

SS02030008

CENTRUM ENVIRONMENTÁLNÍHO VÝZKUMU ODPADOVÉ A OBĚHOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍ BEZPEČNOST

Odborná zpráva o řešení projektu 2024–2025 Výstup 3.A.1.7 Typové analýzy



Reportovací období: 01.01. – 31.12.2025

Kontaktní osoba: prof. Dr. Ing. Aleš Bernatík, ales.bernatik@vsb.cz, +420 597 322 833

Vypracovali: Ing. Petr Lepík, Ph.D., Ing. Petra Roupcová, Ph.D., Ing. Vojtěch Jankůj, Ph.D., prof. Dr. Ing. Aleš Bernatík

Datum vypracování: 15. 1. 2026

T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH) je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

Obsah

Úvod	3
1. Shrnutí problematiky typových scénářů	4
1.1. Charakteristiky jednotlivých projevů havárií	5
1.2. Případy havárií z minulosti	14
2. Výběr reprezentativních látek a technologií	20
2.1. Hořlavost - LPG v zásobníku – 96 t	20
2.2. Výbušnost - čerpací stanice vodíku	21
2.3. Toxicita - železniční cisterna s amoniakem 50 t	22
2.4. Nebezpečnost pro ŽP – zásobník čpavkové vody	23
3. Návrh metodického postupu tvorby scénáře a jeho hodnocení	24
4. Doporučení pro snížení rizik	53
Závěr	54
Reference	55

WP 3.A Hodnocení rizik závažných havárií 2021-2025

TYPOVÉ ANALÝZY

Cíl WP3.A.1.7: Typové analýzy specifických látek a provozů

Úvod

Tato studie vznikla v rámci projektu TAČR SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH). Předmětem této dílčí části projektu je vypracování typových scénářů závažných havárií pro vybrané reprezentativní zástupce kategorií nebezpečných látek - hořlavých, toxických, výbušných a nebezpečných pro životní prostředí v typických provozech průmyslových podniků (Výstup 3.A.1.7). Účelem studie je přispět ke sjednocení postupů analýzy a hodnocení rizik závažných havárií pomocí příkladů typových scénářů rozvoje havárií u vybraných technologií a nebezpečných látek, a tím přispět ke zvyšování bezpečnosti a prevence vzniku závažných havárií.

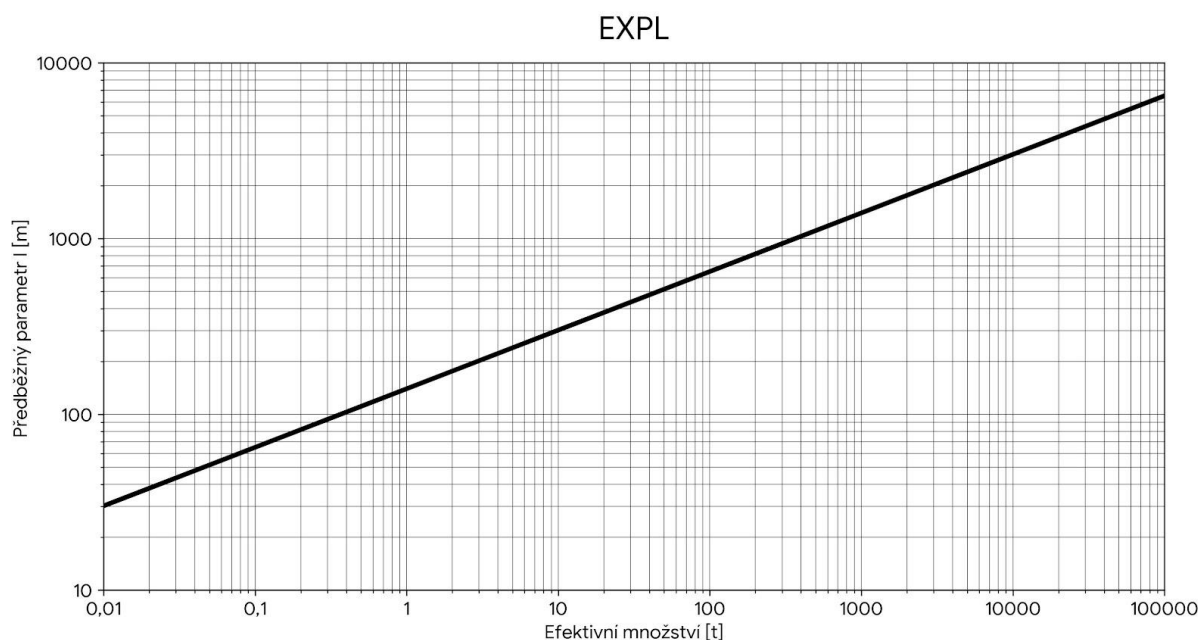
1. Shrnutí problematiky typových scénářů

Pro provedení analýzy a hodnocení rizik závažných havárií existuje ve světě velké množství metodik, což ale na druhé straně přispívá k nejednotnosti postupu analýzy rizik a rozdílným výsledkům při hodnocení následků a pravděpodobnosti scénářů závažných havárií. V České republice je oblíbená holandská metodika tzv. Purple Book (CPR 18E) [1], respektive metodika Bevi (Reference Manual Bevi Risk Assessments) [2]. V navrhovaných typových analýzách bude rovněž využit přístup projektu ARAMIS [3], který se pokusil navrhnout harmonizovaný přístup k analýze a hodnocení rizik pro země Evropské unie.

Výchozím bodem z pohledu legislativy je v České republice vyhláška č. 311/2021, kterou se mění vyhláška č. 226/2015 Sb., o zásadách pro vymezení zóny havarijního plánování a postupu při jejím vymezení a o náležitostech obsahu vnějšího havarijního plánu a jeho struktury [4]. V této vyhlášce jsou uvedeny grafy pro stanovení předběžného parametru I pro následující typové scénáře:

- Toxický únik (TOX)
- Exploze výbušnin a směsí a výbuch mraku par (VCE)
- FireBall z BLEVE a BoilOver (FireBall)
- Požár kapalin (P-Fire)
- Podporování požáru (OXI)
- Množství uniklého plynu z nadzemního potrubí

V následujícím grafu na obrázku č. 1 je na ukázkou představeno stanovení vzdálenosti pro havarijní plánování pro typový scénář VCE.

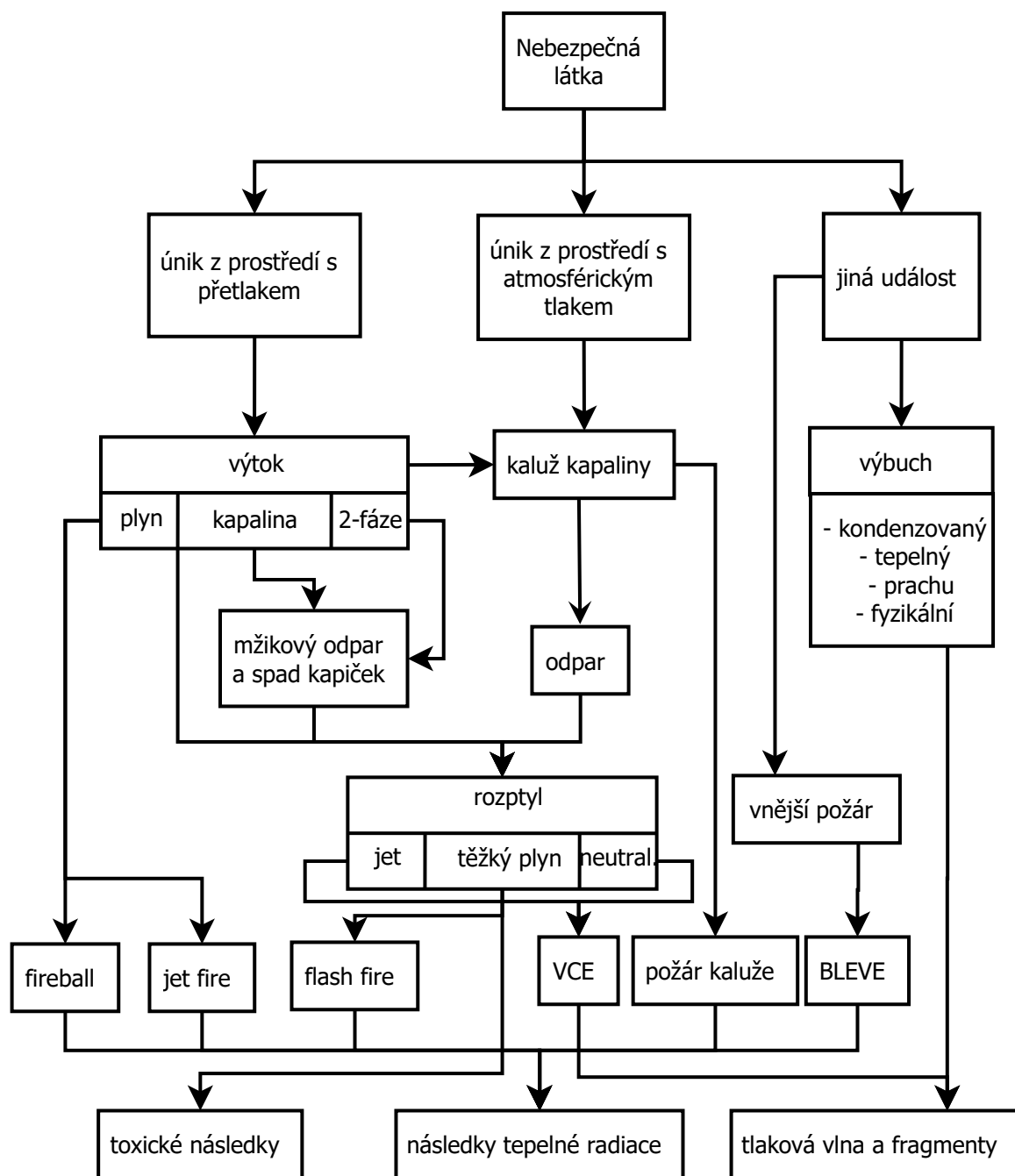


Obrázek č. 1: Stanovení předběžného parametru I pro typové scénáře exploze výbušnin a směsí a výbuch mraku par (VCE) [4]

Tento zjednodušený výpočet stanovení nebezpečných zón v okolí průmyslových podniků zařazených do skupiny B podle zákona č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií [5] přispívá ke stanovení zóny havarijního plánování. V předkládané výzkumné zprávě bude na tento přístup navázáno a navrženo detailnější hodnocení rizik vybraných typových scénářů závažných havárií.

1.1. Charakteristiky jednotlivých projevů havárií

V případech havárií v průmyslových podnicích způsobených nebezpečnými látkami může nastat celá řada scénářů havárií. Základní formy projevů havárií v obecné rovině shrnuje následující schéma (obrázek č. 2) podle metodického pokynu Ministerstva životního prostředí [6].



Obrázek č. 2: Schéma fyzikálních projevů úniku a možných rozvojų havárií [6]

Existují tři hlavní kategorie následků havárií: účinky toxických plynů, účinky tepelné radiace a účinky nárazové přetlakové vlny s případnými letícími troskami. Tyto následky závažných havárií mohou mít dopad na lidské životy, škody na majetku a dopady na životní prostředí. Z pohledu nebezpečí jsou brány v úvahu následující typy požárů a výbuchů (v závorkách jsou uvedeny české ekvivalenty pojmů, ale vzhledem ke skutečnosti, že tyto české pojmy nejsou oficiálně zavedeny, budou v dalším textu většinou používány uznávané anglické pojmy):

- Pool fire (požár kaluže),
- Jet fire (tryskový plamen),
- Flash fire (mžikový požár),
- VCE - Vapor Cloud Explosion (výbuch mraku plynů nebo par),
- BLEVE - Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (výbuch expandujících par přehřáté kapaliny).

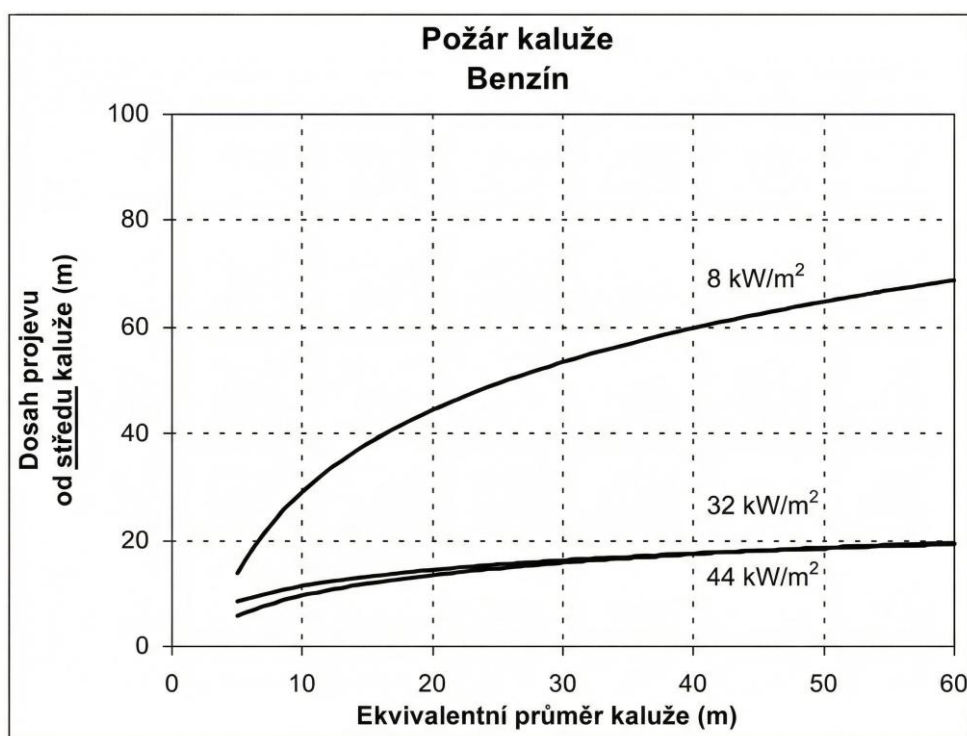
- **Hořlavost a výbušnost**

Následující popis typů požárů a výbuchů pomáhá k pochopení scénáře rozvoje havarijní situace.

Pool fire

Pool fire se vyskytne v případě rozlití kapaliny, která vytvoří kaluž a ta je zapálena. Projevy tepelné radiace závisí na několika faktorech, jako jsou intenzita tepelného toku a trvání expozice, typ exponované konstrukce, povaha použitých materiálů, případné bezpečnostní systémy. Nicméně v literatuře jsou udávány hodnoty intenzity tepelného toku od 8 do 50 kW/m², který je schopen způsobit vážná poškození zařízení [7]. Podle metodologie ARAMIS je doporučená hodnota tepelného toku s možností výskytu domino efektů více než 5 kW/m² [3].

Příkladem výpočtu intenzity tepelného toku požáru benzínu v závislosti na vzdálenosti od zdroje požáru je následující schéma.



Obrázek č. 3: Příklad dosahu projevu Pool fire benzínu [7]

Jet fire

Jet fire se vyskytuje především v případě netěsnosti na potrubí nebo nádobě, pokud dojde k okamžitému zapálení výtoku stlačeného hořlavého plynu, kapaliny nebo dvoufázového výtoku plyn/kapalina. Zvláštní riziko se vyskytne, pokud Jet fire zasáhne zranitelnou překážku, např. zásobník nebo potrubní trasu. Tepelná radiace z tryskavého plamene může být intenzivní, ale tyto požáry ve srovnání s požárem kaluže rozlité kapaliny mají velmi omezený rozsah [6].

Jet fire je charakteristický vysokou energií plamene (značně vyšší než radiace při požáru kaluže) a patrnou kinetickou energií (viz ilustrativní obrázek č. 4). Směr tryskání, délka plamene a radiační energie jsou nejdůležitější charakteristiky při hodnocení takového zdroje rizika [7]. Délka plamene u Jet fire obvykle nepřesáhne 50 m [9]. Povrchová intenzita tepelného toku může dosáhnout až 250 kW/m^2 [9]. Nicméně se zdá, že intenzita tepelného toku se snižuje poměrně rychle s rostoucí vzdáleností od plamene, hodnota intenzity tepelného toku 15 kW/m^2 je dosažena přibližně 50 m od plamene [9]. Proto je pro maximální délku plamene 50 m hrubý odhad dosahu projevu asi 100 m.

Pro potřeby modelování Jet fire je doporučena stejná hodnota tepelného toku 5 kW/m^2 [3], která může způsobit přenesení požáru na sousední zařízení.



Obrázek č. 4: Ilustrační foto požáru typu Jet fire

Flash fire

Flash fire se vyskytuje tam, kde je oblak hořlavých par zapálen se zpožděním po počátku úniku (zpožděná iniciace). Požár se rychle šíří na oblak mezi koncentracemi dolní a horní meze výbušnosti. Pokud nejsou přítomny žádné překážky, pak je rychlost šíření plamene relativně nízká (nedojde k detonaci), přetlak způsobený rozpínáním plynu způsobeným mžikovým požárem je omezený a hlavním zdrojem nebezpečí je tepelná radiace. Jestliže se rychlost šíření plamene zrychluje, může se požár vyvinout ve výbuch oblaku par [10].

Pro potřeby modelování požáru typu Flash fire je doporučena hodnota koncentrace 60 % dolní meze výbušnosti (LEL), kdy ve speciálních případech polozavřených prostor může dojít k zapálení mraku par a tím k ohrožení osob nacházejících se uvnitř mraku.

T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH) je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život.

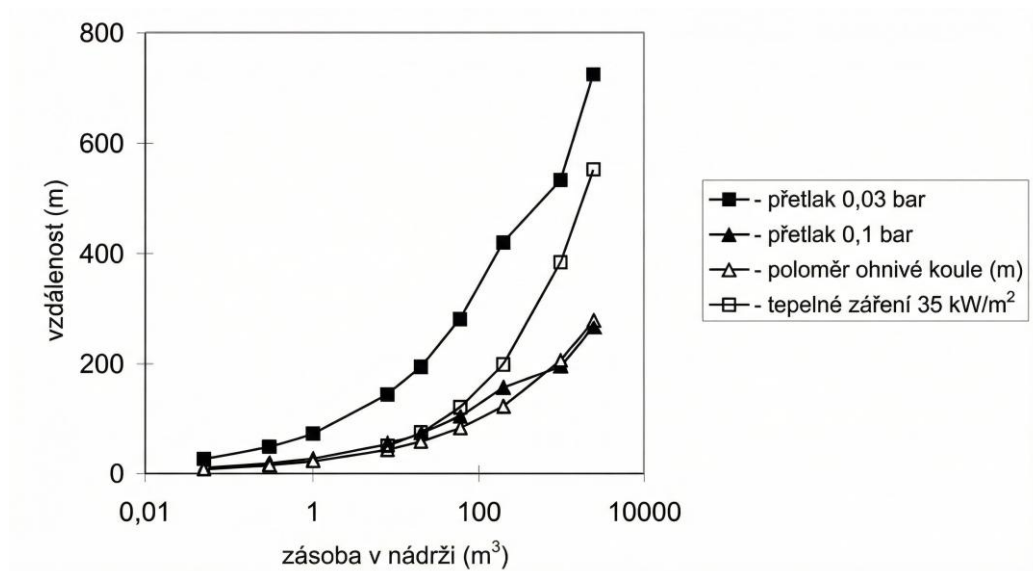
www.tacr.cz

www.mzp.cz

BLEVE

Výbuch expandujících par přehřáté kapaliny (BLEVE - Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) se objeví po náhlém úniku velkého množství stlačené přehřáté kapaliny do atmosféry. K BLEVE dochází v případě, kdy se nádoba s kapalinou, která je vysoce přehřátá nad svůj atmosférický bod varu, katastroficky rozpadne. BLEVE vzniká u skladů tlakem zkapalněných plynů nebo kapalin pod tlakem. Primární příčinou je obvykle vnější oheň, dosahující pláště nádoby s kapalinou, a oslabení nádoby vedoucí k náhlému prasknutí pláště nádoby, nejčastěji v místech nad hladinou kapaliny, a okamžitému uvolnění obsahu. Výsledkem je ohnivá koule (fireball) pocházející ve skutečnosti z atmosférického hoření oblaku tvořeného směsí par a vzduchu. Ohnivá koule se vyskytne tehdy, jestliže při úplném roztržení tlakových nádob, které obsahují hořlavé plyny zkapalněné tlakem, dojde k okamžitému zapálení, například v případě selhání zásobníku propan - butanu. Bouřlivé mísení rozpínající se kapaliny a par se vzduchem způsobuje prudké hoření a ohnivá koule stoupá vzhůru ovzduším [6].

Hlavním projevem jevu BLEVE je tepelná radiace emitovaná ohnivou koulí, tlakové účinky je možné zanedbat. Kromě toho se při jevu BLEVE obecně vytvářejí letící trosky [8]. Na následujícím schématu je uveden příklad výsledků výpočtů nebezpečných vzdáleností jako následků výbuchů typu BLEVE v závislosti na obsahu zásobníku.



Obrázek č. 5: Příklad stanovení projevu výbuchu typu BLEVE [1]

VCE

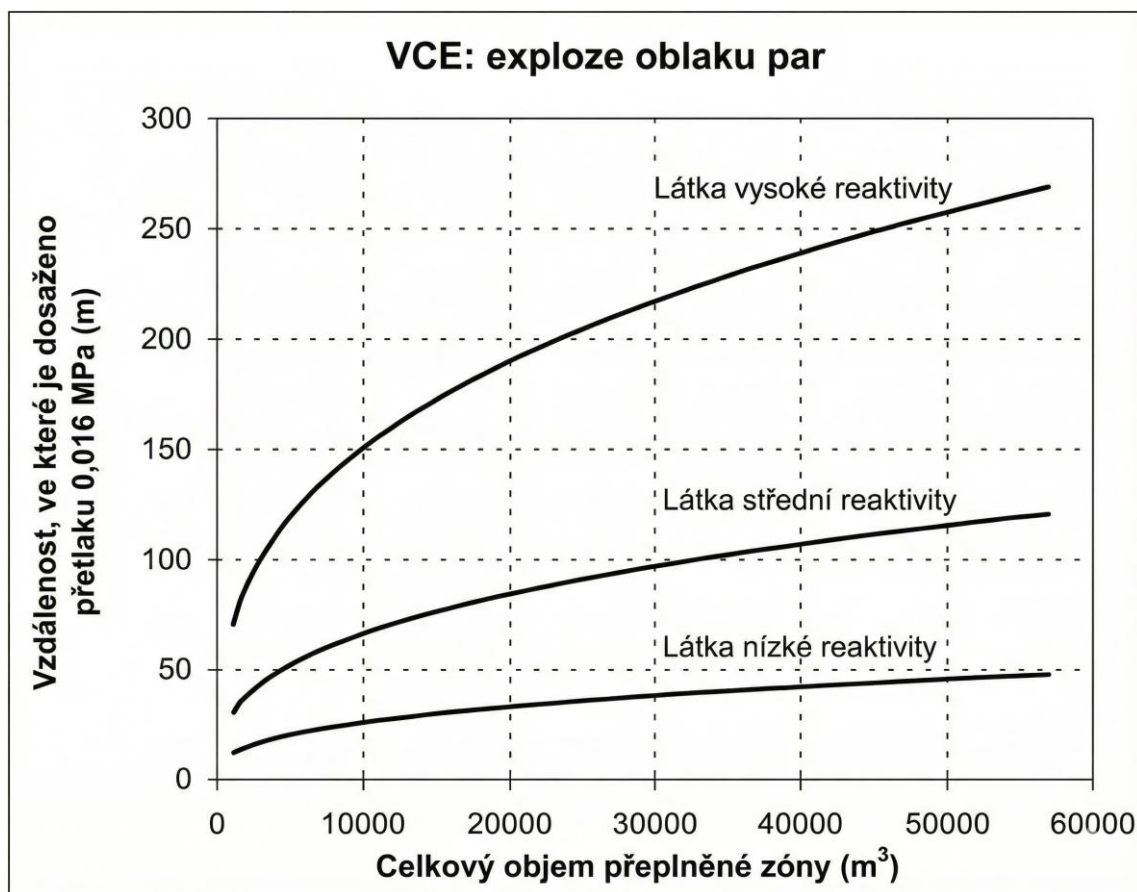
Výbuch mraku plynů nebo par (VCE - Vapour Cloud Explosion) je výbuchová přeměna hořlavých plynů nebo par ve směsi s oxidačním prostředkem, která je doprovázena tlakovou vlnou. VCE je obvykle výsledkem zpožděné iniciace uniklé hořlavé látky.

Mohou nastat dvě situace [9]. Pokud nedojde ke vzniku přetlaku, vznikne flash fire (mžikový požár), při kterém nedochází ke vzniku tlakové vlny. Pokud přetlak nastane, pak se jedná o VCE. Při tomto typu výbuchů již vzniká tlaková vlna, obvykle nastává detonace.

Hlavním účinkem exploze mraku par je náhlé a neočekávané zvýšení tlaku. Hodnota přetlaku 0,016 MPa je považována za prahovou. Tato hodnota odpovídá spodní hranici pro vážná poškození konstrukcí [8].

Pro potřeby modelování VCE je doporučena, v souladu s metodologií ARAMIS, hodnota přetlaku 140 mbar, která může způsobit výskyt domino efektů.

Příklad nebezpečných vzdáleností jako následků výbuchů typu VCE pro různé kategorie látek je uveden na následujícím schématu.



Obrázek č. 6: Příklad dosahu projevu výbuchu typu VCE [8]

Letící trosky (fragmenty)

Následující tabulka č. 1 uvádí vzdálenosti, do kterých odletělo 80 % a 100 % letících trosek během známých havárií. Hodnoty odpovídající 100 % jsou uvedeny pro informaci. Tabulka se čte následovně: u známých nehod s letícími troskami vzniklých z reaktorů dopadlo 80 % letících trosek ve vzdálenosti menší nebo rovné 350 m. Pro látky, které nejsou uvedeny v níže uvedené tabulce, se berou dosahy projevů látky s fyzikálněchemickými vlastnostmi podobnými studované látce [8].

Tabulka č. 1: Vzdálenosti doletu letících trosek z havárií v minulosti [8]

Typ zařízení	80%	100%
Tlakové nádoby		
Horizontální válce		
LPG	200 m	1200 m
Etylenoxid	430 m	1500 m
Vinylchlorid monomer	170 m	1000 m
Amoniak	100 m	200 m
Kulové zásobníky		
LPG	250 m	1000 m
Etylenoxid	500 m	
Vinylchlorid monomer	250 m	
Amoniak	125 m	
Atmosférické tanky	100 m	300 m
Výrobní zařízení		
reaktory	350 m	600 m
kolony	850 m	1100 m
vařáky	130 m	250 m

Speciálním případem letících trosek je výbuch tlakových láhví, kdy například u láhví s propan -butanem jsou známy případy doletu úlomků tlakových láhví do vzdálenosti 150 - 200 m.

- **Toxické účinky**

Při scénáři šíření toxického mraku v ovzduší je z hlediska bezpečnosti hlavním parametrem vzdálenost, do které může dosáhnout mrak se smrtelnou nebo zraňující koncentrací. Celá řada dalších parametrů ovlivňuje tento rozptyl toxických látek – neutrální nebo těžký plyn, stabilita ovzduší, rychlost větru, teplota, vlhkost, apod.

Zasažená zóna při scénáři toxického úniku je závislá na vzdálenosti dosahu toxického mraku podle zvolené koncentrace. Nejčastěji se volí koncentrace pro 50% úmrtnost, ale může být zvolena i koncentrace pro úmrtnost 1% nebo 100%. Proto při modelování potenciálních dosahů toxických účinků vybranými software dochází k velké nejednotnosti výsledků. Pro potřeby stanovení vhodné koncentrace je využíván poměrně složitý postup pomocí probitové funkce [1]:

$$Pr = a + b \times \ln (C^n \times t)$$

kde :

Pr - hodnota probitu

C - koncentrace (kg/m³)

t - čas expozice (s)

Probit umožňuje stanovit koncentraci, která při zadané době vyvolá očekávané následky. Software (např. ALOHA) pak umožní stanovit velikost a tvar zasažené oblasti. Pro stanovení smrtelné koncentrace (pomocí probitu) lze nalézt hranice plochy s odpovídající pravděpodobností fatálního poranění.

- **Dopady na životní prostředí**

Vybrané nebezpečné látky mohou v případě úniku ze zařízení, skladů nebo z přepravních jednotek ohrozit kromě osob a majetku také jednotlivé složky životního prostředí. Takovéto havarijní úniky nejčastěji způsobí znečištění povrchových vod, půdy, podzemní vody, ovzduší a mohou ohrozit rostliny a živočichy.

Havárie s dopadem na životní prostředí lze rozlišovat podle ohrožené složky životního prostředí. Nejčastěji je to povrchová voda, dále půda a podzemní voda. Ovzduším se nebezpečné látky mohou šířit k biotickým složkám ŽP – fauně a floře. Z hlediska skupenství látek představují kapaliny největší nebezpečí, dále pak plynné látky a méně už pevné látky. Obecně lze charakterizovat následující základní scénáře znečištění životního prostředí v důsledku závažných havárií s účastí nebezpečných látek [11]:

- a) nebezpečná kapalná látka unikne ze zařízení na zpevněnou plochu, pronikne do kanalizace a v případě že není odstraněna v ČOV pronikne do řeky,
- b) nebezpečná kapalná látka vyteče na zpevněnou plochu a přímo znečistí řeku,
- c) nebezpečná kapalná látka unikne ze zařízení na nezpevněnou plochu, pronikne do podzemní vody a je šířena ve směru proudění podzemní vody,

- d) nebezpečná kapalná odpařující se látka vyteče do havarijní jímky nebo na zpevněnou plochu, odpařováním dojde k vytvoření mraku par, který je šířen ve směru větru do okolí, kde mohou být ohroženy biotické složky ŽP (fauna a flora),
- e) podobně nebezpečná plynná látka po úniku ze zařízení se rozptyluje ve směru větru; navíc mohou být plyny nebo páry spláchnuty deštěm do půdy,
- f) v případě požáru hořlavých látek (plynných, kapalných nebo pevných) se mohou toxické spaliny šířit do okolí a ohrožovat biotu,
- g) v případě požáru navíc může dojít ke znečištění ŽP v důsledku smíchání s hasící vodou a jejího úniku mimo havarijní jímku.

Jednotlivé složky životní prostředí mohou být ohroženy z těchto důvodů:

- povrchové vody – pokud zařízení leží v blízkosti řeky anebo do řeky ústí výtok z čističky odpadních vod nebo dešťová kanalizace,
- půdy – jsou ohroženy na nezpevněných plochách a travnících,
- podzemní vody – pokud v podloží zařízení existuje kolektor podzemních vod a půdy jsou propustné,
- fauna a flora – pokud se v blízkosti zařízení nachází chráněné území s výskytem vzácných živočichů a rostlin, je dopad havárie významnější.

1.2. Případy havárií z minulosti

V následujícím textu jsou představeny vybrané havárie v ČR a ve světě, které demonstují typické scénáře závažných havárií.

1. Exploze vodíkové čerpací stanice (Sandvika, Norsko, 2019)

Typ události: Výbuch vodíku (VCE)

Dne 10. června 2019 došlo na čerpací stanici UNO-X v Sandvika k náhlé explozi vodíku. Příčinou bylo selhání vysokotlaké nádoby (cca 900 bar) v rámci zásobníkového systému. Z nádoby uniklo velké množství vodíku, došlo k vytvoření oblaku vodíku, jeho následnému zpožděnému zapálení a VCE. Exploze poškodila okolní budovy, spustila airbagy projíždějících aut a vedla k celosvětovému uzavření dalších stanic Uno-X.



<https://insideevs.com/news/354223/hydrogen-fueling-station-explodes/>

2. Výbuch vodíku jako vedlejšího produktu při výrobě anilinu (Teksid/ENI, Itálie)

Typ události: Průmyslový výbuch vodíku (BLEVE/VCE podle konfigurace)

Při výrobě anilinu vzniká vodík jako vedlejší produkt, který se shromažďuje v zásobnících či procesních nádobách. V několika známých případech v Itálii došlo k akumulaci vodíku v reakčním systému, kde vznikla neřízená směs vodík-vzduch. Po dosažení výbušné koncentrace byla směs iniciována (pravděpodobně jiskrou z elektroinstalace). Výsledkem byla prudká exploze, destrukce části výrobní linky a následné požáry.



<https://douglassalumni.blogspot.com/2007/10/part-three-tennessee-eastman-explosion.html>

T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: **Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

3. Exploze kontejneru s vodíkem (Gangneung, Jižní Korea, 2019)

Typ události: Výbuch skladovaného vodíku – roztržení zásobníku a VCE

V testovacím centru firmy Gangneung došlo ke katastrofickému selhání tlakové nádrže s vodíkem během výzkumných zkoušek. Došlo k ruptuře vysokotlakého zásobníku, následnému úniku velkého množství vodíku, okamžitému vytvoření výbušného oblaku a explozi. Událost byla natolik silná, že poškodila více než tucet budov a způsobila smrt dvou pracovníků.



<https://en.yna.co.kr/view/AEN20190523007851320>

4. Požár vodíkového elektrolyzátoru (USA, 2022)

Typ události: Hořlavost – požár v elektrolyzátoru (Jet Fire)

Během provozu elektrolyzátoru došlo k úniku vodíku z vysokotlaké části. Unikající plyn se okamžitě zapálil a vytvořil jet fire, který způsobil vážné poškození technologie ukazující zranitelnost vůči vysokotlakým přírubám, rychlé erozivní destrukci plamenem, popř. selhání odlehčovacích ventilů.



<https://wha-international.com/case-study-power-plant-hydrogen-explosion/>

T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH) je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

5. Havárie LPG zásobníky (Japonsko Chiba 11. března 2011)

Typ události: Výbuch (BLEVE)

Po zemětřeseních v Tohoku v roce 2011 utrpělo několik chemických a ropných komplexů na pobřeží Tichého oceánu v severovýchodním Japonsku obrovské ztráty. V Chibě ztratila rafinerie provozovaná společností Cosmo Oil 17 zásobníků LPG, které byly těžce poškozeny nebo zcela zničeny požáry a výbuchy v rafinerii. Tyto velké zásobníky měly velikost od 1000 do 5000 m³. Odhadovaný objem LPG v době nehody byl mezi 400 a 5000 m³ pro každou nádrž. Došlo k pěti výbuchům LPG typu BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), které vyvolaly obrovské ohnivé koule o průměru asi 500 m. [12]



(Zdroj: <https://www.ibtimes.com/latest-pictures-fire-chiba-prefecture-following-japan-earthquake-photos-551388>)

6. Železniční nehoda v LPG ve Viareggio (Itálie, 29. 6. 2009)

Typ události: Výbuchy (VCE)

Dne 29. června 2009 krátce před půlnocí došlo v italském městě Viareggio k mimořádně závažné železniční nehodě, která je považována za nejhorší havárii spojenou s přepravou nebezpečných látek v historii Itálie. Nákladní vlak číslo 50325, přepravující zkapalněný ropný plyn (LPG) z rafinerie Trecate u Milána do skladovacího terminálu v Gricignanu u Neapole, projížděl železniční stanicí Viareggio rychlostí přibližně 90 km/h, tedy pod povoleným limitem 100 km/h.

Vlak byl tvořen čtrnácti cisternovými vozy, z nichž každý byl naplněn přibližně 45 tunami LPG. Během průjezdu stanicí došlo k vykolejení první cisterny, což následně vedlo k vykolejení a převrácení celkem

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

pěti vozů. Bezprostřední příčinou nehody byla s vysokou pravděpodobností mechanická porucha nápravy prvního cisternového vozu, konkrétně únavový lom osy mezi kolem a nápravou. Analýza lomové plochy ukázala charakteristické znaky dlouhodobého únavového namáhání, což vyvolalo zásadní otázky ohledně účinnosti inspekčních a údržbových postupů používaných při kontrole těchto kritických komponent.

Po vykolejení první cisterna narazila do pevného objektu v blízkosti trati, pravděpodobně do kovového sloupku signalizačního zařízení nebo do části výhybky. Následkem tohoto nárazu došlo k protržení pláště cisterny – vznikl otvor o délce přibližně 40 cm a šířce 2–5 cm, kterým unikl veškerý obsah cisterny, tedy asi 45 tun LPG. Ostatní cisterny zůstaly těsné a k úniku z nich nedošlo

Uniklý LPG se nejprve rozlil v kapalně fázi do šterkového lože trati, kde se začal intenzivně odpařovat. Vzhledem k velmi klidným meteorologickým podmínkám (teplota cca 22 °C, vysoká vlhkost, téměř bezvětří a stabilní atmosféra třídy F) se vytvořil hustý přízemní oblak plynu, který se začal šířit radiálně do okolí stanice. Tento oblak pronikl přes nedostatečně těsný plot do obytné zástavby v ulici Via Ponchielli, která se nachází paralelně s železniční tratí. Otevřená okna domů, typická pro teplou letní noc, umožnila plynu vniknout do přízemních bytů a sklepních prostor, kde se hromadil v koncentracích v mezích výbušnosti.

K zapálení plynového oblaku došlo s časovým odstupem několika minut (svědci uváděli 2 až 5 minut po úniku). Přesný iniciační zdroj zapálení nebyl jednoznačně určen, s vysokou pravděpodobností se však nacházel v obytné zástavbě. Po iniciaci se plamen šířil oblaky plynu ve formě bleskového požáru (flash fire), který přerostl ve výbuchy typu VCE (Vapour Cloud Explosion). Tyto exploze způsobily masivní tlakové účinky, zřícení budov a rozsáhlé požáry. Ke scénáři BLEVE (výbuch tlakové nádoby při požáru) naštěstí nedošlo, a to díky tomu, že ostatní cisterny nebyly zasaženy plynovým oblakem a byly intenzivně chlazeny hasiči.

Následky nehody byly katastrofální. Výbuchy a následné požáry zničily nebo vážně poškodily desítky obytných domů v okruhu až 200 metrů od místa úniku. Pět domů se zcela zřítlo, mnoho dalších bylo zasaženo požárem. Plameny dosahovaly výšky až 20–25 metrů. Celkem zahynulo 32 osob, z nichž většina byli obyvatelé okolních domů; více než 30 dalších osob utrpělo těžká zranění. Přibližně 1 100 obyvatel muselo být evakuováno. Hmotné škody byly odhadnuty na několik desítek milionů eur.

Záchranné práce probíhaly v mimořádně obtížných podmínkách. Na místě zasahovalo přibližně 300 hasičů z celého regionu i okolních oblastí. Bylo zřízeno společné krizové centrum a zdravotnické zázemí. Hasiči prováděli záchranu osob z hořících budov, hašení rozsáhlých požárů a současně intenzivně chladili nepoškozené cisterny, aby zabránili dalším explozím. Následně probíhaly několikadenní operace přečerpávání LPG z vykolejených cisteren do silničních cisteren, které trvaly nepřetržitě od 30. června do 2. července 2009.

Vyšetřování nehody poukázalo nejen na technickou příčinu v podobě únavového lomu nápravy, ale také na systémové nedostatky v oblasti řízení bezpečnosti, údržby a hodnocení rizik při železniční přepravě nebezpečných látek. Závěry zdůraznily potřebu přísnějších inspekčních režimů, lepší harmonizace údržby napříč Evropou a důkladnějšího posuzování rizik při průjezdu vlaků s

nebezpečnými látkami hustě obydlenými oblastmi. Nehoda ve Viareggiu se tak stala zásadním impulzem pro revizi bezpečnostních přístupů v oblasti železniční přepravy LPG a dalších nebezpečných látek. [13]



(Zdroj: https://www.reddit.com/r/CatastrophicFailure/comments/tzbnv/viareggio_railway_disaster_on_29062009_a_tanker/#lightbox)

7. Čpavková havárie v Bělehradě, květen, 1998.

Typ událost: toxický účinek amoniaku vzniklý následkem výbuchu cisterny

O půl druhé odpoledne na předměstí Borča, kdy cisterna s cca 5 tunami amoniaku explodovala a uvolnila toxický plyn do okolí, jeden muž u cisterny byl při výbuchu usmrcen. Oblak čpavku způsobil otravu mnoha lidí, záchranáři převezli do Národního toxikologického centra v průběhu prvních hodin 98 pacientů, celkem bylo ošetřeno 143 osob, z nich 54 hospitalizováno. V závažných případech se vyvinula respirační insuficience, edém plic, pneumonie či ARDS, jeden pacient bohužel zemřel šestý den. Dlouhodobě postiženi byli dva jedinci (plicní fibróza, chronická bronchitida a katarakta). Incident dobře ilustruje nutnost závodních i krizových toxikologických center pro efektivní zpracování chemických havárií.

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz

www.mzp.cz



Chemical Accident with Ammonia in Belgrade in 1998

8. Unik amoniaku do životního prostředí

Dne 22. 7. 2000 byl ohlášen úhyn ryb na řece Dyji v okrese Znojmo. Úhyn byl způsobený únikem čpavku z chladicího okruhu do dešťové kanalizace a. s. Sladovna Hodonice. Šetřením v závodě bylo zjištěno, že neodbornou manipulací pracovníka strojovny došlo k nasátí kapalného čpavku do kompresoru, který se zahltil v části sání čpavkových par a následné poruše chlazení. Při odstraňování závady na kompresoru pracovníci odvětrávali čpavkové páry z kompresoru a absorbovali je do vodní lázně v nádrži 1 m³. Množství čpavkových par bylo větší, než mohla nádrž s lázní pojmout, a proto došlo k úniku čpavkových vod na betonovou plochu v bezprostřední vzdálenosti od vpusti dešťové kanalizace, kterou došlo k úniku do řeky Dyje. Při opravě byly hrubě porušeny povinnosti obsluhy, havárie nebyla pracovníky ohlášena a byla zjištěna až úhynem ryb v úseku asi 5 km. Odhad uniklého množství lázně činil asi 100 l, negativní dopady havárie byly omezeny zvýšeným průtokem v řece Dyji pod Znojemskou přehradou, kdy byl zvýšen průtok až na cca 8 m³.s⁻¹. Protože se jednalo o havárii v blízkosti hraničního profilu řeky Dyje s Rakouskem, byla o havárii preventivně informována rakouská strana.

(zdroj: Příklady významných vodohospodářských havárií od r. 1964, ČIŽP, <https://www.cizp.gov.cz/pusobnost/ochrana-vod/prikklady-vyznamnych-vodohospodarskych-havarii-od-r-1964>)

2. Výběr reprezentativních látek a technologií

Pro potřeby typových scénářů byly vybrány následující reprezentativní látky v často využívaných zařízeních.

2.1. Hořlavost - LPG v zásobníku – 96 t

Stručná charakteristika LPG

Zkapalněný ropný plyn (Liquefied Petroleum Gas), mezinárodně označovaný zkratkou LPG, představuje v současném energetickém mixu jednu z nejvýznamnějších alternativ ke klasickým ropným derivátům. Z chemického hlediska se jedná o směs nasycených uhlovodíkových plynů, v níž dominují propan (C_3H_8) a butan (C_4H_{10}), případně jejich izomery. Tato surovina není primárně těžena, nýbrž vzniká jako vedlejší produkt při dvou klíčových procesech: při rafinaci ropy (cca 40 % celosvětové produkce) a při separaci ze surového zemního plynu (cca 60 %).

Unikátní vlastností, která definuje logistickou efektivitu tohoto paliva, je jeho schopnost změny skupenství. Ačkoliv se za standardních atmosférických podmínek vyskytuje ve formě plynu, působením relativně nízkého tlaku v rozmezí 0,8 až 1,6 MPa dochází k jeho zkapalnění. Tímto fázovým přechodem se objem plynu redukuje přibližně 260krát, což umožňuje skladování velkého množství energie v kompaktních tlakových nádobách. Fyzikální vlastnosti směsi jsou silně závislé na poměru propanu a butanu, který podléhá sezónním variacím. V zimním období je ve směsi navyšován podíl propanu, jehož bod varu $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ zaručuje dostatečný odpar a tlak v nádrži i při silných mrazech, zatímco v letním období může převažovat butan s bodem varu $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Z hlediska bezpečnosti a technické manipulace je zásadním parametrem hustota. V kapalném stavu je LPG lehčí než voda (hustota cca 0,5 až 0,6 kg/l), avšak v plynné fázi je výrazně těžší než vzduch (hustota 1,5 až 2,0 kg/m³). To představuje specifické riziko, neboť při úniku se plyn nehromadí pod stropem, ale stéká do nejnižších míst, jako jsou montážní jámy či kanalizace. Jelikož je LPG v přirozeném stavu bezbarvý a bez zápachu, je z bezpečnostních důvodů nutná jeho odorizace. Do směsi se přidávají těkavé látky na bázi síry (např. ethylmerkaptan), které zajišťují detekovatelnost úniku čichem již při koncentraci odpovídající pětině dolní meze výbušnosti.

V energetice a dopravě vyniká LPG vysokou efektivitou spalování. Jeho výhřevnost dosahuje hodnoty cca 46 MJ/kg, což převyšuje energetický obsah benzínu (43 až 44 MJ/kg). Při využití ve spalovacích motorech nabízí vysoké oktanové číslo v rozmezí 100 až 110, což umožňuje optimalizaci předstihu zážehu a efektivnější využití paliva bez rizika detonačního hoření. Environmentální profil paliva je ve srovnání s benzínem a naftou příznivější; spalování probíhá bez vzniku sazí, s nulovým obsahem olova a se sníženými emisemi oxidů dusíku (NO_x). Emise oxidu uhličitého (CO₂) jsou v porovnání s benzínem nižší přibližně o 10–15 %, což z LPG činí relevantní palivo pro přechodné období dekarbonizace dopravy.

LPG je nejčastěji používán ve zkapalněném stavu, kdy u zásobníků může dojít k následujícím typům havárií – požárům Jet fire nebo Flash Fire a výbuchům typu VCE nebo BLEVE. V případech manipulace s tlakovými láhvemi LPG mohou nastat rovněž požáry a výbuchy provázené odletem tlakových láhví jako „raketa“.

Popis technologie

Technologie průmyslového skladování velkého množství LPG využívá nadzemní tlakové nádoby stabilní (TNS), typicky ležaté válcové nebo velkokapacitní kulové zásobníky, v nichž je směs propan-butanu uchovávána v kapalném stavu pod tlakem nasycených par. Tyto nádrže jsou osazeny komplexním systémem bezpečnostních armatur, včetně zdvojených pojišťovacích ventilů a přesného měření hladiny, a jsou chráněny proti tepelnému namáhání (riziko BLEVE) reflexními nátěry a automatickým chladicím skrápěcím systémem aktivovaným při požáru. Pro zajištění stabilní dodávky plynu do technologie se LPG neodebírá v plynné fázi přímo z nádrže, nýbrž se čerpá v kapalném skupenství do výparníkové stanice, kde dochází k nucenému odparu (ohřevu) a následně regulaci tlaku před vstupem do spotřebičů, přičemž celý proces plnění a odběru je monitorován systémem detekce úniku a jistě dálkově ovládanými nouzovými uzávěry (ESD).

2.2. Výbušnost - čerpací stanice vodíku

Stručná charakteristika vodíku

Vodík je extrémně hořlavý a výbušný plyn, bezbarvý, bez chuti a zápachu. Má nejnižší zápalnou energii ze všech plynných paliv (méně než 0,02 MJ), velmi široké meze výbušnosti (4-75 obj.% ve vzduchu) a vysokou rychlost šíření plamene. Jeho molekula má nízkou molární hmotnost, a proto se vodík velmi rychle šíří a proniká netěsnostmi, včetně mikrotrhlin v potrubí a armaturách.

Při úniku dochází k rychlému vytváření hořlavých a výbušných oblaků, které mohou být iniciovány i velmi malým podnětem. V uzavřených nebo částečně uzavřených prostorech může dojít k akceleraci plamene až do podoby VCE.

Popis technologie

Vodík je skladován stlačený v rozmezí 200 – 900 bar nebo i zkapalněný (-253C). Oba způsoby představují významná rizika, jako vysoké mechanické namáhání nádob, možnost katastrofické ruptury zásobníku, tvorba jet fire při okamžitém zapálení úniku, při větším úniku vzniku flash fire nebo VCE.

Mezi typické projevy havárií vodíkových technologií v souladu se schématem fyzikálních projevů havárií uvedených v kapitole 1.1 jsou u vodíku relevantní zejména:

- Jet fire – okamžité zapálení úniku z vysokotlakého zásobníku, velmi intenzivní tryskový plamen
- Flash fire – mžikové prošlehnutí vodíkového oblaku, typicky bez výrazného přetlaku
- VCE – v uzavřených prostorech nebo v prostorech s překážkami výrazné přetlakové účinky
- Mechanická exploze / ruptura nádoby – při selhání vysokotlakého zásobníku může dojít k destruktivnímu roztržení i bez hoření
- Fireball – při okamžitém souběžném uvolnění velkého množství vodíku.

Vodíkové technologie v dopravě a energetice využívají vysokotlaké zásobníky (typ I-IV), 200 – 900 bar, kompresory, sušičky a filtrační jednotky, převodové potrubní systémy, zásobníkové bloky typu battery rack, mobilní zásobníkové kontejnery.

Potenciální nebezpečné scénáře zahrnují úniky vodíku z potrubí nebo armatur, poruchy ventilu vysokotlaké nádoby, selhání kompresoru (přehřátí, vibrace), mechanické poškození zásobníkového modulu, náraz vozidla do technologie, úmyslné poškození či chyby obsluhy.

2.3. Toxicita - železniční cisterna s amoniakem 50 t

Stručná charakteristika čpavku

Amoniak je bezbarvý plyn s velmi štiplavým zápachem a hustotou $0,77 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, představující nejjednodušší sloučeninu dusíku a vodíku. Má teplotu tání $-77,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotu varu $-33,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Jde o látku zásadité povahy, která je vysoce korozivní, hořlavá (LEL 15 %, UEL 28 %) a při zahřátí či stlačení hrozí riziko výbuchu. Je toxická a nebezpečná, přičemž její ostrý zápach varuje před expozicí – průměrný práh vnímání je 5 ppm, což je výrazně méně než škodlivé koncentrace. Při koncentraci kolem 25 ppm je zápach patrný bez zdravotních účinků, při 50–100 ppm se objevuje mírná bolest očí, nosu a krku, při 140 ppm střední podráždění očí, při 400–500 ppm silné podráždění hrdla (500 ppm je již považováno za IDLH – okamžitě nebezpečné pro život). Koncentrace 700–1000 ppm způsobují akutní poškození dýchacích cest, bronchospasmus a laryngospasmus, zatímco expozice nad 2500 ppm vede během 30 minut k úmrtí v důsledku nekrózy sliznic, plicního edému a akutní plicní poruchy. Smrtící koncentrace LC_{50} pro myši činí přibližně 4230 ppm (přepočteno na 1 hodinu asi 596 ppm). Velmi vysoké koncentrace mohou vést k vážnému poškození plic a smrti. Amonné sloučeniny by neměly přijít do kontaktu se zásadami, pokud to není cílem, protože může dojít k uvolnění nebezpečných dávek amoniaku. V České republice platí limity PEL $14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a NPK-P $36 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, přičemž při emisích do ovzduší nad 10 000 kg ročně je nutné hlášení do Integrovaného registru znečišťování. Průmyslově se amoniak vyrábí slučováním dusíku a vodíku za speciálních podmínek a slouží jako prekurzor pro výrobu dusíkatých sloučenin.

Popis technologie

Cisternová přeprava čpavku využívá tlakové cisterny pro kapalný čpavek, plnicí a vyprazdňovací armatury, uzavírací a pojistné ventily, potrubní propojení, měřicí a kontrolní systémy pro tlak a teplotu, přepravní rám a nárazníkové zóny. Železniční cisterna pro přepravu kapalného čpavku o hmotnosti přibližně 50 tun je tlaková nádoba s objemem okolo 80 m^3 , navržená pro pracovní tlak až 2,2 MPa a provozní teploty od $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Konstrukce je zhotovena z vysoce odolné tlakové oceli, doplněná robustním rámem a podvozkem se čtyřmi nápravami. Součástí technologie jsou plnicí a vyprazdňovací armatury pro kapalnou i plynnou fázi (DN80 a DN50), bezpečnostní ventil nastavený na 2,49 MPa, měřicí systémy tlaku a hladiny, pojistné ventily a nouzové uzavírací prvky. Cisterna je vybavena nárazníkovými zónami, ochranným rámem a izolací proti teplotním extrémům. Bezpečnostní systémy zahrnují ochranu proti přetlaku, hermetizované stáčení výparů a konstrukční prvky dle mezinárodních předpisů RID. Technologie je navržena tak, aby minimalizovala riziko úniku čpavku při přepravě, avšak

potenciální havarijní scénáře zahrnují mechanické poškození cisterny při nehodě, selhání ventilů, netěsnosti potrubí, korozi, požár v okolí nebo chyby obsluhy při manipulaci.

Potenciální nebezpečné scénáře zahrnují únik čpavku z potrubí, armatur nebo těsnění, porucha uzavíracího nebo pojistného ventilu cisterny, mechanické poškození cisterny (při manipulaci nebo dopravní nehodě), selhání měřicích a kontrolních systémů (nesprávné údaje o tlaku/teplotě), náraz vozidla do cisterny nebo havárie při přepravě, úmyslné poškození technologie či chyby obsluhy při plnění/vyprazdňování.

2.4. Nebezpečnost pro ŽP – zásobník čpavkové vody

Stručná charakteristika čpavkové vody

Čpavková voda (čpavek, vodný roztok 25%) je bezbarvá kapalina se štiplavým zápachem, která způsobuje poleptání a je vysoce toxická pro vodní organismy, je žíravá i po značném zředění. Nad vodní hladinou se mohou vytvářet páry, které jsou silně dráždivé. Koncentrace 0,25% je nebezpečná ve vzduchu při vdechování po dobu 30 minut (může dojít k otoku plic). Smrtelná koncentrace LC₅₀ je 5000 ppm. Páry čpavku se vzduchem vytváří směs, která je při 16-27 obj.% výbušná. Látka je dokonale rozpustná ve vodě. Tenze par při 20°C je 64,38kPa, hustota 0,907 kg/m³.

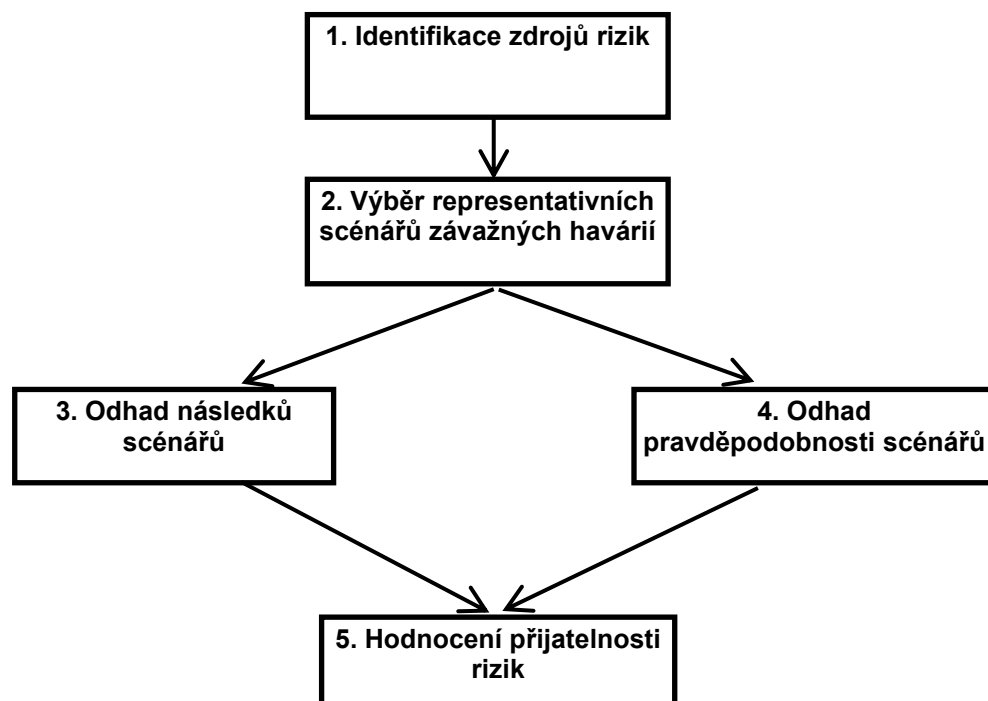
Je žádoucí, aby se látka nerozšířila do okolí, proto je nutné zamezit úniku látky do půdy, podzemních a povrchových vod a do kanalizace. Jako sorbentní materiál se používají látky, které vsakují vodu, tzn. písek, křemelina, inertní savý prostředek.

Popis technologie

Příkladem typového scénáře je únik čpavkové vody ze zásobníku při skladování. Příčinou scénáře je především přeplnění nádrže, méně pravděpodobné je prasknutí dvouplášťového zásobníku. Na zásobníku (80 m³ – cca 72 t čpavkové vody, průměr 4 m, výška 7,7 m) je instalována celá řada bezpečnostních opatření – dvouplášťová nádrž s indikací porušení vakua v meziplášťovém prostoru, zabezpečení plnění nádrže – akustická a světelná signalizace dosažení nejvyšší přípustné hladiny kapaliny v zásobníku + havarijní odstavení plnění zásobní nádrže, bezpečnostní vana 100 m³ (havarijní jímka). Ze všech havarijních jímek budou případné úniky svedeny do podzemní bezodtoké havarijní nádrže (dvouplášťová – 35 m³). Rovněž nad prostorem skladování čpavkové vody je instalováno zkrápění.

3. Návrh metodického postupu tvorby scénáře a jeho hodnocení

Výběr typového scénáře je jedním z kroků hodnocení rizik. Zjednodušený postup hodnocení rizik závažných havárií je založen na následujících krocích (viz obrázek č. 7), u kterých jsou pak dále v textu doporučeny klíčová kritéria a hodnoty.



Obrázek č. 7: Návrh zjednodušeného postupu hodnocení rizik

1. krok – Identifikace zdrojů rizik

Výběr zařízení s nebezpečnými látkami pro hodnocení rizik je stanoven především podle množství nebezpečných látek v zásobnících, cisternách, potrubí, tlakových láhvích atd. Jako prahové množství látek, nad které je vhodné provést analýzu rizik, lze doporučit následující hodnoty (viz tabulka č. 2).

Tabulka č. 2: Definované prahové množství nebezpečných látek [3]

Vlastnosti látek	Definované prahové množství (kg)		
	Pevné látky	Kapaliny	Plyny
1. Vysoce toxické	10 000	1 000	100
2. Toxické	100 000	10 000	1 000
3. Oxidující	10 000	10 000	10 000
4. Výbušné	1 000	1 000	---
5. Hořlavé	---	10 000	---
6. Vysoce hořlavé	---	10 000	---
7. Extrémně hořlavé	---	10 000	1 000
8. Nebezpečné pro životní prostředí	100 000	10 000	1 000

Toto prahové množství je stanoveno v závislosti na nebezpečných vlastnostech látek, jejich fyzikálním stavu a umístění vůči jiným nebezpečným zařízením. Zařízení i s menším množstvím nebezpečných paliv mohou být vybrána k analýze rizik s přihlédnutím k provozním zkušenostem s hodnoceným zařízením.

2. krok – Výběr reprezentativních scénářů závažných havárií

V souladu s metodologií ARAMIS byly z 13 nebezpečných projevů vybrány 4 reprezentativní projevy (Dangerous Phenomena DP):

- DP1 - Požár kaluže (Poolfire),
- DP2 - Požár zásobníku (Tankfire),
- DP3 - Požár typu Jetfire (Jetfire),
- **DP4 - Výbuch mraku par (VCE),**
- DP5 - Požár typu Flashfire (Flashfire),
- **DP6 - Toxický mrak (Toxic cloud),**
- DP7 - Požár (Fire),
- DP8 - Rozlet úlomků (Missiles ejection),
- DP9 - Vývin přetlaku (Overpressure generation),
- **DP10 - Požár typu Fireball (Fireball),**
- **DP11 - Poškození životního prostředí (Environmental Damage),**
- DP12 - Výbuch prachu (Dust explosion),
- DP13 - Překypění a následný požár kaluže (Boilover and resulting poolfire).

Závažná událost (ME) je definována jako závažný účinek na cíl (lidské zdraví, zařízení, životní prostředí,...) vyplývající z nebezpečného projevu. Možné závažné účinky jsou:

- ✓ Tepelné záření (Thermal radiation),
- ✓ Přetlak (Overpressure),
- ✓ Úlomky (Missiles),
- ✓ Toxické účinky (Toxic effects).

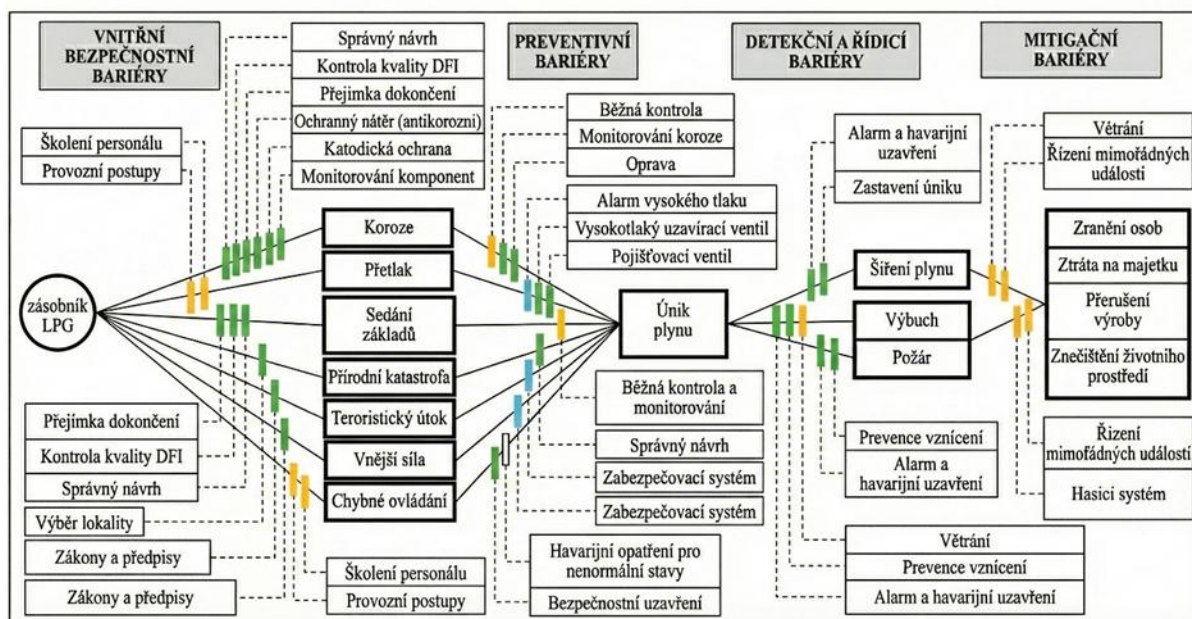
Tyto závažné události ovšem nejsou ve stromech událostí zobrazovány vzhledem k celkovému počtu možných variant.

Konkrétní typové scénáře jsou uvedeny v dalším textu v podobě bow-tie diagramu. Bow-tie diagram je získán spojením kritické události s příslušným stromem poruch vlevo a příslušným stromem událostí vpravo. Tyto bow-tie diagramy je potřeba chápat jako scénáře závažné havárie a zvažovat v nich instalovaná bezpečnostní opatření.

Do takto sestavených typových scénářů může být zapracována frekvence iniciačních událostí, vyhodnocena účinnost bezpečnostních bariér a vypočtena tak frekvence kritické události. Pro provedení těchto dílčích kroků metodika ARAMIS nabízí vybrané údaje v přílohách, především je uvedeno shrnutí frekvencí iniciačních událostí z odborné literatury, seznam možných bezpečnostních bariér, způsob hodnocení účinku jednotlivých bariér.

a) Hořlavost

Příkladem typového scénáře pro hořlavou látku je sestavení obecného bow-tie diagramu pro únik LPG ze zásobníku (viz obrázek č. 8).



Obrázek č. 8: Bow-tie diagram pro únik LPG ze zásobníku [14]

Případová studie LPG zásobník 96 tun

Pro zásobník LPG o kapacitě **96 tun** se již pohybujeme v kategorii **závažné havárie** (podle zákona o prevenci závažných havárií spadají LPG nad 50 tun do skupiny A a nad 200 tun do skupiny B, záleží na celkovém součtu v areálu).

Definice zdroje rizika - vstupní data

- **Látka:** Zkapalněný ropný plyn (LPG). V modelech se pro konzervativní (nejhorší) odhad často používá **čistý Propan** (má vyšší tlak par než Butan, tudíž rychleji uniká a masivněji se odpařuje).
- **Množství:** 96 000 kg.
 - *Poznámka:* Pro modelování se uvažuje maximální provozní náplň (typicky 85 % objemu, ale pro "worst-case" bezpečnostní zprávu se často počítá s celým obsahem).
- **Typ zásobníku:** Nadzemní ležatý válcový zásobník (tzv. "cimbál" nebo "bullet tank").
- **Teplota a tlak:** Teplota okolí (např. 20 °C), tlak nasycených par (po propan cca 8,5 bar).

Klíčové havarijní scénáře

Pro LPG zásobník této velikosti vyžaduje metodika MŽP a standardy Seveso posouzení tří hlavních typů požárů:

A. Scénář BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) – Nejhorší varianta

Toto je katastrofický scénář. Nastává, pokud je zásobník zahříván vnějším požárem, dojde k oslabení pláště a následnému fyzikálnímu výbuchu celého obsahu.

- **Co se děje:** Okamžité uvolnění celých 96 tun, expanze a vznícení. Vzniká obrovská **ohnivá koule (Fireball)**.
- **Klíčové parametry k výpočtu:**
 - **Poloměr ohnivé koule (R):** Jak velká bude koule vizuálně.
 - **Doba trvání (t):** Obvykle v řádu sekund (pro 96 tun to bude cca 15–20 sekund).
 - **Tepelný tok (I):** Sálání tepla v kW/m² v závislosti na vzdálenosti.

B. Scénář Jet Fire (Tryskový plamen)

Nastává při prasknutí potrubí, uražení ventilu nebo díře v plášti, kdy plyn uniká pod tlakem a okamžitě se vznítí.

- **Co se děje:** Vzniká dlouhý, úzký plamen s vysokou intenzitou sálání.
- **Riziko:** "Dominový efekt". Pokud tento plamen působí na sousední zásobník nebo potrubní most, může způsobit další havárii.
- **Vstup pro model:** Průměr otvoru (např. utržení stáčecí hadice DN50 nebo pojistného ventilu).

C. Scénář Flash Fire (Mžikový požár)

Nastává, pokud plyn unikne, ale **nevznítí se hned**. Vytvoří se mrak těžší než vzduch, který se plazí po zemi. Jakmile narazí na iniciaci (jiskra, auto, cigareta), mrak prohoří zpět ke zdroji.

- **Co se děje:** Rychlé prošlehnutí plamene mrakem.
- **Klíčový parametr:** Dolní mez výbušnosti (LEL). Zóna ohrožení je tam, kde je koncentrace plynu nad LEL. Uvnitř mraku je 100% letalita, vně mraku účinek rychle klesá.

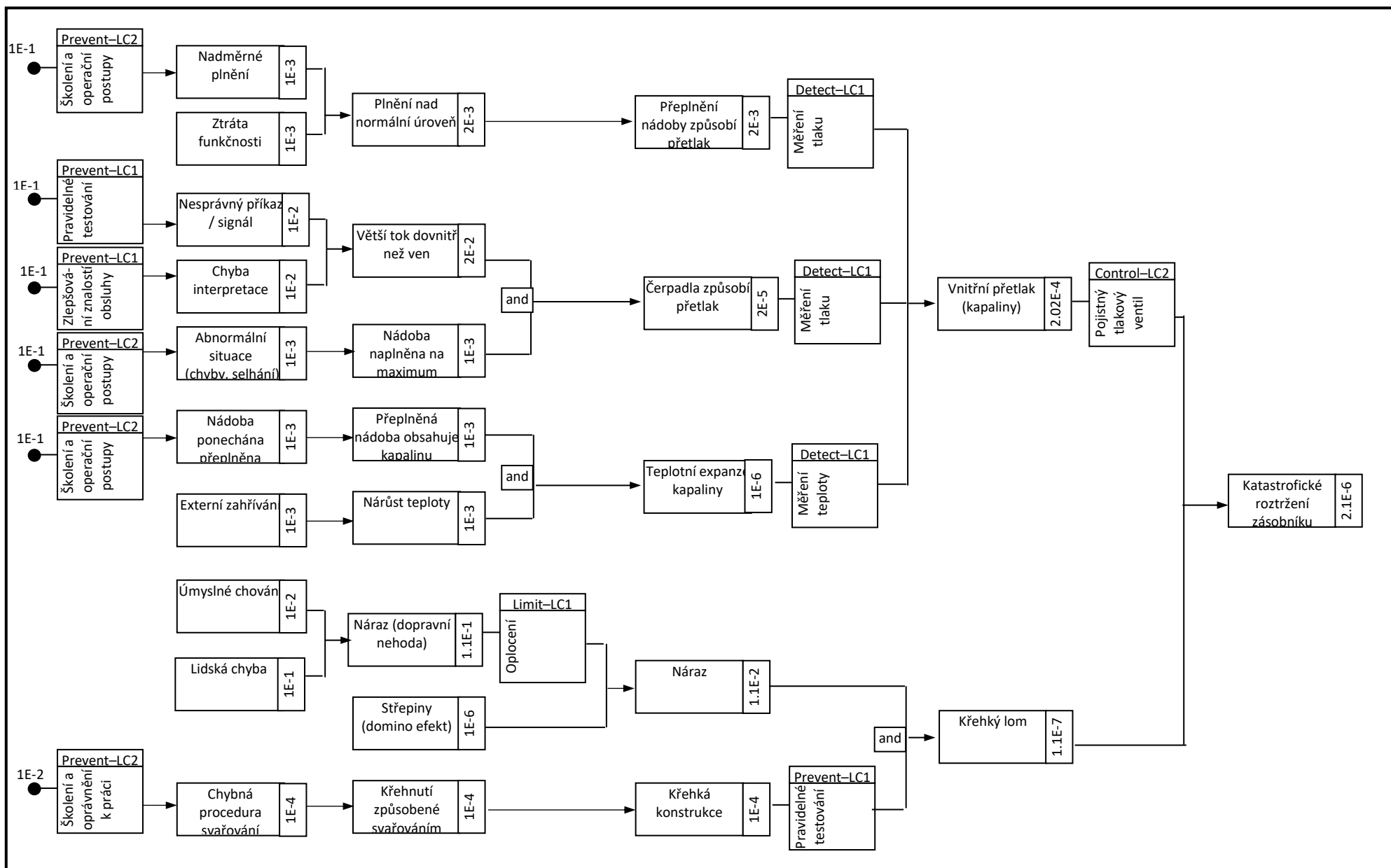
Hodnotící kritéria - Zóny havarijního plánování

Pro vyhodnocení dopadů musíte výsledky z modelovacího softwaru porovnat s těmito limity (dle české praxe a metodiky MŽP):

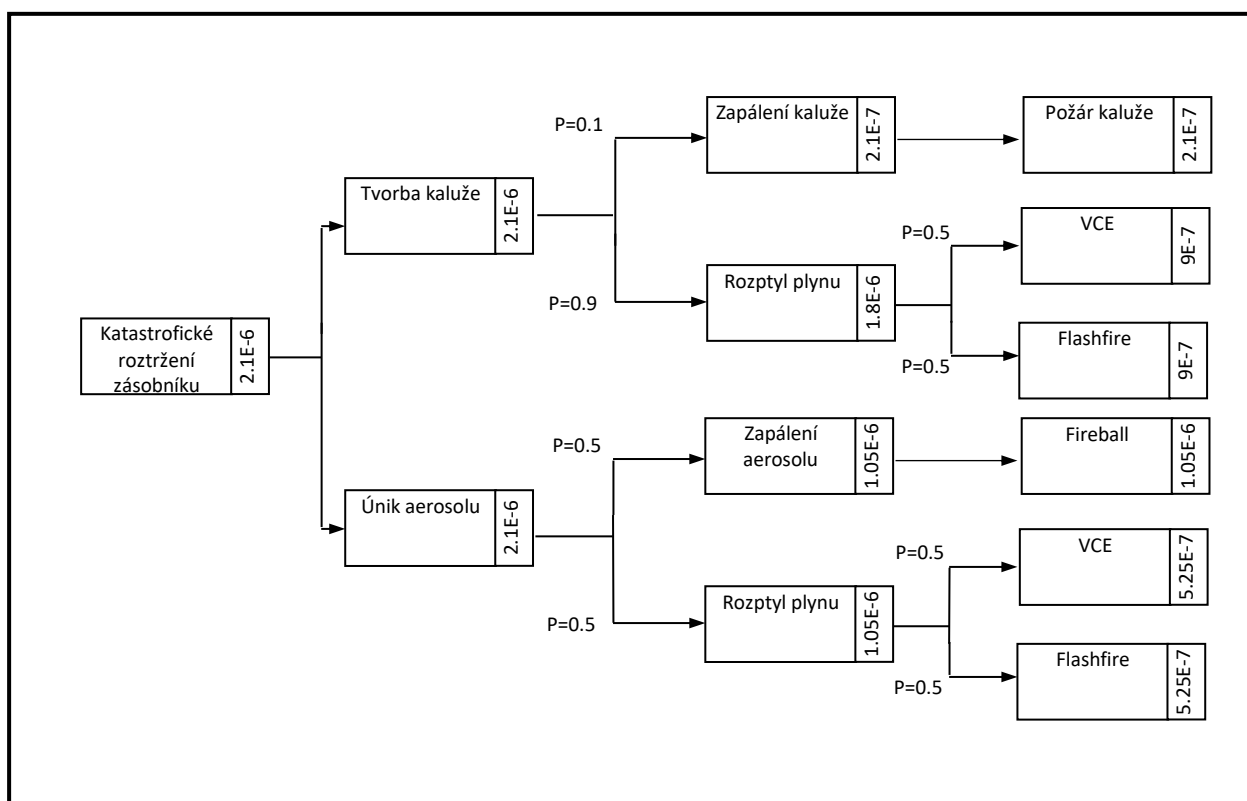
Tabulka č. 3: Hodnotící kritéria

Hodnota tepelného toku	Dopad na člověka/objekty	Interpretace v zónách
3 kW/m ²	Práh bolesti po cca 15–20 sekundách.	Bezpečná vzdálenost pro veřejnost.
5 kW/m ²	Popáleniny 2. stupně do 30 sekund.	Hranice pro evakuaci/ukrytí.
12,5 kW/m ²	Vznícení dřeva, plastů. Vysoká pravděpodobnost úmrtí (1 % až 50 % dle expozice).	Zóna těžkého poškození.
37,5 kW/m ²	Okamžitá smrt, poškození ocelových konstrukcí.	Totální destrukce/smrt.

Výstupem detailní analýzy je strom poruch se stanovenými frekvencemi kritických událostí znázorněný na obrázku č. 9 a strom událostí s frekvencemi nebezpečných projevů na obrázku č. 10.



Obrázek č. 9: Strom poruch s frekvencí kritické události – katastrofické roztržení zásobníku LPG



Obrázek č. 10: Strom událostí s frekvencemi nebezpečných projevů – roztržení zásobníku LPG

Software nástroje pro modelování

Ruční výpočet scénářů podle TNO Yellow Book je složitý. V praxi se používají tyto nástroje:

- **ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres):**
 - *Status:* Freeware (vyvíjí US EPA/NOAA).
 - *Vhodnost:* Skvělá pro rychlé odhady a základní scénáře (Pool Fire, Jet Fire, BLEVE). V ČR široce akceptovaná pro jednodušší analýzy.
- **TEREX:**
 - *Status:* Český software (vyvíjí T-SOFT).
 - *Vhodnost:* Přizpůsobený českým podmínkám a potřebám krizového řízení.
- **Phast / Safeti (DNV) nebo EFFECTS (Gexcon):**
 - *Status:* Drahý komerční standard.
 - *Vhodnost:* Pro složité rafinerie a detailní QRA.

Výpočet podle metodiky **TNO Yellow Book**. Tento postup slouží k získání řádové představy o rozsahu havárie (tzv. "Back-of-the-envelope calculation")

Vstupní data (Scénář BLEVE)

Pro výpočet uvažujeme nejhorší možnou variantu (Worst-Case Scenario) – okamžité uvolnění celého obsahu a jeho vznícení.

- **Látka:** LPG (Propan)
- **Hmotnost (M):** 96 000 kg
- **Spalné teplo (H_c):** 46 000 kJ/kg (typická hodnota pro LPG)
- **Radiační účinnost (F_r):** 0,27 (TNO doporučuje cca 25–30 % energie, která se vyzáří jako teplo)
- **Atmosférická propustnost (τ):** 0,7 (konzervativní odhad pro čistý vzduch; kouř a vlhkost toto číslo snižují)

Krok 1: Geometrie ohnivé koule (Fireball)

Nejprve musíme zjistit, jak bude "koule" velká a jak dlouho bude hořet. Použijeme empirické vzorce z TNO Yellow Book.

1. Poloměr ohnivé koule (R)

Vzorec:

$$R = 3,24 \cdot M^{0,325}$$

$$R = 3,24 \cdot 96000^{0,325}$$

$$R \approx 3,24 \cdot 41,6$$

$$R \approx 135 \text{ metrů}$$

Výsledek: Při výbuchu vznikne ohnivá koule o průměru **270 metrů**.

2. Doba trvání ohnivé koule (t) Pro hmotnost nad 37 tun se používá vzorec:

$$t = 2,6 \cdot M^{1/6}$$

$$t = 2,6 \cdot 96000^{1/6}$$

$$t \approx 2,6 \cdot 6,75$$

$$t \approx 17,5 \text{ sekundy}$$

Krok 2: Výpočet bezpečnostních vzdáleností

Nyní spočítáme, jak daleko od centra výbuchu bude tepelný tok (q) dosahovat kritických hodnot. Pro ruční výpočet použijeme **Model bodového zdroje** (Point Source Model).

Základní rovnice pro vzdálenost (X):

$$X = \sqrt{\frac{E_r \cdot M \cdot H_c \cdot \tau}{4 \cdot \pi \cdot t \cdot Q}}$$

Kde:

- q je cílový tepelný tok (limit, který hledáme - např. 12,5 kW/m²).
- X je vzdálenost od středu ohnivé koule k cíli.

A. Zóna smrti a domino efektu ($q = 12,5 \text{ kW/m}^2$)

Tato hodnota zapaluje dřevo a plasty, taví kabely a způsobuje smrtelné popáleniny. Je to hranice pro řetězení havárie.

$$X_{12,5} = \sqrt{\frac{0,27 \cdot 96\,000 \cdot 46\,000 \cdot 0,7}{4 \cdot 4,14 \cdot 17,5 \cdot 12,5}}$$

$$X_{12,5} \approx 551 \text{ m}$$

Zóna těžkého poškození a vysoké pravděpodobnosti úmrtí sahá do vzdálenosti cca 550 metrů od zásobníku.

B. Zóna nevratných zranění ($q = 5 \text{ kW/m}^2$)

Hranice pro popáleniny 2. stupně (puchýře) u nechráněných osob.

$$X_5 \approx 870 \text{ m}$$

C. Bezpečná vzdálenost ($q = 3 \text{ kW/m}^2$)

Limit pro veřejnost, práh bolesti, bez trvalých následků, pokud se člověk ukryje.

$$X_3 \approx 1125 \text{ m}$$

Shrnutí výsledků

Pro 96tunový zásobník LPG (Propan) vychází hrubý odhad následků havárie BLEVE takto:

Tabulka č. 4: Výpočet následků havárie BLEVE

Parametr	Hodnota	Poznámka
Průměr ohnivé koule	270 m	Vše v tomto průměru je spáleno na popel.
Doba trvání	17,5 s	Doba expozice sálavému teplu.
Zóna I (Smrt/Domino)	do 550 m	Tepelný tok > 12,5 kW/m ² . Zde hrozí zničení sousedních technologií.
Zóna II (Zranění)	do 870 m	Tepelný tok > 5 kW/m ² . Nutná evakuace.
Zóna III (Ohrožení)	do 1,1 km	Tepelný tok > 3 kW/m ² . Bezpečná vzdálenost pro "čumily".

Alternativní postupy výpočtu

Kromě standardní "holandské" metodiky TNO (Yellow Book), kterou byla použita v předchozím kroku, se v bezpečnostním inženýrství často používají tyto dvě metody:

1. Metoda TNT Ekvivalentu (pro tlakovou vlnu)

Zatímco TNO modeluje hlavně tepelný tok (sálání), metoda TNT ekvivalentu převádí vnitřní energii plynu na ekvivalentní hmotnost trhaviny TNT. To je klíčové pro posouzení **tlakové vlny**, která při BLEVE vzniká roztržením pláště zásobníku.

- **Princip:** Energie expandující parní fáze + energie bleskového odparu kapaliny se přepočítá na energii výbuchu TNT (4,184 MJ/kg).
- **Vzorec (zjednodušený):**

$$W_{TNT} = \eta \cdot \frac{M \cdot E_{ex}}{Q_{TNT}}$$

Kde η je účinnost (pro BLEVE cca 40–80 %),

M je hmotnost,

E_{ex} je expanzní energie.

Odhad pro 96t LPG: Tlaková vlna by byla devastující v okruhu cca 200–300 metrů (boření budov), rozbití oken až do 1–2 km.

2. Metodika CCPS (Center for Chemical Process Safety)

Americký přístup (organizace AIChE), který je často konzervativnější než TNO.

- **Rozdíl:** Používá mírně odlišné korelační koeficienty pro výpočet průměru ohnivé koule a jinak počítá s atmosférickou propustností (vlhkostí vzduchu).
- **Využití:** Často vyžadováno u amerických investorů nebo pojišťoven. Pro české úřady (Seveso) je však TNO preferováno.

Postup modelování v software ALOHA (Krok za krokem)

Software ALOHA je pro tento účel ideální nástroj (v manuálu je to popsáno v kapitole *Source Model*, sekce *Tank Source*). ALOHA automaticky počítá jak tepelné záření (Fireball), tak zjednodušeně i tlakovou vlnu.

ALOHA má omezení pro velmi velké zásobníky. V manuálu (sekce Limitations) se píše, že modely mohou být méně přesné u extrémních množství. 96 tun je na hranici. Výsledek z ALOHA bude pravděpodobně konzervativnější (ukáže větší zóny) než ruční výpočet TNO, protože ALOHA počítá s tím, že ohnivá koule se "odlepí" od země a stoupá vzhůru, čímž mění úhel sálání (View Factor).

Výsledky ALOHA

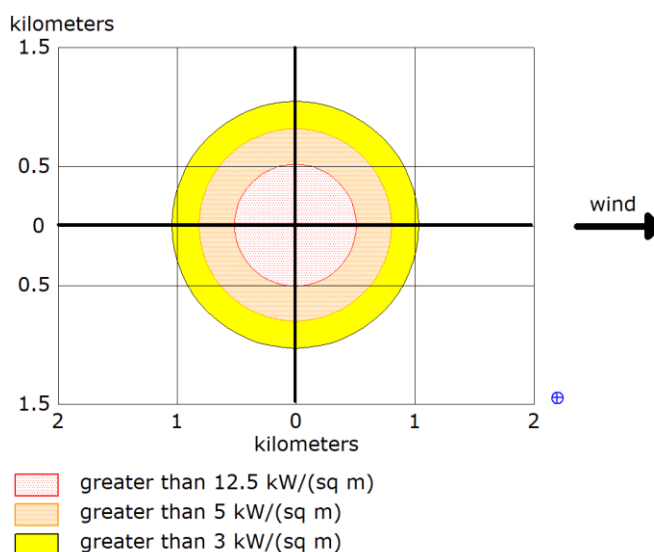
THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball

Red : 514 meters --- (12.5 kW/(sq m))

Orange: 813 meters --- (5 kW/(sq m))

Yellow: 1.0 kilometers --- (3 kW/(sq m))



T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH) je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

Tabulka č. 5: Srovnávací tabulka všech provedených výpočtů pro 96tunový zásobník LPG.

Parametr / Dopad	TNO Yellow Book (Evropský standard)	CCPS / TNT (Americký/Fyzikální)	Metodika BEVI (Legislativní/Probit)	ALOHA Software (Odhad modelu)	Komentář / Interpretace
Průměr ohnivé koule	270 m	265 m	270 m	~ 300 m	Fyzikální modely se shodují. Vše v tomto průměru je okamžitě zničeno plamenem.
Doba trvání hoření	17,5 s	20,6 s	17,5 s	~ 18 s	Velmi krátká doba. Není čas na útěk, pouze na instinktivní ukrytí (pokud je kam).
Zóna I: Vysoká letalita / Domino (Smrt, pád konstrukcí)	550 m (Limit 12,5 kW/m ²)	--	455 m (50 % pravděpodobnost smrti)	~ 600 m (Limit 12,5 kW/m ²)	Kritická zóna. BEVI je zde "optimističtější" (počítá s tím, že ne každý zemře hned), TNO/ALOHA jsou konzervativní (chrání majetek/domino efekt).
Zóna II: Zranění / Evakuace (Popáleniny 2. st., puchýře)	870 m (Limit 5 kW/m ²)	960 m (Limit 5 kW/m ²)	642 m (1 % pravděpodobnost smrti)	~ 900 m (Limit 5 kW/m ²)	Zásadní rozdíl. BEVI definuje riziko smrti (1 %), ostatní metodiky definují zranění. Pro havarijní plánování (evakuaci) počítejte s okruhem cca 900 metrů .
Zóna III: Bezpečná vzdálenost (Práh bolesti)	1 125 m (Limit 3 kW/m ²)	--	--	~ 1,1 - 1,2 km (Limit 3 kW/m ²)	Vzdálenost, kde již nehrozí trvalé následky. Vhodné pro vymezení vnější zóny havarijního plánování.
Tlaková vlna (Destrukce)(Budovy)	--	54 m (0,3 bar)	--	~ 60 m (Overpressure)	Tlaková vlna je u BLEVE sekundární. Ničí budovy jen v bezprostřední blízkosti zásobníku.
Tlaková vlna (Okna) (Střeby)	--	353 m (0,03 bar)	--	~ 350 m	Rozbitá okna mohou zranit lidi až do vzdálenosti 350 m, ale teplo je zde mnohem větším rizikem (sahá dál).

Proč se výsledky liší?

- **TNO vs. BEVI:** Ačkoliv obě metodiky vycházejí ze stejného fyzikálního základu (Nizozemsko), **TNO** pracuje s fixními limity tepelného toku (např. $12,5 \text{ kW/m}^2$ = dřevo hoří), zatímco **BEVI** pracuje s pravděpodobností úmrtí člověka (tzv. Probit funkce). BEVI zohledňuje, že expozice trvá jen 17,5 sekundy, což dává člověku o něco větší šanci na přežití než trvalé sálání. Proto jsou vzdálenosti v BEVI o něco kratší.
- **CCPS (USA):** Je nejpřísnější v odhadu dosahu popálenin (téměř 1 km). Je to dáno jiným výpočtem atmosférické propustnosti.
- **ALOHA:** Software často dává mírně horší výsledky než ruční výpočet, protože dynamicky počítá s tím, že ohnivá koule stoupá vzhůru (změna úhlu sálání) a zohledňuje vlhkost vzduchu.

Dominantní efekt havárie

Z tabulky je jasně vidět, že **tepelné sálání (Fireball)** je u LPG dominantním rizikem.

- Tlaková vlna rozbíjí okna do **350 metrů**.
- Smrtelné teplo ale dosahuje až do **550–650 metrů**.
- *Závěr:* Ochrana proti výbuchu (tlakové vlně) je irelevantní, pokud nejsou řešeny tepelné účinky.

Doporučení (Best Practice)

Pokud jsou výpočty předkládány úřadům (Krajský úřad, HZS, MŽP) v rámci prevence závažných havárií, doporučuje se zvolit **konzervativní přístup** (princip předběžné opatrnosti):

1. Stanovení zón havarijního plánování:

- a. **Vnitřní zóna (Zóna havarijních opatření): 650 metrů.**
 - i. *Zdůvodnění:* Kombinace BEVI (1% letalita) a TNO (blízko limitu domino efektu). V této zóně hrozí smrt.
- b. **Vnější zóna (Zóna informování veřejnosti): 1 100 metrů.**
 - i. *Zdůvodnění:* Limit 3 kW/m^2 (bezpečná vzdálenost). Za touto hranicí lidé ucítí teplo, ale nebudou zraněni.

2. Opatření k redukci rizika (do závěru zprávy):

- a. Vzhledem k rozsahu dopadů (až 1 km) je nutné technicky zabránit scénáři BLEVE.
- b. Navrhněte: **Stabilní chlazení zásobníku** (skrápění), detekci úniku plynu a **automatické uzavírací armatury**, které oddělí zásobník od potrubí a zabrání scénáři Jet Fire, který by mohl zásobník zahřívát.

b) Výbušnost

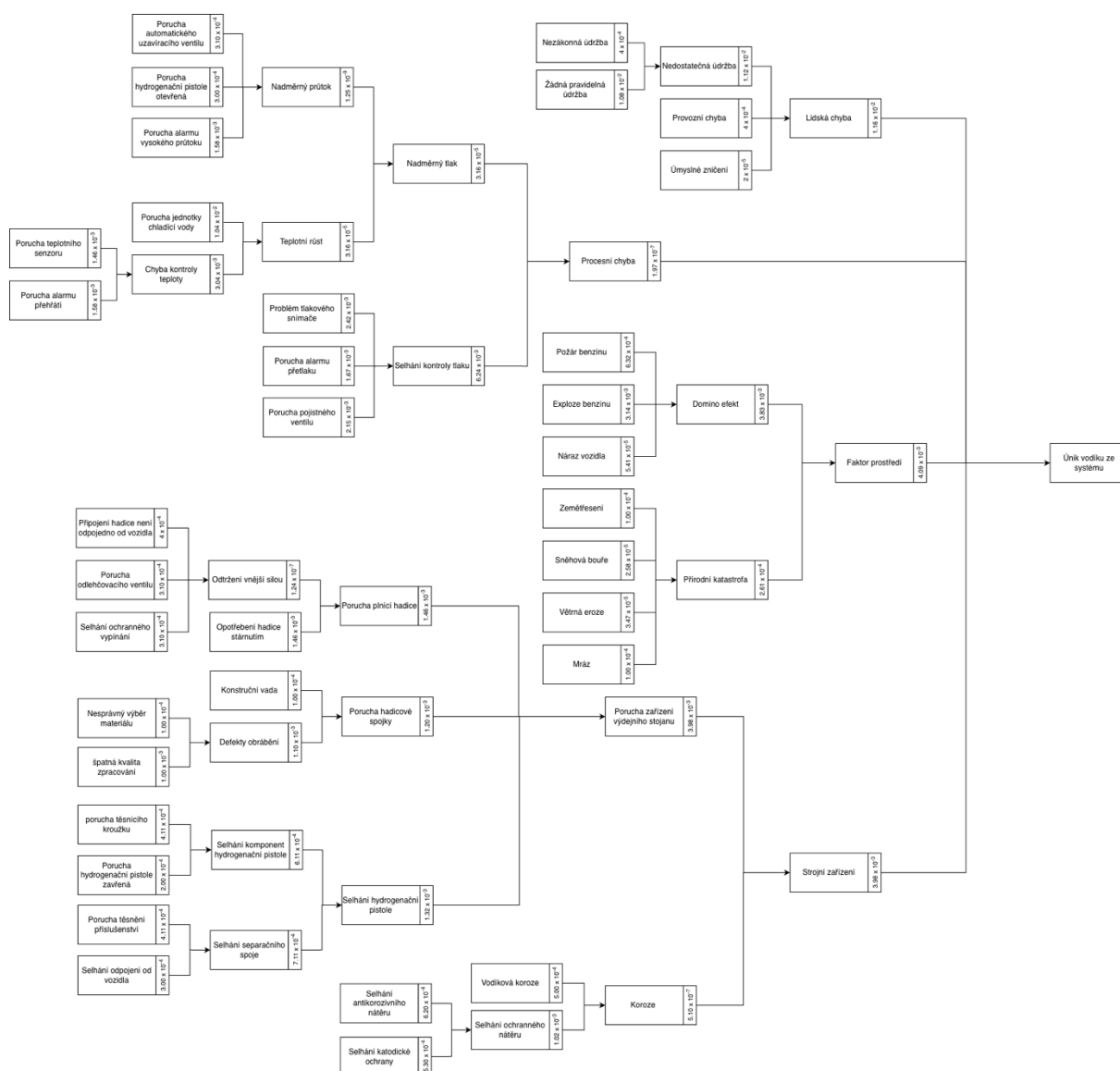
Vodíkové čerpací stanice představují komplexní systém zahrnující vysokotlaké zásobníky, kompresory, regulátory tlaku a výdejní zařízení. Kritickou událostí z hlediska bezpečnosti je ztráta primární těsnosti – únik vodíku, který může vést k požáru nebo k explozi. Obrázky č. 11 a 12 představuje názorný bow-tie diagram (rozdělený na FTA a ETA), který zohledňuje riziko úniku vodíku na hybridní čerpací stanici benzin-vodík.

Kritickou událostí pro bow-tie analýzu je definovaný nehodový únik vodíku z plnicího zařízení. Tento přístup umožňuje systematicky propojit příčiny selhání, bezpečnostní bariéry a možné nebezpečné projevy havárie do jednoho přehledného rámce, který je vhodný jak pro kvalitativní analýzu, tak pro následné kvantitativní hodnocení rizik

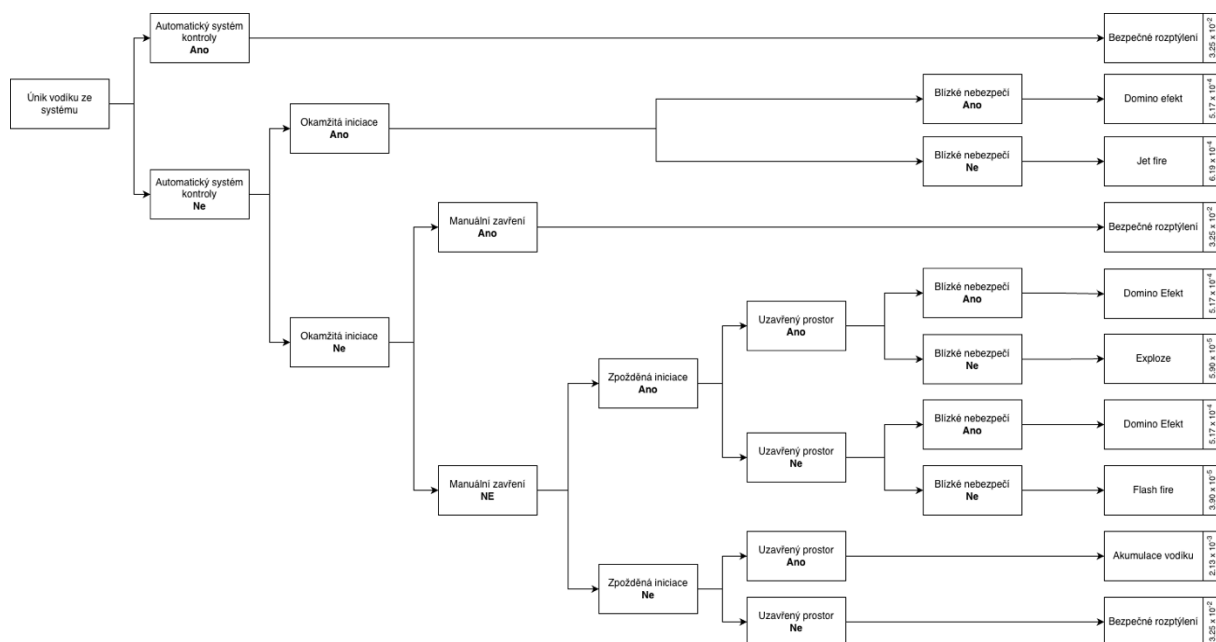
Nejvýznamnější iniciační událostí v prostředí vodíkových čerpacích stanic je únik vodíku z komponent vystavených časté manipulaci a mechanickému namáhání, zejména z plnicí hadice, spojů a armatur. Tyto závěry je možné dohledat z historických incidentů, kde dominují nehořící účinky vodíku, které však při selhání dalších bariér mohou eskalovat do požáru nebo exploze.

Samotný únik vodíku nemusí nutně vést k havárii, pokud jsou funkční klíčové bezpečnostní bariéry, zejména systémy detekce úniku, automatické odstavení a vhodné prostorové uspořádání technologie. Naopak kombinované selhání více bariér, případně přítomnost iniciačních zdrojů a omezeného prostoru, významně zvyšuje pravděpodobnost vzniku tryskového požáru (jet fire), mžikového požáru (flash fire) nebo výbuchu plynné směsi (VCE).

Zvláštní pozornost je věnována také domino efektu v případě kombinovaných čerpacích stanic, kdy primární havárie vodíku může iniciovat sekundární havárii jiného paliva nebo technologie. Výsledky ukazují, že v hybridních systémech nebo v prostorově omezených oblastech představuje domino efekt jeden z klíčových faktorů ovlivňujících celkovou závažnost havárie a výsledné riziko.



Obrázek č. 11: Strom poruch – únik vodíku



Obrázek č. 12: Strom událostí – únik vodíku

Jako reprezentativní zdroj rizika s potenciálně největším uvolněním vodíku byl zvolen vysokotlaký zásobník vodíku umístěný v areálu vodíkové čerpací stanice. Tento výběr vychází z kombinace vysokého provozního tlaku a relativně velkého množství skladovaného vodíku, které společně představují nejzávažnější scénář z hlediska požárně-výbuchových účinků.

Vysokotlaké skladování vodíku je uvažováno jako venkovní zařízení, tvořené svazkem tlakových lahví propojených potrubním systémem. Pro tento zdroj rizika byl definován reprezentativní scénář kontinuálního úniku vodíku, jeho následný rozptyl do okolního prostředí a případné vznícení, které může vést ke vzniku požáru nebo exploze.

V rámci příkladu nejsou uvažovány vnější iniciační vlivy způsobené lidskou činností, jako je úmyslná sabotáž, pád letadla nebo náraz vozidla do technologie, ani významné přírodní vlivy, například seismická aktivita, extrémní teploty nebo nepříznivé větrné podmínky. Scénář se soustředí výhradně na vnitřní technické příčiny selhání zařízení.

K úniku vodíku může dojít v důsledku porušení těsnosti tlakových lahví nebo připojeného potrubního systému, například vlivem vzniku trhliny, selhání ventilu, degradace materiálu nebo dlouhodobého mechanického namáhání. Jako reprezentativní byl zvolen scénář vzniku otvoru o průměru přibližně 1 cm, odpovídající kontinuálnímu úniku vodíku. Tento scénář je v souladu s doporučeným scénářem G2 podle metodiky Purple Book a je běžně používán v kvantitativních i semikvantitativních analýzách rizik.

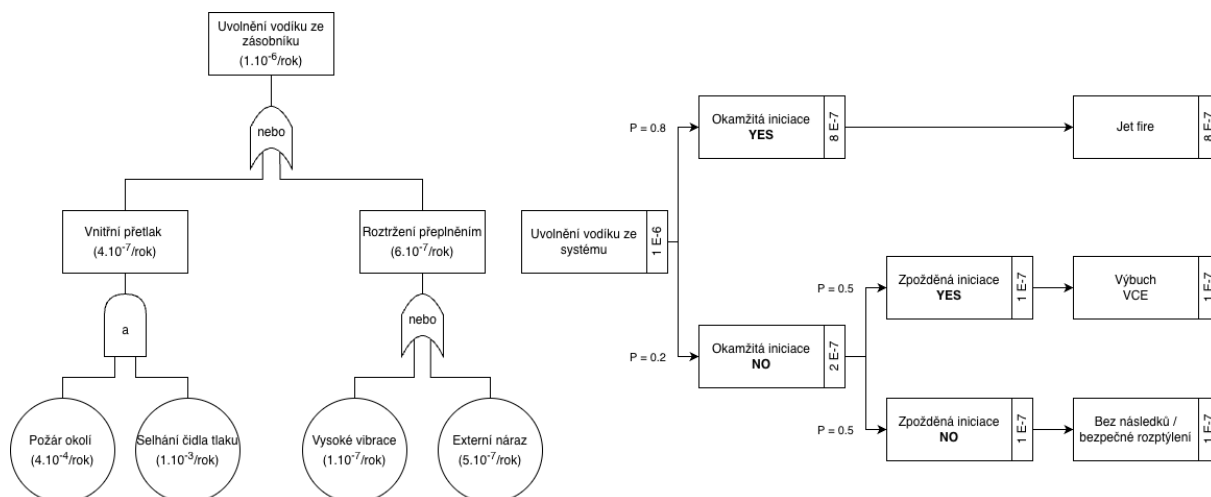
Pravděpodobnost vzniku tohoto scénáře byla stanovena na základě generických frekvencí uváděných v metodice Purple Book a v rámci evropského projektu ARAMIS. Pro identifikaci možných příčin selhání byl použit strom poruch (FTA), který popisuje technické mechanismy vedoucí ke kritické události – úniku vodíku. Na tuto analýzu navazuje strom událostí (ETA), jenž rozvíjí možné scénáře dalšího vývoje havárie a umožňuje stanovení jejich výsledných frekvencí.

V případě svazku vysokotlakých tlakových lahví lze identifikovat dvě hlavní skupiny iniciačních příčin. První skupinu představují přetlakové stavy, například v důsledku selhání systému detekce a regulace tlaku nebo vnějšího ohřevu zařízení. Druhou skupinu tvoří mechanická poškození nebo ztráta těsnosti, způsobená například vibracemi, únavou materiálu nebo lokálním poškozením potrubí.

Výsledná frekvence úniku vodíku stanovená pomocí FTA byla použita jako vstupní frekvence pro analýzu ETA. V případě uvolnění stlačeného vodíku může dojít buď k okamžitému zapálení, které se projeví jako tryskový požár (jet fire), nebo k rozptýlu plynu a zpožděné iniciaci, při níž může vzniknout výbuch plynného oblaku (VCE).

Za nejzávažnější scénář je považováno uvolnění vodíku z vysokotlakého skladování, jeho rozptýl do okolního prostředí a následná zpožděná iniciace. Tento scénář může vést k fatálním následkům až do vzdálenosti přibližně 60 m od místa úniku. Naproti tomu scénář tryskového požáru má převážně lokální charakter, přičemž jeho účinky se typicky omezují na oblast do vzdálenosti přibližně 15 m.

V prostoru čerpací stanice se mohou v běžném provozu nacházet zákazníci a obsluha, kteří mohou být v případě požáru nebo výbuchu přímo ohroženi. Hodnocení rizik proto vychází z kombinace závažnosti následků (vyjádřené dosahem účinků a počtem potenciálně ohrožených osob) a pravděpodobnosti vzniku nehody. Zohledněna jsou přitom běžná technická a organizační bezpečnostní opatření, jako jsou automatické uzavírací ventily, systémy detekce úniku vodíku a havarijní postupy.



Obrázek č. 13: Strom poruch a strom událostí pro únik vodíku z čerpací stanice

Následky havarijních scénářů spojených s únikem vodíku na vodíkové čerpací stanici mohou být hodnoceny na základě modelování výbuchu plynného oblaku (VCE). Pro posouzení účinků na osoby a okolní infrastrukturu lze využít kombinace analytického výpočtu přetlakových účinků a validační simulace v softwaru ALOHA.

Vzhledem k charakteru kontinuálního úniku stlačeného vodíku bylo uvažováno, že nejzávažnější následky jsou způsobeny výbuchem plynného oblaku, zatímco tepelné účinky jsou ve srovnání s přetlakem méně dominantní. Hodnocení následků bylo proto provedeno na základě kritérií přetlakového zatížení.

Modelování v ALOHA bylo provedeno pro scénář úniku vodíku z vysokotlakého zařízení, přičemž byly uvažovány realistické atmosférické podmínky (nízká rychlost větru, běžná teplota a vlhkost vzduchu) a

zapálení oblaku v libovolném čase po úniku. Výsledkem simulace bylo stanovení zón ohrožení osob a staveb v závislosti na dosaženém přetlaku.

Na základě výsledků simulací byly identifikovány tři základní zóny následků:

Zóna smrtelných účinků, odpovídající přetlaku přibližně 140 kPa, ve které lze očekávat fatální poranění osob. Modelování v ALOHA ukazuje, že tato zóna se může rozprostírat do vzdálenosti přibližně 10–12 m od místa výbuchu.

Zóna těžkých zranění, odpovídající přetlaku přibližně 30–35 kPa, kde existuje vysoká pravděpodobnost vážných poranění, zejména poranění sluchu a plic. Tato zóna dosahuje vzdálenosti přibližně 19–20 m.

Zóna lehkých zranění, odpovídající přetlaku kolem 10–15 kPa, kde lze očekávat lehká poranění osob a poškození méně odolných konstrukcí.

Podle výsledků ALOHA se tato zóna může rozšířit až do vzdálenosti přibližně 29 m.

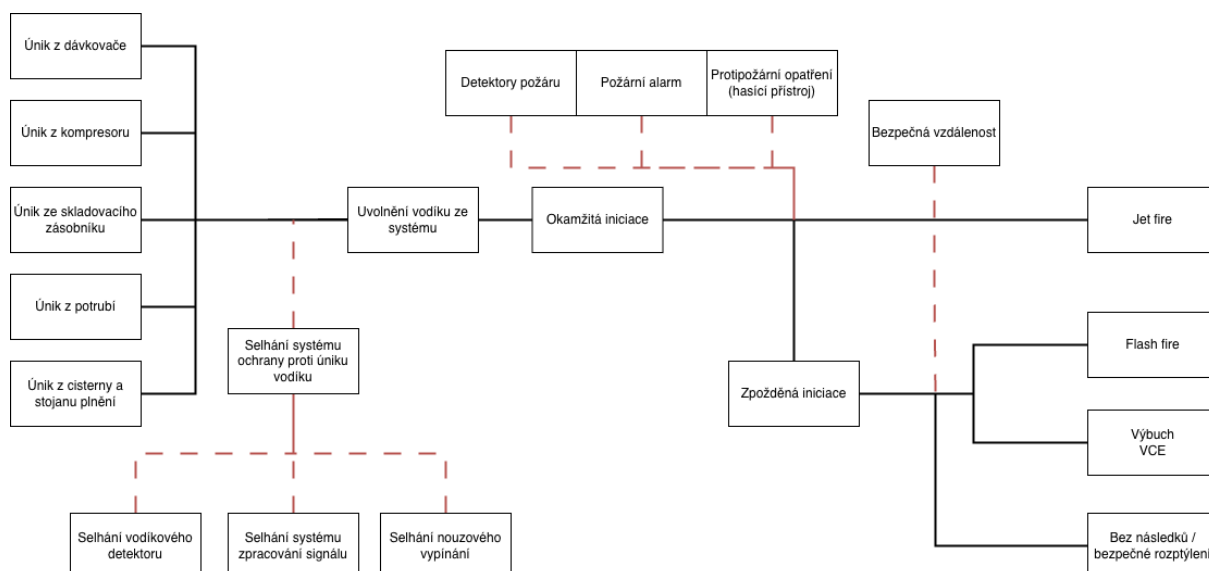
Výsledky simulací ALOHA byly porovnány s analytickým výpočtem pomocí ekvivalentu TNT a Millsovy rovnice. Zjištěné rozdíly v dosazích jednotlivých zón se pohybovaly v rozmezí 5–18 %, což je považováno za přijatelnou odchylku.

Simulace rovněž ukázaly, že rozsah následků výrazně závisí na množství uvolněného vodíku a typu zařízení, ze kterého k úniku dochází. Scénáře s větším množstvím uniklého plynu vedou k výrazně větším zónám ohrožení a vyššímu počtu zraněných osob. Naopak menší úniky, typicky z výdejných zařízení, vykazují podstatně omezené dosahy účinků.

Z pohledu hodnocení rizik představují výsledky ALOHA důležitý vstup pro:

- stanovení rozsahu ohroženého území,
- odhad počtu potenciálně zasažených osob,
- a následné určení závažnosti následků v rámci stromu událostí (ETA) a bow-tie analýzy.

Bezpečnostní bariéry představují klíčový prvek řízení rizik vodíkových čerpacích stanic, neboť přímo ovlivňují pravděpodobnost vzniku kritické události (úniku vodíku) i závažnost jejích následků. V rámci bow-tie analýzy jsou bezpečnostní bariéry rozděleny na preventivní bariéry, které působí před vznikem kritické události, a mitigační bariéry, které omezují následky havárie po jejím vzniku, viz. Následující zjednodušený diagram s vyznačenými příkladovými bariérami.



Obrázek č. 14: Bezpečnostní bariéry v bow-tie diagramu pro únik vodíku

Preventivní bariéry

Preventivní bariéry jsou zaměřeny na zabránění vzniku úniku vodíku. Patří sem zejména:

- konstrukční návrh zařízení a volba materiálů kompatibilních s vodíkem,
- systémy regulace a kontroly tlaku,
- pravidelná údržba a technické inspekce,
- provozní postupy a školení obsluhy.

Analýza ukazuje, že selhání preventivních bariér je často spojeno s mechanickým namáháním komponent, degradací materiálů nebo lidskou chybou. Funkčnost těchto bariér má zásadní vliv na frekvenci vzniku kritické události a tvoří první úroveň ochrany systému.

Detekční a řídicí bariéry

Detekční a řídicí bariéry umožňují včasnou identifikaci úniku vodíku a rychlou reakci systému. Mezi klíčové prvky patří:

- detektory úniku vodíku,
- monitorování provozních parametrů,
- automatické havarijní odstavení technologie.

Tyto bariéry významně snižují pravděpodobnost eskalace úniku do závažné havárie. Jejich účinnost je však podmíněna správným umístěním senzorů, spolehlivostí signalizace a rychlostí odezvy systému.

Mitigační bariéry

Mitigační bariéry jsou navrženy tak, aby omezily následky havárie, pokud již ke kritické události dojde. Zahrnují především:

T A
Č R

Projekt SS02030008 Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH) je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

- ventilaci a odvod uniklého vodíku,
- vhodné prostorové uspořádání technologie a odstupové vzdálenosti,
- havarijní postupy a zásahové plány.

Výsledky analýzy ukazují, že účinnost mitigačních bariér má zásadní význam zejména u scénářů zpožděné iniciace, které mohou vést k výbuchu plynného oblaku (VCE). Správná kombinace technických a organizačních opatření může výrazně snížit rozsah zón ohrožení a počet zasažených osob.

c) Toxicita

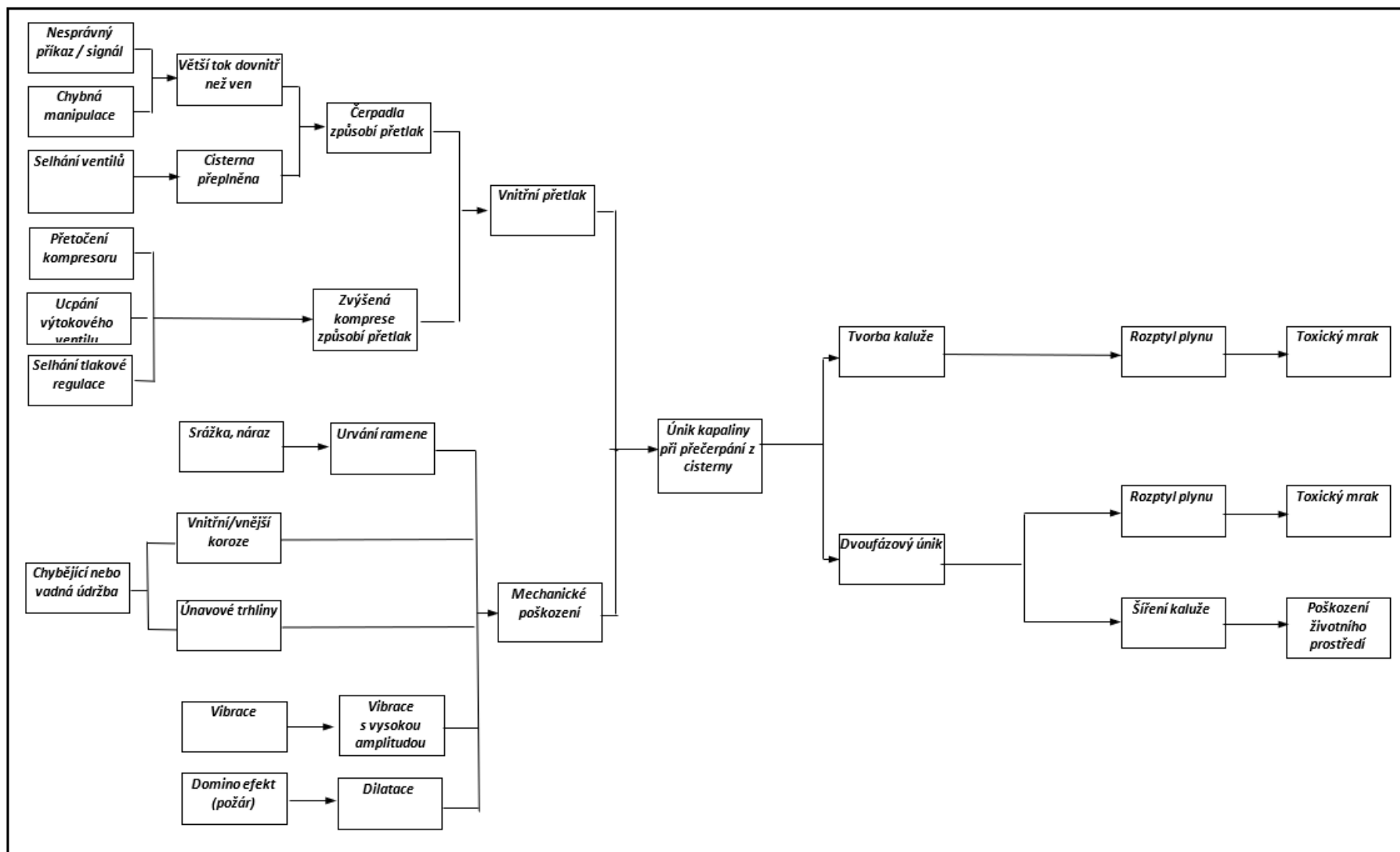
Železniční cisterny určené pro přepravu amoniaku jsou vybaveny plnicími armaturami, uzavíracími ventily, regulátory tlaku a bezpečnostními prvky zajišťujícími kontrolovaný proces plnění. Kritickou událostí z hlediska bezpečnosti je ztráta primární těsnosti – únik amoniaku, který může vést k tvorbě toxického oblaku a následnému ohrožení osob v okolí. Obrázky č. 10 a 11 představují názorný bow-tie diagram (rozdělený na FTA a ETA), který zohledňuje riziko úniku amoniaku při plnění železniční cisterny.

Nejvýznamnější mimořádnou událostí v prostředí plnění železničních cisteren je únik amoniaku ze zařízení vystavených časté manipulaci a mechanickému namáhání, zejména z plnicí hadice, rychlospojek, ventilů a těsnění. Což odpovídá závažným haváriím v minulosti, např. Miramas, Francie 2001, kde převládaly toxické účinky amoniaku, které mohou při selhání dalších bariér eskalovat do rozsáhlého toxického mraku nebo sekundárních havarijních jevů. [15]

K havárii nemusí dojít již při samotném úniku amoniaku, pokud zůstávají funkční klíčové bezpečnostní bariéry, jako jsou systémy detekce úniku, automatické odstavení, vodní clony, ventilace či vhodné prostorové uspořádání technologie. Naopak v případě kombinovaného selhání více bariér, případně při nepříznivých meteorologických podmínkách a v omezeném prostoru, se pravděpodobnost vzniku toxického oblaku výrazně zvyšuje, což může představovat ohrožení pro zaměstnance i okolní obyvatelstvo.

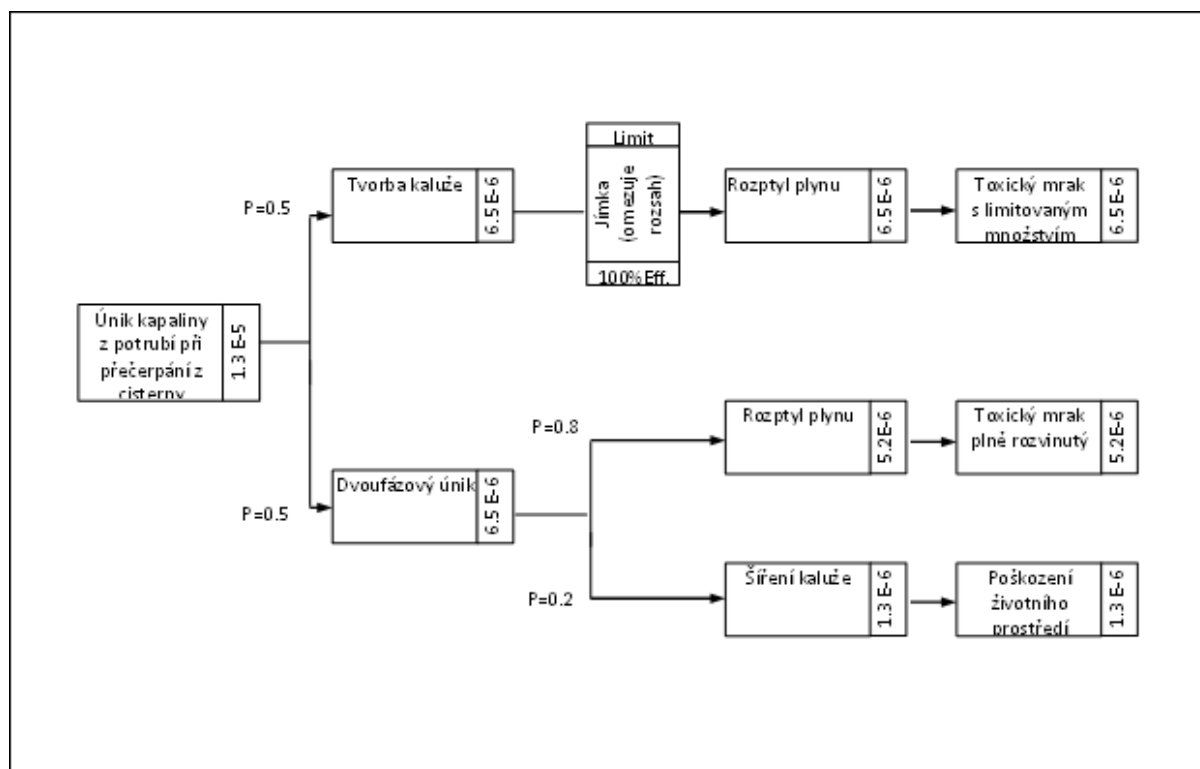
Domino efektu je věnována zvláštní pozornost, protože primární únik amoniaku může vyvolat sekundární havárii jiné technologie v areálu například tehdy, když toxický oblak zasáhne další zařízení nebo způsobí nouzové odstavení sousedních provozů. Výsledky zároveň ukazují, že v technologicky propojených nebo prostorově omezených areálech představuje domino efekt jeden z nejvýznamnějších faktorů, které určují celkovou závažnost havárie a výsledné riziko.

Příkladem typového scénáře pro toxickou látku je sestavení bow-tie diagramu pro únik čpavku (viz obrázek č. 15).



Obrázek č. 15: Bow-tie diagram pro únik amoniaku z cisterny

Výstupem detailní analýzy je strom událostí s frekvencemi nebezpečných projevů na obrázku č. 16.



Obrázek č. 16: Strom událostí s frekvencemi nebezpečných projevů únik amoniaku z potrubí

Jako reprezentativní zdroj rizika s potenciálním uvolněním čpavku byla zvolena 50 tunová železniční cisterna. Hodnocení následků bylo provedeno na základě modelování šíření toxického oblaku v softwaru ALOHA. Cílem bylo posoudit účinky na osoby a okolní infrastrukturu při úniku zkapalněného amoniaku z potrubí během přečerpávání cisterny.

Vzhledem k charakteru úniku (tlaková cisterna, plynné skupenství) byly následky hodnoceny podle toxických koncentrací amoniaku v ovzduší. Tepelné účinky ani riziko výbuchu nebyly v tomto scénáři dominantní. Kritéria hodnocení vycházela z limitních hodnot AEGL (Acute Exposure Guideline Levels) pro dobu expozice 60 minut.

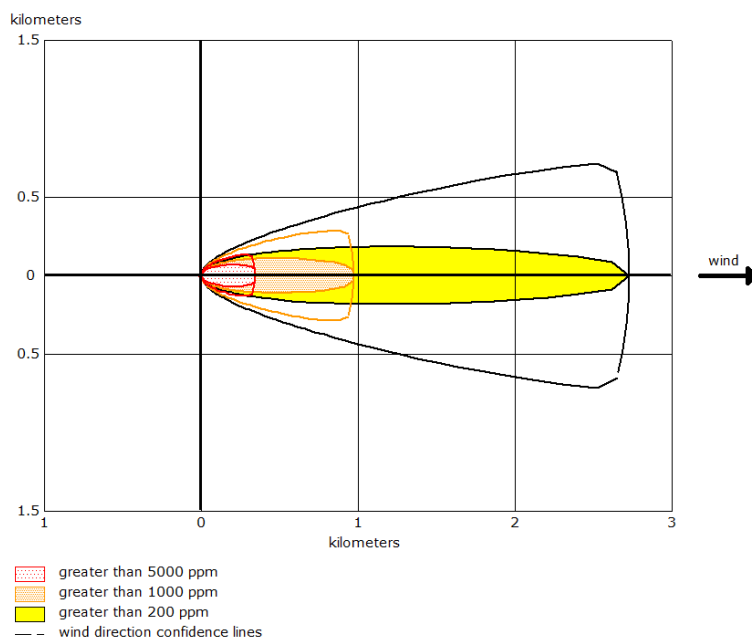
Modelování v ALOHA bylo provedeno pro scénář úniku z připojeného potrubí k cisterně o průměru 7,5 cm, tlakem 8 atm a teplotou 20 °C. Celkově uniklo přibližně 44 000 kg amoniaku během 29 minut. Atmosférické podmínky odpovídaly běžnému stavu (rychlost větru 5 m/s, teplota 20 °C, stabilita D, vlhkost 50 %).

Na základě výsledků simulace byly identifikovány tři zóny ohrožení:

- Červená zóna (smrtné účinky) – koncentrace cca 5000 ppm, kde lze očekávat fatální následky. Dosah této zóny je přibližně 350 m od místa úniku.

- Oranžová zóna (těžké zranění) – koncentrace cca 1000 ppm, vysoká pravděpodobnost vážných zdravotních následků. Dosah této zóny je 976 m.
- Žlutá zóna (lehké zranění) – koncentrace cca 200 ppm, možné lehké zdravotní obtíže a podráždění. Dosah této zóny je 2,7 km.

Výsledky simulace ukazují, že rozsah následků závisí na množství uniklého amoniaku, rychlosti větru a atmosférických podmínkách.



Obrázek č. 17: Výsledky modelování toxického mraku amoniaku v ALOHA

Pro uvedený scénář úniku amoniaku je vhodné zavést kombinaci technických, organizačních a procedurálních bariér. Technické bariéry zahrnují mechanickou ochranu ventilů a potrubí, instalaci automatických uzavíracích ventilů reagujících na pokles tlaku, detekční systém amoniaku s alarmem a napojením na havarijní uzávěr a vodní clony pro snížení koncentrace toxického oblaku. Organizační opatření spočívají ve vymezení bezpečnostní zóny podle výsledků modelování, zpracování havarijního plánu s postupy pro evakuaci a izolaci oblasti a pravidelném školení obsluhy zaměřeném na manipulaci s cisternami a reakci na únik. Procedurální bariéry zahrnují kontrolu integrity zařízení prostřednictvím tlakových zkoušek a vizuálních inspekcí, přečerpávání pouze v chráněném prostoru s odvětráním a detekcí amoniaku a omezení rychlosti manipulace, aby se minimalizovalo riziko mechanického poškození. Součástí ochrany musí být také osobní ochranné prostředky pro personál, zejména chemicky odolné obleky, masky s filtrem pro NH_3 nebo dýchací přístroje, a dostupné dekontaminační sprchy v blízkosti místa přečerpávání.

d) Nebezpečnost pro ŽP

Vybraným zdrojem rizika pro případovou studii nebezpečnosti pro životní prostředí je zařízení pro stáčení a skladování čpavkové vody. Tento zdroj rizika lze podrobněji rozdělit na cisternu, zásobníky, potrubí a čerpadla. Následující typový scénář závažné havárie se zaměří na možný únik čpavkové vody ze zásobníku.

Zásobník – únik čpavkové vody ze zásobníku při skladování. Příčinou scénáře je především přeplnění nádrže, méně pravděpodobné je prasknutí dvouplášťového zásobníku. Na zásobníku (80 m³ – cca 72 t čpavkové vody, průměr 4,0 m, výška 7,1 m) je instalována celá řada bezpečnostních opatření – dvouplášťová nádrž s indikací porušení vakua v meziplášťovém prostoru, zabezpečení plnění nádrže – akustická a světelná signalizace dosažení nejvyšší přípustné hladiny kapaliny v zásobníku + havarijní odstavení plnění zásobní nádrže, bezpečnostní vana 100 m³ (havarijní jímka). Ze všech havarijních jímek budou případné úniky svedeny do podzemní bezodtoké havarijní nádrže (dvouplášťová – 34,7 m³). Rovněž nad prostorem skladování čpavkové vody je instalováno zkrápění.

Hodnocení zdrojů environmentálního rizika závažné havárie je provedeno metodou Analýza dopadů havárií s účastí nebezpečné látky na životní prostředí (dále „H&V Index“). Předmětem této studie je zpracování analýzy dopadů havárií na ŽP v důsledku potenciálního úniku čpavkové vody ze stacionárního zdroje rizika. Pro zásobník je stanovena závažnost potenciální havárie na jednotlivé složky ŽP (především pro povrchové vody). Závažnost havárie je dána nebezpečností látky, zranitelností složek ŽP a množstvím látky, které může do složky ŽP uniknout. Metodou H&V Index lze hodnotit závažnost potenciálních havárií pro životní prostředí pro účely zákona o prevenci závažných havárií.

Při vlastním posuzování dopadů havárií s účastí nebezpečné látky na ŽP vzniká odděleně index nebezpečnosti látky pro složky ŽP a index zranitelnosti území vůči potenciální havárii s účastí nebezpečné látky. Index nebezpečnosti látky pro ŽP je kombinací (eko)toxických vlastností látky, fyzikálně-chemických vlastností látky a možností šíření látky. Index zranitelnosti území je stanoven odděleně pro složky prostředí: povrchové a podzemní vody, půdní prostředí, biotickou složku krajiny. Zahrnuje v sobě charakteristiky těchto složek ŽP (např. propustnost půdy, propustnost hydrogeologického podloží, využití půdy, využívání podzemní a povrchové vody, zvláště chráněná území přírody, ochranná pásma atd.). Vzájemným propojením indexů (zranitelnosti prostředí a nebezpečnosti látky pro ŽP) jsou získány dílčí indexy (syntézou), které informují o nebezpečnosti konkrétní látky pro hodnocenou lokalitu.

V dalším kroku je přistoupeno k určení závažnosti potenciální havárie. Závažnost je stanovena kombinací množství látky, která může uniknout do příslušné složky ŽP a dílčích indexů. Odděleně jsou odhadovány závažnosti účinků toxických látek v povrchových vodách, půdním prostředí, podzemních vodách a v biotické složce prostředí, dále pak je odhadnuta závažnost vlivu látek toxických a hořlavých na biotickou složku prostředí.

Seznam hodnocených zdrojů rizik

Čpavková voda v zásobníku (72 t)

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

Vzhledem ke klasifikaci čpavkové vody jako vysoce toxické pro vodní organismy (H400) je hodnocení zaměřeno na dopad na povrchovou vodu. Ostatní možné dopady na půdní prostředí a podzemní vodu lze charakterizovat jako zanedbatelné, protože v okolí místa stáčení a skladování se nebudou nacházet nebezpečné prostory pro vsakování čpavkové vody do podloží.

Výsledky hodnocení metodou H&V Index

V prvním kroku byl stanoven index T_W - Index toxické nebezpečnosti látky pro vodní prostředí:

Toxicita látky pro vodní prostředí (kód toxicity A)	3
Toxické (LC_{50} ryby = >3,4 mg/l)	
Fyzikální vlastnosti látky (kód B)	4
Rozpustnost = vysoce rozpustná	
Součet kódů	7
Index toxické nebezpečnosti pro vodu (T_W)	4
Třída toxicity – velmi vysoká	

Druhým krokem je hodnocení zranitelnosti zaměřené na povrchové vody, protože tato složka je nejvíce ohrožena potenciálními úniky nebezpečných látek, které jsou klasifikovány jako toxické pro vodní organismy a mohou vyvolat dlouhodobé nepříznivé účinky ve vodním prostředí. V případě vybraného území byl stanoven tento index:

- Index zranitelnosti povrchových vod – hodnoceno indexem $I_{SW}=3$, tzn. průměrná zranitelnost území, únikem nebezpečné látky dojde sice k ohrožení, ale následky lze relativně rychle odstranit. Povrchové vody v blízkosti jsou klasifikovány jako Ostatní vodní toky.

Třetím krokem je syntéza indexů toxicity pro povrchové vody:

$$I_{TSW} = \sqrt{I_{SW} \cdot T_W}$$

$$I_{TSW} = \sqrt{3 \cdot 4}$$

$$I_{TSW} = 3,46 \Rightarrow I_{TSW} = 3$$

V dalším kroku se určuje závažnost havárie z hlediska dopadů na ŽP na základě syntézy indexů nebezpečnosti a zranitelnosti a množství uniklé látky. Hodnocení se provádí tabulkově zvlášť pro každou posuzovanou složku ŽP. Závažnost havárie nabývá hodnot A-E, přičemž A je zanedbatelná závažnost a E vysoká závažnost dopadu havarijního scénáře na životní prostředí. Stanovení závažnosti havárie pro povrchové vody je uvedeno v Tabulce č. 5.

Tabulka č. 6: Kategorie závažnosti havárie únikem toxické látky pro povrchové vody

		Množství toxické látky uniklé do povrchových vod [t]				
		< 1	1 - 10	10 - 50	50 - 200	> 200
I _{TSW}	1.	A	A	B	B	C
	2.	A	B	C	C	D
	3.	B	C	C	D	E
	4.	B	C	D	E	E
	5.	C	D	E	E	E

Poznámky.: A - E = kategorie závažnosti havárie s únikem toxické látky do povrchových vod, A - zanedbatelný dopad na povrchové vody, B - malý dopad na povrchové vody, C - výrazný dopad na povrchové vody, D - velmi výrazný dopad na povrchové vody, E - maximální dopad na povrchové vody, I_{TSW} - index toxicity látky pro povrchové vody.

Pro scénář I. úniku 72 t čpavkové vody ze zásobníku vychází kategorie D – velmi výrazný dopad na povrchové vody.

Na základě analýzy dopadů havárií na životní prostředí byl posouzen potenciální únik čpavkové vody ze zásobníku v kombinaci s pravděpodobností scénáře jako přijatelné riziko pro povrchovou vodu. Tento výsledek byl stanoven i přes značně konzervativní přístup, kdy bylo vzato celkové množství potenciálního úniku čpavkové vody – celý obsah zásobníku. Na zařízení je nainstalována celá řada bezpečnostních opatření, která omezí množství uniklé čpavkové vody. Především se jedná o zachytňé jímky s odvodněním do bezodtoké havarijní nádrže. Okolní zpevněné plochy budou opatřeny nátěrem odolným čpavkové vodě, nezpevněné plochy se budou vyskytovat jen v minimální míře.

Pro prevenci úniku nebezpečných látek pro životní prostředí lze doporučit následující bezpečnostní opatření:

- dvouplášťové nádrže s indikací porušení vakua v mezi plášťovém prostoru,
- zabezpečení plnění nádrže – akustická a světelná signalizace nejvyšší hladiny,
- havarijní odstavení plnění zásobníku,
- zachytňá jímka pod zásobníkem nebo podzemní bezodtoková havarijní nádrž,
- nepropustné podloží s odolnými nátěry,
- zkrápění nad prostorem skladování,

Předpokládá se, že obsluha řídicího střediska nepřetržitě sleduje základní technické parametry (tlak, teplota, výška hladiny, atd.). V případě nestandardních stavů pak tyto stavy musí být signalizovány akusticky či světelnou signalizací.

3. krok – Odhad následků scénářů

S využitím dostupných softwarových programů, jako ALOHA, EFFECTS a řady dalších, lze stanovit vzdálenosti zasažených zón při toxických únicích, požárech a explozích vybraných nebezpečných látek a na těchto zónách odhadnout potenciálně smrtelně ohrožené osoby. Pro sjednocení prahových hodnot, pro účely modelování reprezentativních scénářů, lze doporučit následující hodnoty:

- Poll fire, Jet fire a BLEVE – tepelný tok 5 kW/m^2 určující smrtelnou zónu pro obyvatelstvo pohybující se na volném prostranství, dále pak hodnotu 35 kW/m^2 určující území, kde zemře obyvatelstvo i uvnitř budov,
- Flash fire – koncentrace 60 % LEL, kdy jsou v zasažené zóně předpokládána smrtelná úmrtí obyvatelstva při prošlehnutí plamene,
- VCE – účinky tlakové vlny 140 mbar představující smrtelnou zónu pro obyvatelstvo,
- Toxicita – LC_{50} nebo probitová funkce.

Pro stanovení zasažených zón je potřeba získat doplňující informace o typových havarijních scénářích, především:

- velikost zařízení (délka, výška, průměr, ...) a provozní podmínky (teploty, tlaky, ...),
- vlastnosti nebezpečných látek (fyzikálně - chemické vlastnosti, ...),
- meteorologická data (teplota, vlhkost, větrná růžice, rychlost větru, stabilita ovzduší, výška inverzní vrstvy).

4. krok – Odhad pravděpodobnosti scénářů

V případě zjednodušeného hodnocení rizik lze doporučit použití generických hodnot pravděpodobností scénářů publikovaných ve světově uznávaných příručkách (např. Purple Book, ARAMIS). Jako příklady takových hodnot lze uvést:

- Jednorázový únik celkového množství látky z tlakového zásobníku – $5 \times 10^{-7} \text{ rok}^{-1}$,
- Lom plného průměru potrubí (průměr potrubí $< 75 \text{ mm}$) – $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ rok}^{-1}$,
- Poškození hadice při stáčení autocisterny – $4 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$.

V případě detailnější analýzy je vhodnější provést rozbor scénářů pomocí analýz metodami stromem poruch a stromem událostí, případně jejich spojením do „bow-tie diagramu“. Následně lze do těchto logických grafů dosazovat pravděpodobnosti nebo frekvence základních událostí a stanovit konečné frekvence výsledných událostí.

Příkladem takových určení frekvence kritické události po zvážení bezpečnostních bariér ve stromech poruch.

- Pro CE10 – katastrofické roztržení zásobníku LPG – $2,1 \times 10^{-6} / \text{rok}$
- Pro CE8 – velký únik amoniaku z potrubí – $1,3 \times 10^{-5} / \text{rok}$

5. krok – Hodnocení přijatelnosti rizik

V závěrečném kroku získáme spojením následků (např. odhadovaného počtu smrtelně ohrožených osob) a pravděpodobností (nejčastěji ve formě odhadu frekvence za rok) kvantitativní údaje o riziku. Pro stanovení společenské přijatelnosti scénářů závažných havárií je v ideálním případě nezbytná diskuse všech zúčastněných stran (provozovatele, správních úřadů, zástupců obyvatelstva atd.) o stanovení hranice přijatelnosti rizik. V praxi většinou takové diskuse neprobíhají, a proto je nutné porovnat společenské riziko pomocí doporučené hranice ve vyhlášce č. 227/2015 Sb. ve znění aktuální vyhlášky č. 244/2023 Sb.:

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

$$F_h < F_p$$

kde pro F_p platí vztah

$$F_p = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{N^2},$$

kde

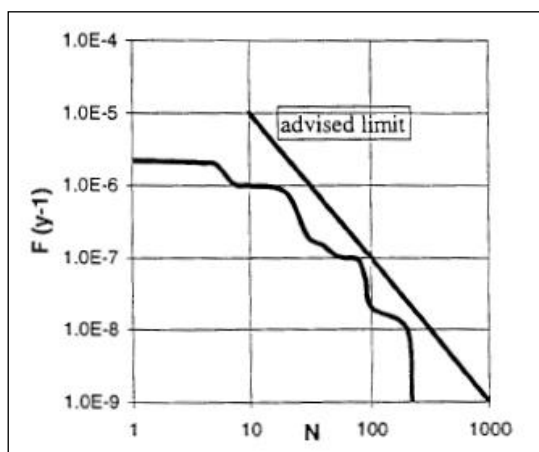
F_p – přijatelná roční frekvence závažné havárie,

N – odhad počtu usmrcených osob.

V případě, že výsledná frekvence scénáře závažné havárie se jeví jako nepřijatelná, stanoví se organizační a technická opatření ke snížení tohoto rizika a termíny jejich realizace a provede se nová analýza a hodnocení rizika.“

Tato hranice společenského rizika byla převzata z publikace Purple Book, kde následující vztah platí pro více než 10 smrtelně ohrožených osob (viz obrázek č. 18)

- $10^{-3} / N^2$ pro $N > 10$, kdy N je počet smrtelně ohrožených osob



Obrázek č. 18: Prezentace křivky společenského rizika (podle metodiky Purple Book)

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

4. Doporučení pro snížení rizik

Pro potřeby umístování bariér do typového scénáře můžeme v souladu s metodologií ARAMIS rozlišovat bezpečnostní bariéry vylučující (avoid), preventivní (prevent), kontrolní (control), detekující (detect) a omezující (limit). Pro potřeby hodnocení účinku bariér jsou definovány 4 hlavní kategorie bezpečnostních bariér: pasivní, aktivované, lidské zásahy a symbolické bariéry. Vlastní hodnocení účinku bariér probíhá pomocí tří parametrů: především podle úrovně jistoty (Level of Confidence –LC) nebo podle efektivity a doby odezvy.

Pro proces snižování rizik lze doporučit celou řadu opatření, které mohou účinně snižovat rizika závažných havárií. Opatření na snižování rizik lze obecně rozdělit na technická a organizační opatření, z jiného hlediska na preventivní (předcházející vzniku havárie) a záchranná (omezující následky havárie). Jako základní přístupy pro snižování rizik lze jmenovat:

- náhrada nebezpečné látky za méně nebezpečnou,
- změna technologie za modernější s menším množstvím nebezpečných látek,
- snižování zásob nebezpečných látek na nezbytné minimum – zlepšení logistiky při zásobování a přepravě nebezpečných látek,
- účinné oddělení množství nebezpečných látek v zařízení (např. dálkovými ventily) – snížení množství unikající látky.

Závěr

Cílem této části projektu bylo vypracování typových scénářů závažných havárií pro vybrané reprezentativní zástupce kategorií nebezpečných látek - hořlavých, toxických, výbušných a nebezpečných pro životní prostředí v typických provozech průmyslových podniků. Navržené typové scénáře závažných havárií umožní, v případě jejich využívání, srovnání výsledků analýz prováděných různými odborníky nebo pracovišti. Příklady typových scénářů rozvoje havárií u vybraných technologií a nebezpečných látek tak přispívají ke zvyšování bezpečnosti a prevence vzniku závažných havárií.

Reference

- [1] Guidelines for Quantitative Risk Assessment, “Purple Book”, CPR 18E, TNO, The Hague 1999
- [2] Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Netherlands, 2009
- [3] ARAMIS “Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of the SEVESO II directive”, User Guide, contract number: EVG1–CT–2001–00036, December 2004, <http://aramis.jrc.it>
- [4] Vyhláška č. 311/2021 Sb., o zásadách pro vymezení zóny havarijního plánování a postupu při jejím vymezení a o náležitostech obsahu vnějšího havarijního plánu a jeho struktury.
- [5] Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi (zákon o prevenci závažných havárií).
- [6] Metodický pokyn odboru environmentálních rizik Ministerstva životního prostředí pro postup při zpracování dokumentu „Analýza a hodnocení rizik závažné havárie“ podle zákona č. 59/2006 Sb., o prevenci závažných havárií, Věstník Ministerstva životního prostředí, částka 3, březen 2007
- [7] Bernatík, A. Loss Prevention and Safety Promotion in Industry. In Lackner, M. Handbook of Combustion. Weinheim, Německo : Wiley-VCH, 2010, s. 441-458, ISBN: 978-3527324491.
- [8] Metodologie pro identifikaci a vyhodnocení synergických a kumulativních jevů, Dostupné z: www.env.cz [cit. 2006-03-18]
- [9] Lees’ Loss Prevention in the Process Industries, Hazard identification, assessment and control, Third Edition, Edited by Sam Mannan, Elsevier 2005, ISBN: 0-7506-7555-1
- [10] Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 1992, ISBN 0-8169-0473-1.
- [11] Bernatík A., Maléřová L.: *Analýza rizik území*, Ostrava: SPBI, 2010
- [12] LI, Xinrui; KOSEKI, Hiroshi a M. SAM MANNAN. Case study: Assessment on large scale LPG BLEVEs in the 2011 Tohoku earthquakes. Online. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014, vol. 35, s. 257-266. ISSN 0950-4230. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.07.015>.
- [13] IMPEL; French Ministry for Sustainable Development; DGPR; SRT; BARPI; ISPRA. Derailment of LPG tank-wagons followed by a UVCE explosion and an intense fire – Viareggio, Italy, 29 June 2009. ARIA Report No. 36464. 2011. Dostupné z: https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/A36464_ips36464_001.pdf
- [14] CHEN, Liqiong; LI, Xia; TAO, Cui; MA, Jianlin; LIU, Hong et al. Combining accident modeling and quantitative risk assessment in safety management. Online. *Advances in Mechanical Engineering*.

2017, vol. 9, no. 10, s. 168781401772600-168781401772600. ISSN 1687-8132. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1177/1687814017726002>

[15] ARIA. Accident involving ammonia leak from rail tank car in Miramas. 2001. Dostupné z:
<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>