

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta chemicko-technologická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Dominik Sedláček

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická

Specifika blízkého výbuchu  
Bakalářská práce

2022

Dominik Sedláček

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Dominik Sedláček**  
Osobní číslo: **C19087**  
Studijní program: **B2802 Chemie a technická chemie**  
Studijní obor: **Chemie a technická chemie**  
Téma práce: **Specifika blízkého výbuchu**  
Téma práce anglicky: **Specifics of near-field explosion**  
Zadávající katedra: **Ústav energetických materiálů**

## Zásady pro vypracování

1. Provedte literární rešerši na téma působení výbuchu s důrazem na působení v malých vzdálenostech od nálože (angl. near-field).
2. Porovnejte proces a působení detonace trhavin v malé vs. velké vzdálenosti od objektu.
3. Výsledky zpracujte formou bakalářské práce.

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

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Pachman, Ph.D.**  
Ústav energetických materiálů

Datum zadání bakalářské práce: **28. února 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2022**

**prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.** v.r.  
děkan

L.S.

**doc. Ing. Miloš Ferjenčík, Ph.D.** v.r.  
vedoucí ústavu

V Pardubicích dne 28. února 2022

Prohlašuji:

Práci s názvem Specifika blízkého výbuchu 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 1. 7. 2022

Dominik Sedláček

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pachmanovi Ph.D. za jeho cenné rady a vedení při zpracování této bakalářské 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**

Bakalářská práce se zabývá problematikou blízkého výbuchu. V práci jsou rozebírány podrobnosti chování výbuchu v blízké oblasti, které jsou porovnávány se vzdáleným výbuchem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Blízký výbuch, detonace, ohnivá koule, odraz rázové vlny, přetlak, redukované veličiny, vzdušná rázový vlna

## **TITLE**

Specifics of near-field explosion

## **ANNOTATION**

The bachelor thesis deals with the issue of near-field explosion. The work discusses the behavior details of the explosion in the near-field area, which are compared with the far-field explosion.

## **KEYWORDS**

Air shock wave, Detonation, fireball, near-field explosion, overpressure, reduced quantities, shock wave reflection

# OBSAH

ÚVOD .....	13
1. VÝBUŠNÁ PŘEMĚNA.....	14
1.1 Co je to výbuch .....	14
1.2 Fyzikální a chemický výbuch .....	14
1.3 Deflagrace .....	15
1.4 Detonace .....	16
2. PROJEVY DETONACE VE VZDUCHU .....	18
2.1 Fireball .....	18
2.2 Vzdušná rázová vlna .....	19
2.2.1 Vlastnosti rázových vln .....	19
2.2.2 Odraz VRV na tuhé překážce .....	21
2.2.3 Parametry vzdušné rázové vlny .....	23
2.2.3.1 Dopadající přetlak – tlakový impulz $i_p$ .....	24
2.2.3.2 Tlak jako funkce vzdálenosti .....	24
2.2.3.4 Dynamický tlak .....	26
2.2.4 Redukované charakteristiky .....	26
2.3 Fragmenty .....	29
3. VLIV VZDÁLENOSTI NÁLOŽE NA CHARAKTER ZATÍŽENÍ OBJEKTU .....	31
3.1 Výbuch v kontaktu s objektem .....	31
3.2 Blízký výbuch .....	32
3.3 Vzdálený výbuch .....	33
4. SPECIFIKA EXPERIMENTŮ V OBLASTI BLÍZKÉHO VÝBUCHU.....	35
4.1 CoBL.....	35
4.2 Modelování a nedostatky LS-DYNA .....	37
ZÁVĚR .....	39



## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1: Chemické výbuchy – a) hoření, deflagrace; b) detonace .....	15
Obrázek 2: Schématické znázornění zón hoření [10] .....	16
Obrázek 3: Detonační vlna [6].....	17
Obrázek 4: Fireball [19].....	18
Obrázek 5: Povrchové nestability – a) Rayleigh-Taylor, b) Richtmyer-Meshkov [7] .....	18
Obrázek 6: Oddělení zplodin od rázové vlny [15].....	20
Obrázek 7: Vzdušná rázová vlna .....	20
Obrázek 8: Schématické zobrazení VRV při detonaci válce [13] .....	21
Obrázek 9: Koeficient odrazu .....	22
Obrázek 10: Odraz rázové vlny [5, 21] - a) příchod RV; b) Odražení RV.....	22
Obrázek 11: Schéma časového průběhu tlaku .....	23
Obrázek 12: Zjednodušený tlakový impulz .....	24
Obrázek 13: Průběh tlakové funkce v závislosti na vzdálenosti [10].....	25
Obrázek 14: Průběh tlaku při blízkém výbuchu [25].....	25
Obrázek 15: Průběh tlaku při vzdáleném výbuchu [25] .....	26
Obrázek 16: Ukázka závislosti tlaku na vzdálenosti .....	27
Obrázek 17: Ukázka závislosti tlaku na redukované vzdálenosti.....	27
Obrázek 18: Výbuch v kontaktu v objektem .....	31
Obrázek 19: Impedanční diagram [14] .....	32
Obrázek 20: Účinek skládání vln při odražení RV v blízkém poli [25] .....	33
Obrázek 21: Schéma CoBL [34].....	35
Obrázek 22: Ocelová deska (CoBL) [34] .....	36
Obrázek 23: Výsledek měření [9].....	37
Obrázek 24: Zpracování snímků fireballu [36].....	37
Obrázek 25: Srovnání průběhu přetlaku kulové a válcové nálože [9].....	38

## SEZNAM ZKRATEK

Značka	Jednotka	Význam
$k_B$	-	Balistický poměr
$t_a$	s	Doba příchodu rázové vlny
$t_{p-}$	s	Doba trvání negativní fáze RV
$t_d, t_{p+}$	s	Doba trvání pozitivní fáze RV
Q	Pa	Dynamický tlak
$C_D$	-	Geometrický koeficient (dynamický tlak)
$k_G$	-	Geometrický koeficient (TNT ekvivalent)
W	kg	Hmotnost nálože TNT
$W_N$	kg	Hmotnost nálože jiné výbušniny
C	-	Hranice ohnivé koule
$\rho_s$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Hustota vzduchu vytěsněná ohnivou koulí
$k_E$	-	koeficient pro těsnění
$p_{\min}$	Pa	Maximální hodnota podtlaku
$p_{\max}, \Delta p_+$	Pa	Maximální hodnota přetlaku
$\Delta p_2, \Delta p_{\text{od}}$	Pa	Nárůst tlaku při odrazu VRV
$k_{\text{od}}$	-	Odrazný koeficient
$p_0$	Pa	Počáteční (atmosférický) tlak
$S_1$	-	Primární RV
$\Delta p$	Pa	Přetlak
$\tau_d$	$\text{s}\cdot\text{kg}^{-1/3}$	Redukovaná doba trvání pozitivní fáze
Z, $R_{\text{red}}$	$\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$	Redukovaná vzdálenost
$i_s$	$\text{Pa}\cdot\text{kg}^{-1/3}$	Redukovaný tlakový impulz
$W_2$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost odražené vzdušné rázové vlny
$W_B$	$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost rázové vlny v překážce
D	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost šíření reakční zóny (detonační rychlost)

$u_s$	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost vzduchu pro výpočet dynamického tlaku
$W_1$	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost vzdušné rázové vlny
$S_2$	-	Sekundární RV
$p$	Pa	Tlak
$p_2$	Pa	Tlak odražené VRV
$p_1$	Pa	Tlak původní rázové vlny (při odrazu VRV)
$p_B$	Pa	Tlak šířící se v překážce (při odrazu VRV)
$i_p$	Pa·s	Tlakový impulz
$k_{TNT-i}$	-	TNT ekvivalent (tlakový impulz)
$k_{TNT-p}$	-	TNT ekvivalent (tlakový)
$Q_v$	$J \cdot kg^{-1}$	Výbuchové teplo
$R$	m	Vzdálenost (od centra výbuchu)

CoBL	Experimentální zařízení "Characterisation of Blast Loading"
HPB	Hopkinsonova tlaková tyč (Hopkinson pressure bar)
DDT	Přeměna deflagrace v detonaci (Deflagration to Detonation Transition)
RV	Rázová vlna
fps	Snímky za sekundu (frames per second)
TNT	Trinitrotoluen
VRV	Vzdušná rázová vlna
ZTO	Zákon třetí odmocniny

## TERMINOLOGIE

Detonační vlna	Rázová vlna, reakční zóna a zóna expanze plyných produktů šířící se nezreagovanou výbušninou při detonaci výbušniny
Explosion wind	"Explozní vítr", vzduch strhlý průchodem vzdušné rázové vlny
Far-field explosion	Vzdálený výbuch
Fireball	Ohnivá koule
Near-field explosion	Blízký výbuch
Scale parametr	Redukovaná vzdálenost Z
Spall damage	Vznik trhlin ve struktuře materiálu
Tenká vrstva	Vzduch vytlačený expanzí ohnivé koule

## ÚVOD

Už při nástupu na Univerzitu v Pardubicích jsem si zvolil studium technické chemie, jakožto nejlepšího oboru pro následující studium výbušnin. Při studiu jsem se rád zabýval fyzikální chemií a fyzikou, což vyústilo i ve volbu blízkého výbuchu jako tématu bakalářské práce. V následujících několika kapitolách bych chtěl vysvětlit problematiku spojenou právě s tímto tématem.

V první kapitole se věnuji výbuchu obecně, jakožto ději, který je spojený s uvolněním energie. Následuje rozdělení výbuchu na jednotlivé druhy s detailnějším popisem chemických výbuchů, jimiž se tato práce zabývá.

Ve druhé kapitole se zaměřuji na popsání projevů detonace ve vzduchu, tedy fireballu, vzdušným rázovým vlnám a fragmentům. Věnuji se podrobněji vzdušným rázovým vlnám, jejich popisu při výbuchu ve volném prostředí i případu odrazu rázových vln. Snažím se zde již popisovat počátky problému blízkého výbuchu s porovnáním k jednoduššímu případu vzdáleného výbuchu.

Třetí kapitola se věnuje vlivu vzdálenosti na složitost působení tlakového zatížení. Rozlišuji zde výbuch v kontaktu s objektem, blízký a vzdálený výbuch. Snažím se zde také popsat problémy spojené s blízkým výbuchem.

Závěrečná čtvrtá kapitola se pak převážně věnuje popisu specializovaného zařízení CoBL z Sheffieldské univerzity používaného pro měření v blízké oblasti. Zároveň se v této kapitole snažím o představení problému vlivu geometrie souvisejícího se simulačním softwarem LS-DYNA.

## 1. Výbušná přeměna

Vše začíná u vysvětlení pojmu výbuchu. Pod tímto si lze představit mnoho situací, od roztržení plynových lahví přes výbuchy vojenských granátů až po výbuch atomové bomby. Na všechny se přitom lze dívat podobným způsobem, a přitom je každý z nich úplně odlišný. Liší se totiž energií, kterou uvolní, změnou své chemické podstaty či fáze.

### 1.1 Co je to výbuch

Výbuch je náhlý, velmi rychlý proces, při kterém dochází k uvolnění energie v různé formě. Mezi tyto formy, jimiž je tato energie uvolněna, patří například tlak (přetlak). Ten je způsoben převedením energie sloučeniny (částic) do kinetické energie. Touto výchozí energií pro převedení může být energie chemická, fyzikální nebo jaderná. Tlak obecně představuje silové působení (nárazy částic) na plochu. Zvýšením kinetické energie dochází ke zvýšení rychlosti, a tedy počtu těchto nárazů. Následkem tlakových účinků také dochází k urychlení fragmentů, kterým se věnuje jedna z následujících kapitol. Dalšími projevy výbuchu je teplo, které též souvisí s kinetickou energií, anebo světlo [4, 11].

### 1.2 Fyzikální a chemický výbuch

Rozeznáváme několik druhů výbuchu.

- Fyzikální výbuch, při kterém se nemění chemická identita látek. Je spojen s rychlým zvětšením objemu [4, 11].
- Jaderný výbuch, u kterého dochází k uvolnění energie v důsledku jaderných reakcí [4, 11].
- Chemický výbuch, jehož podstatou je chemická přeměna látek [4, 11].

Příkladem fyzikálního výbuchu je roztržení tlakové láhve s plynem při požáru vlivem teplotní roztažnosti plynu. Jadernému výbuchu, který je speciálním typem výbuchu, ani fyzikálnímu výbuchu nebude dále v práci věnována pozornost.

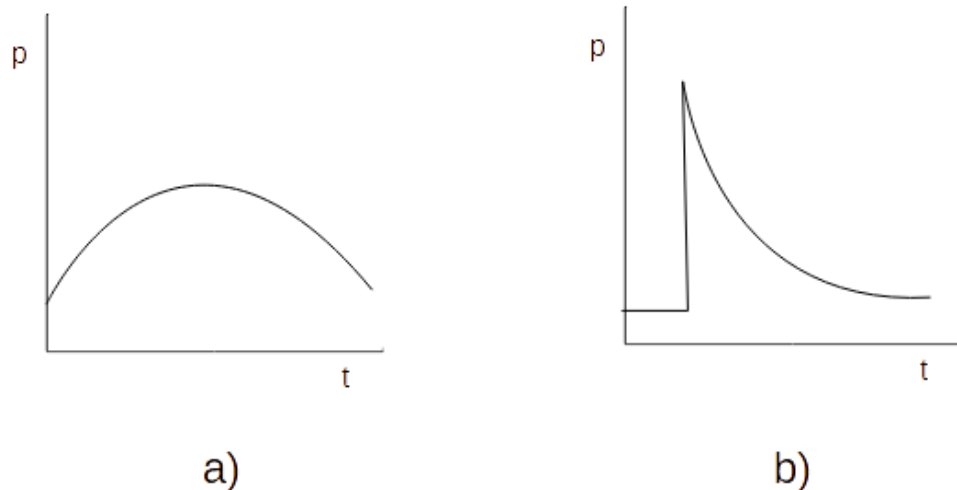
Pro průběh chemického výbuchu musí být splněno několik podmínek:

- Rychlost chemické přeměny. Výbušnina vyprodukuje svým zreagováním velké množství plyných produktů ve velmi krátkém časovém intervalu [22].
- Reakce musí být exotermická, a tedy uvolňovat energii. Endotermická reakce nemůže být výbuchem [22].
- Přeměna energie vazeb na mechanickou práci [22].

Chemický výbuch lze rozdělit na [11]:

- Hoření
- Deflagraci
- Detonaci

Rozdíly mezi těmito druhy chemického výbuchu jsou patrné z obrázku 1 [11].



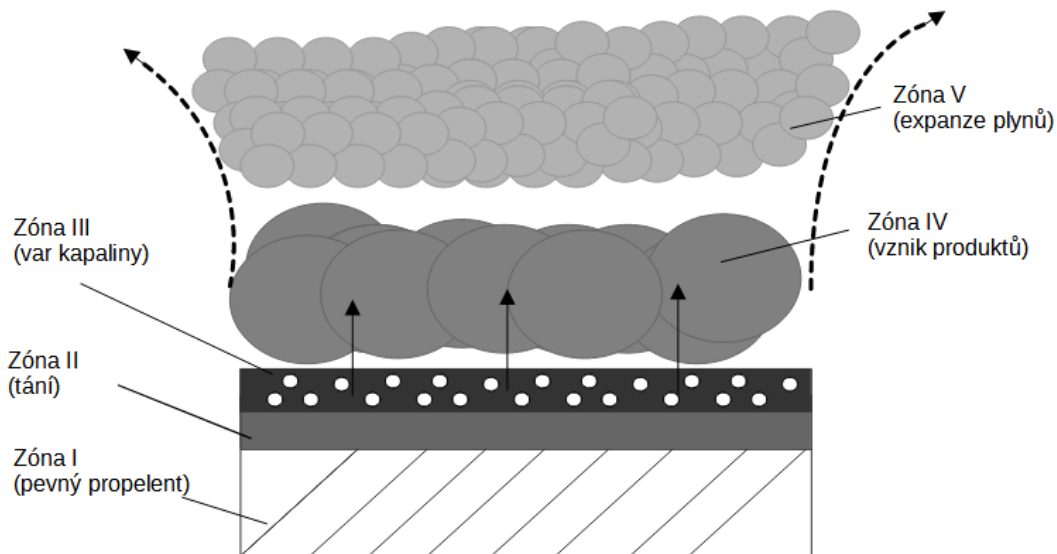
Obrázek 1: Chemické výbuchy – a) hoření, deflagrace; b) detonace

Na něm lze vidět, že průběh tlaku deflagrace potažmo hoření je spojitou funkcí. U detonace se vyskytuje nespojitost v průběhu tlaku. Jak deflagrace, tak detonace budou rozebírány v dalších kapitolách.

### 1.3 Deflagrace

Pojem deflagrace označuje rychlé, ale podzvukové hoření. Průběh tlaku je při něm spojitou funkcí. Spojité funkce jsou takové, u nichž nedochází k náhlým skokům. Deflagraci lze rozdělit do pěti zón (obrázek 2) [8, 10].

- Zóna I: Energetický materiál
- Zóna II: Tání materiálu
- Zóna III: Var kapaliny
- Zóna IV: Chemická přeměna látky
- Zóna V: Expanze plynných produktů



Obrázek 2: Schématické znázornění zón hoření [10]

Vzniklé teplo slouží k dalšímu tání (II) a vypařování (III) energetického materiálu (I). Důležité je zmínit, že v důsledku procesu vzroste i tlak okolí.

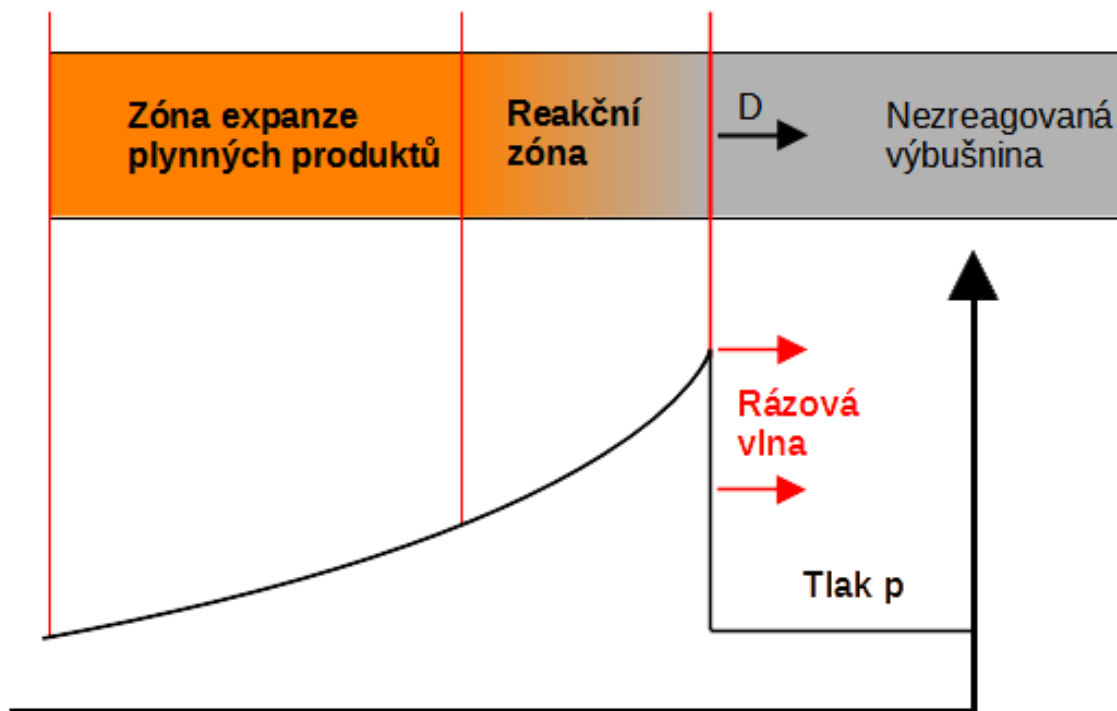
V případě otevřeného prostředí je tlakový rozdíl vyrovnán, avšak u hoření v uzavřeném místě dochází ke zvýšení tlaku a tím i ke zvýšení rychlosti hoření. Toto představuje určité bezpečnostní riziko, protože deflagrace může za určitých podmínek přejít v detonaci. Tomuto jevu se říká DDT neboli „Deflagration to Detonation Transition“ [10].

S vysokou rychlostí hoření se nestačí uvolnit tlak způsobený nárůstem objemu plynných produktů. Plynné produkty předběhnou zónu hoření a způsobí stlačování, které může vést až k iniciaci detonace [1, 2, 10]. Pro DDT přechod je nutné utěsnění, kterým se zabrání odvodu plynů. Utěsnění je možné i v rámci velkého množství látky [10].

### 1.4 Detonace

Při detonaci vstupuje rázová vlna do nezreagované výbušniny a způsobí iniciaci chemických reakcí. Komplex rázové vlny, reakční zóny a zóny expanze plynných produktů šířící se nezreagovanou výbušninou se označuje jako detonační vlna (obrázek 3) [6, 10, 11].





Obrázek 3: Detonační vlna [6]

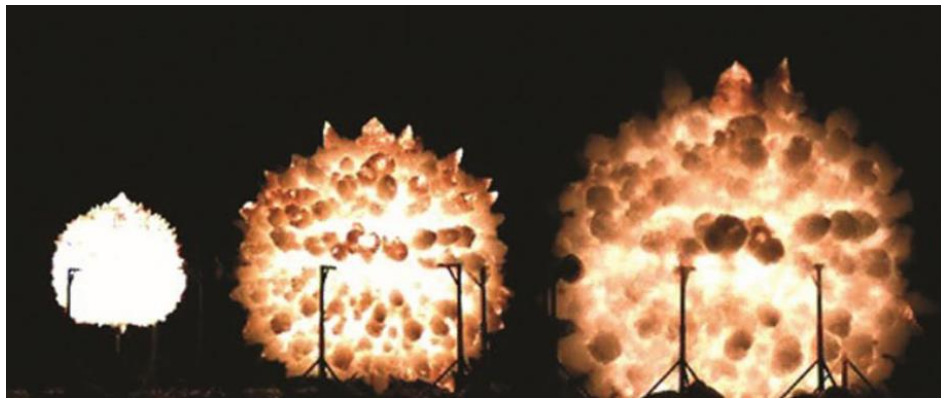
Na rozdíl od případu dříve rozebírané deflagrace dochází u detonace k šíření reakční zóny nadzvukovou rychlostí ( $D$ ;  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ), která je spojena s rázovou vlnou. Rázová vlna je nespojitou (skokovou) změnou v průběhu tlaku související s další iniciací detonace výbušniny [8, 10].

## 2. Projevy detonace ve vzduchu

Detonace ve vzduchu je provázána vznikem ohnivé koule, rozletem fragmentů a vznikem rázové vlny. Každý z těchto projevů je specifický svým působením na okolí, ať již jde o působení formou vysoké teploty, tlaku či jde o lokální poškození způsobené dopadem fragmentu.

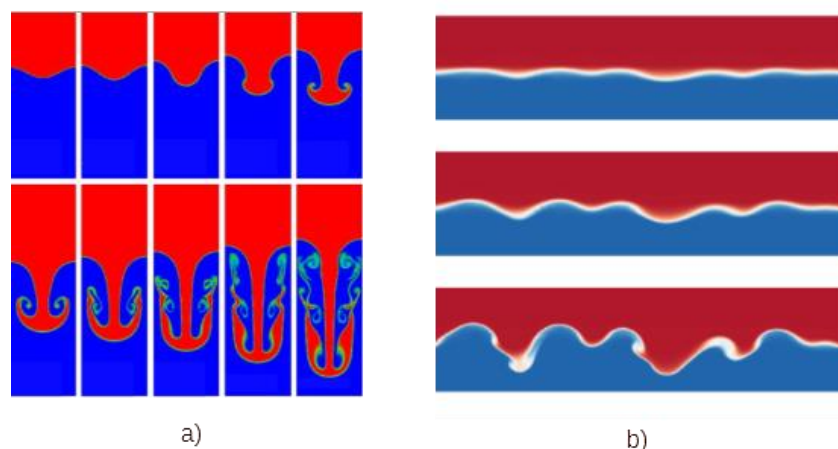
### 2.1 Fireball

Detonace výbušniny je spojena se vznikem velkého množství horkých plynných produktů, které při své expanzi vytvářejí tzv. fireball neboli ohnivou kouli (obrázek 4). Nejde o klasický plamen, ale spíše o expandující horké plyny. Avšak v případě detonace látky, která neobsahovala dostatečné množství kyslíku k úplné oxidaci, může dojít k hoření produktů po smíchání se vzduchem [10, 12].



Obrázek 4: Fireball [19]

Povrch ohnivé koule není hladký vlivem intenzivních turbulencí způsobených rozdílnou hustotou vrstev (nestability Rayleigh-Taylor a Richtmyer-Meshkov na obrázku 5) [7].



Obrázek 5: Povrchové nestability – a) Rayleigh-Taylor, b) Richtmyer-Meshkov [7]

Fireball může dosahovat až 4000krát [25] většího objemu, než je původní objem výbušniny. Tohoto objemu se dosahuje velmi rychle při rychlosti expanze činící i tisíce  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  [24]. Expanzí se vytlačuje přilehlý vzduch, který je stlačen do tzv. „tenké vrstvy“ kolem fireballu. Je to právě rychlá expanze plynů (produktů), která vyvolá rázovou vlnu [24, 25].

Rychlost rozšiřování ohnivé koule je sice na počátku velmi vysoká, avšak její rozšiřování rychle zpomaluje. K zastavení rozpínání dochází u kulové nálože zhruba ve vzdálenosti 20 poloměrů nálože, resp. v redukované vzdálenosti  $1 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ . V této vzdálenosti dochází také k oddělování rázové vlny od zplodin. S klesající rychlostí expanze fireballu klesá i teplota a přetlak. Lokálně mohou teploty fireballu dosáhnout i tisíce Kelvinů [10, 11].

## 2.2 Vzdušná rázová vlna

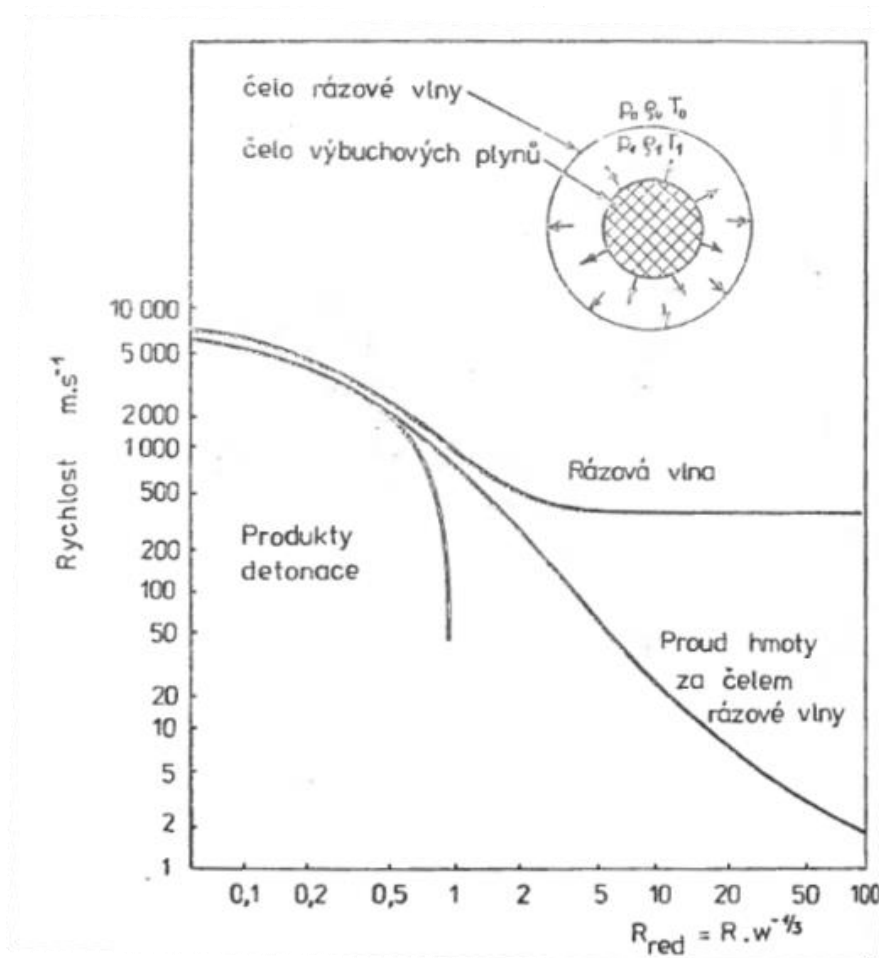
Rázová vlna, která se pohybuje ve vzduchu se nazývá vzdušnou rázovou vlnou (VRV). Stejně jako v případě rázové vlny v jiných prostředích se i vzdušná rázová vlna vyznačuje diskontinuitou v tlakovém průběhu [11, 12, 14].

### 2.2.1 Vlastnosti rázových vln

Rázová vlna má několik vlastností, které jí charakterizují:

- V případě detonace dochází k rázové kompresi, při které se mění mechanická energie na teplo a zároveň roste entropie. V důsledku vysoké rychlosti systém nestihne vyměňovat teplo s okolím, a proto je tento děj považován za adiabatický [10, 15, 20].
- Hustota vzduchu roste při rázové kompresi RV diskontinuálně, jako ostatní veličiny [10, 15].
- Rychlost rázové vlny je vyšší s vyšší hodnotou tlaku v čele vlny [10, 15].
- Její expanze je spojitá a má mnohem delší trvání než komprese. K expanzi dochází okamžitě po dosažení maximální hodnoty tlaku [10].
- Postupným rozšiřováním rázové vlny ve volném prostoru dochází ke snížení jejich tlakových projevů [10, 15].
- V případě uzavřeného prostředí dochází ke vzniku komorového přetlaku [10, 15].

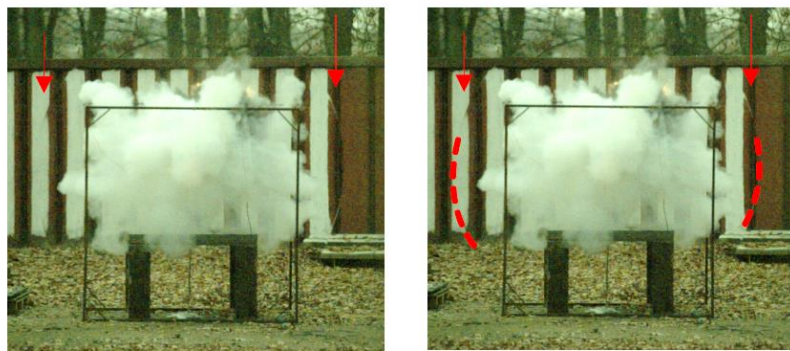
Ve vzdálenosti zhruba 8-15 průměrů původní nálože (nebo  $Z$  odpovídající 0,8 až 1 [15]) dochází k oddělení rázové vlny od zplodin a dál pokračuje prostředím vzduchu jen osamostatněná vzdušná rázová vlna (obrázek 6). Bez podpůrného účinku zplodin rychle klesá i rychlost proudu vzduchu za čelem VRV [10, 14, 15].



Obrázek 6: Oddělení zplodin od rázové vlny [15]

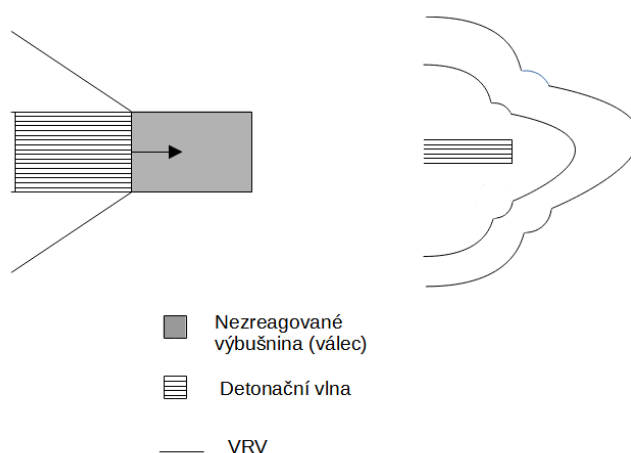
Zplodiny jakožto hmotné částice jsou zbrzdovány, a nakonec zastaveny působením odporu prostředí, respektive srážkami se vzduchem. Po dostatečném snížení energie a po uražení určité vzdálenosti přechází vzdušná rázová vlna do vlny akustické a dále se šíří jako zvuk [10, 14, 15].

Při pohledu na tvar rázové vlny vzniklé detonací kulové nálože ve volném prostoru je vidět, že tlaková vlna se šíří jako rozšiřující se kulová plocha (obrázek 7) [11].



Obrázek 7: Vzdušná rázová vlna

V případě válcové nálože však dochází ke složitějšímu tvaru následkem spojení VRV vzniklé při šíření detonační vlny a VRV vzniklé na konci nálože (obrázek 8) [9, 13].



Obrázek 8: Schématické zobrazení VRV při detonaci válce [13]

### 2.2.2 Odraz VRV na tuhé překážce

V případě, kde je volnému šíření rázové vlny bráněno, mluvíme o situaci kontaktu VRV s překážkou. Zde dochází k rozdělení energie RV. Část energie je předána překážce a část se odrazí. VRV přitom změní svůj směr šíření na opačný za současného snížení velikosti (rychlosti dopadu částic) [14, 25].

Pro odraz totiž platí, že rychlost původní vlny ve vzduchu  $W_1$  a rychlost odražené vlny  $W_2$  se musí rovnat rychlosti pohybu vlny v překážce  $W_B$  [14].

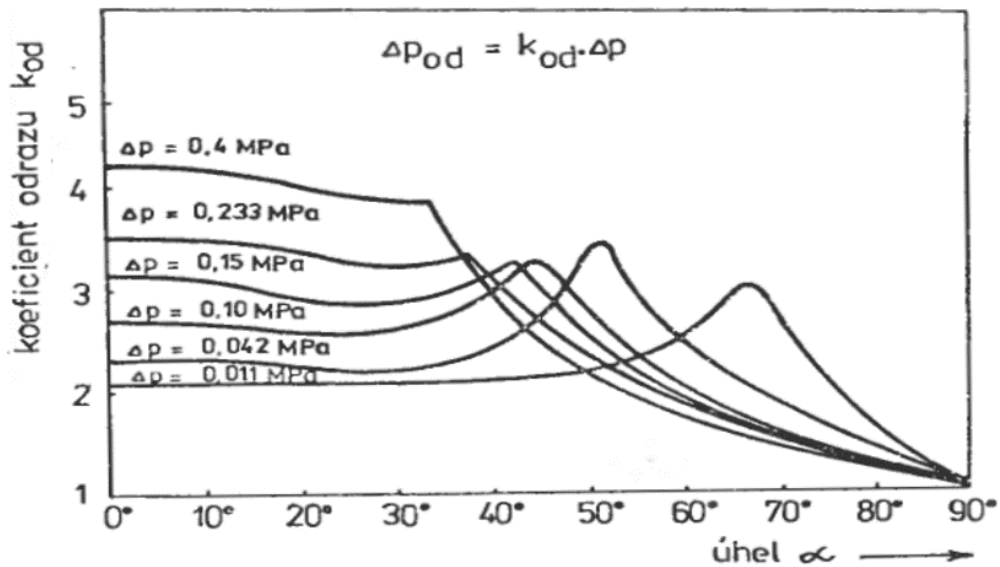
$$W_1 + W_2 = W_B \quad (2.1)$$

Při odražení dochází následně k interakci příchozí VRV a odražené vlny. To v důsledku zapříčiní lokální zvýšení tlaku u místa odrazu kvůli skládání vln. Nárůst tlaku při odrazu velmi slabých vln v místě skládání odpovídá rozdílu tlaků mezi původní vlnou  $p_1$  a tlakem šířícím se v překážce  $p_B$  [14, 25].

$$\Delta p_2 = p_1 - p_B \quad (2.2)$$

Respektive tlak šířící se v překážce bude rovný rozdílu mezi tlaky dopadající ( $p_1$ ) a odražené ( $p_2$ ) RV při rychlosti  $w_B$  (překážka) a rychlosti s opačným směrem  $w_2$  o kterou bude zpomalena vlna šířící se rychlostí  $w_1$  proti překážce [14].

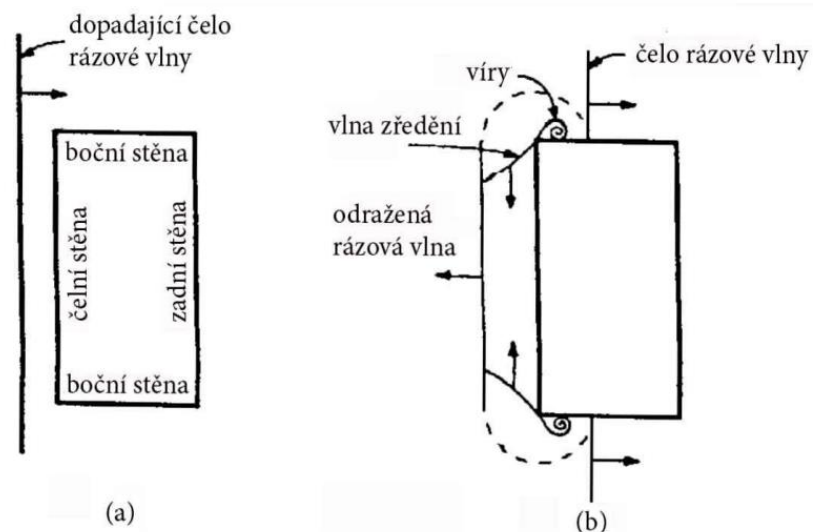
$$p_B = p_1 - p_2 \quad (2.3)$$



Obrázek 9: Koeficient odrazu

Poměr tlaku mezi dopadající a odraženou vlnou popisuje odrazný koeficient (obrázek 9) určený vlastnostmi materiálu. Z obrázku 9 je patrné, že při odrazu záleží nejen na úhlu dopadu, ale i na velikosti přetlaku příchozí rázové vlny. V důsledku skládání vln při odrazu silných VRV pak může dojít i k několikanásobnému navýšení přetlaku, přičemž tento násobek roste s velikostí přetlaku příchozí vlny [15, 25].

V situaci konstrukčního prvku s konečnými rozměry, dochází k nerovnoměrnému zatížení vlivem odlehčení postupujícího od hran překážky (obrázek 10) [4, 5].

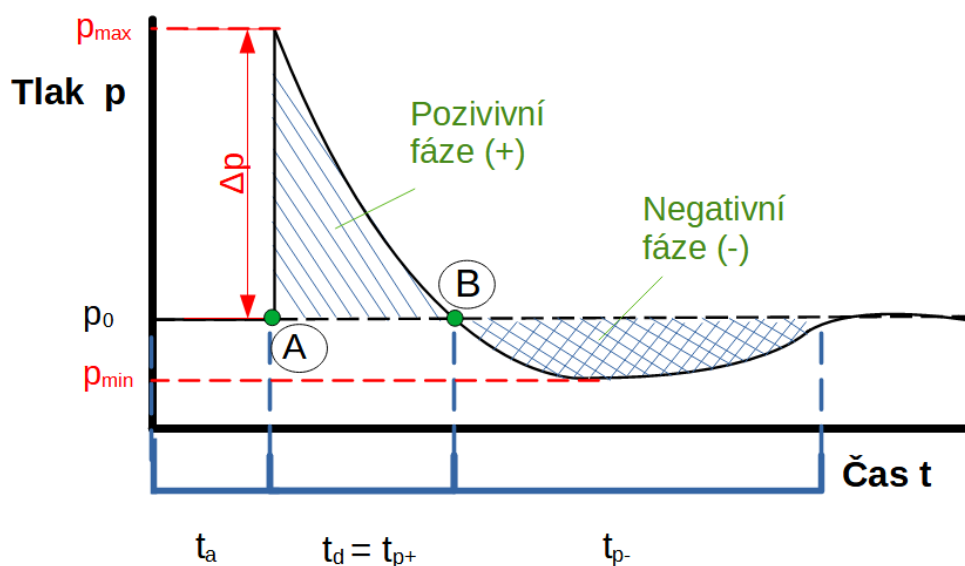


Obrázek 10: Odraz rázové vlny [5, 21] - a) příchod RV; b) Odražení RV

### 2.2.3 Parametry vzdušné rázové vlny

VRV je charakterizována průběhem tlaku v čase znázorněném na obrázku 11. Na průběhu je patrná diskontinuita tlaku v čele, následovaná expanzí. Pro popis VRV je používáno následujících veličin [16, 25, 27]:

- $p_0$  – atmosférický (původní) tlak (Pa)
- $\Delta p$  – přetlak (Pa)
- $p_{\max}$  – maximální hodnota přetlaku (Pa)
- $p_{\min}$  – maximální hodnota podtlaku (Pa)
- $t_a$  – doba příchodu RV (s)
- $t_d$  – doba trvání pozitivní fáze (s)
- $t_p$  - doba trvání negativní fáze (s)



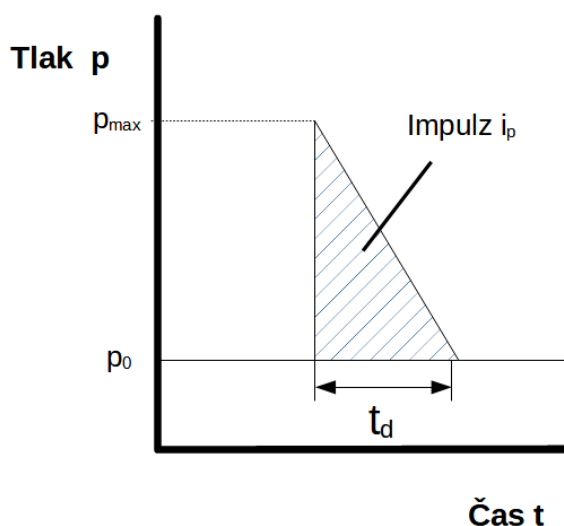
Obrázek 11: Schéma časového průběhu tlaku

Bod A odpovídá příchodu VRV, čímž započne pozitivní (přetlaková) fáze impulzu (+) s maximem tlaku  $p_{\max}$ . Hodnoty přetlaku se následně snižují až do bodu B (expanze). Tímto bodem začíná negativní (podtlaková) fáze (-). Podtlak je zde vyvolán jako následek posunutí molekul vzduchu, které vlna „strhne“ s sebou, načež chybí na původním místě. Tím je vyvoláno lokální snížení hustoty [16, 25, 27].

### 2.2.3.1 Dopadající přetlak – tlakový impulz $i_p$

Impulz obecně popisuje časový průběh fyzikální veličiny. V případě rázové vlny popisuje impulz průběh tlaku (přetlaku) a jeho proměny v čase. Jednotkou impulzu je Pa·s a jeho znázorněním je plocha v p-t grafu (obrázek 11 a 12) [16].

V případě zjednodušení tlakového impulzu se můžeme setkat pouze s tvarem pravoúhlého trojúhelníku, jenž představuje pozitivní fázi v p-t diagramu (obrázek 12) [4].



Obrázek 12: Zjednodušený tlakový impulz

Použitím tohoto zjednodušujícího předpokladu můžeme impulz vypočítat (orientačně) jako obsah trojúhelníku [12, 21].

$$i_p = \frac{1}{2} \cdot (p_{\max} - p_0) \cdot t_d \quad (2.4)$$

V nezjednodušeném tvaru je pak impulz počítán pomocí integrálu [14]:

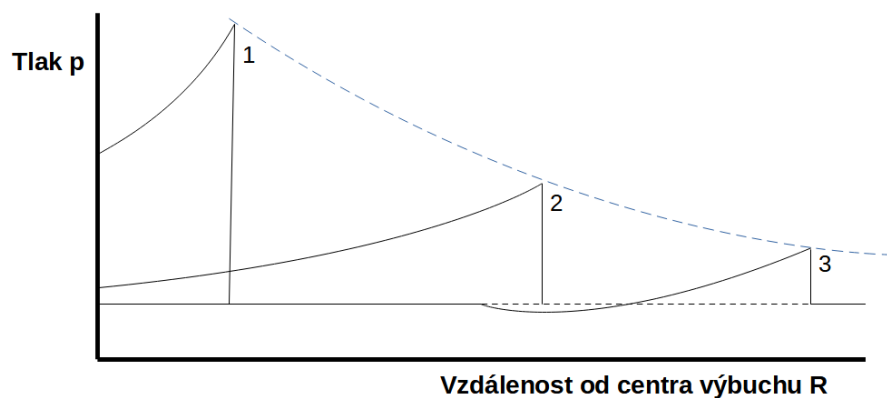
$$i_p = \int_{t_A}^{t_B} p \cdot dt \quad (2.5)$$

Kde t<sub>A</sub> a t<sub>B</sub> jsou časy začátku a konce pozitivní fáze rázové vlny.

### 2.2.3.2 Tlak jako funkce vzdálenosti

Průběh tlaku lze pozorovat nejen z časového hlediska, nýbrž také z hlediska polohy (vzdálenosti). Ten je velmi podobný časovému průběhu (zrcadlové překlopení) [10].

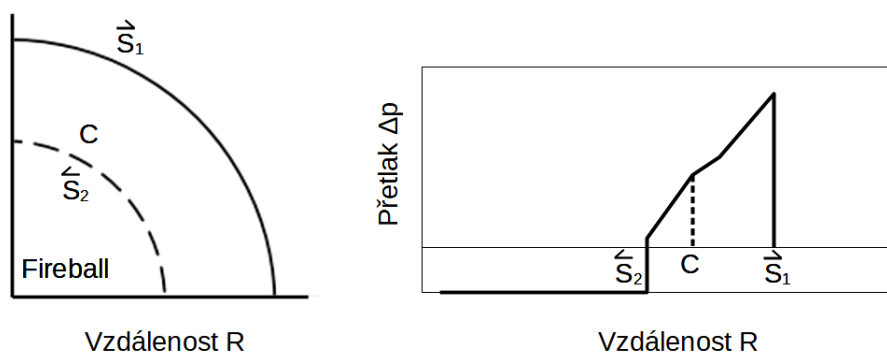




Obrázek 13: Průběh tlakové funkce v závislosti na vzdálenosti [10]

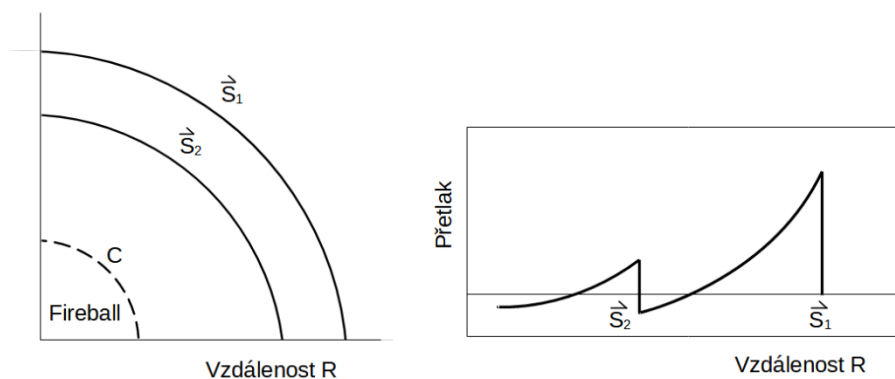
Z obrázku 13 je patrné, že velikost přetlaku se vzdáleností rychle klesá [10, 29].

Pro případ vzdáleného výbuchu se vlna šíří způsobem, který je znázorněn na obrázku 13. Avšak průběh tlaku v počáteční fázi je složitější, a je spojen se vznikem sekundární rázové vlny  $S_2$  (obrázek 14). Ta vzniká jako podtlaková vlna šířící se od původní rázové vlny  $S_1$  směrem do centra výbuchu [25].



Obrázek 14: Průběh tlaku při blízkém výbuchu [25]

V počáteční fázi se sekundární ráz  $S_2$  pohybuje směrem do centra exploze, kde dochází k jeho odrazu. Následně se šíří ven ve směru primární rázové vlny  $S_1$ , ale s nižšími hodnotami přetlaku (obrázek 15) [25].



Obrázek 15: Průběh tlaku při vzdáleném výbuchu [25]

#### 2.2.3.4 Dynamický tlak

Dynamický tlak je veličinou, jež se týká tekutin v pohybu. Jinými slovy tlak, který je způsoben proudící tekutinou, která obtéká těleso v klidu [28].

Při aplikaci definice na výbuch se dostáváme k expanzi fireballu a následným proudům plynů, které mají na svědomí zvýšení tohoto tlaku. Rozšiřování fireballu je spojeno i s vytěsněním vzduchu. Ten se stává dalším zatížením působícím na konstrukci, přičemž se na tomto tlaku rovněž podílí [4, 28].

Dynamický tlak ( $Q$ ) je definován následující rovnicí:

$$Q(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot (u_s)^2 \quad (2.6)$$

Zde  $\rho_s$  představuje hustotu vzduchu, který je vytěsněn fireballem, a  $u_s$  je rychlost částic vzduchu [4]. Hodnota dynamického tlaku se získává obvykle odečtením statického tlaku od tlaku celkového [28].

Pomocí dynamického tlaku  $Q$  se vypočítají hodnoty dynamického tlaku skutečně působícího na objekty vynásobením určitým koeficientem ( $C_D$ ), který charakterizuje tvar překážky. Například pro kouli je to 0,47 a pro krychli s působením do středu stěny to je 1,05 [4].

$$Q_D = C_D \cdot Q \quad (2.7)$$

#### 2.2.4 Redukované charakteristiky

Základem pro srovnání různě velkých náloží téže výbušniny v různé vzdálenosti je tzv. „zákon třetí odmocniny“ (ZTO). Ten říká, že pokud máme dvě výbušniny totožného složení, se stejnou geometrií (tvarem), detonující v identickém prostředí, tak VRV vzniklé výbuchem jsou identické ve stejných redukovaných vzdálenostech [12].

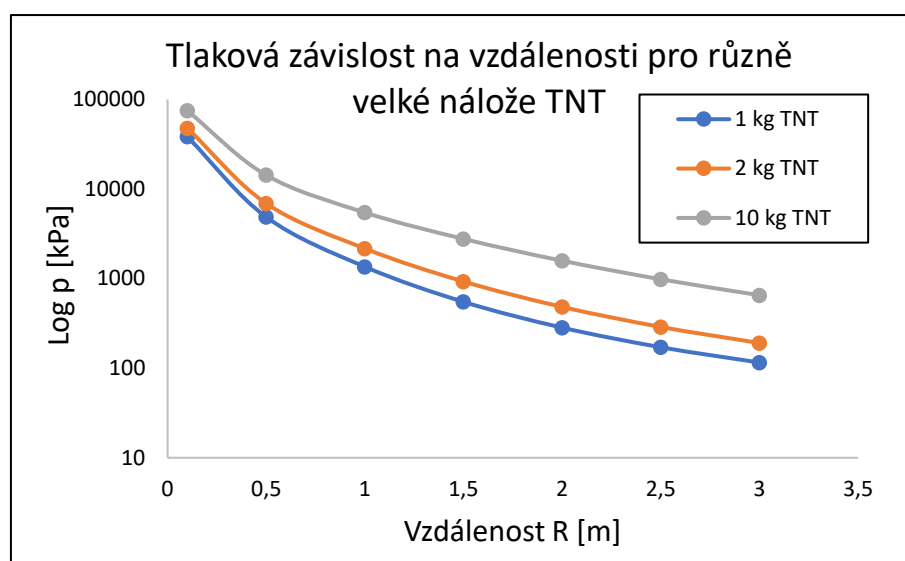
Jeden ze základních a nejdůležitějších parametrů je tzv. „Scale parametr“, kterému se také říká redukovaná vzdálenost [12, 29].

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2.8)$$

Kde „Z“ je redukovanou vzdáleností ( $m \cdot kg^{-1/3}$ ), R je vzdálenost od centra výbuchu (m) a W je hmotnost nálože (kg) [12].

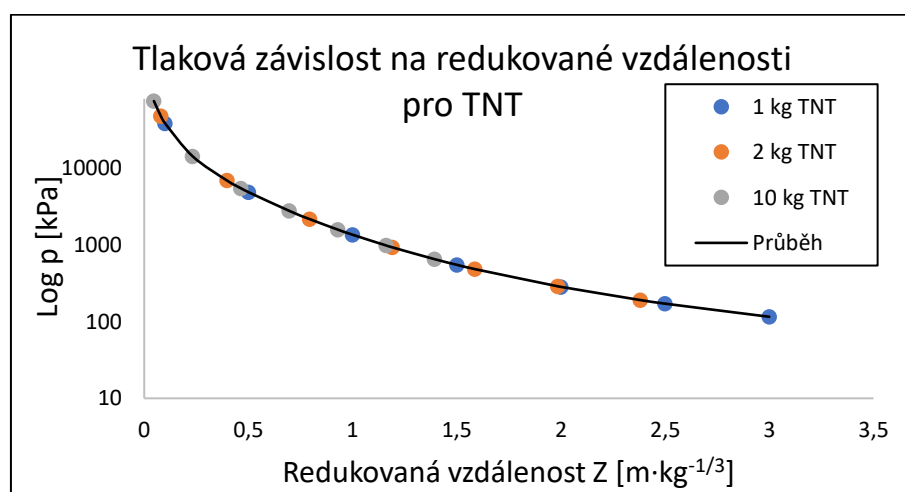
Průběhy funkcí bez použití a s použitím redukovaných vzdáleností jsou následovné:

- Bez použití redukovaných veličin



Obrázek 16: Ukázka závislosti tlaku na vzdálenosti

- Při použití redukovaných veličin k popisu



Obrázek 17: Ukázka závislosti tlaku na redukované vzdálenosti

Při porovnání průběhů je vidět, že s použitím redukovaných veličin (obrázek 17) všechny body závislosti náležejí jediné křivce nehledě na velikost nálože, na rozdíl od případu, kde redukovaných veličin použito nebylo (obrázek 16).

Jako spojení mezi jakoukoliv výbušninou a náloží TNT slouží pak TNT ekvivalent  $k_{TNT}$  [12]. TNT ekvivalent definuje hmotnost TNT, která je potřeba pro vytvoření rázové vlny stejných vlastností, jako by vytvořila daná nálož. Pro TNT se  $k_{TNT}$  rovná 1 [8, 5].

Proces dosazení do rovnice začíná výpočtem tritolového ekvivalentu použitím výbuchového tepla. To lze získat z tabulek či ho lze experimentálně kalorimetricky stanovit. Následující rovnice však platí pouze v rozsahu  $2 \leq Q_v \leq 5$  (v MJ /kg) [12, 30, 31].

$$k_{TNT} = 0,3 \cdot Q_v - 0,2 \quad (2.9)$$

Pomocí  $k_{TNT}$  s koeficienty pro geometrii ( $k_G$ ) a těsnění ( $k_E$ ) je následně převedena hmotnost nálože jiné výbuštiny na hmotnost TNT (v kg), kterou dosadíme do výpočtu scale parametru [12, 31].

$$W = W_N \cdot k_{TNT-p} \cdot k_E \cdot k_G \quad (2.10)$$

Zde „p“ v indexu tritolového ekvivalentu udává, že se jedná o tlakový tritolový ekvivalent. Pokud jde o koeficient  $k_G$ , ten nabývá hodnoty při výbuchu ve volném prostoru 1 a dále pak 2 v případech, že je nálož umístěna na zemi (kvůli odrazu RV) [31, 32].

Prostřednictvím koeficientu  $k_E$  se do výpočtu promítne poměr hmotnosti obalu (v kg) a samotné trhavinu (v kg), který se označuje jako balistický poměr  $k_B$  [12, 31, 32, 33].

$$k_E = 0,2 + \frac{0,8}{1 + k_B} \quad (2.11)$$

Známe-li redukovanou vzdálenost  $Z$ , můžeme s její pomocí vypočítat maximální přetlak rázové vlny (v MPa) dle Henrycha J. [31, 32].

Pro  $Z \in (0,05; 0,3)$

$$\Delta p_+ = \frac{1,40717}{Z} + \frac{0,55397}{Z^2} - \frac{0,03572}{Z^3} + \frac{0,000625}{Z^4} \quad (2.12)$$

Pro  $Z \in (0,3; 1,0)$

$$\Delta p_+ = \frac{6,1938}{Z} + \frac{0,3262}{Z^2} + \frac{2,1324}{Z^3} \quad (2.13)$$

Pro  $Z \in (1,0; 10,0)$

$$\Delta p_+ = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3} \quad (2.14)$$

Redukovaná vzdálenost nemusí být použita jen pro přetlak, ale i pro výpočet doby trvání nebo impulzu. Základem je i nadále ZTO, v němž figuruje místo vzdálenosti od centra výbuchu R doba trvání pozitivní fáze  $t_d$  nebo impulz  $i_p$ . Použitím následujících vztahů můžeme vypočítat tyto veličiny i za pomoci redukovaných veličin [12].

Pro  $Z \in (2; 20)$

$$\tau_d = 0,107 + 1,0111 \cdot Z - 0,0701 \cdot Z^2 + 1,663 \cdot 10^{-3} \cdot Z^3 \quad (2.15)$$

Pro  $Z \in (2; 20)$

$$i_p = 300 \cdot W^{\frac{1}{3}} \cdot Z^{-1} = 300 \cdot \frac{W^{\frac{2}{3}}}{R} \quad (2.16)$$

$$i_s = \frac{i_p}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (2.17)$$

Je nutné mít na paměti, že při výpočtu impulzu musíme v původní rovnici pro výpočet hmotnostního ekvivalentu TNT namísto  $k_{TNT-p}$ , využitého pro přetlak, využít  $k_{TNT-i}$ , který je obvykle vyšší [12].

### 2.3 Fragменты

Nebezpečí spojené s fragmenty (střepinami) spadá do nepřímých, konkrétně sekundárních projevů výbuchu [4].

Rozlišujeme několik typů fragmentů, které rozdělujeme na základě způsobu urychlení [4, 12].

- Prvním typem jsou primární fragmenty. Tento typ fragmentů je urychlen přímo detonací. Při výbuchu dochází k vývoji velkého množství plynů a k jejich rozpínání,

které je způsobeno extrémní teplotou dosahující několika tisíc kelvin. Plyn svým vznikem a expanzí společně s RV způsobí fragmentaci tuhého okolního materiálu (obalu). Části obalu jsou přitom urychleny na vysokou rychlost. Příkladem tohoto typu fragmentu jsou urychlené střepiny granátu [2, 4, 12].

- Druhým typem jsou fragmenty sekundární. Ty již nevznikají přímo působením detonace, ale jsou způsobeny VRV. Příkladem takovýchto fragmentů jsou například části zdiva. Sekundární fragmenty nemusí být ale pouze ty, které vzniknou působením vzdušné rázové vlny. Dopad primárního fragmentu, který způsobí fragmentaci, způsobí též vznik sekundárních fragmentů [4, 12].
- Třetím typem fragmentů jsou terciální fragmenty. Mezi ty patří kusy z materiálů, které plachtí vzduchem. Vytvoření takových fragmentů musí být snadné rovněž jako jejich vnos. Do této kategorie patří například skleněné tabule, které jsou účinkem VRV velmi snadno vyraženy [4, 12].

Nebezpečí spojené s fragmentací však není vztaženo jen na zónu blízkou k explozi. Například v případě havárie v Bejrútu podle novinových zdrojů Deník.cz [18] došlo k poškození skleněných tabulí až do vzdálenosti 25 kilometrů, přičemž v okruhu několika kilometrů byly poškozeny samotné budovy [3, 17].

### 3. Vliv vzdálenosti nálože na charakter zatížení objektu

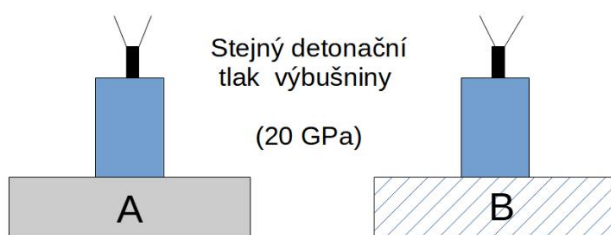
Výbuchy působí odlišně v závislosti na vzdálenosti výbušniny od objektu zatíženého detonací. Dochází zde k rozdílům v působení zplodin detonace a rázových vln [24, 34, 38, 39]:

- V kontaktu – Působení VRV a expandujících zplodin, riziko spall damage
- Near-field – Působení VRV a expandujících zplodin, riziko spall damage
- Far-field – Působení VRV

Velikosti veličin popisující výbuch se se vzdáleností od centra výbuchu výrazně mění. Další rozdíl je také ve způsobu, jakým tlak převážně působí v dané oblasti. Zda se jedná o statický či dynamický tlak.

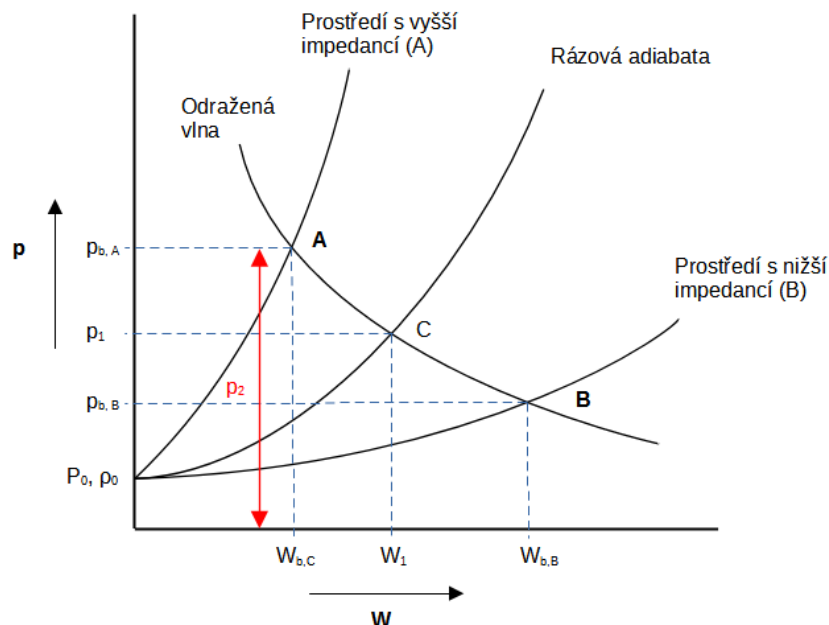
#### 3.1 Výbuch v kontaktu s objektem

Jedná se o typ výbuchu, při kterém je výbušina v kontaktu se zatěžovanou konstrukcí (obrázek 18). Tlak vzniklý v materiálu, který je v kontaktu s výbušninou závisí na rázové impedanci tohoto materiálu. Výbušina tak může indukovat tlaky nižší (B), než je tlak detonační, ale i vyšší (A), což záleží pouze na materiálových vlastnostech materiálu v kontaktu.



Obrázek 18: Výbuch v kontaktu v objektem

Pro stanovení tohoto tlaku je využíván impedanční diagram (obrázek 19).



Obrázek 19: Impedanční diagram [14]

### 3.2 Blízký výbuch

Blízký výbuch nebo také near-field explosion je výbuchem v krátké vzdálenosti od objektu. Tato vzdálenost je menší než  $1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  [24]. V této (blízké) oblasti dochází ke krátkému a intenzivnímu zatížení konstrukcí, a to především dopadem produktů (působením expanze plynů). Následkem stlačení vrstvy vzduchu fireballem dochází též k dosáhnutí vysoké teploty čítající až několik tisíc Kelvinů. Vysoké teploty v kombinaci s vysokým tlakem snadno překonávají mez skluzu materiálů, následkem čehož dochází k závažným poškozením objektů. Podstatnou roli v tom sehrají i fragmenty, které mohou nejenom poškodit konstrukci, ale hrozí i vytvořením sekundárních fragmentů [24, 25]. Celý tento proces probíhá ve velmi krátkém okamžiku [24].

Dochází zde také k výrazným rozdílům v tlaku s hodnotami lišícími se o celé řády při přibližování k centru exploze. Následkem těchto obrovských skoků nelze využít běžné snímače, jako v případě vzdáleného výbuchu. Využívá se proto alternativ, mezi které patří měření hybnosti [24].

Tento typ výbuchu je velmi problematický. Na rozdíl od vzdáleného výbuchu, u blízkého výbuchu není stále známá stavová rovnice, která by ho popisovala, a tak vztahy, kterými blízký výbuch popisujeme nedosahují požadované přesnosti. Získané výsledky se proto musí brát s rezervou a ověřovat experimenty [24].

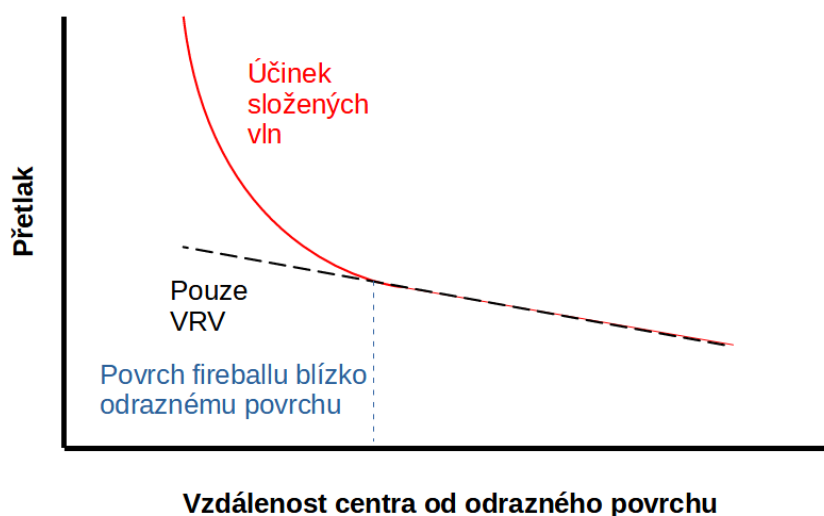


Kvůli tomu, že rozpínající fireball pohání RV nelze použít rovnici Kingery and Bulmash [16] používanou u vzdáleného výbuchu, kde dochází k šíření osamocené VRV [16, 24].

$$f = e^{A+B \cdot \ln Z + C \cdot (\ln Z)^2 + D \cdot (\ln Z)^3 + E \cdot (\ln Z)^4 + F \cdot (\ln Z)^5 + G \cdot (\ln Z)^6 + \dots} \quad (3.1)$$

Kde  $f$  je označení charakterizujícího parametru (např. maximální přetlak  $p_{max}$ ) a hodnoty A-G náleží koeficientům z tabulek pro hledaný parametr [16].

Situace se stává ještě složitější při odrazu. Odraz totiž nejde do vzduchu, ale interaguje s fireballem a sekundární vlnou. Zatížení vzniklé skládáním je následně mnohem vyšší (obrázek 20), než by bylo u vzdáleného výbuchu [24].



Obrázek 20: Účinek skládání vln při odražení RV v blízkém poli [25]

Výzkumy dokonce ukazují, že u blízkého výbuchu hraje roli reakce částečně zoxidovaných produktů se vzduchem, čemuž se říká „dohoření“. Právě kvůli tomuto dohoření se musejí provádět experimenty pro konstrukční doporučení, protože není při simulaci bráno v potaz [24].

Největší podíl zátěže, který je způsoben u near-field výbuchu je dynamický tlak. Jeho podíl se vzdáleností rychle klesá s tím, že přenáší energii na tlakovou vlnu. Ta je založena již převážně na působení statického tlaku [25].

### 3.3 Vzdálený výbuch

Pozorujeme-li výbuch z větší vzdálenosti od centra exploze, jde o far-field explosion, neboli vzdálený výbuch. Jedná se o výbuch působící ze vzdálenosti odpovídající alespoň desetinásobku velikosti původní nálože, nebo vzdálenosti větší než  $4 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  [34]. Při tomto

výbuchu se pracuje pouze s rázovou vlnou, která se oddělí vlivem odporu vzduchu od fireballu [23, 24, 34].

Tím, že v této oblasti nedochází k ovlivňování VRV zplodinami výbuchu je situace snazší než u blízkého výbuchu. Absence zplodin a turbulencí společně s nižšími hodnotami přetlaků umožňují vysokou přesnost měřících metod, a to i v případě měření odrazných přetlaků. Pro měření v této oblasti lze využít piezoelektrická nebo piezorezistivní tlaková čidla [23, 24, 34].

Ve vzdálené oblasti jde převážně o působení statického tlaku. Dynamický tlak je minimální kvůli absenci zplodin, a je vyvolán pouze průchodem rázové vlny (explosion wind) [25].

## 4. Specifika experimentů v oblasti blízkého výbuchu

Měření v blízké oblasti je velmi problematické kvůli vysokým tlakům, které působí ve velmi krátkých časových intervalech. Avšak i v těchto neideálních podmínkách je kvůli významu výstupu nutno měřit [9, 24, 34].

Měření v této oblasti se může uskutečňovat na základě hybnosti či pomocí optické metody. Výsledky mohou posloužit ke zvýšení bezpečnosti (budovy, armáda), ale i k ověření správnosti modelů používaných simulačními softwary, jako je například LS-DYNA [26, 34].

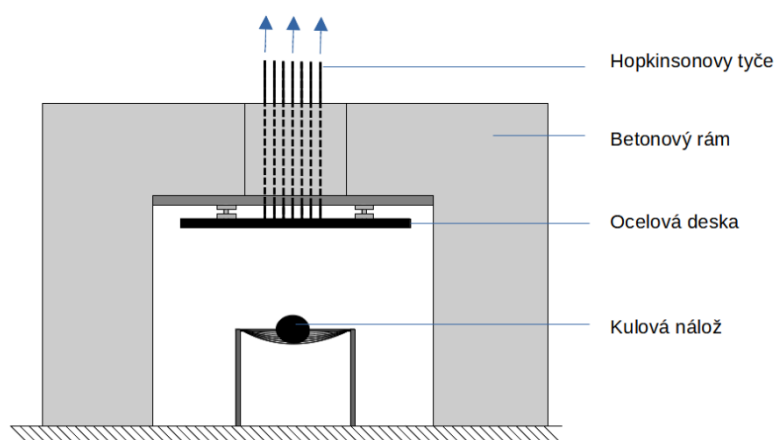
### 4.1 CoBL

Experimentálním měřicím zařízením pro blízkou oblast disponuje univerzita v Sheffieldu ve Velké Británii. Jde o zařízení CoBL, celým názvem „Charakterisation of Blast Loading“ (obrázek 21).

Pro měření jsou využívány Hopkinsonovy tyče (HPB) s délkou 3,25 m. Jedná se o ocelové tyče, kterými se přenáší napětí po odrazu a transformaci RV. To je měřeno tenzometrickými snímači umístěnými po obvodu tyčí ve vzdálenosti 250 mm od ocelové desky [9, 34, 35].

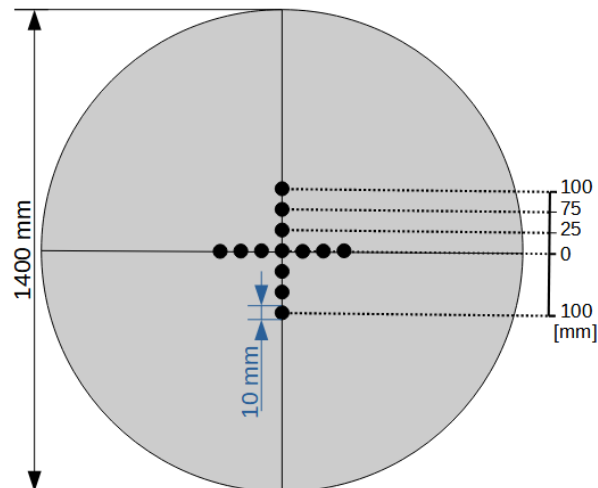
Toto zařízení se skládá ze dvou masivních betonových rámu, které jsou navíc kvůli zvýšení odolnosti vyztuženy ocelovými vlákny a pruty. Tyto rámy mají mezi sebou rozestup 1 metr a jsou složeny ze dvou sloupů čtvercového půdorysu s hranou 500 mm. Spojení sloupů zajišťuje betonový nosník, jenž je 500 mm široký a 750 mm vysoký. Celková výška rámové konstrukce měří přibližně 2 m [24, 34].

Zespodu je k rámu přimontována deska z vysokopevnostní oceli s tloušťkou 100 mm, která má v průměru 1400 mm. Její funkcí je odraz RV a produktů detonace [24, 34].



Obrázek 21: Schéma CoBL [34]

Skrze tuto desku je vyvrtáno celkem 17 otvorů pro HPB s průměrem 10 mm. Tyče jsou rozmístěny v kříži ve vzdálenosti odpovídající 25, 50, 75 a 100 mm od středu desky (obrázek 22) tak, aby zatěžovací konec HPB byl v rovině se zatěžovanou ocelovou deskou [9, 24, 34]. Hodnoty získané v každé vzdálenosti se průměrují, čímž dojde ke snížení vlivu nerovnoměrného zatížení HPB v blízké oblasti [9, 34].

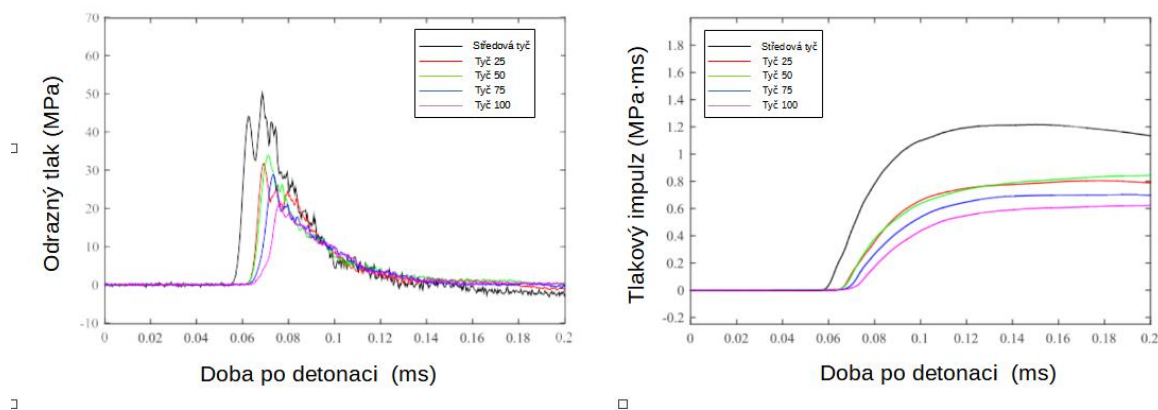


Obrázek 22: Ocelová deska (CoBL) [34]

Nálož se nachází pod středem desky. Umístění záleží na geometrii nálože [24, 34].

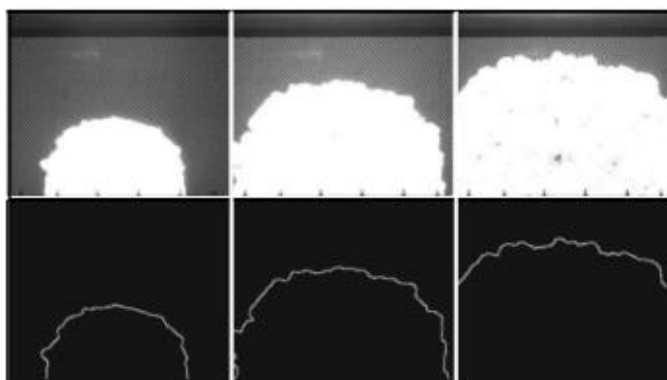
- V případě kulové nálože je výbušnina zavěšena v tkanině ze skleněných vláken, která je natažena přes ocelový kruh na vzpěrách [9, 24, 34].
- U nálože s válcovou geometrií se využívá dřevěných podpěr, přičemž nálož je umístěna do ocelového kontejneru válcového tvaru [34]. Nálož může být zavěšena jen v tkanině jako u případu kulové nálože, ale musí být zajištěno stejné nasměrování válce při všech měřeních, aby mezi výsledky nedocházelo k velkým rozdílům [9].

Měření jako takové je zahájeno poklesem napětí, které je vyvoláno přerušением lanka omotaného kolem rozbušky [24, 34]. Výsledky měření, kterými jsou průběh odrazného přetlaku a průběh tlakového impulzu zobrazuje obrázek 23 [9].



Obrázek 23: Výsledek měření [9]

K ověření výsledků naměřených přetlaků může dojít na základě snímků vysokorychlostní kamery (až 100 000 fps), která doplňuje aparaturu CoBL. Zpracováním (obrázek 24) a následnou analýzou fotografií fireballu v ranné fázi expanze se zjistí rychlost VRV za použití předpokladu, že rychlost povrchu se rovná rychlosti rázové vlny [34, 36].



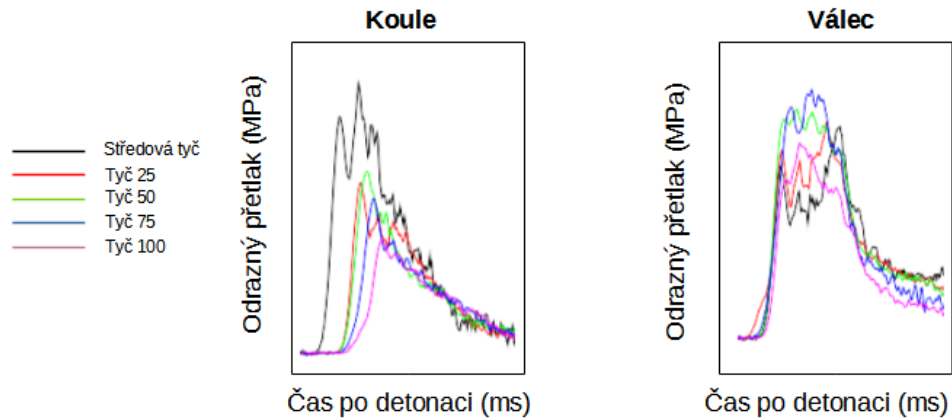
Obrázek 24: Zpracování snímků fireballu [36]

Získaná rychlost je pak následně použita k předpovědi přetlaku pomocí Rankine–Hugoniotových rovnic. Ty vyjadřují zachování hmoty, hybnosti a energie v souřadnicové soustavě pohybující se s RV. Komplikace této optické metody spočívají ve špatné rozlišitelnosti hranic fireballu. Slouží však nejen k neinvazivnímu stanovení přetlaků u blízkého výbuchu, ale také pro studium fireballu a jeho povrchových nestabilit [36, 37].

#### 4.2 Modelování a nedostatky LS-DYNA

Jmenovaná LS-DYNA patří do skupiny programů určených pro simulace fyzikálních dějů s nelineárním průběhem. Typickým příkladem takového děje je „Crash test“ prováděný v automobilovém průmyslu [26].

Během let se prováděly studie, které se snažily blízký výbuch nasimulovat, a to často s velmi dobrými výsledky pro kulovitou nálož. Ze studií však také plyne, že velkou roli v této oblasti hraje geometrie nálož (obrázek 25) [9, 24, 34, 38].



Obrázek 25: Srovnání průběhu přetlaku kulové a válcové nálož [9]

Při následném porovnání výsledků válcové nálož získaných v experimentech s výsledky získanými ze simulace dochází k nesrovnalostem. Ty naznačují, že modely, které slouží dobře pro jednoduchý tvar kulové nálož, nepopisují zcela přesně realitu. To se poté projevuje v případě válcové nálož, kde je VRV značně deformovaná [9, 13, 34].

Obecně v blízkém poli vyhodnocují numerické metody vyšší přetlaky oproti experimentům [9, 13, 34]. Například dle studie provedenou Rigbym [34] pomocí zařízení CoBL bylo naměřeno u středové tyče v experimentu 160 MPa, ale výsledek získaný ze simulace dosahoval 800 MPa. [34]

Tento rozdíl prozrazuje, že používané poloempirické rovnice (Kingery and Bulmash) jsou nevhodné pro složitější tvary, ukazuje se ale také, že model počítá s vyšší rychlostí rozkladu [9, 34].

Následkem nesrovnalostí způsobené tvarem a vzdáleností může být přecenění výkonnosti konstrukcí projektanty, kteří využívají tyto modely pro návržení protivýbuchové prevence [9].

## ZÁVĚR

Blízký výbuch je prozatím stále nevyčerpané téma. Poznatky získané experimenty v této oblasti mohou zásadně pomoci projektantům se správným určením výdrže konstrukcí v rámci protivýbuchové prevence.

V této práci jsem se snažil popsat blízký výbuch a jeho problematiku, která je spojena s vlivem plynných produktů. Při blízkém výbuchu dochází ke komplexnímu působení mnoha faktorů, které svým působením znesnadňují měření v této oblasti, ať již jde o geometrii nálože, povrchové nestability fireballu, vysokou teplotu nebo tlak. Tyto extrémní podmínky v čele s tlakem, který při odrazu vzdušných rázových vln může následně nabývat násobků hodnot tlaků příchozích vln, omezují použití tlakových snímačů využívaných při vzdáleném výbuchu. Kvůli tomu dochází k používání měřících alternativ.

Avšak i se specializovaným zařízením CoBL, které využívá pro měření Hopkinsonových tyčí, se prozatím nepovedlo vyplnit mezery v dokonalém pochopení blízkého výbuchu. Není dodnes známa ani stavová rovnice, jež by blízký výbuch popisovala. Nadále je tedy potřeba provádět další studie se zaměřením na blízkou oblast.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LIBERMAN, M. A., et al. Deflagration-to-detonation transition in highly reactive combustible mixtures. *Acta Astronautica*, 2010, 67.7-8: 688-701.
- [2] ORAN, Elaine S.; GAMEZO, Vadim N. Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion. *Combustion and Flame*, 2007, 148.1-2: 4-47.
- [3] AOUDAD, C. J., et al. Beirut explosion: TNT equivalence from the fireball evolution in the first 170 milliseconds. *Shock Waves*, 2021, 1-15.
- [4] JANOVSKEÝ, Břetislav. PŮSOBENÍ VZDUŠNÝCH RÁZOVÝCH (TLAKOVÝCH) VLN NA ZAŘÍZENÍ A OSOBY. Pardubice, 2008. Přednáška. UPCE.
- [5] MAKOVÍČKA, Daniel; JANOVSKEÝ, Břetislav; ČERNÍN, Milan. Příručka protivýbuchové ochrany staveb. Česká technika-nakladatelství ČVUT v Praze, 2008.
- [6] MINCHINTON, A. On the influence of fundamental detonics on blasting practice. In: 11th international symposium on rock fragmentation by blasting, Sydney. 2015. p. 41-53.
- [7] ZHOU, Ye, et al. Rayleigh–Taylor and Richtmyer–Meshkov instabilities: A journey through scales. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2021, 423: 132838.
- [8] SLUKA, Vilém. Výkladový terminologický slovník některých pojmů používaných v analýze a hodnocení rizik pro účely zákona o prevenci závažných havárií. Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2004.
- [9] LANGRAN-WHEELER, C., et al. Characterisation of reflected blast loads in the very-near field from non-spherical explosive charges. In: Proceedings of the 17th international symposium for the interaction of munitions with structures (ISIEMS17). 2017.
- [10] VÁVRA, Pavel. UNIVERZITA PARDUBICE. KATEDRA TEORIE A TECHNOLOGIE VÝBUŠIN. Teorie výbušin: učební texty - licenční studium. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008, 101 s. : il. ; 24 cm. ISBN 978-80-7395-116-0.
- [11] VÁVRA, Pavel. Teorie výbušnin: učební texty předmětu. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002. ISBN 80-7194-444-0.
- [12] VÁVRA, Pavel a Jiří VÁGENKNECHT. Teorie působení výbuchu: licenční studium. Vyd. 2. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-125-2.



- [13] LANGRAN-WHEELER, Christian, et al. Reflected blast loads from long cylinders in the near-field. In: Proceedings of the 18th international symposium for the interaction of munitions with structures (ISIEMS18), Panama City, FL. 2019.
- [14] PANTOFLÍČEK, Jaroslav a František LÉBR. Teorie působení výbuchu I: výbuchové vlny. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967, 88 s. : il.
- [15] NOVOTNÝ M., MEČÍŘ R., SEDLÁČEK S., TAMCHYNA V.: Teorie výbušin. VŠCHT, Pardubice, 1981.
- [16] STRÍBNÝ, Jakub. Zjišťování parametrů rázových vln indukovaných vybranými typy výbušnin. 2019.
- [17] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: 2020 Beirut explosion [online]. c2022 [citováno 30. 05. 2022]. Dostupný z WWW: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2020\\_Beirut\\_explosion&oldid=1090325494](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2020_Beirut_explosion&oldid=1090325494)>
- [18] GRIČOVÁ, Andrea. Výbuch téměř srovnal Bejrút se zemí. Experti: Jen na ledek to nevypadá. Deník.cz [online]. Praha: VLTAVA LABE MEDIA, 2020 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: [https://www.denik.cz/ze\\_sveta/exploze-bejrut-mesto-20200805.html](https://www.denik.cz/ze_sveta/exploze-bejrut-mesto-20200805.html)
- [19] FROST, David L., et al. Thermocouple temperature measurements in metalized explosive fireballs. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46.6: 899-911.
- [20] Jaroslav Reichl, Martin Všeticka. Adiabatický děj. Encyklopedie fyziky. [Online] 2006-2022. [Citace: 30. Květen 2022.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/604-adiabaticky-dej>
- [21] VRBA, Pavel. ZÁKLADY PROBLEMATIKY VÝBUCHU A JEJICH VLIV NA STAVEBNÍ KONSTRUKCE [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: [https://concrete.fsv.cvut.cz/phdworkshop/proceedings/2020/pdf/Vrba\\_Pavel.pdf](https://concrete.fsv.cvut.cz/phdworkshop/proceedings/2020/pdf/Vrba_Pavel.pdf). Rešerše. ČVUT.
- [22] PECHAR, Jiří. chování horninového masivu při a po vnitřní explozi-základní pojmy. 2019.
- [23] SHIN, Young S. Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion. Computers & Structures, 2004, 82.23-26: 2211-2219.

- [24] TYAS, Andrew. Experimental measurement of pressure loading from near-field blast events: techniques, findings and future challenges. Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, 2018, 2.8: 471.
- [25] CIMPOERU, Stephen J.; RITZEL, David V.; BRETT, John M. Physics of explosive loading of structures. In: Explosion Blast Response of Composites. Woodhead Publishing, 2017. p. 1-22.
- [26] LS-DYNA. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/LS-DYNA>
- [27] JANOVSKEÝ, Břetislav. VÝBUCH VE VNITŘNÍM PROSTORU OBJEKTŮ, VNITŘNÍ VÝBUCH. Pardubice, 2010. Přednáška. UPCE.
- [28] REPETITORIUM ELEKTRO. 2007. [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36236.pdf>
- [29] TATALÁK, Adam. Deformačně-napěťová analýza tenkostěnné skříně vystavené rázovému zatížení od výbuchu. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [30] ČESKO. fragment #f1719796 vyhlášky č. 246/1996 Sb., Českého báňského úřadu, kterou se stanoví podrobnější podmínky pro povolování výbušnin, výbušných předmětů a pomůcek do oběhu a jejich přezkušování - znění od 1. 3. 2002. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 2. 6. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1996-246#f1719796>
- [31] MAKOVIČKA, D.; MAKOVIČKA, D. Navrhování stavební konstrukce při zatížení tlakovou vlnou od výbuchu. ČVUT v Praze, Kloknerův ústav. Praha, 2010.
- [32] MAKOVIČKA, Daniel, Daniel MAKOVIČKA a Jakub VÁGNER. Výpočetní programy pro zjednodušený výpočet ohrožení konstrukce výbuchem pevné nálože v její blízkosti. Praha, 2008. Přednáška. ČVUT.
- [33] KRÁL, Patrik. Studie odrazné desky pro odlehčení výbuchu. 2019. Master's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Výpočetní a informační centrum.
- [34] RIGBY, S. E.; FULLER, B. J.; TYAS, Andy. Validation of near-field blast loading in LS-DYNA. In: Proceedings of the 5th International Conference on Protective Structures (ICPS5), Poznan, Poland. 2018.

- [35] FOREJT, Milan; BUCCHAR, Jaroslav. DYNAMICKÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI OCELÍ ZÍSKANÉ METODOU HOPKINSONOVA TESTU  
DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS OBTAINED BY THE HOPKINSON TEST METHOD.
- [36] RIGBY, S. E., et al. Reflected near-field blast pressure measurements using high speed video. *Experimental Mechanics*, 2020, 60.7: 875-888.
- [37] HARMANEC, Petr a Miroslav BROŽ. Stavba a vývoj hvězd. Praha: Matfyzpress, 2011. ISBN 978-80-7378-165-1. Str. 248-249.
- [38] LI, Jun; WU, Chengqing; HAO, Hong. Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion. *Engineering Structures*, 2015, 102: 395-408.
- [39] ZHANG, Aman, et al. Numerical simulation of underwater contact explosion. *Applied Ocean Research*, 2012, 34: 10-20.