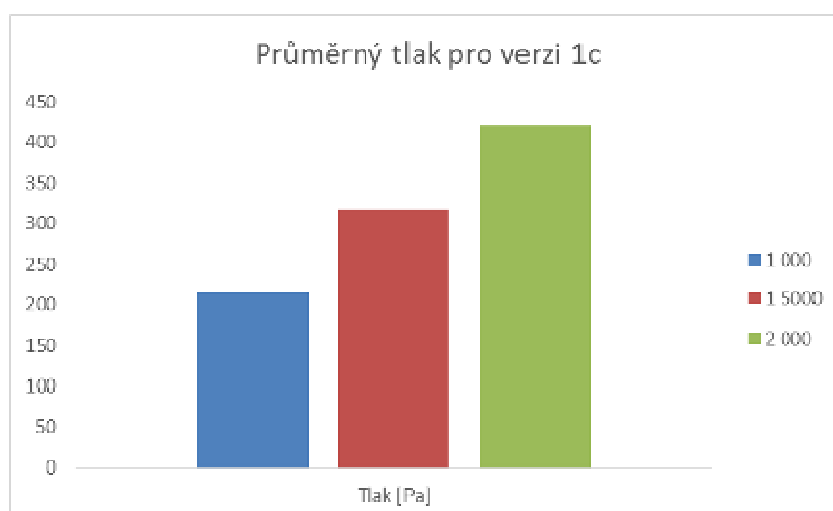
*Příloha 102: Graf tlaku pro verzi 2c*



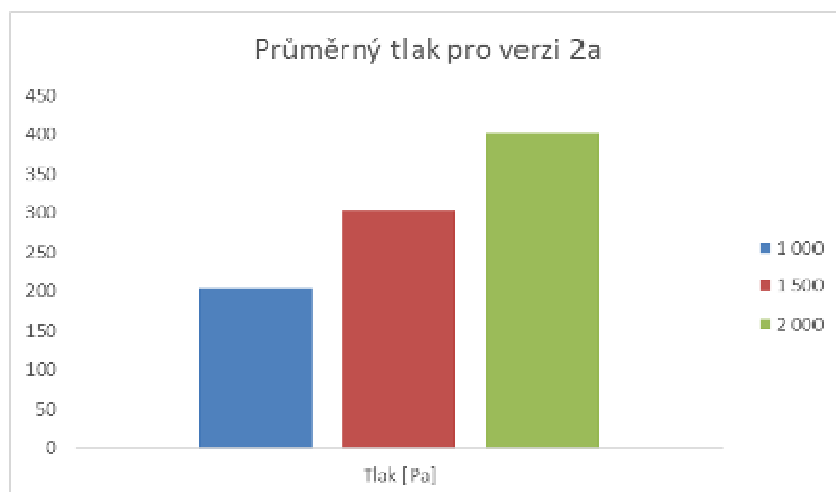
*Příloha 103: Graf průměrného tlaku pro verzi 1a*



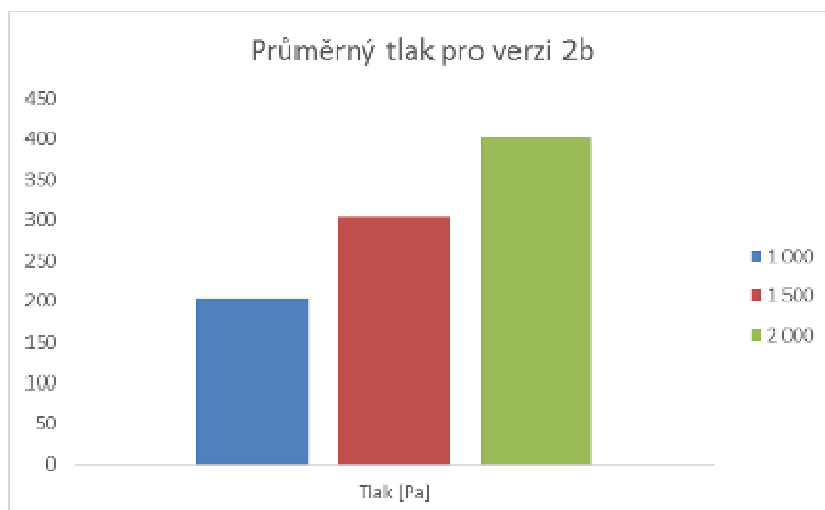
*Příloha 104: Graf průměrného tlaku pro verzi 1b*



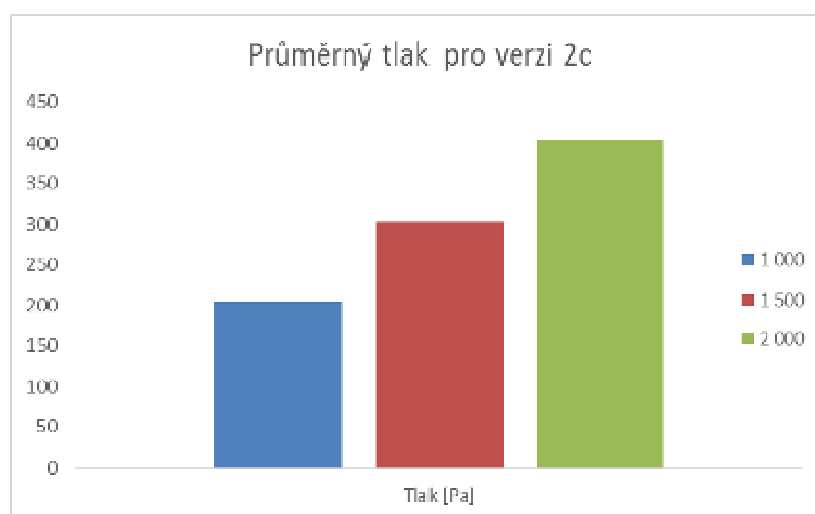
*Příloha 105: Graf průměrného tlaku pro verzi 1c*



*Příloha 106: Graf průměrného tlaku pro verzi 2a*



*Příloha 107: Graf průměrného tlaku pro verzi 2b*



*Příloha 108: Graf průměrného tlaku pro verzi 2c*