

Zpracováno pro účely projektu:

Specifikace požadavků zákona o prevenci závažných havárií v oblasti výroby a skladování výbušnin, střeliva, munice a pyrotechnických výrobků, OPPZH, VÚBP, 2020 – 2021



DÍL 1

VÝBUŠNINY jako zdroj rizika závažných havárií

**REPETITORIUM
základních informací**

Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v. i. i, Praha
prosinec 2021

Dedikace



©2021

Tento výsledek byl finančně podpořen z institucionální podpory na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace na léta 2018–2022 a je součástí výzkumného úkolu 03-2020-VÚBP **Specifikace požadavků zákona o prevenci závažných havárií v oblasti výroby a skladování výbušnin, střeliva, munice a pyrotechnických výrobků**, řešeného Výzkumným ústavem bezpečnosti práce, v. v. i., v letech 2020-2021.

Obsah

1	VÝBUŠNINY – ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI A ROZDĚLENÍ	5
1.1	ÚVODNÍ POZNÁMKY	5
1.1.1	<i>Pojem výbušnin z hlediska řešeného projektu</i>	5
1.1.2	<i>Pojem kondenzovaných výbušnin</i>	5
1.1.3	<i>Terminologie tlakových projevů výbušnin</i>	5
1.1.4	<i>Hlavní legislativní regulace.....</i>	6
1.2	TYPICKÉ ZNAKY VÝBUŠNIN	6
1.3	ROZDĚLENÍ VÝBUŠNIN	8
1.3.1	<i>Trhaviny.....</i>	8
1.3.2	<i>Střeliviny.....</i>	12
1.3.3	<i>Třaskaviny</i>	13
1.3.4	<i>Pyrotechnické slože</i>	14
1.3.5	<i>Problematické dělení výbušnin na primární a sekundární.....</i>	14
2	VÝBUŠNINY JAKO ZDROJ TLAKOVÝCH PROJEVŮ	16
2.1	ZÁKLADNÍ DRUHY VÝBUCHOVÉ PŘEMĚNY	16
2.1.1	<i>Detonace</i>	16
2.1.2	<i>Explozivní hoření.....</i>	17
2.1.3	<i>Nebezpečí přechodu hoření v detonaci</i>	17
2.2	PŮSOBENÍ VÝBUCHU NA OKOLÍ.....	18
2.2.1	<i>Rázová vlna vyvolaná detonací</i>	18
2.2.2	<i>Účinky detonace</i>	18
2.2.3	<i>Tlaková vlna vyvolaná explozivním hořením</i>	19
2.3	VĚCNÝ A TERMINOLOGICKÝ PŘEHLED TLAKOVÝCH PROJEVŮ VÝBUCHU	19
2.3.1	<i>Vybrané termíny.....</i>	19
2.3.2	<i>Grafická interpretace</i>	20
2.4	PRŮVODNÍ JEVI VÝBUCHU	21
2.4.1	<i>Chemické toxické zplodiny.....</i>	21
2.4.2	<i>Toxické zplodiny havarijního výbuchu</i>	22
2.4.3	<i>Ohrožení okolí rozletem úlomků.....</i>	23
3	CHOVÁNÍ RÁZOVÝCH VLN V PROSTŘEDÍ	24
3.1	PROSTŘEDÍ PRO ŠÍŘENÍ RÁZOVÝCH VLN	24
3.2	TLAKOVÉ PROJEVY VE VZDUCHU	24
3.2.1	<i>Základní popis.....</i>	24
3.2.2	<i>Interakce vzdušných rázových vln</i>	26
3.3	ÚČINKY RÁZOVÝCH VLN V PEVNÉM PROSTŘEDÍ	26
4	OHROŽENÍ LIDSKÉHO TĚLA.....	28
4.1	ÚČINKY VÝBUCHU NA LIDSKÝ ORGANISMUS	28
4.1.1	<i>Přímé následky</i>	29
4.1.2	<i>Nepřímé následky.....</i>	30
4.2	VLIV PROSTŘEDÍ NA ÚČINKY VÝBUCHU NA LIDSKÝ ORGANISMUS	31
4.2.1	<i>Vzdušné prostředí.....</i>	31
4.2.2	<i>Vodní a pevné prostředí</i>	32
5	MODELOVÁNÍ TLAKOVÝCH PROJEVŮ VÝBUCHU.....	33
5.1	ÚČINKY A DOSAH TLAKOVÝCH PROJEVŮ	33
5.2	POUŽITÍ PRAHOVÝCH HODNOT PŘETLAKU	33
5.2.1	<i>Původ a použitelnost prahových hodnot</i>	33
5.2.2	<i>Ukázka publikovaných prahových hodnot přetlaku</i>	34
5.2.3	<i>Aplikace geometrické podobnosti, redukováná vzdálenost</i>	36
5.2.4	<i>Aplikace energetické podobnosti, TNT ekvivalent</i>	38

5.2.5	<i>Odlišné přístupy při modelování výbuchu plyných směsí</i>	39
5.3	POUŽITÍ PROBITOVÝCH FUNKCÍ	40
5.4	PROBITOVÉ FUNKCE PRO RŮZNÉ PODMÍNKY	41
5.4.1	<i>Poškození plic</i>	41
5.4.2	<i>Poškození ušních bubínků</i>	42
5.4.3	<i>Poranění hlavy</i>	42
5.4.4	<i>Náraz celého těla</i>	43
5.4.5	<i>Letící trosky a fragmenty</i>	43
5.4.6	<i>Další varianty probitových funkcí</i>	44
5.5	PROBITOVÉ FUNKCE – SHRNUTÍ	44
5.5.1	<i>Obraz účinků výbuchu</i>	44
5.5.2	<i>Podmínky použití probitových funkcí</i>	46
6	PRINCIPY PREVENCE NÁSLEDKŮ HAVARIJNÍCH VÝBUCHŮ	49
6.1	QD PRINCIP – FENOMENOLOGICKÝ PŘÍSTUP	49
6.1.1	<i>Efekt vzdálenosti</i>	49
6.1.2	<i>Bezpečnostní vzdálenost</i>	49
6.1.3	<i>Bezpečnostní vzdálenosti, bezpečnostní pásma a obložení podle zákona o výbušninách</i>	50
6.1.4	<i>Bezpečnostní pásma a dosah přetlaku</i>	52
6.2	POSOUZENÍ RIZIKA – PROBABILISTICKÝ PŘÍSTUP	56
6.2.1	<i>Pravděpodobnostní princip, riziko</i>	56
6.2.2	<i>Posouzení rizik podle zákona o PZH</i>	57
6.3	ROZLET ÚLOMKŮ	58
6.3.1	<i>Terminologie, zdroje úlomků</i>	58
6.3.2	<i>Úlomky staveb a zařízení</i>	59
6.3.3	<i>Ochrana před rozletem podle zákona o výbušninách</i>	60
7	ZÁVĚR	62
8	POUŽITÁ LITERATURA	63
9	PŘÍLOHY	66
9.1	PŘÍLOHA 1: VÝBUŠNINY, VÝBUŠNÉ LÁTKY A PŘEDMĚTY, VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ PODLE PLATNÉ ČESKÉ LEGISLATIVY	66
9.2	PŘÍLOHA 2: VÝBUŠNINY, VÝBUŠNÉ LÁTKY A PŘEDMĚTY, ROZDĚLENÍ PODLE NAŘÍZENÍ CLP	71

1 Výbušniny – základní vlastnosti a rozdělení

1.1 Úvodní poznámky

1.1.1 Pojem výbušnin z hlediska řešeného projektu

*Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi, ve znění pozdějších předpisů (dále též „zákon o prevenci závažných havárií“, příp. „zákon o PZH“) klasifikuje nebezpečné látky (a směsi) na základě kategorií nebezpečnosti v souladu s evropským nařízením (ES) č. 1272/2008, o klasifikaci, označování a balení látek a směsí (tzv. „nařízení CLP“)¹. Zákon o PZH stanovuje pro **výbušniny** dvě kategorie nebezpečnosti (**P1a, P1b**), do nichž spadají jak **výbušné látky a směsi**, tak **výbušné předměty**; tedy předměty, v nichž jsou tyto látky či směsi obsaženy (podrobněji viz tabulka I v příloze 1 zákona a navazující poznámky, srov. též Příloha 2 tohoto dokumentu).*

Vedle toho *zákon č. 61/1988 Sb., o hornické činnosti, výbušninách a o státní báňské správě, ve znění pozdějších předpisů (pro účely tohoto dokumentu dále jen „zákon o výbušninách“)* chápe v rámci své působnosti pojem **výbušniny** jako **(výbušné) látky a předměty** řazené do **třídy 1** Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR), ovšem s tím, že ze své působnosti zároveň vylučuje ty výbušné předměty, které představují střelivo, munici a pyrotechnické výrobky (podrobněji viz ustanovení § 21 odst. 1 písm. a) zákona, srov. též Příloha 2 tohoto dokumentu).

V tomto dokumentu (REPETITORIUM, díl 1) je nadále hlavní pozornost věnována zejména výbušninám představovaným (chemickými) výbušnými látkami a směsmi, pokud není v konkrétních případech výslovně uvedeno jinak; výbušným předmětům (resp. střelivu, munici a pyrotechnickým výrobkům) jsou věnovány ostatní díly REPETITORIA.

1.1.2 Pojem kondenzovaných výbušnin

Občas používaný pojem *kondenzované výbušniny* (tj. skupenství pevného nebo kapalného) je ve vlastní problematice výbušnin nadbytečný, protože výbušniny v plynném skupenství neexistují. Ovšem v obecněji chápané problematice chemických výbuchů se tímto způsobem někdy upřesňuje, že se v takovém případě jedná o explozi „skutečných výbušnin“, a nikoli hořlavých vzdušných disperzí, tedy především směsí hořlavých plynů, par, příp. aerosolů nebo prachů se vzduchem.

Až na několik drobných výjimek (které byly v daném kontextu považovány za účelné) se tento dokument vzhledem k tématu řešeného projektu zabývá pouze (kondenzovanými) výbušninami.

1.1.3 Terminologie tlakových projevů výbušnin

Obvykle v popularizačních interpretacích vede využití více či méně zdařilých překladů, zpravidla z angličtiny, zejména v oblasti typických tlakových projevů výbušnin, k možným nedorozuměním z hlediska jejich výkladu i terminologie. Z tohoto důvodu je v kap. 2.3 uveden terminologický i věcný přehled těchto dějů, i s ohledem na anglické termíny.

¹ classification, labelling and packaging

1.1.4 Hlavní legislativní regulace

Legislativní regulace výbušnin je v našich podmínkách (s úzkou vazbou na legislativní přístupy EU) dána především dvěma zákony, v podrobnostech pak jejich prováděcími vyhláškami:

- v oblasti prevence závažných havárií s účastí výbušnin *zákonem o prevenci závažných havárií* [29],
- v oblasti nakládání s výbušninami „*zákonem o výbušninách*“ [10];

Zákon o výbušninách pokrývá „civilní“ oblast nakládání s výbušninami mimo střeliva, munice a pyrotechnických výrobků a mimo výbušnin v držení ozbrojených sborů a dopravy výbušnin probíhající vně areálu provozovatele.

Podobně zákon o prevenci závažných havárií se nevztahuje mimo jiné také na vnější přepravu, tedy na (§ 1 odst. 3 písm. c):

c) silniční, drážní, leteckou a vodní přepravu nebezpečných látek mimo objekty, včetně dočasného skladování, nakládky a vykládky během přepravy,

- dále se nevztahuje na (§ 1 odst. 3 písm. e):

e) geologické práce, hornickou činnost a činnost prováděnou hornickým způsobem v dolech, lomech nebo prostřednictvím vrtů, s výjimkou povrchových objektů chemické a termické úpravy a zušlechťování nerostů, skladování a ukládání materiálů na odkaliště, jsou-li v souvislosti s těmito činnostmi umístěny nebezpečné látky.

1.2 Typické znaky výbušnin

Nařízení CLP² (část 2.1.1.2) definuje výbušnou látku nebo směs jako: *...tuhou nebo kapalnou látku či směs látek, která je sama o sobě schopna chemickou reakcí vytvořit plyn takové teploty a tlaku a takové rychlosti, které mohou poškodit okolí³.*

Účelem výbušnin jako technických produktů je působit na své okolí mechanickým a/nebo tepelným účinkem. Energie potřebná na vyvolání těchto účinků je u naprosto převážné většiny výbušnin hrazena z exotermní chemické reakce⁴, která má charakter oxidace probíhající formou chemického výbuchu, a to pouze ve vlastní hmotě výbušnin. To je umožněno skutečností, že hmota výbušniny současně obsahuje jak *složku redukční* (hořlavou, schopnou oxidace), tak *složku oxidační*. Toto vnitřní uspořádání je základním znakem převážné většiny výbušnin a díky němu je probíhající výbuchová reakce (na rozdíl od hoření hořlavých látek) prakticky nezávislá na okolním vzdušném kyslíku.

Obě složky, redukční i oxidační, mohou být obsaženy:

² Nařízení (ES) č. 1272/2008, o klasifikaci, označování a balení látek a směsí


³ Zároveň tato definice zahrnuje i pyrotechnické látky.

⁴ U těchto výbušnin má tedy uvolněná energie termochemický původ (reakční teplo oxidační reakce); odlišně je tomu u třaskavin (viz kap. 1.3.3).

- buď společně v každé molekule *chemicky homogenní výbušniny*, která tak má povahu chemické sloučeniny; redukční složku zde obvykle představuje uhlíkatá („organická“) část molekuly a oxidační složku funkční skupiny, v nichž je kyslík vázán zpravidla na dusík, jak je tomu u základních běžně používaných výbušnin (viz tab. 1);
- anebo odděleně, ve dvou různých složkách *chemicky heterogenní výbušniny* (představující ovšem fyzikálně homogenní směs); její redukční složka je zpravidla tvořena organickou hořlavou látkou, příp. práškovým kovem apod., oxidační složka obvykle oxidující soli s jedním nebo více atomy kyslíku v molekule, které jsou v ní zároveň vázány na dusík nebo chlór⁵; typickým příkladem tohoto vnitřního uspořádání výbušniny jsou heterogenní tuhé pohonné hmoty nebo některé pyrotechnické slože (viz dále kap. 1.3.2 a 1.3.4).

Výbuchová chemická reakce probíhá v úzkém *reakčním pásmu*, které se spontánně šíří hmotou výbušniny rychlostí (dle podmínek) až několika tisíc metrů za sekundu. I tento jev je umožněn skutečností, že výbušnina obsahuje vlastní oxidační složku, čímž se zásadně liší od pevných nebo kapalných hořlavých látek [3, 4]. U nich se za běžných podmínek pásmo hoření⁶ (doprovázené obvykle plamenem) do hořlavé hmoty nešíří, ale naopak: pro udržení hoření musí být hmota do pásma hoření transportována⁷, včetně kyslíku, jehož dostatečný přístup z okolí je základní podmínkou „obyčejného“ hoření.

Tabulka 1: Základní chemicky jednotné výbušniny (podle [1, 2])

Skupina látek	Charakteristická chemická funkční skupina	Typický příklad, mezinárodní zkratka	Poznámka
Kapalné nitroestery	- ONO ₂	nitroglycerin (NG) etylenglykoldinitrát (EGDN) dietylenglykoldinitrát (DEGDN)	V tabulce směrem odshora dolů přibližně - klesá energie - klesá citlivost - stoupá chemická stabilita výbušnin 
Krystalické nitroestery	- ONO ₂	pentrit (PETN)	
Vysokomolekulární nitroestery	- ONO ₂	nitrocelulóza (NC)	
Nitraminy	> N-NO ₂	hexogen (RDX) oktogen (HMX)	
Aromatické nitrolátky	- NO ₂	trinitrotoluen (TNT)	

⁵ Obvykle dusičnany, chlorečnany, chloristany, apod.

⁶ Pásmo (zóna, oblast) hoření vzniká v místě kontaktu paliva a oksylichovadla (obvykle vzduchu), pokud zde bylo dosaženo zápalné teploty.

⁷ Jako příklad uveďme vztlínání roztaveného vosku knotem do plamene svíčky.

1.3 Rozdělení výbušnin

Nejběžnější rozdělení výbušnin

- a) vychází z typických vlastností a účelu jejich použití a dělí je do čtyř základních skupin, na:
 - **trhaviny, střeliviny, třaskaviny a pyrotechnické slože.**
- b) Dále vyhláška č. 99/1995 Sb. [11] zákona o výbušninách [10] zařazuje výbušniny podle jejich chování při výbušné přeměně⁸ do **tříd nebezpečí** (viz Příloha 1 část 4) tohoto dokumentu).
- c) Z širšího pohledu (viz též kap. 1.1.1) lze výbušniny dělit na základě nařízení CLP, jak ukazuje schéma v Příloze 2 tohoto dokumentu.

1.3.1 Trhaviny

Trhaviny jsou určeny k přímému tříštivému, destruktivnímu působení na okolní prostředí. To je v průmyslové oblasti využíváno k rozpojování hornin a jiných materiálů (těžební a stavební práce, průmyslové destrukce), ve vojenské sféře k destrukci ocelových a betonových struktur, k prorážení pancířů vozidel, apod.; dále exploze trhaviny jako bojové náplně munice způsobuje fragmentaci kovového obalu a rozlet střepin s ničivým účinkem na okolí.

Výbuchový děj probíhá v trhavinách formou *detonace*. Šíření tohoto chemicko-fyzikálního děje směrem do nezreagované výbušniny probíhá detonační rychlostí, která, dle řady okolností, se může pohybovat zhruba v rozmezí 1000 až 9000 m.s⁻¹, vždy však dosahuje nadzvukové rychlosti za místních podmínek⁹ (podrobněji viz kap. 2.1.1). Do detonace je trhavinu třeba uvést dostatečně účinným detonačním impulsem zvnějšíku, tedy rozbuškou, příp. další trhavinou (roznětná, počinová nálož) nebo bleskovicí¹⁰ u průmyslových trhavin, v případě munice detonujícím muničním iniciátorem¹¹. Vedle výkonových a dalších funkčních parametrů trhavin je hlavním hlediskem jejich bezpečnost. Trhavinu by nemělo být možno uvést do činnosti (detonace) jinak, než předepsaným vnějším zdrojem detonace. Detonační děj v trhavině se do okolního prostředí přenáší především ve formě fyzikálního děje – rázové vlny (podrobněji viz kap. 2.2.1).

Co se týče dělení trhavin, obecně lze použít několika hledisek. Názorné je rozdělení na základní dvě skupiny, tedy *trhaviny průmyslové* a *trhaviny pro vojenské použití* („vojenské“), i když význam tohoto členění je dnes již spíše historický. Důvodem je stírání rozdílů mezi oběma

⁸ Chování při výbušné přeměně s uvedeným dělením dle odst. a) v podstatě koresponduje, ale může záviset i na dalších okolnostech.

⁹ Místní podmínky jsou charakterizovány vysokým tlakem (hustotou) a vysokou teplotou hmotného prostředí, takže rychlost zvuku je zde podstatně vyšší než 330 – 340 m.s⁻¹, běžně uváděných pro vzduch za normálních podmínek.

¹⁰ Bleskovice – je pomocné rozněcovadlo určené k přenosu detonace k (jedné nebo) více náložím s cílem jejich současného výbuchu, přičemž přenos detonace lze realizovat na libovolnou vzdálenost (je dána délkou bleskovice). Bleskovice je tvořena „duší“ (obsahující výkonnou krystalickou trhavinu – pentrit, hexogen), která je opatřena obalem dvěma druhy opředení a vnějším plastovým ochranným obalem; iniciuje se rozbuškou (podle [5]).

¹¹ Iniciace munice je zpravidla zajištěna kombinací několika funkčních prvků; bližší popis by přesáhl rámec tohoto dokumentu.

skupinami v současné praxi. Vývoj a výroba trhavin pro potřeby ozbrojených složek zpravidla probíhá v civilních zařízeních, dříve výhradně vojenské trhavy (zejména plastické pro zvláštní použití) jsou dnes používány ke speciálním účelům i v civilním sektoru, naopak trhavy určené především pro něj jsou příležitostně používány i ozbrojenými složkami; mimo to trhavy z obou oblastí mohou být za stanovených podmínek používány Hasičským záchranným sborem ČR při provádění záchranných a likvidačních prací.

Níže uvedené údaje je třeba považovat za pouze orientační, konkrétní informace o jednotlivých typech trhavin, jejich vlastnostech a způsobu použití lze zpravidla nalézt na webových stránkách jejich výrobců, resp. dodavatelů. V případě průmyslových trhavin (resp. veškerých výbušnin) je dodavatel zároveň povinen poskytovat odběratelům tzv. *návod k používání trhavin*.

Průmyslové trhavy

Průmyslové trhavy [3] jsou zpravidla tvořeny řadou komponent, které cíleně ovlivňují jejich požadované vlastnosti, takže na základní výbušnou složku mnohdy připadá pouze omezený podíl z celkového složení, což je pro daný účel zcela postačující. Obecně průmyslové trhavy obsahují základní výbušnou složku – buď kapalné nitroestery (zpravidla v želatinované formě s nitrocelulózou¹²) nebo TNT, dále pro zvýšení energie systém okysličovač (zpravidla dusičnan amonný) a paliva (dřevěná moučka, oleje, práškový hliník, močovina apod.), také pomocné přísady (emulgátory, stabilizátory, hydrofobizační prostředky apod.). Směs takto rozmanitých komponent může jevit sklon ke vzniku nežádoucích dlouhodobých chemických reakcí mezi jejími jednotlivými složkami v průběhu celé životnosti (resp. skladování) trhavin, takže (zvláště je-li hlavní výbušnou složkou kapalný nitroester) doba spotřeby průmyslových trhavin je (na rozdíl od vojenských) poměrně omezená, obvykle ne delší než 1 rok, často i méně. Ve srovnání s vojenskými dosahují průmyslové trhavy i nižších výkonů. V každém případě však složení průmyslových trhavin představuje optimální kompromis mezi požadavky na jedné straně na výkon a další funkční vlastnosti¹³ (detonační schopnost, chemická a fyzikální stabilita, manipulační bezpečnost, odolnost vůči vodě, toxicita plynů zplodin výbuchu apod.), na straně druhé na ekonomickou stránku jejich použití (danou výrobními náklady i dalšími vlivy).

K základním skupinám průmyslových trhavin lze rámcově uvést:

- *Sypké trhavy – amonledkové* – základní složkou je dusičnan amonný (oxidovadlo) doplněný palivem (dřevěná moučka, oleje apod.) a pomocnými přísadami, u skupiny *amonitů* je navíc TNT (trinitrotoluen, tritol); je-li zde u základní kombinace TNT a dusičnan amonný použit jako palivová složka ještě práškový hliník, jedná se o *amonaly*. Nejjednodušší amonledkovou trhavinu představuje směs DAP¹⁴ (dusičnan amonný + palivo); palivem je zde nafta či podobné olejovité látky. V principu

¹² Vhodný druh nitrocelulózy („dynamitová“) podléhá vlivem kapalných nitroesterů želatinaci a vytváří s nimi homogenní gel – želatinovou směs („želatinu“).

¹³ Podrobnější popis výkonových parametrů trhavin a dalších užitečných vlastností by přesáhl rámec tohoto dokumentu.

¹⁴ Mezinárodní označení ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil)

amonledekové trhavyiny dosahují ve srovnání s dynamity vyšší manipulační bezpečnosti, ale nižšího výkonu a nízké odolnosti vůči vodě; jsou určeny převážně pro povrchové, příp. důlní skalní použití (viz tab. 2).

- *Plastické a poloplastické trhavyiny* (želatinované) – *dynamity* – základem je vysoký nebo střední obsah základní výbušné složky – kapalného nitroesteru (nitroglycerin příp. další, viz tab. 1) ve směsi s malým množstvím nitrocelulózy (želatina), doplněný zpravidla dusičnanem amonným, palivovými a pomocnými látkami. Jde o výkonné trhavyiny, vodovzdorné, pro povrchové nebo důlní skalní použití, vlivem speciálních přísad se může jednat i o trhavyiny důlně bezpečné. Pro dynamity je charakteristický obsah kapalného nitroesteru, který však zároveň vede k jejich nižší manipulační bezpečnosti, ve srovnání např. s amonity.
- *Emulzní trhavyiny* (též „*slurry*“¹⁵, *trhavyiny plastifikované vodou*) – mají formu polotekuté kašovitě vodní emulze či suspenze; vzhledem ke svému specifickému složení (zvláště u směsí bez výbušného senzibilizátoru, viz níže odst. b) zpravidla vyžadují zesílený iniciační impuls docílený počínovou náložkou.
 - a) U vývojově starších produktů šlo o *emulzní trhavyiny s výbušným senzibilizátorem*, kterým byl zpravidla TNT, dále doplněný dusičnanem amonným, palivem (oleje, práškový hliník, dřevěná moučka, močovina apod.), navíc s obsahem pomocných látek (emulgátory, stabilizátory apod.) a vody. Trhavyiny byly obvykle používány v náložkách, především pro povrchové trhačí práce v lomech; pro toto použití vykazovaly dostatečný výkon a vyznačovaly se zvýšenou manipulační bezpečností a vodovzdorností.
 - b) Moderní variantu představují *emulzní trhavyiny s nevýbušným senzibilizátorem* vycházející z předchozí varianty složení, v níž však byl TNT (resp. jakákoli výbušnina) nahrazen nevýbušným senzibilizátorem. Představují jej provzdušňující přísady zajišťující v celkové směsi přítomnost homogenně rozptýleného množství vzduchových (resp. plynových) bublinek¹⁶. U starších verzí emulzních trhavin bylo provzdušnění docíleno přidávkem dutých či porézních skleněných, minerálních nebo polystyrénových mikrokuliček, nejnověji je používáno plynujících chemických směsí. Některé typy těchto trhavin jsou používány i ve formě náložek, ale jejich hlavní výhodou je možnost přípravy v míchacím zařízení nabíjecího vozu až na místě spotřeby, kde je trhavyina z vozu hadicí přímo čerpána do vrtu. Optimálním složením lze docílit dostatečného výkonu a vysoké vodovzdornosti trhavin, které jsou zpravidla určeny pro povrchové nebo důlní skalní použití. Absence výbušného senzibilizátoru vede k vysoké manipulační bezpečnosti těchto trhavin.

¹⁵ Z angličtiny: kaše, šlichta; anglické označení též: *watergels*.

¹⁶ Při dostatečně mohutné iniciaci dojde dopadem rázové vlny na plynové bublinky k jejich rychlému adiabatickému stlačení spolu s prudkým zvýšením teploty jejich plynného obsahu (vznik tzv. horkých jader – hot spots), což v okolní směsi paliva a oxidovadla (bez přítomnosti výbušnin) dokáže zajistit vznik detonace a její další šíření (podle [3]).

- *Trhaviny pro zvláštní použití – plastické trhaviny (pro zvláštní použití)* – v domácím sortimentu jde zejména o různé varianty složení vycházejícího z trhaviny typu semtex, které je tvořeno vysokým obsahem krystalické trhaviny (pentrit, hexogen, příp. jejich směs), doplněný trvale plastickým pojivovým systémem (syntetické polymerní pojivo a změkčovadlo). V současnosti se tak vyrábí několik variant „civilních semtexů“, určených pro průmyslové destrukční práce, trhací práce pod vodou, pro výbuchové zpevňování kovových materiálů („listová nálož“) nebo výbuchové plátování a svařování kovů trhavinou v sypké formě [6].
- *Černý prach* – zrněná směs dusičnanu draselného, síry a mletého dřevěného uhlí¹⁷ představuje jakousi „univerzální výbušninu“, dnes sice již okrajově používanou, která však díky svým vlastnostem stále hraje jistou omezenou roli jak v oblasti trhavin, tak i střelivin a pyrotechniky: Při lomové těžbě je využíván jako „šetná trhavina“ k dobývání kamenných bloků určených pro dekorativní nebo umělecké zpracování, zároveň je prakticky nenahraditelný pro účely střelby z historických zbraní (resp. replik) i jako náplň bezpečnostní zápalnice¹⁸; dále je používán v některých pyrotechnických součástech munice a v zábavní pyrotechnice. Pro různé účely jsou používány jednotlivé typy černého prachu lišící se zrnitostí, poněkud případně i složením. Za běžných podmínek není černý prach schopen detonace, rychlost jeho explozivního hoření nepřesahuje 500 m.s⁻¹, neodolává vodě, je ale velmi citlivý vůči mechanickým podnětům nebo zajiskření (podle [7]).

Velmi významné technické a bezpečnostní hledisko představuje rozsah použitelnosti průmyslových trhavin [5] vzhledem k různým podmínkám okolního prostředí (viz tab. 2).

Tabulka 2: Průmyslové trhaviny podle použitelnosti v okolním prostředí (podle [5])

Průmyslové trhaviny	Přibližná charakteristika	Barevné označení trhaviny (obalu)
Povrchové	Nejlevnější, zpravidla vyšší obsah toxických plynů (zejména CO) ¹⁹ ve výbuchových zplodinách.	žlutá
Důlní skalní	Vhodné i pro práci na povrchu, v podzemí pouze mimo doly s nebezpečím výbuchu plynů nebo uhelného prachu; vysoký výkon, u nás nejčastěji používané.	červená
Důlně bezpečné	Pro podzemí s nebezpečím výbuchu plynů (metan) nebo uhelného prachu, speciální přísady, snížený výkon).	

¹⁷ Princip složení černého prachu pochází ze středověku, černý prach tak byl první výbušninou, k níž lidstvo ve svém vývoji dospělo; tuto výsadní pozici ztratil až těsně před koncem 19. stol. v důsledku postupujících vynálezů dalších výbušnin.

¹⁸ Zápalnice (široce využívaná před zavedením elektrického roznětu) se dnes používá pouze okrajově, jako pomocné rozněčovadlo k iniciaci zážehových rozbušek nebo náloží černého prachu při trhacích pracích; je tvořena „duší“ z černého prachu obalenou dvěma druhy opředení a vnějším plastovým ochranným obalem, iniciuje se plamenem pomocí běžných zápalek nebo dalšími stanovenými způsoby (podle [5]).

¹⁹ Nemusí platit vždy, závisí na konkrétním složení.

- protiprachové	Bezpečné proti výbuchu uhelného prachu.	modrá
- protiplynové I. kategorie	Bezpečné proti výbuchu uhelného prachu a plynů.	bílá
- protiplynové II. kategorie	Se zvýšenou bezpečností proti výbuchu uhelného prachu a plynů.	zelená
- protiplynové III. kategorie	Splňují podmínky speciální zkušební metodiky; v ČR se nevyrábějí.	

Vojenské trhaviny

Vojenské trhaviny (dále podle [8]) se používají převážně jako bojová výbušná náplň munice. Vzhledem k její často nešetrné přepravě a manipulaci na místě použití (obvykle po několikaletém předchozím skladování), musejí trhaviny (určené pro munici) splňovat náročné požadavky nejen na vysoký výkon, ale také na dlouhodobou chemickou a fyzikální stabilitu (obvykle 10 – 15 let), přiměřenou necitlivost vůči mechanickým a dalším vnějším vlivům, včetně skokového mechanického namáhání (přetížení) během výstřelu (např. u dělostřelecké munice), apod.

Z těchto důvodů jsou pro munici používány náplně s vysokým obsahem chemicky jednotných trhavin (TNT, hexogen, příp. pentrit nebo oktogen; pro své sklony k nestabilitě jsou vyloučeny kapalné nitroestery) nebo jejich směsí. Typické je mísení pentritu nebo hexogenu s TNT, prováděné jednak z technologických důvodů při výrobě munice, ale také z důvodu tzv. flegmatizace. Relativně necitlivým tritolem (příp. i malým množstvím nevýbušných látek) je tak snížena citlivost obou ostatních trhavin. Snížená citlivost munice vůči vnějším vlivům musí být na druhé straně kompenzována složitější konstrukcí a vysokým výkonem iniciačního řetězce používaného v munici.

Z důvodu vysokých nároků, které, jak již bylo uvedeno, jsou na vojenské trhaviny kladeny, jsou tyto trhaviny rámcově 5 x až 10 x dražší, než trhaviny průmyslové [9].

1.3.2 Střeliviny

Střeliviny slouží k pohonu střel při výstřelu z palných zbraní; jedná se o *bezdýmné prachy* tvořící hnací náplň v nábojích v případě hlavnových zbraní nebo o *tuhé pohonné hmoty* uložené ve hnací části rakety (raketovém motoru) v případě zbraní raketových. Výbuchovým projevem střeliviny je *explozivní hoření* (podrobněji viz kap. 2.1.2 tohoto dokumentu) vyznačující se mohutnou produkcí plynných zplodin (prachových plynů), které působí posuvným (nikoli destruktivním) účinkem na střelu (projektil) v hlavni nebo tak vyvolávají reaktivní pohyb rakety. Rámcově lze bezdýmné prachy dělit na tři a tuhé pohonné hmoty na dvě skupiny:

Bezdýmné prachy

- *Jednosložkové – nitrocelulózy – s těkavým rozpouštědlem* – jsou tvořeny vhodným typem nitrocelulózy, která je v procesu výroby želatinována těkavým rozpouštědlem, jež je z prachu před dokončením výroby opět odstraněno; dále přídatkem několika procent pomocných látek; vyrábějí se varianty těchto prachů pro civilní i vojenské použití.

- *Dvousložkové – nitroglycerinové – s netěkavým rozpouštědlem* – jsou tvořeny vhodným typem nitrocelulózy, která je v procesu výroby želatinována netěkavým rozpouštědlem (nitroglycerin, příp. jiné kapalné nitroestery), jež v prachu zůstává i po dokončení výroby; dále přídatkem několika procent pomocných látek; vyrábějí se varianty těchto prachů pro civilní i vojenské použití.
- *Třísložkové* – jejich složení v principu vychází z dvousložkových prachů, je však navíc doplněno třetí výbušninou, pro docílení specifických vlastností prachu; typicky jde např. o příměs nitroguanidinu (výbušniny bohaté na dusík) do prachu pro dělostřeleckou munici se sníženou výbuchovou teplotou z důvodu snížení eroze dělových hlavň [7].

Nezávisle na výše uvedeném rozdělení bezdýmných prachů jsou zároveň kterékoli z nich obvykle označovány jako *drobnozrnné*, pokud jsou do nábojů malých a středních ráží laborovány²⁰ sypáním, resp. pokud jsou jako granulovaný materiál schopny „tečení“ během příslušných technologických operací [48].

Okrajovou součástí střelivin představuje i *černý prach* (viz kap. 1.3.1 tohoto dokumentu).

Tuhé pohonné hmoty

- *Homogenní* – jejich složení je podobné dvousložkovým prachům, doplněné o příslušné pomocné látky (chemické stabilizátory, modifikátory hoření, modifikátory mechanických vlastností prachové masy apod.). Válcové elementy homogenních tuhých pohonných hmot (ve své ose příp. opatřené vnitřním tvarovaným kanálem) jsou během výrobní technologie formovány, řezány a po finálních operacích laborovány do raketového motoru.
- *Heterogenní* – obecně jde o směsi syntetického polymeru (palivo) s anorganickým oxidovadlem (zpravidla chloristan amonný); pro zvýšení energie může být obohacena práškovým hliníkem, příp. dalšími pomocnými látkami. Plnění palivového prostoru raketového motoru obvykle probíhá nalitím fyzikálně homogenní směsi paliva a oxidovadla, přičemž palivo se nachází v monomerní formě; po následném vyvolání polymerace dojde k vytvrzení veškeré směsi.

1.3.3 Třaskaviny

Třaskaviny jsou chemicky homogenní výbušniny, někdy také označované jako *primární výbušniny* (iniciovatelné jednoduchým podnětem), které slouží (zalaborované do iniciačních nebo pyrotechnických prostředků) k iniciaci (ostatních) *sekundárních výbušnin*, zejména trhavin a střelivin.

Ke splnění tohoto účelu musejí být třaskaviny velmi citlivé k běžným podnětům (významně citlivější než ostatní výbušniny), takže je lze iniciovat jednoduchým způsobem (impulsem mechanickým, elektrickým, tepelným apod.); v tom zároveň spočívá jejich výrazně vyšší nebezpečnost. Třaskaviny vykazují vysokou akceleraci detonačního děje, to znamená, že po

²⁰ Laborace – plnění munice stanovenými náplněmi za použití příslušného technologického zařízení; opakem je delaborace, tj. odstraňování náplní z munice (zpravidla při její průmyslové likvidaci).

iniciaci nastávající náběh do skokového nárůstu k maximálnímu detonačnímu tlaku je podstatně rychlejší než u trhavin [1].

Ačkoli je tedy charakteristickým výbuchovým dějem třaskavin *detonace* podobně jako u trhavin, její chemický mechanismus je odlišný. Exotermní oxidační chemická reakce, z níž je hrazena energie výbuchových projevů u naprosté většiny ostatních výbušnin, u třaskavin neprobíhá. Původ energie třaskavin tedy není termochemický, ale vazebný, neboť u třaskavin se energie uvolňuje v důsledku rozpadu vazeb mezi atomy původní molekuly [1].

Technicky nejvýznamnějšími zástupci třaskavin jsou třaskavá rtuť, azid olovnatý, trinitroresorcinát olovnatý („tricinát“), tetrazen, diazol aj.; další popis jejich vlastností a použití by přesáhl rámec tohoto dokumentu.

Typickým iniciačním prostředkem, v němž se uplatňují třaskaviny, je rozbuška (pro iniciaci trhavin) nebo iniciační prostředky používané v munici. Mimo to jsou třaskaviny i komponentou některých pyrotechnických složí.

1.3.4 Pyrotechnické slože

Připomeňme, že podle nařízení CLP²¹ je *pyrotechnickou látkou nebo směsí* látka nebo směs látek určená k získání tepelného, světelného, zvukového, plynového nebo dýmového efektu nebo kombinace těchto efektů v důsledku nedetonativních, samovolně probíhajících exotermických chemických reakcí.

Pyrotechnické slože (směsi) se uplatňují v pyrotechnických prvcích munice, ve vojenské, průmyslové i zábavní pyrotechnice, v současnosti jsou široce využívány v prostředcích automobilové pyrotechniky. V principu se jedná o směsi hořlavin (často práškové kovy), okysličovadel (kyslíkaté soli, příp. oxidy), paliv, pojiv a dalších přídavných látek (mimo jiné látky barvící plamen, dýmotvorné látky apod.), jejichž chemická přeměna probíhající formou *explozivního hoření* vyvolává světelné, zvukové, tepelné, dýmové účinky atd. [1].

Tak jsou ve vojenských i civilních pyrotechnických prostředcích využívány např. slože osvětlovací, zábleskové, stopovkové²², signální (barevná světla, dýmové), zážehové (k primárnímu zažehování pyrotechnických prostředků), zpoždňovací (do zpoždňovacích elementů v iniciátorech) apod. Pro některé účely obsahují pyrotechnické slože i omezený podíl třaskaviny; typicky u zápalkových složí²³ sloužících při výstřelu k iniciaci prachové náplně v nábojích [1], [7].

1.3.5 Problematické dělení výbušnin na primární a sekundární

Zároveň s výše uvedeným základním a jednoznačným rozdělením výbušnin podle jejich typických vlastností a účelu použití (mimo některých dalších způsobů) se někdy, zpravidla v rámci různých zjednodušených interpretací, objevuje i způsob dělení podle („náročnosti“)

²¹ Nařízení (ES) č. 1272/2008, o klasifikaci, označování a balení látek a směsí

²² Vrstva stopovkové slože (stopovka) nanesená na zadní konec střely se během výstřelu zapálí a barevně svítí; účelem je vizuální kontrola dráhy letu střely, zpravidla u vojenských malorážových zbraní (podle [1]).

²³ Zápalkovou složí je naplněn kalíšek kovové „zápalky“, která je součástí nábojnice (středový zápal) nebo se zápalková slož plní dovnitř okrajového lemu nábojnice (okrajový zápal, používaný u malorážkových nábojů) [1].

způsobu iniciace, tedy na *primární (přímé) výbušniny*, iniciovatelné jednoduchým (přímým) podnětem, a *sekundární (nepřímé)*, iniciovatelné pomocí standardně vymezených prostředků. Takové dělení má však jisté faktické slabiny, jak je zřejmé alespoň z prezentace tohoto přístupu např. v příručce [9]. Jako přímé výbušniny (iniciovatelné jednoduchým podnětem, např. třením, nárazem, nápichem, plamenem) jsou zde uváděny třaskaviny a střeliviny, jako nepřímé „téměř všechny průmyslové trhaviny“.

Ovšem zejména za podmínek *standardního způsobu použití* výbušnin toto zpravidla neplatí. Např. střelivinu (bezdýmný prach) nelze rozhodně iniciovat přímo, ale pouze v náboji působením mechanismu zbraně (úderníku) na zápalku, obsahující zápalkovou slož; podobně je tomu u třaskavin.

Snad by se tedy spíše dalo říci, že v případě volně přístupných výbušnin (tj. *mimo standardní podmínky* jejich použití) lze především třaskaviny iniciovat nějakým jednoduchým přímým podnětem²⁴. Naproti tomu trhaviny by měly být iniciovatelné vždy pouze detonací (typicky rozbuškou).

²⁴ Odtud také např. anglický resp. americký výraz pro třaskaviny – *primers (primary explosives)*.

2 Výbušniny jako zdroj tlakových projevů

U průmyslově vyvíjených a vyráběných výbušnin je vedle jejich výkonu a dalších funkčních vlastností akcentováno především hledisko bezpečnosti při nakládání²⁵ s nimi [10], zahrnující bezpečnost a ochranu zdraví při práci (BOZP) a bezpečnost provozu. V případě selhání tohoto principu spočívá nejzávažnější nebezpečí v nežádoucí iniciaci výbušniny, vedoucí ke vzniku ohrožení okolí (bezprostředního nebo i vzdáleného) výbuchovými projevy. Jejich charakter závisí především na druhu nastalé výbuchové přeměny, která může nabýt formy detonace nebo explozivního hoření. Přestože k nežádoucí (havarijní) iniciaci výbušniny zpravidla dochází za nestandardních situací, pro objasnění možných dopadů výbuchu na okolí je vhodné využít existujících popisů (resp. modelů), které jsou zpracovány pro případ funkce výbušniny za standardních podmínek. Výchozím momentem jsou přitom dosavadní známé představy o průběhu detonace a explozivního hoření; jsou pro potřeby tohoto dokumentu uvedeny dále, zpravidla ve zjednodušené (resp. kvalitativní) formě.

2.1 Základní druhy výbuchové přeměny

2.1.1 Detonace

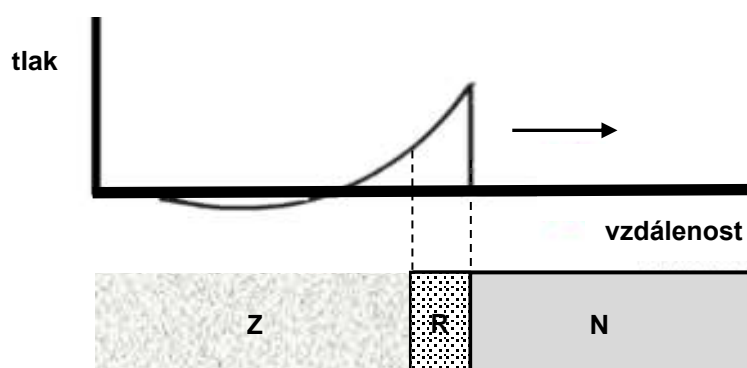
Výbuchový děj probíhá v trhavinách formou detonace (dále podle [3, 7]), kdy se hmotou trhaviny šíří detonační vlna, na jejímž čele dochází k výraznému skokovému (nespojitému) zvýšení tlaku (tedy i hustoty) látky; tlaky zde dosahují řádově až desítek tisíc MPa. Tímto „tlakovým mechanismem“ je ve hmotě iniciována chemická reakce probíhající v úzkém reakčním pásmu²⁶. Reakce má charakter chemického výbuchu a představuje chemický zdroj energie pro probíhající detonaci. Detonační vlna (ve stabilně detonující trhavině) tak vlastně představuje zvláštní případ „reaktivní“ rázové vlny šířící se výbušninou, kdy energii na své udržení a šíření čerpá z chemické reakce, kterou v této výbušnině vyvolává. Reakce se do nezreagované výbušniny šíří přímým působením detonačního tlaku na chemické vazby (dochází k jejich trhání), takže dochází k přímé iniciaci na úrovni molekul. Nikoli tedy tepelným mechanismem (přenosem tepla) převážně se uplatňujícím u „běžných“ chemických reakcí, který by byl pro dynamiku detonace příliš pomalý. Šíření detonace směrem do nezreagované látky probíhá detonační rychlostí, která, dle řady okolností, se může pohybovat zhruba v rozmezí 1000 až 9000 m.s⁻¹, vždy však nadzvukovou rychlostí za místních podmínek²⁷. Schematicky je tento děj v detonující výbušnině znázorněn na obr. 1.

Detonace je výbuchovým dějem typickým pro trhaviny a třaskaviny.

²⁵ Podle „zákona o výbušninách“ [10] se nakládáním s výbušninami rozumí: výzkum, vývoj a zkoušení výbušnin, jejich výroba a zpracování, používání, ničení a zneškodňování, skladování, nabývání, předávání, dovoz, vývoz nebo tranzit, a jejich přeprava (viz zákon, § 21 odst. 1 písm. c).

²⁶ Různé zdroje uvádějí pro šíří reakčního pásma stabilně probíhající detonace rozměr obvykle pod 1 mm.

²⁷ Místní podmínky jsou charakterizovány vysokým tlakem (hustotou) a vysokou teplotou hmotného prostředí, takže rychlost zvuku je zde podstatně vyšší než 330 – 340 m.s⁻¹, běžně uváděných pro vzduch za normálních podmínek.



Obr. 1: Šíření detonační vlny trhavinou (R – reakční pásmo, N – dosud nezreagovaná výbušнина, Z – plynné zplodiny výbuchu (podle [5], upraveno)

2.1.2 Explosivní hoření

V případě explozivního hoření (dále podle [1, 3, 7]), resp. „deflagrace“²⁸, se dosud nezreagovanou výbušninou šíří spojitě zvýšení tlaku a hustoty (tlaková vlna), a to podzvukovou rychlostí (za místních podmínek), zároveň s reakčním pásmem a plynnými zplodinami výbuchu. Takže i v tomto případě je energie pro udržení a šíření tlakové vlny hrazena z chemické reakce probíhající v reakčním pásmu. Vznik a šíření reakce však má „obvyklý chemický mechanismus“, tedy tepelný. Znamená to, že reakce (resp. šíření reakčního pásma) nastává až na základě potřebného „předehřátí“ nejbližší dosud nezreagované výbuštiny. Proto šíření tlakové vlny je těsně doprovázeno reakčním pásmem, které děj energeticky dotuje.

Ve srovnání s detonací je dynamika explozivního hoření značně pomalejší, takže také dosažený tlak a rychlost šíření reakce (tj. rychlost hoření) jsou ve srovnání s detonační rychlostí „nízké“. Tlaky se zpravidla pohybují maximálně do 1000 MPa a rychlosti hoření do několika set $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; naproti tomu např. při hoření některých pyrotechnických složí dosahuje hodnot i pod $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ [3].

Explozivní hoření je výbuchovým dějem typickým pro střeliviny a pyrotechnické slože.

2.1.3 Nebezpečí přechodu hoření v detonaci

Z hlediska nebezpečí vzniku závažné havárie je velmi významným jevem přechod (explozivního) hoření v detonaci. Zatímco průběh detonačního děje dosahujícího ve výbušnině extrémně vysokých tlaků nelze ovlivnit vnějším tlakem, u explozivního hoření tomu tak být nemusí. Probíhá-li explozivní hoření v uzavřeném nebo polouzavřeném prostoru (stavby, technologická zařízení, potrubí, pevné skladové obaly apod.) za nedostatečného odvodu vznikajících plynných zplodin hoření, může vlivem takto narůstajícího tlaku dojít k postupnému urychlování rychlosti hoření až do takové míry, že děj přejde do detonace [3].

²⁸ Pro „explozivní hoření“ bývá často jako synonymum používán pojem „deflagrace“, který ovšem má význam také jako chybná funkce trhaviny ve vývrtu, tedy tzv. „vyhoření“, tj. selhání detonace.

Tomuto jevu mohou podlehnout i výbušniny, které za standardních podmínek použití nedetonují, tedy např. některé pyrotechnické složky, ale zejména střeliviny. Jako příklad lze uvést drobnozrnné bezdýmné prachy, které vyhláška o skladování výbušnin [11] ve své Příloze č. 1 zařadí do třídy nebezpečí AIII (tedy stejně jako např. průmyslové trhaviny), ovšem s tím, že v případě konkrétních typů: „*Bezdýmné prachy drobnozrnné se zařadí do tříd a skupin nebezpečí na základě provedených zkoušek s přihlédnutím k souboru technicko-organizačních opatření vedoucích k omezení přechodu hoření v detonaci.*“

Jak ovšem vyplývá z tohoto příkladu, v případě dalších úvah o ohrožení okolí výbuchem při možném přechodu explozivního hoření v detonaci je vždy vhodné respektovat příslušnou klasifikaci výbušnin. Při „automatickém“ předpokladu přechodu v detonaci u jakýchkoli střelivin může v případě predikce dojít k neúměrnému nadhodnocení dosahů přetlaku, třeba i mimo rámec závazně stanovených a platných bezpečnostních vzdáleností resp. pásem, jejichž dispozice se odvozují vedle hmotnosti výbušniny (resp. obložení objektu), právě od její klasifikace (třídy a skupiny nebezpečí podle vyhlášky o skladování výbušnin [11], viz též Příloha 1 část 4 tohoto dokumentu).

2.2 Působení výbuchu na okolí

2.2.1 Rázová vlna vyvolaná detonací

Od detonující výbušniny se do okolního prostředí šíří rázová vlna, na jejímž čele nastává skokové (nespojité) stlačení prostředí (zvýšení jeho hustoty a tlaku), vyvolané extrémní dynamikou detonace probíhající ve vlastní výbušnině. Typické technické využití tohoto děje představuje destrukce horniny při těžebním odstřelu; vlastní výbuchový děj v náložce trhaviny přitom probíhá řádově v mikrosekundách.

Obecně se rázová vlna může šířit jakýmkoli prostředím, při technickém využití trhavin je to zpravidla pevná hmota (např. hornina, zdivo, beton, ocel apod.), příp. voda, při provádění trhacích prací pod vodou. Průchodem prostředím ztrácí ovšem rázová vlna na energii, ztrácí svůj „rázový charakter“, „degraduje“, až přechází na spojitou vlnu tlakovou. Pro potřeby stavebně destrukčních trhacích prací bylo např. ověřeno, že pevným prostředím se rázová vlna šíří pouze do vzdálenosti několika průměrů použité náložky a pak přechází na vlnu tlakovou [3].

Z hlediska bezprostředních (primárních) účinků při dopadu na pevnou překážku působí rázová vlna tříštivým, destruktivním účinkem. Po své přeměně na vlnu tlakovou (tj. v příslušné vzdálenosti od výbušniny) se uplatňuje deformační nebo posuvný účinek, i ten však může mít destruktivní důsledky; např. při „posunutí“ stěny budovy vlivem dopadu tlakové vlny o dostatečné energii, šířící se vzduchem.

Podrobnější popis chování rázových vln šířících se vzdušným prostředím – viz dále kap. 3.

2.2.2 Účinky detonace

Technicky významný zdroj rázových vln představuje zejména detonace trhaviny. Generované rázové vlny (jak již bylo uvedeno, viz kap. 2.2.1) se obecně mohou šířit jakýmkoli hmotným prostředím, tedy pevným, kapalným i plynným. Dokud má šířící se vlna rázový charakter, šíří se prostředím vždy nadzvukovou rychlostí, zatímco šíření plynných zplodin výbuchu generovaných chemickou reakcí probíhá vždy rychlostí podzvukovou (v důsledku odporu

prostředí vůči částicím plynu a dalších jevů); pohyb těchto plynů se tak zpožďuje za pohybem čela rázové vlny.

Z tohoto důvodu působí detonující trhavina na okolí ve dvou fázích: bezprostředně dynamickým rázem (jeho účinek obvykle trvá jen několik mikrosekund), následně tlakovým účinkem horkých plynných zplodin výbuchu (v trvání desetin až setin sekundy). Pro praxi (typicky např. při provádění těžebních odstřelů v lomech) lze tuto skutečnost interpretovat tak, že zatímco rázová vlna má silný destrukční (tríštivý) účinek na blízké okolí nálože, následné působení výbuchových plynů je přirovnáváno k „pístu“, který má posuvný účinek, takže např. rozdrčenou horninu uvádí do pohybu a přemísťuje (podle [5]).

2.2.3 Tlaková vlna vyvolaná explozivním hořením

Od explozivně hořící výbušniny se do okolního prostředí šíří tlaková vlna představující spojitě stlačení (zhuštění), tedy časově a prostorově omezené zvýšení tlaku a hustoty prostředí, vyvolané rychlým uvolněním tepelné energie výbuchu zároveň za spolupůsobení tlaku expandujících plynných zplodin výbuchu. Typické technické využití tohoto děje představuje výstřel z hlavnových zbraní, probíhající řádově v milisekundách. V případě detonačního děje by došlo roztržení zbraně. Ovšem vlivem odporu prostředí tlaková vlna (podobně jako vlna rázová) postupně ztrácí na energii a její tlak klesá.

Destruktivní působení tlakové vlny bylo zmíněno výše (viz kap. 2.2.1) v souvislosti s přeměnou rázové vlny na tlakovou.

2.3 Věcný a terminologický přehled tlakových projevů výbuchu

2.3.1 Vybrané termíny

Oblast výbušnin po stránce chemické, fyzikální, technické a technologické, vojenské, bezpečnostní, právní a samozřejmě i obchodní, souhrnně představuje výrazně mezioborové prostředí, v němž se logicky uplatňuje řada specifických, poměrně úzce zaměřených pohledů, často vedoucích (mimo jiné) i ke vzniku a používání různých terminologických odchylek. Tato situace je analogická i v zahraničí, což u nás následně přináší další komplikace, ať už v důsledku přímého studia odborných zahraničních zdrojů, nebo využíváním jejich více či méně zdařilých překladů, zpravidla z angličtiny. To vše vede zejména v oblasti typických tlakových projevů výbušnin k možným nedorozuměním z hlediska jejich výkladu i terminologie. Je proto užitečné shrnout v následujícím základní situaci v této oblasti (zejména dle [12, 13, 14]), a to i s případným přihlédnutím k anglické verzi výrazů:

- **Detonační resp. rázová vlna** – viz výše kap. 2.1.1 resp. 2.2.1.
- **Vzdušná rázová vlna** – pojem používaný zejména Denksteinem a Novotným [12, 14] (včetně příp. zkratky VRV) pro rázovou vlnu šířící se vzduchem.
- **Šoková vlna** – ekvivalentní (ale nepřiliš zdařilý) výraz pro rázovou vlnu převzatý z angličtiny, kde *rázová vlna* = *shock wave*; český výraz *ráz* a anglický *shock* lze považovat za ekvivalenty. V technickém prostředí je ale výraz *rázová vlna* jasně upřednostňován, termín *šoková vlna* lze považovat spíše za laický překlad z angličtiny, používaný někdy v novinářských textech apod.

- **Blast wave** – rozdíl tohoto pojmu od *shock wave* není zcela jasný ani z původních anglických textů. Z některých formulací (např. [15]) však vyplývá, že výraz *shock wave* je upřednostňován spíše v obecném fyzikálním smyslu, kdežto *blast wave* se více váže ke konkrétním účinkům; tedy rázová vlna způsobující za konkrétních podmínek usmrcení nebo zranění osob, destrukci budov apod.
- **Machova vlna** – vzdušná rázová vlna druhotně generovaná vlivem interakce primární vzdušné rázové vlny a jejího šikmého odrazu od zemského povrchu; spolupodílí se na celkovém destrukčním účinku (popis by přesáhl rámec tohoto dokumentu).
- **Tlaková vlna**
 - v užším významu – **spojitá vlna**, tedy taková, která je generována explozivním hořením chemického systému nebo vznikne degenerací původní rázové vlny v určité vzdálenosti od centra výbuchu; šíří se prostředím rychlostí zvuku. Mechanismus vlnění, který je spojen s jejím šířením obecným prostředím může být poměrně složitý, ale typicky ve vzduchu (plynu) nabývá formy pouze podélného (akustického) vlnění, proto se v tomto případě též označuje jako **vlna akustická** [14, 16].
 - v širším významu – bývá někdy výraz **tlaková vlna** používán v obecnějším smyslu, aniž by bylo přesně rozlišeno, jde-li o vlnu tlakovou (spojitou) nebo rázovou (nespojitou), tedy jakoby se jednalo o obě; pro takový případ je vhodnější obecnější, souhrnný pojem **tlakový projev**.

2.3.2 Grafická interpretace

Někdy se vyskytují nejasnosti při interpretaci grafického znázornění průběhu rázové vlny. Zatímco ve dvourozměrném souřadném systému osa y přísluší vždy přetlaku, osa x může mít rozměr času nebo (lineární) vzdálenosti.

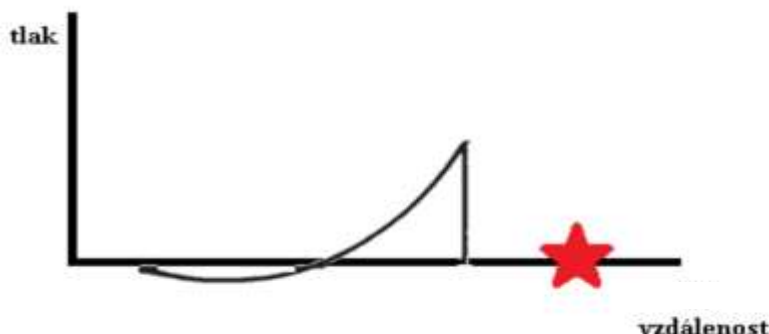
V prvním případě (viz obr. 2) vzniká v čase blízkém nule rázová vlna, pokles jejího tlaku probíhá v časech následujících, podél osy x , souhlasně se směrem nárůstu času. Z hlediska času bývá toto znázornění někdy označováno jako *statické*, protože rozložení tlakové křivky je pevně umístěno na časové ose. Např. pík vzniku maxima (detonace) přísluší určitému času, který zůstává trvale neměnný; na obrázku „čas stojí“.



Obr. 2: Průběh rázové vlny v čase (statický)

Ve druhém případě (viz obr. 3), kdy osa x má rozměr vzdálenosti, se vzniklá rázová vlna šíří do okolí, takže se pohybuje podél této osy ve směru narůstající vzdálenosti. Do každého bodu

na této dráze (jeden z nich je znázorněn hvězdičkou) dorazí nejprve přetlakové maximum a teprve za ním následuje oblast klesajícího tlaku. Toto znázornění lze z hlediska času označit za *dynamické*, protože na obrázku „čas běží“, rázová vlna se přitom pohybuje podél osy x .



Obr. 3: Průběh rázové vlny v lineární vzdálenosti (dynamický)

2.4 Průvodní jevy výbuchu

2.4.1 Chemické toxické zplodiny

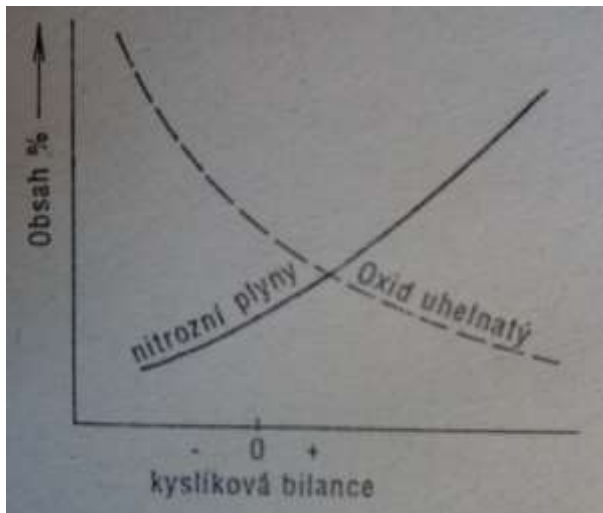
Zplodiny výbuchu běžných výbušnin založených na organické složce a kyslíku vázaném na dusík (viz kap. 1.2) obsahují především tyto produkty: CO, CO₂, C, H₂O, H₂, O₂, N₂, NO_x; zároveň ovšem menší množství dalších molekul, jako např. NH₃, HCN, CH₄, HCHO, dále množství nejrozličnějších iontů resp. molekulárních fragmentů (H⁺, OH⁻, OH⁺, N⁺, C⁺, CO⁺) aj. Složení zplodin je obecně dáno podmínkami v reakčním pásmu a výchozím složením výbušniny, včetně tzv. kyslíkové bilance²⁹.

Z hledisky nebezpečí toxicity plynných zplodin výbuchu jsou nejvýznamnější CO a oxidy dusíku NO_x (nitrózní plyny³⁰); z nich pak především plynný NO₂, oxid dusičitý s typickým intenzivním červenohnědým zabarvením, příp. též bezbarvý NO.

Vliv kyslíkové bilance na obsah CO a NO_x ve zplodinách výbuchu trhavin kvalitativně znázorňuje obr. 4 [5].

²⁹ Jde o poměr (vyjádřený v hmotnostních procentech kyslíku) mezi kyslíkem obsaženým ve výbušnině a kyslíkem nutným na úplnou oxidaci uhlíku a vodíku (tedy za vzniku CO₂ a H₂O); tento poměr obecně nabývá hodnoty nulové, mírně kladné nebo záporné; bližší popis by přesáhl plánovaný rámec tohoto dokumentu.

³⁰ Jako NO_x se někdy označují veškeré oxidy dusíku (tj. od 1. do 5. mocnosti dusíku), v užším významu a zejména souvislosti s výbušninami, kyselinou dusičnou nebo průmyslovými exhalacemi, pak spíše jen NO₂ a NO, obvykle také označované jako *nitrózní plyny*.



Obr. 4: Vliv kyslíkové bilance na obsah CO a NO_x ve zplodinách výbuchu trhavin [5]

Toxické plyny se hromadí na místě odstřelu (zvláště, jedná-li se o podzemní prostory); jde ovšem o použití výbušniny za standardních podmínek, daných zejména odpovídajícím *utěsněním* trhaviny ve vývrtu a jejím *upnutím*³¹ [5] v materiálu tak, aby její energie byla maximálně využita. Tehdy dochází k řízenému sesutí destruovaného materiálu, s minimálním uplatněním rozletu, „vyfukování“ náloží do volného prostoru a dalších nežádoucích jevů. Výbušné plyny tak ve značné míře zůstávají pohlceny v kusovitém rozvalu a po jistou dobu se odtud uvolňují. Pro přístup oprávněných osob na místo po provedení odstřelu proto příslušné předpisy stanovují předchozí kontrolu nezávadnosti ovzduší (u podzemních pracovišť), resp. stanovují čekací doby pro bezpečný přístup.

2.4.2 Toxické zplodiny havarijního výbuchu

Na jedné straně lze u výbuchu trhavin a střelivin obecně očekávat prakticky úplnou přeměnu jejich původní hmotnosti na plynné produkty, v nichž může teoretický obsah CO a NO_x činit až desítky procent [3]. Na straně druhé, u havarijního výbuchu nelze předpokládat průběh, odpovídající výše uvedeným standardním podmínkám použití. Výbušné plyny proto snadněji pronikají do okolního volného prostoru, jsou ovšem hnány dynamikou výbuchu (včetně působení vysokých tlaků a teploty), aniž by byly omezovány odporem rozpojovaného materiálu. Podléhají proto výrazným vlivům turbulence vzhledem k aktuální teplotě i rychlé vertikální expanzi v důsledku termických vlivů. Dochází tak k rychlému rozptylu plynů v ovzduší, nehledě na značnou pravděpodobnost dodatečné konverze CO na CO₂ vlivem vzdušného kyslíku za daných podmínek.

Někdy prezentované obavy ze sekundárního ohrožení osob v okolí v důsledku vzniku stabilního toxického oblaku, který by se šířil od místa výbuchu, nelze považovat za dostatečně opodstatněné. Za popsané situace budou z hlediska sledovaných následků (úmrtí osob a škody na zdraví) vždy naprosto dominantní primární tlakové účinky výbuchu.

³¹ Optimální poloha nálože vzhledem k okolním volným plochám, podrobněji viz např. [5].

Přesto může nastat významnější ohrožení toxicitou vznikajících NO_x , ovšem spíše při požáru některých výbušnin. Typicky *nitrocelulóza*, zejména, je-li způsobem ovlhčení příp. hašení omezeno její hoření, podléhá částečnému termickému rozkladu za výrazného vývinu NO_x . Tyto těžké plyny se pak „plazí“ po zemi, tečou po svahu a zatékají do snížených prostor a dutin. Je tedy vždy otázkou konkrétní situace, zda za takových okolností může v okolí požáru dojít k ohrožení osob toxicitou. Bezpečnostní listy různých výrobců nitrocelulózy pro takové případy zpravidla doporučují vybavení zásahových sil ochrannými dýchacími prostředky.

2.4.3 Ohrožení okolí rozletem úlomků

Na tomto místě je ohrožení rozletem úlomků zmíněno pouze pro úplnost, jako další z ohrožujících projevů výbuchu; podrobněji je tento jev popsán v kap. 6.3, v souvislosti s municí (rozlet střepin) pak v dokumentu REPETITORIUM, díl 3.

3 Chování rázových vln v prostředí

3.1 Prostředí pro šíření rázových vln

Při technickém využití trhavin je prostředím zpravidla *pevná hmota*, v níž je náložka trhaviny ve vývrtu uložena (např. hornina, zdivo, beton, apod.), příp. je na ní povrchově přiložena (např. při destrukcích ocelových konstrukčních prvků). V pevném prostředí se rázová vlna vyvolaná detonací nálože šíří všemi směry; přetlak v jejím čele převyšuje pevnost horniny, proto je hornina v sousedství nálože rozdrčena. Dále se vytváří zóna velmi silně deformované horniny, která je značně stlačena a pohybuje se směrem od centra výbuchu. S rostoucí vzdáleností přetlak na čele rázové vlny klesá, jako u šíření v jiných materiálech, a deformace zeminy se v závislosti na velikosti přetlaku mění. Při vyšších tlacích, kdy napětí překročí mez pružnosti, nastupuje oblast plastického chování, kdy deformovaný materiál „teče“, ale po zrušení tlaku, tedy i napětí, se nevrací do původního stavu, takže vzniká trvalá deformace.

Prostředí může tvořit i *voda*, při provádění trhacích prací pod vodou. Z hlediska problematiky závažných havárií je však tato otázka málo významná.

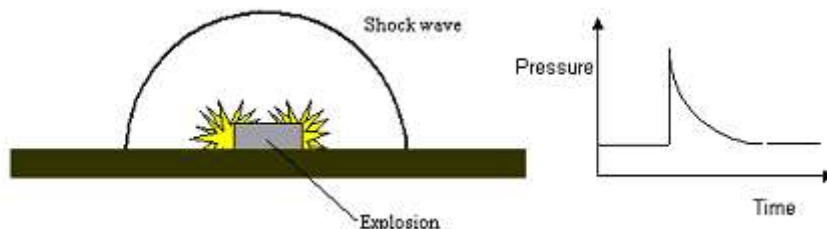
Při závažných haváriích způsobených výbušninami jde zpravidla o šíření rázových vln *vzdušným prostředím* (příp. včetně fáze jejich degradace), resp. o šíření *vzdušných rázových vln*. Je tomu tak v případě havarijních výbuchů výbušnin, k nimž obvykle dochází ve skladových nebo výrobních prostorech, které mají dostatek volného prostoru, a odkud se proto vzniklé tlakové projevy šíří především vzduchem, i když přitom mohou narážet na překážky (stěny budov, zemní ochranné valy, příp. zalesnění apod.).

Z hlediska následků závažných havárií může svou roli hrát i šíření rázových vln v pevném prostředí (při podpovrchovém umístění výbušniny).

3.2 Tlakové projevy ve vzduchu

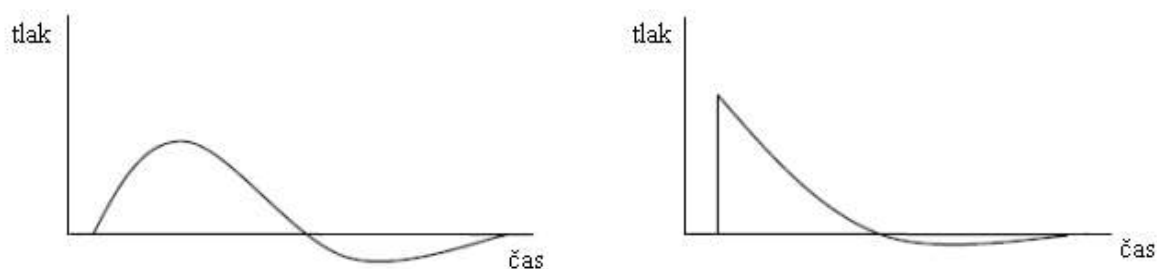
3.2.1 Základní popis

Připomeňme, že ve vzduchu (stejně jako v kapalném či pevném prostředí) se tlakové projevy (vlny) šíří kolem centra výbuchu v neohrazeném prostředí v kulových vlnoplochách (viz obr. 5 [18]).



Obr. 5: Šíření rázové vlny vzdušným prostředím [18]

Typický tvar (tlakový průběh) rázové a tlakové (spojité) vlny znázorňuje obr. 6 [13]:

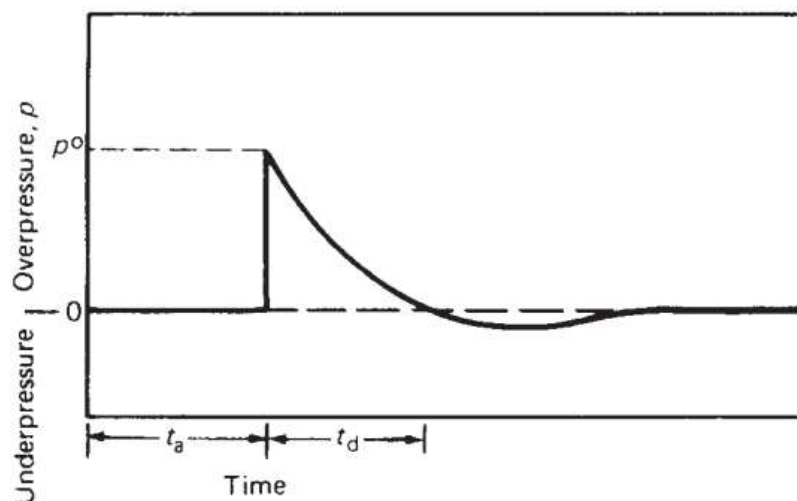


Obr. 6: Tlakový průběh vln, vlevo: spojitá tlaková vlna; vpravo: nespojitá rázová vlna [13]

Rázové vlny jsou (v okolním vzduchu) generovány detonací výbušniny, zatímco (spojité) tlakové vlny buď jejím explozivním hořením, nebo mohou vzniknout degradací původních rázových vln ztrátou energie během jejich šíření prostředím (viz obr. 6, též kap. 2.2.1).

Podrobný průběh vzdušné rázové vlny je znázorněn na obr. 7. Je zde zřejmá přetlaková a podtlaková fáze rázové vlny, přičemž maximální přetlak na jejím čele je p_0 , čas detonace t_a ($t = 0$), doba trvání přetlakové (pozitivní) fáze – t_d .

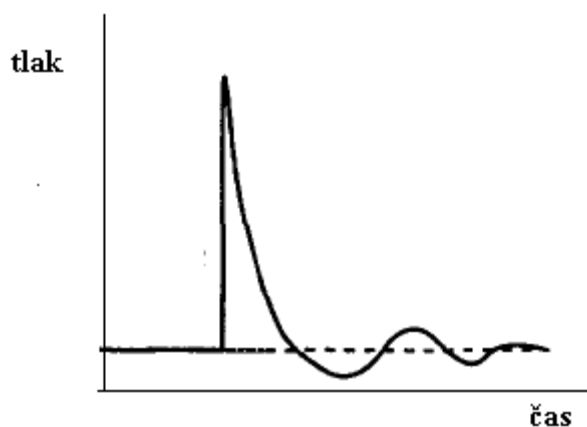
Vznik podtlakové fáze je typický pro pružné a stlačitelné vzdušné prostředí, které po prudkém stlačení zpětně expanduje až k dosažení jistého „překmitu“ do záporných hodnot vůči původnímu atmosférickému tlaku.



Obr. 7: Tlakový průběh vzdušné rázové vlny [15]

Podtlaková fáze má zpravidla podstatně menší energii než fáze přetlaková, nicméně může dosáhnout významného destruktivního účinku díky tomu, že odolnost zděných nebo betonových stavebních prvků vůči tahovému napětí (které podtlaková fáze vyvolává) je významně nižší, než vůči tlaku.

Při šíření vzdušným prostředím degeneruje postupně rázová vlna na vlnu spojitou tlakovou (viz obr. 8), kterou lze vzhledem k jejímu mechanismu šíření ve vzduchu označit též za vlnu akustickou [12].



Obr. 8: Degenerace rázové vlny na tlakovou vlnu [12]

3.2.2 Interakce vzdušných rázových vln

Dosud popsaná situace se převážně týká tzv. *primárních vln*, tedy těch, které vznikly jako bezprostřední následek výbuchu, prakticky bez uplatnění jiných vnějších vlivů. Ovšem odrazem primárních vln od okolního prostředí a následnou vzájemnou interakcí vznikají *vlny sekundární*, které mohou být několika druhů. Za jistých okolností mohou způsobovat navýšení destruktivních tlakových účinků primárních rázových vln.

Základní ničivý faktor v širším okolí centra výbuchu (detonace) představuje především přímý dopad primární vzdušné rázové vlny na pevnou překážku (stavební objekt, lidské tělo). Interakcí vlny a překážky dochází ke změnám resp. narušení struktury rázové vlny. Průběh tohoto děje závisí na charakteru překážky a zásadně určuje výsledné účinky rázové vlny. Bližší popis interakčních dějů vzdušných rázových vln by přesáhl rozsah tohoto dokumentu.

Pro praxi je však zpravidla dostačující (a velmi účelné) hodnotit (resp. predikovat) konkrétní následky rázové vlny především na základě experimentálně zjištěné závislosti účinků na přetlaku na čele primární vlny. Dnes existuje a je široce využíváno značné množství údajů tohoto druhu – *prahových hodnot přetlaku na čele vzdušné rázové vlny*, při jejichž dosažení lze předpokládat vznik destrukce konkrétních stavebních prvků, staveb jako takových (s přihlédnutím k typu zdiva – cihla, železobeton, apod.). Analogicky jsou známy prahové hodnoty i pro zranění člověka resp. *poškození lidského těla a jeho orgánů přetlakem*; typické ukázky těchto prahových hodnot – viz kap. 4 a 5.

3.3 Účinky rázových vln v pevném prostředí

Z hlediska působení rázových vln šířících se pevným prostředím na konstrukce či budovy, lze rozlišit dvojí účinek, *silový* a *deformační*. Silový účinek, typický zejména pro podpovrchové nálože je (v pevném prostředí) analogický s tlakovým působením vzdušných rázových vln.

U nadzemních staveb narazí povrchová nebo podpovrchová vlna nejčastěji na základy, projde do zdiva (v případě budov), kde vzhledem k nárazům, lomům a difrakci vln napětí u volných povrchů zdiva, okenních, dveřních, komínových a jiných otvorů, vznikají tahové vlny, způsobující trhliny, praskliny a podobně. Největší poškození vzniká v rohových částech budov, kde se účinky vln násobí vzhledem k interferenci vln [17].

Deformace resp. *vibrace*, vznikají při přenosu vln z podzemního výbuchu na základy stavby, tím se rozkmitá celá stavba; jedná se tedy o složitý děj seismického charakteru [17]. Je zřejmé, že způsob a stupeň poškození budov má vliv i na ohrožení osob uvnitř. Z tohoto hlediska jsou účinky výbuchu nebo zemětřesení prakticky nerozlišitelné [26]. V případě těžké destrukce nebo totálního zborcení budovy je nejlepší šance na přežití osob v místech mezi zborcenými konstrukcemi, jejichž materiál na sebe nedoléhá, takže zde vznikají volné prostory.

4 Ohrožení lidského těla

V případě detonace, kdy se rázová vlna šíří prostředím nadzvukovou rychlostí, je nárůst tlaku v podstatě okamžitý. Charakter vlny je takový, že se přetlak skokově zvýší až do své maximální hodnoty a následně poklesne pod hodnotu tlaku atmosférického (vzniká podtlak). Při velmi silných explozích má „záporná“ (podtlaková, negativní) fáze vlny za následek náhlý vznik tlakového působení opačným směrem (vlastně tedy působení tahového), které může způsobovat vymrštění méně hmotných předmětů nebo i povalení a zranění osob [24, 25].

4.1 Účinky výbuchu na lidský organismus

V odborné literatuře jsou účinky výbuchu na lidský organismus popsány velmi různorodě, přičemž je značná pozornost věnována výbuchům oblaků hořlavých plynů ve směsi se vzduchem. Obvykle se však účinky výbuchu na lidský organismus dělí na primární, sekundární a popřípadě terciární nebo na účinky přímé a nepřímé.

Následkem *primárního poškození* způsobeného přímými účinky rázové příp. tlakové vlny bývají četná smrtelná zranění vlivem krvácení do plic. Je-li vnější tlak na hrudník větší než vnitřní tlak v těle, hrudník se vmáčkne dovnitř, což vede k pohmožděninám vnitřních orgánů, případně i k vnitřnímu krvácení. Ovšem nejčastějším bezprostředním zraněním vlivem působení tlakové vlny je protržení ušního bubínku, který, vzhledem k vnitřnímu uspořádání orgánů ucha, bývá poměrně snadno porušen při zatížení přetlakem resp. impulsem dopadající vlny [24, 25].

Sekundární poškození je způsobeno letícími troskami resp. fragmenty, které se pohybují po přímé trajektorii od centra výbuchu. Při určování účinků letících trosek na lidské tělo se rozlišuje mezi ostrými („řeznými“) fragmenty, které způsobují řezné rány, a troskami, tvořenými velkými tupými předměty [24, 25]. Ostré fragmenty působí tržné rány a „průstřely“; obvykle mají nízkou hmotnost a často jsou tvořeny skleněnými střepy nebo plechovými ostrými úlomky. Trosky charakteru velkých tupých předmětů (např. letící cihly) způsobují především vnitřní poranění zasažených osob (podrobněji k problematice úlomků viz kap. 6.3).

Osoby uvnitř hroučících se budov jsou vystaveny účinkům dopadu velmi těžkých částí konstrukce budov. Ze snímků pořízených po zemětřesení či bombardování je zřejmé, že vertikální části konstrukce se obvykle zřítí a jednotlivá poschodí se navrství jedno na druhé. Počet osob, které přežijí tyto mimořádné události, je do značné míry dán možností náhodného vzniku kleneb a prostor v prostředí trosek budovy, v nichž lidé zůstanou uchráněni [24, 25].

Terciární poškození lidského organismu vzniká při srážce člověka s překážkou. Lidské tělo může být sraženo či odhozeno tlakovou vlnou, jak během její přetlakové, tak i podtlakové fáze. Nejvýraznější účinky terciárních následků nastávají tehdy, nachází-li se člověk v okamžiku zasažení vlnou ve vzpřímené poloze [25].

Mimo výše uvedeného přístupu lze účinky výbuchu na lidský organismus rozdělit i jiným způsobem, a to podle následků [27], tedy na:

- *přímé následky* – způsobené náhlým zvýšením tlaku vzdušného prostředí;

- *nepřímé následky* – způsobené letícími troskami, hroucením budov, tepelným zářením, také dopadem těla (v důsledku výbuchu) na zem či překážku.

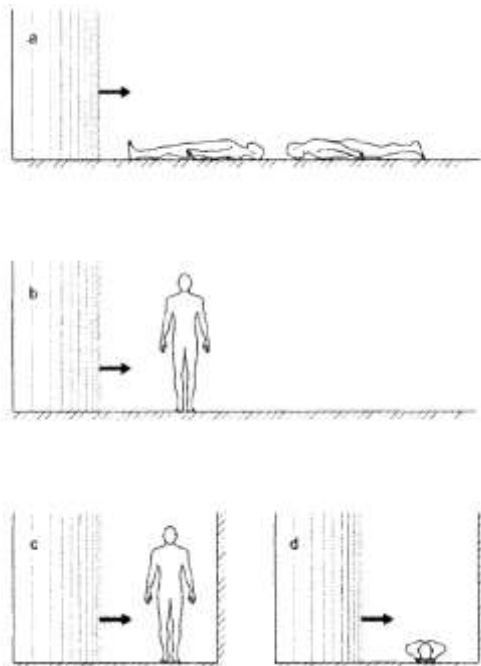
V dalším jsou na základě tohoto dělení přiblíženy některé typické následky výbuchových projevů významně ohrožující lidský organismus [27].

Tabulka 3: Přibližné prahové poškození lidského organismu (podle [27])

Přetlak [kPa]	Poškození těla
7	Poškození zdraví až smrtelná zranění v důsledku rozletu trosek
> 21	Je pravděpodobné odhození těla na zem či překážku
34	Prasknutí ušních bubínků
< 100	Osoby by se měly ukryt pod zesílenými prvky budov (dveřní rámy apod.) a měly by se vyhnout blízkosti skleněných ploch
100	Poranění plic

4.1.1 Přímé následky

Hlavním přímým účinkem výbuchu na lidský organismus je náhlé zvýšení tlaku při dopadu rázové vlny. Lidské tělo odolává poměrně dobře (oproti budovám) zvýšenému přetlaku, protože je tvořeno z velké části vodou a je poměrně pružné. Přímé následky se projeví v těch částech těla, kde se vyskytují vzduchové výdutě, které mohou být rozdrceny, např. vnitřní stavba uší a plic. Účinek je zároveň závislý na poloze lidského těla a na případném odrazu rázové vlny; obr. 9 shrnuje základní možné situace polohy lidského těla.



Obr. 9: Různé polohy lidského těla vzhledem k působení rázové vlny [22, 27]

4.1.2 Nepřímé následky

Nepřímé následky jsou způsobeny pádem příp. rozletem trosk vznikajících v důsledku působení exploze na zařízení či budovy. Jedná se zároveň o sekundární dopad výbuchu na lidský organismus. Terciární dopad představuje (mimo jiné) vržení (pád) těla na překážku či na zem. Jde tedy o přemístění lidského těla na určitou vzdálenost, ale může jít i o jeho zasypaní v důsledku výbuchu (při hroucení budovy apod.).

Kromě zranění, která mohou nastat při pádu těla na zem, existuje vysoká pravděpodobnost úmrtí při prudkém nárazu těla na pevnou překážku. Vliv poranění závisí na rychlosti pohybu těla, na tvaru pevné překážky a na konkrétní části, kterou tělo dopadne na překážku. Pravděpodobnost fatálních následků je velmi vysoká, pokud dojde k nárazu (pádu) na hlavu. Pravděpodobnost zlomeniny lebky je přímo úměrná rychlosti nárazu. V tabulce 4 je rámcově uveden rozsah poranění lebky v závislosti na rychlosti dopadu vrženého (padajícího) těla.

Tabulka 4: Vliv rychlosti dopadu na pravděpodobnost poranění lebky (podle [27])

Rychlost dopadu [m.s ⁻¹]	Rámcový rozsah poranění lebky
3	Bez nebezpečí
4	Prahová hodnota
5,5	50 % poranění
7	100 % poranění

Náraz do lebky představuje jedno z nejnebezpečnějších poranění v oblasti nepřímých účinků výbuchu na lidský organismus. V případě nárazu celého lidského těla na překážku jsou prahové hodnoty rychlosti nárazu vyšší než u rychlosti nárazu do lebky, jak potvrzuje tabulka 5. Údaje z tabulky 4 a 5 odpovídají lidskému tělu o hmotnosti 70kg.

Tabulka 5: Pravděpodobnost úmrtí vzhledem rychlosti dopadu celého lidského těla na překážku (podle [27])

Rychlost dopadu [m.s ⁻¹]	Rámcový rozsah poranění lidského těla
3	Bez nebezpečí
6,5	Prahová hodnota
16,5	50 % poranění
42	100 % poranění

Letící trosky způsobující tupá poranění jsou například letící cihly, které při nárazu do lidského těla způsobí vysoká napětí v těle. Údaje o poškození lidského těla vlivem letících trosek jsou poměrně vzácné. V následujících tabulkách jsou uvedeny rámcové informace týkající se poškození lebky vlivem letících trosek o hmotnosti 4,5 kg, které nezpůsobují řezná poranění (tab. 6); dále vlivu rychlosti řezné letící trosky o váze 10 g na poranění lebky (tab. 7).

Tabulka 6: Kritické rychlosti pro náraz letící trosky na lebku (podle [27])

Poranění	Rychlost dopadu [m.s ⁻¹]	Rámcový rozsah poranění lidského těla
Otřes mozku	3	Bez nebezpečí
	4,6	Prahová hodnota
Fraktura lebky	3	Bez nebezpečí
	4,6	Prahová hodnota
	7	Téměř 100 % poranění

Tabulka 7: Kritické rychlosti pro náraz letící trosky (4,5 kg) na lebku (podle [27])

Rychlost dopadu [m.s ⁻¹]	Rámcový rozsah poranění lebky
15	Práh poškození kůže
30	Práh pro těžká zranění
55	Těžkých zranění 50 %
99	Těžkých zranění 100 %

4.2 Vliv prostředí na účinky výbuchu na lidský organismus

4.2.1 Vzdušné prostředí

Účinky vzdušného výbuchu (*air blast syndrom*), resp. účinky vzdušné rázové vlny byly rámcově popsány již v předchozí kap. 4.1. Může docházet ke skrytému poranění ucha, plic, případně i gastrointestinálního traktu, tj. orgánů obsahujících vzduch. Přímým nárazem rázové resp. tlakové vlny vznikají trhliny stěn plicních sklípků s krvácením do plicní tkáně. Vyvíjí se obraz dušení, které při současné aspiraci krve do neporušených sklípků může vést ke smrti udušením. Hrozí i vzduchová embolie průnikem vzduchu do plicních cév a přes levou část srdce do mozkových a věnčitých tepen. Zranění ucha často probíhá formou překrvení intaktního bubínku, tečkovitým krvácením do bubínku, jeho roztržením a poškozením hlemýždě. Hlavním symptomem poškození ucha v době exploze je hluchota a hučení v uších. Poranění zažívacího traktu se projevuje krevními výrony, někdy dosahujícími velikosti i několika cm, které postihují

především tlusté střevo v krajině slepého střeva. Vzácně může dojít i k trhlinám střeva. Tenké střevo a žaludek bývají postiženy vzácně.

4.2.2 Vodní a pevné prostředí

Spíše pro úplnost lze uvést, že při *působení výbuchu ve vodě (immersion blast syndrom)* dochází především k postižení zažívacího traktu a často ke kontuzi šourku a varlat. Jsou zjišťovány mnohočetné hemorhagie pod peritoneem břišní stěny, v mesenteriu, ve střevech a dochází i k cirkulárním trhlinám tenkého a tlustého střeva, predilekčně, v oblasti ilea a slepého střeva. Vzácně vznikají i trhliny solidních orgánů jako např. jater. Poranění plic je nekonstantní. Pokud k němu došlo, vysvětluje se účinkem tlaku přeneseného z břicha bránicí.

Působením tlakové vlny přenesené na organismus pevnou překážkou (solid blast syndrom) vznikají četné zlomeniny částí těla, které s ní byly v bezprostředním styku (výbuchy v podpalubí, v tancích, pod bojovými vozy). U stojících osob dochází k otevřeným zlomeninám kostí nohy a dolního konce bércových kostí. U sedících vznikají zlomeniny především dolní části hrudní nebo horní části bederní páteře často provázené komocí mozku.

5 Modelování tlakových projevů výbuchu

Pro účely tohoto dokumentu je třeba *modelováním* rozumět zjednodušený popis vztahu mezi přetlakem (příp. jiným parametrem tlakového projevu) a poškozujícím účinkem výbuchu na lidský organismus nebo na stavby.

5.1 Účinky a dosah tlakových projevů

V dalším je předpokládána nejfrekventovanější varianta havarijních explozí výbušnin v průmyslu, tedy pozemní výbuch. Účinky tlakových projevů výbuchu (rázové vlny resp. přetlakové spojité vlny) klesají se vzdáleností od výbušniny. V odborné literatuře zabývající se prevencí závažných havárií je pro případ havarijních výbuchů v průmyslu uváděno několik možných přístupů k matematicko-fyzikálnímu modelování přetlakových účinků na stavby a lidský organismus. Nejfrekventovanější postupy lze rozdělit do dvou základních skupin, podle toho, zda využívají *prahových (limitních) hodnot přetlaku* nebo *probitových funkcí*.

Protože oba způsoby vycházejí ze znalosti přetlaku v konkrétním ohroženém místě, je nejprve třeba tuto hodnotu přetlaku Δp v konkrétní vzdálenosti od výbušniny vypočítat. Relativně jednoduchý a v praxi dostatečně přesný výpočet lze provést na základě *redukované vzdálenosti Z* (viz kap. 5.2.3) a závislosti přetlaku na ní (viz kap. 5.2.4), tedy:

$$\Delta p = f(Z)$$

Další postup spočívá v případě použití:

- *prahových hodnot přetlaku* – v porovnání přetlaku vypočteného pro konkrétní vzdálenost od výbušniny s odpovídající limitní hodnotou přetlaku, která udává destruktivní účinek; prahové hodnoty přetlaku jsou popsány v kap. 5.2;
- *probitových funkcí* – v dosazení přetlaku vypočteného pro konkrétní vzdálenost od výbušniny do příslušné probitové funkce, která určuje přímo procentuální rozsah sledovaného druhu poškození (viz kap. 5.3); tato výhoda (či větší přesnost) probitových funkcí je však zároveň často vyvážena nutností, dosazovat do nich vedle přetlaku i další parametry tlakových projevů, jejichž stanovení je poměrně komplikované (podrobněji viz kap. 5.3).

5.2 Použití prahových hodnot přetlaku

5.2.1 Původ a použitelnost prahových hodnot

Pro výpočet dosahů, případně vzdáleností od potenciálních center výbuchu, lze použít hodnotu výbuchového přetlaku Δp v jednotkách tlaku, obvykle v *kPa*. Ve starších dokumentech bývá používána jednotka *bar*, v ještě starších (*fyzikální*) *atmosféra atm*. Protože atmosféra byla fyzikálně stanovena jako hodnota přirozeného atmosférického tlaku, kdežto v současnosti standardní *pascal* (podle SI) představuje tlak $1 \text{ N.m}^{-2} = 1 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$, je $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$. Aby v technické praxi bylo možno i po přepočtu atmosfér na pascaly pracovat z okrouhlými čísly a v „rozumném“ rozsahu řádů, uplatnil se *bar*, kde $1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa} \cong 1 \text{ atm}$.

Celosvětově je publikováno i používáno velké množství *prahových hodnot výbuchového přetlaku*, které jsou vztahovány k různým účinkům na lidský organismus a stavby. Hodnoty

byly odvozeny ze získaných experimentálních dat, ze skutečných případů nebo získány z jiných modelů. Často nejsou publikovány ve formě uceleného modelu, ale pouze jako ilustrační tabulka, kde jsou uvedené vybrané účinky a přiřazené hodnoty přetlaku. Většinou je obtížné určit původní zdroj těchto hodnot, jednotlivé dokumenty odkazují spíše na další literaturu, málokdy na původní studie. Podklady pro prahové hodnoty výbuchového přetlaku byly v případě výbušnin čerpány především:

- z vojenského prostředí – již z období obou světových válek (1. pol. 20. stol.), dále z jaderných pokusů a z experimentů pro účely konvenčního zbrojního vývoje (od 2. pol. 20. stol.);
- ze zkušeností z průmyslových havárií, kdy informace typu *množství výbušniny – vzdálenost – následky* byly zpravidla dobře vyhodnotitelné;
- z technických experimentů v oblasti průmyslových aplikací (trhací práce pro účely těžby nebo výstavby, experimentální výbuchy pro účely bezpečnostně inženýrského výzkumu apod.).

Z literatury přímo použité v této zprávě lze připomenout zejména např. následující zdroje: *Mannan* [15] („Lees“, 2005, kap. „Explosion“) uvádí stovky odkazů na literaturu o explozích z období od roku 1944 do 90. let 20. stol., která vychází z poznatků v oblasti válečných aplikací jaderných i konvenčních výbušnin, v menší míře z událostí v průmyslu. *Glasstone* [21] (1967) uvádí řadu poznatků o účincích vzdušných rázových vln z oblasti jaderných zbraní, z pozdější doby pak informace získané rozborem průmyslových havárií (především ovšem z oblasti výbuchů plyných uhlovodíků). Po skončení studené války (tj. zhruba po roce 1990) nastal znatelný pokles výzkumné pozornosti věnované účinkům explozí konvenčních i jaderných výbušnin. V ČR je pak s dalším vývojem zřetelný i pokles výzkumných a experimentálních prací zaměřených na účinky výbušnin v oblasti těžebního a důlního průmyslu. Více či méně však přetrvává pozornost věnovaná účinkům výbuchů v důsledku průmyslových havárií, zejména v případě výbuchů plyných uhlovodíků. Z tohoto tématu lze připomenout např. domácí i zahraniční publikace *D. Makovičky a spoluautorů*, přibližně z let 2000 – 2008, zaměřené zejména na účinky výbuchů plynu nebo jiných havarijních explozí na stavební konstrukce budov (viz zdroj [13], 2008).

Ačkoliv lze fyzikální účinky výbuchu teoreticky vztahovat i k dalším výbuchovým veličinám (jejichž popis by přesáhl rámec tohoto dokumentu), prahové hodnoty přetlaku se ukazují pro technickou praxi z hlediska přesnosti jako přijatelné a přitom relativně jednoduché.

5.2.2 Ukázka publikovaných prahových hodnot přetlaku

Tabulka 8 (zpracovaná podle výchozích údajů ze zdroje [40]) znázorňuje prahové hodnoty přetlaku působícího závažnými účinky na osoby (s rozlišením přímých a nepřímých účinků), stavby a zařízení. Vyplývá odtud vysoké ohrožení osob nepřímými účinky výbuchu a zároveň až překvapivá „odolnost“ lidského těla vůči přetlakovým účinkům ve srovnání se stavbami.

Prahové hodnoty přetlaku způsobující poškození staveb a zařízení [27, 40] jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 8: Prahové hodnoty přetlaku pro poškození osob, staveb a zařízení (podle [40])

Přetlak [kPa]	Přímý účinek na osoby	Nepřímý účinek na osoby	Účinek na stavby a zařízení
1			Prahová hodnota pro rozbití skla
7 – 14		Prahová hodnota zranění povrchu těla letícími troskami	
14	Prahová hodnota poškození ušních bubínků	Možnost úmrtí v důsledku pádu na překážku	
10 – 20		Sražení lidského těla na zem tlakovou vlnou	
15 – 20			Zhroucení nevyztužené betonové stěny nebo stěn ze škvárobetonových tvárnic
20 – 30			Zhroucení průmyslové ocelové konstrukce
27 – 34		Zranění letícími troskami, pravděpodobnost úmrtí 50 %	
34 – 48	Poškození ušních bubínků		
35 – 40			Posunutí potrubních mostů, porušení potrubí
48	Prahová hodnota vnitřního zranění výbuchem		
48 – 69		Zranění letícími troskami, pravděpodobnost úmrtí 100 %	
50 – 100			
55 – 110		Odhození lidského těla na určitou vzdálenost	
69 – 103	Poškození ušních bubínků		
70			Totální destrukce budov a těžkých strojů
83 – 103	Prahová hodnota poškození plic		
138 – 172	Krvácení z plic, pravděpodobnost úmrtí 50 %		
209 – 241	Krvácení z plic, pravděpodobnost úmrtí 90 %		
483 – 1376	Okamžité úmrtí, pravděpodobnost 100 %		

Tabulka 9: Prahové hodnoty přetlaku pro poškození staveb a zařízení [27, 40]

Přetlak [kPa]	Popis poškození
0,15	Nepříjemný hluk
0,2	Žádné poškození konstrukcí, velké okenní tabule zatíženy tlakem
0,3	Hluk podobný sonické bombě, příležitostné popraskání skel
0,7	Rozbití malých okenních tabulí
1	Typické poškození skleněných ploch
2	95 % poškození budov bez vážných následků
3	Menší poškození konstrukcí
3,5 – 7	Občasné poškození okenních rámců
5	Drobné poškození struktury domu
7	Kolaps střech nádrží
8	Nutnost následné demolice domů z důvodu neobyvatelnosti
7 – 15	Selhává upevnění ocelových konstrukcí, dřevo a panely jsou poškozeny
10	Ocelové konstrukce staveb začínají být nestabilní
15	Částečné zhroucení střech a stěn domů
15 – 20	Rozbití nevyztužených betonových stěn nebo škvárobotonových tvárníc
18	Dolní mez vážného poškození konstrukcí, 50 % destrukce zdiva domů
20	Poškození těžkých strojů a posunutí ocelových konstrukcí
20 – 28	Zničení ocelových panelových domů a protržení nádrží pro skladování olejů
20 – 40	Popadání vzrostlých stromů
30	Porušení plášťů budov
35	Přelomení dřevěných sloupů el. vedení, zničení většiny budov, kromě zdí vyztužených betonem, zdeformování nákladních automobilů
35 – 40	Posunutí potrubních mostů, porušení potrubních celků
35 – 50	Téměř úplné zničení budov
40 – 55	Kolaps potrubních mostů
50	Poškození naložených nákladních aut / železničních cisteren
50 – 55	Poškození zdí stříhem a ohybem
60	Totální zničení plně naložených vagónů
70	Zničení všech budov a těžkých strojů

5.2.3 Aplikace geometrické podobnosti, redukováná vzdálenost

Z praktického hlediska bývá užitečná možnost porovnat účinky výbuchů na základě tzv. *redukové vzdálenosti*. Tento postup vychází z principu *geometrické podobnosti* uplatněného na vzájemně související veličiny *množství výbušniny – vzdálenost – následky výbuchu*.

Nejjednodušší řešení nabízí zavedení tzv. (Hopkinsovy³² [13]) *redukované vzdálenosti Z*, pro kterou platí

$$Z = R / W^{1/3}$$

kde R [m] je reálná vzdálenost mezi výbušninou a cílovým objektem, W [kg] – hmotnost výbušniny; potom podle principu geometrické podobnosti:

Účinky (a tedy i parametry) tlakového projevu generovaného tímž výbušným systémem³³ jsou při stejných hodnotách redukované vzdálenosti stejné [29].

Názorně to přibližuje tabulka 10, v níž jako příklad byla pro veškeré zde uvedené případy zvolena hodnota redukované vzdálenosti $Z = 1$; lze jí docílit pomocí vhodné volby různých hmotností nálože a její vzdálenosti od cílového objektu. Za dané volby (a v mezích přesnosti tohoto přístupu) budou účinky výbuchu na cílový objekt ve všech případech identické, přestože množství (těže) výbušniny se mění od 1 kg až do 1000 tun. Příklad v tabulce 10 pro $Z = 1$ byl pochopitelně vybrán pro svou jednoduchost, jinak však představuje extrémně vysoký přetlak.

Tabulka 10: Příklad odpovídajících hodnot $Z = R / W^{1/3}$ pro $Z = 1$

R [m]	W [kg]	$W^{1/3}$	Z	Identické účinky
1	1	1	1	1 kg výbušniny na vzdálenost 1 m
10	1 000	10	1	1 tuna výbušniny na vzdálenost 10 m
100	1 000 000	100	1	1 000 tun výbušniny na vzdálenost 100 m



Obr. 10: Redukovaná vzdálenost Z pro různá množství výbušniny

Spojité hodnoty redukované vzdálenosti v rozsahu do $Z = 200$, při rozsahu vzdálenosti R do 200 m a pro různá množství trhaviny 1 – 10 – 100 – 500 – 1000 kg, jsou znázorněny na obr. 10.

³² Spíše pro výbuchy plynů jsou používány i jiné redukované veličiny – např. dle Sachse [13] nebo Swisdaka [12].

³³ V případě kondenzovaných výbušnin je tento systém charakterizován druhem a uspořádáním (nikoli množstvím) výbušniny.

5.2.4 Aplikace energetické podobnosti, TNT ekvivalent

V předchozím případě byl uvažován stále jeden druh výbušniny (typicky trhaviny). Je však užitečné, zahrnout do celkového porovnání tlakových projevů výbušnin i vliv jejich různého energetického obsahu (*výbuchového tepla*). Dostáváme se tak k energetické podobnosti, jejímž základem je přepočítání hmotnosti W konkrétní výbušniny na odpovídající hmotnost TNT (W_{TNT}), která by poskytovala energii ekvivalentní, tedy:

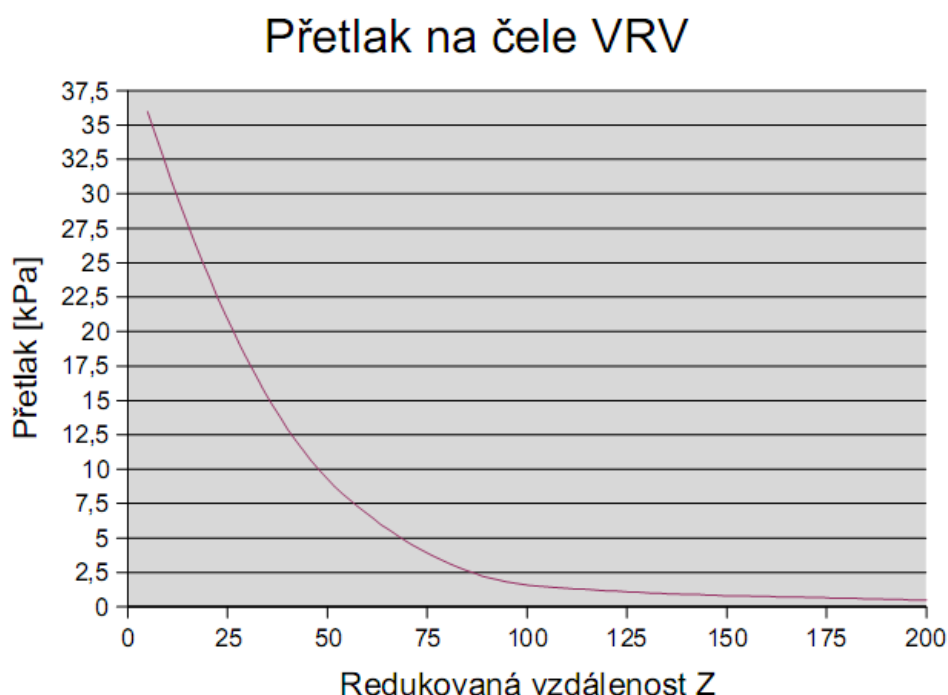
$$W_{TNT} = W \cdot Q_V / Q_{TNT}$$

kde Q_V je výbuchové teplo konkrétní výbušniny a Q_{TNT} výbuchové teplo TNT ($4,187 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ [29]). Porovnání s energií TNT se nejčastěji provádí na bázi *výbuchového tepla* (jak je zde uvedeno), někdy též na bázi *tlaku* nebo *impulzu*.

Konkrétní přetlak Δp na čele rázové vlny lze pak vypočítat na základě experimentálně zjištěné rovnice (polynom třetího stupně), která platí s dostatečnou přesností pro *detonaci kulových náloží na zemském povrchu* ve stanoveném rozmezí hodnot Z [29], [12]:

$$\Delta p [\text{kPa}] = 93,2 / Z + 383 / Z^2 + 1275 / Z^3 \quad (\text{pro } 2 < Z < 200)$$

Přitom hodnoty Z lze pak vypočítat za pomoci reálné vzdálenosti R od výbušniny a ekvivalentní hmotnosti (W_{TNT}) jakékoli detonující výbušniny (resp. trhaviny). Průběh této závislosti je graficky znázorněn na obr. 11.



Obr. 11: Přetlak na čele vzdušné rázové vlny jako funkce Z

V souvislosti s podmínkami platnosti uvedeného vztahu je vhodné připomenout, že stavební objekty obsahující největší množství výbušnin, tedy (povrchové) *sklady*, se zásadně budují jako *jednopodlažní* (viz vyhláška č. 99/1995 Sb., § 6 čl. 1 [11]).

Výše uvedený jednoduchý přístup je v praxi zpravidla dostačující. Existují však i složitější³⁴ možnosti výpočtu účinků rázové vlny, založené např. na výpočtu přetlakové fáze impulzu dopadající vzdušné rázové vlny vyvolané pozemní detonací kulových náloží trhavin [12]; nověji jde např. o „univerzální“ vzorec pro modelování dalších charakteristických veličin výbuchového projevu v závislosti na redukované vzdálenosti [30]. Popis těchto veličin a používaných postupů by přesáhl rámec tohoto dokumentu.

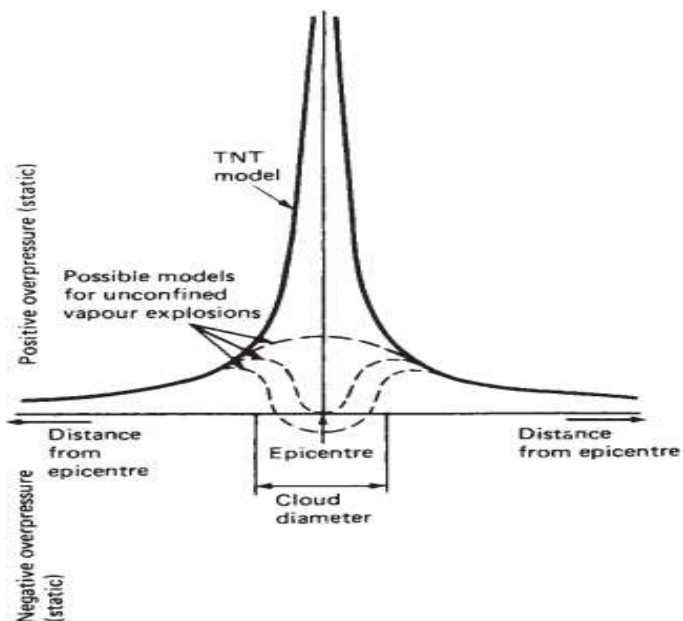
5.2.5 Odlišné přístupy při modelování výbuchu plyných směsí

Výše uvedené modelování tlakových projevů na základě redukované vzdálenosti a TNT ekvivalentu (resp. geometrické a energetické podobnosti) je dostatečně přesné pouze u detonace výbušnin. Vývoj dokonalejších postupů modelování tlakových projevů výbuchu stále probíhá, včetně navazujícího vývoje softwarových nástrojů. Naprostá většina těchto aktivit je však zaměřena na problematiku výbuchu plyných systémů, která je ve srovnání s výbušninami komplikovanější. Pro ilustraci dále alespoň stručně připomeňme, že v případě výbuchu plyných systémů je dostatečná platnost energetické a geometrické podobnosti negativně ovlivněna zejména následujícími skutečnostmi:

- odlišným charakterem výbušné přeměny kondenzovaných trhavin (resp. referenčního TNT) a plyných směsí, a to z hlediska dynamiky chemické reakce výbuchu a odpovídajících fyzikálních projevů;
- relativně vysokou fyzikální hustotou výbušnin (např. TNT cca $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [7]) a ve srovnání s tím nízkou *objemovou energetickou hustotou* plyných směsí; např. výbuchové teplo na objem stechiometrické směsi metanu se vzduchem (o koncentraci 9,5 % obj. plynu) je $3,412 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ [29], kdežto u TNT (s výbuchovým teplem $4,187 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [29]) je to v přepočtu $6281 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, tedy zhruba 1800 krát více (!);
- neochotou oblaků plyných směsí (zvláště ve volném prostoru – výbuch typu UVCE³⁵) přecházet do detonace; i za podmínek navozujících detonaci do ní přichází pouze omezená část objemu oblaku; za teoretické maximum stupně *konverze do detonace* bývá považováno 40 %; prakticky, jak je zjištěno z mnoha zkoumaných případů havárií, jsou však tyto hodnoty podstatně nižší, tj. od 1 % do zhruba 10 až 15 % [13].

³⁴ Přitom zde není řešeno zda, a nakolik přesnější; některé z postupů ovšem lépe vyhovují oblastem velmi vysokých přetlaků vzdušných rázových vln.

³⁵ Unconfined Vapour Cloud Explosion



Obr. 12: Modelové průběhy přetlaku při výbuchu TNT a plynného systému [15]

Závěrem lze shrnout, že v důsledku případného opomíjení výše uvedených skutečností a při mechanické aplikaci TNT ekvivalentu na výpočet tlakových projevů rázové vlny dochází v případě výbuchu UVCE k jejich neúměrnému nadhodnocení, především v blízkosti centra výbuchu, resp. v prostoru oblaku (viz obr. 12 [15]).

5.3 Použití probitových funkcí

Základním motivem pro zavedení probitových funkcí³⁶ byl empiricky zjišťovaný skutečný průběh závislosti mortality na koncentraci resp. dávce toxické látky, který se odlišoval od původních zjednodušených předpokladů lineární závislosti. Zpřesnění skutečné závislosti, resp. zpřesněné stanovení odhadu pravděpodobnosti úmrtí, začalo být řešeno na základě probitové funkce (obecně použitelné nejen na problém toxicity), která je definována jako druh modelové závislosti *dávka – účinek* vyjádřený rovnicí typu $Pr = a + b \cdot \ln D$; za předpokladu normálního rozložení náhodných veličin představuje D „dávku“ a konstanty a , b reprezentují podmínky stanovené pro platnost závislosti. Probitová funkce začala být používána jak pro odhad fyziologických následků při působení toxických látek, tak i tepelného záření při požáru nebo přetlaku a dopadu fragmentů při explozi [25, 31]. V posledně uvedeném případě exploze pak na místě *dávky (podnětu)* zpravidla vystupují:

- přetlak výbuchového projevu,
- fyzikální parametry fragmentu (rychlost, rozměry, hmotnost),

kdežto na místě *účinku*:

- pravděpodobnost poškození zdraví nebo ztráty života.

³⁶ Anglicky *probit function*, kde zkratka *probit* je složena ze slov *probability unit*.

Na základě probitové funkce (*probitu Pr*) je pak *pravděpodobnost úmrtí P* (v důsledku daného účinku havarijních projevů) vyjádřena následující rovnicí [25]:

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right],$$

kde erf ³⁷ je chybová (Gaussova) funkce (podrobněji viz např. [39]). Pro operativnost řešení jsou hodnoty pravděpodobnosti *P* v závislosti na probitu *Pr* tabelovány (viz např. [25]).

5.4 Probitové funkce pro různé podmínky

5.4.1 Poškození plic

Účinky exploze způsobí náhlý rozdíl mezi tlakem uvnitř plic a okolním tlakem. Okolní tlak je mnohonásobně vyšší než tlak, na který je pro plíce za normálních podmínek obvyklý. Tento rozdíl tlaků způsobí, že se hrudník propadne směrem dovnitř, což způsobí jeho poškození případně i smrt postiženého. Důležitou roli zde hraje i doba trvání přetlaku (zvyšuje míru poškození). Pro účely výpočtu poškození plic lidského organismu byla navržena probitová funkce, která bere v úvahu postavení člověka v prostoru a je definována jako poměr přetlaku (vektor *P*) a impulsu (vektor *i*) rázové vlny:

$$\bar{P} = \frac{P'}{P_a} \quad \text{and} \quad \bar{i} = \frac{i}{m^{1/3} \sqrt{P_a}} = \frac{1}{m^{1/3} \sqrt{P_a}} \left(\frac{1}{2} P' t_p \right).$$

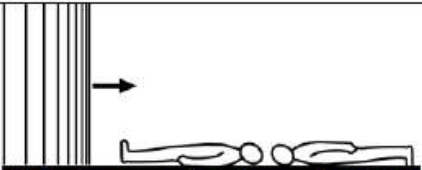
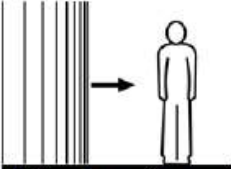
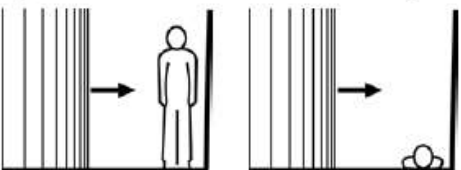
V této rovnici je zahrnuta hmotnost exponované osoby *m*, která se obvykle uvádí v následujících hodnotách: 5 kg pro malé děti, 25 kg pro děti, 55 kg pro dospělé ženy, 75 kg pro dospělé muže.

Na obr. 13 jsou uvedeny empirické výrazy pro výpočet celkového přetlaku *P'* [Pa] vzhledem k různým místům lidského těla a ve vztahu k šíření tlakové vlny. Níže je popsán postup dle Bowena [32]:

V určité vzdálenosti od centra výbuchu je vypočítán: přetlak *P_s* [Pa]; pozitivní fáze trvání *t_s* [s]. Podle obr. 21 se vypočítá celkový přetlak *P'* [Pa] pro specifické postavení lidského těla. Určí se hmotnost lidského těla a z výše uvedené rovnice se vypočte impuls a poměr tlaků. Hodnota probitové funkce se pak počítá dle následující rovnice [32]:

$$Pr = 5.0 - 5.74 \ln S, \quad S = \frac{4.2}{\bar{P}} + \frac{1.3}{\bar{i}}.$$

³⁷ error function

Position of the human body	Total overpressure P' (Pa)
 <p>a) No obstruction of shock wave due to the human body.</p>	$P' = P_s$
 <p>b) Shock wave flows around the human body.</p>	$P' = P_s + \frac{5P_s^2}{2P_s + 14 \times 10^5}$
 <p>c) Reflection of the shock wave against a surface in the immediate surroundings of the person.</p>	$P' = \frac{8P_s^2 + P_s 14 \times 10^5}{P_s + 7 \times 10^5}$

Obr. 13: Poloha lidského těla vzhledem k dopadu tlakové vlny [32]

Probit funkce: Bowen [32]

Probit rovnice: $Pr = 5.0 - 5.74 \ln S$,

Aplikace: Praviděpodobnost úmrtí vlivem poškození plic

Praviděpodobnost úmrtí P vlivem poškození plic se pak za pomoci vypočtené hodnoty probitu Pr stanoví výpočtem z úvodní definiční rovnice $P = f(Pr)$ resp. z tabelovaných hodnot této závislosti (viz např. [25]); analogicky se postupuje i v ostatních dále uvedených případech.

5.4.2 Poškození ušních bubínků

Hirsh v roce 1968 [33] navrhl, že praviděpodobnost protržení bubínku P , lze vypočítat z rovnic s vrcholem přetlaku P_s [Pa].

Probit funkce: Hirsch [33]

$$Pr = -12.6 + 1.524 \ln P_s .$$

Probit rovnice:

Aplikace: Praviděpodobnost protržení ušního bubínku

5.4.3 Poranění hlavy

Protržení ušních bubínků a poškození plic (viz výše) se řadí mezi přímé účinky výbuchu, které jsou přímo způsobené účinkem přetlaku.

Mezi nepřímé účinky způsobující poranění lidského organismu se řadí poranění hlavy vlivem pádu či nárazu na překážku. K pravděpodobnosti úmrtí vlivem poranění hlavy P lze dospět na pomoci z níže uvedené rovnice [22].

$$S = \frac{2.43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s i_s}.$$

Probit funkce: Baker [22]

Probit rovnice: $Pr = 5.0 - 8.49 \ln S,$

Aplikace: Pravděpodobnost úmrtí vlivem poranění hlavy

5.4.4 Náraz celého těla

Mezi nepřímé účinky výbuchu lze zařadit i případy, kdy u silnějších explozí lidské tělo po odhození dopadne na zem nebo na překážku. Pravděpodobnost úmrtí P za těchto podmínek lze vypočítat z níže uvedené rovnice [22].

$$Pr = 5.0 - 2.44 \ln S,$$

$$S = \frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_s i_s}.$$

Kde (stejně jako ve všech předchozích rovnicích tohoto typu) je přetlak P_s [Pa] a impuls i_s [Pa.s].

Probit funkce: Baker [22].

Probit rovnice: $Pr = -12.6 + 1.524 \ln P_s.$

Aplikace: Pravděpodobnost úmrtí odhozením a nárazem těla

5.4.5 Letící trosky a fragmenty

Zranění nebo úmrtí osob vlivem letících trosek a fragmentů se také řadí mezi nepřímé účinky výbuchu. Jejich pravděpodobnost P lze určit pomocí níže uvedených probitových funkcí, do nichž vstupuje rychlost letícího kusu u [$m.s^{-1}$] a jeho hmotnost m [kg] [22].

$$\text{for } 0.001 \leq m \leq 0.1 \text{ kg} \quad Pr = -29.15 + 2.10 \ln(mu^{5.115})$$

$$\text{for } 0.1 < m \leq 4.5 \text{ kg} \quad Pr = -17.65 + 5.30 \ln\left(\frac{1}{2}mu^2\right)$$

$$\text{for } m > 4.5 \text{ kg} \quad Pr = -13.19 + 10.54 \ln(u)$$

Probit funkce:	Baker [22]
Probit rovnice:	viz výše
Aplikace:	Pravděpodobnost úmrtí vlivem rozletu trosek a fragmentů

5.4.6 Další varianty probitových funkcí

Jiný okruh zdrojů (Eisenberg [34], HSE [37], TNO [35]) poskytuje probitové funkce týkající se zranění nebo úmrtí osob a poškození budov či zařízení na základě velikosti přetlaku nebo rychlosti a velikosti letících trosek, při současném zohlednění vlivu některých dalších, obtížněji dostupných veličin, jako je *velikost impulsu* rázové vlny nebo *doby jeho trvání* apod.

Jako příklad uveďme probitovou funkci pro výpočet pravděpodobnosti *úmrtí osob* v důsledku poškození plic (TNO [35], [40]):

Probit funkce:	TNO [35], [40]
Probit rovnice:	$Y = 5 - 8,49 \ln \left[\frac{2530}{P_s} + 4 \times \frac{10^8}{P_s i} \right]^c$
Aplikace:	Smrtelné zranění způsobené poškozením hlavy

Přitom je P_s – *maximální přetlak [Pa]*, $P_s i$ – *impuls rázové vlny [Pa.s]*; c je pouze formální označení typu argumentu (nikoli exponent).

Dále připomeňme probitovou funkci pro výpočet pravděpodobnosti *kolapsu budov a zařízení* (TNO [35], [40]):

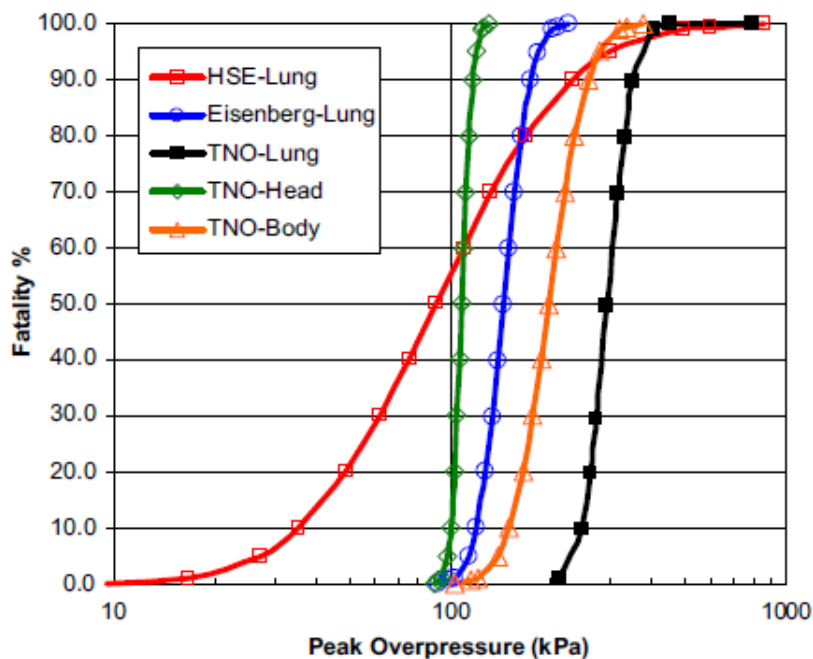
Probit funkce:	TNO [35], [36]
Probit rovnice:	$Y = 5 - 0,22 \ln [V'']^i$
Aplikace:	Kolaps budov/zařízení

Zde je $V'' = (40\,000/P_s) 7.4 + (460/i) 11.3$, kde P_s – *maximální přetlak [Pa]*, i – *impuls rázové vlny [Pa.s]*; horní i je pouze formální označení typu argumentu (nikoli exponent).

5.5 Probitové funkce – shrnutí

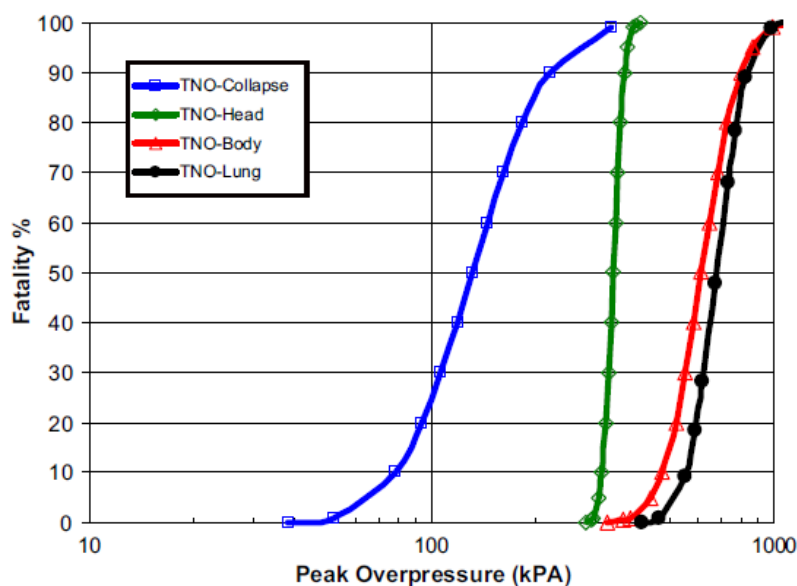
5.5.1 Obraz účinků výbuchu

Na obr. 14 je znázorněno srovnání pravděpodobnosti úmrtí osob podle probitových funkcí z uvedených zdrojů, tedy na základě smrtelných zranění plic, hlavy a těla, v závislosti na přetlaku. U prezentovaných probitových funkcí vycházejících z přetlaku se předpokládá doba trvání výbuchu 70 ms [40]. Jak je patrné z obr. 14, co se týče smrtelného poranění plic, model HSE [37] (červená křivka) poskytuje nejvíce konzervativní přístup pro nízké hodnoty přetlaku, u vyšších hodnot však udává nižší pravděpodobnosti úmrtí než model Eisenbergův (modrá křivka) [34], který se pohybuje na úrovni vyšších přetlaků. Eisenbergův model (modrá křivka) [34] stanovuje hodnoty přibližně podobné úrovni pro plicní krvácení, jak je uvádí tabulka 8 (kap. 5.2.2). Nejvyšší „odolnost“ vůči poranění plic vyplývá z modelu TNO (černá křivka).



Obr. 14: Srovnání probit funkcí pro fatální poškození orgánů [40]

Podle obr. 15 je poranění hlavy (zelená křivka) nejzávažnější příčinou úmrtí, protože nastává při nižších přetlacích, než při kterých dochází ke smrtelným zraněním těla (červená křivka) a plic (černá křivka). Modrá křivka popisuje fatální zranění v důsledku kolapsu budov a zařízení; tato kritická situace nastává při ještě nižších tlacích, než přímé následky (úmrtí osob) po zranění přetlakem. Tuto skutečnost potvrzuje také tab. 8, tedy, že smrtelná zranění osob vlivem hroucení trosek nastanou při výrazně nižších hodnotách přetlaku, než při kterých dochází k poškození plic.

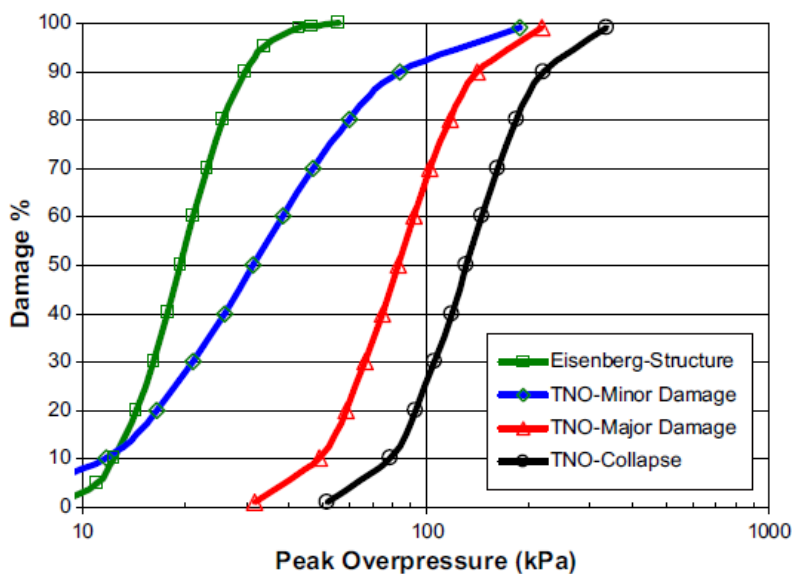


Obr. 15: Srovnání probit funkcí TNO pro fatální poškození orgánů [35, 38]

Z uvedených výsledků probitových funkcí (viz obr. 14, 15, 16) vyplývá, že největší nebezpečí pro osoby představují nepřímé účinky výbuchu; např. hodnoty přetlaku způsobujícího smrtící náraz lidského těla zem nebo překážku, hroucení budov nebo vznik smrtelně zraňujících letících trosek jsou výrazně nižší než hodnoty přímých dopadů způsobujících smrtelné poranění (lebky, plic, příp. dalších částí těla). Přičemž jako nejpravděpodobnější lze očekávat úmrtí v důsledku hroucení staveb (ještě při relativně menším přetlaku), zatímco (při vyšší úrovni přetlaku) osoby ve vnějším prostoru jsou primárně ohroženy přímým účinkem přetlaku na lebku.

Tento celkový obraz sledovaných účinků výbuchu se jeví shodně v případě znázorněných probitových funkcí (viz obr. 14, 15, 16) a publikovaných prahových přetlaků (viz tab. 8 a 9 v kap. 5.2.2); ovšem v konkrétních oblastech prahových hodnot je mnohdy patrný nesoulad mezi oběma druhy údajů, resp. je obtížné jejich jednoznačné vzájemné přiřazení.

Mimo to, co se týče rozdílů mezi průběhy pravděpodobnosti úmrtí na základě probitových funkcí podle různých zdrojů (viz obr. 14, 15, 16), lze jako jednu z možných příčin opět připomenout vliv délky impulsu stanovené u TNO na 70 ms, zatímco u ostatních zdrojů není tato hodnota známa.



Obr. 16: Srovnání probit funkcí hodnotící poškození budov a zařízení [40]

5.5.2 Podmínky použití probitových funkcí

Přehled probitových funkcí poskytovaných uvedenými zdroji znázorňuje tab. 11.

Tabulka 11: Vybrané modely vycházející z probitových funkcí

	Zdroj	Bowen [32]	Hirsh [33]	Baker [22]	Eisenberg [34]	HSE [37]	TNO [35], [38], [40]
Smrtelná poškození zdraví	Poškození v důsledku poranění ušních bubínek		x				
	Poškození v důsledku poranění plic	x			x	x	x
	Poškození v důsledku poranění hlavy			x			x
	Poškození v důsledku poranění celého těla			x			x
	Poškození v důsledku letící trosky nad 4,5kg			x			x
	Poškození v důsledku letící trosky 0,1-4.5 kg			x			x
	Poškození v důsledku letící trosky 0,001-0.1 kg			x			x
Poškození staveb	Totální destrukce budov/zařízení				x		
	Poškození skleněných ploch						x
	Závažné poškození budov/zařízení						x
	Poškození skleněných ploch						x

Obecně je třeba říci, že výpočty či odhady prahových přetlaků pro poškození staveb a konstrukcí dosahují v principu obvykle vyšší přesnosti, neboť jsou mnohdy založeny na vyhodnocení reálných situací, zatímco modelování škod na lidském zdraví je odkázáno především na nepřímé údaje, nedostatečně přesné extrapolace výsledků laboratorních testů apod.

Použití modelů založených na probitových funkcích se na první pohled může jevit jako velmi výhodné, protože tento postup stanovuje přímo pravděpodobnost úmrtí osob vystavených tlakovým projevům výbuchu. Je však třeba si uvědomit, že tyto modely jsou zaměřeny na relativně úzký druh smrtelného poranění (plíce, lebka, hroucení budov, apod.), zároveň však vyžadují poměrně přesné vstupní údaje. Typicky je to zřejmé např. z probitových funkcí vycházejících z přetlaku generovaného výbuchem, do nichž jako „vedlejší parametr“ vstupuje i časová délka impulsu přetlaku. Seriózní celkové závěry na základě výsledků několika probitových funkcí lze pak dělat pouze, pokud funkce vycházejí ze shodných vedlejších parametrů; jinak poskytují prakticky nesrovnatelné výsledky, lišící se přinejmenším v desítkách procent, jak je zřejmé i z některých předchozích grafů. Dále je třeba mít naprostou jistotu, co se týče dalších podmínek použitelnosti a platnosti probitových funkcí, např. včetně jejich příp. odlišnosti pro výbuchy plynů nebo výbušnin (srov. obr. 12 v kap. 5.2.5), apod.

Mimo to, jak již bylo řečeno, z porovnání předchozích grafů (viz obr. 14, 15, 16) vycházejících z probitových funkcí a publikovaných prahových přetlaků (viz tab. 8 a 9 v kap. 5.2.2), je v konkrétních oblastech prahových hodnot mnohdy patrný nesoulad mezi oběma druhy údajů, resp. je obtížné jejich jednoznačné vzájemné přiřazení. Nicméně celkový obraz sledovaných

účinků výbuchu, tedy zásadní „hierarchie“ podmínek fatálně ohrožujících osoby (tj. v pořadí – hroucení staveb – zranění lebky – zranění plic – ostatní zranění) se v obou případech jeví shodně.

6 Principy prevence následků havarijních výbuchů

Nejzávažnější následky havarijního výbuchu představují oběti na životech, dalšími závažnými následky jsou destrukce staveb. Zde, vedle materiálních škod, opět mohou být fatálně ohroženy osoby, pokud jsou přítomny ve vnitřních prostorách. Smrtelné ohrožení uvnitř budov (nepřímé následky) nastává v důsledku hroucení staveb a jejich konstrukčních prvků už při nižších tlacích, než které by způsobily smrtelná zranění při pobytu osob na volném prostoru (viz též kap. 4 a 5, resp. zejména obr. 14, 15, 16 a tab. 8 a 9 v kap. 5.2.2).

Predikce a prevence následků nežádoucích výbuchů výbušnin představuje velmi rozsáhlou problematiku; z ní budou v dalším přiblíženy dva základní přístupy.

6.1 QD princip – fenomenologický přístup

6.1.1 Efekt vzdálenosti

Přístup je založen na skutečnosti, že energie tlakových projevů výbuchu daná množstvím a vlastnostmi výbuštiny ubývá se vzdáleností; jde tedy o vztah *Quantity – Distance (QD)*. Podstatou prevence je zde vzájemné oddělení výbuštiny a ohroženého objektu³⁸ bezpečnou vzdáleností $D [m]$, pro kterou platí (viz např. [43]):

$$D = k \cdot Q^n$$

kde n zpravidla nabývá hodnoty v rozmezí 1/2 až 1/6, $Q [kg]$ je množství výbuštiny a koeficient k zahrnuje, obecně řečeno, různými způsoby specifikovaný charakter ohrožujícího objektu (resp. v něm umístěné výbuštiny) a zároveň i objektu ohroženého.

Tento velmi jednoduchý a spolehlivý přístup vyplynul již ze zkušeností z obou světových válek; přinejmenším od poloviny 20. stol. je ve značné míře využíván ve vyspělých zemích jako kritérium pro plánování výstavby výrobních, zpracovatelských a skladových areálů výbušnin a munice. Na jeho základě je řešeno jak zabezpečení vzájemně mezi *ohrožujícími* a *ohroženými technologickými a skladovými objekty* (mj. tedy zabránění *domino efektu*), tak i jejich „bezpečné sousedství“ s vnějším okolím a veřejností, především s okolní „civilní“ zástavbou.

QD přístup bývá někdy označován jako *fenomenologický*, protože vychází z poznaného jevu (fenoménu), že přetlak generovaný výbuchem se vzdáleností od výbuštiny klesá, resp., že dostatečnou bezpečnost lze zajistit pomocí vzdálenosti. Přitom nejsou zkoumány další podrobnosti celého jevu, tedy zejména způsob šíření přetlaku, jeho dynamika ani jeho konkrétní hodnoty v místě ohrožení.

6.1.2 Bezpečnostní vzdálenost

QD princip se tak mnohde stal i jedním z nástrojů územního plánování a pro (bezpečnou) vzdálenost oficiálně stanovenou na jeho základě byl zaveden pojem *bezpečnostní vzdálenost*

³⁸ V daných souvislostech je vhodné chápat zde pojem „objekt“ v souladu se zákonem č. 61/1988 Sb. [10], tj. jako stavbu pro výrobu, zpracování nebo skladování výbušnin, a nikoli jako objekt ve smyslu zákona č. 224/2015 Sb. [28].

(*safety clearance*); např. německý BAM³⁹ stanovuje pro skladování výbušnin bezpečnostní vzdálenosti způsobem uvedeným v tabulce 12 (podle [44]).

Tabulka 12: Způsob stanovení vybraných bezpečnostních vzdáleností v Německu (podle BAM [44])

Klasifikace výbušniny ⁴⁰ (ohrožující objekt)	Ohrožené objekty	Výpočet bezpečnostní vzdálenosti D	Příklad: bezpečnostní vzdálenost pro 1000 kg
1.1	Obytné areály a podobné stavby (např. stavby jiných společností)	$D = 22 \cdot Q^{1/3}$	220 m
1.1	Dopravní infrastruktura (např. silnice, železnice, plavební trasy)	$D = 15 \cdot Q^{1/3}$	150 m
1.2	Obytné areály a podobné stavby (např. stavby jiných společností)	$D = 58 \cdot Q^{1/6}$	184 m
1.2	Dopravní infrastruktura (např. silnice, železnice, plavební trasy)	$D = 39 \cdot Q^{1/6}$	124 m
1.3	Obytné areály a podobné stavby (např. stavby jiných společností)	$D = 6,4 \cdot Q^{1/3}$	64 m
1.3	Dopravní infrastruktura (např. silnice, železnice, plavební trasy)	$D = 4,3 \cdot Q^{1/3}$	40 m
1.3, 1.4 Ohrožující objekt s méně než 100 kg	nestanovuje se	nestanovuje se	nestanovuje se

6.1.3 Bezpečnostní vzdálenosti, bezpečnostní pásma a obložení podle zákona o výbušninách

Také v ČR se QD princip (ač takto není nikde přímo nazýván) stal jedním z používaných nástrojů, či spíše respektovaných limitů územního plánování, jak vyplývá zejména z ustanovení § 30 odst. 3 zákona o výbušninách [10], podle kterého je organizace⁴¹ povinna: *...poskytovat orgánu územního plánování údaje o ochraně okolí...pokud jde o bezpečnostní vzdálenosti.*

Dále, podle vybraných ustanovení § 30 a 31 téhož zákona, v případech, kdy stavbu skladu výbušnin nebo objekt pro výrobu, zpracování (aj.) výbušnin umísťuje stavební úřad⁴², vyžádá si k tomu *závazné stanovisko* obvodního báňského úřadu. Toto stanovisko samozřejmě bere v úvahu stanovení bezpečnostních vzdáleností (a pásem), které je pro objekty uvedeného druhu povinnou součástí projektové dokumentace (viz např. § 5 vyhlášky o skladování výbušnin [11]).

³⁹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung – Spolkový úřad pro výzkum a zkoušení materiálů

⁴⁰ Odpovídá evropskému nařízení CLP.

⁴¹ Tj. *provodovatel* ve smyslu zákona o prevenci závažných havárií.

⁴² Tedy pokud se stavba nachází mimo dobývací prostor.

Podle téže vyhlášky (§ 4 písm. b) je přitom *bezpečnostní vzdálenost* definována, jako: *nejmenší dovolená vzdálenost mezi místem nebo objektem, v němž se vyrábějí, zpracovávají nebo skladují výbušniny, nebo hranicí místa manipulace s výbušninami, a ohroženým objektem.*

Ovšem bezpečnostní vzdálenost zajišťuje zabezpečení příslušných objektů pouze ve stanovené míře; musí tedy zabránit poškození ohroženého objektu nad jistou úroveň, nikoliv však jakémukoli (menšímu) poškození. Poškození lze tímto způsobem kategorizovat do určitých intervalů vzdálenosti v okolí ohrožujícího objektu. Výše citovaná vyhláška [11] v tomto smyslu definuje *bezpečnostní pásmo* (§ 3 písm. a), představující: ... *prostor určený hranicí, která vymezuje předem zvolený stupeň poškození objektu.*

Pak tedy platí, že mezi jakýmkoli ohroženým objektem uvnitř nebo mimo výrobního areálu a ohrožujícím objektem v areálu nesmí být vzdálenost menší, než stanovená *bezpečnostní vzdálenost*. Ve stanovených případech se však ohrožený objekt zároveň nachází v určitém *bezpečnostním pásmu*, pro něž je tolerován jistý stupeň poškození.

Stanovení konkrétních bezpečnostních vzdáleností musí být součástí projektové dokumentace každého objektu. Bezpečnostní pásma musejí být zakreslena do územního plánu a jejich stanovení je dáno např. v případě skladů *třídy nebezpečí A*⁴³ tabulkou č. 1 v příloze 2 vyhlášky [11] o skladování výbušnin (viz dále tab. 13 v kap. 6.1.4 tohoto dokumentu).

V této příloze vyhlášky je též uveden vlastní výpočet bezpečnostní vzdálenosti $S [m]$, představující naprostou analogii výše popsaného QD přístupu, i když s odlišným značením veličin:

$$S = k \cdot M^n$$

kde $M [kg]$ je *obložení*⁴⁴ (tj. *nejvýše povolené množství výbušnin*), k je koeficient (viz též tab. 14 níže) a exponent n nabývá hodnot podle rozsahu obložení:

$$n = 1/2 \text{ pro } M < 2000 \text{ kg}$$

$$n = 1/3 \text{ pro } M \geq 2000 \text{ kg}$$

Pokud vzájemné vzdálenosti ve skupině dvou nebo více skladů jsou menší, než odpovídá jejich stanoveným bezpečnostním vzdálenostem, jedná se o *soubor skladů*. V případě havarijního výbuchu jednoho z nich se tedy předpokládá přenos exploze i na ostatní, takže pro určení bezpečnostní vzdálenosti vůči objektům mimo tuto skupinu je třeba hodnotu M pro výpočet brát jako souhrnné obložení celého souboru.

Vedle toho je pro výpočet bezpečnostních vzdáleností v případě výbušnin, které se svým energetickým obsahem významně odchyľují od TNT (např. vysokobrizantní trhaviny), nutno korigovat obložení na TNT ekvivalent, tedy veličinu M násobit koeficientem k_{ekv} , především tehdy, pokud je jeho hodnota větší než jedna.

⁴³ Třídy nebezpečí (podle vyhlášky [11]) viz Příloha 1 část 4 tohoto dokumentu.

⁴⁴ *Obložení* – v provozním prostředí spíš zdomácněla varianta tohoto pojmu – *obložnost*.

Výpočet bezpečnostní vzdálenosti pak reálně nabývá formy:

$$S = k \cdot (k_{ekv} \cdot M)^n$$

6.1.4 Bezpečnostní pásma a dosah přetlaku

Použití bezpečnostních vzdáleností a pásem (QD přístup) se týká přímo vzdáleností mezi ohroženými a ohrožujícími objekty, aniž by byly explicitně známy hodnoty prahového přetlaku způsobujícího v těchto vzdálenostech dané škody. Tyto hodnoty přetlaku, právě v souvislosti s bezpečnostními vzdálenostmi a pásmy, jsou však snadno přístupné, jak bude ukázáno později.

Zde však nejprve blíže objasníme význam koeficientu k v rovnici pro výpočet bezpečnostní vzdálenosti S (viz kap. 6.1.3 tohoto dokumentu, resp. [11]), která pro obložení nad 2000 kg od skladu výbušnin *třídy nebezpečí A*, nabývá tvaru:

$$S = k \cdot M^{1/3}$$

Po separaci koeficientu k , kde

$$k = S / M^{1/3}$$

získáme fakticky totožný výraz (lišící se pouze formálním označením veličin) pro redukovanou vzdálenost Z :

$$Z = R / W^{1/3}$$

Z toho vyplývá, že při hodnotě exponentu $n = 1/3$ má koeficient k používaný k výpočtu bezpečnostní vzdálenosti S fakticky rozměr redukované vzdálenosti Z . Přitom hodnoty koeficientu k jsou pro účely výpočtu bezpečnostních pásem uvedeny v tabulce č. 1 v příloze 2 vyhlášky o skladování výbušnin [11]; viz dále tabulka 13 (upraveno).

Podle této tabulky určuje pevně stanovená hodnota koeficientu k (prostřednictvím výpočtu bezpečnostní vzdálenosti S) vzdálenost začátku příslušného bezpečnostního pásma (1 až 5) ve směru od ohrožujícího objektu s obložením $M \geq 2000 \text{ kg}$. Pro každé bezpečnostní pásmo je v tabulce uveden charakteristický druh zástavby, kterému je tak v důsledku vzdálenosti přiznána přiměřená ochrana, zároveň lze pro ni ovšem předpokládat jistý (přípustný) stupeň poškození.

Údaje z tabulky 13 jsou velmi významné jednak z hlediska *zabránění domino efektu* (bezpečnostní pásmo 1), především však z hlediska *ohrožení resp. ochrany veřejnosti* (bezpečnostní pásma 3 – 5). Zároveň odtud vyplývá, že mimo hranice *organizace nakládající s výbušninami*, resp. *objektu, v němž jsou umístěny výbušniny*, tj. v bezpečnostních pásmech 3 – 5, je třeba počítat s poškozením staveb pouze takového stupně, u kterého zpravidla nelze předpokládat fatální dopad na zdraví a životy osob zdržujících se uvnitř i vně.

V souvislosti s tabulkou 13 je však nutno zdůraznit, že pro jiné případy (výbušniny nižších tříd nebezpečí, výrobní objekty aj.) existuje ve dvou prováděcích vyhláškách [11], [47] zákona o výbušninách [10] několik dalších závazných postupů pro výpočet bezpečnostních vzdáleností, resp. pásem, jejichž podrobnější rozbor by přesáhl rámec tohoto dokumentu.

Tabulka 13: Specifikace bezpečnostních pásem pro sklady třídy A (podle [11], upraveno)

BEZPEČ. PÁSMA	Hodnota koeficientu k , vztah pásem k okolí		Povolená zástavba bezpečnostního pásma	Stupeň poškození ohrožených objektů	Příklad: začátek bezpeč. pásma pro 8000 kg výbušniny tř. A
Pořadí pásma	k				
„nulté“			„Neoficiální pásmo“, zahrnuje objekt a nejbližší okolí, předpoklad totální destrukce		0 m
1.	1,5	Vnitřní pásmo	Sklady výbušnin a výrobní objekty tříd nebezpečí B, C a D, objekty malé důležitosti bez trvalé obsluhy	Nedojde k přenosu detonace; destrukce objektu, úplné rozrušení budov	30 m
2.	8		Objekty bez nebezpečí výbuchu, správní, sociální, energetické a jiné stavby, kde se nevyrábějí a nezpracovávají výbušniny	Poškození rámu oken a dveří, porušení omítky, vnitřních dřevěných příček	160 m
3.	15	Pásma pro veřejnost (vnější)	Jednotlivé budovy mimo území provozovny, silnice, železnice	Lehká poškození staveb, větší rozsah zničení oken	300 m
4.	22		Obce bez souvislé výškové zástavby	Částečné poškození zasklených oken	440 m
5.	60		Sídlíště s výškovou zástavbou, nemocnice, významné kulturní památky, stavby s vysokou koncentrací osob, např. velká obchodní střediska	Náhodné poškození zasklených oken	1200 m

Jak již bylo uvedeno, platí-li $n = 1/3$, nabývá koeficient k používaný k výpočtu bezpečnostní vzdálenosti S fakticky rozměru redukované vzdálenosti Z . Dále, pro výpočet přetlaku Δp na čele šířící se vzdušné rázové (ve větších vzdálenostech pravděpodobně akustické) vlny je pro praktické účely a za předpokladu alespoň přibližně kulové nálože detonující na zemském povrchu dostatečně přesná rovnice (viz též kap. 5.2.4 tohoto dokumentu, resp. [29, 12]) závislosti přetlaku Δp na redukované vzdálenosti Z :

$$\Delta p [kPa] = 93,2 / Z + 383 / Z^2 + 1275 / Z^3 \quad (\text{pro } 2 < Z < 200)$$

kde $R [m]$ je reálná vzdálenost mezi výbušninou a ohroženým objektem, $W [kg]$ – netto hmotnost výbušniny⁴⁵ (tedy tzv. *NEQ – Net Explosives Quantity*).

Dosadíme-li tedy do této rovnice za redukovanou vzdálenost Z konkrétní hodnoty koeficientu k z tabulky 13 a provedeme-li pro ně výpočet

$$\Delta p = f(Z) \text{ resp. } \Delta p = f(k)$$

⁴⁵ Obecně je ještě třeba korigovat tuto hmotnost na TNT ekvivalent (viz kap. 6.1.3 toho dokumentu).

získáme tak hodnoty přetlaku vždy na hranici počátku příslušného bezpečnostního pásma (směrem od zdroje výbuchu); podle nich lze dále stanovit rozmezí přetlaku pro jednotlivá bezpečnostní pásma (viz tabulka 14).

Tabulka 14: Specifikace bezpečnostních pásem pro sklady třídy A (upraveno podle [11])

Bezpeč. pásmo	Koeficient	Dílčí výpočty členů rovnice $\Delta p = f(Z)$			Vypočtený přetlak na počátku bezp. pásma Δp [kPa]	Rozmezí přetlaku Δp [kPa] (zaokrouhleno)
	$k (= Z)$	$93,2/Z$	$383/Z^2$	$1275/Z^3$		
1.	1,5	---	---	---	mimo obor platnosti rovnice pro Δp ($Z < 2$)	$>>20$
2.	8	11,65	5,984375	2,490234	20,12	$20 \div 8$
3.	15	6,213333	1,702222	0,377778	8,29	$8 \div 5$
4.	22	4,236364	0,791322	0,119741	5,15	$5 \div 2$
5.	60	1,553333	0,106389	0,005903	1,67	$2 \div 0$

Následně jsou v tabulce 15 prahových hodnot přetlaku pro poškození staveb a zařízení vyznačena (viz modré značky) rozmezí přetlaku zjištěná pro jednotlivá bezpečnostní pásma.

Je však třeba si uvědomit, že předpokládané následky poškození staveb podle tabulky 13, resp. vyhlášky [11], představují oficiální údaj z legislativy, jehož platnost je navíc prověřena desítkami let praktických zkušeností v průmyslu výbušnin. Naproti tomu tabulka 15 (resp. tabulka 9 z kap. 5.2.2 tohoto dokumentu) představuje jistý výběr ze značného množství nejrůznějších prahových hodnot přetlaku, které sice pocházejí z odborné literatury, ale okolnosti jejich vzniku a podmínky platnosti nejsou mnohdy dostatečně jasné.

Podle výše uvedených zkušeností v průmyslové praxi se běžně má zato, že přinejmenším od poloviny 20. stol. dodnes nedošlo na území ČR při jakékoli závažné havárii s účastí výbušnin nikdy ke vzniku takových škod v okolí, které by přesahovaly stupeň odpovídající příslušné bezpečnostní vzdálenosti resp. bezpečnostnímu pásmu podle příslušných legislativních nebo jiných odborných předpisů. Úplná a co do sledovaných parametrů dostatečně rozsáhlá statistika, která by toto přesvědčení mohla prokázat, však není v ucelené podobě k dispozici; nanejvýš jde obvykle o vnitropodnikové záznamy z vlastních událostí, které jednak není zájem zveřejňovat; dále nemusí být zpracovány v takové kvalitě a zejména s potřebnou mírou unifikace dat, aby bylo možné seriózní statistické zpracování.

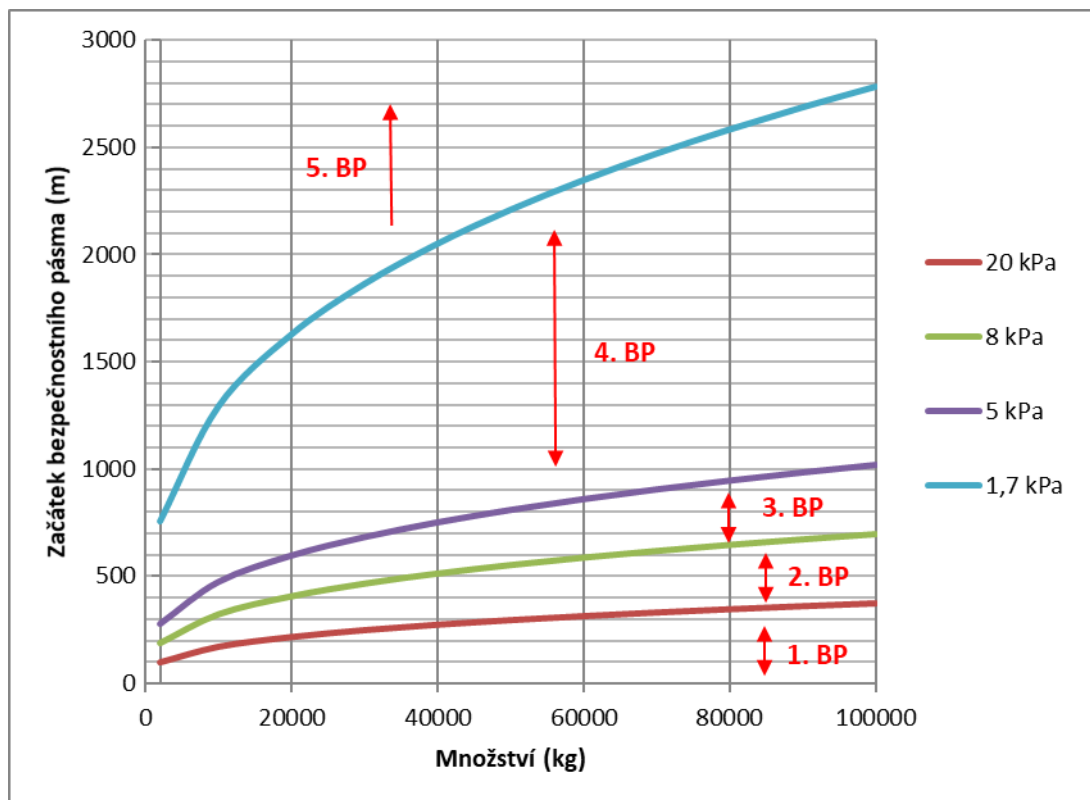
Tabulka 15: Prahové hodnoty přetlaku⁴⁶ a vymezení bezpečnostních pásem (BP)

Přetlak [kPa]	Popis poškození	BP
0,15	Nepříjemný hluk	↑
0,2	Žádné poškození konstrukcí, velké okenní tabule zatíženy tlakem	
0,3	Hluk podobný sonické bombě, příležitostné popraskání skel	
0,7	Rozbití malých okenních tabulí	
1	Typické poškození skleněných ploch	
2	95 % poškození budov bez vážných následků	5.
3	Menší poškození konstrukcí	
3,5 – 7	Občasné poškození okenních rámců	
5	Drobné poškození struktury domu	4.
7	Kolaps střech nádrží	
8	Nutnost následné demolice domů z důvodu neobyvatelnosti	
7 – 15	Selhává upevnění ocelových konstrukcí, dřevo a panely jsou poškozeny	3.
10	Ocelové konstrukce staveb začínají být nestabilní	
15	Částečné zhroucení střech a stěn domů	
15 – 20	Rozbití nevyztužených betonových stěn nebo škvárobetonových tvárnic	
18	Dolní mez vážného poškození konstrukcí, 50 % destrukce zdiva domů	
20	Poškození těžkých strojů a posunutí ocelových konstrukcí	2.
20 – 28	Zničení ocelových panelových domů a protržení nádrží pro skladování olejů	
20 – 40	Popadání vzrostlých stromů	
30	Porušení pláště budov	
35	Přelomení dřevěných sloupů el. vedení, zničení většiny budov, kromě zdí vyztužených betonem, zdeformování nákladních automobilů	
35 – 40	Posunutí potrubních mostů, porušení potrubních celků	
35 – 50	Téměř úplné zničení budov	
40 – 55	Kolaps potrubních mostů	
50	Poškození naložených nákladních aut / železničních cisteren	
50 – 55	Poškození zdí stříhem a ohybem	
60	Totální zničení plně naložených vagonů	1.
70	Zničení všech budov a těžkých strojů ⁴⁷	↓

⁴⁶ Upraveno na základě výchozí tabulky 9.

⁴⁷ Dle okolností přetlaky v 1. BP samozřejmě mohou dále růst „mimo tabulku“ směrem k ještě podstatně vyšším hodnotám.

Na obr. 17 jsou znázorněny vzdálenosti [m] počátečních hranic jednotlivých bezpečnostních pásem (BP) ve směru od ohrožujícího objektu a odpovídající přetlaky [kPa] (viz tabulka 14) v závislosti na množství výbušniny M [kg]. Mimo jiné je zde názorně ilustrována skutečnost, že 5. bezpečnostní pásmo není ukončeno, tedy, že teoreticky sahá do nekonečna. Odpovídá tomu zkušenost, že při značně velkých haváriích nelze vyloučit vznik „náhodného poškození zasklených oken“ (viz příslušný stupeň poškození podle tabulky 13) ve značných vzdálenostech, aniž by však v ostatních bezpečnostních pásmech došlo k překročení předpokládaných stupňů poškození.



Obr. 17: Vzdálenosti počátečních hranic bezpečnostních pásem (BP) od ohrožujícího objektu a odpovídající přetlaky [kPa] v závislosti na množství výbušniny [kg] (pro sklady výbušnin třídy nebezpečí A)

6.2 Posouzení rizika – probabilistický přístup

6.2.1 Pravděpodobnostní princip, riziko

Během zhruba posledních 30 let rozvoje průmyslu a společnosti začalo být QD přístupu (viz kap. 6.1 tohoto dokumentu) vytýkáno, že ač poskytuje vcelku spolehlivou ochranu, vychází vlastně z předpokladu, že k havarijnímu výbuchu dříve či později vždy dojde, přičemž jediným prostředkem prevence následků má být stanovení *bezpečnostní vzdálenosti*. Narůstal zájem doplnit tento systém dalšími postupy, zohledňujícími řadu detailů tak, aby bylo možno uvažovat

o *závažné havárii* s účastí výbušnin na základě *rizika*, jakožto veličiny, jejíž hodnotu lze kvalifikovaně odhadnout (podle [43]).

Tím byl do představ o vzniku havárie zaveden *pravděpodobnostní (probabilistický) přístup*, neboť v souladu s řadou zahraničních odborných zdrojů a evropskou legislativou (v daném případě SEVESO III⁴⁸) definuje zákon o prevenci závažných havárií [29] *riziko* jako (viz § 2 písm. i): *pravděpodobnost vzniku nežádoucího specifického účinku, ke kterému dojde během určité doby nebo za určitých okolností*.

Riziko se kvantitativně často vyjadřuje jako *míra rizika R*, což je číselná hodnota nebo číselná funkce, která popisuje vztah mezi pravděpodobností a následky nežádoucí události [45]. V oblasti prevence závažných havárií se míra rizika *R* definuje jako součin *frekvence*⁴⁹ *F* vzniku nežádoucí události a *mortality N*, tedy:

$$R = F \cdot N$$

6.2.2 Posouzení rizik podle zákona o PZH

Prevence závažných havárií (resp. jejich následků) v průmyslu výbušnin představuje poměrně rozsáhlou problematiku, z níž bude dále stručně přiblížen pouze základní princip posouzení rizik. To je pro účely zpracování *bezpečnostní dokumentace* povinen provést provozovatel *objektu* zařazeného podle zákona o prevenci závažných havárií [28] do skupiny A nebo B (viz § 9 zákona); *posouzení rizik závažné havárie* sestává z *identifikace zdrojů rizik, analýzy rizik a hodnocení rizik*.

Přitom *objektem* (na rozdíl od zákona o výbušninách) se pro účely zákona o prevenci závažných havárií ([29], viz § 2 písm. a) rozumí: *celý prostor, popřípadě soubor prostorů, ve kterém je umístěna jedna nebo více nebezpečných látek v jednom nebo více zařízeních užívaných právnickou nebo podnikající fyzickou osobou, včetně společných nebo souvisejících infrastruktur a činností*.

Významným výstupem analýzy rizik je přehled vyjádření rizika pro jednotlivé identifikované scénáře havárií (podrobněji viz příloha č. 2 vyhlášky č. 227/2015 Sb., o náležitostech bezpečnostní dokumentace a rozsahu informací poskytovaných zpracovateli posudku [46]; dále též „vyhláška o náležitostech bezpečnostní dokumentace“) ve tvaru:

$$R = F_h \cdot N$$

kde je

R – *míra skupinového rizika* scénáře závažné havárie (počet usmrcených osob za rok);

F_h – *zjištěná roční frekvence* scénáře závažné havárie; stanovuje se jako součin dalších pravděpodobnostních veličin spojených s podmínkami vzniku havárie (podrobněji viz [41, 42, 46]);

⁴⁸ SEVESO III – Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/18/EU (SEVESO III) ze dne 4. července 2012, o kontrole nebezpečí závažných havárií s přítomností nebezpečných látek.

⁴⁹ Frekvence (četnost) – zde počet výskytů sledované události za rok (podle [45]).

N – odhad počtu usmrcených osob; stanovuje se zpravidla na základě předpokládaného zasažení osob o známém nebo odhadnutém počtu v ohrožených prostorech a objektech příslušnou *prahovou hodnotou přetlaku* (podrobněji viz kap. 5.2 tohoto dokumentu); příp. na základě použití vhodných *probitových funkcí* (podrobněji viz kap. 5.3 a 5.4 tohoto dokumentu).

Navazující výstup *hodnocení rizik*, resp. *hodnocení přijatelnosti skupinového rizika závažných havárií* spočívá v porovnání roční frekvence scénáře závažné havárie F_h (pro všechny hodnocené scénáře) s kritériem F_p , definovaným jako ([46], příloha 1 odst. 3):

$$F_p = 1 \cdot 10^3 / N^2$$

kde je

F_p – přijatelná roční frekvence závažné havárie,

N – odhad počtu usmrcených osob.

Skupinové riziko scénáře závažné havárie pro okolí hodnoceného objektu se považuje za přijatelné, jestliže:

$$F_h < F_p$$

Popis úplného provedení *posouzení rizik*, včetně *celkového hodnocení rizika objektu pro jeho okolí* a souvisejících postupů přesahuje rámec tohoto dokumentu (podrobně viz [28, 41, 42, 46]). Z této oblasti poznatků spojených s bezpečným provozováním objektů a zařízení lze bez dalších podrobností připomenout ještě dvě významná témata:

- *systém řízení bezpečnosti*, který je vypracován a provozován provozovatelem a jeho popis je vedle posouzení rizik a dalších položek součástí bezpečnostní dokumentace;
- *vliv (spolehlivosti a chybování) lidského činitele*, jehož popis je součástí analýzy rizik prováděné v rámci posouzení rizik.

6.3 Rozlet úlomků

6.3.1 Terminologie, zdroje úlomků

Okolí havarijního výbuchu může být druhotně ohroženo také rozletem trosek, resp. fragmentů, úlomků, střepin. Přestože v této oblasti ohrožujících projevů výbuchu není používané názvosloví jednotné, lze vyjít z přístupu domácí legislativy a dalších odborných zdrojů, kdy např. vyhláška o skladování výbušnin [11] na několika místech hovoří o ohrožení okolí *rozletem (lehkých nebo těžkých) úlomků*. Z dalšího kontextu je zřejmé, že jako zdroj těchto úlomků lze (za blíže určených podmínek) předpokládat jak stavební objekty, příp. technologická zařízení, v nichž se nacházejí *výbušniny*, tak i skladované *výbušné předměty*.

Naproti tomu výkladový slovník VÚBP [45] upřednostňuje výraz *fragmenty* (vymrštěné při destrukci objektu nebo zařízení) a dělí je na dvě základní skupiny:

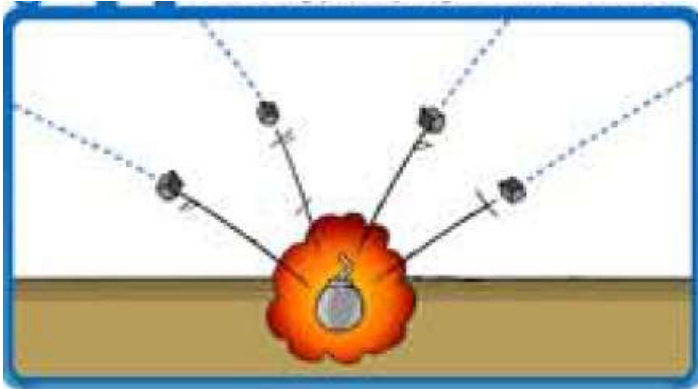
- *primární fragmenty* – vzniklé v důsledku roztržení pevného materiálu přímým působením explodující látky (tj. přímým kontaktem explodující výbušniny a tříštěného materiálu);

- *sekundární fragmenty* – vzniklé v důsledku působení vzdušné rázové vlny na okolní objekty.

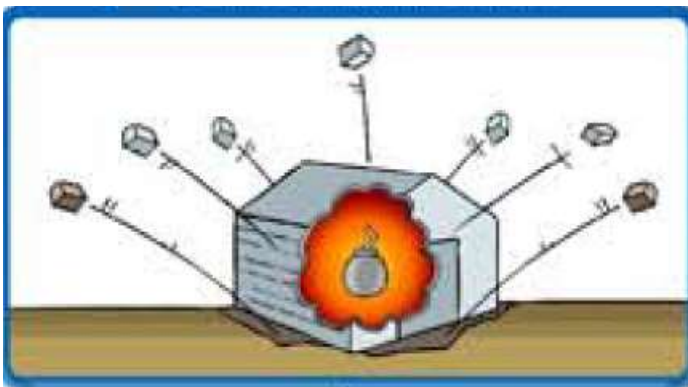
Z praktického hlediska lze předpokládat, že k *primární fragmentaci* dochází v důsledku havarijní exploze výbušniny v zařízení; v principu podobný jev ovšem nastává i při výbuchu *munice*, tj. především přímým účinkem exploze trhavinové náplně na plášť střely, příp. jiných druhů munice.

Sekundární fragmentace je pak typická pro destrukci budovy skladu při havarijním výbuchu zde uložených výbušnin. Ty by při regulérním skladování neměly být k podlaze, stěnám a stropu skladu umístěny blíže než na několik decimetrů (viz konkrétní ustanovení vyhlášky [11]), dále jsou zpravidla uloženy v papírových, kartonových nebo dřevěných obalech apod. Z těchto důvodů je typické působení rázové vlny vzniklé explozí výbušnin uložených (zpravidla na paletách) na podlaze skladu (kde se účinkem detonace vytvoří kráter), na jeho stěny a stropní konstrukci.

Rozdíl mezi rozletem primárních a sekundárních úlomků je stylizovaně znázorněn na obr. 18 a 19 [43].



Obr. 18: Stylizované znázornění vzniku primárních úlomků [43]



Obr. 19: Stylizované znázornění vzniku sekundárních úlomků [43]

6.3.2 Úlomky staveb a zařízení

Kvantitativní predikce hlavních následků (zdraví a životy osob), příp. jejich pravděpodobnosti, které jsou způsobeny rozletem úlomků v důsledku havarijní exploze výbušnin uvnitř staveb

(skladů, výroben) či zařízení, je velmi obtížná. Pokročilá řešení kombinují QD a probabilistický přístup (viz např. [49]); velmi komplexní postup tohoto druhu zpracovaný formou řady algoritmů (resp. matematických modelů) integrovaných do softwarového nástroje je prezentován např. ve zprávě [43].

Používané výpočetní modely jsou velmi náročné na vstupní údaje a zároveň musejí brát v úvahu celý řetězec okolností a podmínek, přinejmenším v následujícím rozsahu:

- zdroj výbuchu – výbušnina, příp. munice – množství, vlastnosti;
- objekt, sklad – stavební provedení a materiál, příp. další vlastnosti;
- parametry vnitřního výbuchu v objektu, skladu, včetně pravděpodobnosti jeho vzniku (zpravidla z generických dat);
- parametry příp. primární fragmentace (munice, výbušnina v zařízení);
- pravděpodobnost průniku primárních fragmentů překážkami (stěnami a stropem stavby);
- parametry sekundární fragmentace (vznik úlomků stavebních dílů a materiálů), jejich distribuce do okolí;
- charakter a dislokace ohrožených budov, počty ohrožených osob;
- pravděpodobnostní parametry pobytu osob v ohroženém prostoru.

Závěrečné kroky představuje stanovení výsledné pravděpodobnosti zranění a úmrtí osob v každé ohrožené budově a lokalitě, dále celkově v celém ohroženém prostoru.

6.3.3 Ochrana před rozletem podle zákona o výbušninách

Zákon o výbušninách [10] resp. příslušné prováděcí vyhlášky popisují mimo jiné uplatnění a stavební provedení zemních *ochranných valů* (představujících zároveň „zvýhodnění“ pro výpočet bezpečnostních vzdáleností) u skladů a dalších staveb, určených pro nakládání s výbušninami. V případě takto vybaveného skladu se pak kritickým místem z hlediska rozletu úlomků stává především jeho střecha. Její konstrukční řešení určuje, zda plochou střechy mohou v důsledku vnitřního výbuchu prolétat primární úlomky, a zda se její materiál může zároveň stát zdrojem pro rozlet úlomků sekundárních. Z hlediska prevence je přitom žádoucí především *zabránění rozletu těžkých úlomků*. Z těchto důvodů vyhláška o skladování výbušnin [11] požaduje (viz § 8 odst. 4 písm. a, b), aby střecha skladu byla provedena pouze:

- a) *jako výfuková, z lehkého, snadno tříštitelného materiálu, který při výbuchu uvnitř objektu neohrozí okolí rozletem těžkých úlomků, nebo*
- b) *jako odolná proti účinkům výbuchu nebo snižující účinek tlakové vlny, pevně zakotvená do okolních stěn a dimenzovaná tak, aby odolala tlakové vlně a ostatním účinkům výbuchu nebo aby je omezila na nejnižší míru.*

Zároveň jsou v příloze 1 citované vyhlášky stanoveny třídy nebezpečí výbušnin A, B, C, D, přičemž *třída A* je definována jako:

Výbušniny nebezpečné hromadným výbuchem, při němž je okolí ohrožováno tlakovými účinky a vymršťovanými úlomky. Závažnost škod a rozsah poškození jsou závislé na množství výbušniny.

Vzhledem k tomu, že z jednotlivých tříd nebezpečí je dále odvozován způsob stanovení bezpečnostní vzdálenosti příp. bezpečnostního pásma, je zřejmé, že předpokládané ohrožení okolí vymršťováním těžkých úlomků je do tohoto stanovení zahrnuto. Přitom není zcela jasné (ale pravděpodobně ani důležité), zda se v daném případě jedná o úlomky primární či sekundární.

Prioritou je v každém případě zabránění rozletu *úlomků těžkých*, jak je zřejmé jednak z požadavků vyhlášky na provedení střechy skladu, ale např. také z jejího požadavku taxativního stanovení bezpečnostní vzdálenosti (viz příloha 1 této vyhlášky odst. 6) pro 3. bezpečnostní pásmo skladů třídy nebezpečí A (viz též tab. 13 tohoto dokumentu), který zní:

Bezpečnostní vzdálenost od skladu třídy nebezpečí A, v nichž se skladují předměty ohrožující při výbuchu okolí rozletem těžkých úlomků, je pro silnice a železnice nejméně 180 m a pro obytné budovy mimo území provozovny nejméně 275 m.

Tímto způsobem je zajištěno, že pro *jednotlivé obytné budovy mimo území provozovny, silnice, železnice*, nepřesáhnou škody v tomto pásmu přípustný stupeň, stanovený jako – *lehká poškození staveb, větší rozsah zničení oken* (viz tab. 13 tohoto dokumentu). V této souvislosti lze uvést následující příklad:

Např. pro obložení 2000 kg skladu tř. nebezpečí A by bezpečnostní vzdálenost pro *jednotlivé obytné budovy mimo území provozovny* dle výpočetního vzorce (viz kap. 6.1.3 tohoto dokumentu) činila 189 m. Vzhledem ke známým vlastnostem příslušných výbušnin (resp. výbušných předmětů), včetně možného ohrožení rozletem těžkých úlomků, se však na tento případ vztahuje povinnost, zajistit bezpečnostní vzdálenost v rozsahu minimálně 275 m.

7 Závěr

Účelem tohoto dokumentu bylo, v intencích řešeného projektu prezentovat výbušniny jako zdroj rizika ve smyslu zákona o prevenci závažných havárií [28], včetně využití přístupů dalších relevantních specializovaných zákonů, zejména zákona o výbušninách [10], a zároveň za použití řady odborných informačních zdrojů (viz níže kap. 8). Vedle stručného pohledu na chemickou a fyzikální podstatu výbušnin bylo vysvětleno jejich dělení podle technického účelu na trhavinu, střelivinu, třaskavinu a pyrotechnické slože, včetně jejich typických vlastností a ohrožujících projevů vůči okolí.

Zároveň byly přiblíženy základní přístupy k predikci i prevenci účinků a následků havarijních explozí výbušnin v jejich nezávažnější podobě, tedy jako ohrožení lidského zdraví, života a poškození staveb. Odpovídající postupy jsou v současnosti v ČR (stejně jako v řadě dalších průmyslově vyspělých států) založeny na kombinaci QD a probabilistického přístupu, což obojí má svou oporu v příslušné legislativě.

V obdobných intencích byla v navazujících dokumentech REPETITORIUM, díl 2 a REPETITORIUM, díl 3 popsána problematika komodit spadajících do širšího pojetí výbušnin (viz níže Příloha 2), tedy pyrotechnických výrobků, střeliva a munice, opět za použití relevantních specializovaných zákonů a příslušných odborných informačních zdrojů.

8 Použitá literatura

- [1] DENKSTEIN J., STRNAD J., SVATOŠ L., ŠTEKL J., VÁVRA P.: Technologie výbušin. VŠCHT, Pardubice, 1979.
- [2] DENKSTEIN J.: Chemie a technologie základních výbušin. VŠCHT, Pardubice, 1987.
- [3] NOVOTNÝ M., MEČÍŘ R., SEDLÁČEK S., TAMCHYNA V.: Teorie výbušin. VŠCHT, Pardubice, 1981.
- [4] PANTOFLÍČEK J., SEDLÁČEK S., SVATOŠ L.: Teorie hoření. VŠCHT, Pardubice, 1978.
- [5] JURÁNEK O., RAMPÍR B.: Příručka pro střelmistry. ARIES, Ostrava, 1994.
- [6] Katalog výrobků. Trhaviny. Explosia a. s., Pardubice, 2017.
- [7] KÖHLER J., MEYER R.: Explosivstoffe II, Wiley VCH, Weinheim – New York, 1998.
- [8] BREBERA S.: Vojenské trhaviny a technologie trhavinových náloží. VŠCHT, Pardubice, 1989.
- [9] Oborová příručka pro živnost – vývoj, výroba, opravy, úpravy, přeprava, nákup, prodej, půjčování, uschovávání, znehodnocování, ničení – zbraní, střeliva, výbušin. Hospodářská komora ČR, Odbor informačních míst pro podnikatele. ARDENT Brno, 2009.
- [10] Zákon Českého báňského úřadu č. 61/1988 Sb., o hornické činnosti, výbušninách a o státní báňské správě, ve znění pozdějších předpisů.
- [11] Vyhláška Českého báňského úřadu č. 99/1995 Sb., o skladování výbušnin, ve znění pozdějších předpisů.
- [12] DENKSTEIN J.: Ochrana objektů před účinky havarijních výbuchů I. VŠCHT, Pardubice, 1991.
- [13] MAKOVIČKA D., JANOVSÝ B. a kol.: Příručka protivýbuchové ochrany staveb. Česká technika – ČVUT v Praze, Praha, 2008.
- [14] NOVOTNÝ M., DENKSTEIN J.: Základy protivýbuchové ochrany. Chemické závody Juraja Dimitrova, Bratislava, 1986.
- [15] MANNAN S.: Lee's Loss Prevention in the Process Industries. Elsevier, Butterworth, Heinemann, 2005.
- [16] HENRYCH J.: Dynamika výbuchu a její užití. Academia, Praha, 1973.
- [17] VÁVRA P., VÁGENKNECHT J.: Teorie působení výbuchu. Univerzita Pardubice, Pardubice, 2002.
- [18] BJERKETVEDT D., BAKKE J. R., WINGERDEN K.: Gas Explosion Handbook, Journal of Hazardous Materials 52, 1992.
- [19] NORRIS C.H.: Structural design for dynamic loads. McGraw – Hill, 1959.
- [20] Center for Chemical Process Safety/AIChE. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs. 1994. ISBN 0-8169-0474X.

- [21] GLASSTONE S.: The effects of nuclear weapons. United States Atomic Energy Commission, 1967.
- [22] BAKER W.E., COX P.A., WESTINE P.S.: Explosion hazards and evaluation. Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [23] BRASIE W.C., SIMPSON D.W.: Guidelines for estimating damage explosion. Proc. 63rd Nat. AIChE Meeting, AIChE, New York, 1968.
- [24] SANDRA S. S., RAMPAL K. G.: Occupation health: risk assessment and management. John Wiley & Sons. 1999. ISBN 0-632-04199-4.
- [25] SKŘEHOT P. a kol.: Prevence nehod a havárií, 2. díl. VÚBP, Praha, 2009.
- [26] Hazardous Substances Publication series 1. Methods for determining possible damage ('Green book'). Ministry of VROM [Housing, Spatial Planning and the Environment], 2005.
- [27] CASAL J.: Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. ELSEVIER. ISBN 9780444530813, Hardbound, 378 pages.
- [28] Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi, ve znění pozdějších předpisů.
- [29] NOVOTNÝ M.: Bezpečnostní inženýrství I. Výbuchy hořlavých plynů a prachů. VŠCHT, Pardubice, 1988.
- [30] Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd Edition. AIChE, New York, 2000.
- [31] DLABKA J.: Kritická analýza probit funkcí používaných v rámci prevence závažných havárií. VŠB-TU Ostrava, 2010.
- [32] BOWEN J.G, FLETCHER E.R., and RICHMOND D.R., 1968, "Estimate of Man's Tolerance to the Direct Effects of Air Blast", Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Albuquerque, New Mexico, Report DASA-2113.
- [33] HIRSH F.G.: 1968, "Effects of Overpressure on the Ear - A Review", *Ann. N Y Acad. Sci.* 152:147-162
- [34] Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, center for chemical process safety. American Institute of Chemical Engineers; 2000.
- [35] Methods for the determination of possible damage. In: CPR 16E. The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO); 1989.
- [36] Method for Evaluating Possible Damage. PGS1, parts 2A and 2B, ministry of housing, spatial planning and the environment. The Hague; December 2003.
- [37] Major hazard aspects of the transport of dangerous substances. Health & Safety Executive (HSE); 1991.
- [38] NEEDHAM C. E.: Blast waves. Springer.Berlin. 2010, ISBN 978-643-05287-3.
- [39] ANDREWS L. C.: Special functions of mathematics for engineers. SPIE Press, 1998.
- [40] La CHANCE J., TCHOUVELEV A., ENGEBO A.: Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. Elsevier. International journal of hydrogen energy 36 (2011) p. 2381-2388.

- [41] Metodika přístupu k identifikaci zdrojů rizik, analýze rizik a hodnocení rizik průmyslových havárií pro posouzení rizik v rámci prevence závažných havárií. Ministerstvo životního prostředí, VÚBP, v. v. i., Praha, 2016.
- [42] Doplnky k Metodice přístupu k identifikaci zdrojů rizik, analýze rizik a hodnocení rizik průmyslových havárií pro posouzení rizik v rámci prevence závažných havárií. VÚBP, v. v. i., Praha, 2016.
- [43] ROSS T., SUATENGCO T. E., CARLILE J. A.: Risk-based explosive safety analysis. Air Force Research Laboratory AFB, California, 2016.
- [44] NOLDE M.: Storage of explosives in Germany. 2nd Provision to the German Explosives act, BAM, 2016.
- [45] Výkladový terminologický slovník některých pojmů používaných v posouzení rizik závažné havárie. VÚBP, Praha, 2010.
- [46] Vyhláška č. 227/2015 Sb., o náležitostech bezpečnostní dokumentace a rozsahu informací poskytovaných zpracovateli posudku, ve znění pozdějších předpisů.
- [47] Vyhláška 102/1994 Sb., kterou se stanoví požadavky k zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci a bezpečnosti provozu v objektech určených pro výrobu a zpracování výbušnin.
- [48] Generic Risk Assessment 5.7, Explosives, Part 1. TSO, London, 2008.
- [49] MORETON P.: Controlling Risks around Explosives Stores. Health and Safety Executive (HSE), Warrington, UK, 2002.

9 PŘÍLOHY

9.1 PŘÍLOHA 1: VÝBUŠNINY, VÝBUŠNÉ LÁTKY a PŘEDMĚTY, vymezení základních pojmů podle platné české legislativy

1) ADR

Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí

Třída 1 – **Výbušné látky a předměty**

Kap. 2. 2. 1. 1. 1 – Pod název třídy 1 spadají:

- **Výbušné látky**

Tř. 1: a) Tuhé nebo kapalné látky (nebo směsi látek), které mohou chemickou reakcí vyvinout plyny takové teploty, takového tlaku a takové rychlosti, že mohou způsobit škody v okolním prostředí.

- Pyrotechnické látky **Tř. 1:** Látky nebo směsi látek určené k vyvolání tepelných, světelných, zvukových, plynových nebo dýmových efektů nebo jejich kombinaci pomocí nedetonačních, samovolně probíhajících exotermických chemických reakcí.

- **Výbušné předměty**

Tř. 1: b) Předměty, které obsahují jednu nebo více výbušných nebo pyrotechnických látek.

2) Zákon o PZH

Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi

Kategorie nebezpečnosti v souladu s nařízením (ES) č. 1272/2008 (CLP)⁵⁰.

Příloha 1, Tabulka 1 – Kategorie nebezpečných látek:

- **P1a VÝBUŠNINY**

- nestabilní výbušniny
- výbušniny, oddíl 1.1, 1.2, 1.3, 1.5 nebo 1.6
- látky nebo směsi, které mají výbušné vlastnosti podle metody A. 14 dle nařízení (ES) č. 440/2008 (viz CLP, pozn. 3) a nenáleží do třídy nebezpečnosti organické peroxidy nebo samovolně reagující látky a směsi.

⁵⁰ Viz poznámka v záhlaví Tabulky 1, Příloha 1 zákona o PZH.

Pozn.: Metoda A. 14 určuje výbušné vlastnosti látky nebo směsi na základě zkoušky její citlivosti na působení tepla, na náraz a na tření (zkoušku na náraz a tření lze alternativně řešit porovnáním s citlivostí 1, 3-dinitrobenzenu; za pozitivní výsledek se považuje vyšší citlivost zkoušené látky nebo směsi).

- **P1b VÝBUŠNINY**

- výbušniny, oddíl 1.4

Pozn.: odd. (resp. podtřída) 1. 4 (podle CLP) – látky, směsi a předměty, které nepředstavují žádné významné nebezpečí:

- *látky, směsi a předměty, které představují pouze malé nebezpečí v případě zážehu nebo vznícení. Účinky jsou převážně omezeny na balení a nepředpokládá se rozlet úlomků větších rozměrů nebo větší ohrožení okolí. Vnější požár nezpůsobí prakticky současný výbuch téměř celého obsahu balení.*
-

3) Nařízení CLP⁵¹

Nařízení Evropského parlamentu a rady (ES) č. 1272/2008, o klasifikaci, označování a balení látek a směsí

- Příloha I, část 2.1.1.1 - Třída VÝBUŠNIN zahrnuje:

a) **výbušné látky a směsi;**

- b) **výbušné předměty**, vyjma zařízení obsahujících výbušné látky nebo směsi v takovém množství či takové povahy, že jejich mimovolné či náhodné zapálení nebo vznícení nezpůsobí žádné vnější účinky mimo zařízení v důsledku zasažení částicemi, ohně, kouře, tepla nebo hluku; a

- c) látky, směsi a předměty **nevedené** v písmenech a) a b), které jsou vyráběny k získání praktického, výbušného nebo pyrotechnického účinku.

Část 2.1.1.2 - Pro účely tohoto nařízení se použijí tyto definice:

- **Výbušná látka nebo směs**

„Výbušnou látkou nebo směsí“ se rozumí tuhá nebo kapalná látka či směs látek, která je sama o sobě schopna chemickou reakcí vytvořit plyn takové teploty a tlaku a takové rychlosti, které mohou poškodit okolí. Tato definice zahrnuje pyrotechnické látky, i když nevyvíjejí plyny.

- **Pyrotechnická látka nebo směs**

„Pyrotechnickou látkou nebo směsí“ se rozumí látka nebo směs látek určená k získání tepelného, světelného, zvukového, plynového nebo dýmového efektu nebo kombinace

⁵¹ Evropská verze GHS: Globálně harmonizovaný systém klasifikace a označování chemikálií (původ OSN, 1992).

těchto efektů v důsledku nedetonativních, samovolně probíhajících exotermických chemických reakcí.

- **Výbušný předmět**

„Výbušným předmětem“ se rozumí předmět obsahující jednu nebo více výbušných látek nebo směsí.

- **Pyrotechnický předmět**

„Pyrotechnickým předmětem“ se rozumí předmět obsahující jednu nebo více pyrotechnických látek nebo směsí.

- *Nestabilní výbušnina*

„Nestabilní výbušninou“ se rozumí výbušná látka nebo směs, která je teplotně nestálá nebo příliš citlivá pro běžnou manipulaci, dopravu a užití.

- *Úmyslná výbušnina*

„Úmyslnou výbušninou“ se rozumí látka, směs nebo předmět, které jsou vyráběny za účelem získání praktického, výbušného nebo pyrotechnického účinku.

4) Zákon o výbušninách

Zákon č. 61/1988 Sb., o hornické činnosti, výbušninách a o státní báňské správě

Ustanovení § 21 odst. 1 písm. a):

Pro účely tohoto zákona se rozumí

- **Výbušninou**

Látky a předměty, které jsou uvedeny v *Příloze A Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR)* zařazené do třídy 1 těchto látek, pokud nejde o střelivo, munici a pyrotechnické výrobky.

Dále jsou uvedeny *třídy nebezpečí výbušnin* podle vyhlášky č. 99/1995 Sb. zákona:

Třída nebezpečí	Chování při výbušné přeměně
A	Výbušniny nebezpečné hromadným výbuchem, při němž je okolí ohrožováno tlakovými účinky a vymršťovanými úlomky. Závažnost škod a rozsah poškození jsou závislé na množství výbušniny. (Detonující výbušniny, dále se dělí do 4 skupin nebezpečí AI – AIV; podrobněji viz [N6]).

B	Výbušniny neschopné hromadného výbuchu, při požáru vybuchují jednotlivě. Tlakový účinek je omezen na bezprostřední okolí, na stavbách v blízkém okolí vznikají jen malé škody. Vymrštěvané předměty mohou vybuchnout, a tím přenášet požár a výbuch.
C	Výbušniny neschopné hromadného výbuchu, jejich požár vyvolává silné tepelné účinky a může se rychle rozšiřovat. Okolí je ohroženo hlavně plameny, tepelným zářením a vyletujícími hořícími díly. Předměty mohou jednotlivě vybuchovat a být vrženy do okolního prostoru. Ohrožení staveb v bezprostředním okolí působením vzdušných rázových vln je malé.
D	Výbušniny nepředstavující žádné významnější nebezpečí pro okolí. Účinky jsou omezeny na jednotlivé obaly, při požáru nevybuchuje celý obsah jednotlivého balení. Jsou schopny odhořívání, předměty mohou jednotlivě vybuchovat. Nevznikají úlomky nebezpečné velikosti, dolet úlomků je malý.

5) Zákon o pyrotechnice

Zákon č. 206/2015 Sb., o pyrotechnických výrobcích a zacházení s nimi

- **Pyrotechnický výrobek**

Výrobek obsahující výbušné látky nebo směs výbušných látek určené k produkci tepla, světla, zvuku, plynu, kouře, nebo kombinace těchto efektů pomocí samoudržujících se exotermických chemických reakcí (§ 3 písm. a).

Z definice v § 4 odst. 2 zákona se pyrotechnické výrobky dělí do kategorií

- F – zábavní pyrotechnika (F1 – F4)
- T – divadelní pyrotechnika (T1, T2)
- P – ostatní pyrotechnické výrobky (P1, P2).

Pozn.: Zákon se však nevztahuje mj. na pyrotechnické výrobky určené k nekomerčnímu využití ozbrojenými sbory... (viz § 2 odst. 2 zákona).

6) Zákon o zbraních a střelivu

Zákon č. 229/2016 Sb., kterým se mění zákon č. 119/2002 Sb., o střelných zbraních a střelivu (zákon o zbraních)

- **Střelivo**

Druhy zbraní a střeliva jsou vymezeny v příloze č. 1 k tomuto zákonu (§ 2 odst. 1 zákona č. 119/2002 Sb.).

Definice střeliva – viz Příloha č. 1 k zákonu č. 119/2002 Sb., část 2., odst. 1:

Střelivo – souhrnné označení nábojů, nábojek a střel do střelných zbraní, nejedná-li se o municí.

- **Munice**

Municí je úplně i neúplně zkompletovaný výrobek obsahující výbušninu nebo nukleární, biologický nebo chemický materiál, speciálně konstruovaný pro použití ozbrojenými silami a bezpečnostními sbory. Druhy a skupiny munice jsou vymezeny v příloze č. 2 k tomuto zákonu (§ 70a odst. 1).

Definice skupin munice – viz Příloha č. 2 k zákonu č. 119/2002 Sb.:

- *Skupiny munice*

- a) *středorážová munice* – kulové náboje a střely ráže vyšší než 12,7 mm a nejvýše 20 mm, pokud jejich střela obsahuje výbušné látky nebo jiné aktivní muniční náplně, ostatní náboje ráže větší než 20 mm, s výjimkou nábojů dovoleného výrobního provedení,
 - b) *dělostřelecká munice* – dělostřelecké jednotné nebo dělené náboje od ráže 20 mm včetně podkaliberní munice,
 - c) – o) další druhy munice...
-

9.2 **PŘÍLOHA 2: VÝBUŠNINY, VÝBUŠNÉ LÁTKY a PŘEDMĚTY, rozdělení podle nařízení CLP**

Grafická forma schématu je zpracována a upravena pouze pro účely tohoto dokumentu.

