

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Dominik Sedláček

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Modelování šíření vzdušné rázové vlny v programu OpenFOAM
Diplomová práce

2024

Dominik Sedláček

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Dominik Sedláček**
Osobní číslo: **C22344**
Studijní program: **N0531A130027 Inženýrství energetických materiálů**
Téma práce: **Modelování šíření vzdušné rázové vlny v programu OpenFOAM**
Zadávající katedra: **Ústav energetických materiálů**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši na téma výpočtů šíření vzdušných rázových vln (VRV).
2. Navrhněte a optimalizujte modelový způsob výpočtu parametrů VRV při pozemním výbuchu.
3. Proveďte experimentální měření a výpočet parametrů VRV reálné trhavinové nálože.
4. Porovnejte získané numerické i experimentální výsledky mezi sebou a porovnejte je s údaji v literatuře.
5. Výše uvedené zpracujte formou diplomové práce.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Pachman, Ph.D.**
Ústav energetických materiálů
Oponent diplomové práce: **Ing. Jakub Šelešovský, Ph.D.**
Ústav energetických materiálů
Datum zadání diplomové práce: **29. února 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jiří Pachman, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Pardubicích dne 29. února 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Modelování šíření vzdušné rázové vlny v programu OpenFOAM jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze 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, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne:

Dominik Sedláček v. r.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pachmanovi Ph.D za jeho cenné rady a vedení při zpracování této diplomové práce. Současně bych také rád poděkoval rodině a přátelům, kteří mě podporovali při mém studiu a jejichž slova mi pomohly s překonáním mnohých obtíží.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá ověřením možnosti simulace vzniku a šíření vzdušných rázových vln pomocí balíku OpenFOAM/BlastFOAM. Zvolenou úlohou byla simulace výbuchu polokulové nálože umístěné na zemi. Výsledky simulace pro různé vstupní parametry byly porovnány s experimentálními hodnotami.

KLÍČOVÁ SLOVA

BlastFOAM, detonace, měření přetlaku, OpenFOAM, optimalizace simulace, vliv vstupních parametrů na numerický experiment, vzdušná rázová vlna.

TITLE

Modelling of blast wave propagation in BlastFOAM

ANNOTATION

The thesis deals with the verification of the simulation of usage possibilities of the OpenFOAM/BlastFOAM package for the formation and propagation of blast waves. The chosen task was the explosion simulation of a hemispherical charge placed on the ground. Simulation results for different input parameters were compared with experimental values.

KEYWORDS

BlastFOAM, detonation, overpressure measurement, OpenFOAM, optimization of simulation, influence of input parameters on numerical experiment, blast wave.

OBSAH

ÚVOD.....	18
1 Výbušná přeměna.....	21
1.1 Deflagrace.....	21
1.2 Detonace.....	21
1.2.1 Fireball (ohnivá koule).....	22
1.2.2 Vzdušná rázová vlna.....	24
1.2.3 Fragments.....	26
2 Vlastnosti vzdušné rázové vlny.....	27
2.1 Šíření VRV.....	28
2.2 Redukované charakteristiky.....	30
3 Modelování vzniku a šíření VRV pomocí CFD OpenFOAM BlastFOAM.....	33
3.1 Seznámení s CFD.....	33
3.2 Struktura prostředí.....	34
3.2.1 Základní výpočetní síť (<i>blockMeshDict</i>).....	36
3.2.2 Nastavení pozice a velikosti nálože (<i>setFieldsDict</i>).....	39
3.2.3 Rozdělení domény pro paralelizovaný výpočet (<i>decomposeParDict</i>).....	39
3.2.4 Způsob řešení (fvSchemes).....	39
3.2.5 Ovládání řešiče (fvSolution).....	39
3.2.6 Nastavení výpočetních kroků a funkcí (<i>controlDict</i>).....	39
3.2.7 Adaptivní zahuštění sítě AMR (<i>dynamicMeshDict</i>).....	40
3.2.8 Vlastnosti fází (<i>phaseProperties</i>).....	40
3.2.9 Charakterizace počátečního stavu (adresář <i>0</i>).....	41
4 Experimentální měření parametrů VRV.....	43
5 Numerické uspořádání.....	46
5.1 Nastavení geometrie mřížky.....	46
5.2 Nastavení velikosti a pozice nálože.....	48
5.3 Nastavení slovníku s ovládáním.....	50
5.4 Nastavení výpočetní kapacity.....	52
5.5 Nastavení způsobu řešení a řešičů.....	53

5.6 Nastavení počátečního stavu a okrajových podmínek.....	55
5.7 Nastavení vlastností fází.....	57
5.8 Adaptivní zahuštění sítě (AMR).....	58
6 Naměřené experimentální výsledky.....	64
7 Výsledky numerických experimentů.....	66
7.1 Vliv velikosti buněk sítě.....	66
7.2 Vliv výpočetního výkonu.....	69
7.3 Vliv počtu přidávaných vrstev u AMR.....	70
7.4 Vliv maximálního stupně zjemnění AMR.....	71
7.5 Vliv nastavení podmínky AMR pro zjemnění sítě.....	71
7.6 Vliv velikosti intervalu zjemnění při použití AMR.....	72
7.7 Optimalizovaná simulace.....	73
8 Porovnání výsledků experimentu a simulace.....	76
ZÁVĚR.....	82
POUŽITÁ LITERATURA.....	84
PŘÍLOHY.....	89

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1: Průběh tlaku u tlakové vlny (a) a rázové vlny (b) [1].....	21
Obrázek 2: Detonační vlna [4].....	22
Obrázek 3: Postup expanze produktů detonace demonstrující turbulentní charakter povrchu [9].....	22
Obrázek 4: Pokles dynamické složky energie při výbuchu za hranicí fireballu [3].....	23
Obrázek 5: Idealizovaný tlakový průběh vzdušné rázové vlny.....	24
Obrázek 6: Přiblížení idealizovaného tlakového průběhu ke skutečnému zobrazením sekundární VRV.....	25
Obrázek 7: Šíření rázové vlny do centra výbuchu [8].....	25
Obrázek 8: Šíření sekundární RV po odrazu v centru výbuchu [8].....	26
Obrázek 9: Popis tlakového průběhu rázové vlny.....	27
Obrázek 10: Snižování maximálního přetlaku VRV s ураženou vzdáleností [14].....	28
Obrázek 11: Šíření VRV u symetrické nálože umístěné na povrchu [3].....	29
Obrázek 12: Šíření VRV u zvednuté nálože [3].....	29
Obrázek 13: Závislost tlaku na vzdálenosti pro různé velikosti nálože (a) a na redukované vzdálenosti (b).....	31
Obrázek 14: Struktura softwaru BlastFOAM před výpočtem.....	34
Obrázek 15: Struktura úlohy po provedení výpočtu.....	35
Obrázek 16: Popis bloku.....	37
Obrázek 17: Nastavení stěn a jejich vizualizace v Paraview.....	38
Obrázek 18: Rozdělení buňky.....	40
Obrázek 19: Popis jednotek.....	41
Obrázek 20: Tužková sonda (pencil probe).....	43
Obrázek 21: Uspořádání provedeného experimentálního měření.....	45
Obrázek 22: Zařízení DAQ Sirius.....	45
Obrázek 23: Schéma geometrického tvaru domény klín.....	46
Obrázek 24: Vrstvy vzduchu přidané na nálož.....	49

Obrázek 25: Zjemnění okolí nálože (3. stupeň).....	49
Obrázek 26: Popis funkcí.....	52
Obrázek 27: VRV zjemněná pomocí AMR (vlevo) a VRV bez AMR (vpravo).....	58
Obrázek 28: nBufferLayers (4 oproti 1).....	59
Obrázek 29: maxRefinement (1 oproti 3).....	60
Obrázek 30: Porovnání nastavení nízké (vlevo) a vysoké (vpravo) hodnoty pro unrefineLevel a lowerRefineLevel.....	61
Obrázek 31: Tlakové průběhy experimentů.....	64
Obrázek 32: Vliv velikosti buněk na tlakové průběhy ze simulace.....	66
Obrázek 33: Vliv velikosti buněk (detail pro sondu ve 3 a 4 metrech).....	67
Obrázek 34: Konvergence hodnot tlaku pro sondu ve vzdálenosti 3 m.....	68
Obrázek 35: Demonstrace zvyšování doby výpočtu při zmenšování velikosti buněk statické sítě.....	68
Obrázek 36: Vliv výpočetního výkonu na délku numerického experimentu.....	70
Obrázek 37: Vliv počtu přidávaných vrstev před AMR na tlakové průběhy získané simulací....	70
Obrázek 38: Vliv maximálního stupně zjemnění na hodnoty tlaku získané simulací.....	71
Obrázek 39: Vliv nastavení podmínky zjemnění na tlakové průběhy získané simulací.....	72
Obrázek 40: Vliv velikosti intervalu zjemnění na tlakové průběhy získané simulací.....	73
Obrázek 41: Tlakové průběhy z optimalizované simulace.....	74
Obrázek 42: Tlakové průběhy z neoptimalizované simulace.....	75
Obrázek 43: Porovnání tlakových průběhů experimentů a simulace.....	76
Obrázek 44: Porovnání přetlaků simulací s UFC a daty ÚEnM.....	77
Obrázek 45: Porovnání redukovaných impulzů simulací s daty ÚEnM.....	78
Obrázek 46: Grafické porovnání přetlaku ze simulace, experimentů a empirických rovnic....	80
Obrázek 47: Grafické porovnání impulzu ze simulace, experimentů a empirických rovnic....	81
Obrázek 48: Postup instalace.....	90
Obrázek 49: Povolení WSL.....	91
Obrázek 50: Test instalace.....	93

Obrázek 51: Zobrazení simulace.....	95
Obrázek 52: Nastavení paraview pro zobrazení výukového příkladu.....	96
Obrázek 53: Test simulace.....	96
Obrázek 54: Porovnání tlakového průběhu experimentu 1 a optimalizované simulace.....	98
Obrázek 55: Porovnání tlakového průběhu experimentu 2 a optimalizované simulace.....	99

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Kalibrační konstanty tužkových senzorů.....	44
Tabulka 2: Výsledky experimentu 1.....	65
Tabulka 3: Vliv velikosti buněk ve vzdálenosti 3 a 4 metry.....	67
Tabulka 4: Vliv výpočetního výkonu.....	69
Tabulka 5: Vliv velikosti intervalu zjemnění na dobu trvání výpočtu.....	72
Tabulka 6: Výsledky přetlaků a impulzů z optimalizované simulace.....	74
Tabulka 7: Výsledky přetlaků a impulzů z neoptimalizované simulace.....	75
Tabulka 8: Vyhodnocení impulzu.....	78
Tabulka 9: Porovnání přetlaku ze simulace, experimentů a empirických rovnic.....	80
Tabulka 10: Porovnání impulzu ze simulace, experimentů a empirických rovnic.....	81

SEZNAM PŘÍKAZŮ

Příkaz 1: Zahájení stahování.....	91
Příkaz 2: Instalace OpenFOAM 9.....	92
Příkaz 3: Kontrola aktualizací.....	92
Příkaz 4: Přidání cesty.....	92
Příkaz 5: Nastavení prostředí OF.....	92
Příkaz 6: Vytvoření složky OpenFOAM.....	93
Příkaz 7: Otevření adresáře a stažení kopie BF.....	93
Příkaz 8: Propojení příkazem echo.....	94
Příkaz 9: Načtení a nastavení linuxového terminálu.....	94
Příkaz 10: Dokončení instalace BF.....	94
Příkaz 11: Nastavení zobrazení pro Xming.....	94
Příkaz 12: Příkazy pro otevření úlohy.....	95
Příkaz 13: Otevření Windows složky BF v terminálu.....	97

SEZNAM PŘÍKLADŮ ÚPRAV A ZADÁNÍ DO SLOVNÍKŮ

Příklad 1: Zadávání vrcholů.....	36
Příklad 2: Zadávání bloků.....	37
Příklad 3: Slovník blockMeshDict pro optimalizovanou simulaci.....	47
Příklad 4: Slovník setFieldsDict pro optimalizovanou simulaci.....	48
Příklad 5: Umístění výbušniny do geometrie.....	50
Příklad 6: Slovník controlDict pro optimalizovanou simulaci.....	50
Příklad 7: Vliv výpočetního výkonu (nastavení AMR).....	53
Příklad 8: Slovník decomposeParDict pro optimalizovanou simulaci.....	53
Příklad 9: Slovníky fvSchemes a fcSolution pro optimalizovanou simulaci.....	54
Příklad 10: Adresář 0 pro optimalizovanou simulaci.....	55
Příklad 11: Slovník phaseProperties pro optimalizovanou simulaci.....	57
Příklad 12: Slovník dynamicMeshDict pro optimalizovanou simulaci.....	61

SEZNAM ZNAČEK

Z_a	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	Akustická impedance prostředí
k_B	-	Balistický koeficient
t	s	Čas
D	$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	Detonační rychlost
t_a	s	Doba příchodu RV (time of arrival)
t_{p-}	s	Doba trvání negativní (podtlakové) fáze
t_d	s	Doba trvání pozitivní fáze
W	kg	Hmotnost ekvivalentní nálože TNT
W_N	kg	Hmotnost skutečné nálože
ρ_0	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Hustota prostředí
i_{p-}	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	Impulz negativní fáze VRV
i_p	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	Impulz pozitivní fáze VRV
k_G	-	Koeficient geometrie
k_{od}	-	Koeficient odrazu
k_E	-	Koeficient těsnění
Δp_{max}	Pa	Maximum přetlaku
C	m	Maximální velikost (poloměr) fireballu
p_{min}	Pa	Nejnižší dosažený tlak
p_{max}	Pa	Nejvyšší dosažený tlak
t_0	s	Počáteční čas
γ	-	Poměr specifických tepel prostředí (pro vzduch 1,4)
Δp	Pa	Přetlak
Δp_+	Pa	Přetlak v čele RV
$p_0 (p_{atm})$	Pa	Původní tlak (tlak atmosférický)
Z_R	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	Rázová impedance prostředí
τ_d	$\text{s}\cdot\text{kg}^{-1/3}$	Redukovaná doba příchodu

Z	$\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$	Redukovaná vzdálenost
i_s	$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1/3}$	Redukovaný impulz
u	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost částic
U	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost rázové vlny
U_b	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost RV v hornině
c_0	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost zvuku ve vzduchu ($343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
c_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Tepelná kapacita (při konst. Tlaku)
p	Pa	Tlak (přetlak)
p_r	Pa	Tlak odražené vlny
k_{TNT}	-	Tritolový ekvivalent
α	°	Úhel dopadu RV
e	J	Vnitřní energie
R	m	Vzdálenost

SEZNAM ZKRATEK

AMR	Adaptive mesh refinement
BF	BlastFoam
DAQ	Data acquisition system (zařzení ke sběru a vyhodnocení dat)
LTS	Long Term Support
MV	Machova vlna
OF	OpenFoam
OS	Operační systém
RV (VRV)	Rázová vlna (vzdušná rázová vlna)
EOS	Stavová rovnice (equation of state)
TNT	2,4,6-Trinitrotoluen
WSL	Windows Subsystem for Linux
ZTO	Zákon třetí odmocniny

SEZNAM PŘÍKAZŮ POUŽÍVANÝCH V TERMINÁLU LINUX

klávesa „tab“	Dokončení názvu adresáře podle začátku jména
cd <název>	Change directory (přesunout se do adresáře <název>)
ctrl+z	Pozastavení probíhajícího procesu
ctrl+s	Pozastavení výstupu terminálu
chmod +x All*	Přidělení oprávnění ke spuštění scriptu Allrun a Allclean
paraview	Spustí program Paraview pro zobrazení simulace
./Allclean	Spustí script Allclean (vymazání proběhlého výpočtu, vyčištění případu)
./Allrun	Spustí script Allrun (spuštění výpočtu)
gnuplot	Spustí program Gnuplot (zobrazení dat)
ctrl+c	Stisknutím této kombinace k okně terminálu dojde k ukončení probíhajícího procesu (výpočtu)
tail log.blastFoam	Vypíše posledních 10 řádků ze souboru logu
ll	Zobrazení obsahu aktuálně otevřeného adresáře včetně informací uživatele, času a data vytvoření
tail -f log.blastFoam	Zobrazení záznamu (logu) právě probíhajícího výpočtu softwaru BF
ls	Zobrazí názvy souborů uvnitř právě otevřeného adresáře
ctrl+q	Zrušení pozastavení výstupu terminálu

ÚVOD

Předložená diplomová práce se zabývá ověřením možnosti využití výpočetního softwaru OpenFOAM/BlastFOAM pro stanovení parametrů vzdušných rázových vln způsobených detonací trhavinové nálože. Program OpenFOAM/BlastFOAM byl zvolen z toho důvodu, že jde o volně dostupný programový balík s otevřeným zdrojovým kódem.

V teoretické části je v rámci první kapitoly představena detonace a její projevy. Následná druhá kapitola se věnuje vlastnostem vzdušných rázových vln (VRV). Ve třetí kapitole, která je poslední v teoretické části je představena výpočetní dynamika tekutin (CFD) a výpočetní program použitý v této diplomové práci, kterým je OpenFOAM/BlastFOAM. Je zde věnována pozornost struktuře programu a vstupům do programu z pohledu uživatele.

Experimentální část se věnuje provedeným experimentálním měřením a numerickým experimentům. Ve čtvrté kapitole jsou popsány tužkové sondy a technika, která je použita pro experimentální měření přetlaku VRV vzniklých detonací půlkilové polokulové nálože umístěné na zemi. Sondy jsou umístěny ve vzdálenosti 3-9 metrů s rozestupem 1 m. K měření je pro nedostatek vstupů osciloskopu využito také zařízení Sirius od společnosti Dewesoft, které je mnohoúčelovým zařízením pro sběr a zpracování dat (DAQ). V rámci numerických experimentů, kterým se věnuje pátá kapitola, jsou zjišťovány vlivy vstupních parametrů a prováděna jejich optimalizace. Jsou měněny velikosti buněk a počet použitých procesorových jader a pozorován vliv na přetlak ve vzdálenostech 3-9 m a na délku numerického experimentu. Následně je povoleno adaptivní zahuštění sítě a měněny jeho vstupní parametry, mezi které patří velikost zjemnění, počet přidaných vrstev před zjemnění, podmínka zjemnění nebo jak často ke zjemnění dochází. Pro numerické experimenty je s ohledem na dostupnou výpočetní techniku zvoleno uspořádání wedge (klín), které je v zásadě 2D simulací, pro kterou je aplikováno nastavení řešeného výukového případu axisymetrické nálože.

Třetí část se pak věnuje vyhodnocení experimentálního měření a numerických experimentů. V šesté kapitole jsou vyhodnoceny přetlaky a pozitivní impulsy získané experimentálním měřením parametrů VRV pro vzdálenosti 3-9 m. Následující sedmá kapitola je věnována

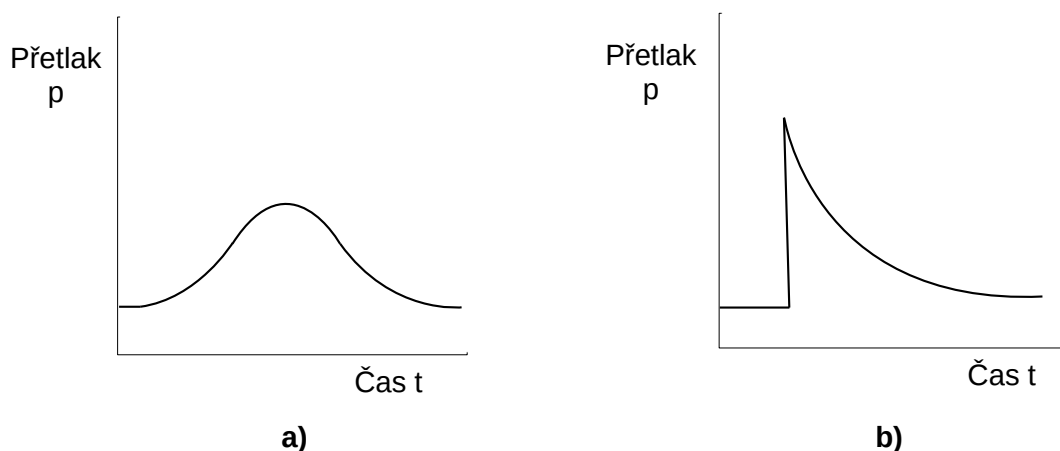
vlivům jednotlivých vstupních parametrů, které jsou v rámci optimalizace výchozího nastavení řešeného případu axisymetrické nálože měněny. Obsahuje také nastavení parametrů jednotlivých slovníků, které je použito pro optimalizovanou simulaci a které vychází z poznatků o vlivu jednotlivých parametrů. V závěrečné osmé kapitole je provedeno porovnání hodnot přetlaků a impulzů, získaných optimalizovaným numerickým experimentem, s hodnotami z experimentálního měření. Dále je zde provedeno porovnání výsledků optimalizované a neoptimalizované simulace s daty ÚEnM a v případě přetlaků i s daty UFC. V závěru této kapitoly je také provedeno porovnání hodnot přetlaků a pozitivních impulzů z experimentálního měření a numerického experimentu s hodnotami získanými použitím empirických vztahů.

Cílem práce je z pohledu uživatele ověřit možnosti použití balíku OpenFOAM/BlastFOAM pro výpočet parametrů vzdušných rázových vln, optimalizovat vstupní parametry založené na řešeném výukovém případě axisymetrické nálože a porovnání výsledků simulace s experimentálními daty.

Část I
Teoretická část

1 Výbušná přeměna

Výbuch je náhlé a rychlé uvolnění energie fyzikálního nebo chemického charakteru spojeného s vývojem tepla, světla, tlaku či zvuku. Ačkoli lze výbuchy dělit na výbuchy jaderné, fyzikální a chemické, v rámci této práce bude probírán pouze projev chemického výbuchu spojeným se vznikem a šířením vzdušné rázové vlny. Ta se svým průběhem liší od vln tlakových, jak je demonstrováno na schematickém obrázku 1. [1, 2]



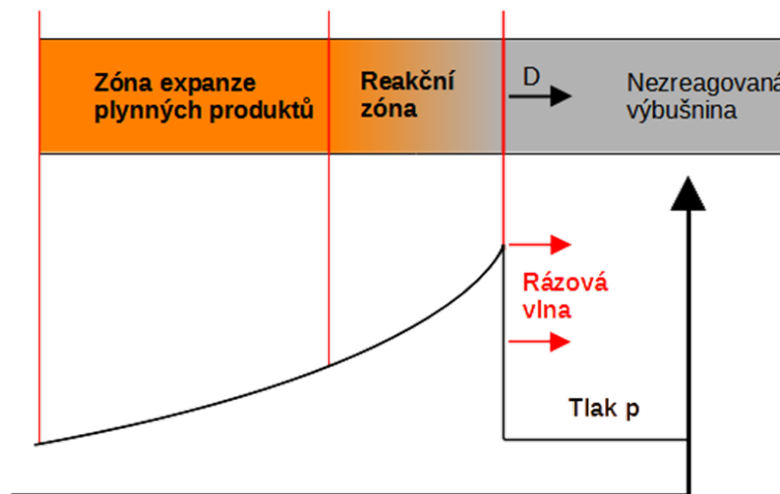
Obrázek 1: Průběh tlaku u tlakové vlny (a) a rázové vlny (b) [1]

1.1 Deflagrace

Deflagrace, nebo také výbušné (explozivní) hoření [1, 2] je výbušná přeměna založená na chemické přeměně výchozího materiálu na produkty, při které se reakční zóna šíří podzvukovou rychlostí ($< 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a může dosahovat přetlaku desítek až stovek MPa [1] (řádově až 1000 MPa dle [3]). Deflagrace ač spojitý jev, může ve svém okolí vygenerovat rázovou vlnu. [1–3]

1.2 Detonace

Detonace je typ výbušné přeměny, při které vstupuje rázová vlna do nezreagované výbušniny a způsobí iniciaci chemických reakcí. Rázová vlna je vyvolána nadzvukovým pohybem reakční zóny s rychlostí D ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), předcházející zóně expanze plynných produktů. Komplex sestávající z rázové vlny podporovaný chemickou reakcí (naznačeno na obrázku 2) je označován jako „detonační vlna“. [1, 2, 4, 5]

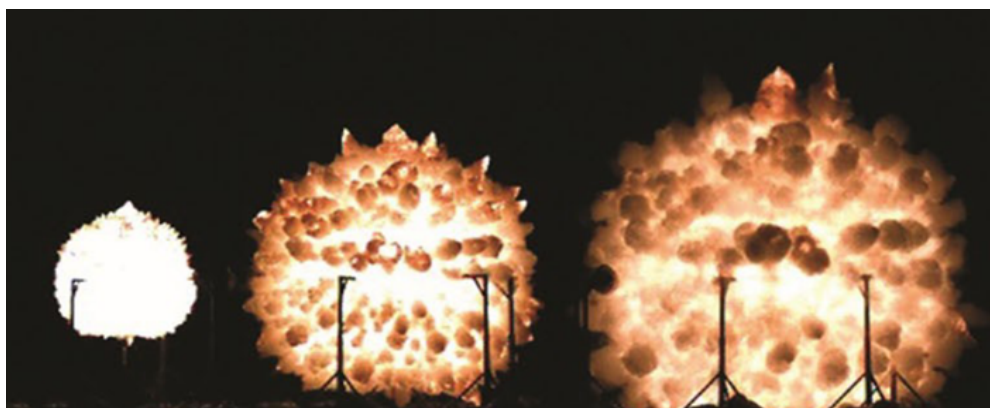


Obrázek 2: Detonační vlna [4]

Detonace se ve svém okolí vlivem vysoké teploty a tlaku projevuje vznikem fireballu a vzdušné rázové vlny (VRV). V případě, že je nálož v obalu, jsou působením výbuchu urychleny části materiálu do okolí. Mechanismy působení výbuchu se liší v závislosti na vzdálenosti náložky na výbuch v kontaktu, blízký výbuch a vzdálený výbuch. [6, 7]

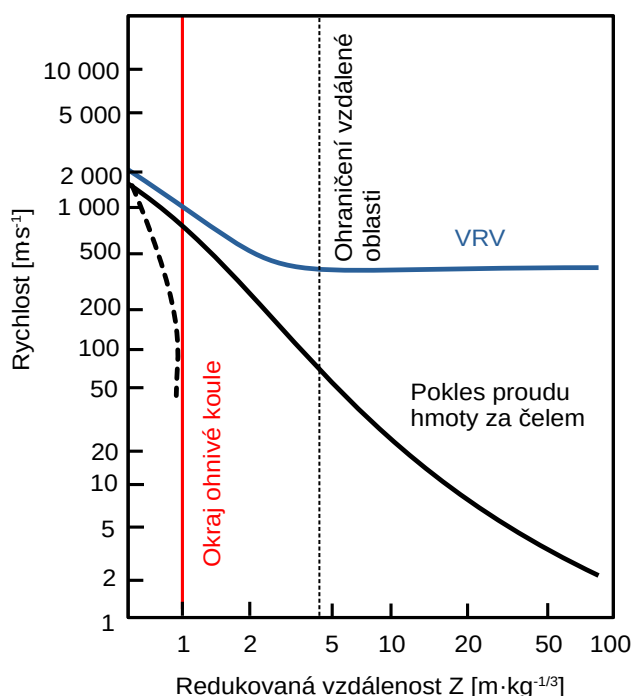
1.2.1 Fireball (ohnivá koule)

Detonací výbušniny vzniká velké množství plynným produktů o vysokém tlaku, zahřátých na vysokou teplotu. Tyto zplodiny následně expandují na zhruba 4000násobek [8] původního objemu náložky. Těmto expandujícím, horkým zplodinám výbuchu se říká fireball (ohnivá koule; viz obrázek 3). [8, 9]



Obrázek 3: Postup expanze produktů detonace demonstrující turbulentní charakter povrchu [9]

Vzhledem k velmi rychlé změně výbušniny z kondenzovaného stavu do plynných produktů je počátek fireballu spjat s velmi vysokými tlaky a teplotami (v řádu tisíců K a až desítek GPa [7, 8]) a rychlostí expanze dosahující rychlosti tisíců $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, která vyvolá vznik RV v přiléhajícím prostředí [8]. Rychlost expanze produktů, která dosahovala stejné rychlosti jako vzdušná rázová vlna, je však postupně utlumována vzduchem, až dojde k jejímu úplnému zastavení, což způsobí následné rychlé snižování dynamického přetlaku za hranicí fireballu, a úplnému oddělení vzdušné rázové vlny (VRV), jak je vidět na obrázku 4. [3, 6–8, 10]



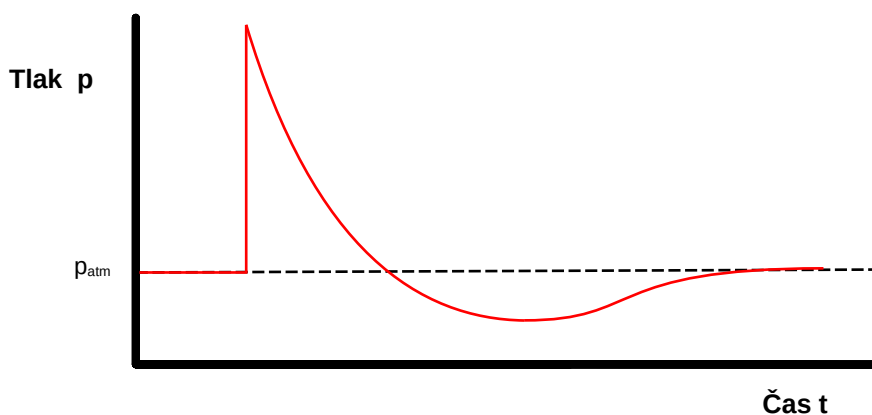
Obrázek 4: Pokles dynamické složky energie při výbuchu za hranicí fireballu [3]

Detonační produkty po expanzi však nemají tvar hladké koule, ale jeho povrch je zvrásněn účinkem intenzivních turbulencí, jak je vidět na obrázku 3. Navíc při expanzi detonačních produktů výbušniny se zápornou kyslíkovou bilancí, tedy takové, která nemá dostatečné množství kyslíku k úplné oxidaci spalitelných složek, dochází po promíchání se vzduchem k dohoření. Energie uvolněná tímto dohořením se již neprojevuje v parametrech primární VRV. [8, 9, 11]

Zajímavostí je, že v počáteční fázi není světelná emise výbuchu způsobena chemickou reakcí, ale jako důsledkem adiabatického rázového stlačení vzduchové vrstvy kolem výbušniny, která je tímto stlačením zahřáta řádově na teplotu 8000 K [8].

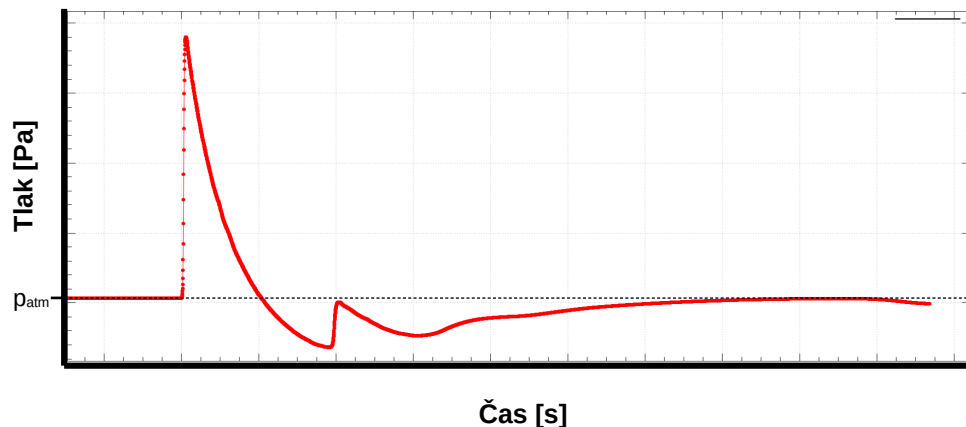
1.2.2 Vzdušná rázová vlna

Zatímco blízké okolí nálože je intenzivně ovlivněno teplotou rozpínajícího fireballu, ve větších vzdálenostech od nálože převažuje působení tlakové, prostřednictvím vzdušné rázové vlny (VRV). To je rázová vlna s charakteristickým nespojitým průběhem tlaku v čele tzv. diskontinuitou, která se šíří vzduchem. Příklad idealizovaného tlakového průběhu takové vlny zobrazuje obrázek 5. [1, 6, 12]



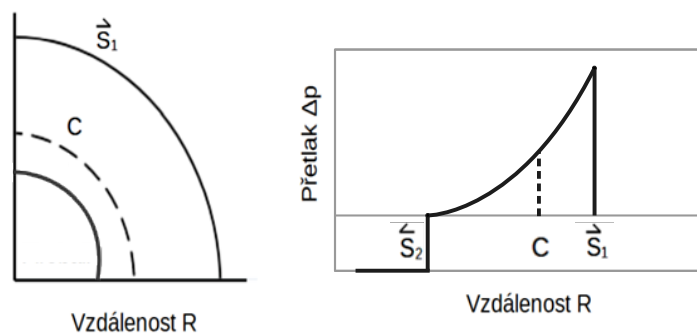
Obrázek 5: Idealizovaný tlakový průběh vzdušné rázové vlny

V případě polokulových náloží na zemi, což je geometrie, kterou se zabývá tato práce, však vzdušná rázová vlna nenabývá idealizovaného tvaru průběhu (obrázek 5) ale obsahuje v podtlakové části druhou tzv. sekundární rázovou vlnu, která je znázorněna na obrázku 6.



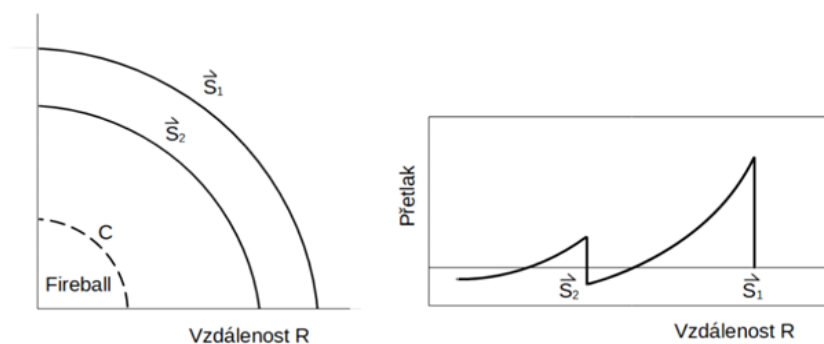
Obrázek 6: Přiblížení idealizovaného tlakového průběhu ke skutečnému zobrazením sekundární VRV

Popis vzniku této vlny je možno objasnit v několika krocích, které jsou schematicky popsány pomocí obrázků 7 a 8. Při výbuchu dochází k šíření rázové vlny směrem od nálože (S_1), po dosažení maximální velikosti fireballu (C) dojde uvnitř fireballu k poklesu tlaku a šíření rázové vlny (S_2) do tohoto podtlaku směrem do centra výbuchu. [8]



Obrázek 7: Šíření rázové vlny do centra výbuchu [8]

V centru dojde ke sražení těchto rázových vln a vytvoření sekundární rázové vlny (S_2) s nižšími parametry, která bude následovat po vlně primární (obrázek 8) [8]. Ke sloučení primární a sekundární vlny však nedojde, protože jsou obě vlny odděleny podtlakovou fází. [8]



Obrázek 8: Šíření sekundární RV po odrazu v centru výbuchu [8]

1.2.3 Fragментy

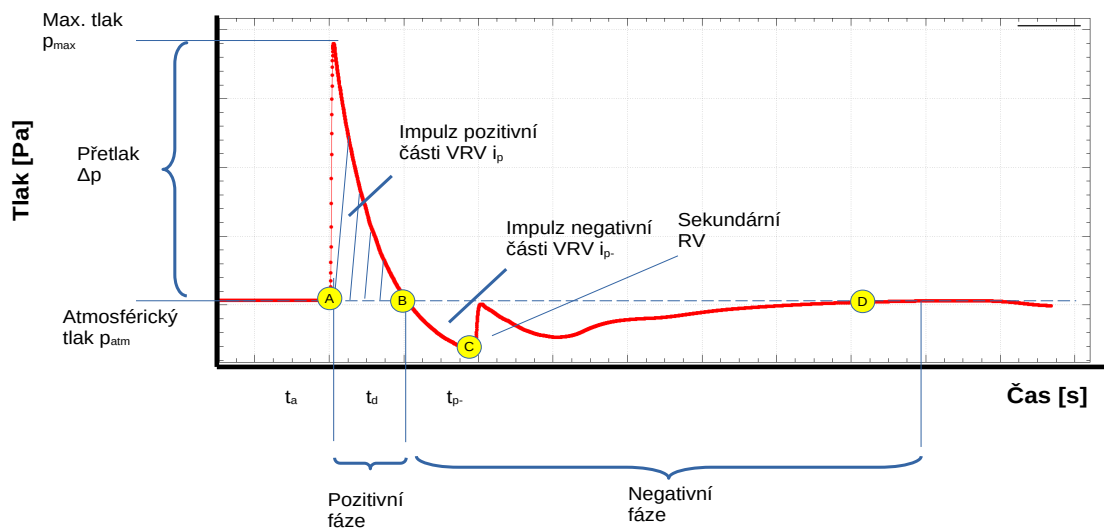
V případě, že je nálož umístěna v obalu, způsobuje expanze zplodin roztrhání obalu a vzniku fragmentů. Tyto fragmenty jsou urychleny na vysokou rychlost spojeným působením detonační vlny a expandujících produktů. Parametry fragmentů, jejich velikost, rychlost a energie, jsou důležité z nejen hlediska vojenských aplikací, ale i v dalších oblastech, například při charakterizaci výbušnin nebo stanovení bezpečnostní vzdálenosti průmyslových výrob. [6]

Předkládaná diplomová práce se však problematice fragmentů a fireballu nevěnuje a soustředí se výhradně na vznik a šíření primární VRV. Tlakové průběhy simulací však zachycují i sekundární VRV nacházející se v negativní fázi, jejíž parametry nelze vypočítat použitím empirických vztahů.

2 Vlastnosti vzdušné rázové vlny

Výbuchem vzniká rázová vlna šířící se vzduchem označovaná v anglické literatuře pojmem „blast wave“, čeština však neobsahuje ekvivalentna k tomuto pojmu a proto se využívá termínu vzdušná rázová vlna (VRV). Jak je vidět na obrázku 9, její tlakový průběh je popsán řadou parametrů, mezi které patří:

- p_0 – atmosférický (resp. původní) tlak, někdy značen jako p_{atm} (Pa)
- p_{max} – maximální tlak (Pa)
- p_{min} – maximální podtlak (Pa)
- Δp – přetlak (Pa)
- i_p – impulz pozitivní fáze VRV ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- i_{p-} – impulz negativní fáze VRV ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- t_a – čas příchodu rázové vlny („Time of arrival“) (s)
- t_d – doba trvání pozitivní tlakové fáze (s)
- t_{p-} – doba trvání negativní (podtlakové) fáze (s)

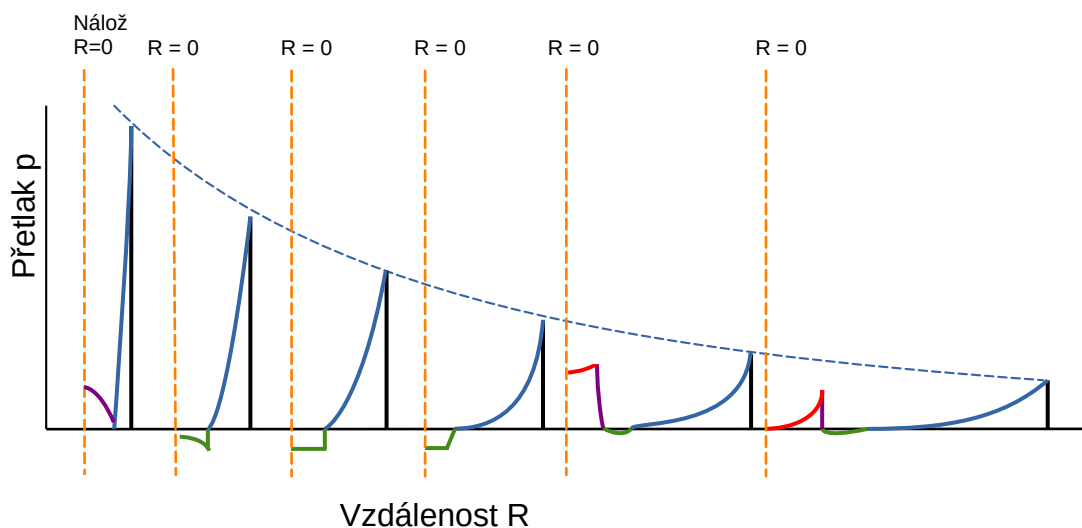


Obrázek 9: Popis tlakového průběhu rázové vlny

Rázová vlna přichází k senzoru v čase A, doba za kterou k němu dorazí se nazývá doba příchodu (t_a). Následně dochází k tlakové diskontinuitě a tlak skokově naroste do maximální hodnoty p_{max} . Odečtením atmosférického tlaku od této hodnoty je získán přetlak (Δp). Ihned po dosažení maximální hodnoty dochází ke snižování tlaku až do času znázorněného bodem B. Doba mezi body A a B ohraničuje pozitivní fázi VRV. Hodnota tlaku za bodem B klesá pod úroveň atmosférického tlaku na který se navrácí v bodě D. Časový interval ohraničený body B a D se nazývá negativní fáze VRV. Její vyhodnocení v rámci nejvyššího podtlaku a impulsu komplikuje výskyt sekundární rázové vlny (bod C).

2.1 Šíření VRV

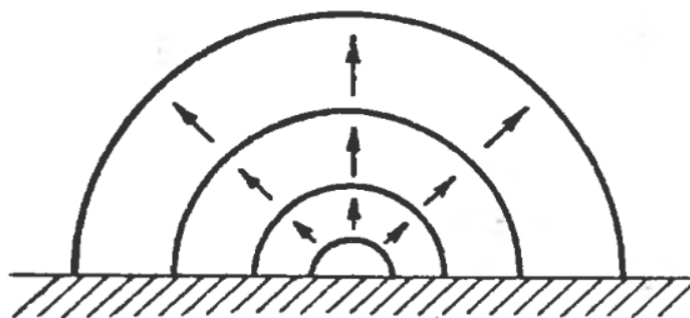
Hodnoty parametrů VRV se s jejím šířením od nálože postupně mění. Maximální tlak a rychlost se snižují a doba trvání pozitivní i negativní fáze se prodlužuje (viz obrázek 10). Na obrázku je znázorněno, že zůstává zachován diskontinuální průběh vlny. Pokles rychlosti souvisí s poklesem tlaku. V dostatečné vzdálenosti od nálože je natolik snížena, že rázová vlna přechází na vlnu akustickou.[6, 13, 14]



Obrázek 10: Snižování maximálního přetlaku VRV s uraženou vzdáleností [14]

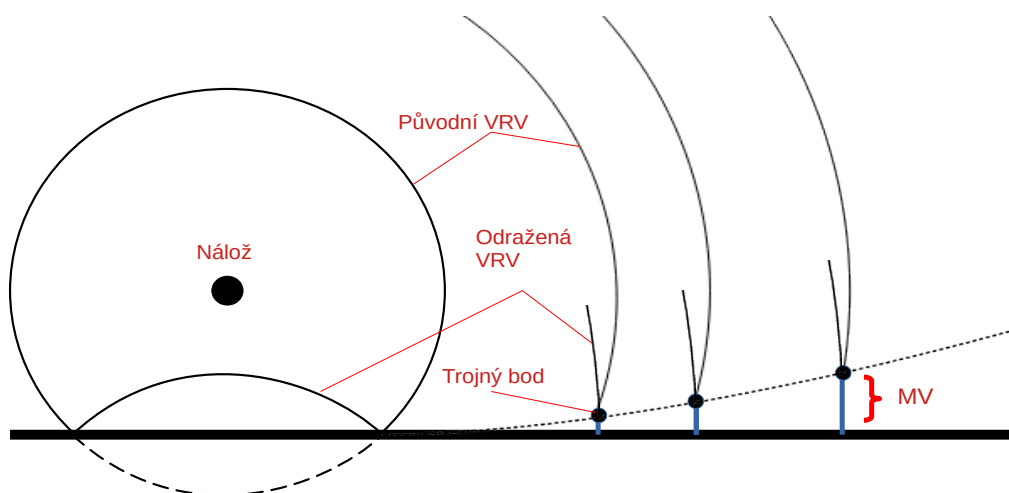
Pro šíření VRV je také důležitá pozice nálože. Ta může být umístěna v neohraničeném prostoru, kdy se VRV šíří od nálože od

Pro případ, že je symetrická nálož umístěna na zemi, dochází k šíření formou vln s polokulovým čelem, jak je vidět na obrázku 11. [3]



Obrázek 11: Šíření VRV u symetrické nálože umístěné na povrchu [3]

Posunutím nálože i o relativně malou vzdálenost nad povrch se však situace výrazně zkomplikuje. Rázová vlna se v takovém případě odrazí od země a skládá s původní vlnou, čímž vznikne Machova vlna (MV). Ta je ohraničena povrchem a trojným bodem, u kterého dochází s postupem VRV k posunu (viz obrázek 12). [3, 12]



Obrázek 12: Šíření VRV u zvednuté nálože [3]

Posledním případem je výbuch nálože ve volném prostoru, kdy dochází k šíření vln v kuloplochách od nálože, jak je částečně naznačeno na obrázku 12 (před odrazem od povrchu země). [3, 6]

2.2 Redukované charakteristiky

Parametry popisující šířící se VRV vzniklé detonací různých náloží je možné porovnávat. Touto problematikou se zabývá zákon třetí odmocniny (ZTO), který uvádí, že 2 nálože stejného složení se stejným tvarem a které zároveň detonují ve shodném prostředí způsobí vznik 2 podobných rázových vln mající shodné parametry ve stejné redukované vzdálenosti. [2, 6]

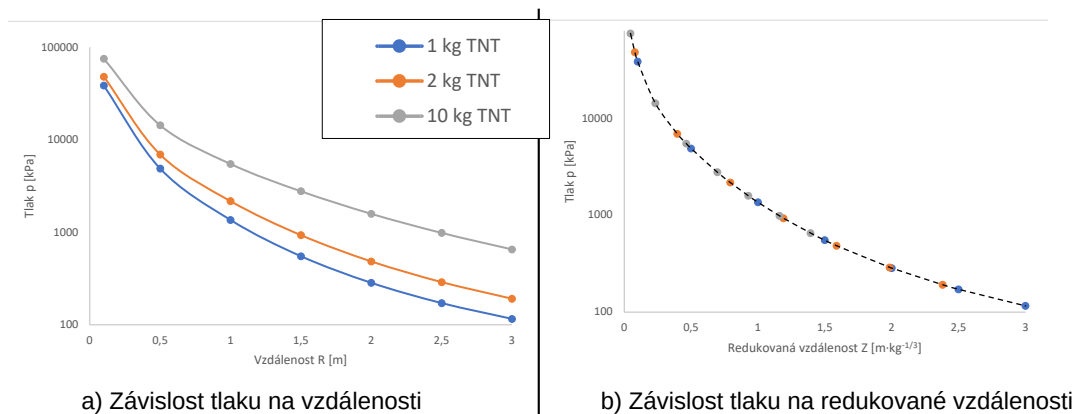
Základem pro proces redukování veličin, kterým jsou veličiny zbaveny závislosti na konkrétním experimentálním uspořádání (konkrétní náloži), je zákon třetí odmocniny (ZTO) resp. zákonu modelové podobnosti výbuchů [2].

Redukovaná vzdálenost Z ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$), označována také jako tzv. „scale parametr“, je veličinou vypočítávanou dle rovnice 1.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

Kde R je vzdálenost [m] a W [kg] je hmotnost ekvivalentní nálože TNT.

Využitím redukované vzdálenosti je možné porovnávat účinky různě velkých náloží (viz obrázek 13.), protože po redukcii je dosaženo stejné hodnoty parametru „vzdálenosti“ pro malou nálož umístěnou blízko měřící sondy, jako pro velkou nálož umístěnou dále. Dle ZTO pak 2 vlny mající shodnou „vzdálenost“ musí mít i stejný tlak v čele.



Obrázek 13: Závislost tlaku na vzdálenosti pro různé velikosti nálože (a) a na redukované vzdálenosti (b)

Redukovanou vzdálenost lze využít v rámci empirických rovnic na výpočet ostatních parametrů VRV (např. výpočet přetlaku v čele RV dle Makovičky [15] v MPa pro rozsah $1 < Z \leq 15$, rovnice 2). [6, 15]

$$\Delta p_+ = \frac{0,0932}{Z} + \frac{0,383}{Z^2} + \frac{1,275}{Z^3} \quad (2)$$

Mimo přetlaku v čele VRV je možné redukovanou vzdálenost uplatnit i pro výpočty dalších parametrů, jako je impulz i_p nebo redukovaná doba příchodu τ_d (viz rovnice 3 [6]). Případně lze vypočítat redukovaný impulz (rovnice 4) aplikováním rovnice 1 pro tlakový impulz (rovnice 3) namísto vzdálenosti R . [6]

Pro $Z \in \langle 2; 20 \rangle$, [Pa·s]

$$i_p = 300 \cdot W^{1/3} \cdot Z^{-1} \quad (3)$$

Pro $Z \in \langle 2; 20 \rangle$, [Pa·s·kg^{-1/3}]

$$i_s = 300 \cdot Z^{-1} \quad (4)$$

Využitím tritolového ekvivalentu k_{TNT} , který slouží jako spojení mezi jakoukoli výbušninou a náloží TNT (rovnice 5) je následně umožněno porovnání veličin i mezi náložemi rozdílného chemického složení.

$$W = W_N \cdot k_{TNT} \cdot k_E \cdot k_G \quad (6)$$

Hmotnost nálože TNT [kg] je vypočítána využitím tritolového ekvivalentu k_{TNT} , hmotnosti skutečné nálože W_N [kg], koeficientu těsnění k_E (počítán dle rovnice 7) a koeficientu geometrie k_G (pro pozemní výbuch 1 kvůli odrazu RV od země [13]). Některé zdroje [2, 15] však uvádí dvojnásobné hodnoty pro koeficient geometrie (2 pro pozemní výbuch a 1 pro výbuch ve vzduchu tzv free air). [2, 6, 13, 15]

$$k_E = 0,2 + \left(\frac{0,8}{1 + k_B} \right) \quad (7)$$

Kde k_B je balistický koeficient (poměr hmotnosti obalu ku hmotnosti trhaviny). Pro zjednodušení se často zanedbává což vyústuje ke zjednodušení počítající s koeficientem těsnění rovným 1. [6]

3 Modelování vzniku a šíření VRV pomocí CFD

OpenFOAM | BlastFOAM

BlastFOAM (BF) je výpočetní program určený pro řešení vícesložkového stlačitelného proudění tekutin, s aplikacemi v oblasti výpočtu detonace výbušnin, protivýbuchové bezpečnosti a výpočtů výbuchů ve vzduchu. Jeho vývoj je spojen se společností Synthetik Applied Technologies. BlastFOAM využívá metody konečných objemů a jeho výhodou je dostupnost jako open-source software, což znamená, že je transparentní a umožňuje uživatelům provádět úpravy podle svých potřeb. [16]

Jeho hlavním nedostatkem je však příliš omezená dokumentace. Existuje jen několik výukových videí a uživatelský manuál. V tomto ohledu je využito skutečnosti, že BlastFOAM je založen na knihovně softwaru OpenFOAM [16], což umožňuje použití obsáhlých manuálů a diskuzních fór vytvořených pro OpenFOAM, jako jediných dalších dostupných zdrojů informací pro zpracování této diplomové práce.

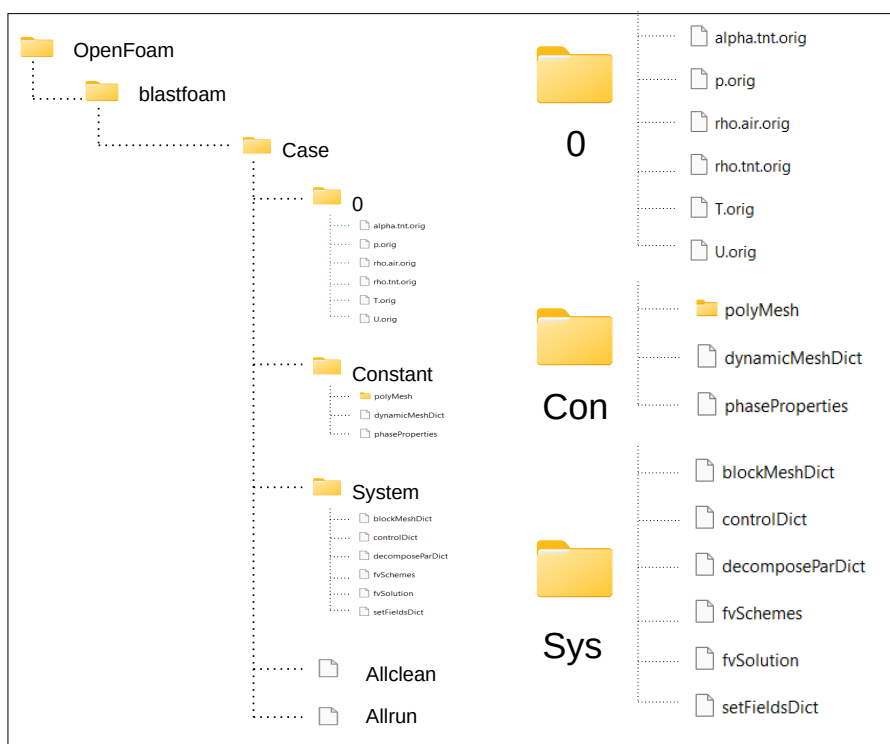
Pro výpočty byla použita oficiální stabilní verze BF 6.0, která byla spuštěna pod systémem Ubuntu nainstalovaném v systému Windows 11 pomocí WSL.

3.1 Seznámení s CFD

CFD neboli computational fluid dynamics, jehož součástí je OpenFOAM a BlastFOAM (řešič pro OpenFOAM), je inženýrský nástroj sloužící k simulování reálného problému, vztahujícímu se k dynamice tekutin. Jeho počátek sahá do roku 1922, kdy byl vyvinut Lewises Fry Richardsonem první numerický model pro předpověď počasí. S postupující dobou a rozvojem výpočetní techniky nabízí CFD účinný nástroj inženýrů k řešení parciálních diferenciálních rovnic (transportních rovnic) popisujících reálné problémy a získat tak aproximace skutečnosti. CFD je často využíván v situacích, kdy je reálné ověření měřením problematické nebo náročné, ať již z ohledu času či financí. Pro efektivní využití je však nutné ověřit numerický experiment provedením měření, jinak se může stát, že výsledná simulace nebude odpovídat reálnému chování systému. Pro řešení rovnic využívá nejčastěji metodou konečných objemů, u které je doména rozdělena na konečný počet malých objemů (sít') ve kterých jsou proměnné nahrazovány průměrnými hodnotami pro daný objem. [17, 18]

3.2 Struktura prostředí

Celá výpočetní úloha je definována a specifikována ve vlastním adresáři úlohy (tzv. *Case*). Tento adresář obsahuje podadresáře s textovými soubory (tzv. slovníky), které určují počáteční podmínky (*0*), materiálové vlastnosti (*constant*) a nastavení parametrů výpočtu (*system*). Mimo tyto podadresáře obsahuje adresář úlohy pomocné skripty Allrun a Allclean. První usnadňuje spouštění jednotlivých kroků výpočtu, zatímco druhý slouží ke smazání výpočtu před jeho opětovným spuštěním, například po změně parametru. Strukturu před provedením výpočtu zobrazuje obrázek 14. [19]



Obrázek 14: Struktura softwaru BlastFOAM před výpočtem

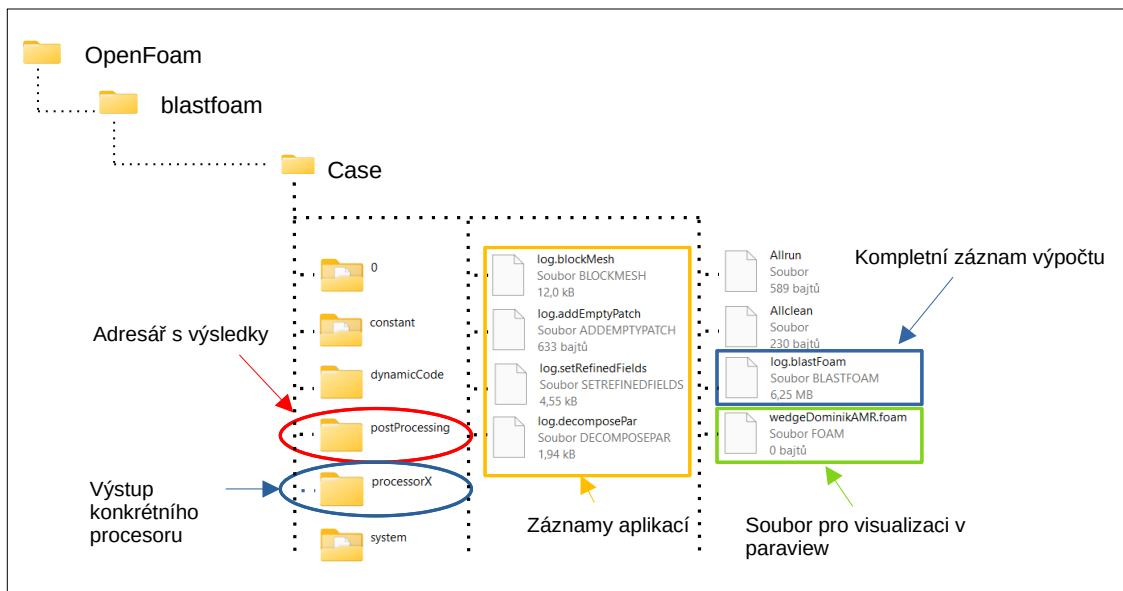
Celý postup výpočtu obsahuje 3 fáze [20, 21]:

- preprocessing – příprava vstupních slovníků pro řešič,
- solving – výpočet úlohy řešičem (BlastFOAM),
- postprocessing – zpracování získaných dat.

Jednotlivé kroky výpočtu je možné zadat buď individuálně nebo s pomocí scriptu Allrun, který postupně spouští [19]:

1. blockMesh – tvorba sítě
2. decomposePar – rozdělení domény (vznik subdomén)
3. internalPatch – definice okrajových podmínek na sdílených plochách
4. setRefinedFields – počáteční rozdělení materiálu
5. blastFoam – vlastní výpočet

Po uskutečnění výpočtu je v adresáři úlohy vytvořena řada nových adresářů obsahujících výsledky výpočtu. Ty jsou rozděleny na adresáře obsahující prostorová data pro konkrétní čas, nebo jsou v případě tzv. paralelizace, tedy výpočtu využívajícího více jader, uložena v adresáři jednotlivých procesorů dle rozdělení domény. Data vztažená ke konkrétnímu bodu, kterým je například senzor jsou zapisována do adresáře postProcessing. Zároveň dojde k vytvoření záznamů jednotlivých kroků výpočtu a kompletního záznamu výpočtu, který má nenahraditelnou roli v případě hledání chyb způsobujících pád simulace. Strukturu úlohy po provedení výpočtu zachycuje obrázek 15.



Obrázek 15: Struktura úlohy po provedení výpočtu

3.2.1 Základní výpočetní síť (*blockMeshDict*)

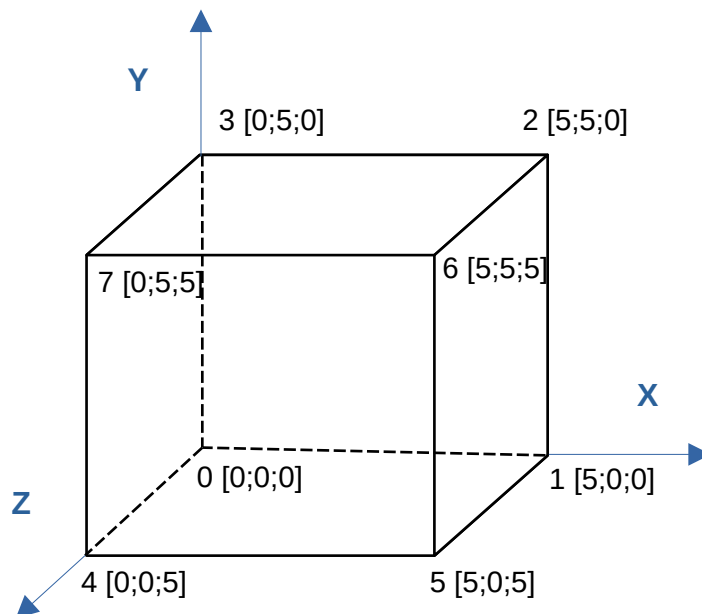
Slovník *blockMeshDict*, který se nachází v adresáři *system* slouží pro nastavení základní mřížky resp. výpočetní sítě, jejích vrcholů, samotných bloků, hran a stěn. Obsahuje také informace o jednotce, ve které byla mřížka vytvořena. [20, 22, 23]

Při tvoření sítě je nutné provést zadání vrcholů bloků, které ohraničují prostor. V nejjednodušším případě zadávání domény tvaru krychle lze vrcholy zadat následovně (příklad 1). [19]

Příklad 1: Zadávání vrcholů

```
vertices
(
    ( 0.0 0.0 0.0) // vrchol 0
    ( 5.0 0.0 0.0) // vrchol 1
    ( 5.0 5.0 0.0) // vrchol 2
    ( 0.0 5.0 0.0) // vrchol 3
    ( 0.0 0.0 5.0) // vrchol 4
    ( 5.0 0.0 5.0) // vrchol 5
    ( 5.0 5.0 5.0) // vrchol 6
    ( 0.0 5.0 5.0) // vrchol 7
);
```

Zadávání pokračuje zadáním bloku (případně seznamu bloků) obsahující právě definované vrcholy pod částí *vertices* dle následujícího obrázku 16 a příkladu zadání 2. [19, 24, 25]



Obrázek 16: Popis bloku

Příklad 2: Zadávání bloků

```
blocks
(
hex (0 1 2 3 4 5 6 7) // tvar buněk a definice domény
(30 20 10) // dělení ve směru x, y, z
simpleGrading (1 2 3) // zhuštění sítě ve směru x, y, z
);
```

Krychle z obrázku 16, která tvoří doménu, je definována pomocí 2 ploch (označených v příkladu 2). Každá plocha je vždy definována pomocí 4 vrcholů. Po definování vrcholů objektu je specifikováno, na kolik částí má být šestistěn rozdělen v osách x, y, z a jakého tvaru by měly být buňky (šestistěny). Posledními zadanými parametry v příkladu 2 jsou poměry expanze buněk (Grading) ve směru x, y, z. [22–25]

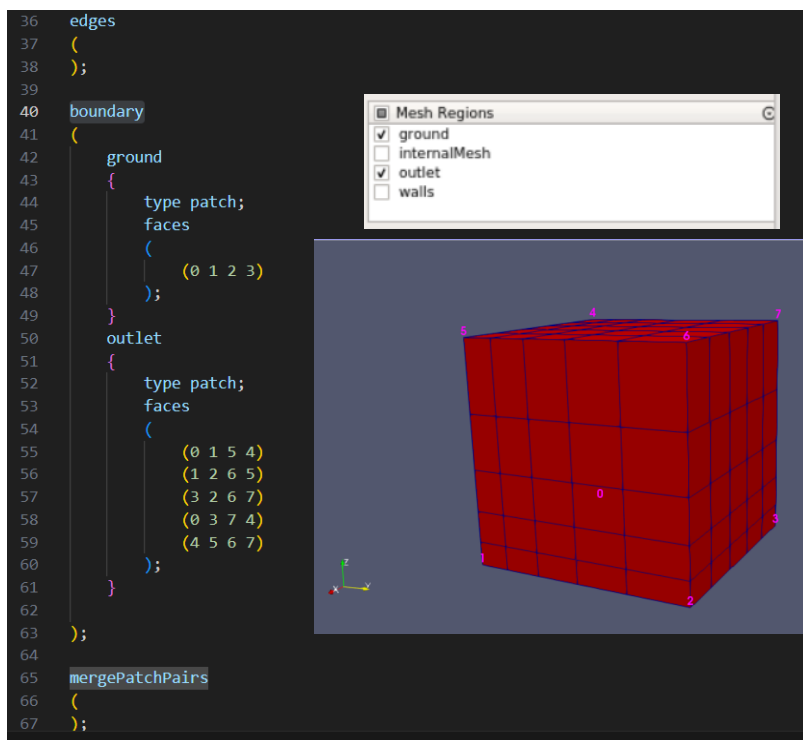
Posledním specifíkem souboru *blockMeshDict* je pak definování stěn tvořících hranici specifikovaného objektu. Nejprve je definován název plochy jako klíčové slovo následovaný

definováním hranice, přičemž název je použit jako identifikátor pro nastavení podmínek v souborech dat popisujících pole. [22, 24, 25]

Pro stěnu resp. okraj bloku je definován její typ a plocha. Typ může obsahovat okraj, u kterého jsou aplikovány okrajové podmínky, případně geometrická podmínka. jde o jednu ze 7 možností (OpenFOAM). Pro BF jsou však dle [22] představeny 4, přičemž je seznam rozšířen o možnost klínu (wedge). [22, 26]

V případě že nedojde ke specifikaci všech okrajových ploch, je zbývající plocha automaticky vytvořena a přidána jako defaultFaces a nastavena na typ empty. [22]

Příklad zadání okrajů je vidět na obrázku 17, který zobrazuje výchozí výukový případ BF (building3D; [19]). [19, 27]



Obrázek 17: Nastavení stěn a jejich vizualizace v Paraview

3.2.2 Nastavení pozice a velikosti nálože (*setFieldsDict*)

V tomto souboru, který se nachází v adresáři *system* dochází k nastavení místa výbušniny. V softwaru BF je možné definovat velikost nálože pomocí definování místa výbušniny a hustoty. [19, 22, 23]

Seznam použitelných tvarů náloží je možno vygenerovat pomocí chybného zadání tvaru, přičemž seznam bude následně uveden v souboru logu umístěném v adresáři úlohy (*log.setRefinedFields*). [19, 23]

3.2.3 Rozdělení domény pro paralelizovaný výpočet (*decomposeParDict*)

V tomto slovníku adresáře *system* dochází k nastavení rozdělení domény pro výpočet využívající více jader procesoru a tím i přiřazení výpočetní kapacity. Tomuto rozdělení se říká paralelizace výpočtu. [24, 28].

3.2.4 Způsob řešení (*fvSchemes*)

Pokyny k řešení zadané úlohy jsou zadány ve slovníku *FvSchemes*. Samotné algoritmy (řešiče) rovnic jsou kontrolovány pomocí slovníku *fvSolution* (viz kap. 3.2.5) v adresáři *system*. *FvSchemes* obsahuje numerické schéma pro derivaci, interpolaci či aproximaci. [19, 24, 29, 30]

Nastavení slovníku *fvSchemes* může být upravováno i během výpočtu, ale požaduje povolení *runTimeModifiable* ve slovníku *controlDict*. [24, 29]

3.2.5 Ovládání řešiče (*fvSolution*)

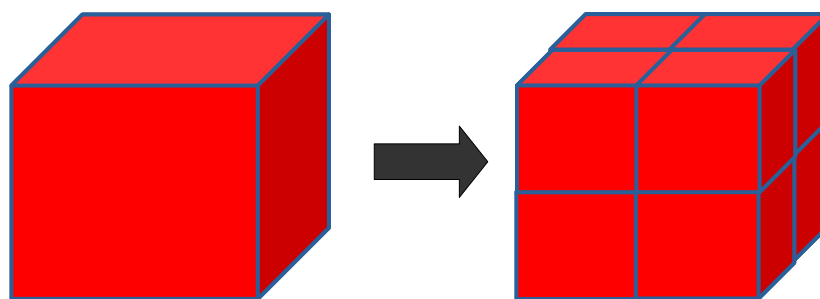
Průběh výpočtu, tedy nastavení řešiče rovnic, tolerance a algoritmy se ovládají ze slovníku *fvSolution* v adresáři *system*. [29]

3.2.6 Nastavení výpočetních kroků a funkcí (*controlDict*)

Pomocí slovníku *controlDict* dochází k popisu simulace (začátek, konec, počet výpočetních kroků, formát zápisu přesnost zápisu), následované výpisem funkcí s nastavenými parametry, které BF využívá při dané simulaci. [16, 19]

3.2.7 Adaptivní zahuštění sítě AMR (*dynamicMeshDict*)

Aby simulace poskytovala výsledky odpovídající skutečnosti, je třeba, aby byla k dispozici dostatečně jemná síť. Při příliš velkých velikostech buněk dochází k většímu průměrování hodnot, které vyústí v nižší hodnoty vypočítaných veličin. Dodatečného zjemnění, doplňující hustotu základní sítě, lze docílit použitím AMR (ang. adaptive mesh refinement). To způsobí zjemnění sítě rozdělením buňky na stejně velké části (viz obrázek 18) v místech, kde dochází ke změnám hustoty dle zadání ve slovníku *dynamicMeshDict*. Automatické nastavení časových kroků je dosaženo povolením možnosti nastavitelného kroku a nastavením Courantova čísla ve slovníku *controlDict*. [16, 19, 24, 31]



Obrázek 18: Rozdělení buňky

Nastavení parametrů pro AMR se však primárně nachází ve slovníku *dynamicMeshDict* v adresáři *constants* [19].

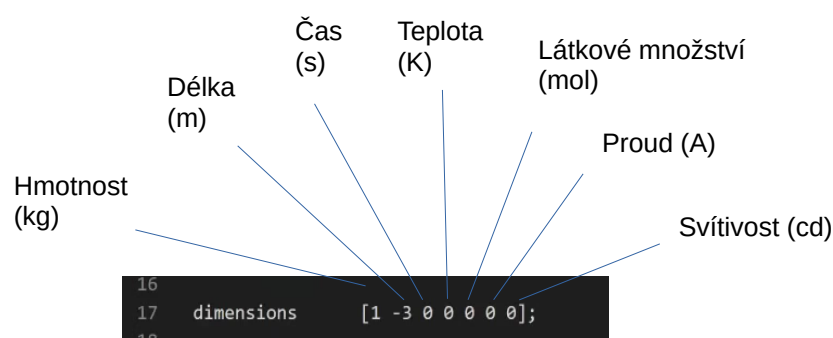
Rozhodnutí o zjemnění oblasti resp. buňky nastává na základě rozdílů (nebo derivací) hodnot sledované veličiny pro stěny dané buňky a buněk sousedních. Maximální hodnota všech chyb je brána jako hodnota patřící středu buňky a slouží k určení, zda buňka (oblast mřížky) vyžaduje zjemnění sítě. [16]

3.2.8 Vlastnosti fází (*phaseProperties*)

Ve slovníku *phaseProperties* jsou popsány vlastnosti všech fází (látek) vyskytující se v daném systému (výchozí látky, produkty, atmosféra). Zároveň zde dochází ke specifikaci bodu od kterého dochází k iniciaci nálože pro detonující látku. [16, 19, 22, 23]

3.2.9 Charakterizace počátečního stavu (adresář 0)

Stav je na počátku charakterizován pomocí souborů popisujících jednotlivé objekty které lze najít v adresáři 0. V jednotlivých souborech je popsána jednotka daného objektu resp. veličiny (popis dle [32] je zobrazen na obrázku 19), její hodnota a okrajové podmínky. [23, 24, 32–34]



Obrázek 19: Popis jednotek

V adresáři se nachází následující soubory: [19, 24]

- *alpha.<výbušnina>.orig* – Soubor charakterizující výbušninu (masu výbušniny). Není zde definována jednotka či konkrétní hodnota veličiny. [19]
- *p.orig* – Soubor obsahující charakterizaci atmosférického tlaku. [19]
- *rho.air.orig* – Soubor charakterizující hustotu vzduchu. [19]
- *rho.<výbušnina>.orig* – Soubor obsahující charakterizaci hustoty výbušniny. [19]
- *T.orig* – Soubor s charakterizací teploty. [19]
- *U.orig* – Soubor charakterizující rychlost v čase t_0 , který má nulovou hodnotu (nehybný systém). [19, 24]

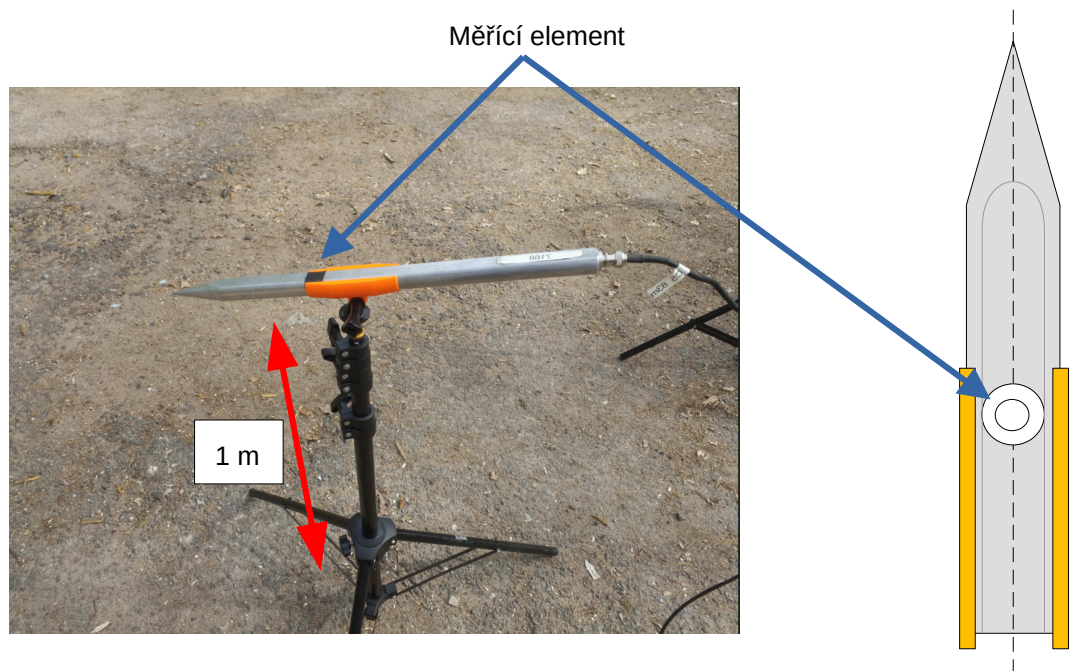
Přípona „.orig“ způsobuje, že soubor není při výpočtu upravován a je ponechán v původní nezměněné verzi. V případě využití více náloží různého druhu, je třeba každou látku separátně charakterizovat pomocí patřičných souborů v adresáři 0. [22, 23]

Část II
Experimentální část

4 Experimentální měření parametrů VRV

Pro měření přetlaku jsou používány „tužkové“ tlakové sondy. Jejich citlivým prvkem je piezoelektrická křemenná membrána. Tužková sonda je zobrazena v podobě schématu a reálné aplikace na obrázku 20. [35]

Špičatý tvar sondy zabraňuje nechtěným odrazům VRV. Má také zajistit, aby nedošlo k výrazným změnám čela VRV, které by nebyly vyrovnány dříve než je dosaženo citlivého prvku. Sonda je namířena hrotem na nálož kvůli čemuž dochází jen k naměření hodnot dopadajícího (side-on) přetlaku, bez vlivu dynamické složky tlaku. [35, 36]



Obrázek 20: Tužková sonda (pencil probe)

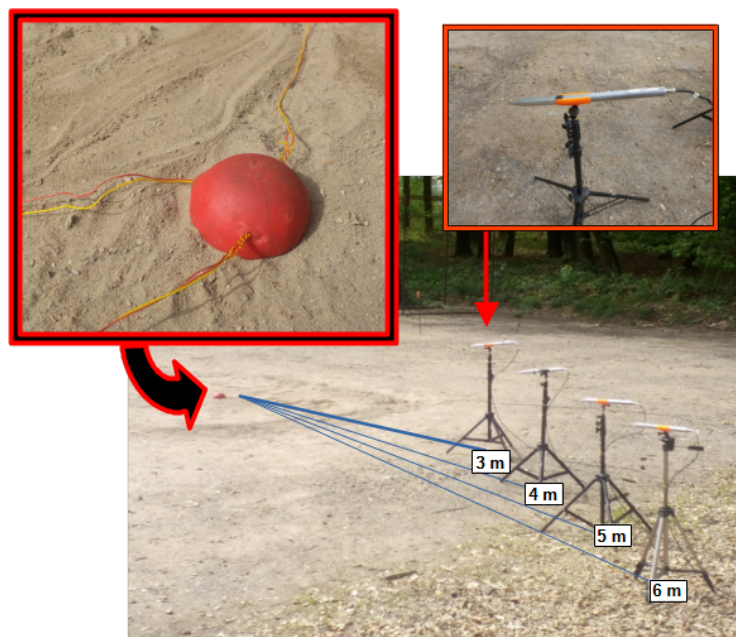
Výstupem tužkové sondy je záznam napětí zaznamenávaný osciloskopem. Hodnoty napětí je nutné následně přepočítat na hodnoty přetlaků pomocí kalibračních konstant senzorů (mV/kPa), které jsou uváděné výrobcem. [36]

Pro experiment byly připraveny 2 polokulové nálože Semtexu 1 A o hmotnosti 500 g (jehož tritolový ekvivalent dle provedených měření na ÚEnM přibližně 1, ale byl použit z důvodu výrazně snazší manipulace), iniciované elektrickou rozbuškou ROCKSTAR II 0-S. K iniciaci

byla použita kondenzátorová roznětnice RKA-1. Rozbuška byla umístěna radiálně ke středu v ploché části nálože. Tužkové sondy (tlaková čidla PCB ICP 137A23) s kalibračními konstantami (viz tabulka 1) byly umístěny na trojnožkách ve výšce alespoň 1 m (kvůli zamezení měření Machových vln) a ve vzdálenosti 3 až 9 metrů po 1 metru (umístění odpovídající simulaci). Uspořádání experimentu je zobrazeno na obrázku 21.

Tabulka 1: Kalibrační konstanty tužkových senzorů

Vzdálenost [m]	Senzor	Kalibrační konstanta [mV·kPa⁻¹]
3	7167	13,98
4	7168	13,54
5	7169	13,89
6	7170	14,1
7	7729	14,27
8	7733	14,02
9	11828	14,54



Obrázek 21: Uspořádání provedeného experimentálního měření

Na obrázku 21 vpravo nahoře je vidět adjustovaná nálož se 2 triggerů ve formě ionizujících sond. Dvou triggerů bylo využito, protože napětí vzniklé působením VRV na citlivý prvek sond bylo zaznamenáno 2 způsoby. Ve vzdálenosti 3-6 metrů bylo využito osciloskopu optimes Tektronix DPO 3034 (rychlost vzorkování 300 MHz) se zesilovačem PCB piezotronics (ICP model 482A22). Pro vzdálenosti 7-9 metrů bylo využito přístroje SIRIUSi-HS-6xACC-2xACC+ (obrázek 22) vyvinutého společností Dewesoft a ovládaného pomocí počítače. Jeho předností je snazší a intuitivnější ovládání zkracující dobu přípravy experimentu, které je však kompenzováno nižší vzorkovací frekvencí (1 MHz), která však postačující v rámci měření parametrů VRV.



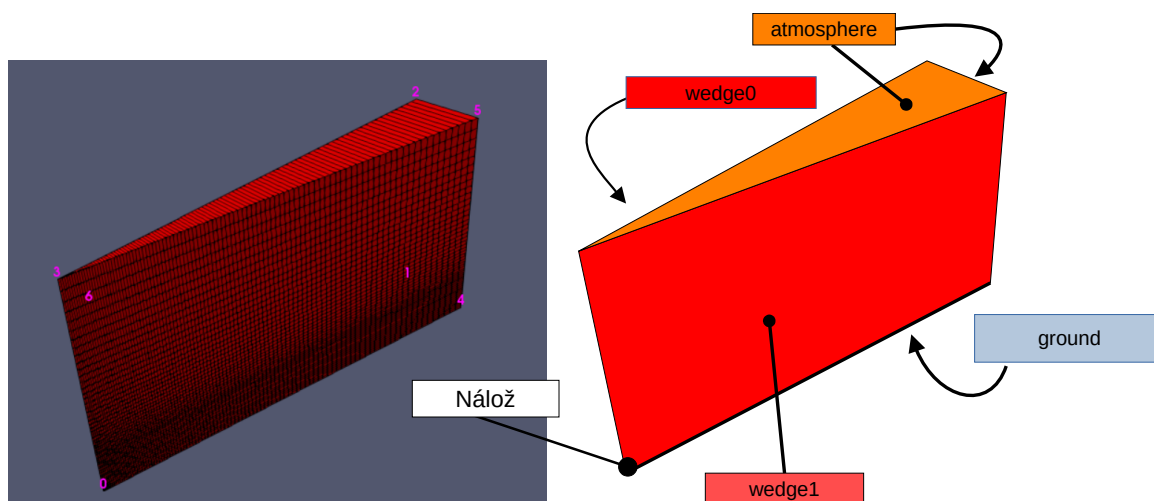
Obrázek 22: Zařízení DAQ Sirius

5 Numerické uspořádání

Pro simulace bylo využito nastavení založeného na řešeném případě pro axisymetrickou nálož, který je dostupný pro všechny uživatele po instalaci BF, s aplikací na klín (wedge) pro snížení náročnosti výpočtu. Byly zjišťovány vlivy vstupních parametrů, které posloužily k navržení optimálního nastavení parametrů simulace, která byla následně ověřována experimentálním měřením.

5.1 Nastavení geometrie mřížky

Pro simulaci byl využit klín o výšce 5 m a poloměru 10 m. Velikost buněk byla nastavena na 0,1 m. Typ stěn byl pro povrch země a hranici atmosféry nastaven dle řešeného případu na obecnou stěnu. Pro nastavení šikmých stěn byl zvolen typ klín. Rozvržení stěn je patrné z obrázku 23. [22, 26]



Obrázek 23: Schéma geometrického tvaru domény klín

V rámci optimalizace parametrů simulace byl zjišťován vlivu velikosti buňky na vypočtenou hodnotu maximálního tlaku a délku numerického experimentu. Velikost buněk byla nastavena postupně na 0,1; 0,05; 0,02 m a byl sledován vliv na velikost přetlaku pro sondy umístěné ve vzdálenosti 3-9 m.

Byl zkoumán vliv velikosti buňky na dobu trvání numerického experimentu využívajícího 4 jader a sondu umístěnou ve vzdálenosti 3 m. Očekávalo se, že maximální tlak konverguje

k určité hodnotě, která by měla odpovídat maximálnímu tlaku získanému optimalizovanou simulací. Nastavení slovníku pro optimalizovanou simulaci je popsáno v příkladu 3.

Příklad 3: Slovník blockMeshDict pro optimalizovanou simulaci

```
// * * * * * //
convertToMeters 1; // převod na metry
H 5.0; // výška
R 10.0; // poloměr
cellSize 0.1; // velikost buněk
nx #calc "round($R / $cellSize)";
ny #calc "round($H / $cellSize)";
x #calc "$R * cos(5.0 *
Foam::constant::mathematical::pi/180)";
z #calc "$R * sin(5.0 *
Foam::constant::mathematical::pi/180)";
nz #calc "-$R * sin(5.0 *
Foam::constant::mathematical::pi/180)";
xe 5;
ye (
    (15 30 1)
    (75 70 5)
);
// * * * * * //
vertices // vrcholy
(
    (0 0 0)
    ($x 0 $nz)
    ($x $H $nz)
    (0 $H 0)
    ($x 0 $z)
    ($x $H $z)
    (0 $H 1)
);
blocks // bloky
(
    hex (0 1 2 3 0 4 5 3) // doména a tvar buněk
    ($nx $ny 1) // rozdělení domény
    simpleGrading ($xe $ye 1) // zhuštění sítě
);
edges // hrany
(
);
Boundary // stěny
(
    ground
    {
        type patch; // obecná stěna
        faces
        (
            (0 1 4 0)
        );
    }
    atmosphere
    {
        type patch;
        faces
        (
            (1 2 5 4)
            (3 2 5 3)
        );
    }
    wedge0 // šikmá stěna klínu
    {
        type wedge; // typ klín
        faces
        (
            (0 1 2 3)
        );
    }
    wedge1
    {
        type wedge;
        faces
        (
            (0 4 5 3)
        );
    }
);
mergePatchPairs // spojený překrývající se hran
(
);
// * * * * * //
```

5.2 Nastavení velikosti a pozice nálože

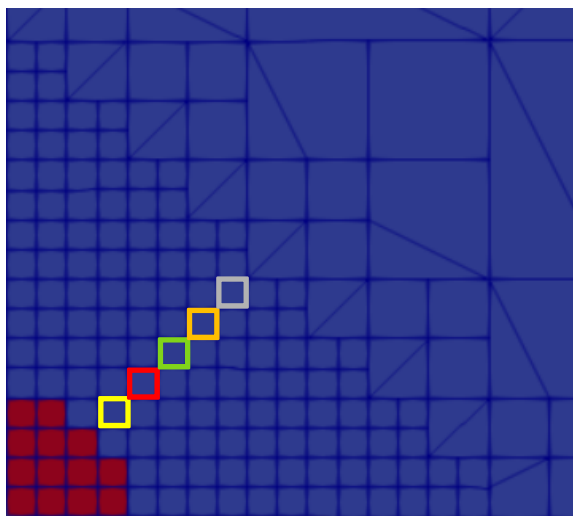
Pro simulaci byla využita polokulová nálož o velikosti 0,5 kg TNT (viz příklad 4). Polokulové nálože bylo dosaženo vhodným umístěním kulové nálože, kdy polovina nálože není v definované oblasti sítě a není proto uvažována. Byl zadefinován střed nálože do počátku souřadnic. Nastavením poloměru na hodnotu 0,0527 m bylo dosaženo hmotnosti 0,5 kg TNT (při hustotě $1630 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Pro zálohu, která je použita v případě, že zadefinovaná oblast nálože je příliš malá v aktuálně zadané mřížce (velikost nálože \ll velikost buňky, selhalo nalezení nálože) byl nastaven poloměr 1 m. Tato „větší“ oblast však není použita k nastavení velikosti nálože, ale pouze k určení jejího umístění v hrubé síti. [19, 23]

Příklad 4: Slovník setFieldsDict pro optimalizovanou simulaci

```
// * * * * * //
fields (alpha.TNT); // nálož
nBufferLayers 5; // vrstvy kolem nálože
defaultFieldValues // výchozí nastavení prostoru
(
    volScalarFieldValue alpha.TNT 0
);
regions // nastavení prostoru nálože
(
    sphereToCell // tvar nálože (koule)
    {
        centre (0 0 0); // střed nálože
        radius 0.0527; // poloměr
    }
);
// ***** //

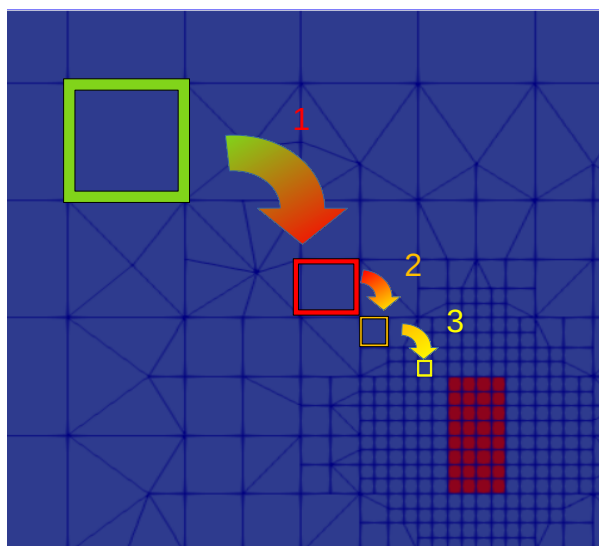
backup // nastavení větší oblasti hledání
{
    centre (0 0 0);
    radius 1; // poloměr zálohy
}
level 5; // úroveň zjemnění sítě u nálože
refineInternal yes; // zapnout zjemnění // v okolí nálože
fieldValues // materiál nálože
(
    volScalarFieldValue alpha.TNT 1
);
// ***** //
```

Nálož byla obklopena 5 vrstvami vzduchu (viz obrázek 24) se stejným zjemněním jako má nálož, aby nedocházelo k přechodu z velmi malých buněk nálože do mnohem větších buněk vzduchu (zamezení vlivu průměrování). [22]



Obrázek 24: Vrstvy vzduchu přidané na nálož

Následné zapnutí zjemnění okolí nálože slouží k nastavení úrovně zjemnění mřížky v okolí výbušniny ze simulace až do úrovně 5, což může způsobit mírné zrychlení výpočtu. Zjemnění výbušniny lze vidět na obrázku 25, kde bylo nastaveno zjemnění do 3. stupně. [23]



Obrázek 25: Zjemnění okolí nálože (3. stupeň)

TNT je pak přidána do nastaveného pole dle následujícího příkladu 5.

Příklad 5: Umístění výbušniny do geometrie

```
fieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.tnt 1
);
```

5.3 Nastavení slovníku s ovládáním

Nastavení slovníku s ovládáním, který popisuje kontrolu průběhu numerického výpočtu a využití funkce pro optimalizovanou simulaci, je uvedeno v příkladu 6.

Příklad 6: Slovník controlDict pro optimalizovanou simulaci

```
// * * * * * //
application      blastFoam; // solver
startFrom        startTime; // začátek simulace
startTime        0; // v jakém čase začít
stopAt           endTime; // konec simulace
endTime          0.025; // kdy skončit
writeControl     adjustableRunTime; // typ zápisu
writeInterval    0.002; // interval zápisu
// výsledků
writeFormat      binary; // formát zápisu
writePrecision   12; // počet číslic zápisu
writeCompression off; // zkomprimování
timeFormat       general; // vědecký zápis času
timePrecision    6; // přesnost času
runTimeModifiable true; // znovunačtení slovníků
adjustTimeStep   yes; // úprava kroku dle Co
deltaT           1e-8; // velikost čas. kroku
maxCo            0.5; // max. Courantovo číslo
// * * * * * //
functions // funkce pro simulaci
{
    impulse
    {
        type            impulse;
        writeControl    writeTime;
        writeInterval    1;
        pRef             101325;
    }
    dynamicPressure
    {
        type            dynamicPressure;
        writeControl    writeTime;
        writeInterval    1;
    }
}

fieldMinMax
{
    type            fieldMinMax;
    writeControl    writeTime;
    writeInterval    1;
    fields
    (
        speedOfSound
        dynamicPressure
        overpressure
    );
}
pressureProbes
{
    type            blastProbes;
    writeControl    timeStep;
    writeInterval    1;
    adjustLocations yes; // úprava pozice
    probeLocations // výčet pozic sond
    (
        (3 0.7 0)
        (4 0.7 0)
        (5 0.7 0)
        (6 0.7 0)
        (7 0.7 0)
        (8 0.7 0)
        (9 0.7 0)
    );
    fields // zápis dat jen pro tlak
    (
        p
    );
}
// impulse
// dynamicPressure
```

```

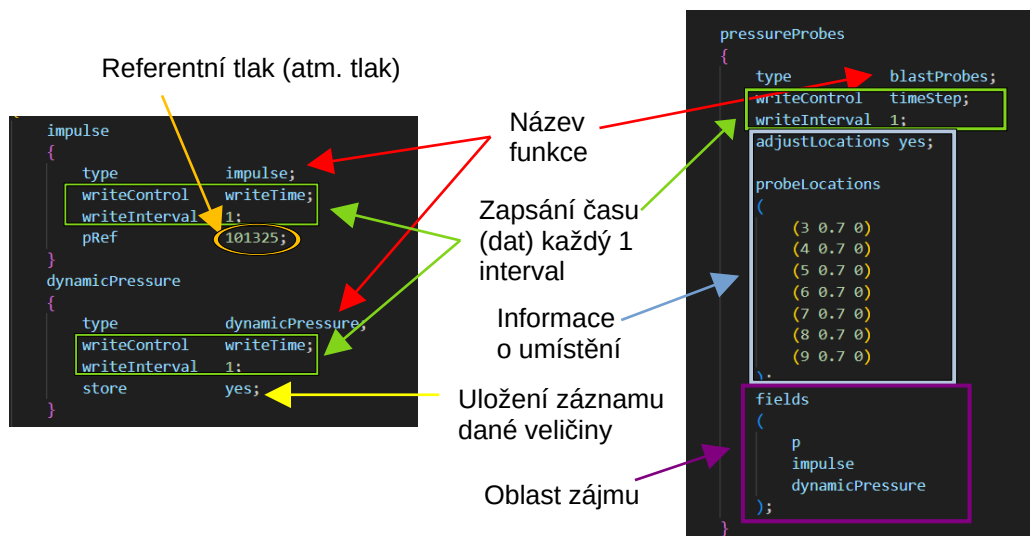
        store          yes;
    }
    overpressure
    {
        type           overpressure;
        writeControl   writeTime;
        writeInterval  1;
        pRef           101325;
        store          yes;
    }
};
}
//
***** //

```

Po nastavení času ve kterém simulace začíná (0 s) a končí (0,025 s). Následuje část pro definování zápisu získaných hodnot. Zde je zvolen typ řízení zápisu do souboru v rámci experimentu `adjustableRunTime`. Ten provádí zápis podle definovaného časového intervalu a v případě potřeby provede úpravu časového kroku, aby došlo ke shodě s intervalem zápisu výsledků, na který následně navazuje definování přesnosti zápisu vypočítaných hodnot. V sekci s nastavení času je nastaven vědecký formát čísel. Komprese dat jako `.gzip` není povolena. [19, 24]

V závěru sekce (před popisem funkcí) je nastaveno, aby probíhalo opětovné načtení slovníků při zahájení každého časového kroku (`runTimeModifiable`) a aby probíhala úprava časového kroku (povolení `adjustTimeStep`) podle Courantova čísla, které ovlivňuje přesnost a stabilitu simulace [37]. Maximální povolené Courantovo číslo je nastaveno na 0,5, což je shodné s nastavením v řešeném případě axisymetrické nálože. Délka časového kroku simulace (`deltaT`) je nastavena na 10^{-8} s. [19, 24, 34, 37, 38]

V rámci experimentu je využito nastavení funkcí z řešeného případ axisymetrické nálože (popis některých funkcí je ukázán obrázku 26). Sondy byly nastaveny funkcí `blastProbes`, do výšky 0,7 m nad povrch ve vzdálenostech 3 až 9 m s nastavením, které umožňuje posun sondy na nejbližší stěnu pokud se nenachází v síti. [16]



Obrázek 26: Popis funkcí

5.4 Nastavení výpočetní kapacity

V rámci experimentů bylo vždy nastaveno automatické rozdělení domény, protože se tak lze vyhnout případu, kdy dochází k nečinnosti určitých jader při výpočtu, zatímco jiná jsou vysoce zatížena. Volbou správného algoritmu se lze také vyhnout přebytné komunikaci mezi procesory, která by zpomalovala výpočet. [24, 28, 39, 40]

V rámci optimalizace byl zjišťován vliv přiděleného výpočetního výkonu (počtu jader) na délku numerického výpočtu. V rámci experimentu byl měněn počet jader procesoru (2-6 jader). Experiment byl proveden pro 2 simulace simulace:

- bez AMR s velikostí buněk 0,05 m,
- využívající AMR s velikostí buněk 0,1 m a s úpravou nastavení AMR dle příkladu 7.

Příklad 7: Vliv výpočetního výkonu (nastavení AMR)

```
LowerRefineLevel    0,05
unrefineLevel       0,05
nbufferLayers       1;
maxRefinement        3;
refineInterval      10;
loadBalance
{
  balance yes
  balanceInterval    20;
  allowableImbalance 0.2;
  method             scotch;
}
```

Pro optimalizovaný numerický výpočet bylo zvoleno použití 8 jader s automatickým rozdělením domény dle příkladu 8.

Příklad 8: Slovník `decomposeParDict` pro optimalizovanou simulaci

```
// * * * * * //
numberOfSubdomains 8; // počet jader
method             scotch; // automatické rozdělení
// * * * * * //
```

5.5 Nastavení způsobu řešení a řešičů

Nastavení parametrů souboru `fvSchemes` a `fvSolution` bylo převzato z řešeného výukového případu axisymetrické nálože dostupného po instalaci BF v adresáři *tutorials* [19]. S parametry nebylo během prováděných experimentů manipulováno a jsou uvedeny v příkladu 9.

Příklad 9: Slovníky fvSchemes a fvSolution pro optimalizovanou simulaci

fvSchemes	fvSolution
<pre>// * * * * * // fluxScheme Kurganov; ddtSchemes { default Euler; timeIntegrator RK2SSP; } gradSchemes { default cellMDlimited leastSquares 1.0; } divSchemes { default none; div(alphaRhoPhi.TNT,lambda.TNT) Riemann; } laplacianSchemes { default Gauss linear corrected; } interpolationSchemes { default cubic; reconstruct(alpha) Minmod; reconstruct(rho) Minmod; reconstruct(U) MinmodV; reconstruct(e) Minmod; reconstruct(p) Minmod; reconstruct(speedOfSound) Minmod; "reconstruct(*)" Minmod; } snGradSchemes { default corrected; } wallDist { method meshWave; } // * * * * * //</pre>	<pre>// * * * * * // solvers { "(rho rhoU rhoE alpha)" { solver diagonal; } "(U e)" { solver PBiCGStab; preconditioner DIC; tolerance 1e-6; relTol 0; } } // * * * * * //</pre>

5.6 Nastavení počátečního stavu a okrajových podmínek

Pro charakterizaci stavu systému na počátku (v čase t_0) je využito nastavení z řešeného případu asymetrické nálože dostupné instalací BF [19] s úpravou konkrétních hodnot teploty, tlaku a hustoty TNT (viz příklad 10).

Příklad 10: Adresář 0 pro optimalizovanou simulaci

alpha.TNT.orig	p.orig
<pre>// * * * * * // dimensions [0 0 0 0 0 0]; // jednotka internalField uniform 0; // hodnota boundaryField // okrajové podmínky { atmosphere // název stěny { type zeroGradient; } ground { type zeroGradient; } wedge0 { type wedge; } wedge1 { type wedge; } } // * * * * * //</pre>	<pre>// * * * * * // dimensions [1 -1 -2 0 0 0]; internalField uniform 101325; boundaryField { atmosphere { type pressureWaveTransmissive; value \$internalField; } ground { type zeroGradient; } wedge0 { type wedge; } wedge1 { type wedge; } } // * * * * * //</pre>

rho.air.orig	rho.TNT.orig
<pre> // * * * * * dimensions [1 -3 0 0 0 0]; internalField uniform 1.225; boundaryField { atmosphere { type zeroGradient; } ground { type zeroGradient; } wedge0 { type wedge; } wedge1 { type wedge; } } // * * * * * </pre>	<pre> // * * * * * dimensions [1 -3 0 0 0 0]; internalField uniform 1630; boundaryField { atmosphere { type zeroGradient; } ground { type zeroGradient; } wedge0 { type wedge; } wedge1 { type wedge; } } // * * * * * </pre>
T.orig	U.orig
<pre> // * * * * * dimensions [0 0 0 1 0 0]; internalField uniform 298; boundaryField { atmosphere { type zeroGradient; } ground { type zeroGradient; } wedge0 { type wedge; } wedge1 { type wedge; } } // * * * * * </pre>	<pre> // * * * * * dimensions [0 1 -1 0 0 0]; internalField uniform (0 0 0); boundaryField { atmosphere { type zeroGradient; } ground { type slip; } wedge0 { type wedge; } wedge1 { type wedge; } } // * * * * * </pre>

Jako okrajová podmínka je ve většině případů zvolen Zero gradient. To značí, že hodnota na okraji pole bude nastavena na hodnotu nejbližší vnitřní buňky [33]. Dalšími nastaveními využitými v experimentu jsou `pressureWaveTransmissive` (propustnost stěny pro tlakovou vlnu) a `slip` (rychlost U ve stěně není nulová) [24, 34]. [24, 33, 34]

5.7 Nastavení vlastností fází

Nastavení vlastností látek v rámci simulací probíhalo dle příkladu 11. Vycházejícího z nastavení řešeného případu axisymetrické nálože. V rámci experimentu však byla nahrazena rovnice Murnaghan pro reaktant za rovnici Birch-Murnaghan 3. řádu. Byly také upraveny hodnoty hustot na $1630 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a detonační rychlost na $6930 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro experiment je využito lineárního detonačního modelu.

Příklad 11: Slovník `phaseProperties` pro optimalizovanou simulaci

```
// * * * * * //
phases (TNT air);
TNT
{
  type detonating; // výbušnina
  reactants
  {
    thermoType
    {
      transport const; // konstantní mu a Pr
      thermo eConst; //konst. tep. kapacita
      equationOfState BirchMurnaghan3;
    }
    equationOfState // koeficienty stav. rovnice
    {
      rho0 1630;
      K0 9.6e9;
      K0Prime 6.6;
      Gamma 0.35;
      pRef 101325;
    }
  }
  specie
  {
    molWeight 227.13; // mol. hmotnost
  }
  transport
  {
    mu 0; // viskozita
    Pr 1; // Prandtlovo kritérium
  }
}
}
transport
{
  mu 0;
  Pr 1;
}
}
thermodynamics
{
  Cv 1000;
  Hf 0.0;
}
}
activationModel linear;
initiation
{
  E0 7.0e9; // energie detonace (Pa)
  points ((0 0 0)); //bod iniciace
  vDet 6930; // det. rychlost
}
residualRho 1e-6;
residualAlpha 1e-6;
}
air
{
  type basic; // inert
  thermoType
  {
    transport const;
    thermo eConst;
    equationOfState idealGas;
  }
}
```

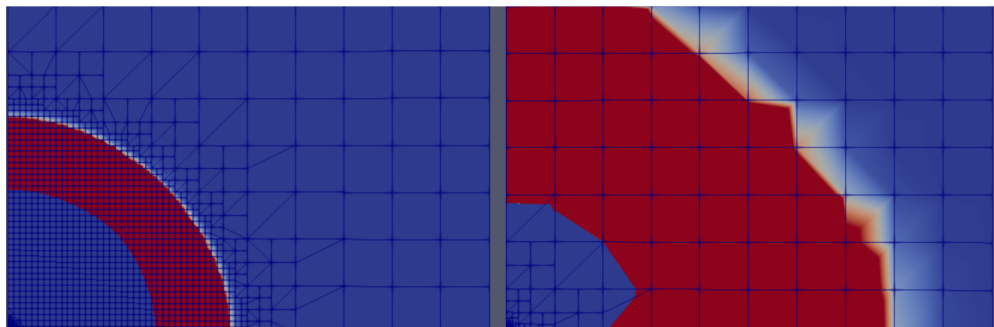
```

thermodynamics
{
  Cv          1095; // tep. kapacita
  Hf          0.0;  // sluč. teplo
}
}
products
{
  thermoType
  {
    transport  const;
    thermo     eConst;
    equationOfState JWL; // stav. Rovnice
  }
  equationOfState
  {
    rho0      1630;
    A          371.21e9;
    B          3.23e9;
    R1         4.15;
    R2         0.95;
    omega      0.3;
  }
  specie
  {
    molWeight  18.8;
  }
}
}
equationOfState
{
  gamma       1.4;
  a           0;
}
}
specie
{
  molWeight   28.97;
}
transport
{
  mu          0;
  Pr          1;
}
}
thermodynamics
{
  Cv          718;
  Hf          0;
}
residualRho  1e-6;
residualAlpha 1e-6;
}
// ***** //

```

5.8 Adaptivní zahuštění sítě (AMR)

V rámci optimalizace parametrů byly měněny následující parametry AMR nacházející se ve slovníku *dynamicMeshDict*. Rozdíl výstupu paraview pro simulaci s a bez AMR je vidět na obrázku 27. [16, 19]

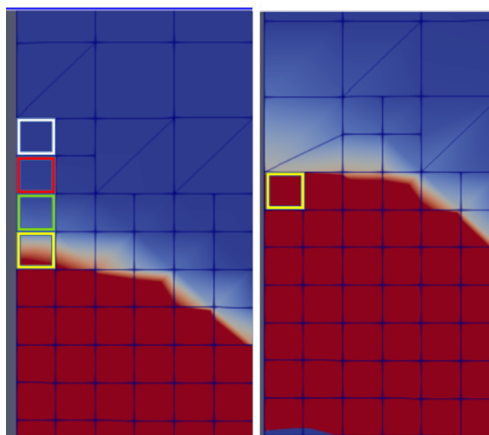


Obrázek 27: VRV zjemněná pomocí AMR (vlevo) a VRV bez AMR (vpravo)

V rámci experimentu je využito typu zjemnění *adaptiveFvMesh*, který je využíván pro zjemnění mřížky tvořené velkou oblastí s relativně malou změnou proměnných polí a malým

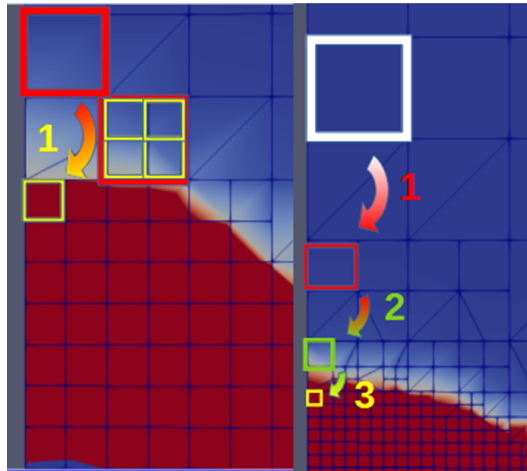
úsekem s rychlou a extrémní změnou proměnných polí [41] upraveného pro BF, aby mohl být AMR aplikováno ve 3D i 2D prostoru. [19, 41, 42]

- `nBufferLayers` – V rámci optimalizace byla měněna hodnota na 1-4. Parametr definuje, že se mezi nezjemněnou buňkou sítě a RV budou nacházet 2 vrstvy zjemněných buněk před provedením zjemnění. Rozdíl při použití 4 a 1 vrstvy je ukázán na obrázku 28. Tento parametr lze dále zpřesnit použitím ve tvaru `nRefinementBufferLayers`, kdy jsou přidávány vrstvy ke zjemnění, a `nUnrefinementBufferLayers`, kdy jsou přidány vrstvy před zhrubnutím sítě. Ve výchozím nastavení nejsou tyto vrstvy přidávány. [16, 19]



Obrázek 28: `nBufferLayers` (4 oproti 1)

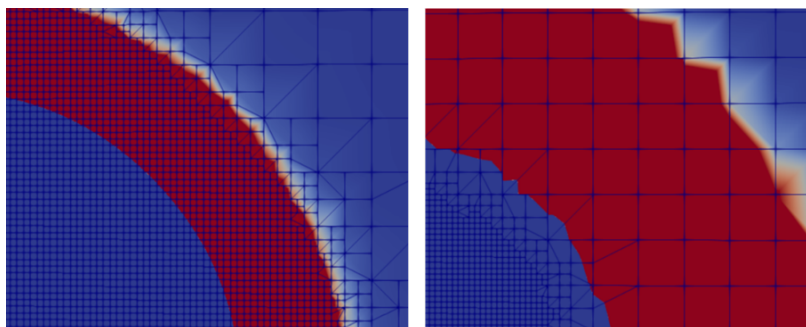
- `maxRefinement` – Hodnota tohoto parametru byla změněna na hodnotu 1-3 a byl pozorován její vliv na výsledky simulace. Tento parametr specifikuje, kolikrát má v případě splnění požadavku na zjemnění, ke zjemnění dojít, jak je vidět na obrázku 29 pro případ zjemnění 1krát (`maxRefinement 1;`) a 3krát (`maxRefinement 3;`). Pro optimalizovanou simulaci bylo nastaveno zjemnění až do 5. stupně. [16]



Obrázek 29: *maxRefinement* (1 oproti 3)

- `refineInterval` – V rámci experimentu zabývajícím se vlivem parametrů došlo ke změně intervalu na hodnoty 1, 2, 5, 10. Tento parametr popisuje, jak často má docházet ke zjemnění sítě resp. „jednou za kolik kroků/iterací má ke zjemnění dojít“ a předpokládá se tam jeho vliv na délku numerického experimentu. Jeho analogií je `unrefineInterval`, zabývajícím se zhrubnutím sítě, se kterým však v rámci práce nebylo manipulováno. V rámci optimální simulace však nebyla využita jeho změna z důvodu dostatečné časové dotace. [16, 31]
- `unrefineLevel` a `lowerRefineLevel` – V rámci optimalizačního experimentu byly změněny hodnoty těchto parametrů na 0,2; 0,1; 0,05 a 0,02. Oba tyto parametry se vztahují k objasnění velikosti změny náležící veličině se kterou AMR pracuje (na jejíž hodnotě je rozhodnuto zjemnění). `UnrefineLevel` je velikost změny, která je již tak malá, že není třeba, aby v daném místě síť dosahovala vysoké hustoty (dojde ke zhrubnutí sítě pro všechny pole/buňky obsahující hodnoty menší než 0,02). `LowerRefineLevel` je parametr určující, při jak velké hodnotě má dojít ke zjemnění sítě (pokud pole obsahuje hodnoty větší než 0,02, dojde ke zjemnění sítě). Nastavení je klíčové pro provedení AMR ve chtěné oblasti, jak je vidět na obrázku 30 u zadání nízkých a vysokých hodnot těchto parametrů. Zpřesnění, kdy má být provedeno zjemnění může být doplněno o možnost horní hranice (`upperRefineLevel`,

upperUnrefineLevel), kdy má dojít ke zjemnění (zhrubnutí) sítě. Pro optimalizovanou simulaci byla zvolena hodnota parametru 0,02. [16, 19, 31]



Obrázek 30: Porovnání nastavení nízké (vlevo) a vysoké (vpravo) hodnoty pro *unrefineLevel* a *lowerRefineLevel*

Poznatky získané z optimalizace parametrů AMR byly ve většině využity při nastavení AMR optimalizované simulace, jak je vidět na příkladu 12.

Příklad 12: Slovník dynamicMeshDict pro optimalizovanou simulaci

```
// * * * * * //
dynamicFvMesh      adaptiveFvMesh;
errorEstimator     densityGradient; // na základě čeho má dojít ke zjemnění
refineInterval     1; // jak často má dojít ke zjemnění sítě
beginRefine        1e-5; // kdy má začít zjemňování sítě
beginUnrefine      1e-5; // kdy má dojít ke zhrubnutí sítě
lowerRefineLevel   0.02; // dolní hranice pro zjemnění
unrefineLevel      0.02; // hranice pro zhrubnutí sítě
nBufferLayers      2; // počet vrstev před provedením zjemnění
maxRefinement      5; // úroveň zjemnění
dumpLevel          true; // zápis úrovně buněk
loadBalance
{
    balance          yes; //vyrovnání zátěže vlivem AMR
    balanceInterval  20; // interval vyrovnání
    allowableImbalance 0.2; // přípustný rozdíl mezi průměrnou a maximální zátěží jádra
    method           scotch; // automatické rozdělení domény
}
// * * * * * //
```

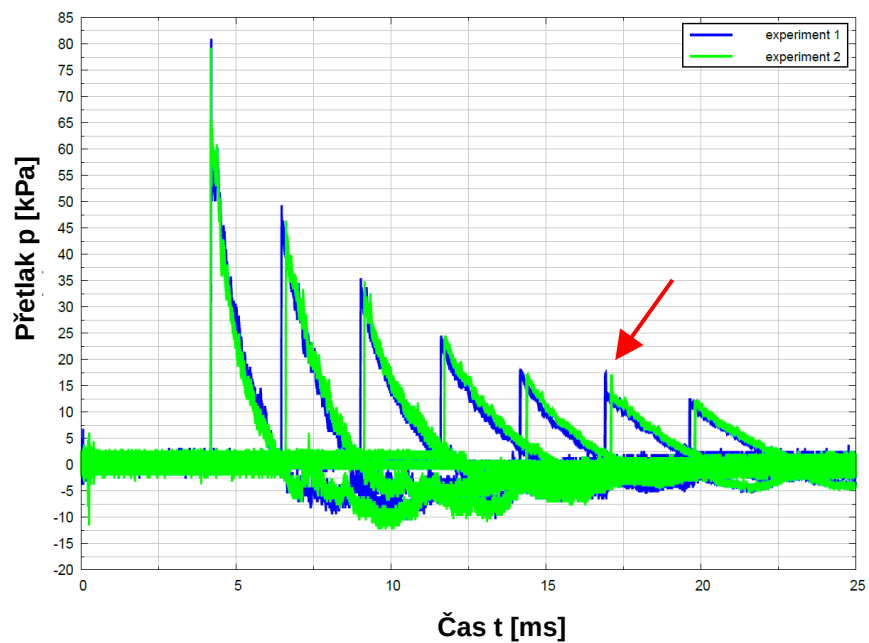
Následující seznam se zabývá popisem parametrů, kterých bylo využito u optimalizované simulace, ale nebyl zjišťován jejich vliv na simulaci. [16, 19]

- `beginRefine` (`beginUnrefine`) – Upřesnění času (s), kdy se má začít se zjemněním (zhrubnutím) sítě. Výchozím nastavením je začátek zjemnění i zhrubnutí sítě na počátku simulace (0 s). Pro optimalizovanou simulaci byl nastaven počátek zjemnění i zhrubnutí sítě na 10^{-5} s. [16]
- `endRefine` (`endUnrefine`) – Upřesnění času, kdy má dojít k ukončení zjemnění (zhrubnutí) sítě zadané v sekundách. [16]
- `dumpLevel` – Povolením dochází k zápisu úrovně každé buňky (bodu) jako viditelných polí (`volScalarField`), čehož lze využít u ladění vizualizace zjemnění sítě v simulaci. [16, 19, 43]
- `loadBalance` – Nastavení, které může způsobit značné zkrácení doby nutné pro výpočet optimalizací distribuce buněk jednotlivým procesorům. Jak často (1krát za kolik časových kroků) k tomuto rozdělení dochází je nastaveno pomocí `balanceInterval`. Nastavení obsahuje také položku `allowableImbalance`, která nastavuje přípustný rozdíl mezi průměrnou a maximální zátěží jádra. Pro optimalizovanou simulaci bylo nastaveno přerozdělení každých 20 časových kroků s hranicí tolerance 0,2. [16, 19]

Část III
Výsledky a diskuze

6 Naměřené experimentální výsledky

Naměřené tlaky jsou společně s hodnotami impulzů uvedeny v tabulce 2. Výsledky obou experimentů zobrazuje také obrázek 31, na kterém je patrné, že v případě sondy ve vzdálenosti 8 metrů dochází k naměření mnohem vyššího tlaku, než jaký je teoreticky možný.



Obrázek 31: Tlakové průběhy experimentů

Získaný průběh na obrázku 31 se shoduje s průběhem teoretickým (viz obrázek 6 kap. 1.2.2). Jsou zaznamenány i projevy sekundární rázové vlny, které se nacházejí v podtlakové části záznamu.

Tabulka 2: Výsledky experimentu 1

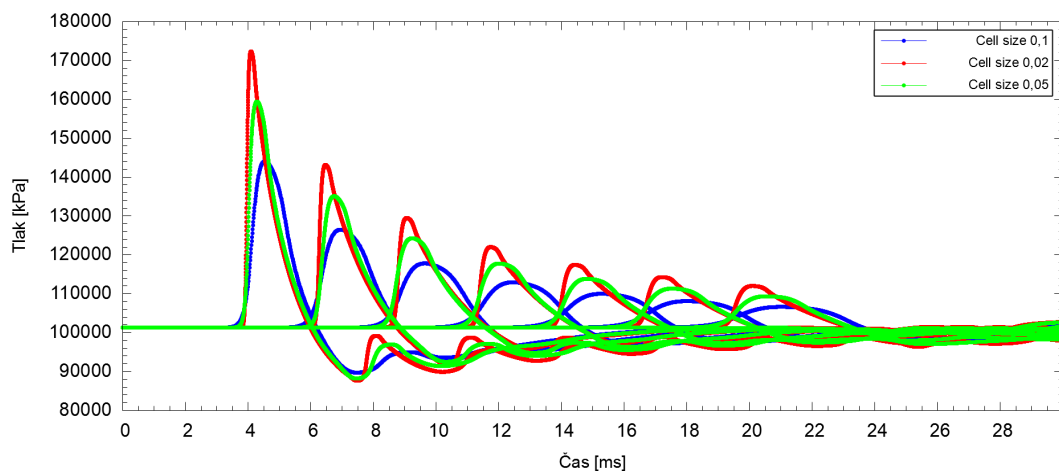
Vzdálenost sondy [m]	Maximální přetlak [kPa]		Tlakový impulz [Pa·s]	
	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 1	Experiment 2
3	80,97	79,26	50,34	48,14
4	49,34	46,38	42,68	42,01
5	35,44	34,86	33,26	32,85
6	24,54	24,54	27,81	27,01
7	17,95	17,00	21,5	20,89
8	13,96	13,76	19,98	18,77
9	12,6	12,20	18,02	17,69

7 Výsledky numerických experimentů

V rámci optimalizace parametrů byl nejdříve zjištěn vliv velikosti buněk bez dodatečného zjemnění (viz kap. 7.1 a kap. 7.2). V těch je věnována pozornost nejprve vlivu velikosti buněk a poté paralelizaci výpočtu. Nasledovala optimalizací parametrů vztahujících se k použití použití dodatečného zjemnění AMR (viz kap. 7.3 až 7.6). Kapitola 7.7 se pak věnuje výsledkům z optimalizované simulace.

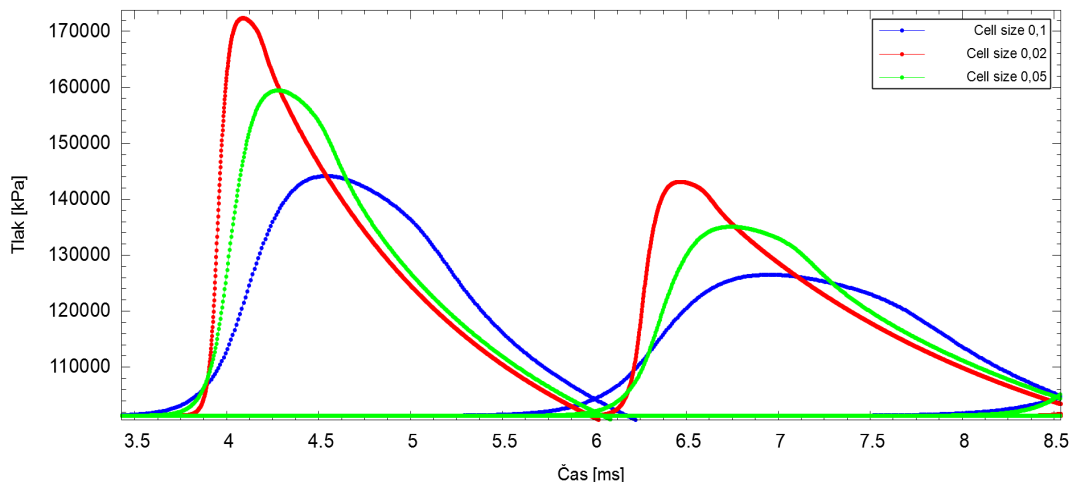
7.1 Vliv velikosti buněk sítě

Prvním zkoumaným parametrem byla velikost buněk u sítě s pevně nastavenou velikostí. Tlaky získané tímto způsobem neodpovídají svým průběhem ani hodnotami přetlaku hodnotám experimentálním. Vliv použití buněk o velikosti 0,1; 0,05 a 0,02 m, které se projeví navýšením maximálního přetlaku a rychlosti náběhu (ostrota čela vlny) je vidět na obrázku 32.



Obrázek 32: Vliv velikosti buněk na tlakové průběhy ze simulace

Tlakový průběh je nejbližší ostrému píku pro sondu ve vzdálenosti 3 m při nastavení nejmenších buněk (0,02 m), ale pro ostatní sondy je dosahováno „kopce“ bez prudkého nárůstu čela do ostré špičky. Detail pro sondy ve vzdálenosti 3 a 4 m je vidět na obrázku 33, kde je vidět značný rozdíl v maximální hodnotě tlaku i ostrosti čela RV.



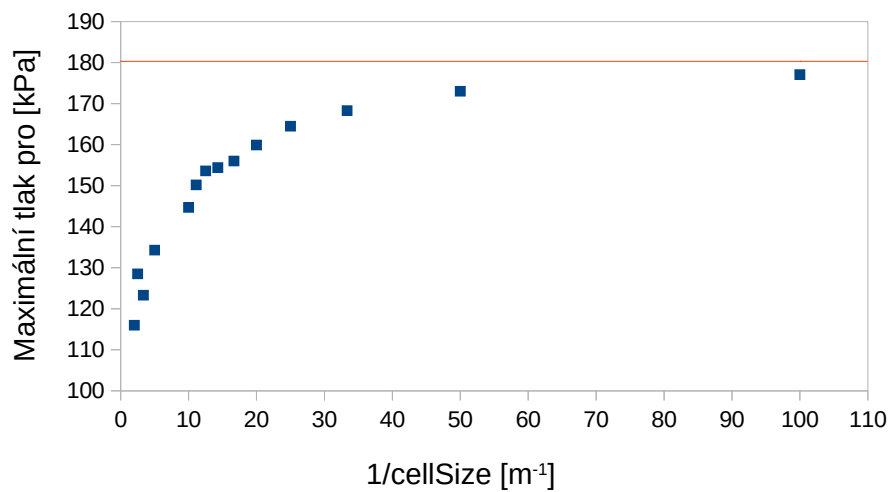
Obrázek 33: Vliv velikosti buněk (detail pro sondu ve 3 a 4 metrech)

Hodnoty maximálního tlaku (v kPa) a časy náběhu (v ms), které náležejí jednotlivým velikostem buněk pro sondy ve 3 a 4 metrech jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Vliv velikosti buněk ve vzdálenosti 3 a 4 metry

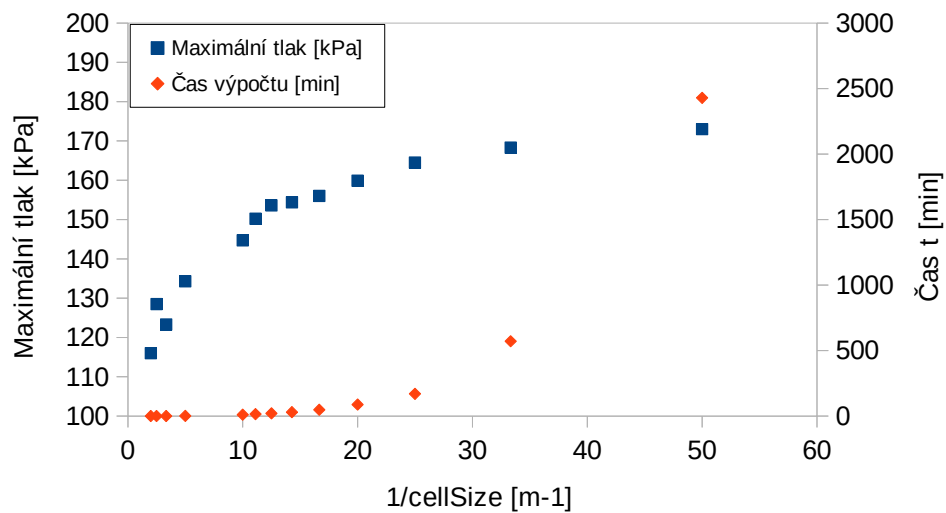
Velikost buněk [m]	Vzdálenost 3 m	Vzdálenost 4 m
0,1	144,4 kPa	126,8 kPa
	1,04 ms	1,43 ms
0,05	159,6 kPa	135,6 kPa
	0,61 ms	0,80 ms
0,02	172,7 kPa	143,5 kPa
	0,31 ms	0,43 ms

Vliv zmenšování velikosti buněk u simulace je vidět na obrázku 34. Z něho vyplývá, že tlak konverguje k hodnotě blízké 180 kPa pro sondu ve vzdálenosti 3 m, která odpovídá průměrné hodnotě experimentálně stanoveného tlaku (181 kPa).



Obrázek 34: Konvergence hodnot tlaku pro sondu ve vzdálenosti 3 m

Ačkoli se však hodnoty přibližují experimentální hodnotě, dochází k téměř exponenciálnímu růstu doby numerického experimentu, jak je vidět na obrázku 35, a proto je nutné využít v rámci optimalizované simulace adaptivní zahuštění sítě a ne síť statickou.



Obrázek 35: Demonstrace zvyšování doby výpočtu při zmenšování velikosti buněk statické sítě

7.2 Vliv výpočetního výkonu

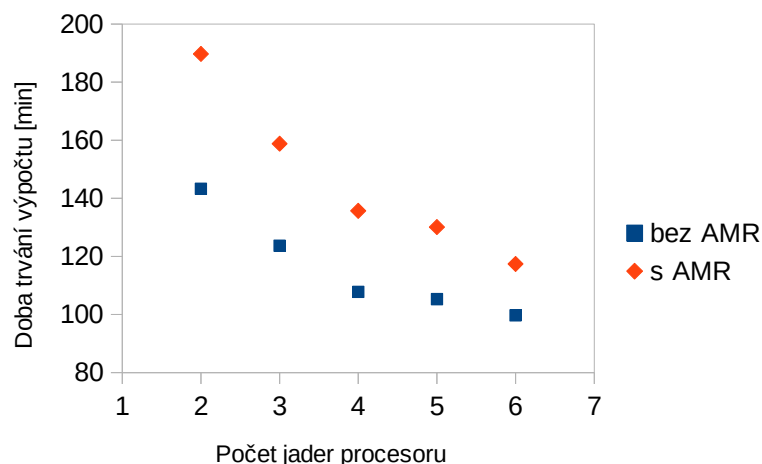
Byl sledován vliv použití rozdílného počtu jader procesoru v rámci paralelizace výpočtu pro simulaci bez dodatečného zjemnění AMR. Později byl pro úplnost vytvořen také experiment využívající AMR doplňující informace k délce numerických experimentů. Doby výpočtu při využití 2 až 6 jader z důvodu omezených možností osobního počítače jsou uvedeny v tabulce 4. Nebyl prováděn experiment využívající pouze 1 jádro z důvodu nutnosti úpravy spouštěcího skriptu a časové náročnosti experimentu.

Tabulka 4: Vliv výpočetního výkonu

Počet jader	Čas výpočtu bez AMR [min]	Čas výpočtu s AMR [min]
2	143,3	189,7
3	123,7	158,8
4	107,8	135,7
5	105,3	130,1
6	99,7	117,4

Výsledek vlivu výpočetního výkonu na simulaci je značný, jak vyplývá z tabulky 4. Dochází k významnému zpomalení výpočtu při snižování počtu jader a to jak pro simulaci využívající AMR, tak i pro simulaci bez AMR. Ačkoli jsou velikosti buněk u simulace s AMR výrazně nižší v zájmové oblasti, a jsou tedy získány i vyšší tlaky, než u experimentu se statickou sítí, je dosaženo podobných dob trvání numerických experimentů.

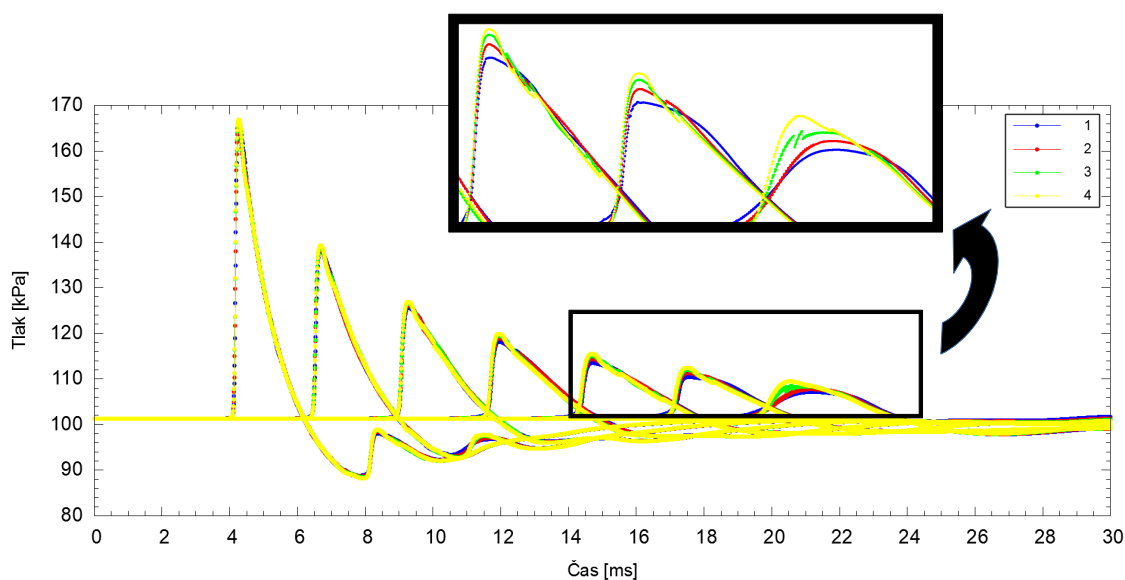
Z obrázku 36 pak plyne, že s rostoucím počtem jader se snižuje toto zrychlování výpočtu a to výrazněji pro statickou síť. To je způsobeno tím, že s vyšším počtem subdomén je vyžadováno také více komunikace mezi jádry.



Obrázek 36: Vliv výpočetního výkonu na délku numerického experimentu

7.3 Vliv počtu přidávaných vrstev u AMR

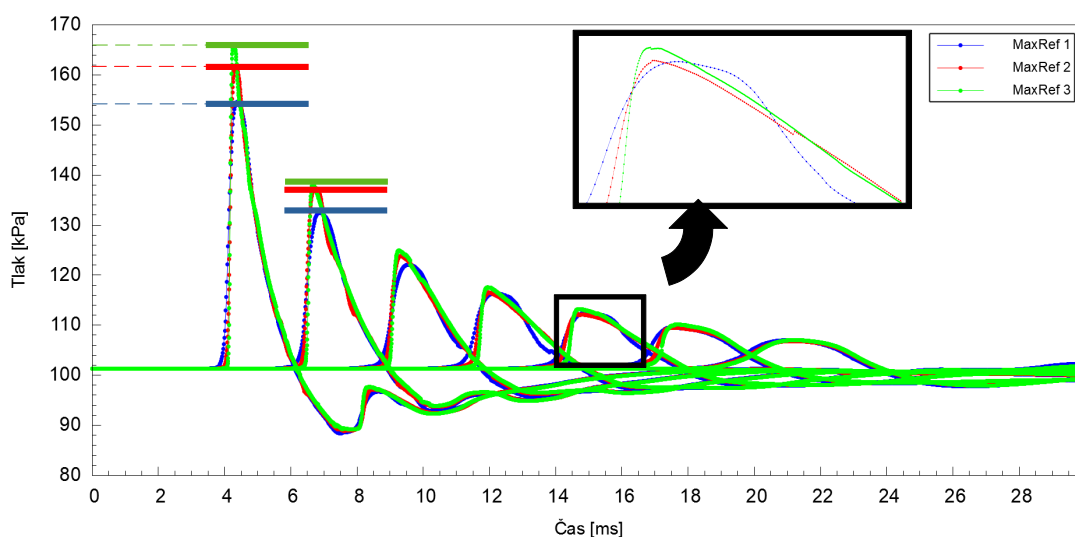
Přidávání vrstev do sítě před provedením zjemnění (`nBufferLayers`) se projevuje hlavně ve vzdálenějších oblastech (7,8 a 9 metrů; viz obrázek 37), kde dochází k menším změnám tlaku vlivem útlumu VRV. Z obrázku 37 vyplývá, že je třeba využít více než 1 vrstvy pro získání ostrého čela VRV a pro dosažení vyšších hodnot maximálního tlaku ve větších vzdálenostech.



Obrázek 37: Vliv počtu přidávaných vrstev před AMR na tlakové průběhy získané simulací

7.4 Vliv maximálního stupně zjemnění AMR

Způsob ovlivnění simulace pomocí maximálního stupně zjemnění (`maxRefinement`) je vidět na obrázku 38.



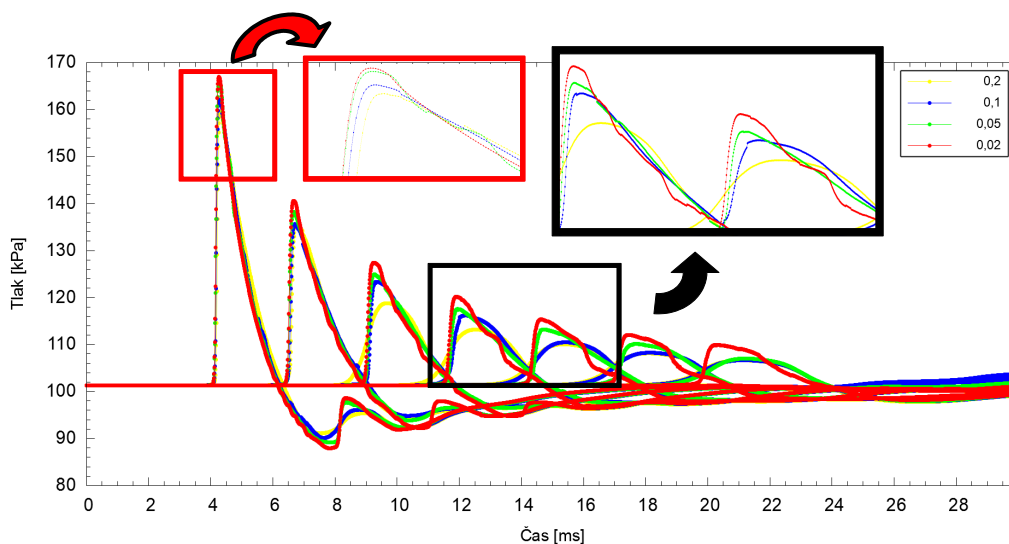
Obrázek 38: Vliv maximálního stupně zjemnění na hodnoty tlaku získané simulací

Použitím vyššího stupně zjemnění je dosaženo vyšších hodnot maximálního přetlaku získaného numerickým experimentem a jeho význam narůstá se zmenšující se vzdáleností k náloži, kde dochází k velkým změnám tlaku a je vyžadována malá velikost buněk. Zároveň však tento parametr ovlivňuje ostrost náběhu čela VRV a tlakový průběh, jak je vidět v detailu na obrázku 38. Pro získání přesných hodnot v kratší vzdálenosti od nálože a pro ideální tlakový průběh (viz obrázek 5, kap. 1.2.2) je třeba, aby byl zvolen vyšší stupeň zjemnění.

7.5 Vliv nastavení podmínky AMR pro zjemnění sítě

Nastavení, kdy má být provedeno zjemnění (`unrefineLevel` a `lowerRefineLevel`) je důležitý parametr, jehož vliv se projevuje nejvíce ve vzdálenosti 5 a 6 metrů (viz černý detail na obrázku 39). Má silný dopad na ostrost čela VRV v simulaci ve větších vzdálenostech. Zároveň ale při nastavení větší tolerance nedochází k efektivnímu zjemnění sítě (viz obrázek 39, sondy ve vzdálenosti 8 a-9 metrů), kde jsou vidět tlakové průběhy bez ostrých čel.

Parametr má nižší avšak nezanedbatelný vliv i v krátkých vzdálenostech od nálože (viz červený detail na obrázku 39).



Obrázek 39: Vliv nastavení podmínky zjemnění na tlakové průběhy získané simulací

Pro optimální simulaci je třeba využít menší toleranci odchylky, aby došlo k efektivnímu zjemnění sítě v celé zájmové oblasti (3 až 9 metrů).

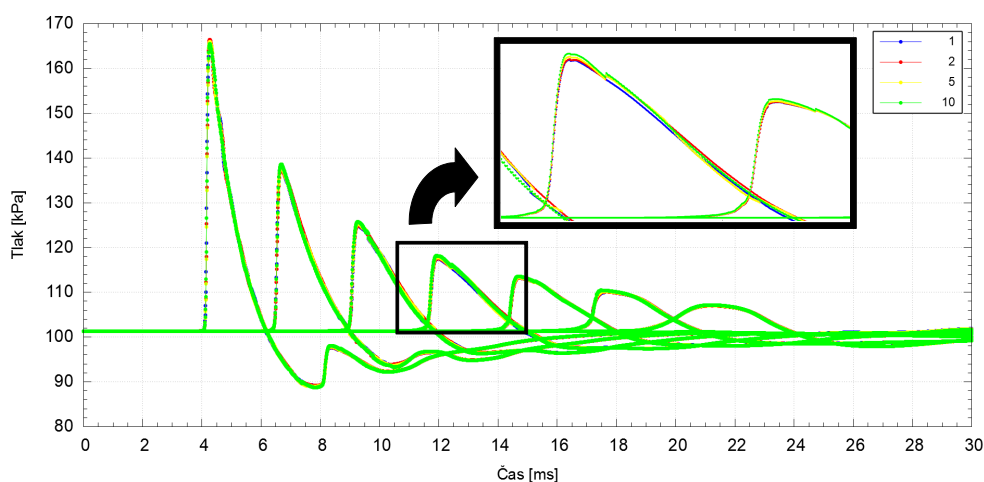
7.6 Vliv velikosti intervalu zjemnění při použití AMR

Interval pro provedení zjemnění (`refineInterval`) je parametr, který výrazně ovlivňuje dobu trvání simulace, jak je vidět v tabulce 5, kde zvětšení intervalu z 1 na 10 způsobilo zkrácení času o téměř polovinu (44 %).

Tabulka 5: Vliv velikosti intervalu zjemnění na dobu trvání výpočtu

Interval zjemnění	Doba výpočtu [min]
1	389
2	315
5	231
10	219

I přes značné ovlivnění doby výpočtu, nedochází změnou intervalu k výraznému ovlivnění tlakového průběhu (viz obrázek 40). Je však otázkou, zda nebude růst význam vlivu s délkou a náročností experimentu.

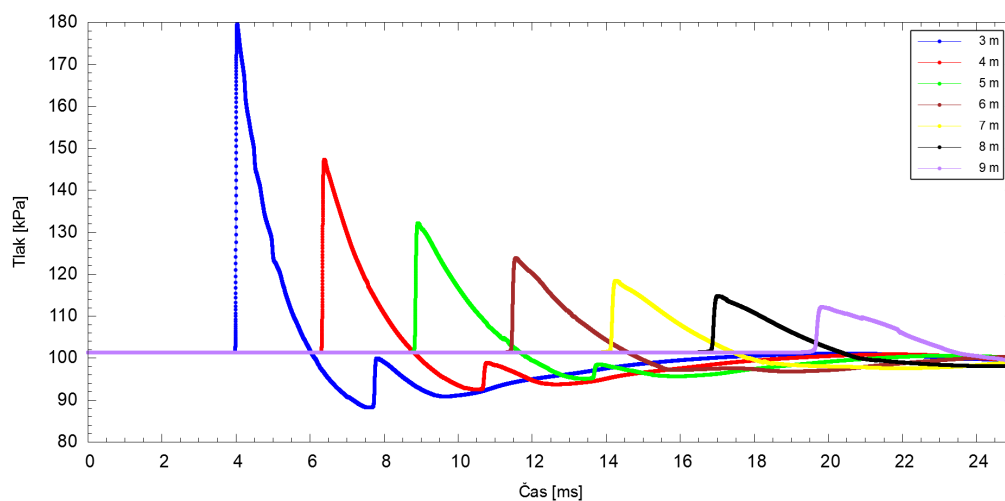


Obrázek 40: Vliv velikosti intervalu zjemnění na tlakové průběhy získané simulací

7.7 Optimalizovaná simulace

Při nastavování parametrů bylo využito poznatků z kap. 7.1 až 7.5 pro vliv parametrů na simulaci získaná data. Účelem optimalizace bylo přednostně získání tlakových průběhů, které odpovídají experimentálně získaným průběhům VRV v celé zájmové oblasti (3 až 9 metrů). Výsledek simulace je zobrazen na obrázku 41.

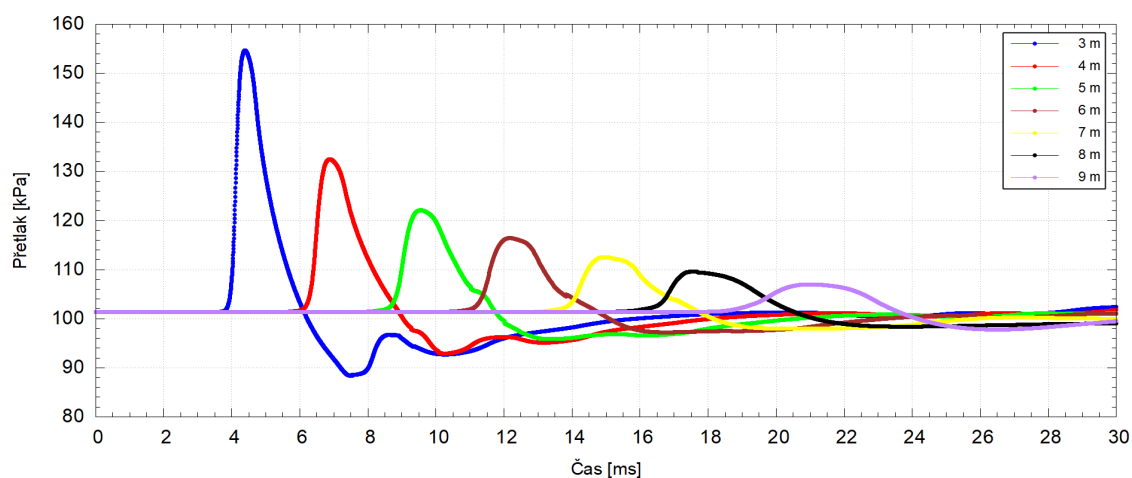
Bylo využito všech poznatků z kap. 7 kromě parametru `refineInterval`. Pro simulaci byl dostatek času a nebylo tak třeba riskovat vyšší ovlivnění výsledků tímto parametrem při využití vyšších hodnot zjemnění i přes potenciálně mnohem nižší časovou náročnost. Maximální přetlaky získané simulací jsou společně s impulzy a redukovanými impulzy uvedeny v tabulce 6. Tlakové průběhy před provedením optimalizace jsou pro srovnání zobrazeny na obrázku 42, s přetlaky, impulzy a redukovanými impulzy uvedenými v tabulce 7.



Obrázek 41: Tlakové průběhy z optimalizované simulace

Tabulka 6: Výsledky přetlaků a impulzů z optimalizované simulace

Vzdálenost tlakové sondy [m]	Přetlak [kPa]	Impulz [Pa·s]	Redukovaný impulz [Pa·s·kg ^{-1/3}]
3	78,98	59,65	75,15
4	46,68	46,2	58,21
5	31,48	38,56	48,58
6	23,08	32,1	40,44
7	17,78	27	34,02
8	14,18	23,22	29,26
9	11,38	22,36	28,18



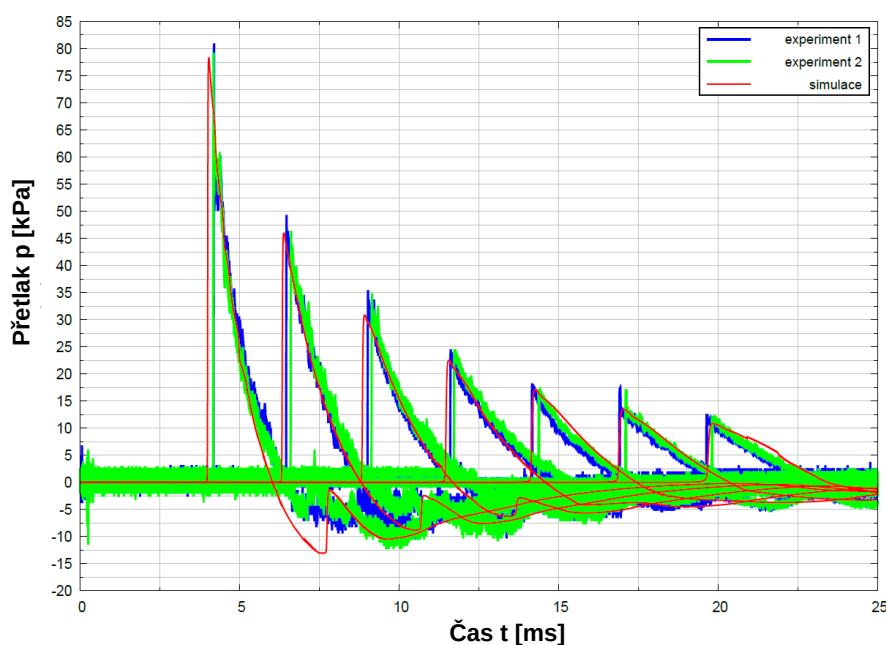
Obrázek 42: Tlakové průběhy z neoptimalizované simulace

Tabulka 7: Výsledky přetlaků a impulzů z neoptimalizované simulace

Vzdálenost sondy [m]	Přetlak [kPa]	Impulz [Pa·s]	Redukovaný impulz [Pa·s·kg ^{-1/3}]
3	65.4	54.229	67,76
4	37.7	42.466	52,65
5	25.3	34.962	42,47
6	18.2	27.866	35,24
7	13.8	24.952	30,81
8	0	0	26,72
9	7.2	0	21,98

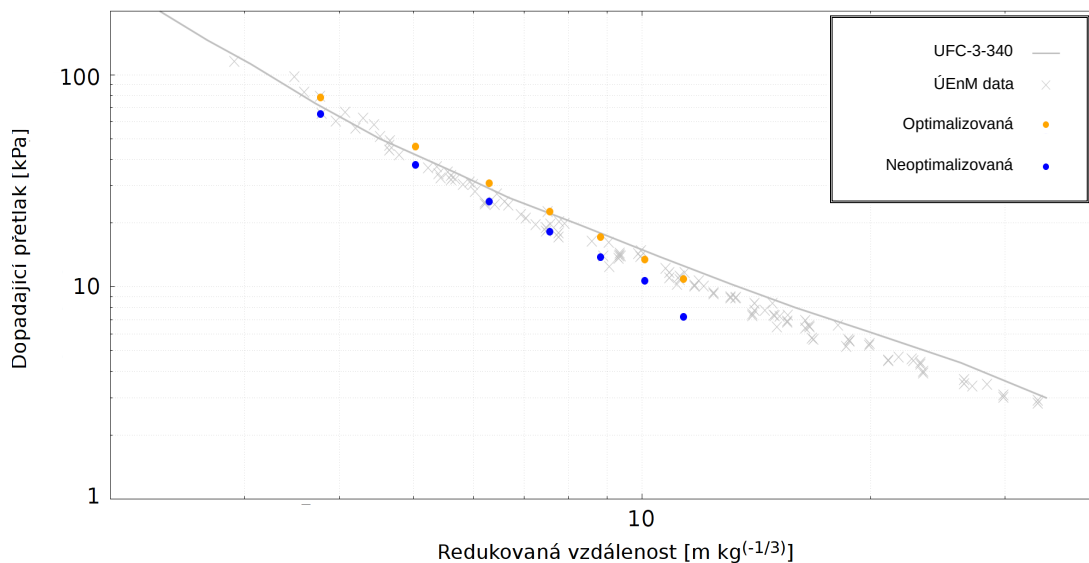
8 Porovnání výsledků experimentu a simulace

Shoda tlakových průběhů experimentálního měření a simulace je velmi uspokojivá a dochází u ní jen k malým rozdílům (viz obrázek 43). Průměrný rozdíl mezi hodnotami tlaku vypočítaných softwarem OpenFoam/BlastFOAM a získaných experimentem je 5,8 % (experiment 1) a 4,7 % (experiment 2). Průběhy jednotlivých experimentů s porovnáním k optimalizované simulaci jsou přiloženy v příloze B.



Obrázek 43: Porovnání tlakových průběhů experimentů a simulace

Výsledek úspěšné optimalizace v rámci přetlaků dokazuje také obrázek 44 zobrazující dosazení hodnot přetlaků obdržených ze simulace do souboru naměřených dat ÚEnM Univerzity Pardubice a UFC-3-340 [44].

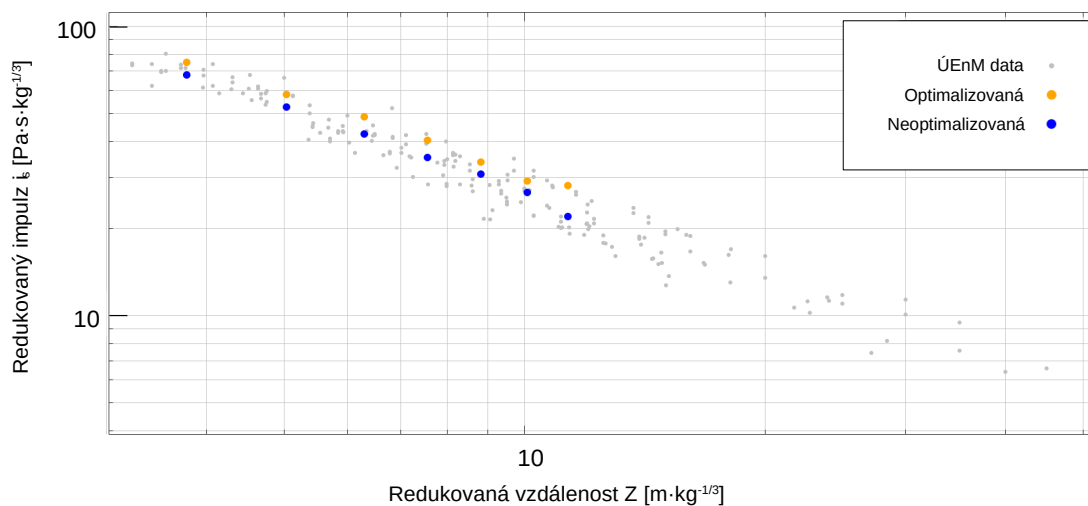


Obrázek 44: Porovnání přetlaků simulací s UFC a daty ÚEnM

V rámci srovnání tlakového průběhu v rozsahu 3-9 m (viz obrázek 43) je však patrný rozdíl mezi průběhem měření a simulací. Rozdíl experimentálních hodnot impulzů od hodnot získaných ze simulace přesahuje i 20 % (viz tabulka 8). Ačkoli se to však zdá významné, z porovnání hodnot redukovaných impulzů získaných ze simulace a datového souboru hodnot redukovaných impulzů ÚEnM Univerzity Pardubice (obrázek 45) je patrné, že hodnoty optimalizované a dokonce i neoptimalizované simulace odpovídají rozsahu experimentálních dat a že optimalizací nedošlo k významným změnám získaného impulzu.

Tabulka 8: Vyhodnocení impulzu

Vzdálenost sondy [m]	Experiment 1 [Pa·s]	Experiment 2 [Pa·s]	Průměr [Pa·s]	Simulace [Pa·s]	Rozdíl %
3	50,3	48,1	49,2	59,7	21,1
4	42,7	42,0	42,3	46,2	9,1
5	33,3	32,9	33,1	38,6	16,7
6	27,8	27,0	27,4	32,1	17,1
7	21,5	20,9	21,2	27,0	27,4
8	20,0	18,8	19,4	23,2	19,8
9	18,0	17,7	17,9	22,4	25,2



Obrázek 45: Porovnání redukovaných impulzů simulací s daty ÚEnM

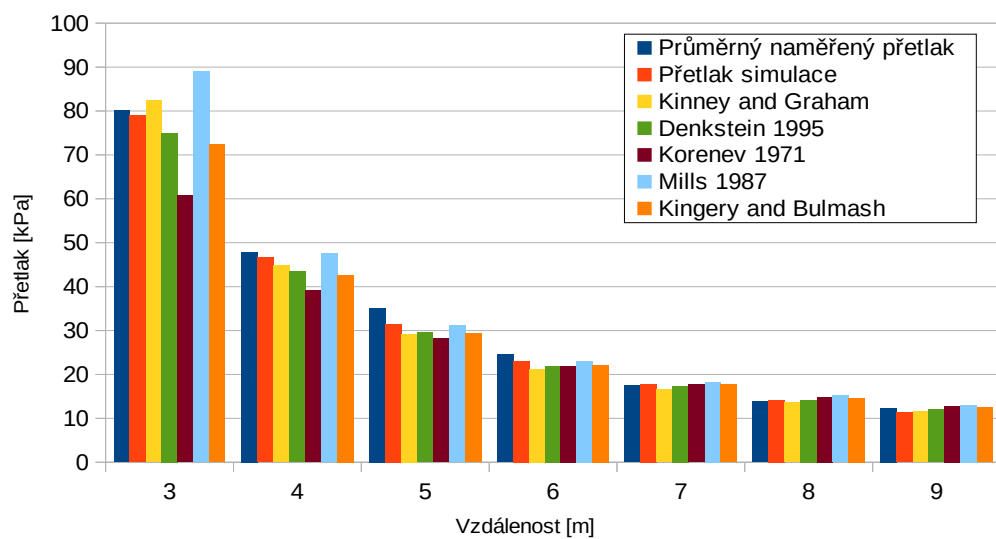
Na závěr bylo provedeno porovnání přetlaků a pozitivních impulzů, získaných ze simulace a experimentálního měření, s hodnotami přetlaků (tabulka 9) a impulzů (tabulka 10) získanými pomocí empirických vzorců.

Z grafického srovnání přetlaků z tabulky 9 (viz obrázek 46) je patrné, že jejich hodnoty odpovídají výsledkům poskytnuté experimentálním měřením a numerickému experimentu od vzdálenosti přibližně 6 m. V kratších vzdálenostech dochází při použití většiny porovnávaných empirických vztahů k získání nižších přetlaků.

Oproti tomu je z grafického porovnání pozitivních impulzů z tabulky 10 (viz obrázek 47) patrné, že porovnávané empirické vztahy poskytují vyšší hodnoty impulzu, které jsou v celém rozsahu prakticky stejné jako hodnoty impulzu z numerického experimentu. Výraznou výjimkou je zde však vztah Korenev 1971, který poskytuje hodnoty výrazně nižší než ostatní srovnávané vztahy nebo numerický experiment.

Tabulka 9: Porovnání přetlaku ze simulace, experimentů a empirických rovnic

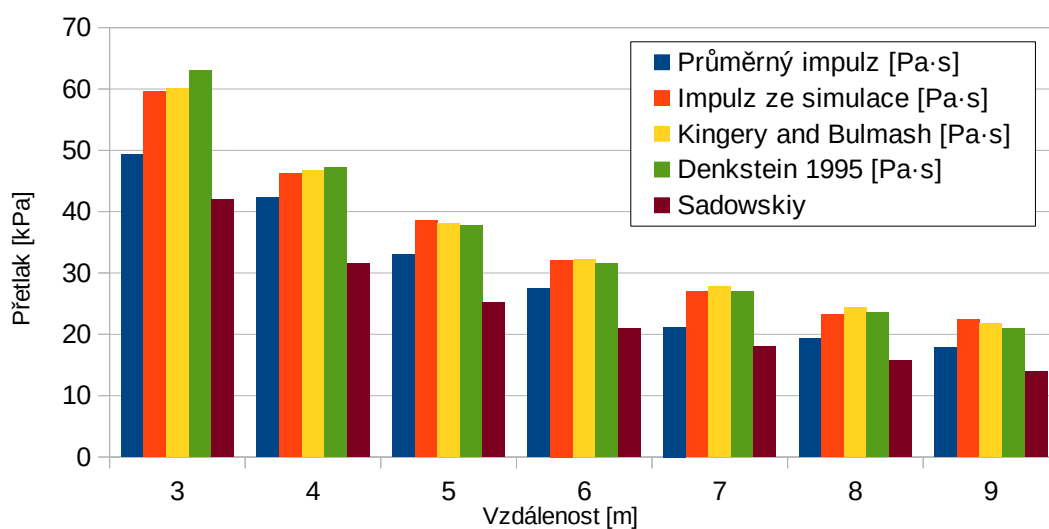
Zdroj	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m
Přetlak naměřený 1 [kPa]	81,0	49,3	35,4	24,5	18,0	14,0	12,6
Přetlak naměřený 2 [kPa]	79,3	46,4	34,9	24,5	17,0	13,8	12,2
Průměrný naměřený přetlak [kPa]	80,1	47,9	35,2	24,5	17,5	13,9	12,4
Přetlak simulace [kPa]	79,0	46,7	31,5	23,1	17,8	14,2	11,4
Denkstein 1995 [kPa] [13, 15]	75,0	43,5	29,5	22,0	17,3	14,2	12,1
Korenev 1971 [kPa] [13]	88,3	55,6	39,5	30,3	24,3	20,2	17,3
Mills 1987 [kPa] [45]	89,0	47,6	31,2	23,0	18,3	15,2	13,0
Kinney and Graham [kPa] [46]	82,3	44,9	29,2	21,3	16,6	13,6	11,5
Kin. & Bulmash [kPa]	72,4	42,6	29,4	22,1	17,7	14,7	12,5



Obrázek 46: Grafické porovnání přetlaku ze simulace, experimentů a empirických rovnic

Tabulka 10: Porovnání impulzu ze simulace, experimentů a empirických rovnic

Zdroj	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m
Impulz experiment 1 [Pa·s]	50,3	42,7	33,3	27,8	21,5	20,0	18,0
Impulz experiment 2 [Pa·s]	48,1	42,0	32,9	27,0	20,9	18,8	17,7
Průměrný impulz [Pa·s]	49,2	42,3	33,1	27,4	21,2	19,4	17,9
Impulz ze simulace [Pa·s]	59,7	46,2	38,6	32,1	27,0	23,2	22,4
Kingery and Bulmash [Pa·s]	60,2	46,7	38,1	32,2	27,8	24,4	21,8
Denkstein 1995 [Pa·s] [13]	63,0	47,2	37,8	31,5	27,0	23,6	21,0
Sadowskiy [Pa·s] [47]	42,0	31,5	25,2	21,0	18,0	15,7	14,0



Obrázek 47: Grafické porovnání impulzu ze simulace, experimentů a empirických rovnic

ZÁVĚR

V teoretické části této diplomové práce byla představena detonace a její projevy, mezi které patří vzdušná rázová vlna (VRV). U té byly popsány její vlastnosti, její šíření a představeny redukované charakteristiky, které slouží k porovnávání parametrů VRV vzniklých detonací rozdílných náloží. Bylo představeno CFD a balík OpenFOAM/BlastFOAM, který je možné využít k získání parametrů VRV numerickou cestou. Byla zde popsána jeho struktura a význam jednotlivých slovníků, pomocí kterých dochází k nastavení výpočtu.

Bylo provedeno experimentální měření parametrů vzdušných rázových vln vzniklých detonací půlkilové polokulové nálože Semtexu 1A umístěné na zemi. K měření bylo využito tužkových sond umístěných ve vzdálenosti 3-9 m po 1 m, osciloskopu a nově také zařízení DAQ Sirius od společnosti Dewesoft. Celkem byly provedeny 2 experimentální měření a výsledné hodnoty přetlaků a pozitivních impulzů byly shrnuty do tabulky.

Byla provedena řada numerických experimentů založených na řešeném výukovém případě axisymetrické nálože aplikovaného pro zjednodušenou geometrii (klín), jejíž cílem bylo zjištění vlivu jednotlivých vstupních parametrů na hodnoty přetlaků a délku numerického experimentu při simulaci detonace půlkilové polokulové nálože TNT.

Nejprve byl sledován vliv zmenšování velikosti buněk na výsledné přetlaky a délku experimentu. Se zmenšující se velikostí bylo sice dosaženo vyšších tlaků, které se blížily tlakům z experimentálního měření, ale za cenu neúměrně vysokého navýšení doby trvání numerického experimentu, což ukázalo na nutnost použití AMR v rámci optimalizované simulace.

Byly provedeny také numerické experimenty zaměřující se na počet jader v rámci paralelizace výpočtu, který ukázal výrazné zkrácení doby experimentu s přibývajícím počtem jader. S rostoucím počtem jader však docházelo ke snižování významu paralelizace, protože se zároveň zvyšovala nutnost komunikace mezi jádry procesoru na okrajích subdomén.

Další numerické experimenty byly zaměřeny na vstupní parametry AMR. Bylo zjištěno, že pro výpočet přetlaků je vhodné využít vyšší úroveň zjemnění, zatím co pro zpřesnění hodnot tlaků pro vzdálenost 4-9 metrů je nutné využít více vrstev předcházející AMR a nižší hodnotu

podmínky zjemnění. Posledním sledovaným parametrem, který však nebyl v rámci optimalizované simulace využit byl parametr nastavující interval, ve kterém má ke zjemnění sítě pomocí AMR docházet. U něj bylo zjištěno, že zásadním způsobem ovlivňuje délku výpočtu, přičemž při prováděných numerických experimentech došlo ke zkrácení až téměř o polovinu. Ačkoli nebyl pozorován výrazný vliv tohoto parametru na výsledné tlaky v relativně rychlých numerických experimentech, není jisté, zda jeho použitím u dlouhých a náročných simulací nedojde k výraznému zhoršení výsledků. Po analýze výsledků vlivu jednotlivých parametrů bylo vytvořeno nastavení pro optimalizovanou simulaci.

Výsledky této optimalizované simulace, tedy přetlak a pozitivní impulz, byly porovnány s hodnotami z provedeného experimentálního měření parametrů VRV. V rámci přetlaků došlo k velmi uspokojivým výsledkům, když rozdíl numerických hodnot od hodnot experimentálních činil v průměru pouze 5,25 % (4,7 % pro experiment 1 a 5,7 % pro experiment 2). Při porovnání impulzů došlo k výraznějším rozdílům, které dosahovaly až 20 %. Bylo provedeno porovnání redukovaných impulzů z optimalizované i neoptimalizované simulace s daty ÚEnM a přetlaků z optimalizované i neoptimalizované simulace s UFC a ÚEnM daty, které ukázaly výraznou shodu. Výjimkou však byla hodnota přetlaku z neoptimalizované simulace, která datům při větší redukované vzdálenosti neodpovídala.

Bylo také provedeno srovnání přetlaků a pozitivních impulzů ze simulace a experimentálního měření s několika empirickými vztahy. V případě impulzu došlo k dobré shodě u většiny srovnávaných vztahů s výsledky numerického experimentu v celém zájmovém rozsahu 3-9 m. Výsledky pro simulaci i pro většinu empirických vztahů však nabývaly vyšší hodnoty než jakých bylo dosaženo během experimentálního měření. V případě přetlaku došlo k dobré shodě většiny empirických vztahů s hodnotami ze simulace i měření od vzdálenosti 5 m.

Tato práce se však zabývá nejjednodušším případem axisymetrické nálože a to v zásadě pouze pro 2D prostor pomocí aplikace pro geometrii klínu. Dalším směřováním by se mohlo jevit využití balíku OpenFOAM/BlastFOAM pro simulaci 3D prostoru, simulaci rozdílné a složitější geometrie nálože, simulaci zahrnující odrazy VRV a nebo simulaci využívající větší počet náloží, které mohou být rozdílného tvaru i složení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VÁVRA, Pavel. *Teorie výbušin: učební texty - licenční studium*. 1. vydání. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-116-0.
- [2] DOJČÁR, Ondrej, Jiří. HORKÝ a Robert KORÍNEK. *Trhacia technika*. Ostrava: Montanex, 1996. ISBN 978-80-85780-69-7.
- [3] NOVOTNÝ, M., R. MEČÍŘ, S. SEDLÁČEK a V. TAMCHYNA. *Teorie výbušin*. Pardubice: VŠCHT Pardubice, 1981.
- [4] MINCHINTON, A. On the Influence of Fundamental Detonics on Blasting Practice. In: *11th international symposium on rock fragmentation by blasting: FragBlast11*. Sydney, New South Wales: AusIMM, 2015, s. 827. FragBlast. ISBN 1-925100-32-4.
- [5] SLUKA, Vilém. *Výkladový terminologický slovník některých pojmů používaných v posouzení rizik závažné havárie pro účely zákona o prevenci závažných havárií* [online]. B.m.: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v. v. i., 2019. Dostupné z: <https://vubp.cz/soubory/prevence-zavaznych-havarii/metodiky/vykladovy-terminologicky-slovník-unor-2019.pdf>
- [6] VÁVRA, Pavel a Jiří VÁGENKNECHT. *Teorie působení výbuchu: licenční studium*. Vyd. 2. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-125-2.
- [7] TYAS, Andrew. Experimental Measurement of Pressure Loading from Near-Field Blast Events: Techniques, Findings and Future Challenges. In: *The International Conference on Experimental Mechanics: The 18th International Conference on Experimental Mechanics* [online]. Brusel, Belgie: MDPI, 2018, s. 471 [vid. 2023-10-08]. Dostupné z: doi:10.3390/ICEM18-05364
- [8] CIMPOERU, Stephen J., David V. RITZEL a John M. BRETT. Physics of Explosive Loading of Structures. In: *Explosion Blast Response of Composites* [online]. B.m.: Elsevier, 2017 [vid. 2024-01-14], s. 1–22. ISBN 978-0-08-102092-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102092-0.00001-7
- [9] FROST, David L., John-Mark CLEMENSON, Samuel GOROSHIN, Fan ZHANG a Michael SOO. Thermocouple Temperature Measurements in Metalized Explosive Fireballs. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* [online]. 2021, **46**(6), 899–911. ISSN 0721-3115, 1521-4087. Dostupné z: doi:10.1002/prop.202000328
- [10] RIGBY, Sam, Ben FULLER a Andy TYAS. Validation of Near-Field Blast Loading in LS-DYNA. In: *5th International Conference on Protective Structures: ICPS5 2018*. Poznaň, Polsko: COMPRINT Advertising Agency, 2018. ISBN 978-83-89333-71-1.

- [11] ZHOU, Ye, Robin J.R. WILLIAMS, Praveen RAMAPRABHU, Michael GROOM, Ben THORNER, Andrew HILLIER, Wouter MOSTERT, Bertrand ROLLIN, S. BALACHANDAR, Phillip D. POWELL, Alex MAHALOV a N. ATTAL. Rayleigh–Taylor and Richtmyer–Meshkov instabilities: A journey through scales. *Physica D: Nonlinear Phenomena* [online]. 2021, **423**, 132838. ISSN 01672789. Dostupné z: doi:10.1016/j.physd.2020.132838
- [12] PANTOFLÍČEK, Jaroslav a František LÉBR. *Teorie působení výbuchu I: výbuchové vlny*. 1. Praha: SNTL, 1967.
- [13] ČERNÍN, Milan, Jaroslav DAMEC, Jiří DOHNÁLEK, Pavel DOHNÁLEK, Břetislav JANOVSKÝ, Jaroslav JAVŮREK, Jaromír KRÁL, Daniel MAKOVIČKA, Daniel MAKOVIČKA, Tadeáš PODSTAWKA, Vlastimil PROKOP, Marie STUDNIČKOVÁ, Petr ŠELEŠOVSKÝ a Jan ZIGMUND. *Příručka protivýbuchové ochrany staveb* [online]. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04090-4. Dostupné z: <http://www.makovicka.cz/data/S/U/t/2008-pvoch-cz.pdf>
- [14] *Explosive Modeling: Airblast Anatomy | Pete and RePete* [online]. 2021 [vid. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=uOm6a70tKgA>
- [15] MAKOVIČKA, Daniel a Daniel MAKOVIČKA. *Navrhování stavební konstrukce při zatížení tlakovou vlnou od výbuchu* [online]. B.m.: ČVUT v Praze, Kloknerův ústav. 2010. Dostupné z: <http://www.makovicka.cz/data/e/E/P/2009-po-cz.pdf>
- [16] HEYLMUN, Jeff, Peter VONK a Timothy BREWER. *blastFoam Theory and User Guide*. Austin, USA: Synthetik Applied Technologies. 30. srpen 2022
- [17] FUKA, Vladimír. *Modelování proudění ve vysokém rozlišení* [online]. Praha, 2006. Diplomová práce. Univerzita Karlova. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/7704/DPTX_2004_1_11320_NSZZ016_214923_0_41983.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [18] *Modelování proudění metodou CFD_1: Přednáška | E-learning VŠCHT* [online]. video. Praha: VŠCHT. 4. duben 2021 [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://e-learning.vscht.cz/mod/url/view.php?id=63545&forceview=1>
- [19] *blastFoam: An OpenFOAM Solver for Compressible Multi-Fluid Flow with Application to High-Explosive Detonation* [online]. B.m.: Synthetik Applied Technologies LLC. 22. říjen 2019. Dostupné z: <https://github.com/synthetik-technologies/blastfoam>
- [20] ZBAVITEL, Jan. *OPENFOAM: MOŽNOSTI OPEN-SOURCE CFD* [online]. Brno, 2016. Bakalářská práce. VÚT - Vysoké učení technické. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=129311
- [21] KRAMOLIŠ, David. *Matematické modelování transportu hybnosti*. scriptum. 31. říjen 2022

- [22] BREWER, Tim, Peter VONK a Jeff HEYLMUN. *blastFoam3.0 Workshop [May 13, 2020]* [online]. 15. květen 2020. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=0YYrkwnNWM6U>
- [23] BREWER, Tim, Peter VONK a Jeff HEYLMUN. *blastFoam3.5 Workshop [July 14, 2020]* [online]. 24. červen 2020. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=OLpRcjR3cW4&t=13627s>
- [24] GREENSHIELDS, Chris. OpenFOAM v9 User Guide. *CFD Direct* [online]. 14. červenec 2021 [vid. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v9/>
- [25] PHILIP, Cardiff. Introduction to Meshing in OpenFOAM. In: *UK & Éire FOAM/OpenFOAM User Day: 5th UK & Ireland FOAM/OpenFOAM User Day* [online]. Dublin, Irsko: ResearchGate, 2017 [vid. 2023-11-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/325218270_Introduction_to_Meshing_in_OpenFOAM
- [26] ANON. Boundary types. *Node94 - CFD SUPPORT* [online]. [vid. 2023-12-02]. Dostupné z: <https://www.cfdsupport.com/openfoam-training-by-cfd-support/node94.html>
- [27] [blockMesh] mergePatchPairs with blockMesh -- CFD Online Discussion Forums. In: *OpenFOAM -- CFD Online Discussion Forums* [online]. září 2019 [vid. 2023-12-02]. Dostupné z: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-meshing/90357-mergepatchpairs-blockmesh.html>
- [28] ANON. Parallel decomposition. *Node90 - CFD SUPPORT* [online]. [vid. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.cfdsupport.com/openfoam-training-by-cfd-support/node90.html>
- [29] MATHIEU, David, Eric HUSS, Michael BRYAN, Matt ICKSTADT, Michał BUDZYŃSKI a Josh ROTENBERG. OpenFoam® Handbook. *Adige Calculations* [online]. [vid. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://openfoam-handbook.adigecalculations.com/preface.html>
- [30] *OpenFOAM fvSchemes explained in under 5 mins* [online]. video. 25. duben 2022 [vid. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=JIB6y8NSI20>
- [31] GUERRERO, Joel. *Dynamic meshes in OpenFOAM: Mesh morphing, overset meshes, sliding meshes, moving bodies, rigid body motion, and adaptive mesh refinement* [online]. Janov, Itálie: Wolf Dynamics. červen 2021. Dostupné z: http://www.wolfdynamics.com/training/movingbodies/OF2021/dynamicmeshes_2021_OF8.pdf
- [32] ABELLA, Vitor. How are dimension units on openFoam? In: *Computational Science Stack Exchange* [online]. 31. srpen 2018 [vid. 2023-12-07]. Dostupné z: <https://scicomp.stackexchange.com/questions/30121/how-are-dimension-units-on-openfoam>

- [33] *Zero Gradient boundary condition in CFD (OpenFOAM)* [online]. 2022 [vid. 2023-12-07]. OpenFoam. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=4xGGMQxkw0Y>
- [34] HEATHER, Andrew, Mattijs JANSSENS, Mark OLESEN, Prashant SONAKAR, Pawan GHILDIYAL, Kutalmış BERÇİN, Matej FORMAN, Chiara PESCI, Martin LICHTMES, Jiri POLANSKY, Mohammad Ashfaqul BARI, Ann RONCHETTI, Fred MENDONÇA, Swapnil SALOKHE, Venkata Ramana EAGA a Josep POCURULL. OpenFOAM v2312. *OpenFOAM®* [online]. prosinec 2023 [vid. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.openfoam.com/news/main-news/openfoam-v2312>
- [35] WALTER, Patrick L. *Introduction to Air Blast Measurements - Part I* [online]. B.m.: PCB Piezotronics. 2022. Dostupné z: https://www.pcb.com/contentstore/mktgcontent/linkedddocuments/technotes/TN-12-0714_Air_Blast_Lowresv2.pdf
- [36] SHOWALTER, Benjamin. *Utilization of Pencil Probes in Blast Experiments for the Explosive Effects Branch* [online]. Technická zpráva. ARL-TN-1034. B.m.: CCDC Army research laboratory. 2020. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1110073.pdf>
- [37] SAJKOWSKI, Michal. Courant Number in CFD. *SimFlow* [online]. 2. duben 2023 [vid. 2024-03-05]. Dostupné z: <https://sim-flow.com/courant-number-in-cfd/>
- [38] ANON. CFD - Transient Analysis / Moving Mesh. *Trivista Engineering Ltd.* [online]. 14. září 2015 [vid. 2024-03-05]. Dostupné z: <https://trivista.co.uk/design-and-analysis/cfd-overview/transient-analysis-moving-mesh/>
- [39] ANON. Domain Decomposition. *Moldex3D SYNC 2022 for NX* [online]. 2022 [vid. 2023-11-25]. Dostupné z: https://support.moldex3d.com/2022/sync/sync-for-nx/1-1-6-4_domaindecomposition.html
- [40] ALBERTO. DecomposePar - OpenFOAMWiki. *OpenFOAMWiki* [online]. 25. listopad 2009 [vid. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://openfoamwiki.net/index.php/DecomposePar>
- [41] NICKNINEVAH. DynamicMeshDict - OpenFOAMWiki. *OpenFOAMWiki* [online]. 29. srpen 2019 [vid. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://openfoamwiki.net/index.php/DynamicMeshDict>
- [42] HEYLMUN, Jeff, Peter VONK a Timothy BREWER. *blastFoam Theory and User Guide*. Austin, USA: Synthetik Applied Technologies. 30. říjen 2019
- [43] NICKNINEVAH. Parameter Definitions - dynamicRefineFvMesh - OpenFOAMWiki. *OpenFOAMWiki* [online]. 8. srpen 2020 [vid. 2024-02-22]. Dostupné z: https://openfoamwiki.net/index.php/Parameter_Definitions_-_dynamicRefineFvMesh#Refine_Interval

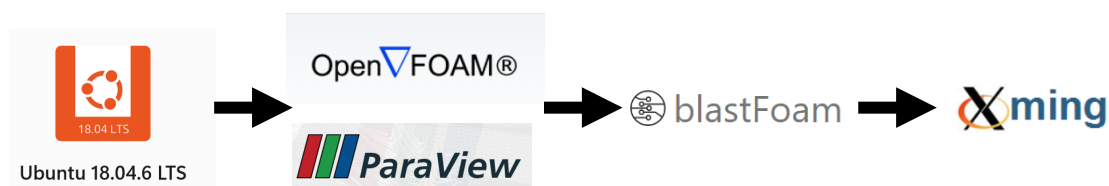
- [44] JAMES C., Dalton, Gott JOSEPH E., Parker PAUL A., McAndrew MICHAEL a Bowling CURTIS. *UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* [online]. B.m.: U. S. Department of Defense. 5. prosinec 2008. Dostupné z: https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ARCHIVES/ufc_3_340_02.pdf
- [45] JANNEY, Sarah Beth. *Blast Resistant Design of Steel Structures* [online]. Knoxville, Tennessee, USA, 2007. Magisterská práce. The University of Tennessee UTK. Dostupné z: https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1179&context=utk_gradthes&unstamped=1
- [46] FILICE, Anselmo, Miroslav MYNARZ a Raffaele ZINNO. Experimental and Empirical Study for Prediction of Blast Loads. *Applied Sciences* [online]. 2022, 12(5), 2691. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12052691
- [47] BAJI, Zoran, Jovica BOGDANOV a Radun JEREMI. Blast Effects Evaluation Using TNT Equivalent. *Scientific Technical Review*. 2009, Vol LIX(3–4).
- [48] *blastFoam: How to install and run a simulation in Windows 10* [online]. 21. duben 2020 [vid. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=vfd610LadSU>
- [49] ANON. Povolte Linuxový podsystém a nainstalujte Ubuntu ve Windows 10. *SSL.com* [online]. 5. březen 2020 [vid. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://www.ssl.com/cs/jak/povolit-linuxov%C3%BD-subst%C3%A9m-instalovat-Ubuntu-Windows-10/>
- [50] GREENSHIELDS, Chris. Download v7 | Ubuntu | OpenFOAM. *OpenFOAM* [online]. 8. červen 2019 [vid. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://openfoam.org/download/7-ubuntu/>
- [51] GERGANOV, Hiks. *What Is rc and What Are rc Files? | Baeldung on Linux* [online]. 3. duben 2022 [vid. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://www.baeldung.com/linux/rc-files>
- [52] HARTINGER, David Čápka. Lekce 10 - Linuxový terminál (Bash) - Standardní vstup/výstup a expanze. *itnetwork.cz* [online]. 5. srpen 2014 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/linux-bash-standardni-vstup-vystup-a-expanze>
- [53] COLINHARRISON. Xming X Server for Windows. *SourceForge* [online]. 9. srpen 2016 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://sourceforge.net/projects/xming/>
- [54] *synthetik-technologies/blastfoam* [online]. C. Austin, USA: Synthetik Applied Technologies. 20. říjen 2019 [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://github.com/synthetik-technologies/blastfoam>
- [55] BOŘÁNEK, Roman. Visual Studio Code: nový editor od Microsoftu zdarma. I pro Linux. *Root.cz* [online]. [vid. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.root.cz/zpravicky/visual-studio-code-novy-editor-od-microsoftu-zdarma-i-pro-linux/>

PŘÍLOHY

Příloha A – Instalace.....	90
Instalace terminálu Linux (WSL).....	90
Instalace OpenFOAM 9.....	91
Instalace programu BlastFOAM.....	93
Instalace Xming X Server pro Windows a zobrazení výsledné simulace.....	94
Otestování správné funkce softwaru BlastFOAM.....	95
Přidání možnosti pro práci s daty v prostředí OS Windows.....	97
Příloha B– Porovnání tlak. průběhů jednotlivých experimentů se simulací.....	98

Příloha A – Instalace

Instalaci programu BlastFOAM lze provést pro zařízení v operačním systému Linux. S vývojem OS Windows lze však BlastFOAM nainstalovat i pro něj s využitím prostředí WSL (podsystem Windows pro Linux) pomocí návodu [48]. Před započítím instalace BF pro Windows je nutno nainstalovat systém Linux (WSL), která je dostupná pro Windows 10 (verze 1709 nebo vyšší [49]) a Windows 11. Ve výchozím nastavení Windows je však tato možnost zakázána. Postup instalace lze shrnout obrázkem 48. [48, 49]



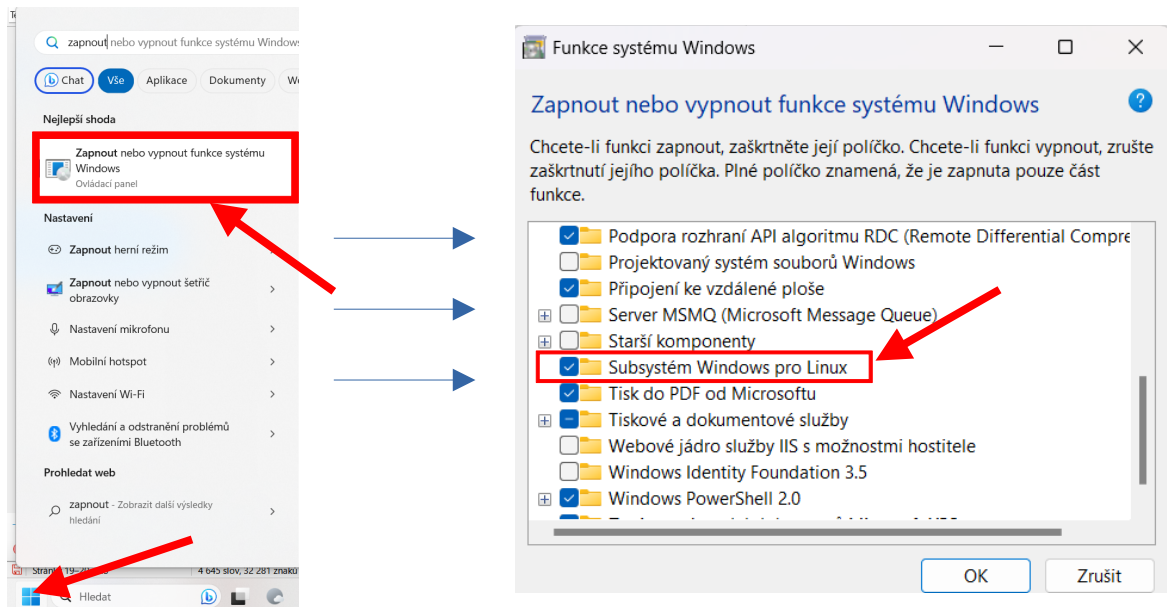
Obrázek 48: Postup instalace

Nejprve je nainstalován systém Linux, do kterého je následně nainstalován OpenFOAM (OF). BlastFOAM (verze 6.0) je kompatibilní s prostředím OF 9. Součástí instalace OF je i instalace aplikace Paraview, která slouží pro zobrazení simulace. Po instalaci softwaru OpenFOAM je pak nainstalován BF a aplikace Xming, která umožní zobrazení výstupního terminálu v OS Windows. Na závěr je vhodné provést úpravu, která umožní vizualizaci souborů a práci s nimi v prostředí Windows. [16, 48]

Celý proces instalace byl společností Synthetik Applied Technologies demonstrován pomocí videí dostupných veřejnosti na platformě YouTube a je dostupný i v příručce k používání BF. [16, 48]

Instalace terminálu Linux (WSL)

Pro instalaci OS Linux pod Windows je nutno povolit použití funkce WSL v nastavení Windows (Start > Zapnout nebo vypnout funkce systému Windows > Subsystem Windows pro Linux ; viz obrázek 49). [49]



Obrázek 49: Povolení WSL

Dalším krokem je samotná instalace systému Linux, který je dostupný skrze aplikaci Microsoft store. Pro instalaci je doporučený systém Ubuntu 18.04 LTS [48]. Po stažení a otevření aplikace dochází k otevření terminálu a instalaci systému. Po dokončení instalace je uživatel vyzván k volbě uživatelského jména a hesla. [48]

Instalace OpenFOAM 9

Po instalaci systému Linux následuje instalace výpočetního softwaru OpenFOAM 9 (zkompilovaný balíček pro Ubuntu; OF 9). Instalace OF je velmi jednoduchá při dodržení postupu dle [48, 50]. Součástí instalace OF 9 je také instalace aplikace paraview (verze 5.6.3), která je využívána pro zobrazení výsledků, tedy simulací [50].

Proces začíná otevřením terminálového okna (Ubuntu 18.04), do kterého je postupně zadány následující příkazy, které slouží k zahájení instalace a stažení souborů pro OF a jsou zadávány pouze jednou pro daný OS. [48, 50]

Příkaz 1: Zahájení stahování

```
sudo sh -c "wget -O - https://dl.openfoam.org/gpg.key | apt-key add -"
sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu
```

Po stažení je nejprve provedena aktualizace instalačního balíčku a následně je (dle příkazů 2) spuštěna instalace OF 9. [48, 50]

Příkaz 2: Instalace OpenFOAM 9

```
sudo apt-get update
sudo apt-get -y install openfoam9
```

Po dokončení instalace by měla být dle [48] provedena kontrola aktualizací OF zadáním následujících příkazů 3 a následné potvrzení případných aktualizací.

Příkaz 3: Kontrola aktualizací

```
sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
```

Závěrečný instalační krok dle [50] však obsahuje problém, protože Linux (WSL) neobsahuje ve své databázi editor `gedit` [48]. Proto je uživateli dle [48] doporučováno použití následujícího příkazu 4 pro přidání source `/opt/openfoam9/etc/bashrc` do `rc` složky (konfigurační soubor, spustí příkazy po otevření, Run Command [51]). [48, 50]

Příkaz 4: Přidání cesty

```
echo "source /opt/openfoam9/etc/bashrc" >> $HOME/.bashrc
```

Následně je nutné načíst a nastavit prostředí OF (bash; linuxový terminál) a to následujícím příkazem 5. [48, 52]

Příkaz 5: Nastavení prostředí OF

```
source $HOME/.bashrc
```

Tím byla dokončena instalace OF 9. Správnost instalace, respektive funkčnost prostředí OF lze otestovat příkazem `blockMesh`, který ukáže v terminálu hlavičku OF, příkaz a kritickou chybu (viz obrázek 50), protože chybí zadefinování sítě (viz kapitola 3.2.1). [48]

```

-----
      \  / Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
      /  \ Operation  | Website: https://openfoam.org
      /    \ Manipulation | Version: 9
-----
Build : 9-b456138dc4bc
Exec  : bLockMesh
Date  : Jan 22 2024
Time  : 22:25:51
Host  : "DESKTOP-THVT8F6"
PID   : 264
I/O   : uncollated
Case  : /home/thericco
nProcs : 1
sigFpe : Enabling floating point exception trapping (FOAM_SIGFPE).
fileModificationChecking : Monitoring run-time modified files using timeStampMaster (fileModificationSkew 10)
allowSystemOperations : Allowing user-supplied system call operations

// *****
Create time

--> FOAM FATAL ERROR:
cannot find file "/home/thericco/system/controlDict"

From function virtual Foam::autoPtr<Foam::ISstream> Foam::fileOperations::uncollatedFileOperation::readStream(Foam::regIOobject&, const Foam::fileName&, const Foam::word&, bool) const
in file global/fileOperations/uncollatedFileOperation/uncollatedFileOperation.C at line 539.

FOAM exiting

```

Obrázek 50: Test instalace

Instalace programu BlastFOAM

Po instalaci OF je možné zahájit instalaci samotného BF, která probíhá opět v prostředí terminálu. Prvním krokem v procesu této instalace je vytvoření složky (adresáře) *OpenFOAM* a to příkazem 6. [48]

Příkaz 6: Vytvoření složky OpenFOAM

```
mkdir -p $HOME/OpenFOAM
```

Po vytvoření je adresář otevřen příkazem *cd* (change directory). Následuje zadání příkazu pro stažení kopie BF do daného adresáře (viz příkaz 7). [48]

Příkaz 7: Otevření adresáře a stažení kopie BF

```
cd $HOME/OpenFOAM
git clone https://github.com/synthetik-technologies/blastfoam.git
```

Tím dojde k vytvoření podadresáře *blastfoam* v adresáři *OpenFOAM*, ve kterém se musí provést úprava podobná té při instalaci OF pro připojení *etc/bashrc*. Stejně jako v případě OF je připojení vyřešeno přes příkaz *echo*, který zobrazí zadaný argument (v uvozovkách) a přesměruje ho do *\$HOME/.bashrc* (viz příkaz 8). [48, 52]

Příkaz 8: Propojení příkazem echo

```
cd $HOME/OpenFOAM/blastfoam  
echo "source $HOME/OpenFOAM/blastfoam/etc/bashrc" >> $HOME/.bashrc
```

Následně je třeba načíst a nastavit prostředí bash (linuxového terminálu) pomocí příkazu 9, podobně jako v případě instalace OF. [48, 52]

Příkaz 9: Načtení a nastavení linuxového terminálu

```
source $HOME/.bashrc
```

Posledním krokem je kompilace softwaru BlastFOAM pomocí příkazu 10, které může trvat přibližně 10 minut. [48]

Příkaz 10: Dokončení instalace BF

```
./Allwmake
```

Kontrolu instalace lze ověřit pomocí příkazu `blastFoam`, který se zachová stejně jako tomu bylo pro OF (viz obrázek 50) jen s rozdílem, že vykonávaný příkaz napsaný ve zprávě nebude `blockMesh` ale `blastFoam`. [48]

Instalace Xming X Server pro Windows a zobrazení výsledné simulace

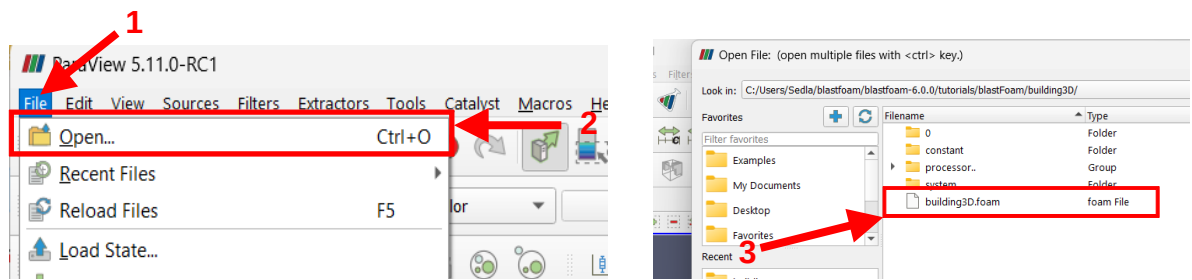
Xming je program sloužící pro zobrazení linuxového terminálu do Windows. Stažení je k dispozici z [53]. Jeho instalace je velmi jednoduchá a rychlá. [48]

Před jeho použitím je však nutno nastavit pro Xming místo, kde má zobrazit výsledky, pomocí následujícího příkazu 11 v terminálu Ubuntu. [48]

Příkaz 11: Nastavení zobrazení pro Xming

```
export DISPLAY=:0
```

Pro spuštění aplikace `paraview`, která slouží pro zobrazení výsledků stačí napsat příkaz `paraview` v terminálu. Po otevření okna aplikace `paraview` lze zobrazit simulaci otevřením složky úlohy a načtením souboru s přípomou `.foam` (viz obrázek 51). [48]



Obrázek 51: Zobrazení simulace

Otestování správné funkce softwaru BlastFOAM

Otestování funkce BF je vhodné provést na výukovém příkladu *shockTube_tabulated*, jehož výpočet je téměř okamžitý. Proces testu se řídí úkony v následujícím pořadí [19, 48]:

1. Spustit Xming
2. Spustit terminál Ubuntu 18.04
3. Zadat následující příkazy pro otevření úlohy

Příkaz 12: Příkazy pro otevření úlohy

```
cd OpenFOAM/
cd blastfoam/
cd tutorials/
cd blastFoam/
cd shockTube_tabulated/
./Allrun
```

nebo jen

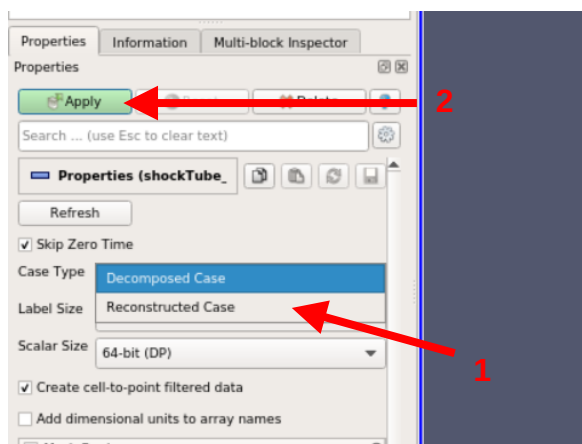
```
cd ./OpenFOAM/blastfoam/tutorials/blastFoam/shockTube_tabulated
./Allrun
```

Poznámka: Vymazání vypočítané úlohy, kvůli opětovnému spuštění výpočtu se provede příkazem `./Allclean`. Pro zobrazení obsahu (podrobností) otevřené složky u postupného otevírání je využít příkaz `ls`.

4. Spuštění paraview (příkaz `paraview`)
5. Otevření souboru *shockTube_tabulated.foam*

File> Open...>shockTube_tabulated.foam

6. Nastavení typu na *Reconstructed case* (viz obrázek 52) a potvrdit (Apply)

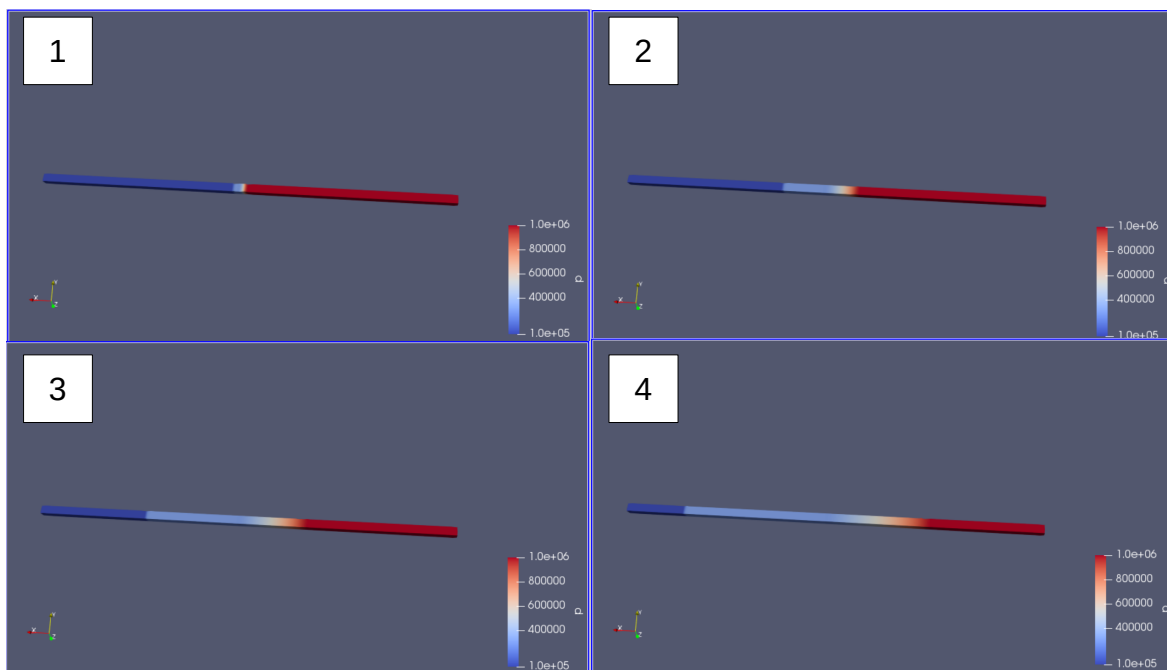


Obrázek 52: Nastavení paraview pro zobrazení výukového příkladu

Pozn: Při simulaci využívající paralelizaci výpočtu je využito typu *Decomposed case*

7. Spustit simulaci

Pokud došlo k zobrazení a průběhu jako na obrázku 53, software BlastFOAM funguje a všechny části byly nainstalovány správně.



Obrázek 53: Test simulace

Přidání možnosti pro práci s daty v prostředí OS Windows

Výhodou této úpravy je umožnění manipulace se soubory a daty pro systém Windows. Při výchozí instalaci jsou možnosti práce s daty omezeny pouze na terminál Ubuntu. [48]

Prvním krokem je stažení složky BF (gitHub [54]) ve formátu zip. Následuje vytvoření složky *blastfoam* ve složce uživatele (C:/Users/<uživatel>), do které je tento soubor přesunut. [48]

Úprava pokračuje otevřením terminálu (Ubuntu), do kterého je zadána cesta k souboru umístěnému ve složce *blastfoam* (viz příkaz 13). [48]

Příkaz 13: Otevření Windows složky BF v terminálu

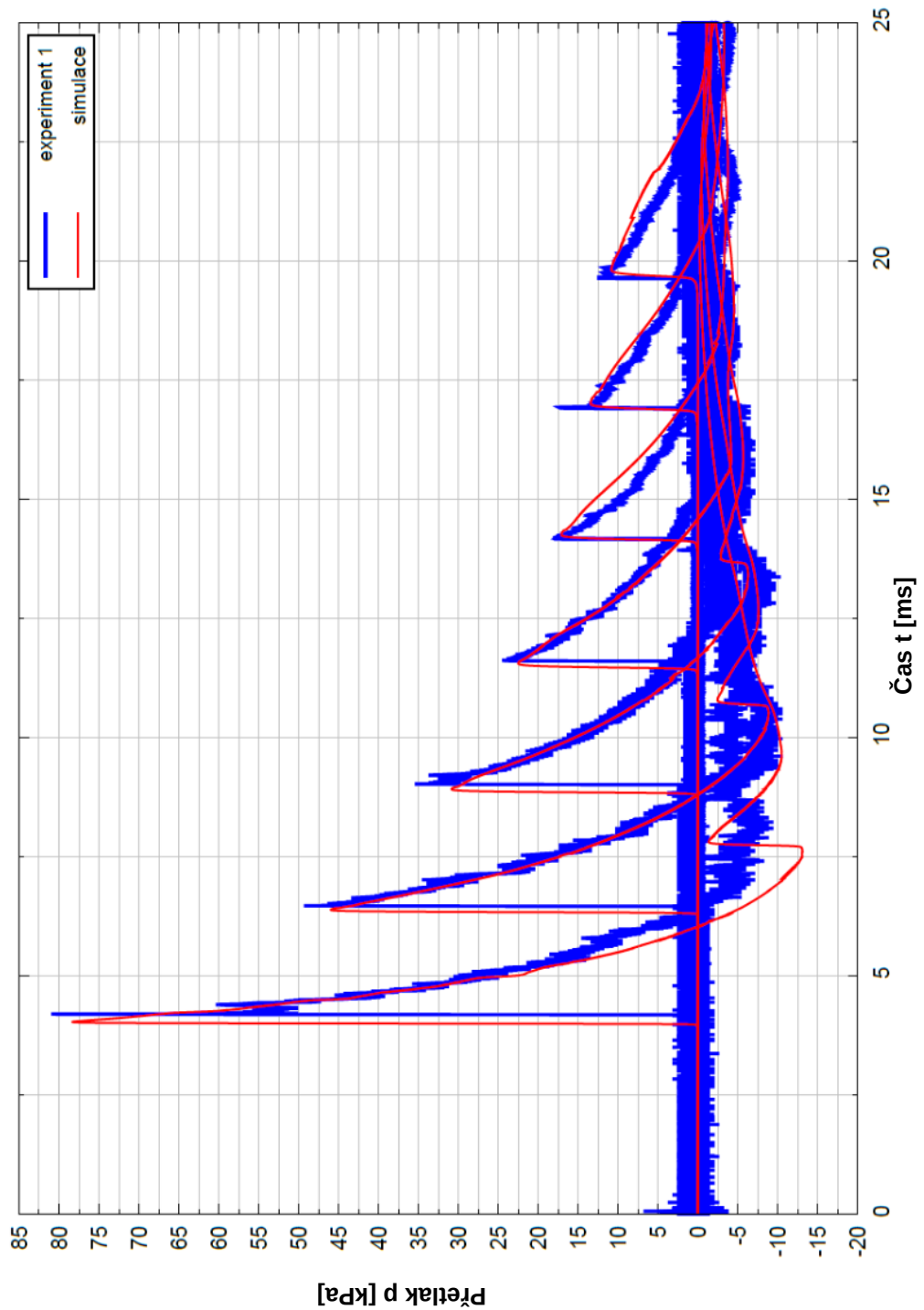
```
cd /mnt/c/Users/<uživatel>/blastfoam
```

Následně je třeba extrahovat obsah staženého zip souboru do složky *blastfoam*. Po tomto kroku je zpřístupněna práce se soubory v prostředí Windows. Pro zobrazení výsledků simulace ve Windows však musí být nainstalována aplikace Paraview zvlášť. [48]

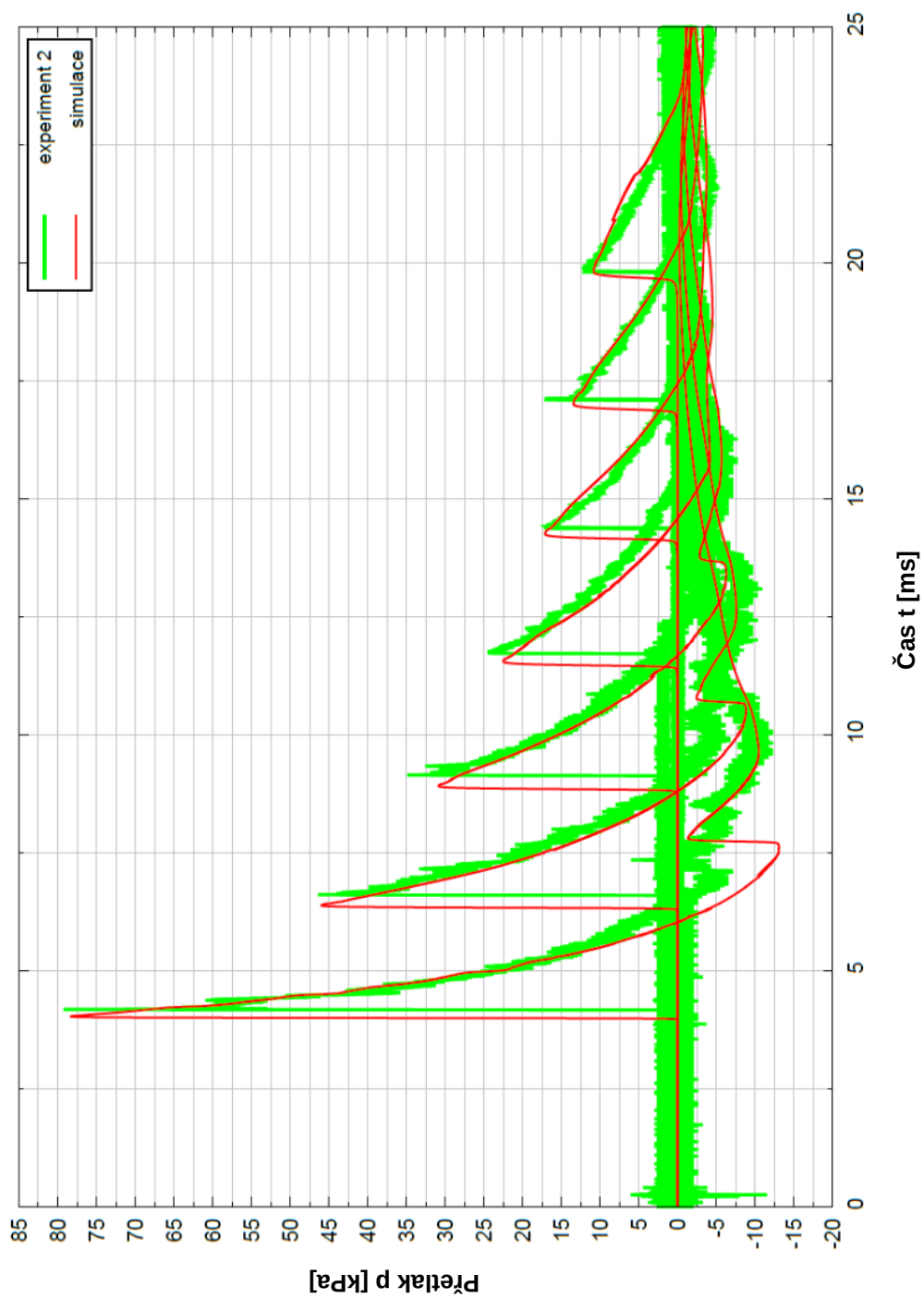
Pro zobrazení grafů a práci s nimi je vhodné nainstalovat do Windows aplikaci gnuplot. K zobrazení a případné práci s textovými soubory lze využít například některou z následujících aplikací:

- Poznámkový blok: Je nainstalována v každém OS Windows. Aplikace však není vhodná pro práci s velkým množstvím dat (pády aplikace).
- Notepad++ : Výchozí poznámkový blok s přidánými funkcemi, jako je zobrazení syntaxe. Při práci s velkým objemem dat, však přestává odpovídat, což značně prodlužuje práci s daty. Je nutné stažení a instalace.
- Visual Studio Code: Je editor zdrojového kódu, který vyvíjí společnost Microsoft [55]. Editor je značně automatizovaný. Po stažení a instalaci sám rozpozná podsystém Linux, případně i další součásti systému, a navrhne instalaci rozšíření pro práci s kódem. Oproti použití Poznámkového bloku (nebo Notepad++) nedochází k pádům programu při práci s velkým objemem dat a zároveň obsahuje více funkcí, jako například integrovaný terminál nebo integrovaný průzkumník souborů s možností zobrazení adresářového stromu.

Příloha B– Porovnání tlak. průběhů jednotlivých experimentů se simulací



Obrázek 54: Porovnání tlakového průběhu experimentu 1 a optimalizované simulace



Obrázek 55: Porovnání tlakového průběhu experimentu 2 a optimalizované simulace