

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



**Hodnocení rizika přepravy nebezpečných látek
po železnici**

**The risk evaluation of dangerous substances
transport by railway**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:
Vedoucí práce:
Konzultanti:

Tomáš Saska
Ing. Pavel Fuchs, CSc.
Ing. David Vališ, Ph. D.
Ing. Jan Šembera, Ph. D.
RNDr. Jan Novák, Ph. D.

LIBEREC 2006

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146134782

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra modelování procesů

Akademický rok: 2004/2005

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: **Tomáš Saska**

studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Hodnocení rizika transportu nebezpečných látek na železnici**

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se základními postupy analýzy rizik (stanovení pravděpodobnosti vzniku nebezpečné nežádoucí události, modelování následků úniku nebezpečné látky).
2. Zpracování dat o nehodovosti na železnici a stanovení pravděpodobnosti nehody s únikem nebezpečné látky ve zvolené lokalitě.
3. Popis šíření nebezpečné látky a modelování následků jejího šíření vhodným SW prostředkem.
4. Stanovení rizika a návrh opatření k jeho redukci.

407
126/05 M

KMO/EI - AK
P50, [18] s. mil. Samel
Hr. tab. graf

Anotace

Cílem diplomové práce je modelování rizika nehody s únikem nebezpečné látky na železnici. Modelování rizika se skládá z tří kroků. Prvním krokem je shromáždění a zpracování dat o nehodovosti na železnici. Druhým krokem je stanovení pravděpodobnosti nehody s únikem nebezpečné látky ve zvolené lokalitě libereckého železničního nádraží. Třetí důležitou etapou je určení následků na obyvatelstvo zasažených oblastí. Práce se zabývá výpočtem rizika úniku nebezpečné látky a následně modelováním šíření nebezpečné látky v atmosféře s přihlédnutím k proměnným faktorům. Výsledkem diplomové práce je stanovení rizika pro nehodu s únikem nebezpečné látky v lokalitě libereckého hlavního železničního nádraží a návrh opatření k jeho redukci.

Annotation

The main goal of the diploma thesis is the risk simulation of accident with dangerous substances outflow in railway. The risk simulation contains three steps. The first step is to collect and to compile the data of railway accident frequency. The second step is to determine the probability of accident with dangerous substance outflow in the area of Liberec central railway station. The third step is to assess the effects to population in affected areas. The report deals with risk calculation of dangerous substances escape and next with simulating of diffusion of dangerous substances in atmosphere with emphasis on flexible factors. The result of the diploma thesis is to determinate the risk of dangerous substances escape in locality of general railway station in Liberec and then the concept for it's reduction.

OBSAH

DEFINICE A ZÁKLADNÍ POJMY	11
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	19
1 ÚVOD.....	21
2 CÍLE PRÁCE.....	22
3 TEORETICKÁ ČÁST	23
3.1 Riziko	23
3.2 Analýza rizik	24
3.2.1 Identifikace zdrojů rizik.....	24
3.2.2 Metody používané při hodnocení rizik	24
3.2.2.1 Srovnávací metody	24
3.2.2.2 Analytické metody.....	27
3.2.2.3 Metody modelování úniku.....	32
3.2.2.4 Modely požárů a výbuchů	37
3.2.2.5 Modely hodnocení zranitelnosti	38
3.2.2.6 Data potřebná pro hodnocení rizik	43
3.2.2.7 Softwarové prostředky.....	46
3.2.3 Výpočet rizika a posouzení jeho přijatelnosti.....	48
3.2.3.1 Individuální riziko	48
3.2.3.2 Společenské riziko.....	50
3.2.3.3 Ekonomické riziko.....	51
3.2.3.4 Kritéria hodnocení přijatelnosti rizika.....	51
3.2.3.5 Opatření pro snížení rizika	53
3.3 Postup hodnocení rizika přepravy nebezpečných látek po železnici	55
3.3.1 Identifikace zdroje rizika	55
3.3.2 Výpočet pravděpodobnosti havárie s únikem nebezpečné látky na železnici.....	56
3.3.3 Určení zdroje a charakteru úniku.....	57
3.3.4 Zranitelnost	58
3.3.5 Stanovení rizika	58
3.3.5.1 Individuální riziko	58
3.3.5.2 Společenské riziko.....	58

3.3.5.3	Hodnocení přijatelnosti rizika	58
4	PRAKTICKÁ ČÁST	59
4.1	Vstupní data	59
4.1.1	Vstupní data pro stanovení pravděpodobnosti	59
4.1.2	Vstupní data pro stanovení následků	64
4.2	Riziko nehody s únikem nebezpečné látky pro hlavní železniční nádraží v Liberci.....	67
4.3	Určení rizika úmrtí pro specifickou havárii s únikem čpavku na hlavním nádraží v Liberci.....	67
4.3.1	Výpočet pravděpodobnosti nehody s únikem čpavku na hlavním železničním nádraží v Liberci	68
4.3.2	Určení závislosti pravděpodobnosti úmrtí na vzdálenosti od zdroje	71
4.3.3	Určení individuálního rizika	71
4.3.4	Určení společenského rizika	74
4.3.5	Výpočet kritéria přijatelnosti rizika	76
4.4	Únik čpavku zpracovaný softwarem Aloha	77
4.5	Navržená opatření pro snížení rizika.....	80
5	ZÁVĚR	82
	LITERATURA.....	84

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Jednoduchý strom poruch.....	30
Obr. 2: Příklad stromu událostí	31
Obr. 3: Pravděpodobnost úmrtí osob uvnitř a vně budov následkem toxického mraku.....	39
Obr. 4: Pravděpodobnost úmrtí osob uvnitř a vně budov následkem bleskového požáru...	41
Obr. 5: Pravděpodobnost úmrtí osob uvnitř a vně budov následkem události typu BLEVE	42
Obr. 6: Pravděpodobnost úmrtí osob uvnitř a vně budov následkem tlakové vlny.....	43
Obr. 7: Příklad znázornění individuálního rizika	49
Obr. 8: Log – log diagram pro hodnocení přijatelnosti společ. rizika závažné havárie	52
Obr. 9: Rastrový plán okolí hlavního železničního nádraží v Liberci.....	66
Obr. 10: Okruhy individuálního rizika pro únik čpavku z železniční cisterny.....	73
Obr. 11: Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (ERPG 1 – 3) zakreslené v mapě města Liberce a okolí	79

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vývoj počtu nehod v železniční dopravě	60
Graf 2: Vývoj vlakových kilometrů celkem	61
Graf 3: Podíl nebezpečných surovin v nákladní přepravě	61
Graf 4: Vývoj počtu událostí s únikem látek	62
Graf 5: Nehodovost s únikem nebezpečných látek v jednotlivých krajích (2003).....	63
Graf 6: Vývoj počtu nehod s únikem nebezpečných látek v Libereckém kraji.....	64
Graf 7: Počet nastupujících osob v jednotlivých denních dobách (pondělí)	65
Graf 8: Počet vystupujících osob v jednotlivých denních dobách (pondělí).....	65
Graf 9: Pravděpodobnost závažné nehody s únikem nebezpečných látek na jeden vlkm...	69
Graf 10: Průběh pravděpodobnosti úmrtí pro únik čpavku z železniční cisterny	71
Graf 11: Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (ERPG 1 – 3)	78
Graf 12: Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (LC50, 4000 ppm, 1000 ppm)	78
Graf 13: Průběh koncentrace v místě o vzdálenosti 500 metrů od místa úniku	79

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Probit funkce P_r jako funkce pravděpodobnosti P	39
Tab. 2: Prahové hodnoty účinků tepelné radiace na osoby a stavby	42
Tab. 3: Úrovně zničení budov a konstrukcí přetlakem.....	43
Tab. 4: Třída stability počasí (podle softwaru Aloha).....	45
Tab. 5: Podíly obyvatel uvnitř (f_{in}) a vně (f_{out}) budov pro denní a noční dobu.....	46
Tab. 6: Porovnání výsledků analýzy rizika s kritérii	52
Tab. 7: Rozdělení nebezpečných látek do tříd.....	56
Tab. 8: Počty nehod s únikem nebezpečných látek v jednotlivých krajích.....	62
Tab. 9: Vývoj pravděpodobnosti nehody s únikem nebezpečných látek vztažené na jednotku vzdálenosti	68
Tab. 10: Pravděpodobnost úmrtí při jednorázovém úniku čpavku v jednotlivých vzdálenostech od zdroje.....	71

PŘÍLOHY

Příloha 1: Třídění nebezpečných látek	72
Příloha 2: Značení nebezpečných nákladů	73
Příloha 3: Statistika železniční dopravy	74
Příloha 4: Hustota zalidnění urbanistických obvodů města Liberce	75

DEFINICE A ZÁKLADNÍ POJMY

Analýza rizika

Proces analýzy nebezpečí a odhadu úrovně rizika pro lidi, majetek, životní prostředí, kde se používá kvalitativní nebo kvantitativní odhad rizika určité události. Odhad je založen na inženýrském ocenění a metodikách, vzhledem k ocenění pravděpodobností (frekvencí) a následků scénářů možných událostí (závažných havárií) vycházejících ze zdrojů rizik.

Asanace

Soubor opatření, sloužících ke zlepšení (ozdravení) životního prostředí.

Bezporuchovost

Schopnost funkční jednotky plnit požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu.

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)

Exploze vyplývající z poruchy (náhlého roztržení) nádoby obsahující kapalinu při teplotě významně vyšší než je její bod varu za normálních atmosférických podmínek.

Bleskový požár (Flash Fire)

Hoření hořlavé směsi plynů nebo par se vzduchem, při kterém se plamen šíří podzvukovou rychlostí, takže nedochází k tvorbě významného přetlaku, který by způsobil tlaková poškození.

Dávka

Celkové množství daného činitele (např. chemické látky) přijaté lidským organismem nebo definovaným subjektem životního prostředí.

Deflagrace

Výbušná přeměna, při které lineární rychlost šíření reakční zóny do nezreagovaného materiálu je vždy menší než rychlost zvuku za místních podmínek (několik $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až stovky $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Domino efekt

Domino efektem se v analýze rizika rozumí možná eskalace událostí, kdy událost u jednoho objektu/zařízení může být příčinou události u jiného objektu/zařízení, a tím může dojít ke zvýšení pravděpodobnosti vzniku závažné havárie a ke zvýšení jejích následků v důsledku umístění podniků nebo skupiny podniků a jejich nebezpečných látek (např. ztráta obsahu jednoho zařízení vede ke ztrátě obsahu jiného zařízení a tím k rozšíření havárie).

Dvoufázový únik

Únik, kde je vedle sebe přítomna kapalná i plynná fáze.

Ekosystém

Funkční soustava živých a neživých složek životního prostředí, jež jsou navzájem spojeny výměnou látek, tokem energie a předáváním informací a které se vzájemně ovlivňují a vyvíjejí v určitém prostoru a čase.

Exploze

Náhlé uvolnění energie, které způsobí vznik výbuchové vlny (též přetlaková nebo rázová vlna). Škody jsou způsobeny kromě tlakových účinků tepelnou expozicí, letícími úlomky.

Expozice

Kontakt fyzikálního, chemického, případně biologického faktoru (činitele) s vnějšími hranicemi organismu nebo definované části životního prostředí.

Frekvence, četnost

Počet výskytu určité události, jevu nebo následku za časovou jednotku (obvykle za rok).

Frekvence havárií

Počet výskytu havárie za časovou jednotku.

Havárie

Neplánovaná, náhlá, nežádoucí událost, která vznikla v souvislosti s provozem technických zařízení, a která způsobí zranění či smrt lidí, hospodářských zvířat, škodu na životním prostředí a majetku, včetně výrobních ztrát.

Havarijní plán

Dokument, v němž jsou na základě identifikovaných potenciálních havárií uvedeny popisy činností a opatření prováděných při vzniku těchto havárií, vedoucí k minimalizaci jejich následků. Vnitřní havarijní plán se týká vlastního objektu nebo zařízení. Vnější havarijní plán se týká okolí objektu nebo zařízení – územního celku, kde se kromě daného objektu nebo zařízení nacházejí další zájmové objekty nebo zařízení (průmyslové objekty a zařízení, občanská zástavba, infrastruktura, energetické a jiné systémy), a možnosti jejich vzájemného ovlivňování a vztahů mezi nimi.

Hodnocení rizik

Komplexní proces kvantitativního ohodnocení frekvence nebo pravděpodobnosti nežádoucích událostí a jejich následků, zvláště s ohledem na poškození zdraví a škody na majetku a životním prostředí. V řadě jiných výkladů je tento proces ještě doplněn

o rozhodnutí o závažnosti rizika nebo jeho složek na základě výsledků analýzy rizika buď relativním oceněním strategie redukce rizika nebo porovnáním s cílovým rizikem.

Identifikace rizik

Proces rozpoznávání, že existuje nebezpečí a definování jeho charakteristik.

Iniciace

Proces, kdy vlivem působení mechanické, elektrické, tepelné nebo jiné energie na hořlavou látku dojde k jejímu hoření a/nebo explozi.

Iniciační událost

Děj nebo stav, který iniciuje škodlivý potenciál nebezpečí (zdroje rizika) v rámci scénáře jeho uplatnění. Iniciační událostí je např. působení energetického impulsu na směs par hořlavé látky se vzduchem v mezích hořlavosti/výbušnosti, selhání funkce určitého zařízení, „ujetí“ chemické reakce apod. Iniciační událost je výchozí událostí pro sestavení scénáře havárie.

Interakce

Vzájemné působení dvou a více objektů.

Jednorázový únik

Únik určitého množství látky ve velmi krátké době, obvykle v několika sekundách. Jedná se v podstatě o okamžité uvolnění obsahu nebezpečné látky.

Karcinogenní látka

Látka, která může v živém organismu vyvolat zhoubné bujení.

Kemlerův kód

Označení nebezpečných látek, jde o dvoumístnou až třímístnou kombinaci čísel, v některých případech doplněných na začátku písmenem X, což znamená, že látka nesmí přijít do styku s vodou. Jestliže jsou číslice v tomto kódu zdvojené nebo ztrojené, znamená to stupňování nebezpečí. Postačí-li k udání nebezpečí pouze jedna číslice, doplní se na druhé místo 0.

Koncentrace

Množství rozpuštěné látky vyjádřené na jednotku objemu či hmotnosti rozpouštědla.

Kontinuální únik

Únik určitého konstantního množství látky, který trvá určitou delší dobu, která musí být minimálně po dobu tvorby maximální velikosti oblaku.

Křivka F – N

Graf v logaritmických souřadnicích, kde osa **x** představuje míru následků **N** (např. počet úmrtí), osa **y** reprezentuje kumulativní frekvenci havárií s vyjádřenou mírou následků **N** nebo více.

LC50 (Lethal Concentration, 50% Mortality)

Střední smrtelná koncentrace – koncentrace látky, pro kterou se předpokládá, že způsobí v daném časovém intervalu smrt u 50% jedinců vystavených účinkům látky po určitou dobu (obvykle 10 nebo 30 minut).

LD50 (Lethal Dose, 50% Mortality)

Střední smrtelná dávka – dávka, u které se předpokládá, že způsobí v daném časovém intervalu smrt u 50% jedinců vystavených účinkům látky.

Mimořádná událost

Škodlivé působení sil a jevů vyvolaných činnostmi člověka, přírodními vlivy, a také havárie, které ohrožují život, zdraví, majetek nebo životní prostředí a vyžadují provedení záchranných a likvidačních prací.

Model PLUME

Laminární – difúzní model rozptylu oblaku uvolněné látky při kontinuálním úniku látky do okolní atmosféry.

Model PUFF

Laminární – difúzní model rozptylu oblaku uvolněné látky při jednorázovém úniku látky do okolní atmosféry.

Model těžkého plynu „BOX“

Model použitelný pro úniky těžkého plynu (těžšího než vzduch). Uvolněný oblak je modelován jako válec se stejným počátečním poloměrem a výškou, který se skládá ze směsi nebezpečné látky v plynné formě, kapiček a vzduchu.

Model TNT

Model stanovení ekvivalentní hmotnosti nálože TNT, která vyvolá vzdušnou výbuchovou vlnu stejných parametrů jako zkoušená výbušnina.

Mutagenní látka

Látka evokující tvorbu mutací.

Následek havárie

Skutečný rozsah projevu havárie. Je vyjádřen určitými dopady, jako jsou zdravotní následky (expozice, zranění, smrt), škody na majetku, účinky na životní prostředí,

provedení evakuace apod. Dále se může se jednat o dosah pásem ohrožení tlakovou vlnou, dosah působení tepelné radiace pro zvolenou dobu expozice, dosah zamoření pro zvolenou toxickou koncentraci.

Nebezpečí, zdroj rizika

OECD definuje obecně nebezpečí jako vnitřní vlastnost činitele nebo situace mající potenciál způsobit nepříznivé jevy, když je organismus, systém nebo (část) populace vystavena tomuto činiteli.

Seveso II definuje nebezpečí jako vnitřní vlastnost nebezpečné látky nebo fyzické/fyzikální (či fyzicky existující) situace, s možností vzniku poškození lidského zdraví a/nebo životního prostředí.

CPQRA definuje nebezpečí jako chemickou nebo fyzickou/fyzikální podmínku (stav, okolnost), která má potenciál způsobit škodu lidem, životnímu prostředí nebo na majetku (např. tlakový zásobník s amoniakem).

ČSN IEC 61882 Studie nebezpečí a provozuschopnosti (studie HAZOP) – Pokyn k použití definuje nebezpečí jako potenciální zdroj poškození či újmy, přičemž poškozením či újmou rozumí fyzické zranění nebo újmu na zdraví lidí či škodu na majetku nebo životním prostředí.

Nebezpečná chemická látka

Vybraná nebezpečná chemická látka nebo chemický přípravek, který vykazuje jednu nebo více nebezpečných vlastností, klasifikovaných podle § 3 až §5 zákona č. 157/1998 Sb., o chemických látkách a chemických přípravcích, ve znění zákona č. 352/1999 Sb., a které jsou uvedeny v příloze č. 1 k zákonu.

Nehoda

Nepředvídaná, nežádoucí událost, která nemusí být spojena se zraněním člověka nebo poškozením zařízení, přerušující však vykonávání činnosti. Předchází jí vždy nebezpečné jednání nebo nebezpečné podmínky, příp. obojí současně.

Nežádoucí událost

Událost, která má nepříznivé důsledky pro člověka, životní prostředí a průmyslový provoz.

Ohnivá koule (Fireball)

Stoupající hořící mrak hořlaviny a vzduchu, jehož energie je emitována primárně ve formě radiačního tepla. Vnitřní jádro mraku se skládá téměř výlučně z hořlaviny, zatímco vnější vrstva (kde se nejprve vyskytne vznícení) se skládá ze směsi hořlavina – vzduch. Protože

vztahové síly horkých plynů se zvětšují, hořící mrak má tendenci stoupat, expandovat a dostává kulový tvar.

Porucha

Ukončení schopnosti objektu vykonávat požadovanou funkci.

Pozn. 1: Po poruše je objekt v poruchovém stavu, který může být úplný nebo částečný.

Pozn. 2: „Porucha“ je jev, na rozdíl od „poruchového stavu“, což je stav.

Požár kaluže (Pool Fire)

Hoření materiálu vypařujícího se z vrstvy kapaliny.

Ppm (Parts per million)

Jedna miliontina celku.

Pravděpodobnost

Míra výskytu nějaké události/jevu (daný případ/jev k celkovému počtu všech sledovaných případů/jevů), vyjádřená číselně hodnotou mezi 0 a 1.

Přijatelnost rizika

Míra nebezpečnosti systému, pravděpodobnost vzniku úrazu, kterou za stávajících technických, organizačních, ekonomických a sociálních podmínek se ještě považuje za únosnou.

Radioaktivita

Schopnost atomových jader vysílat záření a nestabilní atomová jádra se jím postupně mění v stabilní jádra jiných prvků.

Riziko

Existují různé definice rizika. Riziko je obecně pravděpodobnost výskytu nežádoucí události s nežádoucími následky.

Zákon č. 353/1999 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami a chemickými přípravky definuje riziko pro účely zákona jako pravděpodobnost vzniku zvláštních účinků ve specifikovaném období nebo za specifikovaných okolností. Pro znázornění výsledků ocenění rizika se používá např. matice rizika, jednorozměrná míra rizika, střední míra úmrtí, isolinie rizika (individuální riziko), F – N křivka (společenské riziko).

Riziko závažné havárie

Pravděpodobnost vzniku závažné havárie a jejích možných následků, které by mohly nastat během určitého období nebo za určitých okolností.

Spolehlivost (dependability)

Souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovosti, udržitelnosti a zajištěnosti údržby.

Tepelná radiace

Přenos energie (tepla) prostřednictvím elektromagnetického vlnění. Nositeli tepelné energie jsou elementární částice hmoty (fotony), šířící se rychlostí světla. Vyskytuje se u jevů požár kaluže (Pool Fire), bleskový požár (Flash Fire), tryskový požár (Jet Fire), ohnivé koule (BLEVE).

Tlaková vlna

Rychle se šířící vlna zhuštěného vzduchu v atmosféře charakterizovaná postupnou změnou tlaku, hustoty a teploty na jejím čele. Obvykle je vytvořená a uvedená do pohybu explozí. Trajektorie šíření této vlny je ve směru od epicentra výbuchu a pohybuje-li se kontinuálním prostředím, pak její rychlost je ve všech směrech stejná.

Tryskový požár (Jet Flame, Fire)

Hoření směsi kapaliny a par, vytékající pod tlakem velkou rychlostí z únikového otvoru (často nadzvukovou rychlostí) s vysokým stupněm turbulencí a velkým množstvím přísávaného vzduchu. Následkem těchto podmínek pro hoření dochází k vysoké tepelné radiaci. Vizually se požár jeví jako výšleh plamene a následně jako hořící pochodeň.

Toxicita

Schopnost chemické látky způsobit poškození živé tkáně, narušení centrálního nervového systému, závažné zranění, nebo smrt po požití, inhalaci nebo absorpci kůží. Toxicita se často dělí na akutní toxicitu, subakutní (subchronickou) a chronickou.

Toxická dávka

Obdržená toxická dávka, matematicky vyjádřená jako $(C^n \cdot t)$ v případě konstantní koncentrace v průběhu času, nebo jako $(\int C^n dt)$, kde n je koeficient charakteristický pro každou látku).

Únik

V analýze rizik se analyzuje únik (uvolnění, emise) materiálu (látky) z kontejmentu, systému nebo procesu. Může být jednorázový, kontinuální nebo časově omezený. Co se týče skupenství materiálu, jedná se o únik plynu/páry, kapaliny, dvoufázový únik pára/kapalina, popř. uvolnění pevné látky. Co se týče uvolněného množství, může jít o malé úniky kapalin – netěsnosti a průsaky [*leakage, leaks*]; rozlití či přetečení kapalin nebo rozsypaní pevné látky [*spillage*]; popř. významná množství plynů/par, kapalin, popř.

pára/kapalina [*release*]. Typ úniku závisí na způsobu, jakým je kontejment porušen, na vlastnostech přítomné chemické látky a podmínkách skladování nebo zpracování.

UN kód

Čtyřmístné přírůstkové číslo v registru nebezpečných látek OSN pro více než 3000 položek.

UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion)

Exploze nahromaděného oblaku směsi hořlavých par nebo plynu se vzduchem.

Zdroj rizika

Zákon č. 353/1999 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami a chemickými přípravky rozumí zdrojem rizika (nebezpečím) podstatnou vlastnost nebezpečné látky a konkrétní situace, které mohou způsobit závažnou havárii.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ALOHA	označení software (Areal Locations of Hazardous Atmosphere)
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion exploze rychle se rozpínajícího oblaku par vroucí kapaliny
BOX	model těžkého plynu
CAMEO	označení software (Computer – Aires Management of Emergency Operations)
CBA	Cost – Benefit Analysis analýza nákladů a užitků
CCA	Cause – Consequence Analysis analýza příčin a dopadů
CFD	Computational Fluid Dynamics model dynamiky tekutin
CL	Checklist Analysis analýza kontrolním seznamem
CPQRA	Chemical Process Quantitative Risk Analysis komplex metod použitý v logickém procesu hodnocení rizika chemických procesů pomocí míry rizika.
ERPG – 1	hodnota maximální koncentrace látky v ovzduší, do které je možno se domnívat, že téměř všichni jednotlivci by mohli být nechráněni po dobu jedné hodiny, aniž by zakusili jiné nežli mírné přechodné nepříznivé účinky na svém zdravotním stavu nebo postřehli zřetelně nepříjemný zápach
ERPG – 2	hodnota maximální koncentrace látky v ovzduší, do které je možno se domnívat, že téměř všichni jednotlivci by mohli být nechráněni po dobu jedné hodiny, aniž by zakusili nebo se u nich vyvinuly nezvratné nebo další vážné účinky nebo příznaky, které by mohly poškodit jejich schopnosti podniknout záchrannou činnost
ERPG – 3	hodnota maximální koncentrace látky v ovzduší, do které je možno se domnívat, že téměř všichni jednotlivci by mohli být nechráněni po dobu jedné hodiny, aniž by zakusili nebo se u nich vyvinuly účinky ohrožující zdraví nebo život
ETA	Event Tree Analysis analýza stromem událostí

F&EI	Dow's Fire & Explosion Index index požáru a exploze
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis analýza způsobů a důsledků poruch
FTA	Failure Tree Analysis analýza stromem poruch
HAZOP	Hazard and Operability Analysis studie nebezpečí a provozuschopnosti
HRA	Human Reliability Analysis analýza spolehlivosti člověka
HZS ČR	Hasičský záchranný sbor České Republiky
IDLH	Immediately Dangerous to Life and Health maximální koncentrace nebezpečné látky ve vzduchu na pracovišti, z kterého může jedinec uniknout během 30 minut, bez jakýchkoliv příznaků, které by narušily únik nebo by měly nevratné zdravotní následky
PHA	Preliminary Hazard Analysis předběžná analýza zdrojů rizika
PLUME	model kontinuálního úniku
Ppm	parts per milion
PUFF	model okamžitého úniku
RR	Relative Ranking relativní klasifikace
SEČ	středoevropský čas
SERIDA	Safety Environment Risk Database
SR	Safety Review bezpečnostní prohlídka
TerEx	označení software (Teroristický expert)
TNT	trinitrotoluen
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion exploze neohraničeného mraku par

1 ÚVOD

Díplomová práce se zabývá hodnocením rizika transportu nebezpečných látek na železnici. V první části jsou představeny základní obecné postupy analýzy rizik. Ve druhé části je popsána metodika pro hodnocení rizika přepravy nebezpečných látek po železnici. Ve třetí části je tato metodika použita pro určení rizika spojeného s přepravou nebezpečných látek přes hlavní železniční nádraží v Liberci.

Jelikož hodnocení rizika je velmi důležité pro mnohá odvětví lidského působení, zabývá se metodami a postupy hodnocení rizika řada odborníků a institucí. Analýza a hodnocení rizika je nutným předpokladem pro efektivní řízení rizika. Analýzy rizik jsou významné jak pro havarijní plánování, tak pro integrovaný záchranný systém. Analýzy rizik jsou využívány v rozhodovacích procesech při povolování průmyslových i jiných staveb. Proto je identifikaci rizik a jejich hodnocení věnována značná pozornost.

Jak je zřejmé z definice rizika, je při jeho hodnocení nutné uvažovat jak pravděpodobnost vzniku nežádoucí události, tak její následek. Následky nežádoucích událostí jsou rozmanité. Jejich spektrum sahá od jednoduchých ekonomických ztrát způsobených výpadkem výrobního zařízení až po závažné zasažení lidí a jednotlivých složek životního prostředí nebezpečnými chemickými látkami a radioaktivitou.

2 CÍLE PRÁCE

Cíle vyplývají ze zadání diplomové práce. Je to seznámení se základními postupy analýzy rizik (stanovení pravděpodobnosti vzniku nebezpečné nežádoucí události, modelování následků úniku nebezpečné látky). Dále zpracování dat o nehodovosti na železnici a stanovení pravděpodobnosti nehody s únikem nebezpečné látky ve zvolené lokalitě. Touto lokalitou je hlavní železniční nádraží v Liberci. V neposlední řadě je to popis šíření nebezpečné látky a modelování jejího šíření vhodným softwarovým prostředkem. Nejdůležitějším cílem je stanovení rizika úmrtí obyvatel při přepravě nebezpečných látek přes hlavní železniční nádraží v Liberci a návrh opatření k jeho redukci. K dosažení těchto cílů je potřeba využívat postupy a metody, které s touto problematikou úzce souvisí.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Riziko

Ve většině oborů lidské činnosti má termín riziko rozdílný význam. Ve všech definicích rizika se objevují dvě hlavní složky:

- Pravděpodobnost vzniku nežádoucí události
- Nežádoucí následky

Riziko je definováno jako součin pravděpodobnosti vzniku nežádoucí události a jejích následků. Tuto formulaci lze shrnout do symbolické rovnice:

$$R = P \cdot N \quad (3 - 1)$$

R riziko

P pravděpodobnost vzniku nežádoucí události

N nežádoucí následky

Aby bylo možno určit riziko, musí být vyhodnoceny oba parametry rovnice (pravděpodobnost vzniku nežádoucí události, nežádoucí následky).

Hodnocení rizika představuje komplexní úlohu. Je složeno z řady dílčích úloh. Jejich kombinace závisí na typu řešené úlohy, tj. na hodnocení rizika definované nežádoucí události.

Spektrum nežádoucích událostí je obecně rozmanité, od selhání technického zařízení až po politickou nestabilitu a daném regionu.

Vzhledem k zadání diplomové práce je hodnocení rizika zaměřeno na riziko spojené s únikem nebezpečných látek při selhání technického zařízení.

Následky nežádoucích událostí se v tomto případě týkají jak prostých ekonomických ztrát, tak újmy na zdraví a životech obyvatelstva environmentálních škod. Je tedy možné rozdělit následky nežádoucích událostí na tři základní skupiny:

- Následky na lidech
- Následky na okolním prostředí
- Sociálně – ekonomické následky

Středem našeho zájmu je samozřejmě první kategorie. Týká se nepříznivých účinků nehod na zaměstnance podniku a populaci v okolí. Tyto účinky mohou být dále rozděleny na akutní a chronické, na úmrtí a zranění. Druhá kategorie uvažuje účinky nehod na životní

prostředí a ekosystém. Třetí kategorie slučuje ekonomické ztráty vlastníků podniku a škody na budovách způsobené nehodou (ztráta produkce, surovin, zařízení, škody na budovách, atd.).

3.2 Analýza rizik

Analýza rizik se skládá ze tří základních částí:

- Identifikace zdrojů rizik
- Aplikace metod vhodných pro hodnocení rizik
- Výpočet rizika a posouzení jeho přijatelnosti

3.2.1 Identifikace zdrojů rizik

Identifikace zdrojů rizika spočívá v identifikaci těch částí systému, kde jsou ve významném množství umístěny nebezpečné látky nebo je zde s nimi manipulováno. Počáteční identifikace zdrojů rizika se dá provést mnoha různými metodami vyhledávání zdrojů rizika. Výsledkem počáteční identifikace zdrojů rizika je seznam zdrojů rizika. Následuje posouzení významnosti zdrojů rizika a jejich ohodnocení podle stupně závažnosti, zpravidla podle množství nebezpečné látky a jejích vlastností. Výstupem je seznam jednotlivých zdrojů rizika uspořádaných podle odhadované závažnosti.

3.2.2 Metody používané při hodnocení rizik

Tato kapitola podává přehled metod používaných pro hodnocení rizik. Metody používané k hodnocení rizika lze dělit do několika skupin podle účelu, ke kterému jsou použity.

- Srovnávací metody
- Analytické metody
- Metody modelování úniku
- Metody modelování požáru a výbuchu
- Metody hodnocení zranitelnosti

Stručný popis těchto metod je uveden v následujících podkapitolách.

3.2.2.1 Srovnávací metody

Tyto metody jsou založeny na porovnávání a aplikaci zkušeností získaných z provozu zařízení. Jsou doplněny prohlídkou zařízení. Cílem srovnávacích metod je nalezení slabých míst provozovaného zařízení a subjektivní sestavení žebříčku nebezpečných zařízení podle

Analýza rizika a provozní podmínky

jejich podílu na potenciálním vzniku nežádoucí události s nežádoucími následky. Hlavní srovnávací metody jsou:

- RR Relative Ranking (relativní klasifikace)
- SR Safety Review (bezpečnostní prohlídka)
- CA Checklist Analysis (analýza kontrolním seznamem)

Pomocí srovnávacích metod lze vyhledat potenciálně nebezpečné části hodnoceného zařízení. Tyto metody nemají schopnost vyjádřit číselně hodnotu pravděpodobnosti selhání jednotlivých částí zařízení. Proto nelze pomocí srovnávacích metod kvantifikovat podíl jednotlivých komponent zařízení na pravděpodobnosti vzniku nebezpečné události. Pomocí těchto metod nelze vyčíslit míru rizika.

Relativní klasifikace (RR – Relative Ranking)

Metoda relativní klasifikace je postavena na základě posouzení fyzikálních a chemických parametrů látek, nacházejících se v procesu, informací o maximálních kapacitách látek, podmínkách procesu a geografickém umístění nebezpečných látek.

Hlavní účel relativní klasifikace je stanovit, které části zařízení představují nejvýznamnější zdroje rizika. Metoda relativní klasifikace je založena na ohodnocení jednotlivých zdrojů rizika.

Mnoho organizací si vytvořilo svou vlastní speciální indexaci pro vytvoření žebříčku zdrojů rizika. Např. chemická společnost Dow Chemical Company má několik typů indexů, které používá pro vyhodnocování rizik procesů a činností. Jeden z nich se nazývá index chemické expozice (Dow's Chemical Exposure Index – CEI). Index CEI je používán pro seřazení nebezpečných chemických látek. Nebezpečné látky jsou seřazeny podle potenciálních nežádoucích následků pro člověka při jejich potenciálním úniku. Index CEI používá jednoduchou metodiku, která zařadí jakoukoliv toxickou chemickou látku. Metodika je založena na pěti faktorech [5]:

- Míra toxicity látky
- Rychlost okamžitého přechodu materiálu do ovzduší
- Vzdálenost ke každé ploše, kde je třeba uvažovat toxické dopady
- Molekulová hmotnost hodnocené toxické látky
- Procesní proměnné, které mohou ovlivnit podmínky úniku (teplota, tlak, atd.)

Jiným typem relativní klasifikace je metoda Dow's Fire & Explosion Index (F&EI). F&EI hledá zdroje rizika a posuzuje jejich závažnost z hlediska možného vzniku požáru nebo

exploze. Zařízení je rozděleno do jednotlivých procesních jednotek, kterým jsou přiděleny indexy. Indexy uvažují materiálové, fyzikální a chemické charakteristiky nebezpečných látek, dále pak podmínky procesu, uspořádání procesu, umístění zařízení a další faktory. Tyto faktory jsou kombinovány a vzniká tzv. F&EI skóre. Skóre je možným porovnávacím parametrem s jinými analyzovanými zařízeními [4].

Mezi další srovnávací metody založené na indexaci zdrojů rizika patří:

- Substance Hazard Index (SHI) – metoda vyvinutá společností Organization Resources Counselors. Metoda slouží jako nástroj pro klasifikaci nebezpečnosti látek. Index SHI je definován jako podíl rovnovážné koncentrace látky za normální teploty a prudce toxické koncentrace stejné látky ve vzduchu.
- Material Hazard Index (MHI) – metoda, která je používána pro stanovení limitního množství nebezpečné látky, které je přípustné z hlediska bezpečnosti. Při překročení tohoto limitu musí být provedena bezpečnostní opatření.
- Threshold Planning Quantity (TPQ) Index – metoda, kterou zavedla organizace Environmental Protection Agency. Pro látky překračující přípustné limity množství musí být podniknuta bezpečnostní opatření. Je obdobný jako MHI.
- Rapid Ranking – metoda, která umožňuje rychlou identifikaci nebezpečí požáru a ohrožení toxickou látkou. Jedná se o propojení zjednodušených modifikací metod CEI a F&E I společnosti Dow Chemical Company. Seznam otázek je značně zjednodušený.

Bezpečnostní prohlídka

Bezpečnostní prohlídka se skládá z inspekčních pochůzek, které provádí specialista dobře obeznámený s bezpečnostními postupy a parametry. Vyhodnocení bezpečnostních prohlídek vede k určení provozních činností zařízení, které mají potenciál ke vzniku nežádoucí události spojené s nežádoucími následky. Bezpečnostní prohlídky mohou sloužit k získání informací o zařízení, nebo ke kontrole správné funkce zařízení.

Typická bezpečnostní prohlídka zahrnuje vizuální kontrolu zařízení a rozhovory s mnoha lidmi podniku jako jsou operátoři, údržbáři, inženýři, bezpečnostní pracovníci, atd.

Po vyhodnocení parametrů získaných z bezpečnostní prohlídky je navržen soubor potřebných opatření ke snížení rizika vzniku nežádoucí události. Výsledkem bezpečnostní prohlídky jsou tedy kvalitativní popisy možných bezpečnostních problémů a doporučená opatření k jejich nápravě [6].

Analýza kontrolním seznamem (CA – Checklist Analysis)

Analýza kontrolním seznamem používá seznam komponent zařízení, spolu s jejich základními parametry, podle kterých se ověřuje stav zařízení. Podrobný kontrolní seznam poskytuje základ pro standardní zhodnocení zdrojů rizika.

Kontrolní seznam obsahuje otázky týkající se možných nedostatků nebo odchylek od standardního provozu zařízení. Vyplněný kontrolní seznam obsahuje na dané otázky odpovědi typu „ANO“, „NE“, „NEAPLIKOVATELNÝ“, „POTŘEBA VÍCE INFORMACÍ“.

Aby byla metoda provedena správně, je potřeba disponovat kontrolním seznamem vytvořeným ve fázi projektu zařízení a provozní manuál zařízení. Vyplnění kontrolního seznamu provádí osoba, která má znalosti o kontrolovaném zařízení [6].

3.2.2.2 Analytické metody

Analytické metody založené na deterministickém přístupu analyzují příčiny vzniku nežádoucích nebezpečných událostí a scénáře rozvoje nebezpečné události. Řadíme sem tyto metody:

- PHA Preliminary Hazard Analysis (předběžná analýza zdrojů rizika)
- W – I What If Analysis (analýza „Co se stane, když...“)
- HAZOP Hazard and Operability Analysis (studie nebezpečí a provozuschopnosti)
- FMEA Failure Mode and Effects Analysis (analýza způsobů a důsledků poruch)
- FTA Fault Tree Analysis (analýza stromem poruch – kvalitativní)
- ETA Event Tree Analysis (analýza stromem událostí – kvalitativní)
- CCA Cause – Consequence Analysis (analýza příčin a následků)
- HRA Human Reliability Analysis (analýza lidské spolehlivosti)

Při aplikaci těchto metod jsou definovány nežádoucí události, pro které je vypracován seznam poruch zařízení, komponent a lidských chyb, které vedou k definovaným nežádoucím událostem.

Předběžná analýza zdrojů rizika (PHA – Preliminary Hazard Analysis)

Předběžná analýza zdrojů rizika (PHA) se soustřeďuje na nebezpečné látky a hlavní procesy v podniku. Pomocí této metody je sestaven seznam zdrojů rizika. Při sestavování tohoto seznamu jsou uvažovány tyto parametry provozu:

- Suroviny, meziprodukty, konečné produkty
- Vzájemná reaktivita surovin, produktů

- Zařízení provozu, umístění provozu
- Okolí provozu
- Provozní činnosti (testování, údržba)
- Rozhraní mezi komponentami systému

PHA poskytuje kvalitativní popis zdrojů rizika a jejich seřazení podle potenciálního nebezpečí [6].

Analýza „Co se stane, když...“ (W – I – What If Analysis)

Analýza „Co se stane, když...“ je hledání založena na diskuzi a hledání nápadů. Skupina odborníků dobře seznámených s parametry zařízení diskutuje nad potenciálními nežádoucími událostmi. Hlavním úkolem analýzy „Co se stane, když...“ je identifikovat nebezpečné situace, nebo nehodové události, které by mohly způsobit nežádoucí následky. Vytvořený tým odhaluje příčiny nežádoucích a jejich možné následky a navrhuje možnosti snížení rizika.

Analýza „Co se stane, když...“ vytváří seznam otázek a odpovědí o zařízení [6].

Analýzy nebezpečí a provozuschopnosti (HAZOP – Hazard and Operability Analysis)

Analýza HAZOP byla vyvinuta pro předvídaní ohrožení a provozních problémů nového zařízení. Později byla metoda shledána jako efektivní pro použití na již existující procesy a zařízení.

Použití HAZOP vyžaduje podrobné zdroje informací týkající se projektu a provozu analyzovaného zařízení.

HAZOP je týmová metoda, která rozpoznává problémy týkající se provozuschopnosti zařízení a nebezpečí spojená s jeho selháním. Analýza je prováděna týmem pod vedením zkušeného vedoucího podle tzv. vodících (klíčových) slov. Tým se zabývá nalezením odchylek od standardního provozu zařízení, hledá příčiny těchto odchylek a hodnotí následky, které mohou tyto odchylky způsobit. Je-li rozpoznán problém, je zaznamenán pro další hodnocení a řešení.

Výsledky analýzy HAZOP jsou nalezené odchylky od standardního provozu zařízení, jejich příčiny a doporučení pro odstranění těchto odchylek [16].

➤ Vytváření analýzy

➤ Analýza analýzy analýzy analýzy

Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis)

Analýza způsobů a důsledků poruch vyžaduje pro správné provedení seznam zařízení systému nebo podniku, znalost funkcí zařízení a způsobů poruch, znalost funkcí celého systému nebo podniku a znalost odezev na selhání zařízení.

Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA) tedy vychází ze seznamu zařízení. U každého zařízení jsou uvedeny potenciální poruchy a jejich možné nežádoucí účinky. FMEA identifikuje primární způsoby poruchy, které vedou k nehodě nebo k ní významně přispějí. Účelem FMEA je identifikovat způsoby poruch jednotlivých zařízení a jejich následky.

Výsledkem FMEA je seznam zařízení, způsobů možných poruch jednotlivých zařízení a možných následků pro zařízení nebo funkci systému, jehož je součástí.

Logickým rozšířením FMEA je uvažování kritičnosti a pravděpodobnosti výskytu způsobů poruch. Tato analýza kritičnosti identifikovaných způsobů poruch je známa jako FMECA. Pomocí metody FMECA lze tedy hodnotit kritičnost jednotlivých poruch a pravděpodobnost výskytu poruch [18].

Analýza stromem poruch (FTA – Fault Tree Analysis)

Analýza stromem poruch je deduktivní metoda, která se zaměřuje na jednu určitou nehodu nebo velké selhání zařízení a stanovuje příčiny takové události.

Strom poruch je grafický model, který znázorňuje logické vztahy mezi tzv. vrcholovou událostí a mezi příčinami vzniku této události. Příčiny mohou být v provozních podmínkách, běžných očekávaných poruchách zařízení, chybách obsluhy, odchylkách provozních parametrů zařízení apod. Strom poruch reprezentuje kombinace poruch zařízení, které mohou vést ke vzniku vrcholové události. Vrcholová událost tedy reprezentuje nežádoucí událost.

Analýza stromem poruch obsahuje:

- Přípravnou část (definice tzv. vrcholové události)
- Tvorbu stromu poruchových stavů
- Kvalitativní analýzu stromu poruchových stavů
- Kvantitativní analýzu stromu poruchových stavů
- Vyhodnocení analýzy

Výstupem analýzy stromem poruch může být:

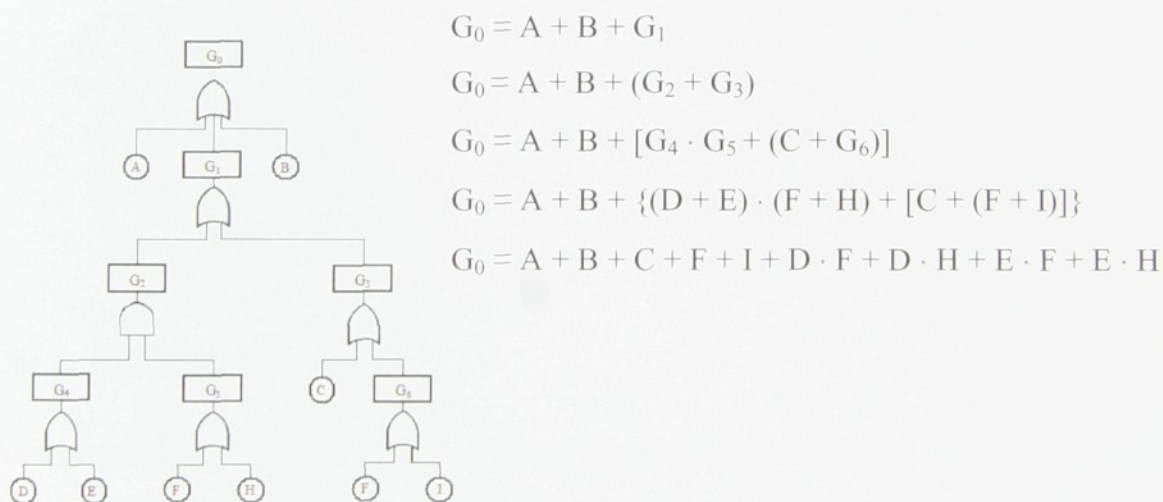
- Soupis možných kombinací provozních podmínek, podmínek prostředí, chyb lidského faktoru, provozních poruch prvků, které mohou vést ke vzniku nežádoucí vrcholové události
- Pravděpodobnost, s jakou nežádoucí vrcholová událost může v provozu nastat během časového intervalu

Analýze FTA často předchází provedení analýzy systému jinou metodou, např. FMEA nebo FMECA. Výhoda FTA je v její schopnosti identifikovat kombinace základních poruch a lidských chyb, které mohou vést k nežádoucí události. Toto umožňuje zaměřit se na preventivní opatření týkající se významných základních příčin tak, aby byla omezena možnost vzniku nežádoucí události.

FTA vytváří logické modely poruch systému. Tyto modely používají booleovských logických hradel (např. AND, OR) pro zápis způsobů, jak mohou být selhání zařízení a lidské chyby zkombinovány, aby zapříčinily velkou systémovou poruchu.

FTA se hodí pro analýzy velkých členitých systémů.

Následující obrázek ukazuje příklad jednoduchého kvalitativního stromu poruch.

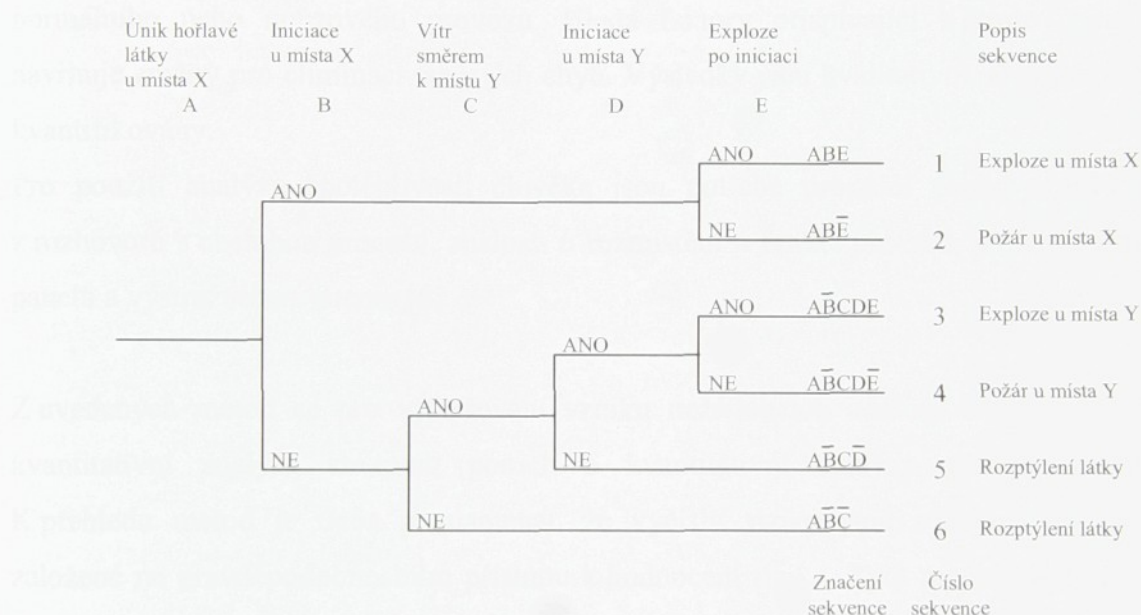


Obr. 1: Jednoduchý strom poruch

Pokud je známa pravděpodobnost nastoupení elementárních poruch zařízení, je možné provést kvantitativní analýzu stromu poruch. Cílem je určení ukazatelů, charakterizujících vrcholovou událost, např. pravděpodobnosti že vrcholová událost nastane v zadaném intervalu nebo střední doby do prvního nastoupení vrcholové události [17].

Analýza stromem událostí (ETA – Event Tree Analysis)

Strom událostí je grafický logický model, který ukazuje možné koncové stavy nehody, která následovala po iniciační události (určitá porucha zařízení, lidská chyba). Stromy



31

Analýza lidské spolehlivosti (HRA – Human Reliability Analysis)

Analýza lidské spolehlivosti hodnotí faktory, které ovlivňují výkonnost operátorů, údržbářů, techniků a ostatních zaměstnanců podniku. HRA hledá situace v provozu náchylné k chybám nebo omylům, které mohou vést k nežádoucím událostem. Může být použita také pro identifikování příčin lidských chyb. Provádí se obvykle ve spojení s jinými technikami hodnocení zdrojů rizika (např. bezpečnostní prohlídka).

Účelem analýzy spolehlivosti člověka je identifikovat potenciální lidské chyby a jejich následky pro zařízení nebo identifikovat příčiny lidských chyb.

Analýza spolehlivosti člověka vytváří seznam chyb, které se mohou vyskytnout během normálního nebo nouzového provozu. Hledá faktory přispívající k těmto chybám a navrhuje změny pro eliminaci takových chyb. Výsledky jsou kvalitativní, ale mohou být i kvantifikovány.

Pro použití analýzy spolehlivosti člověka jsou potřeba procesní postupy, informace z rozhovorů s obsluhou procesu, znalosti o rozmístění a funkci procesu, umístění řídicího panelu a výstražného systému [6].

Z uvedených metod se pro vyšetřování vzniku nežádoucích událostí nejvíce používají kvantitativní analýza stromem poruch a kvantitativní analýzy stromem událostí. K přehledu metod je třeba poznamenat, že vyčíslit riziko jsou schopny jen metody založené na pravděpodobnostním přístupu k hodnocení rizika. Tyto metody byly nejprve používány v jaderné energetice. Obecně jsou známy pod označením **pravděpodobnostní hodnocení rizika** (PRA – Probability Risk Assessment). Představují souhrn metod používaných pro stanovení pravděpodobnosti a následků úniku radioaktivních látek. V ostatních průmyslových oborech se zvýšenou mírou nebezpečí se častěji používá termín **kvantifikované hodnocení rizika** (QRA – Quantified Risk Assessment).

V chemickém průmyslu jsou tyto metody označovány jako CPQRA (Chemical Process Quantitative Risk Analysis) [7].

3.2.2.3 Metody modelování úniku

Běžný vývoj nehody spojené s únikem nebezpečné látky bývá následující:

- Na počátku je výtok nebezpečné látky do prostředí. Tento výtok může být v plynné fázi, kapalně fázi nebo jako dvoufázový.
- Pokud je látka v kapalně formě, bude následovat vypařování kapaliny.
- Pokud je látka hořlavá, existuje možnost okamžité iniciace.

- Pokud je látka toxická nebo pokud je hořlavá, ale nehrozí okamžitá iniciace, pak se bude plynná forma rozptylovat do atmosféry.
- Toxická látka může být inhalována lidmi. Pokud dávka dosáhne určité prahové hodnoty, existuje možnost zranění nebo úmrtí.
- Hořlavá látka může být zapálena. Osoby v blízkosti budou ohroženy tepelnými a přetlakovými účinky požáru nebo výbuchu.
- Pokud je hořlavá látka uvolněna v kapalně formě, pak se bude vytvářet kaluž.
- Pokud se zde dodatečně objeví zdroj zapálení, dojde k požáru této kaluže.

Modely zdrojového členu

Prvním krokem při hodnocení následků úniku je definice zdrojového členu. Ten se skládá ze stanovení množství nebezpečné látky a podmínek, za kterých unikla. Protože většina událostí začíná výtokem hořlavé, toxické nebo radioaktivní látky ze zařízení, které je od vnějšího okolí nějak odděleno, je hodnocení zdrojových členů nezbytným krokem, který předchází další kroky hodnocení následků.

Důležitým parametrem je doba trvání úniku. Pokud je tato doba velmi krátká, únik může být považován za jednorázový. Na druhé straně, pokud je tato doba dlouhá ve srovnání s celkovou dobou trvání nehody, je pak únik považován za kontinuální a podle toho je modelován. Pro praktické účely považuje většina analytiků za jednorázový únik takový, který netrvá déle než 5 minut.

Uniklé množství látky může být v plynné nebo kapalně fázi, může se vyskytovat i dvoufázový únik. Pokud uniká kapalina, vytváří se obvykle kaluž a začíná vypařování. Aby se vypařování mohlo uskutečnit, musí látka absorbovat teplo z okolí (vzduch, půda). Páry kapaliny se začleňují do plynné fáze a výsledkem je zvýšení množství rozptýlené látky.

Výstupy modelů zdrojového členu vstupují do výpočtu modelů rozptylů. [2]

Modely výtoků

Modely pro výtok kapaliny a plynu jsou dobře známy z inženýrské praxe. Výběr vhodného modelu závisí na fázi a podmínkách unikající látky. Typickým příkladem modelu úniku kapaliny je Bernouliova rovnice:

$$m'_L = C_d \cdot A \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2(p - p_a)}{d} + 2gH_h} \quad (3 - 2)$$

m'_L hmotnostní rychlost úniku kapaliny [kg·s⁻¹]

C_d	únikový koeficient	[1]
A	plocha otvoru	[m ²]
d	hustota kapaliny	[kg·m ⁻³]
p	absolutní skladovací tlak	[N·m ⁻²]
p_a	absolutní tlak okolí	[N·m ⁻²]
g	gravitační tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
H_h	výška hladiny nad únikovým otvorem	[m]

Pro únik plynu by měly být použity složitější modely a měl by být učiněn rozdíl mezi případem úniku s rychlostí nadzvukovou (vysoký tlak) a podzvukovou (nízký tlak).

Modely výtoku obvykle berou jako vstupy podmínky vně a uvnitř zařízení s látkou (např. tlak, teplota) společně s charakteristikami látky. Požadovány jsou také velikost, ostrost a umístění únikového otvoru. Tato data se odvodí přímo z provozních podmínek zařízení a z úvah spojených se scénářem dané nehody. Výstupem výtokových modelů jsou charakteristiky, které zahrnují [2]:

- Vyteklé množství nebo hmotnostní rychlost výtoku
- Trvání výtoku
- Podmínky vytékající látky, tj. zda se jedná o kapalnou nebo plynnou fázi nebo o rychle se odpařující látku

Modely vypařování

Pro vypařování byla navržena řada modelů. Důležitým aspektem je zde mechanismus přenosu tepla, a to zda je dominantní přenos z půdy nebo vzduchu, nebo z vanoucího větru. Modely vypařování z kaluže jsou založeny na základních principech termodynamiky. V případě, kdy je dominantním mechanismem přenos tepla z půdy nebo vzduchu, je hmotnostní rychlost vypařování dána energetickou rovnováhou. V případě, kdy se poloměr kaluže zvětšuje, jsou třeba různé fyzikální vlastnosti terénu, např. průměrnou drsnost terénu, tepelnou vodivost, hustotu materiálu podkladu. Bližší popis modelů uvádí [2].

Modely rozptylu

Látka po úniku do atmosféry vytváří oblak, který je pak rozptylován ve směru větru. Existuje mnoho rozptylových modelů. Ty se dají rozdělit podle:

1. Chování vytvořeného mraku. Jsou to modely pro vznášivý rozptyl (Gaussův model rozptylu, Lagrangeův model rozptylu) a modely pro rozptyl těžkého plynu (BOX).
2. Trvání úniku, tj. zda může být únik považován za okamžitý („PUFF“) nebo kontinuální („PLUME“).
3. Složitosti modelování. Existují jednoduché „BOX“ modely a složité 3 – D modely, které berou v úvahu reliéf terénu (CFD – Computational Fluid Dynamics).

Gaussův model rozptylu

Je nejvíce využívaný model, který je aplikován pro plyny lehčí než vzduch. Pro kontinuální únik z vyvýšeného bodového zdroje o výšce H je koncentrace v bodě (x, y, z) dána vztahem:

$$c(x, y, z) = \frac{\dot{m}}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right] \left[\exp \frac{-(z-H_z)^2}{2\sigma_z^2} + \exp \frac{-(z+H_z)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (3-3)$$

x, y, z	vzdálenost od zdroje	[m]
$c(x, y, z)$	koncentrace látky v bodě (x, y, z)	[kg·m ⁻³]
$\dot{m}$	hmotnostní rychlost výtoku	[kg·s ⁻¹]
$u(x, y, z, t)$	rychlost větru	[m·s ⁻¹]
H_z	výška zdroje nad terénem	[m]
σ_y	horizontální disperzní koeficient	[m]
σ_z	vertikální disperzní koeficient	[m]

Lagrangeův model

Lagrangeův model simuluje rozptyl po úniku plynu lehčího než vzduch. Model předpokládá, že se únik skládá z řady částic a studuje jejich vzdušný přenos v předem stanoveném větrném poli.

„BOX“ model těžkého plynu

Model je použitelný pro úniky těžkého plynu (těžšího než vzduch). Uvolněný oblak je modelován jako válec se stejným počátečním poloměrem a výškou, který se skládá ze směsi nebezpečné látky v plynné formě, kapiček a vzduchu. Válec je přemísťován ve směru větru, převažující silou je gravitace a proto se výška válce snižuje a jeho poloměr zvětšuje. Tato fáze je známa jako „klesavá fáze“. Protože vzduch vniká do oblaku z okrajů

a shora, celá směs se ohřívá a zředňuje. Existuje určitý bod během této fáze, ve kterém je oblak natolik zředěn, že se stává lehčí než vzduch a je neutrálně rozptylován vzduchem.

Model okamžitého úniku („PUFF“)

Popisuje okamžitý jednorázový únik látky. Oblak postupuje ve směru větru, a to tak, že se zmenšuje postupným mísením se vzduchem. Na svém povrchu má ale stále stejnou koncentraci. Typickým příkladem je roztržení zásobníku a následný únik látky.

Koncentrace $C(x, y, z, t)$ pro jednorázový únik látky o hmotnosti m v čase t se počítá podle:

$$C(x, y, z, t) = \frac{m}{\sqrt{2 \cdot \pi^{3/2} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - ut}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (3 - 4)$$

$C(x, y, z, t)$	lokální koncentrace	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
m	hmotnost látky	$[\text{kg}]$
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	disperzní koeficienty	$[\text{m}]$
$u(x, y, z, t)$	rychlost větru	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

Model kontinuálního úniku („PLUME“)

Popisuje koncentraci látky unikajícího z kontinuálního zdroje. Oblak se rozptyluje ve směru větru mísením se vzduchem. Typickým příkladem je únik nebezpečných látek z komína.

Koncentraci $C(x, y, z)$, pro kontinuální únik látky s hmotnostním průtokem Q_m z jednoho zdroje, umístěného na úrovni země, při konstantní rychlosti větru u , je možno vypočítat podle:

$$C(x, y, z) = \frac{Q_m}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (3 - 5)$$

Q_m	hmotnostní průtok látky	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	rozptylové koeficienty	$[\text{m}]$
$u(x, y, z, t)$	rychlost větru	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

CFD – Computational Fluid Dynamics

Tyto modely jsou nejpropracovanější, a proto nejvýkonnější a také nejsložitější. Studují dynamiku tekutin systémů za použití velkých detailů při jejich analýze. Je řešena řada

diferenciálních rovnic pro všechny tři rozměry a každý časový okamžik. Bez problémů mohou být brány v úvahu složitý terén, překážky různého tvaru a ohraničení a zvláštnosti proudění.

Výběr odpovídajícího modelu je obtížný a závisí na požadavcích projektu, dostupnosti jednotlivých modelů a požadované přesnosti výsledků.

Rozptylové modely obvykle vyžadují jako vstupy množství a počáteční charakteristiku úniku, meteorologické podmínky, topografii oblasti a vlastnosti dané látky. Hlavním výstupem je koncentrace látky v každém bodě a čase kolem zdroje [2].

3.2.2.4 Modely požárů a výbuchů

V případě úniku hořlavé látky je velmi pravděpodobné, že dojde k zapálení iniciačním zdrojem a vzniku požáru. Existují různé typy požárů.

Požáry kaluží

Vyskytují se v případě úniku kapaliny, která vytvoří kaluž a ta je potom zapálena. Při modelování požárů kaluží se uvažuje rychlost hoření dané látky, je počítána výška plamene, geometrický faktor a berou se v úvahu meteorologické podmínky. Výstupem modelu je přijatelná intenzita tepelného toku [$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$].

Tryskavé požáry

Jsou výsledkem úniku stlačených hořlavých plynů nebo kapalin. Jsou modelovány jako válec s průměrem D a délkou L (délka plamene). Dále je spočítána intenzita tepelného toku, přičemž se bere v úvahu geometrický faktor (stanoven z pozice příjemce vůči plameni).

Výbuch expandujících par vroucí kapaliny (BLEVE)

Tento výbuch se objeví po náhlém úniku velkého množství stlačené přehřáté kapaliny do atmosféry. Výsledkem je ohnivá koule (fireball) pocházející ve skutečnosti z atmosférického hoření mraku směsi paliva a vzduchu. Energie z ohnivé koule je především vyzařena v podobě tepelné radiace. Ohnivá koule vzniká vlivem vznášivých sil horkých plynů. Účinky BLEVE zahrnují tepelnou radiaci a letící trosky roztržené nádoby.

Výbuch neohraničeného oblaku par (UVCE)

Je obvykle výsledkem zpožděné iniciace uniklé hořlavé látky. Pro jeho vyhodnocení se používají dvě metody:

- Model TNT, který vypočítává hmotnost TNT (trinitrotoluen) ekvivalentní uniklé hořlavé látky a odhaduje přetlak v závislosti na vzdálenosti od příslušné TNT křivky
- Model TNO, který počítá charakteristickou výbuchovou délku L_0 a z ní přetlak v závislosti na vzdálenosti

Letící trosky

Nežádoucím účinkem obvykle následujícím po výbuchu zásobníků nebo nádob jsou letící trosky z těchto zařízení, které mohou způsobit úmrtí nebo zranění lidí, škody na budovách a konstrukcích nebo dokonce iniciaci nových nehodových událostí (domino efekty).

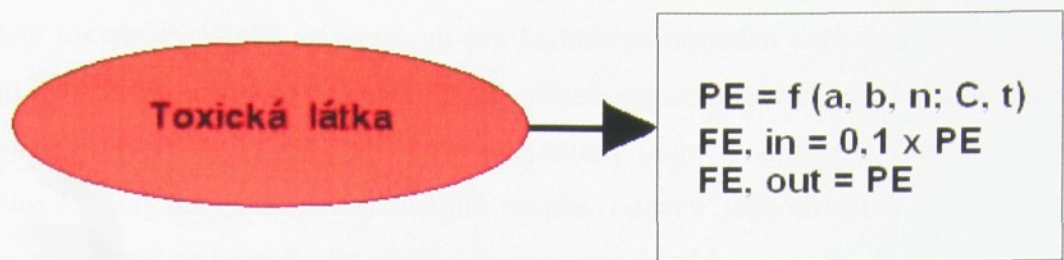
Domino efekty

Domino efekt je důležitý nežádoucí účinek spojený hlavně s požáry, výbuchy a letícími troskami. Za určitých okolností a podmínek je možné, že se nehoda, která se vyskytla v jedné jednotce nebo podniku, rozšíří také na sousední jednotky nebo podniky, a tím vznikne řetězová závažná nehoda s rozsáhlými následky. Proto by měla být pozornost zaměřena nejen na zdraví, ale také na odolnost ostatního blízkého zařízení (tanky, čerpadla, potrubí, atd.) vůči tepelné radiaci [2].

3.2.2.5 Modely hodnocení zranitelnosti

Po úniku a rozptýlu nebezpečné látky do životního prostředí následuje určení následků a expozic. V tomto oddíle budou popsány výpočty pro určení pravděpodobnosti úmrtí, odpovídající expozici a podílu obyvatelstva, pro který je expozice smrtelná. K vyjádření smrtelných účinků jsou užity následující parametry:

- Pravděpodobnost úmrtí P_E – indikuje pravděpodobnost úmrtí jednotlivce následkem expozice za předpokladu, že tato osoba se nachází venku a je nechráněna. Tento parametr P_E se použije k výpočtu individuálního rizika.
- Podíl usmrceného obyvatelstva F_E – indikuje podíl obyvatelstva, které zemře v určitém místě následkem dané expozice. Část obyvatelstva je chráněna tím, že zůstane uvnitř budov a oblékne si ochranné prostředky. Z tohoto důvodu se používají dvě hodnoty F_{Ein} a F_{Eout} k označení podílu obyvatel usmrcených uvnitř a vně budov. Parametry F_{Ein} a F_{Eout} se použijí pro výpočet společenského rizika.



Obr. 3: Pravděpodobnost úmrtí osob uvnitř a vně budov následkem toxického mraku

Pro určení pravděpodobnosti úmrtí při expozici toxickými látkami a tepelnou radiací jsou používány tzv. **probit funkce** [3].

Probit funkce

Druh modelové závislosti **dávka – odpověď** vyjádřený rovnicí. V analýze rizika se používá pro odhad fyziologických následků při působení toxických látek, tepelné radiace z požárů, přetlaku při explozi a letících fragmentů.

Výpočet individuálního a společenského rizika vyžaduje výpočet pravděpodobnosti úmrtí osoby za dané expozice. Pravděpodobnost úmrtí se vypočítá použitím probit funkce. Vztah mezi pravděpodobností účinku P a odpovídající probit funkcí P_r :

$$P = 0,5 \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \tag{3 - 6}$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} dt \tag{3 - 7}$$

Vztah mezi pravděpodobností účinku P a odpovídající probit funkcí P_r je uveden v tabulce 1.

Tab. 1: Probit funkce P_r jako funkce pravděpodobnosti P

P	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	–	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
0,1	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
0,2	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
0,3	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
0,4	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
0,5	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
0,6	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
0,7	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
0,8	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
0,9	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33

Toxická expozice

Modely toxických účinků se používají pro hodnocení následků expozice toxických plynů na lidské zdraví. Je obtížné přesně ocenit účinek expozice toxickými látkami. Hlavními důvody jsou skutečnosti, že existují mnohé účinky (např. podráždění, dušení, poškození smyslových orgánů, smrt) a rozmanité stupně odezvy jednotlivců v populaci. Navíc existuje výrazný nedostatek dat týkajících se těchto účinků a experimentování na člověku není možné. Při pokusu studovat a analyzovat účinky toxických látek byly definovány následující prahové hodnoty:

- LC_{50} : střední smrtelná koncentrace – koncentrace látky, pro kterou se předpokládá, že způsobí v daném časovém intervalu smrt u 50% jedinců vystavených účinkům látky po určitou dobu (obvykle 10 nebo 30 minut)
- LD_{50} : střední smrtelná dávka – dávka, u které se předpokládá, že způsobí v daném časovém intervalu smrt u 50% jedinců vystavených účinkům látky
- $IDLH$: okamžitě nebezpečné pro zdraví a život – je to maximální koncentrace látky ve vzduchu, které může být člověk vystaven po dobu max. 30 minut a ještě je schopen uniknout bez ztráty života nebo bez nevratných poškození

Pravděpodobnost úmrtí následkem expozice toxickým mrakem P a podílem lidí zasažených uvnitř a vně budov F_{Ein} a F_{Eout} je znázorněna na obrázku 3.

K vyjádření smrtelných účinků se využívají následující parametry probit funkce:

$$P_r = a + b \cdot \ln(C^n \cdot t) \quad (3 - 8)$$

P_r probit funkce odpovídající pravděpodobnosti úmrtí [1]

a, b, n konstanty popisující toxicitu látky [1]

C koncentrace [mg·m⁻³]

t doba expozice [min]

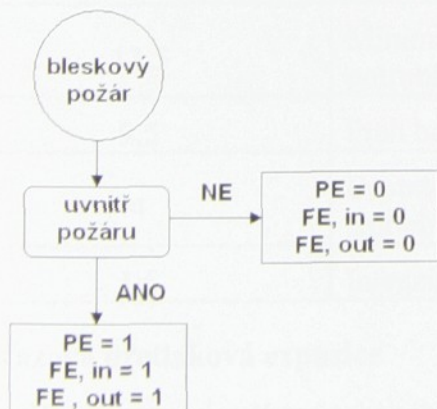
- Význam konstanty a souvisí s koncentrací C a dobou expozice t . Rozměry koncentrace a doby expozice musí proto odpovídat významu konstanty a v probit funkci.
- Probit je funkce toxické dávky pro jednotlivce. Toxická dávka D je ekvivalentní $D = C^n \cdot t$, pokud je koncentrace C konstantní během doby expozice t . Není-li koncentrace v čase konstantní, toxická dávka se vypočítá jako $D = \int C^n dt$.

- Expoziční doba t je omezena maximálně na 30 minut, počínaje okamžikem příchodu mraku. Příchod mraku může být definován jako okamžik, kdy pravděpodobnost úmrtí P_E přesáhne 1%.
- Pobyt uvnitř budovy redukuje toxickou dávku, protože koncentrace uvnitř je nižší než koncentrace vně budovy během průchodu mraku okolím. Tento vliv je vypořádán generickým faktorem 0,1 pro podíl obyvatel, kteří zahynou uvnitř budov.
- Doba průchodu mraku se mění se vzdáleností od zdroje a je různá pro každý případ poruchy zařízení.
- Rychlost obměny vzduchu závisí na parametrech, jako jsou typ a stáří obydlí, podmínky počasí a otevírání a zavírání oken. Nejsou-li dostupné žádné specifické informace, měla by být použita rychlost obměny vzduchu $1 \times$ za hodinu.
- Maximální doba expozice uvnitř budov je 30 minut. Doba prodlevy mezi ukončením průchodu mraku a počátkem celkového vyvětrání při otevřených oknech je proto maximálně 0,5 hodiny.

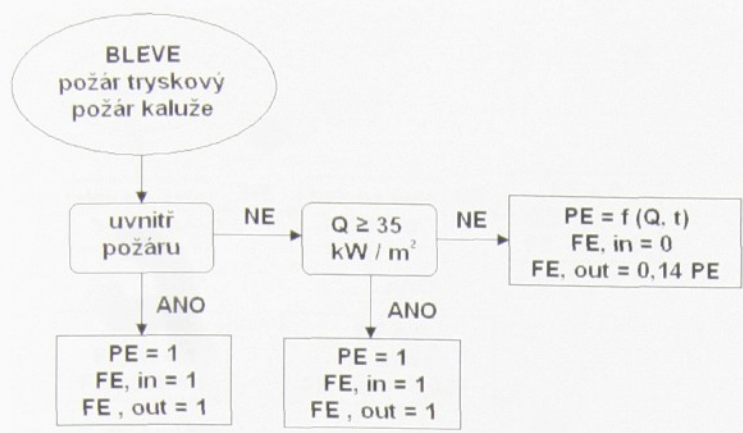
Hodnoty jsou platné pro probit funkce s koncentrací C [mg m^{-3}] a dobu expozice t [min]. Toxické konstanty a, b, n látek jsou uvedeny v databázi látek RIMV SERIDA.

Tepelná expozice

Pravděpodobnost úmrtí způsobeného bleskovým požárem P_E a podíly obyvatel, kteří zahynou uvnitř a vně budov F_{Ein} a F_{Eout} jsou znázorněny na obrázku 4. Pravděpodobnost úmrtí způsobených událostmi typu BLEVE, tryskovým požárem nebo požárem kaluže P_E a podíly obyvatel, kteří zahynou uvnitř a vně budov F_{Ein} a F_{Eout} jsou na obrázku 5.



Obr. 4: Pravděpodobnost úmrtí osob uvnitř a vně budov následkem bleskového požáru



Obr. 5: Pravděpodobnost úmrtí osob uvnitř a vně budov následkem události typu BLEVE

Pravděpodobnost úmrtí následkem expozice tepelnou radiací se počítá pomocí funkce probit. Probit funkce pro úmrtí následkem tepelné radiace [3]:

$$P_r = -36,38 + 2,56 \cdot \ln\left(Q^{\frac{4}{3}} \cdot t\right)$$

(3 – 9)

P_r

probit funkce odpovídající pravděpodobnosti úmrtí

[–]

Q

intenzita tepelného toku

[W·m⁻²]

t

doba expozice

[s]

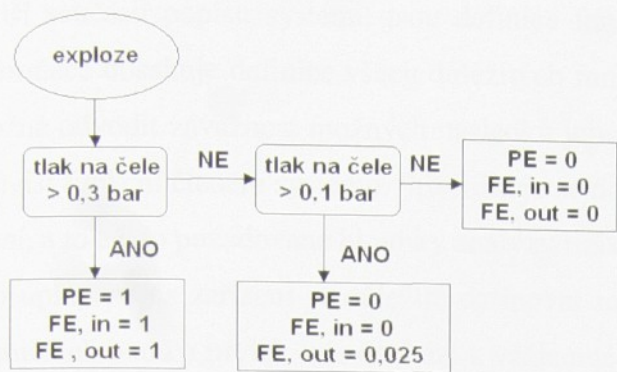
Následující tabulka shrnuje nejdůležitější prahové hodnoty uvažovaných účinků tepelné radiace na osoby a stavby.

Tab. 2: Prahové hodnoty účinků tepelné radiace na osoby a stavby

Intenzita tepelného toku [kW·m ⁻²]	Pozorované účinky
37,5	Dostatečná intenzita pro poškození procesního zařízení
25	Minimální intenzita pro zapálení dřeva
12,5	Minimální intenzita pro pokusné zapálení dřeva, tavení potrubí z plastu
9,5	Prah bolesti dosažený po 8 s, popáleniny 2. stupně po 20 s
4	Dostatečná intenzita pro způsobení bolesti během 20 s, bez smrtelných účinků
1,6	Intenzita, která není nebezpečná po dlouhou dobu

Nárazová přetlaková expozice

Pravděpodobnost úmrtí způsobeného explozí P_E a podíly obyvatel, kteří zahynou uvnitř a vně budov F_{Ein} a F_{Eout} jsou znázorněny na obrázku 6.



Obr. 6: Pravděpodobnost úmrtí osob uvnitř a vně budov následkem tlakové vlny

Pravděpodobnost úmrtí následkem expozice tlakovou vlnou se počítá pomocí funkce probit. Probit funkce pro úmrtí následkem tlakové vlny [3]:

$$P_r = 1,47 + 1,37 \ln(p_p)$$
 (3 – 10)

P_r probit funkce odpovídající pravděpodobnosti úmrtí [1]

p_p stanovená hodnota přetlaku (obvykle hodnoty pro 1%, 50% a 95% fatalitu) [Pa]

Následující tabulka uvádí úrovně zničení budov a konstrukcí přetlakem na čele tlakové vlny.

Tab. 3: Úrovně zničení budov a konstrukcí přetlakem

Zóna	Úroveň zničení	Přetlak na čele tlakové vlny [kPa]
1	Úplné zničení	> 83
2	Vážné škody	> 35
3	Střední škody	> 17
4	Lehké škody	> 3,5

3.2.2.6 Data potřebná pro hodnocení rizik

Do úlohy hodnocení rizik vstupuje celá řada datových souborů. Tyto datové soubory jsou použity např. pro výpočet individuálního a společenského rizika. Data vstupující do úlohy hodnocení rizik jsou:

Popisy zařízení

Součástí popisu hodnoceného zařízení nebo systému je jeho technický popis. Technický popis zařízení (systému) je slovní popis konstrukčního uspořádání zařízení a použitého technologického řešení zařízení, doplněné o podrobnou výkresovou dokumentaci, schémata, grafy, apod.

Další součástí popisu systému jsou definice funkcí zařízení a jeho prvků. Tato vstupní informace obsahuje definice všech důležitých funkcí systému a prvků. Z definicí musí být možné odvodit závažnost možných následků jejich neplnění. S definicemi funkcí systému souvisí funkční členění systému. Specifikuje se do jakých funkčních subsystémů se systém člení, a to až do požadované hloubky analýzy rizik.

Pro úplný popis zařízení je důležité definovat rozhraní systému. Jde o přesné vymezení hraničních bodů a prvků, kde dochází k vzájemné interakci se sousedními zařízeními nebo s vnějším okolím zařízení. Definice rozhraní má za cíl vyloučit průniky více zařízení, tak aby se stejné analyzované jevy (funkce, poruchy, apod.) neopakovaly vícekrát v různých systémech. Důležitou součástí popisu analyzovaného zařízení jsou údaje o prvcích zařízení. O všech prvcích zařízení (do zvolené úrovně dané hloubkou analýzy) jsou potřeba základní informace. Jsou to:

- Jednoznačná identifikace prvků (např. čísla prvků na výkresech, apod.)
- Popis funkcí prvků
- Popis možných způsobů poruch prvků
- Popis následků poruch prvků
- Intenzity jednotlivých způsobů poruch prvků

Statistická data (poruchy, nehody)

Hodnocení rizik je možno provést jen na základě konkrétních, pravdivých a ověřených datových souborů o dané nehodě, havárii, apod. Statistická data slouží k určení pravděpodobnosti vzniku nežádoucí události, potažmo k výpočtu rizika nežádoucí události. Existuje řada ukazatelů, které statisticky popisují hodnocené zařízení. Je to např. intenzita poruch zařízení, nebo střední doba provozu zařízení mezi poruchami. [12, 15] Z těchto ukazatelů a charakteru poruch lze usuzovat, zda je zařízení zdrojem nebezpečí.

Meteorologická data

Meteorologická data tvoří jedny z nejdůležitějších vstupních parametrů rozptylových modelů [4]. Meteorologické podmínky jsou určeny rychlostí a směrem větru, teplotou a vlhkostí vzduchu, atmosférickým tlakem a stabilitní třídou. Ta je klasifikována v závislosti na parametrech jako jsou rychlost větru a denní a noční oblačnost. Členění se skládá z 6 tříd v rozsahu od A (extrémně nestabilní) po F (extrémně stabilní). Obecně platí, že když je počasí stabilní (třídy E, F) nebo neutrální (třída D), pak se očekává, že uniklé látky se

budou šířit na delší vzdálenosti než se jejich koncentrace sníží. Z tohoto důvodu se stabilní třídy F až D považují za „špatné“ povětrnostní podmínky pro rozptyl nebezpečných látek.

Tab. 4: Třída stability počasí (podle softwaru Aloha)

Rychlost přízemního větru [m/s]	Den			Noc	
	Dopadající sluneční záření			Mraková pokrývka	
	silné	střední	slabé	> 1/2 oblohy	< 1/2 oblohy
< 2	A	A – B	B	E	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Topografie

Je dána obvykle pomocí nadmořské výšky každého bodu kolem místa havárie a pomocí drsnosti povrchu v okolí oblasti havárie. Místní topografie hraje důležitou roli při rozptylu uniklých látek, protože fyzikální překážky nebo terénní nerovnosti mohou ochránit určité oblasti a prostory. Např. rozptyl nebezpečných látek v údolích je velmi odlišný od rozptylů v rovném terénu. Topografie je obvykle reprezentována výškou každého bodu. Drsnost povrchu má rovněž velký význam. Při modelování rozptylů je obvykle uvažováno pět kategorií drsnosti odpovídající: rovnému terénu, obdělávaným pozemkům, pozemkům s řídky rozptýlenými budovami, obydlené oblasti a městské oblasti (s vysokými budovami, mrakodrapy, atd.).

Hustota a přítomnost obyvatelstva

Hustota obyvatel je jedním ze vstupních parametrů pro výpočet společenského rizika. Hustota obyvatel je většinou získána ze sčítání obyvatel. Pro určení hustoty zalidnění je potřeba dvou parametrů. Jsou to počet obyvatel v dané lokalitě a plocha lokality. Hustota zalidnění je udávána v počtu obyvatel na jednotku plochy. Pro přítomnost obyvatel v daných lokalitách platí následující pravidla:

- V obydlených oblastech je podíl přítomného obyvatelstva během denního času $k_d = 0,7$. Podíl přítomného obyvatelstva během nočního času je $k_n = 1$. Pokud jsou školy a/nebo pracovní místa umístěny v obydlených oblastech, měla by být rovněž uvažována přítomnost lidí v takových lokalitách.
- Obyvatelstvo v rekreačních oblastech by mělo být rovněž uvažováno. Pokud typ rekreace je sezónně závislý, měly by být použity diskrétní hodnoty hustoty zalidnění pro různá roční období. Pokud jsou velké skupiny obyvatel přítomny

po krátké časové intervaly, jako např. v hledištích stadionů, měly by být použity diskrétní hodnoty hustoty zalidněnosti pro různá časová období. Avšak pokud podíl času, kdy je přítomna velká skupina lidí, je malý, použití diskrétních hodnot může být zanedbáno. Jako směrnici lze užít součin souhrnné frekvence významných scénářů a podíl času, po který je velká skupina lidí přítomna. Je-li součin menší než 10^{-9} za rok, může být přítomnost velké skupiny zanedbána.

- Přítomnost obyvatelstva se mění s časem, jak lidé vyjíždějí za prací, docházejí do škol a podobně. Proto musí být použity rozdílné hodnoty pro přítomnost obyvatelstva během denního a nočního času.
- Denní čas se vztahuje na období od 8:00 do 18:30 SEČ, noční čas na období 18:30 až 8:00 SEČ.
- Na průmyslových plochách je podíl přítomného obyvatelstva v denním čase roven 1. Pokud je práce prováděna i během nočních směn, podíl přítomného obyvatelstva v nočním čase je roven 0,2, jinak je podíl roven 0.
- Podíl přítomného obyvatelstva v rekreačních oblastech v denním a nočním čase závisí na typu rekreace.

V principu platí, že data o obyvatelstvu by měla být co možná nejpodrobnější. V praxi může být obtížné shromáždit data o obyvatelstvu na velmi detailní úrovni. Existuje řada pramenů, které mohou být zdrojem informací o obyvatelstvu, jako jsou městské úřady a správní obvody.

Je také nutno určit podíly přítomnosti osob uvnitř a vně budov. Používají se rozdílné hodnoty obyvatel nacházejících se uvnitř a vně budov f_{in} a f_{out} . Základní hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tabulce 5. Hodnoty platí pro obytné a průmyslové plochy, pokud nejsou dostupné jiné informace. Pro rekreační oblasti určuje podíly obyvatel nacházejících se uvnitř a vně budov typ rekreace [3].

Tab. 5: Podíly obyvatel uvnitř (f_{in}) a vně (f_{out}) budov pro denní a noční dobu

	f_{in}	f_{out}
denní doba	0,93	0,07
noční doba	0,99	0,01

3.2.2.7 Softwarové prostředky

K modelování šíření látky v atmosféře se využívají specializované softwarové prostředky. Některé jsou běžně dostupné, jako např. Fluent (komplexní program pro řešení úloh

z oblasti proudění), dále např. Gambit, Fidap, TGrid. Softwary, které budou v této práci popsány jsou Cameo (zahrnuje v sobě tři softwarové prostředky: Cameo, Aloha, Marplot), TerEx, Serida.

CAMEO: Systém Cameo v sobě integruje chemickou databázi, rozptylový model a možnost zobrazení okruhů namodelovaných koncentrací do mapy. Software lze použít dvěma způsoby. První možností je přístup, ukládání, vyhodnocení informací potřebných pro schopnost reagovat na vzniklé nebezpečné situace. Druhá cesta využití systému je vyvíjení záchranných plánů pro osoby při úniku nebezpečných látek. Cameo je navrženo tak, aby poskytlo potřebné informace o nehodě s únikem nebezpečné látky v co nejkratší době.

ALOHA: Aloha (Areal Locations of hazardous Atmosphere) je počítačový program vytvořený speciálně pro použití specialistům, kteří se zabývají nehodami s únikem chemických látek. Aloha může předpovědět stupeň úniku nebezpečné látky do atmosféry z roztržených plynových vedení, prosakujících nádrží a vypařujících se kaluží. Dále program dovoluje předpovědět, jak se bude mrak plynu pohybovat atmosférou po náhodném úniku nebezpečné látky.

Software je vytvořen tak, aby jeho používání bylo jednoduché v krizových situacích. Chemická databáze programu obsahuje fyzikální informace o 1000 chemických látek. Aloha je navržena tak, aby minimalizovala chyby operátora. Kontroluje informace, které jsou zadávány a upozorňuje na chyby, což je velmi důležité, protože na tom závisí mnohdy životy lidí.

SERIDA: Databáze a softwarová aplikace speciálně vyvinutá pro uživatele, kteří se zabývají vyhodnocováním rizika vlivu nebezpečných látek na člověka a životní prostředí. Databáze obsahuje 684 látek. Poskytuje rozsáhlé informace o fyzikálních, chemických a toxikologických vlastnostech. Serida využívá tyto informace k určování prahových hodnot koncentrací nebezpečných pro člověka.

TerEx: Nástroj pro rychlou prognózu dopadů a následků působení nebezpečných látek nebo výbušných systémů. Model je vytvořen jako počítačový program s návazností na grafický informační systém pro přímé zobrazení výsledků v mapách.

ROZEX: Software je zaměřen na prognózu dopadů havárií v průmyslu, při nichž dojde k úniku nebezpečných látek, které mohou ohrozit okolí požárem, výbuchem nebo jej intoxikovat. Program rozlišuje jednorázové a déle trvající, čili kontinuální, úniky látek ze zařízení. Na základě povahy úniku a fyzikálně – chemických vlastností látky program

rozlišuje způsob tvorby oblaku a jeho šíření krajinou (s následkem intoxikace, resp. výbuchu) nebo hoření látky (požár). Úniky toxických látek hodnotí program ROZEX z hlediska dosahu a tvaru toxického oblaku při zvolené mezní koncentraci toxické látky. U hořlavých látek vyhodnocuje program účinky tepelné radiace na osoby a na stavební konstrukční prvky. Úniky hořlavých výbuchu schopných látek hodnotí program z hlediska dosahu vzdušné rázové vlny o stanoveném přetlaku, umístění pravděpodobného epicentra výbuchu od místa úniku a dosahu mezní koncentrace, odpovídající dolní mezi výbušnosti.

3.2.3 Výpočet rizika a posouzení jeho přijatelnosti

Existuje-li riziko, je nutné rozhodnout, zda bude akceptováno, nebo zda budou přijata zmírňující opatření. U přijímání rizik se většinou uplatňuje zásada co nejnižšího rizika, kterého lze rozumně dosáhnout. Podle této zásady se rozlišují dvě úrovně rizik: pokud je riziko pod dolní hranicí, není třeba přijímat žádná opatření; je-li nad horní hranicí, není riziko považováno za přijatelné. Nachází-li se riziko mezi oběma limity, hledají se ekonomicky optimální řešení.

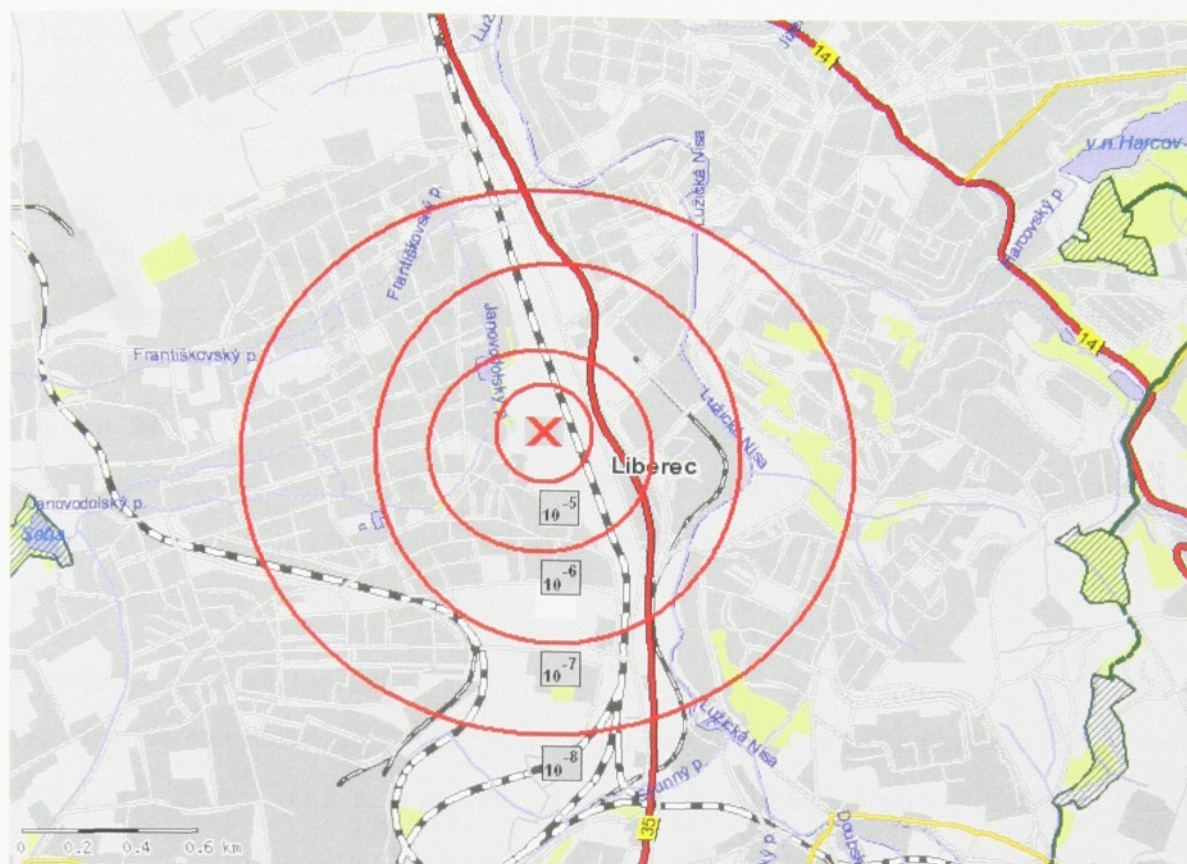
Před přistoupením k vlastním výpočtům rizik je nutno definovat síť pokrývající oblast zájmu, tj. výpočetní souřadnicovou síť.

Úroveň přijatelného rizika se obvykle stanovuje na základě následujících tří kritérií:

- Individuální riziko
- Společenské riziko
- Ekonomické riziko

3.2.3.1 Individuální riziko

Individuální riziko představuje pravděpodobnost, se kterou může jednotlivec očekávat, že bude vystaven určitému nebezpečí poškození způsobeného určitým zdrojem. Představuje frekvenci zranění nebo úmrtí jednotlivce v návaznosti na případ poruchy zařízení. Předpokládá se, že jednotlivec není chráněn a že je vystaven nepříznivým okolnostem po celou dobu expozice. Individuální riziko se znázorňuje obrysovými liniemi na topografické mapě (viz obr. 7).



Obr. 7: Příklad znázornění individuálního rizika

Výpočet individuálního rizika

Individuální riziko se počítá pro každý bod souřadnicové sítě odděleně. Příspěvek $\Delta IR_{S,MS,\varphi}$ individuálního rizika pro zranění nebo úmrtí jednotlivce v bodě souřadnicové sítě se počítá pro každý případ poruchy zařízení S , každou třídu počasí MS a každý směr vanutí větru φ odděleně:

$$\Delta IR_{S,MS,\varphi} = f_S \cdot P_{MS} \cdot P_{\varphi} \cdot P_j \quad (3 - 11)$$

f_S pravděpodobnost vzniku nebezpečné události

P_{MS} pravděpodobnost třídy meteorologické stability

P_{φ} pravděpodobnost směru větru

P_j pravděpodobnost zranění v daném bodě souřadnicové sítě

Celkové individuální riziko IR se pak určí v bodě sítě sečtením všech příspěvků:

$$\Delta IR = \sum_S \sum_{MS} \sum_{\varphi} \Delta IR_{S,MS,\varphi} \quad (3 - 12)$$

3.2.3.2 Společenské riziko

Společenské riziko je definováno jako vztah mezi pravděpodobností výskytu nebezpečí a počtem lidí v dané populaci vystavených možnosti určitého poškození způsobeného určitým zdrojem nebezpečí.

Představuje tedy frekvenci takové události, při které zahyne nebo se zraní N nebo více osob současně. Znáznorňuje se pomocí křivek $F - N$, kde N je počet zranění, resp. úmrtí a F je kumulativní frekvence nežádoucích událostí doprovázených N nebo více zraněními nebo úmrtími [1].

Pro výpočet společenského rizika je nutno znát hustotu obyvatelstva zasažené oblasti a pravidla, která určují přítomnost obyvatel v daných oblastech (viz. 3.2.2.6 – hustota a přítomnost obyvatelstva).

Výpočet společenského rizika

Pro výpočet společenského rizika je nutno nejprve zjistit pravděpodobnost úmrtí osob F_u v daném místě, která se vypočítá jako suma pravděpodobnosti úmrtí uvnitř budov F_{Ein} vynásobená počtem lidí nacházejících se uvnitř budov f_{in} a úmrtí mimo budovy F_{Eout} vynásobeného počtem lidí nacházejících se mimo budovy f_{out} .

$$F_u = F_{Ein} \cdot f_{in} + F_{Eout} \cdot f_{out} \quad (3 - 13)$$

F_{Ein} pravděpodobnost úmrtí uvnitř budov

f_{in} podíl lidí nacházejících se uvnitř budov

F_{Eout} pravděpodobnost úmrtí mimo budovy

f_{out} podíl lidí nacházejících se mimo budovy (viz. tab. 5)

Stejně jako v případě individuálního rizika, se počítá počet poškození pro každou buňku souřadnicové sítě odděleně a pro každou kombinaci případu poškození zařízení S , třídy počasí MS a směru větru φ zvlášť.

Očekávaný počet zranění, resp. úmrtí v buňce sítě $\Delta N_{S, MS, \varphi}$ pro daný případ poruchy zařízení S , třídy počasí MS , a směru větru φ .

$$\Delta N_{S, MS, \varphi} = F_j \cdot N_{OS} \quad (3 - 14)$$

kde N_{OS} je počet lidí v buňce sítě

Pro každou kombinaci poté následuje výpočet očekávaného počtu zranění, resp. úmrtí pro všechny buňky sítě $N_{S, MS, \varphi}$:

$$N_{S,MS,\varphi} = \sum_{\text{bunůň}} \Delta N_{S,MS,\varphi} \quad (3 - 15)$$

Dále je nutno určit frekvenci $f_{S,M,\varphi}$, která se pro každou kombinaci určí podle:

$$f_{S,MS,\varphi} = f_S \cdot P_{MS} \cdot P_{\varphi} \quad (3 - 16)$$

Nakonec se určuje kumulativní frekvence sečtením všech frekvencí $f_{S,MS,\varphi}$, pro které platí, že $N_{S,MS,\varphi} \geq N$:

$$F_N = \sum_{S,MS,\varphi} f_{S,MS,\varphi} \quad (3 - 17)$$

Společenské riziko se znázorňuje jako křivka $F - N$, počet úmrtí je v logaritmickém měřítku s minimální hodnotou 1, osa závisle proměnné představuje kumulativní frekvenci událostí a počtem zranění, resp. úmrtí rovným N nebo více a je v logaritmickém měřítku s minimální hodnotou 10^{-9} [rok⁻¹] [1].

3.2.3.3 Ekonomické riziko

Ekonomické riziko je vyjádření nákladů a opatření spojených se vznikem a následky nežádoucí události.

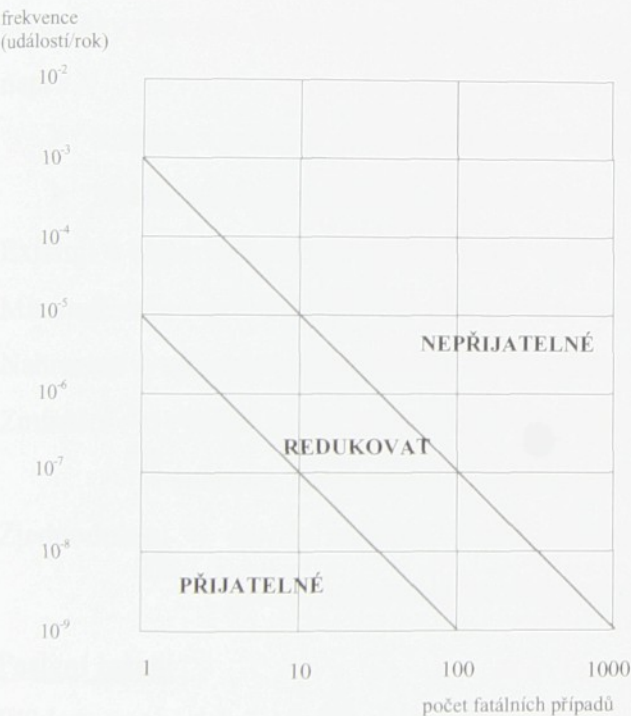
3.2.3.4 Kritéria hodnocení přijatelnosti rizika

Hodnocení rizika závažné havárie je upraveno zákonem č. 349/2004 Sb., a vyhláškou MŽP č. 366/2004 Sb. Definice kritéria přijatelnosti rizika je politické rozhodnutí a vždy závisí na jednohlasé dohodě průmyslových podniků, správních úřadů a dotčené veřejnosti. Podle zákona č. 353/1999 Sb., je provozovatel zařízení ve smyslu Vyhlášky MŽP č. 8/2000 Sb., povinen zhodnotit rizika závažné havárie a posoudit přijatelnost rizik závažné havárie. Zatímco kritérium pro individuální riziko je vyjádřeno jedním číslem, které lze okamžitě porovnat s výsledkem analýzy a zjistit tak, zda toto riziko je přijatelné nebo nepřijatelné, procedura přijatelnosti společenského rizika je složitější. Zde je třeba z výsledků analýzy spočítat součin četnosti havárie a kvadrátu potenciálních úmrtí osob a tento součin porovnat s kritériem. Při použití $F - N$ grafického výstupu je možné mezní křivku kritéria zanést do tohoto grafu. Pak scénáře, které představují nepřijatelné riziko, se nacházejí na touto křivkou.

Tab. 6: Porovnání výsledků analýzy rizika s kritérii

Kategorie rizika	Objekt nebo zařízení	Kritérium	Riziko mezní (F _m)	Riziko přijatelné	Riziko nepřijatelné
Individuální	Stávající	10 ⁻⁶	R = 10 ⁻⁵	R < 10 ⁻⁵	R > 10 ⁻⁵
	Nové	10 ⁻⁶	R = 10 ⁻⁶	R < 10 ⁻⁵	R > 10 ⁻⁵
Společenské	Stávající	F _m · N ² = 10 ⁻³	log F _m + 2 · log N + 3 = 0	log F _m + 2 · log N + 3 < 0	log F _m + 2 · log N + 3 > 0
	Nové	F _m · N ² = 10 ⁻⁴	log F _m + 2 · log N + 4 = 0	log F _m + 2 · log N + 4 < 0	log F _m + 2 · log N + 4 > 0

F_m četnost havárie
N počet obětí havárie



Obr. 8: Log – log diagram pro hodnocení přijatelnosti společ. rizika závažné havárie

Ekonomické kritérium přijatelnosti rizika je založeno na metodě CBA, což je metoda pro stanovení nákladů na opatření snížení rizik. Vyjadřuje všechny následky nežádoucí události a opatření, která jsou použita pro snížení rizik nežádoucí události v ekonomické rovině.

3.2.3.5 Opatření pro snížení rizika

Nehody s únikem toxických látek jsou pro člověka nebezpečné a tím pádem i nežádoucí. Také proto se snažíme stanovit opatření, která by vedla ke snížení následků na člověka a okolní prostředí. Z definice rizika vyplývá, že jeho redukci pro určitý scénář havárie je možné dosáhnout buď snížením četnosti (pravděpodobnosti) vzniku takové závažné havárie, nebo snížením následků havárie, nebo současným snížením obou parametrů.

Bezpečnější technologie

V současné době se minimalizace rizika řeší v období projektování zařízení nebo při realizaci trvalých změn během jeho provozu. Nejčastěji se používá jeden ze 4 níže popsaných způsobů.

Vnitřně bezpečnější řešení

Toto řešení eliminuje nebo zmírňuje nebezpečí tím, že se používá materiál nebo takové podmínky procesu, které jsou méně nebezpečné. Příkladem vnitřně bezpečnějšího řešení je např.:

- Snížení množství nebo eliminace nebezpečných produktů
- Nahrazení hořlavého rozpouštědla vodou

Existují 4 hlavní přístupy k projektování vnitřně bezpečnějších procesů a zařízení.

Minimalizace – použití menšího množství nebezpečných látek

Nahrazení – výměna nebezpečných látek a materiálů za méně nebezpečné

Zmírnění – využití méně nebezpečných podmínek provozu zařízení, využití vhodných zařízení, která minimalizují následky úniku nebezpečné látky nebo energie

Zjednodušení – návrh zařízení, která odstraňují zbytečnou složitost a která snižují pravděpodobnost vzniku provozních chyb

Pasivní řešení

Příklady pasivních řešení projektu jsou:

- Bezúkapové stáčení kapalin pomocí trvale nainstalovaných trubek
- Trvalé elektrické uzemnění
- Návrh takového tlakového zařízení, které dokáže zachytit přetlak při vnitřní deflagraci
- Zachycení uniklých nebezpečných látek např. v jímce

Aktivní řešení

Toto řešení vyžaduje přístroje ke sledování procesních proměnných a funkcí, aby bylo sníženo nebezpečí. Aktivní řešení vyžaduje vysoký podíl údržbářské práce a je proto méně spolehlivé než vnitřně bezpečnější řešení nebo pasivní řešení. Příklady aktivního řešení projektu jsou:

- Použití pojistných ventilů k zabránění přetlakování nádob
- Zálohování důležitých zařízení
- Zálohování napájení důležitých zařízení

Procedurální řešení

Toto řešení vyžaduje přítomnost pracovníka obsluhy, aby provedl činnost pro vyloučení nebezpečí. Může to být sledování standardních operačních podmínek nebo reakce na indikaci problémů, jako je alarm, odečet z přístrojů, hluk nebo únik látky. Protože opravnou činnost provádí pracovník obsluhy, je třeba uvažovat vliv lidského činitele. Procedurální řešení jsou nejméně spolehlivá ze všech čtyř kategorií.

Příklady procedurálních řešení jsou:

- Sledováním standardních operačních podmínek udržet proces uvnitř mezí daných projekčních parametrů zařízení
- Manuálním uzavřením napájecího ventilu při alarmu horní hladiny zabránit přeplnění zásobníku
- Vykonáním preventivních procedur údržby zabránit poruchám zařízení
- Manuálně elektricky uzemnit systém

Ukrytí, evakuace osob

Závažná chemická havárie většinou nezpůsobí krizovou situaci, protože její následky jsou plošně omezeny. V případě následků způsobených požárem/výbuchem může být zasažená plocha velikosti v řádu stovky hektarů, v případě úniku toxické látky v řádu cca 10 km². Může však způsobit paniku. Když taková havárie nastane, je její počáteční průběh velmi rychlý. Na evakuaci v takových případech není čas.

Daleko důležitější je mít možnost osoby okamžitě ukrýt, aby mohly přežít nejnebezpečnější počáteční období v relativně bezpečném prostředí. To je ale možné, jsou-li okamžitě varovány a zároveň vědí, co mají dělat.

3.3 Postup hodnocení rizika přepravy nebezpečných látek po železnici

Při hodnocení rizika přepravy nebezpečných látek po železnici budou uvažovány pouze toxické látky. Pro hodnocení rizika transportu toxických látek na železnici byl stanoven následující postup:

1. **Identifikace zdroje rizika** – Zdrojem rizika je v případě přepravy nebezpečných látek po železnici železniční cisterna s toxickou látkou.
2. **Výpočet pravděpodobnosti havárie s únikem nebezpečné látky** – Zpracování statistických údajů a informací z nákladní železniční přepravy.
3. **Určení zdroje úniku a charakteru úniku** – Použití vybraných metod popsaných v kapitole 3.2.2.3.
4. **Zranitelnost** – Hodnocení možných dopadů na obyvatelstvo při úniku toxické látky (toxická expozice).
5. **Stanovení rizika** – Určení individuálního a společenského rizika

3.3.1 Identifikace zdroje rizika

Přeprava nebezpečných látek podléhá mezinárodním dohodám, které jsou specifické pro každou jednotlivou přepravu. Pro železniční dopravu je to Mezinárodní řád pro přepravu nebezpečného zboží po železnici vedený pod zkratkou RID. V tomto předpisu jsou vyjmenovány látky a předměty, které představují určitý druh nebezpečí a jsou proto nazývány nebezpečnými. Dále se zde stanovují požadavky na balení, označení, přepravu, přepravní prostředky. Zákonné předpisy týkající se nakládání s nebezpečnými látkami jsou zákon č. 353/1999 Sb., „O prevenci závažných průmyslových havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami a chemickými přípravky.“ a zákon č. 356/2003 Sb., „O chemických látkách a chemických přípravcích.“

Nebezpečné látky a jejich třídění

Pro dopravu nebezpečných látek jsou stanovena přesná pravidla. Při mezinárodní přepravě (správně ale i přepravě tuzemské) by měl být každý nebezpečný náklad provázen kromě dalších podkladů i dokladem o přesném chemickém složení nákladu spolu s přesnými pokyny pro případ havárie. Pokyny musí obsahovat:

- Vyznačení povahy nebezpečí spojeného s přepravovanou látkou a opatření k jeho odvrácení.
- Opatření pro první pomoc osobám, které se dostaly do styku s přepravovanou látkou a pokyny pro případnou evakuaci okolí.
- Opatření v případě požáru, přípustné hasící prostředky a prostředky, které se naopak použít nesmějí.
- Opatření, která je nutné učinit v případě úniku látky z poškozených nebo rozbitých obalů.

Dělení nebezpečných látek

Tab. 7: Rozdělení nebezpečných látek do tříd

Třída	Charakteristika látky
1	výbušniny, střelivo, ohněstrůjná tělesa, zápalky
2	stlačené, zkapalněné nebo pod tlakem rozpuštěné plyny
3	hořlavé kapaliny
4	hořlavé pevné látky
5	vznětlivé (samovznětlivé) látky – oxidovadla
6	jedovaté látky
7	radioaktivní látky
8	žíravé látky
9	ostatní

Podrobnější údaje o třídění nebezpečných látek jsou uvedeny v příloze 1.

Značení nebezpečných nákladů

Značení nebezpečných nákladů se při přepravě na železnici uvádí na výstražné identifikační tabule, viz příloha 2. K charakterizaci nebezpečných nákladů se používá Kemlerův kód a Diamantový kód. Popis kódů je uveden v příloze 2.

3.3.2 Výpočet pravděpodobnosti havárie s únikem nebezpečné látky na železnici

Výpočet pravděpodobnosti havárie lze provést na základě ověřených statistických údajů. Ty jsou uvedeny ve statistických ročenkách Českých drah, statistikách ministerstva vnitra ČR, statistikách ministerstva dopravy ČR a statistikách Hasičského záchranného sboru ČR [23, 24, 25].

Pravděpodobnost nehody s únikem nebezpečné látky lze vypočítat podle následujícího vztahu. Vzorec určuje pravděpodobnost, která je vztažena na jeden ujetý vlakový kilometr.

$$P_{vlkm} [vlkm^{-1}] = N [rok^{-1}] / C_v [vlkm^{-1} \cdot rok^{-1}] \quad (3 - 18)$$

P_{vlkm}	pravděpodobnost nehody při přepravě nebezpečných látek na jeden ujetý vlakový kilometr
N	počet nehod s únikem nebezpečných látek všech nákladních vlaků za jeden rok
C_v	celkové množství ujetých kilometrů všech nákladních vlaků za jeden rok při nákladní přepravě

3.3.3 Určení zdroje a charakteru úniku

Pro hodnocení následků úniku toxické látky z železniční cisterny je důležitá definice zdrojového členu. Parametry zdrojového členu jsou množství toxické látky obsažené v železniční cisterně a podmínky, za kterých tato látka unikla.

Únik toxické látky z železniční cisterny bude mít tento průběh:

1. Výtok toxické látky z železniční cisterny do prostředí. Tento výtok může být v plynné fázi, kapalně fázi nebo jako dvoufázový.
⇒ použití **modelů výtoku**
2. Je-li uniklá toxická látka v kapalně formě, bude se vytvářet kaluž a bude docházet jejímu odpařování do okolního atmosféry.
⇒ použití **modelů vypařování**
3. Je-li toxická látka v plynné formě, bude docházet k jejímu úniku do okolní atmosféry. Látka vytvoří toxický mrak, který je unášen větrem.
⇒ použití **modelů rozptylu**

Z časového hlediska mohou nastat dva druhy úniku toxické látky:

- Okamžitý únik – použití rozptylového modelu PUFF
- Kontinuální únik – použití rozptylového modelu PLUME

Z hlediska chování utvořeného mraku toxického plynu se dají použít modely pro:

- Plyn lehčí než vzduch (např. Gaussův model rozptylu, Lagrangeův model rozptylu)
- Plyn těžší než vzduch (např. „BOX“ model těžkého plynu)

3.3.4 Zranitelnost

Po úniku a rozptýlu toxické látky do životního prostředí následuje určení následků a expozice. Pro účely diplomové práce jsou jako následky úniku toxické látky uvažovány počty potenciálních úmrtí osob.

Pro určení toxické expozice se použije vzorec pro probit funkci (3 – 9) v jednotlivých vzdálenostech od zdroje. Vzdálenost od zdroje se může navzorkovat např. po 100 metrech. Výsledné hodnoty probit funkce se podle tab. 1 převedou na hodnoty pravděpodobnosti úmrtí osob. Výsledkem jsou tedy hodnoty pravděpodobnosti úmrtí osob v jednotlivých vzdálenostech od zdroje.

3.3.5 Stanovení rizika

3.3.5.1 Individuální riziko

Individuální riziko úniku toxické látky z železniční cisterny je určeno z pravděpodobnosti havárie železniční cisterny s únikem toxické látky, následků tohoto úniku a pravděpodobnosti směru vanutí větru. Pro účely diplomové práce nejsou uvažovány žádné faktory zmírnění (úkryty, evakuace). Individuální riziko se určí ze vztahů v kapitole 3.2.3.1.

3.3.5.2 Společenské riziko

Pro určení společenského rizika úniku toxické látky z železniční cisterny se použije postup popsáný v kapitole 3.2.3.2.

3.3.5.3 Hodnocení přijatelnosti rizika

Vypočtené hodnoty individuálního a společenského rizika se porovnají s kritérii popsány v tab. 6.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části diplomové práce je hodnoceno riziko nehody s únikem nebezpečné látky na hlavním železničním nádraží v Liberci podle metodiky uvedené v kapitole 3.3. Hlavní důraz bude kladen na potenciální úmrtí osob zasažených nebezpečnou látkou. Základem pro pozdější kvantifikaci rizika úmrtí obyvatel přilehlých částí hlavního železničního nádraží v Liberci při přepravě nebezpečných látek je výpočet pravděpodobnosti vzniku nebezpečné havárie a modelování jejích následků.

4.1 Vstupní data

Pro vyjádření pravděpodobnosti je třeba zpracovat velké množství statistických údajů. Statistická data týkající se nákladní železniční přepravy byla získána ze statistických ročenek Českých drah, a. s., ze statistik Ministerstva dopravy České republiky, Ministerstva vnitra České republiky a ze statistik Hasičského záchranného sboru České republiky. Tyto datové soubory se od sebe v mnoha ohledech odlišují. Je to dáno tím, že každá instituce sleduje rozdílné parametry železniční dopravy. Např. Hasičský záchranný sbor České republiky zaznamenává statistiku nehod, při kterých byl nucen zasáhnout. České dráhy sledují železniční dopravu z širšího hlediska. Zaznamenávají statistické údaje o všech nehodách. Jak v osobní, tak v nákladní dopravě. Dále sledují množství přepravovaných osob a přepravovaného zboží a množství ujetých vzdáleností všech vlaků v osobní a nákladní dopravě. V další kapitole budou popsány a zpracovány statistické údaje, které budou později použity pro výpočet pravděpodobnosti nehody v nákladní železniční dopravě.

Pro doplnění celkového přehledu o vývoji nehodovosti v železniční dopravě bude statistika doplněna o údaje z osobní železniční dopravy (viz. příloha 3).

4.1.1 Vstupní data pro stanovení pravděpodobnosti

Vývoj nehodovosti v železniční dopravě

Od roku 1997 platí odlišná metodika posuzování a kategorizace nehodových událostí dle předpisů ČD D17. Údaje od roku 1997 nejsou srovnatelné s předcházejícími roky. Z tabulky (viz. příloha 3) je patrný velký pokles nehodovosti v roce 2002. Je to dáno

značným snížením nehod v kategorii C (porucha a poškození zařízení). Např. nehodovost v důsledku vykolejení při posunu zaznamenala velký pokles.

Vývoj počtu mrtvých byl od roku 1996 stabilní, ale v roce 2002 byl zaznamenán velký nárůst, a to až na počet 110. Počet úmrtí v železniční dopravě je ve srovnání s dopravou silniční velmi malý (např. v roce 2000 to bylo 1336 úmrtí v silniční dopravě a “jen” 26 úmrtí na železnici) [23, 24, 25].

Počet zraněných osob měl od roku 1997 klesající tendenci, ale v roce 2002 toto číslo vzrostlo na téměř maximum za posledních deset let. Hůře tomu bylo jen v roce 1996, kdy bylo na železnici zraněno 294 osob. Vzhledem k velkému komunikačnímu a technickému pokroku se snižuje množství srážek vlaků. V roce 1994 došlo k 21 srážkám a v roce 2002 jen k 6 srážkám. Vývoj počtu nehod je uveden v grafu 1.



Graf 1: Vývoj počtu nehod v železniční dopravě

Celkový počet najetých kilometrů všech vlaků za jeden rok

Celkový počet vlakových kilometrů je potřeba k výpočtu **pravděpodobnosti nehody** vztaženého na jeden ujetý vlakový kilometr.

Průměrná přepravní vzdálenost v osobní dopravě je cca 35 km, v nákladní dopravě je to 200 km. Českou železnici zatěžuje více doprava osobní. V roce 1993 byl poměr mezi zatížením nákladní a osobní dopravou větší než 1/2 (nákladní/osobní), ale v roce 2002 byl tento údaj již 1/3. Je to dáno výrazným poklesem počtu najetých kilometrů v rámci nákladní přepravy. Vývoj počtu najetých kilometrů všech vlaků je zaznamenán v grafu 2.

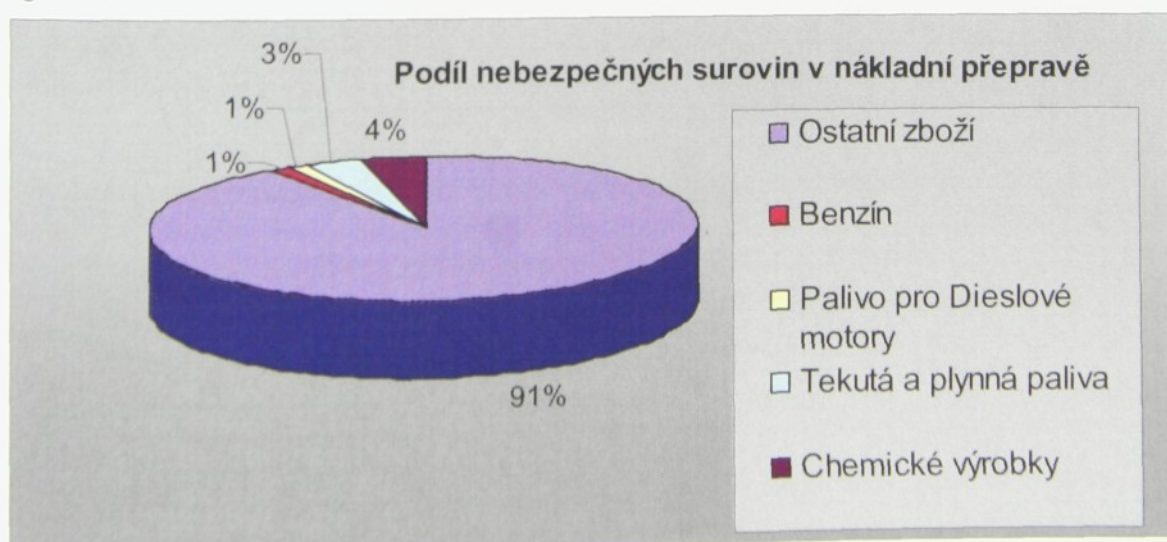


Graf 2: Vývoj vlakových kilometrů celkem

Přeprava zboží

Přeprava zboží v železniční dopravě v České republice stále klesá. Jestliže by tento trend pokračoval, v roce 2008 by se přepravovala již jen polovina toho, co v roce 1993. Hlavní podíl na nákladní přepravě v České republice má zahraniční vývoz. Vnitrostátní přeprava klesla od roku 1993 o více než polovinu (ze 70 mil. tun (1993) na 33,5 mil tun (2002)).

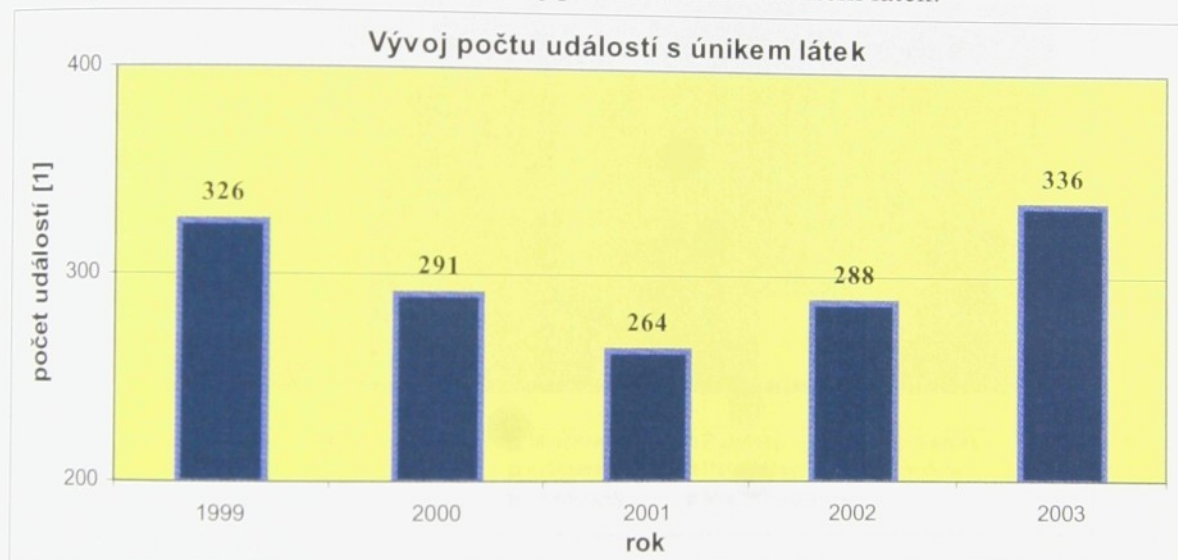
Přepravované zboží je rozděleno do několika skupin, z nichž lze čtyři klasifikovat jako nebezpečné. Jsou to benzín, palivo pro diesellové motory, tekutá a plynná paliva, chemické výrobky. Tyto třídy tvoří cca desetinu celkové přepravy zboží na železnici [23, 24, 25]. Podíl přepravovaných nebezpečných surovin na železnici je znázorněn v grafu č. 3.



Graf 3: Podíl nebezpečných surovin v nákladní přepravě

Počet nehod s únikem nebezpečných látek v České republice

Při nehodě na železnici zasahuje Hasičský záchranný sbor České republiky (HZS ČR). Ten si také vede svou statistiku, která není běžně dostupná. Podařilo se získat jen data od roku 1999 do roku 2003. V roce 2002 se změnilo značení jednotlivých typů událostí. Označení jedním číslem nahradilo označení čísly dvěma. Např. v roce 1999 se rozlišoval jen únik látek, ale v roce 2002 se již tento typ události rozdělil na několik skupin. Ty jsou dány tím, jaký druh látky unikl. Při starém značení by byla označena událost číslicí 7 (únik látky) nebo číslicí 6 (olejová havárie). Nové značení již rozlišuje pět typů událostí: únik plynu, únik kapaliny, únik ropných produktů, únik pevné látky, únik ostatních látek. Na následujícím grafu č. 4 je znázorněn vývoj počtu událostí s únikem látek.



Graf 4: Vývoj počtu událostí s únikem látek

Následující tabulka ukazuje rozložení nehod s únikem nebezpečných látek v ČR

Tab. 8: Počty nehod s únikem nebezpečných látek v jednotlivých krajích

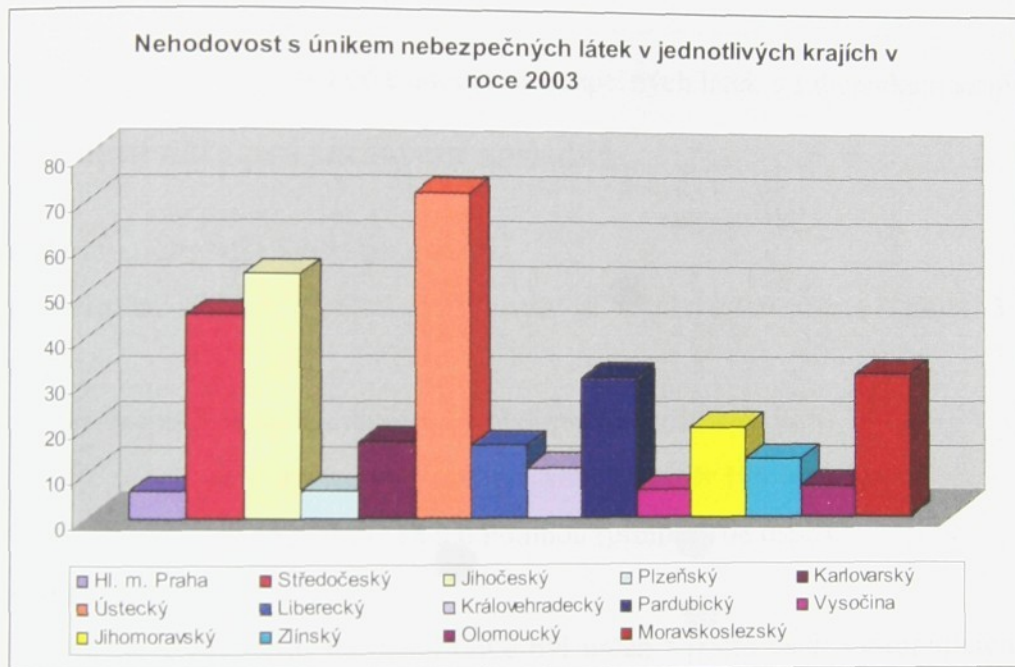
Kraj	1999	2000	2001	2002	2003	Celkem
Hl. m. Praha	7	7	6	3	6	29
Středočeský	34	38	49	59	45	225
Jihočeský	14	10	20	21	54	119
Plzeňský	15	10	13	3	6	47
Karlovarský	87	43	11	17	17	175
Ústecký	12	17	13	37	72	151
Liberecký	23	19	16	18	16	92
Královéhradecký	6	10	10	8	11	45
Pardubický	21	9	30	17	31	108
Vysočina	5	4	2	6	6	23

Jihomoravský	19	15	11	21	20	86
Zlínský	39	53	23	29	13	157
Olomoucký	10	12	16	9	7	54
Moravskoslezský	34	44	44	37	32	191
Celkem	326	291	264	288	336	1502

Příklad: Nehodovost s únikem látek v roce 2003

V roce 2003 došlo na železnici ke 336 událostem, při nichž byl zaznamenán únik nějaké látky. Jsou to nehody, při nichž musel zasahovat Hasičský záchranný sbor České republiky. Od relativně jednodušších (např. únik benzínu z lokomotivy) k těm závažnějším (např. likvidace úniku kyseliny sírové z cisterny nákladního vlaku).

Nejvíce mimořádných událostí se stalo v Ústeckém kraji. Z celkového počtu nehod se zde událo více než 20%. Nikdo se nestal obětí úniku látek.

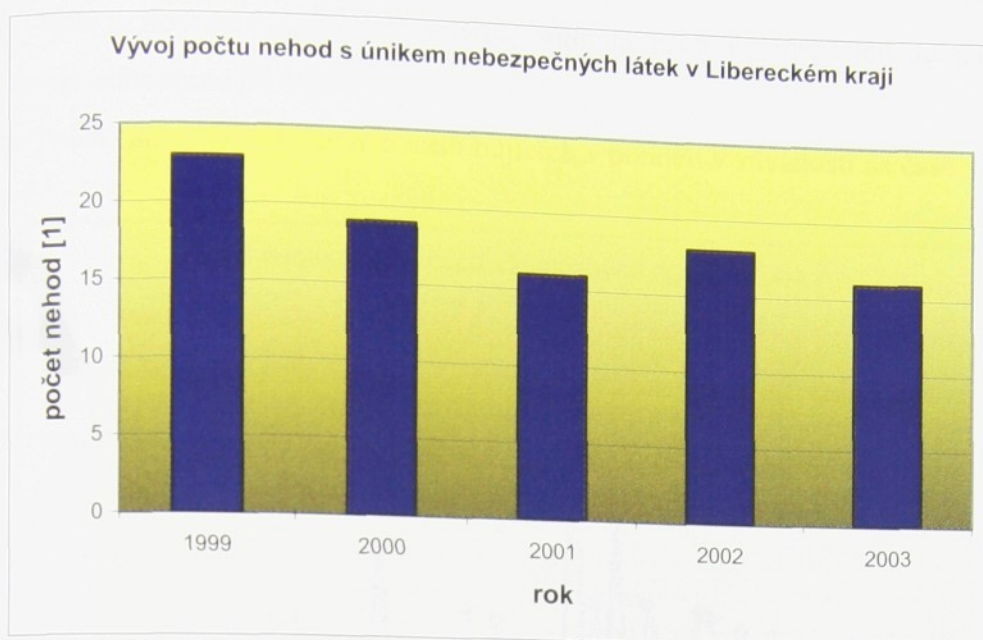


Graf 5: Nehodovost s únikem nebezpečných látek v jednotlivých krajích (2003)

Mimořádné události s únikem látek s sebou přinášejí různé druhy zamoření. Nejčastěji je to znečištění půdy a podzemních vod. Tyto úniky jsou z tohoto hlediska velmi závažné a mohou mít vliv na ekologii v mnoha dalších letech po havárii.

Počet nehod s únikem nebezpečných látek v Libereckém kraji

Vývoj nehod s únikem látek v Libereckém kraji má klesající tendenci. V roce 2003 došlo na železničních tratích v Libereckém kraji ke 23 nehodám a v roce 1999 se stalo již jen 16 nehod. Grafické znázornění vývoje nehod s únikem nebezpečných látek v Libereckém kraji je v grafu č. 6.



Graf 6: Vývoj počtu nehod s únikem nebezpečných látek v Libereckém kraji

4.1.2 Vstupní data pro stanovení následků

Množství osob pohybujících se po nádraží

Obvod železniční stanice Liberec je situován ve střední části města v délce 3 km na otevřené ploše.

Počet zaměstnanců: 1. doba mezi 6 a 16 hodinou (průměr 448 osob)
 2. doba mezi 16 a 18 hodinou (průměr 186 osob)
 3. doba mezi 18 a 6 hodinou (průměr 108 osob)

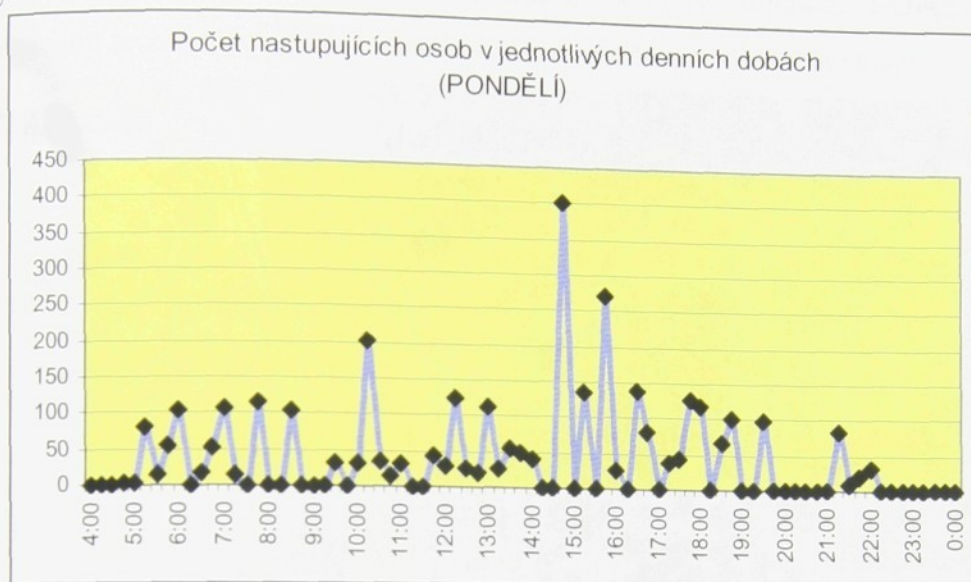
Počet cestujících:

Počet cestujících v závislosti na denní době byl určen z počtu osob vystupujících a osob nastupujících do vlakových souprav. Byly ovšem k dispozici jen seznamy vlaků a ke každému počet nastupujících a vystupujících osob. Do železniční stanice Liberec přijíždí vlaky z pěti směrů. Z každého směru se dají shromáždit informace o počtu cestujících osob. Podle jízdního řádu byly každou čtvrt hodinu vybrány vlaky, které jsou právě ve stanici a určen počet vystupujících a nastupujících osob. Tato čísla byla sečtena a byl sestaven graf počtu osob, které vystupují z vlakových souprav a nastupují do vlakových souprav v závislosti na čase. Další osoby se zdržují v čekacích prostorách u stánků s občerstvením atd. Tato hodnota byla vyčíslena na 100 osob. Jde jen o přibližnou hodnotu, přesnější určení by bylo otázkou dalších studií. Podle odhadu by se počet osob, které se mohou nacházet při havárii v železniční stanici Liberec, mohl pohybovat okolo

hodnoty 1000 v dopravní špičce. Průměrná hodnota osob pohybujících se na nádraží během dne je odhadnuta na 400.

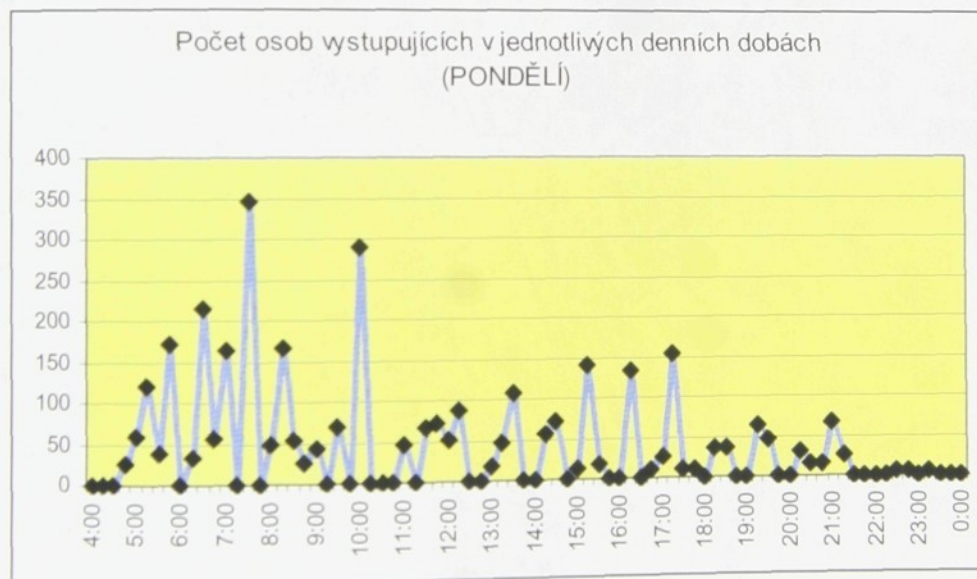
Příklad: Počet osob vystupujících a nastupujících v pondělí v závislosti na čase

Nástupy:



Graf 7: Počet nastupujících osob v jednotlivých denních dobách (pondělí)

Výstupy:



Graf 8: Počet vystupujících osob v jednotlivých denních dobách (pondělí)

Hustota zalidnění města Liberce

Hustota zalidnění města Liberce byla získána z Magistrátu města Liberce za pomoci Ing. Lubora Franců. Jedná se o sčítání obyvatel z roku 2001. Podrobnosti o počtech osob v jednotlivých urbanistických obvodech města jsou v příloze 4.

Mapy hlavního železničního nádraží v Liberci a okolí

Díky spolupráci Technické univerzity v Liberci s Magistrátem města Liberce byly získány mapy hlavního železničního nádraží v Liberci a okolí v elektronické, tedy dále zpracovatelné podobě. K dispozici jsou letecké snímky, digitální technická mapa (se zakreslením technických sítí), katastrální mapa a další specializované mapy.



Obr. 9: Rastrový plán okolí hlavního železničního nádraží v Liberci

4.2 Riziko nehody s únikem nebezpečné látky pro hlavní železniční nádraží v Liberci

Riziko je definováno jako násobek pravděpodobnosti nehody a jejích následků. V našem případě je následek nebezpečné události počet mrtvých. Pro simulaci úniku nebezpečné látky do okolního prostředí je použit program Aloha. Tento softwarový prostředek dokáže modelovat průběh úniku nebezpečné látky do atmosféry. Hlavním výstupem programu je graf, který ukazuje okruhy zasažení jednotlivými koncentracemi látky v závislosti na síle a směru větru, počasí, množství uniklé látky a dalších parametrech. Ostatní výstupy ukazují např. průběh množství unikající látky nebo průběh koncentrace látky v místě o určité vzdálenosti od místa vzniku havárie.

Pro určení množství zasažených osob toxickou látkou, bylo potřeba určit hustoty zalidnění v jednotlivých obvodech města Liberce. Množství obyvatel žijících v jednotlivých urbanistických obvodech spolu s rozlohami jednotlivých obvodů byly získány z Magistrátu města Liberce za pomoci Ing. Lubora Franců. Z těchto hodnot byly spočítány hustoty zalidnění jednotlivých urbanistických obvodů. Tabulku s hodnotami zalidnění jednotlivých částí města Liberce společně s mapou urbanistických obvodů je možno dohledat v příloze 4.

4.3 Určení rizika úmrtí pro specifickou havárii s únikem čpavku na hlavním nádraží v Liberci

Výpočet rizika úmrtí nehody s únikem nebezpečných látek pro hlavní železniční nádraží v Liberci je demonstrován na příkladu jednorázového úniku čpavku z železniční cisterny. Za pomoci softwaru ALOHA jsou modelovány okruhy jednotlivých koncentrací, které jsou později zaneseny do mapy pro názorný příklad ukázky zamořených oblastí. Ze znalosti lokálních koncentrací je pomocí probit funkce pro toxickou expozici (viz. 3.2.2.5) vypočten průběh pravděpodobnosti úmrtí v závislosti na vzdálenosti od zdroje. Dále je určeno individuální a společenské riziko.

4.3.1 Výpočet pravděpodobnosti nehody s únikem čpavku na hlavním železničním nádraží v Liberci

Výpočet pravděpodobnosti nehody spojené s únikem nebezpečné látky je jednou z hlavních částí kvantifikace rizika. Pro výpočet pravděpodobnosti úniku nebezpečné látky je použit vztah (3 – 18). Pro přehlednost je uveden i v této kapitole.

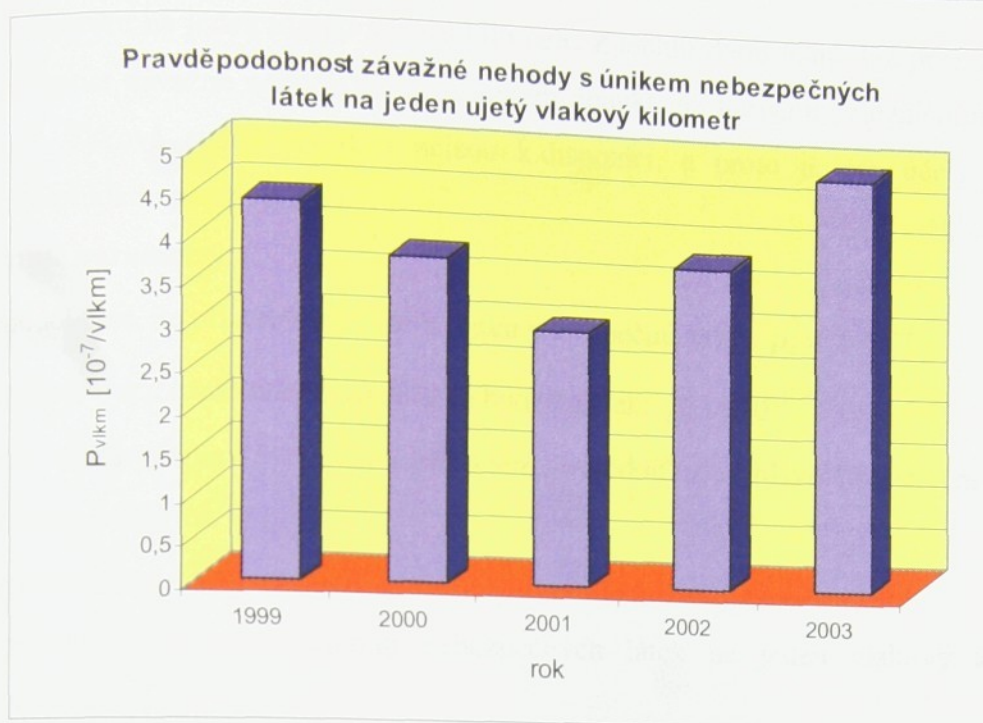
$$P_{vlkm} [vlkm^{-1}] = N_z [rok^{-1}] / C_v [vlkm \cdot rok^{-1}]$$

- P_{vlkm} pravděpodobnost nehody při přepravě nebezpečných látek na jeden ujetý vlakový kilometr
- N počet nehod s únikem nebezpečných látek všech nákladních vlaků za jeden rok
- N_z počet závažných nehod s únikem nebezpečných látek všech nákladních vlaků za jeden rok
- C_v celkové množství ujetých kilometrů všech nákladních vlaků za jeden rok při nákladní přepravě

Tab. 9: Vývoj pravděpodobnosti nehody s únikem nebezpečných látek vztažené na jednotku vzdálenosti

Rok	1999	2000	2001	2002	2003
$N [rok^{-1}]$	326	291	264	288	336
$N_z [rok^{-1}]$	7	6	4	5	6
$C_v [vlkm \cdot rok^{-1}] \cdot 10^6$	61,116	56,938	53,631	51,872	47,694
$P_{vlkm} [vlkm^{-1}] \cdot 10^{-7}$	1,1	1,0	0,7	0,9	1,2

Pravděpodobnost závažné nehody s únikem nebezpečných látek na jeden ujetý vlakový kilometr se pohybuje mezi hodnotami $7 \cdot 10^{-8}$ a $1,2 \cdot 10^{-7}$ $[vlkm^{-1}]$. Vývoj pravděpodobnosti mezi roky 1999 a 2003 je znázorněn v grafu č. 9.



Graf 9: Pravděpodobnost závažné nehody s únikem nebezpečných látek na jeden vlkm

Pravděpodobnost nehody s únikem nebezpečných látek na jeden ujetý vlakový kilometr na hlavním železničním nádraží v Liberci je brána jako průměrná hodnota pravděpodobnosti nehody s únikem nebezpečných látek na jeden vlakový kilometr z let 1999 – 2003 pro celou Českou republiku.

$$\overline{P_{vlkm}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{vlkm} \quad (3 - 19)$$

n počet let

i jednotlivé roky

$$\overline{P_{vlkm}} = 0,98 \cdot 10^{-7} [vlkm^{-1}]$$

⇒ Pravděpodobnost nehody s únikem nebezpečných látek pro hlavní železniční nádraží v Liberci je $0,98 \cdot 10^{-7} [vlkm^{-1}]$.

Pro zjištění pravděpodobnosti závažné nehody vlaku přepravujícího čpavek je třeba mít k dispozici statistické údaje k určení pravděpodobnosti, že při nehodě vlaku přepravujícího nebezpečnou látku dojde k úniku této látky. Výsledná pravděpodobnost nehody při které dojde k úniku nebezpečné látky je dále vynásobena procentuálním podílem přepravy čpavku na celkové přepravě nebezpečných látek. Výpočet roční četnosti závažné nehody vlaku přepravujícího čpavek závisí na množství vlaků přepravujících čpavek, které ročně projedou přes hlavní železniční nádraží v Liberci a pravděpodobnosti závažné nehody

s únikem čpavku na jeden ujetý vlakový kilometr. Z těchto dvou údajů lze poté vypočítat roční frekvenci závažné nehody vlaku s únikem čpavku na hlavním železničním nádraží v Liberci. Taková statistická data nejsou k dispozici, a proto je pro účely výpočtu názorného příkladu použit odhad.

Odhadnuté parametry:

Pravděpodobnost, že při nehodě dojde k úniku nebezpečné látky: $p_u = 2 \cdot 10^{-1}$

Pravděpodobnost, že tato nebezpečná látka bude čpavek: $p_{uč} = 10^{-1}$

Množství vlaků přepravujících čpavek, které projedou přes hlavní železniční nádraží v Liberci: $N_{\varepsilon} = 20 [\text{rok}^{-1}]$

Znamé parametry:

Pravděpodobnost nehody s únikem nebezpečných látek na jeden vlakový kilometr:

$$\overline{P_{\text{vlkm}}} = 0,98 \cdot 10^{-7} [\text{vlkm}^{-1}]$$

Délka hlavního železničního nádraží v Liberci: $l_{\text{nádr}} = 3 [\text{km}]$

Výpočet roční četnosti závažné nehody, při které dojde k úniku čpavku na hlavním železničním nádraží v Liberci.

Celková ujetá vzdálenost vlaků přepravujících čpavek přes nádraží v Liberci za rok

$$C_{\text{vn}} = l_{\text{nádr}} \cdot N_{\varepsilon} \quad (3 - 20)$$

$$C_{\text{vn}} = 3 \cdot 20 = 60 \text{ vlkm} \cdot \text{rok}$$

C_{vn} Celková ujetá vzdálenost vlaků přepravujících čpavek přes nádraží v Liberci za rok

Roční četnost závažné nehody, při které dojde k úniku čpavku na hlavním železničním nádraží v Liberci

Celková roční četnost úniku čpavku na železničním nádraží v Liberci

$$P_{\varepsilon} = \overline{P_{\text{vlkm}}} \cdot C_{\text{vn}} \cdot p_u \cdot p_{uč} [\text{rok}^{-1}] \quad (3 - 21)$$

$$P_{\varepsilon} = 0,98 \cdot 10^{-7} \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-1} = 117,6 \cdot 10^{-9} = 1,17 \cdot 10^{-7}$$

P_{ε} celková roční četnost úniku čpavku na železničním nádraží v Liberci

Vypočtená roční četnost nehody s únikem čpavku na hlavním železničním nádraží v Liberci je dále použita pro výpočet individuálního a společenského rizika úniku čpavku z železniční cisterny.

4.3.2 Určení závislosti pravděpodobnosti úmrtí na vzdálenosti od zdroje

Pro určení pravděpodobnosti úmrtí v určité vzdálenosti je použit vztah pro výpočet probit funkce pro toxickou expozici (3 – 9). Specifická rovnice pro výpočet probit funkce čpavku je:

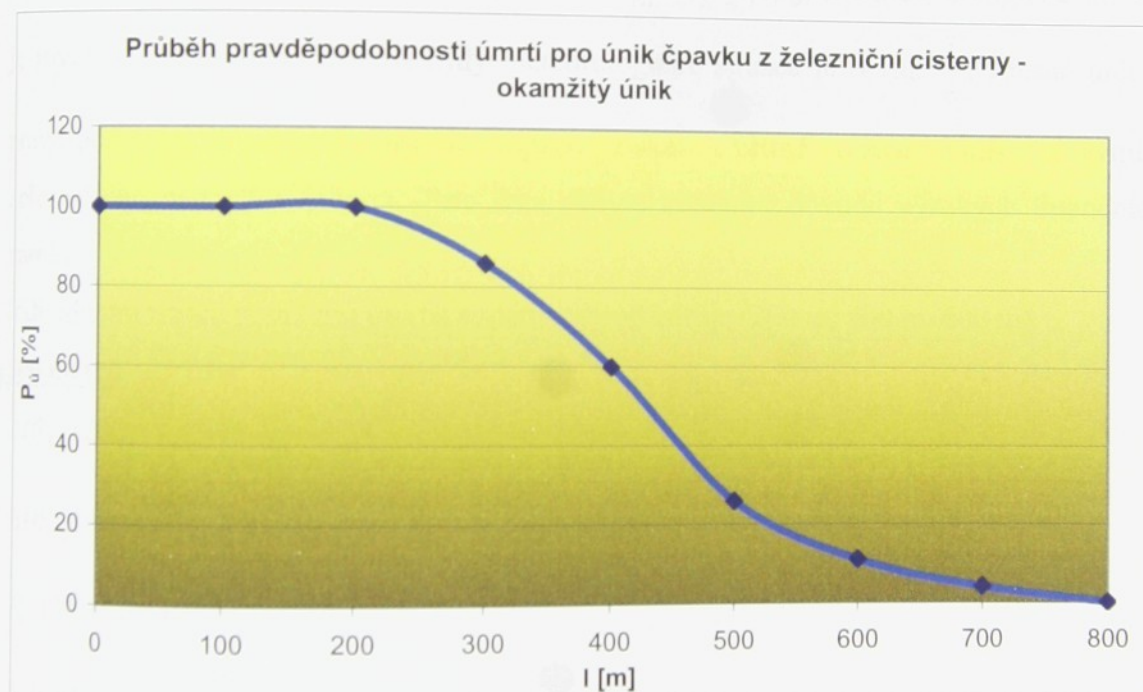
$$P_r = -15,6 + 1 \cdot \ln(C^2 \cdot t) \quad (3 - 22)$$

Parametry chemických látek popisující jejich toxicitu je možno nalézt v softwaru SERIDA. Dalšími parametry, které jsou zastoupeny v rovnici (3 – 22), je koncentrace látky a doba expozice. Tyto parametry byly získány ze softwaru Aloha.

Hodnota probit funkce je převedena na pravděpodobnost úmrtí pomocí tabulky č. 1.

Tab. 10: Pravděpodobnost úmrtí při jednorázovém úniku čpavku v jednotlivých vzdálenostech od zdroje

Vzdálenost od zdroje (l) [m]	0	100	200	300	400	500	600	700	800
Pravděpodobnost úmrtí (P _u) [%]	100	100	100	86	60	26	11	4	0



Graf 10: Průběh pravděpodobnosti úmrtí pro únik čpavku z železniční cisterny

4.3.3 Určení individuálního rizika

Pro výpočet individuálního rizika platí vztah uvedený v kapitole 3.2.3.1. Pro přehlednost je v této kapitole znovu uveden.

$$\Delta IR_{S,MS,\varphi} = f_S \cdot P_{MS} \cdot P_{\varphi} \cdot P_j$$

f_S Celková roční četnost úniku čpavku na železničním nádraží v Liberci

P_{MS} pravděpodobnost třídy meteorologické stability

P_{φ} pravděpodobnost směru větru

P_j pravděpodobnost úmrtí v daném bodě souřadnicové sítě

Vzorec pro výpočet individuálního rizika se pro zjednodušení redukuje na:

$$\Delta IR_{S,\varphi} = f_S \cdot P_j \cdot P_{\varphi} \cdot P_{MS}$$

kde $f_S = P_{\bar{c}}$

$$P_j = P_u$$

$P_{\varphi} = \frac{1}{8}$ pravděpodobnost směru větru

$P_{MS} = \frac{1}{6}$ pravděpodobnost třídy meteorologické stability

Pro účely diplomové práce je uvažováno 8 základních směrů větru a 6 základních tříd meteorologické stability, proto pravděpodobnost směru větru jedné meteorologické situace je rovna $\frac{1}{8}$ a pravděpodobnost třídy meteorologické situace je rovna $\frac{1}{6}$. Přesné určení

pravděpodobnosti směru větru je možno získat z větrné růžice v místě hlavního železničního nádraží v Liberci. Tato data nebyla získána z důvodu vysokých finančních nároků.

Individuální riziko je určeno pro tři vzdálenosti od zdroje (200 m, 400 m, 600 m).

200 metrů

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = f_S \cdot P_j \cdot P_{\varphi} \cdot P_{MS}$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = \overline{P_{vkm}} \cdot P_u \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6}$$

$$P_u(200) = 1 = 100\%$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6}$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = 0,12 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-7}$$

400 metrů

$$P_u(400) = 0,6 = 60\%$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(400) = 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 0,07 \cdot 10^{-6} = 7 \cdot 10^{-8}$$

600 metrů

$$P_u(600) = 0,11 = 11\%$$

$$\Delta R_{S,\varphi}(600) = 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,11 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 0,01 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-8}$$

Okruhy individuálního rizika získaného z pravděpodobnosti nehody železniční cisterny s nebezpečnou látkou a pravděpodobnosti úmrtí v dané vzdálenosti jsou zakresleny do rastrového plánu blízkého okolí hlavního železničního nádraží v Liberci (obr. 10).



Obr. 10: Okruhy individuálního rizika pro únik čpavku z železniční cisterny

4.3.4 Určení společenského rizika

Výpočet společenského rizika

Pro výpočet společenského rizika jsou použity vztahy uvedené v kapitole 3.2.3.2. Při určení potenciálních úmrtí osob při úniku čpavku ze železniční cisterny na hlavním železničním nádraží v Liberci je určující hodnota potenciálních úmrtí osob nacházejících se vně budov. Potenciální úmrtí osob nacházejících se uvnitř budov je redukováno faktorem 0,1. Výpočet potenciálních úmrtí osob je určen pro tři intervaly vzdáleností od zdroje úniku (0 – 200 metrů, 200 – 400 metrů, 400 – 800 metrů). Pro každý okruh je vypočtena hodnota potenciálních úmrtí osob. Ta je dána procentuálním zasažením jednotlivých urbanistických obvodů města Liberce a hustotou zalidnění těchto urbanistických obvodů. Procentuální zasažení je určeno po zakreslení jednotlivých okruhů do mapy urbanistických obvodů. Hodnota osob nacházejících se v jednotlivých okruzích je dále násobena průměrnou pravděpodobností úmrtí v daném intervalu. Např. pro okruh 200 – 400 metrů je hodnota průměrné pravděpodobnosti úmrtí vypočtena jako:

$$\overline{P_u(0-200)} = \frac{P_u(200) + P_u(300) + P_u(400)}{3} = \frac{1 + 0,86 + 0,6}{3} = 0,82 = 82\%$$

Do výpočtu vstupují ještě tři korekční faktory. Jsou to korekční faktory f_{in} a f_{out} , které jsou popsány v tab. 5. a korekční faktor pravděpodobnosti přítomnosti obyvatelstva v obydlených zónách, který je během denního času 0,7 a během noci 1 (popsáno v kapitole 3.2.2.6).

Po zanesení tří okruhů do mapy urbanistických obvodů města Liberce byly vypočteny tyto hodnoty potenciálních úmrtí osob.

0 – 200 metrů

$$F_j = F_{in} \cdot f_{in} + F_{out} \cdot f_{out}$$

kde $j = u$

$$F_{in} = 0,1 \cdot 1 = 10\%$$

$$f_{in} = 0,93 = 93\%$$

$$F_{out}(0-200) = \overline{P_u(0-200)} = \frac{P_u(0) + P_u(100) + P_u(200)}{3} = \frac{1 + 1 + 1}{3} = 1 = 100\%$$

$$f_{out} = 0,07 = 7\%$$

$$F_j = F_u = 0,1 \cdot 0,93 + 1 \cdot 0,07 = 0,163 = 16,3\%$$

Výpočet potenciálních úmrtí pro jednotlivé zasažené urbanistické obvody bude následující:

Pozn: Železniční nádraží je bráno jako samostatný obvod s průměrným počtem 400 osob.

$$\Delta N_u(0-200) = 0,7 \cdot N_{ob} \cdot S_z \cdot F_u$$

$\Delta N_u(0-200)$ potenciální počet úmrtí v daném urbanistickém obvodu [1]

N_{ob} počet obyvatel v daném urbanistickém obvodu [1]

S_z procentuální zasažení plochy daného urbanistického obvodu [%]

Celkový počet potenciálních úmrtí pro daný okruh bude:

$$N_u(0-200) = \sum \Delta N_u(0-200)$$

Společenské riziko pro daný okruh se vypočítá ze vztahu:

$$\Delta S_{S,\varphi}(0-200) = f_s \cdot P_\varphi \cdot P_{MS} \cdot N_u(0-200)$$

$f_s = P_\varepsilon = 5,9 \cdot 10^{-6}$ Celková roční četnost úniku čpavku na železničním nádraží v Liberci

$P_\varphi = \frac{1}{8}$ pravděpodobnost směru větru

$P_{MS} = \frac{1}{6}$ pravděpodobnost třídy meteorologické stability

$$N_u(0-200) = \sum \Delta N_u(0-200) = 39$$

$$\Delta S_{S,\varphi} = 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} \cdot 39 = 4,8 \cdot 10^{-6}$$

200 – 400 metrů

$$F_j = F_{in} \cdot f_{in} + F_{out} \cdot f_{out}$$

$$F_{in} = 0,1 \cdot 0,82 = 0,082 = 8,2\%$$

$$f_{in} = 0,93 = 93\%$$

$$F_{out}(200-400) = \overline{P_u(200-400)} = \frac{P_u(200) + P_u(300) + P_u(400)}{3} = \frac{1 + 0,86 + 0,6}{3} = 0,82 = 82\%$$

$$f_{out} = 0,07 = 7\%$$

$$F_j = F_u = 0,082 \cdot 0,93 + 0,82 \cdot 0,07 = 0,13 = 13\%$$

$$N_u(200-400) = \sum \Delta N_u(200-400) = 26$$

$$\Delta S_{S,\varphi}(200-400) = f_s \cdot P_\varphi \cdot P_{MS} \cdot N_u(200-400) = 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} \cdot 26 = 3,2 \cdot 10^{-6}$$

400 – 800 metrů

$$F_j = F_{in} \cdot f_{in} + F_{out} \cdot f_{out}$$

$$F_{in} = 0,1 \cdot 0,2 = 0,02 = 2\%$$

$$f_{in} = 0,93 = 93\%$$

$$F_{out}(400-800) = \overline{P_u(400-800)} = \frac{P_u(400) + P_u(500) + P_u(600) + P_u(700) + P_u(800)}{5} =$$

$$= \frac{0,6 + 0,26 + 0,11 + 0,04 + 0}{5} = 0,2 = 20\%$$

$$f_{out} = 0,07 = 7\%$$

$$F_j = F_u = 0,02 \cdot 0,93 + 0,2 \cdot 0,07 = 0,032 = 3,2\%$$

$$N_u(400-800) = \sum \Delta N_u(400-800) = 32$$

$$\Delta S_{s,\varphi}(400-800) = f_s \cdot P_\varphi \cdot P_{MS} \cdot N_u(400-800) = 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} \cdot 32 = 3,9 \cdot 10^{-6}$$

4.3.5 Výpočet kritéria přijatelnosti rizika

Počet potenciálních úmrtí osob při úniku čpavku ze železniční cisterny je 97

Kritérium

Individuální riziko

$$\Delta IR_{s,\varphi}(200) = 0,12 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-7} < 10^{-5}$$

$$\Delta IR_{s,\varphi}(400) = 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 0,07 \cdot 10^{-6} = 7 \cdot 10^{-8} < 10^{-5}$$

$$\Delta IR_{s,\varphi}(600) = 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,11 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 0,01 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-8} < 10^{-5}$$

Společenské riziko

Podmínka přijatelnosti společenského rizika (viz. tab. 6):

$$F_m = \frac{10^{-3}}{N^2} \quad (3 - 23)$$

F_m frekvence události

N počet potenciálních úmrtí osob

Přípustný počet úmrtí nehody s únikem čpavku na železničním nádraží v Liberci

$$N = \sqrt{\frac{10^{-3}}{1,17 \cdot 10^{-7}}} = 93$$

Za daných podmínek přepravy je možno z hlediska přijatelnosti rizika připustit 93 úmrtí osob.

Pro případ úniku čpavku z železniční cisterny na hlavním nádraží v Liberci byla vyčíslena hodnota potenciálních úmrtí osob **97**.

4.4 Únik čpavku zpracovaný softwarem Aloha

V této kapitole jsou uvedeny a ukázány výstupní parametry, grafy softwaru Aloha pro specifickou havárii cisterny s okamžitým únikem čpavku do atmosféry.

Parametry úniku: Informační panel programu Aloha dává celkový přehled o zadaných parametrech doplněných o vnitřní parametry.

SITE DATA INFORMATION:

Location: LIBEREC, CZECH

Building Air Exchanges Per Hour: 0.42 (sheltered double storied)

CHEMICAL INFORMATION:

Chemical Name: AMMONIA Molecular Weight: 17.03 g/mol

ERPG-3: 750 ppm ERPG - 2: 150 ppm ERPG - 1: 25 ppm

IDLH: 300 ppm

Normal Boiling Point: -33.4°C Ambient Boiling Point: -34.4°C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC INFORMATION: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 4 meters/sec from NW at 3 meters

No Inversion Height

Stability Class: D Air Temperature: 20°C

Relative Humidity: 50% Ground Roughness: urban or forest

SOURCE STRENGTH INFORMATION:

Direct Source: 35 tons Source Height: 0

Release Rate: 529 kilograms/sec

Total Amount Released: 31,751 kilograms

Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.

Use both dispersion modules to investigate its potential behavior.

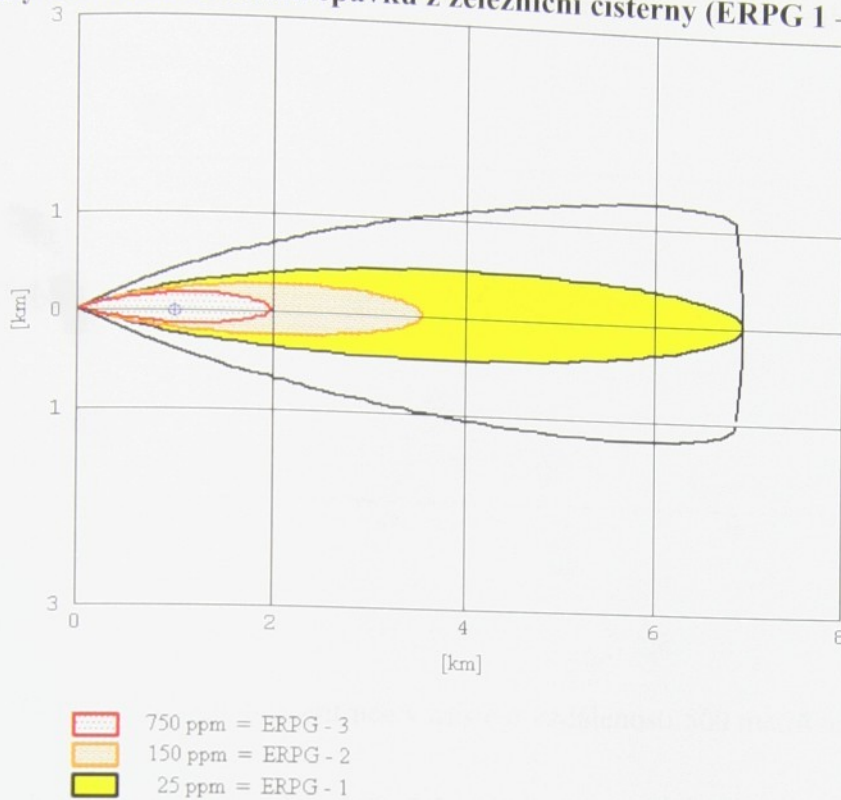
FOOTPRINT INFORMATION:

Red LOC (750 ppm = ERPG - 3) Max Threat Zone: **2.0 kilometers**

Orange LOC (150 ppm = ERPG - 2) Max Threat Zone: **3.5 kilometers**

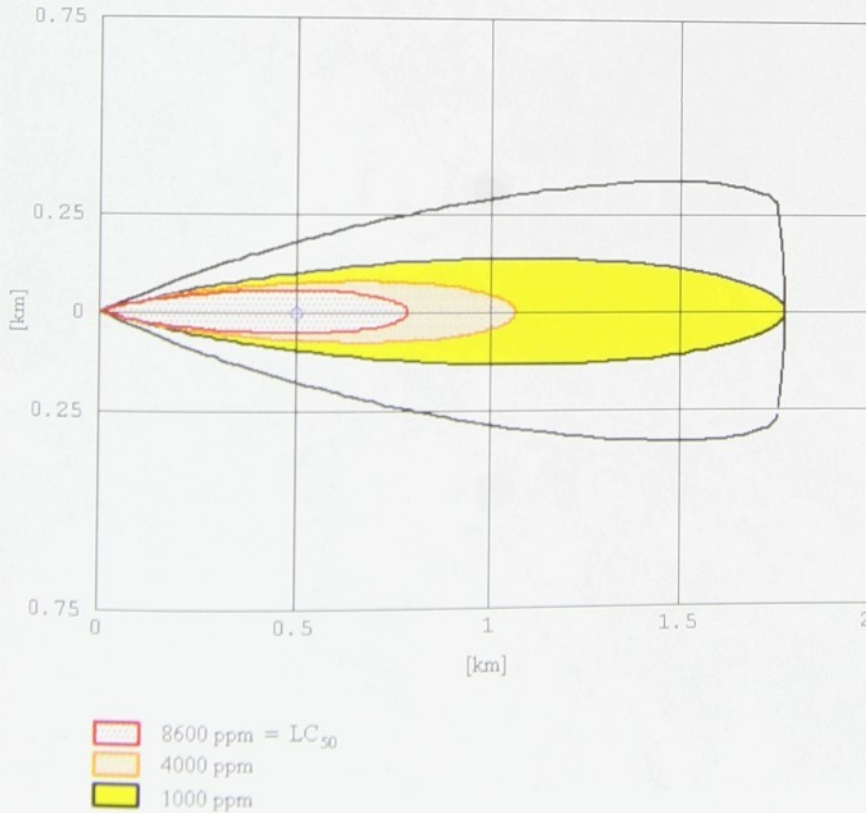
Yellow LOC (25 ppm = ERPG - 1) Max Threat Zone: **7.0 kilometers**

Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (ERPG 1 – 3)



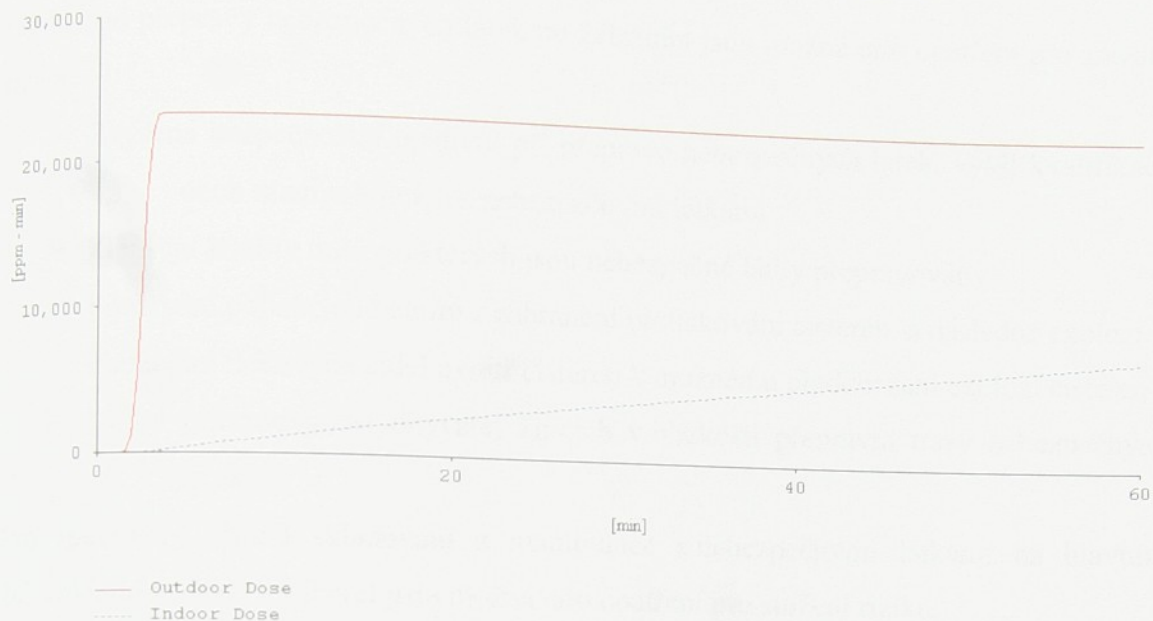
Graf 11: Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (ERPG 1 – 3)

Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (LC₅₀, 4000 ppm, 1000 ppm)



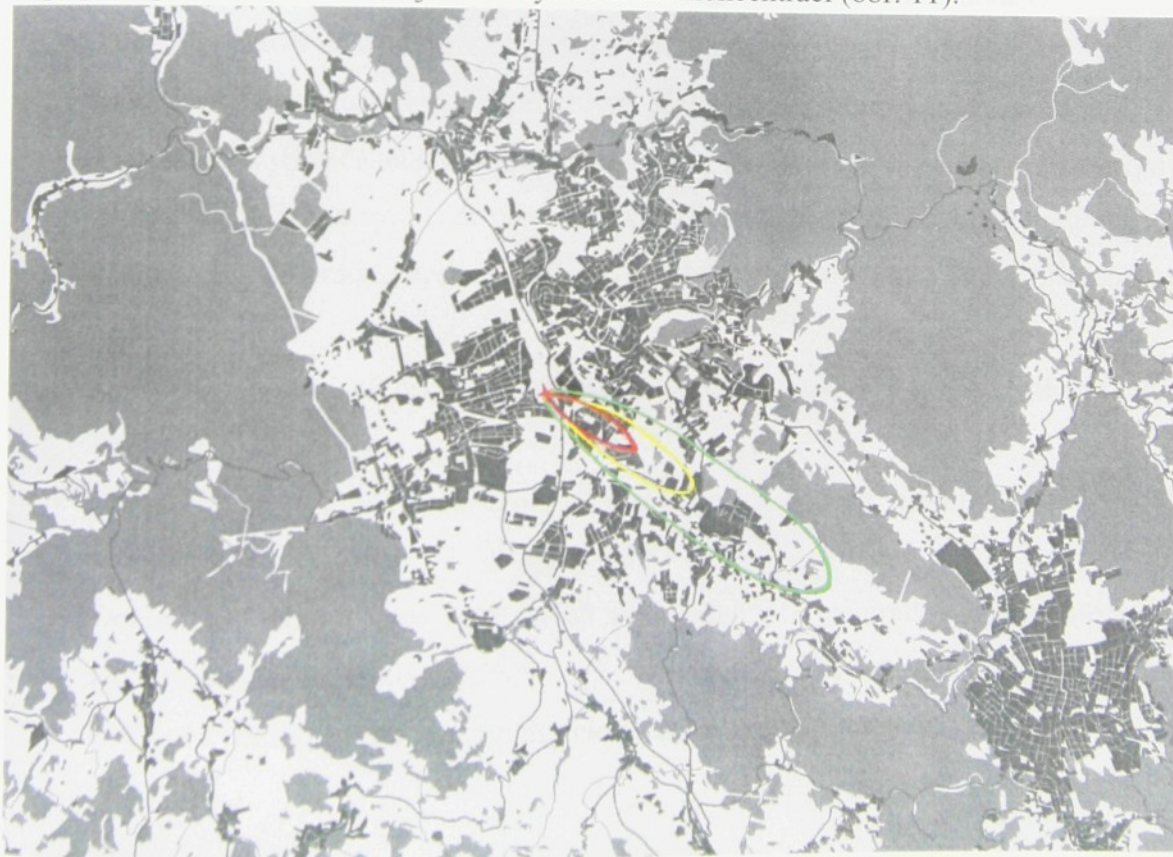
Graf 12: Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (LC₅₀, 4000 ppm, 1000 ppm)

Průběh koncentrace v místě o vzdálenosti 500 metrů od místa úniku



Graf 13: Průběh koncentrace v místě o vzdálenosti 500 metrů od místa úniku

Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (ERPG 1 – 3) jsou zakresleny do mapy pro lepší ilustraci dosahu jednotlivých okruhů koncentrací (obr. 11).



Obr. 11: Okruhy koncentrace úniku čpavku z železniční cisterny (ERPG 1 – 3) zakreslené v mapě města Liberce a okolí

4.5 Navržená opatření pro snížení rizika

Pro případ přepravy nebezpečných látek po železnici jsou možná tato opatření pro snížení rizika:

- Zvýšená bezpečnostní opatření při přepravě nebezpečných látek, vyšší kvalifikace osob manipulujících s nebezpečnými látkami
- Zlepšení kvality tratí, po kterých jsou nebezpečné látky přepravovány
- Používání pojistných ventilů z zabránění přetlakování cisteren a následné explozi
- Používání tlakových čidel uvnitř cisteren k možnému předcházení explozí cisteren
- Dobrá informovanost obyvatel žijících v blízkosti přepravní trasy nebezpečných látek

Pro specifický případ skladování a manipulace s nebezpečnými látkami na hlavním železničním nádraží v Liberci jsou možná tato opatření pro snížení rizika:

- Omezení množství nebezpečných látek přepravovaných přes hlavní železniční nádraží v Liberci
- Skladování nebezpečných látek na místě, kde je nejmenší možnost ohrožení lidí a životního prostředí (v samostatné stanici oddělené od osobního nádraží)
- Fungující plán vyrozumění v případě havárie s únikem nebezpečné látky
- Dobrá informovanost obyvatel přilehlých částí hlavního železničního nádraží
- Připravenost Hasičského záchranného sboru Liberec (rychlý zásah, připravený model zásahu, míra evakuace obyvatelstva přilehlých částí železničního nádraží)
- Fungující spolupráce všech zásahových složek přítomných při úniku nebezpečné látky
- Omezení nákladní přepravy přes hlavní železniční nádraží v Liberci v dopravních špičkách
- Vystavění prostor pro možné ukrytí zaměstnanců nádraží při úniku nebezpečné látky
- Dohled nad používáním ochranných prostředků při manipulaci s nebezpečnými látkami (nakládka, vykládka)
- Zvýšení kvalifikace osob manipulujících s nebezpečnými látkami

Pro důkladnou analýzu rizik pro hlavní železniční nádraží v Liberci jsou potřeba podrobná statistická data.

Jsou to statistiky množství přepravovaných nebezpečných látek, četnost přepravy těchto nebezpečných látek, statistiky jednotlivých nehod s únikem nebezpečných látek na nádraží (jaká látka, jaké množství, podmínky úniku, podniknuté kroky při likvidování nehody s únikem nebezpečné látky). Dále závažnost jednotlivých nehod, počty zraněných, počty mrtvých, vliv nehody na životní prostředí.

Všechny výše uvedené skutečnosti budou vést k obsáhlejší analýze rizik pro hlavní železniční nádraží v Liberci. Výsledkem obsáhlejších analýz rizik bude zvýšení věrohodnosti analýz a případných reakcí na tyto analýzy, což v konečném kroku může vylepšit stávající opatření pro snížení rizika.

5 ZÁVĚR

1. V první části jsou vysvětleny základní pojmy používané v analýze a hodnocení rizik nežádoucí události. Je vysvětlen pojem riziko a představeny základní metody používané pro analýzy rizik. Dále jsou představeny jednotlivé modely používané pro stanovení vlastnosti úniků nebezpečných látek. Současně je výčet modelů rozšířen o modely, které se používají ke stanovení následků nežádoucích událostí. Jsou popsány metody pro posouzení přijatelnosti jednotlivých rizik a kritéria přijatelnosti rizik. V neposlední řadě jsou zde uvedena možná opatření týkající se snížení rizik provozu zařízení.
2. Ve druhé části je stanoven postup pro analýzu a hodnocení rizika přepravy nebezpečných látek po železnici. Je naznačeno třídění jednotlivých nebezpečných látek a značení železničních vozů používaných pro přepravu nebezpečných látek. V této části je uveden vztah pro výpočet pravděpodobnosti nehody s únikem nebezpečné látky na železnici vztažené na jeden vlakový kilometr. Dále jsou zde uvedeny vztahy, které je možno použít pro hodnocení individuálního a společenského rizika přepravy nebezpečných látek po železnici. Výsledná metodika dává přehled o tom, jaké metody je možno použít v případě hodnocení rizika úniku nebezpečné látky na železnici.
3. V praktické části diplomové práce je hodnoceno riziko nehody s únikem nebezpečné látky na hlavním železničním nádraží v Liberci podle sestavené metodiky. Hlavní důraz je kladen na potenciální úmrtí osob zasažených nebezpečnou látkou. Základem pro pozdější kvantifikaci rizika úmrtí obyvatel přilehlých částí hlavního železničního nádraží v Liberci při přepravě nebezpečných látek je výpočet pravděpodobnosti vzniku nebezpečné havárie. Pro vyjádření pravděpodobnosti bylo třeba zpracovat velké množství statistických údajů. Byly popsány a zpracovány statistické údaje, které jsou později použity pro výpočet pravděpodobnosti nehody v nákladní železniční dopravě. Pro doplnění celkového přehledu o vývoji nehodovosti v železniční dopravě je statistika doplněna o údaje z osobní železniční dopravy.

Na specifickém příkladu je popsáno určení pravděpodobnosti úmrtí, individuálního rizika a společenského rizika. Individuální riziko je zakresleno do rastrové mapy okolí železničního nádraží. Vypočtené hodnoty individuálního a společenského rizika jsou porovnány s kritérii přijatelnosti jednotlivých rizik. Bylo zjištěno, že individuální riziko přepravy čpavku přes hlavní železniční nádraží je přijatelné. Pro společenské riziko by byl nejvyšší možný přípustný počet potenciálních úmrtí osob při úniku čpavku z železniční cisterny 93. Z výpočtu zasažení jednotlivých urbanistických obvodů vyšla hodnota 97 potenciálně mrtvých osob. V poslední části diplomové práce jsou představena možná opatření pro snížení rizik přepravy nebezpečných látek po železnici. Dále jsou uvedena možná specifická opatření pro snížení rizik manipulace a přepravy nebezpečných látek na hlavním železničním nádraží v Liberci.

LITERATURA

- [1] Committee for the Prevention of Disasters: Guidelines for Quantitative Risk Assessment, Den Hague 1999
- [2] Committee for the Prevention of Disasters: Methods for the calculation of physical effects, Den Hague 1997
- [3] Committee for the Prevention of Disasters: Methods for calculation of damage. Voorburg 1990
- [4] American Institute of Chemical Engineers (AIChE): Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide, 2005
- [5] American Institute of Chemical Engineers (AIChE): Dow's Chemical Exposure Index Guide, 1998
- [6] Stone & Webster Engineering Corporation: Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry, 1991
- [7] Center for Chemical Process Safety: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 1999
- [8] CROWL D. A., LOUVAR J. F.
- [9] BUMBA J.: Charakteristika havárií spojených s nebezpečnými látkami v chemickém a jiném průmyslu, část I. Zpráva pro MV – GR HZS. Praha 2003
- [10] PROCHÁZKOVÁ D.: Minimální znalosti pro určování rizik. Učební texty IMS Praha. Praha 2003
- [11] RICHARDSON M.L. ed.: Risk Assessment of Chemicals in the Environment. The Royal Society of Chemistry, London 1988
- [12] MYKISKA A.: Spolehlivost technických systémů. Vydavatelství ČVUT. Praha 2000
- [13] STARÝ, I.: Spolehlivost systémů. Vydavatelství ČVUT. Praha 1998
- [14] HOLUB, R., VINTR, Z.: Základy spolehlivosti. Vojenská akademie v Brně. Brno 2002
- [15] HOLICKÝ, M., MARKOVÁ, J.: Základy teorie spolehlivosti a hodnocení rizik. Vydavatelství ČVUT. Praha 2005
- [16] ČSN IEC 61882 Studie nebezpečí a provozuschopnosti (studie HAZOP) – Pokyn k použití
- [17] ČSN IEC 1025 Analýza stromu poruchových stavů

- [18] ČSN IEC 812 Metody spolehlivosti systému – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)
- [19] Internetová adresa: <http://www.mvcr.cz>
- [20] Internetová adresa: <http://mdcr.cz>
- [21] Internetová adresa: <http://www.epa.gov>
- [22] Internetová adresa: <http://toxnet.nlm.nih.gov>
- [23] Internetová adresa: <http://www.krizove-rizeni.cz>
- [24] Internetová adresa: <http://www.enviweb.cz>
- [25] Dopravní informační systém DOK
Internetová adresa: <http://cep.mdcz.cz/dok2/DokPub/dok.asp>
- [26] Zákon č. 353/1999 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami a chemickými přípravky.
- [27] Zákon č. 157/1998 Sb. o chemických látkách a chemických přípravcích.
- [21] RID – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí
- [22] Statistické ročenky ČR roč. 1998, Český statistický úřad, 1997
- [23] Statistické ročenky ČR roč. 2003, Český statistický úřad, 2002.
- [24] Statistická ročenka ČD roč. 1997.
- [25] Statistická ročenka ČD roč. 2002.

PŘÍLOHA 1

Třídění nebezpečných látek

Třída 1- výbušné látky

Řada nebezpečných látek ve směsi se vzduchem v přítomnosti otevřeného plamene vybuchuje. K tomu, aby k výbuchu došlo, je nutné dosažení určité koncentrace plynů nebo par látky v ovzduší. Koncentrační rozpětí, ve kterém páry látky ve směsi se vzduchem vybuchují, se označuje jako oblast výbušnosti.

K havárii se hasiči obvykle dostanou až po explozi části nákladu. Jedinou možnou zábranou dalších explozí je intenzivní skrápění převáženého nákladu rozptýleným vodním proudem (s výjimkou látek označených před číselným kódem písmenem X).

Třída 2 – tekuté plyny

K poměrně často přepravovaným substrátům v České republice patří **tekutý kyslík**. V případě havárie vozidla přepravující tuto látku je nejdůležitější uzavřít ohrožený prostor, aby v okolí nemohla stoupnout koncentrace kyslíku nad 25%, tedy nad hodnotu, která velmi výrazně podporuje hoření téměř všech materiálů. Je dobré snažit se zasypat louži tekutiny třeba škvárou nebo pískem. Piliny, sláma a jiné organické hmoty nasáklé tekutým kyslíkem tvoří výbušninu (oxiliquit) srovnatelnou s dynamitem.

Tekutý Chlór – Prudký jed, jehož dráždivost včas varuje. Pozitivní vlastností chlóru je jeho dobrá reaktivita s páleným vápnem. Vzniká chlórové vápno, které již neznamena nebezpečí. Zásah je třeba provádět s dýchacími přístroji.

Amoniak (čpavek) – V případě havárie je v první řadě třeba uzavřít ohrožený prostor, protože nebezpečná koncentrace čpavku je pouhé 2 mg na litr vzduchu. Zásah je nutné provádět nejen v dýchací technice, ale i v ochranných oblecích, protože čpavek se snadno rozpouští v tělesných tekutinách a má žíravé účinky. Jako absorbent se osvědčily čerstvé piliny v množství asi 10 m³ na jednu tunu čpavku.

Třída 3 – hořlavé kapaliny

Do této třídy patří většina vyráběných a převážených organických kapalin.

Ethylalkohol – již o koncentraci 40%

Ředidla, motorová nafta, těžký ropný olej – jen některé z nich mají speciální nepříznivé vlastnosti

Kyselina akrylová, akryláty – Jejich jedovatost sice nevybočuje z průměru jiných běžných organických kapalin, ale vyznačují se pronikavým zápachem a ohavnou chutí, citelnou už při malých koncentracích. Množství menší než 1 mg stačí ke znehodnocení tisíce litrů pitné vody. Při havárii je nutné se vyvarovat použití vody nebo vodní pěny. Jako absorbent se používá jemně mletý vápenec s vápenným hydrátem.

Třída 4 – pevné látky

V České republice se převládá pouze jedna problémová pevná látka, kterou je **sodík**. Vozí se obvykle v sudech, zalitý petrolejem. Při havárii nebo poškození sudů petrolej obvykle vyteče, sodík se dostane na vzduch a může vznítit. Nejlepším způsobem asanace je provizorní utěsnění trhliny v sudu a doplnění petroleje.

Třída 5 – vznětlivé látky

Do této skupiny patří **organické peroxidy** a **peroxid vodíku** (v koncentraci nad 30%). V obou případech je nejlepší metodou asanace rozředění reagujících látek vodou. Pravděpodobnost havárie těchto látek však v České republice je malá, protože v současné době je spotřeba a tedy i transport silně limitován.

Třída 6 – jedovaté látky

Obecně lze říci, že jed je látka, která způsobuje otravu i v jednorázových dávkách, nebo poškozuje organismus v nepatrných dávkách. Toxický účinek je výsledkem interakce živé hmoty a látky.

Do této třídy patří **formaldehyd** (formalín). Je to protoplastický a mutagenní jed. Formaldehyd reaguje s mnoha látkami. Velmi rychle reaguje např. se čpavkem. Toho využívá i metoda asanace. Kaluže uniklého formalínu se kropí čpavkovou vodou. Je nutné pracovat s dýchacím přístrojem!

Třída 8 – žíravé látky

Mezi žíravé látky přibližně stejných nepříjemných vlastností můžeme řadit kyselinu solnou (chlorovodíkovou, obvykle 35%), kyselinu sírovou (obvykle 98%), kyselinu dusičnou (56%) a roztok hydroxidu sodného (40%). Nejlepší metodou asanace kyselin je jejich neutralizace. Provádí se zasypáním jemně mletým vápencem.

V rámci příslušné třídy lze nebezpečnou látku dále podrobněji charakterizovat přídatným druhým a třetím číslem, které udává další nebezpečné vlastnosti.

PŘÍLOHA 2

Značení nebezpečných nákladů



Obr. 1: Označení diamantovým kódem

Vysvětlení významu polí a značení

Modré pole označuje:

Číslo	Míra nebezpečí poškození zdraví	Ochrana
4	Mimořádně nebezpečné!	Zabránit jakémukoliv kontaktu s parami nebo kapalinou bez speciálních ochranných prostředků.
3	Velmi nebezpečné!	Práce a pobyt v zamořeném území možný pouze v protichemickém ochranném obleku a s dýchacím přístrojem.
2	Nebezpečné!	Práce a pobyt v zamořeném území pouze s dýchacím přístrojem a v ochranném oděvu.
1	Málo nebezpečné!	Doporučeno použití dýchacího přístroje.
0	Bez nebezpečí!	

Červené pole označuje:

Číslo	Míra nebezpečí požáru
4	Extrémně lehce zápalný při všech teplotách.
3	Nebezpečí iniciace při normální teplotě.
2	Nebezpečí iniciace při ohřátí.
1	Nebezpečí iniciace při silném ohřátí.
0	Bez nebezpečí iniciace za normálních okolností.

Žluté pole označuje:

Číslo	Míra reaktivity (samovolné reakce)	Opatření
4	Velké nebezpečí výbuchu!	Vytvořit vnější a nebezpečnou zónu. Při požáru evakuovat nebezpečnou oblast.
3	Nebezpečí výbuchu při působení horka, nebo při velkém otřesu.	Vytvořit vnější a nebezpečnou zónu.
2	Možnost prudké chemické reakce!	Vytvořit vnější a nebezpečnou zónu, hasební zásah provádět pouze z bezpečné vzdálenosti.
1	Při silném zahřátí nestabilní!	Nutnost přijetí bezpečnostních opatření.
0	Za normálních podmínek bez nebezpečí.	

Bílé pole označuje:

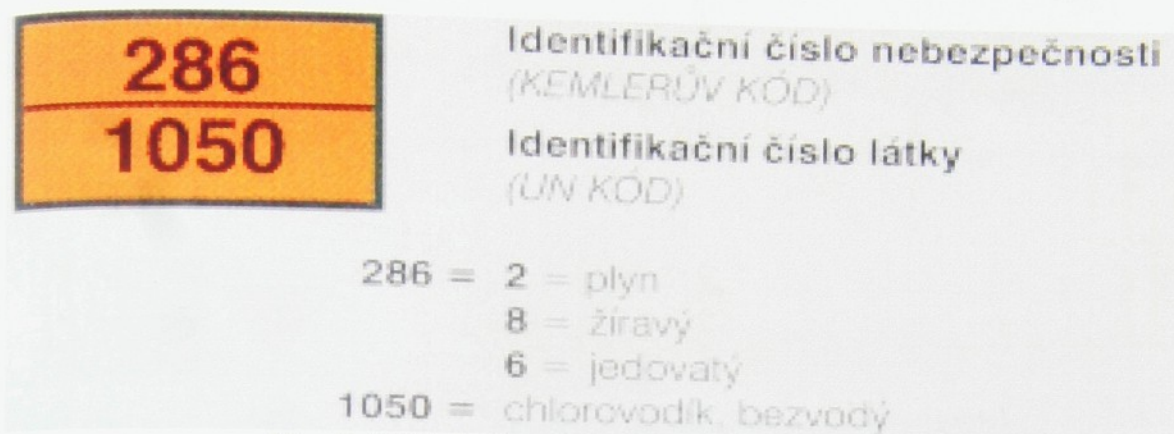
Označení	Míra dalšího nebezpečí
Prázdné pole	K hašení lze použít vodu
W	Voda k hašení se nesmí použít, látka reaguje s vodou.
OXY	Látka působí jako silné okysličovadlo.

Výstražné identifikační tabule na nákladní vozy

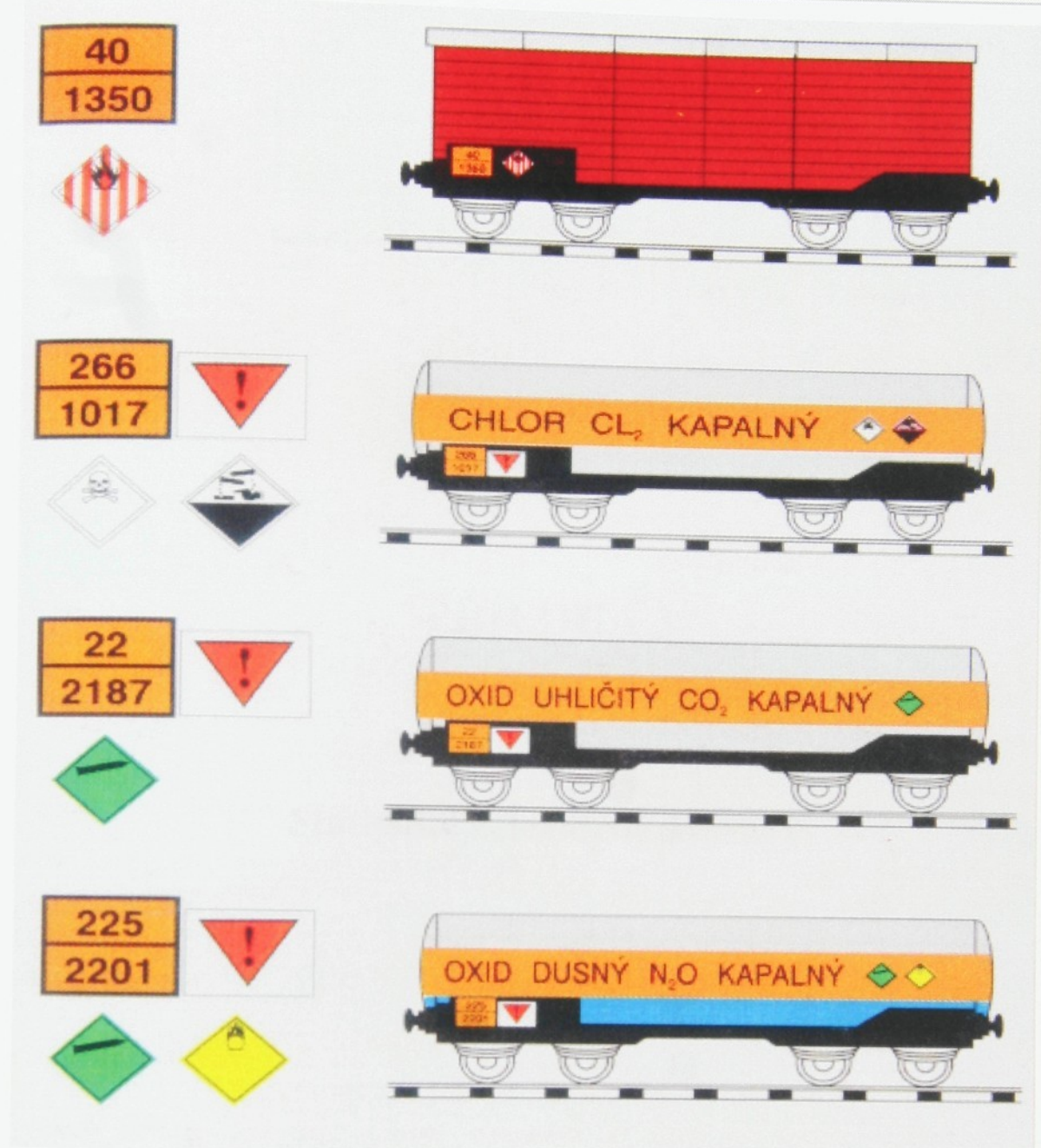
Pro polepování železničních vozů a ostatních nádob pro přepravu nebezpečného zboží jsou předpisem určené nálepky pro označování nebezpečí (viz Obr. 2). Ve spodní polovině nálepek výstražných značek může být nápis, který poukazuje číslicemi nebo písmeny na druh nebezpečí. Při přepravě vozových zásilek musejí být železniční vozy označeny výstražnými značkami podle předpisu **RID** [21] pro přepravu nebezpečných látek.

Kotlové vozy (cisterny) a nádržkové kontejnery se označují zvláštními výstražnými tabulemi (nálepkami), pokud se přepravuje nebezpečná látka vyjmenovaná v **RID**. Na každé podélné straně vozu musí odesílatel svisle umístit obdélníkovou oranžovou tabuli (nálepku) o základně 400 mm a výšce nejméně 300 mm, která nyní, na rozdíl od stávajícího **RID**, smí odrážet světlo. Tabule (nálepka) musí mít černý okraj o šířce 15 mm. Každá tabule (nálepka) musí mít identifikační čísla, která byla přidělena přepravované látce podle seznamu v **RID**. Tato identifikační čísla sestávají z černých číslic o výšce 100 mm a tloušťce čáry 15 mm. Identifikační čísla k označení nebezpečí musejí být uvedena v horní části tabule (dvojmístné nebo třímístné číslo, v některých případech s předcházejícím písmenem X) a identifikační čísla k označení látky v dolní části (čtyřmístné číslo). Obě tato čísla jsou od sebe oddělena vodorovnou čarou černé barvy o tloušťce 15 mm, vedenou od jednoho kraje tabule v polovině

její výšky ke kraji druhému (viz Obr. 1). Nápis identifikačních čísel musejí být nesmazatelné a musejí zůstat čitelné i po požáru trvajícím 15 minut.



Obr. 2: Příklad výstražného označení železničního vozu



Obr. 3: Příklady označování železničních vozů

PŘÍLOHA 3

Statistika železniční dopravy

Tab. 1: Délka tratí

	Km									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Stavební délka tratí	9441	9413	9430	9435	9430	9430	9365	9365	9444	9499
<i>jedenokolejné</i>	7490	7386	7403	7494	7490	7490	7436	7436	7566	7624
<i>dvou- a vícekolejné</i>	1951	2027	2027	1941	1940	1940	1929	1929	1878	1875
<i>normálně rozchodné</i>	9435	9316	9336	9341	9366	9366	9342	9342	9421	9477
<i>úzkorozchodné</i>	96	97	94	94	94	94	23	23	23	22
<i>neelektrizované</i>	6735	6773	6687	6576	6571	6446	6522	6522	6551	6573
<i>elektrizované</i>	2706	2640	2743	2859	2859	2984	2843	2843	2893	2926
Délka kolejí celkem	17249	15575	16884	16876	16714	17095	16948	16417	16370	16322

Tab. 2: Počet přepravovaných osob

Přeprava	mil. osob									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Vnitrostátní	241,05	227,63	225,65	217,38	199,25	179,05	172,39	179,79	185,53	172,64
Mezinárodní	1,128	1,086	1,502	1,863	3,627	2,931	2,622	2,759	2,753	2,339
Celkem	242,18	228,72	227,15	219,24	202,88	181,98	175,02	182,55	188,28	174,98

Tab. 3: Počet nehod a způsobená škoda

	Počet // tis.Kč									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Počet nehod	2255	2189	2288	2412	2838	2582	2624	2629	2817	1375
Z toho:										
Velké nehody (A)	88	95	103	94	****	****	****	****	****	****
Nehody (B)	31	54	64	60	****	****	****	****	****	****
Ohrož.provozu (C,D)	2136	2040	2121	2258	****	****	****	****	****	****
Kategorie A	****	****	****	****	354	312	333	283	309	241
Kategorie B	****	****	****	****	55	37	54	51	48	448
Kategorie C	****	****	****	****	2429	2233	2237	2295	2460	686
Škoda (tis.Kč)	32686	46705	86497	70796	101905	124503	120009	107217	112210	140055

Tab. 4: Počet nehod jednotlivých kategorií

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Srážky vlaků	18	21	19	13	11	10	8	5	5	6
Vykolejení	825	730	671	635	526	398	336	307	284	246
Střetnutí na přejezdech	270	268	308	337	305	254	291	237	270	235
Ohrožení dopravy	50	55	53	42	55	37	54	51	48	68

Tab. 5: Následky nehod

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Mrtvých (M)	47	26	63	30	39	33	31	26	27	110
Zraněných (Zr)	154	122	202	294	222	167	141	133	97	257

Tab. 6: Přeprava zboží, průměrná přepravní vzdálenost

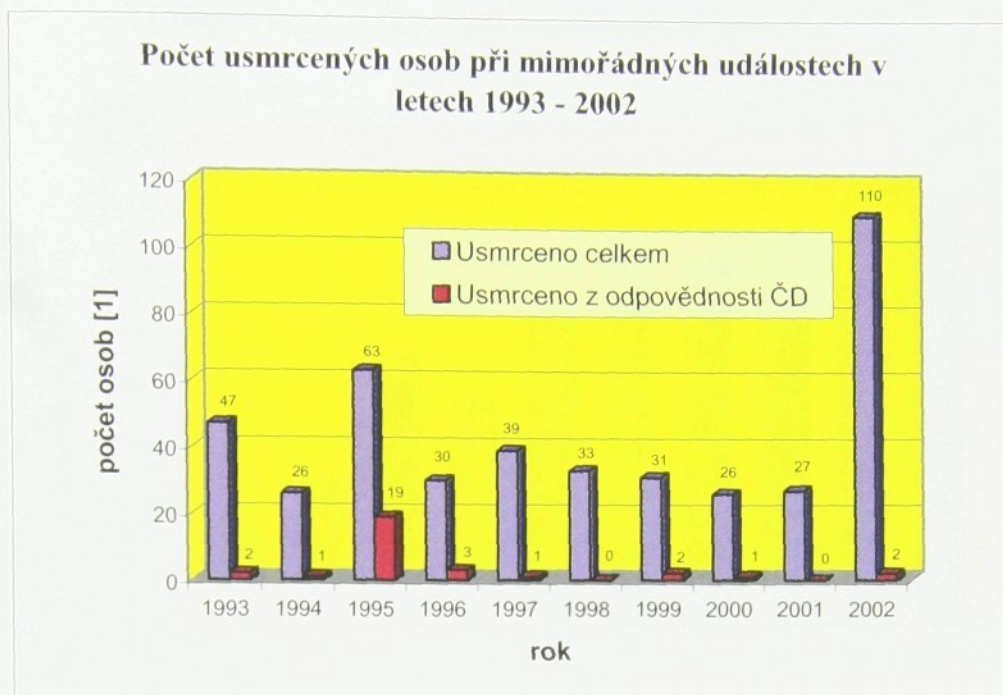
	mil. tun									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Přepravené zboží	69,98	59,64	54,56	53,19	49,17	39,84	34,71	37,59	36,16	33,43
Přepravní výkon	12570	10795	10330	10493	9505	7781	6867	7189	6833	6368
Prům. přeprav. vzd. (km)	179,6	181	189,3	197,3	193,3	195,3	197,9	191,3	189	190,5

Tab. 7: Přeprava zboží podle jednotlivých druhů

Skupiny zboží	tis. tun								
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Potraviny, zem. výr	3634,6	4610,6	4162,7	3699,7	3270,9	3622	3817,2	2447,5	1765,3
Nerostné suroviny	7885,9	9324	7424,1	7921,1	9012,6	5922,2	7274,2	7889,5	7548,7
Cement	4405,5	4000,5	3568,2	3083,3	2820,5	2492,8	2182,9	1409,6	1016,3
Písek, štěrk, štěrkopísek	4387,3	4007,4	5326	5003	3120,7	3148	3187,9	2916,6	2271,6
Ostatní stav. materiály	6739	6393,7	6225,2	5849,8	6214	5212,7	5594,4	5198,6	4699,1
Černé uhlí	15219	14264	15449	14218	12741	11118	11407	11483	11452
Hnědé uhlí	28908	26917	26294	24054	17525	15186	17520	18114	16138
Koks	2807,7	3085,1	2733,1	2573,6	2163,2	1787,9	2328,8	2453,4	2567,1
Benzín	382	355,9	1005,2	1134,9	960,6	1135,9	1156,9	1340,4	1231,6
Palivo pro dies. motory	501	589	1040,9	1124,2	1271,3	1220,7	1061,3	1318,7	1273,5
Tekutá, plynná paliva	4957,6	4637,1	3690	3239,7	3134,4	2766	2597,9	2504,8	2333,6
Chemické výrobky	4138,2	4156,4	4040,6	3832,3	3612,9	3215,4	3183,9	3299,3	3162,3
Minerální hnojiva	1359	1515,8	1447,4	1411,9	1209,9	1119,4	1284	1357,8	1025,5
Dřevo, výr. ze dřeva	5919,8	6299	6245,4	6198	5652,9	5673	5410,7	5128,2	5303,1
Papír, výrobky z papíru	1364,2	1378,7	1353,1	1285,4	1230,5	1050,5	1076,4	1039,1	948,2
Železný šrot	3093,6	3115,3	2801,6	2751,6	2924,4	2625,9	2709,8	2929	2902,5
Železo, ocel	8775	9235	8401,1	9183	9112,5	7468,6	8272,9	8201,5	8118,6
Barevné kovy, výrobky	302,1	225,8	183,5	166	156,9	148,3	121	121,5	105,7
Mech. a el. stroje	313,5	312,5	307,3	280,8	247,5	185,5	235,8	252,6	201,3
Pozemní vozidla	971,5	681,6	778,2	914,2	1247,3	1144,8	2583,8	2395,3	1999,8
Velké kontejnery	1009,9	1364,7	1738,7	1888	2068,7	2233,9	2651,9	2772,8	3409,2
Ostatní kombin. přepr.	114,8	90,9	167,1	227,3	293,3	325,9	450	490,5	481
ROLA silniční návěsy	494,4	1398,1	2053,8	2575,4	2934,1	2814,3	3100,8	2462,6	2172,8
Ostatní zboží	1059	890,1	788,5	745,2	614	546,6	561,4	479,1	472,8
Kusové zásilky	19,7	11,8	9,8	0	0	0	0	0	46,4
CELKEM	108762	108859	107235	103360	93521	82165	89770	88006	82646

Tab. 8: Počet nehod s únikem látek, počet mrtvých, zraněných, zachráněných

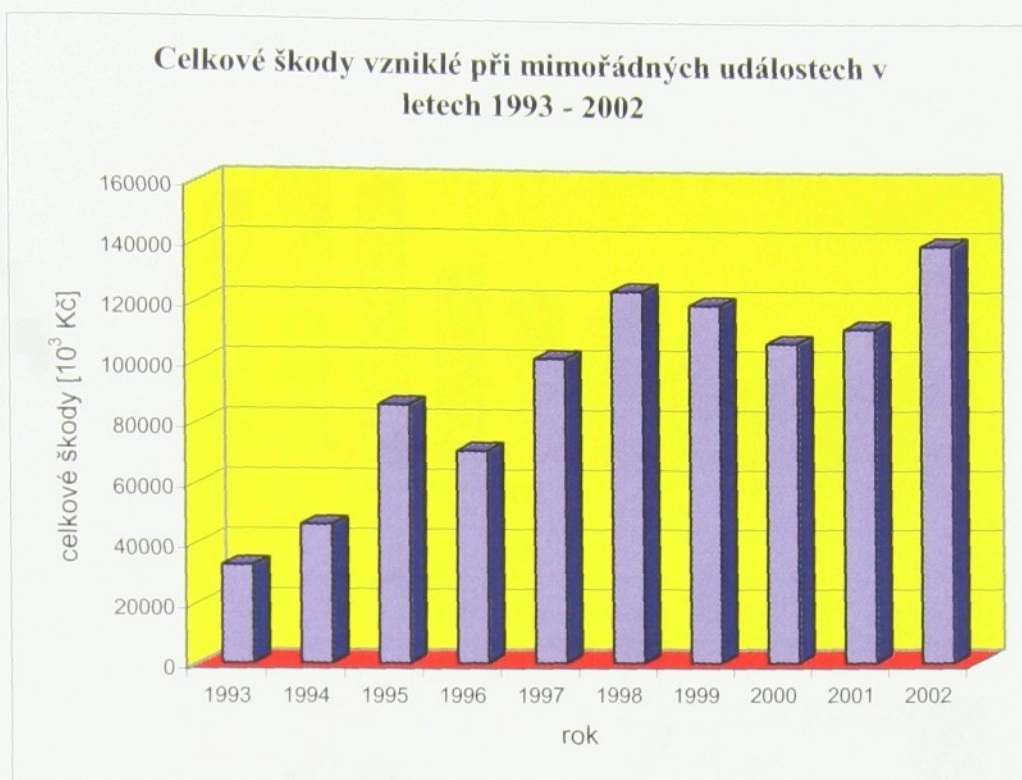
	1999	2000	2001	2002	2003
Nehody s únikem látek	326	291	264	288	336
Mrtvých	3	2	6	2	0
Zraněných	21	10	12	15	25
Zachráněných	4	0	6	0	4



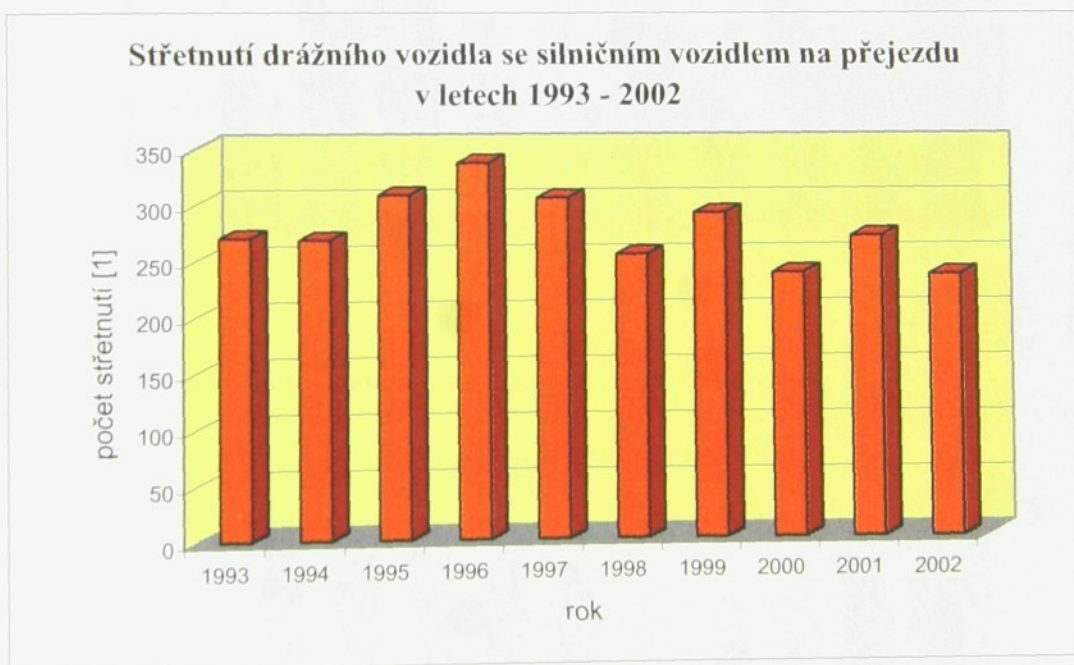
Graf 1: Počet usmrcených osob při mimořádných událostech v letech 1993 - 2002



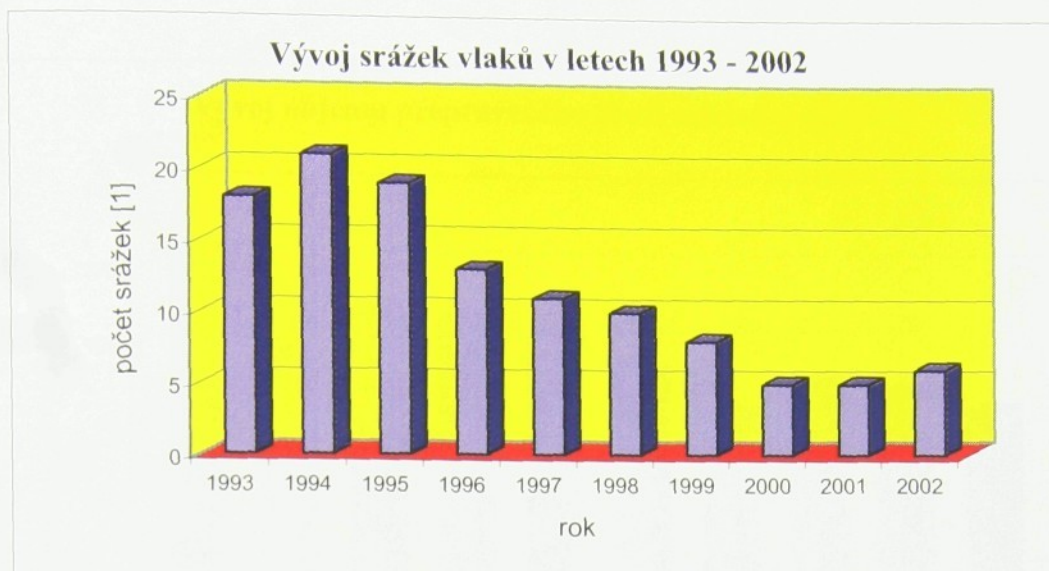
Graf 2: Počet zraněných osob při mimořádných událostech v letech 1993 - 2002



Graf 3: Celkové škody vzniklé při mimořádných událostech v letech 1993 - 2002



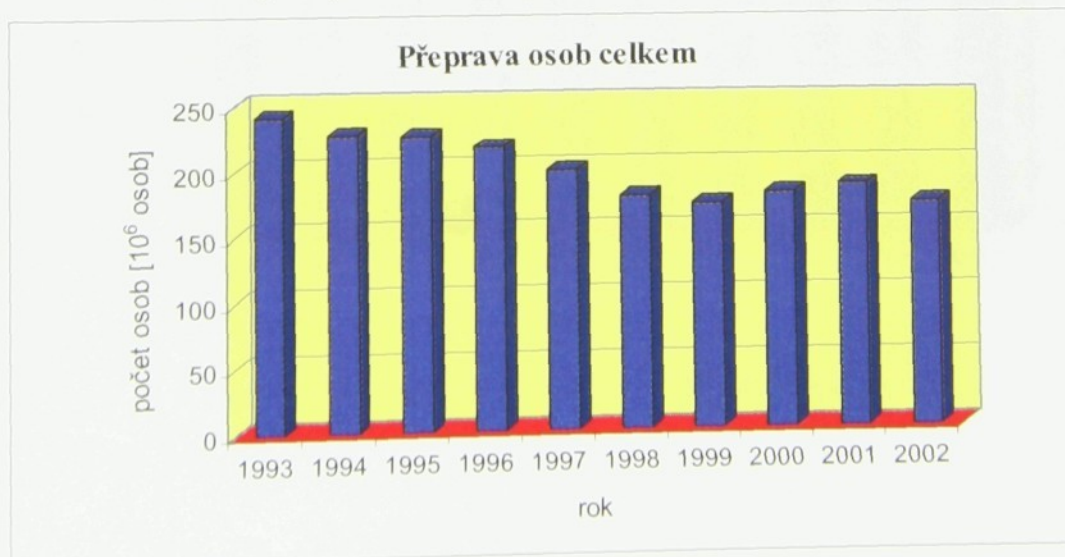
Graf 4: Střetnutí drážního vozidla se silničním vozidlem na přejezdu v letech 1993 - 2002



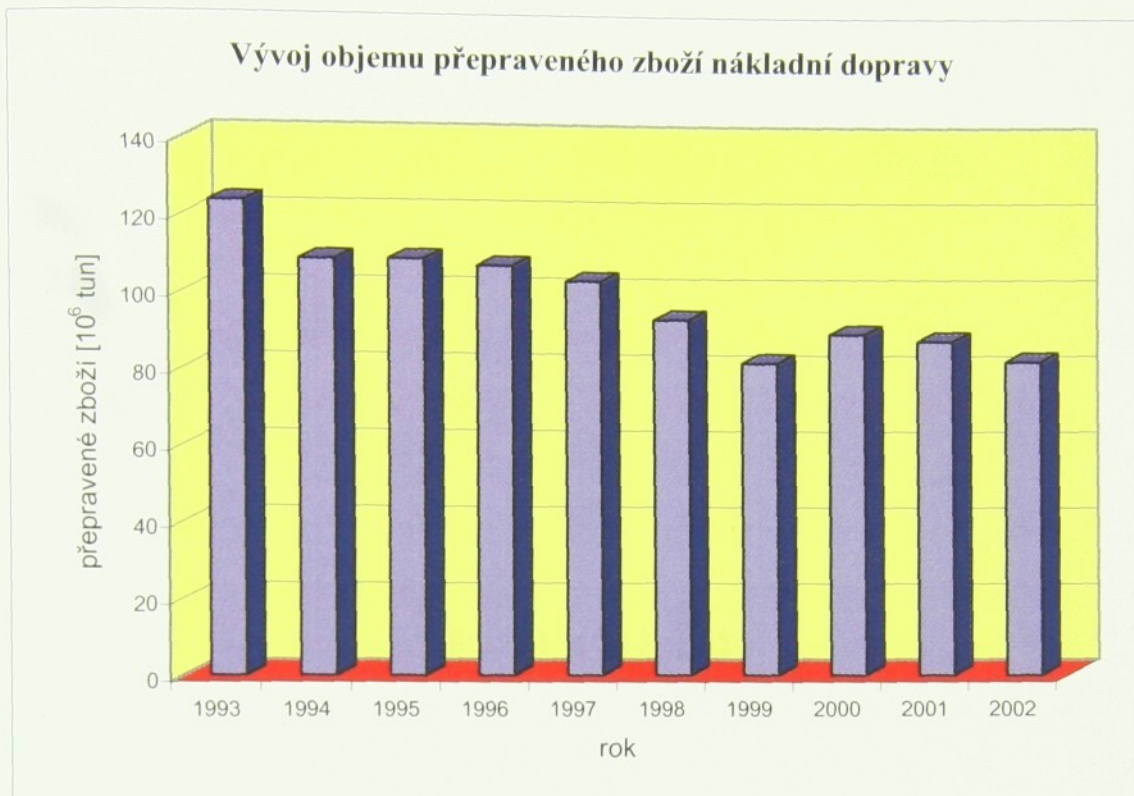
Graf 5: Vývoj srážek vlaků v letech 1993 - 2002



Graf 6: Vykolejení vozidel za jízdy vlaků v letech 1993 - 2002



Graf 7: Přeprava osob celkem



Graf 8: Vývoj objemu přepraveného zboží nákladní dopravy



Graf 9: Vývoj přepravního výkonu nákladní dopravy

PŘÍLOHA 4

Hustota zalidnění urbanistických obvodů města Liberce

Tab. 1: Hustota zalidnění urbanistických obvodů města Liberce

Číslo obvodu	Název obvodu	Počet obyvatel	Rozloha (m ²)	Hustota zalidnění (ob/m ²)
1	Liberec - střed	3619	611502	0,005918
2	Keilův vrch	1810	381436	0,004745
3	Pod nádražím	1842	190866	0,009651
4	Kristiánov	2089	254057	0,008223
5	Nerudovo náměstí	1474	143792	0,010251
6	Krajinská	2454	618798	0,003966
7	Žižkovo náměstí	2570	635828	0,004042
8	Výstaviště	79	96502	0,000819
14	Nové Pavlovice	2906	513664	0,005657
15	Staré Pavlovice	3800	1383258	0,002747
16	Pavlovice - sever	902	346588	0,002603
17	Čistící stanice	46	170030	0,000271
18	Růžodol I	2257	1395411	0,001617
19	U skládky	19	902649	0,000021
20	Letiště	1	710155	0,000001
21	Františkov	4095	1069577	0,003829
22	Janův Důl	882	266413	0,003311
23	Horní Růžodol	1081	442142	0,002445
24	Hanychov	1740	795953	0,002186
26	Hanychov - prům.obvod	104	334565	0,000311
27	Nádraží	28	246306	0,000114
28	Rochlice - jih	1225	806926	0,001518
29	Rochlice - sever	3451	553851	0,006231
30	U Nisy - jih	99	225582	0,000439
31	U Nisy - sever	220	318168	0,000691
32	Perštýn	2108	566412	0,003722
33	Králův Háj	2825	586632	0,004816
34	Husova	2284	692095	0,003300
35	Nemocnice	247	157167	0,001572
36	Vysoká škola	29	74827	0,000388
43	U Ostašova-prům.obv.	5	184632	0,000027
45	Ostašov	504	1606375	0,000314
46	Karlinky	242	1007610	0,000240
48	Broumovská	3949	480869	0,008212
49	Vesec	4101	2766448	0,001482
50	Doubí	2571	1502837	0,001711
51	Malé Doubí	210	667661	0,000315
57	Vratislavice - střed	2666	916777	0,002908
58	Vratislavice - prům.obv.	235	287662	0,000817
59	U cihelny	657	539572	0,001218
60	Zelené Údolí	140	395272	0,000354
61	Nová Ruda - sever	463	668012	0,000693
78	Nová Ruda - střed	380	255193	0,001489
79	Rochlice - střed	6756	346781	0,019482
80	U pivovaru	72	588499	0,000122
83	Jeřáb	2492	412634	0,006039
84	U Janova Dolu	241	149852	0,001608
85	Horní Růžodol - západ	1228	238495	0,005149
86	Rochlice - západ	2390	234862	0,010176
87	Janův Důl - za tratí	245	81399	0,003010
89	Rochlice - prům. obvod	57	636216	0,000090
90	Hradební	650	113128	0,005746
91	U Nisy - střed	56	250635	0,000223
94	U Vysílačky	658	171354	0,003840
95	Pod Novou Rudou	89	231587	0,000384
96	Doubí - prům. zóna	36	1246642	0,000029

P_{MS} pravděpodobnost třídy meteorologické stability

P_{φ} pravděpodobnost směru větru

P_j pravděpodobnost úmrtí v daném bodě souřadnicové sítě

Vzorec pro výpočet individuálního rizika se pro zjednodušení redukuje na:

$$\Delta IR_{S,\varphi} = f_S \cdot P_j \cdot P_{\varphi},$$

kde $f_S = P_{\varepsilon}$

$$P_j = P_{\dot{u}}$$

$$P_{\varphi} = \frac{1}{8} \quad \text{pravděpodobnost směru větru}$$

$$P_{MS} = \frac{1}{6} \quad \text{pravděpodobnost třídy meteorologické stability}$$

Pro účely diplomové práce je uvažováno 8 základních směrů větru a 6 základních tříd meteorologické stability, proto pravděpodobnost směru větru jedné meteorologické situace je rovna $\frac{1}{8}$ a pravděpodobnost třídy meteorologické situace je rovna $\frac{1}{6}$. Přesné určení pravděpodobnosti směru větru je možno získat z větrné růžice v místě hlavního železničního nádraží v Liberci. Tato data nebyla získána z důvodu vysokých finančních nároků.

Individuální riziko je určeno pro tři vzdálenosti od zdroje (200 m, 400 m, 600 m).

200 metrů

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = f_S \cdot P_j \cdot P_{\varphi} \cdot P_{MS}$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = \overline{P_{vlkm}} \cdot P_{\dot{u}} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6}$$

$$P_{\dot{u}}(200) = 1 = 100\%$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6}$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = 0,024 \cdot 10^{-7} = 2,4 \cdot 10^{-9}$$

400 metrů

$$P_{\dot{u}}(400) = 0,6 = 60\%$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(400) = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot 0,6 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 0,014 \cdot 10^{-7} = 1,4 \cdot 10^{-9}$$

600 metrů

$$P_u(600) = 0,11 = 11\%$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(600) = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot 0,11 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 0,0027 \cdot 10^{-7} = 2,7 \cdot 10^{-10}$$

Okruhy individuálního rizika získaného z pravděpodobnosti nehody železniční cisterny s nebezpečnou látkou a pravděpodobnosti úmrtí v dané vzdálenosti jsou zakresleny do rastrového plánu blízkého okolí hlavního železničního nádraží v Liberci (obr. 10).



Obr. 10: Okruhy individuálního rizika pro únik čpavku z železniční cisterny

4.3.4 Určení společenského rizika

Výpočet společenského rizika

Pro výpočet společenského rizika jsou použity vztahy uvedené v kapitole 3.2.3.2. Při určení potenciálních úmrtí osob při úniku čpavku ze železniční cisterny na hlavním železničním nádraží v Liberci je určující hodnota potenciálních úmrtí osob nacházejících se vně budov. Potenciální úmrtí osob nacházejících se uvnitř budov je redukováno faktorem 0,1. Výpočet potenciálních úmrtí osob je určen pro tři intervaly vzdáleností od zdroje úniku (0 – 200 metrů, 200 – 400 metrů, 400 – 800 metrů). Pro každý okruh je vypočtena hodnota potenciálních úmrtí osob. Ta je dána procentuálním zasažením jednotlivých urbanistických obvodů města Liberce a hustotou zalidnění těchto urbanistických obvodů. Procentuální zasažení je určeno po zakreslení jednotlivých okruhů do mapy urbanistických obvodů. Hodnota osob nacházejících se v jednotlivých okruzích je dále násobena průměrnou pravděpodobností úmrtí v daném intervalu. Např. pro okruh 200 – 400 metrů je hodnota průměrné pravděpodobnosti úmrtí vypočtena jako:

$$\overline{P_u(0-200)} = \frac{P_u(200) + P_u(300) + P_u(400)}{3} = \frac{1 + 0,86 + 0,6}{3} = 0,82 = 82\%$$

Do výpočtu vstupují ještě tři korekční faktory. Jsou to korekční faktory f_m a f_{out} , které jsou popsány v tab. 5. a korekční faktor pravděpodobnosti přítomnosti obyvatelstva v obydlených zónách, který je během denního času 0,7 a během noci 1 (popsáno v kapitole 3.2.2.6).

Po zanesení tří okruhů do mapy urbanistických obvodů města Liberce byly vypočteny tyto hodnoty potenciálních úmrtí osob.

0 – 200 metrů

$$F_j = F_m \cdot f_m + F_{out} \cdot f_{out}$$

kde $j = u$

$$F_m = 0,1 \cdot 1 = 10\%$$

$$f_m = 0,93 = 93\%$$

$$F_{out}(0-200) = \overline{P_u(0-200)} = \frac{P_u(0) + P_u(100) + P_u(200)}{3} = \frac{1+1+1}{3} = 1 = 100\%$$

$$f_{out} = 0,07 = 7\%$$

$$F_j = F_u = 0,1 \cdot 0,93 + 1 \cdot 0,07 = 0,163 = 16,3\%$$

Výpočet potenciálních úmrtí pro jednotlivé zasažené urbanistické obvody bude následující:

Pozn: Železniční nádraží je bráno jako samostatný obvod s průměrným počtem 400 osob.

$$\Delta N_u(0-200) = 0,7 \cdot N_{ob} \cdot S_z \cdot F_u$$

$$\Delta N_u(0-200) \text{ potenciální počet úmrtí v daném urbanistickém obvodu} \quad [1]$$

$$N_{ob} \text{ počet obyvatel v daném urbanistickém obvodu} \quad [1]$$

$$S_z \text{ procentuální zasažení plochy daného urbanistického obvodu} \quad [\%]$$

Celkový počet potenciálních úmrtí pro daný okruh bude:

$$N_u(0-200) = \sum \Delta N_u(0-200)$$

Společenské riziko pro daný okruh se vypočítá ze vztahu:

$$\Delta S_{S,\varphi}(0-200) = f_S \cdot P_\varphi \cdot P_{MS} \cdot N_u(0-200)$$

$$f_S = P_\varepsilon = 1,17 \cdot 10^{-7} \quad \text{Celková roční četnost úniku čpavku na železničním nádraží v Liberci}$$

$$P_\varphi = \frac{1}{8} \quad \text{pravděpodobnost směru větru}$$

$$P_{MS} = \frac{1}{6} \quad \text{pravděpodobnost třídy meteorologické stability}$$

$$N_u(0-200) = \sum \Delta N_u(0-200) = 39$$

$$\Delta S_{S,\varphi} = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} \cdot 39 = 0,95 \cdot 10^{-7} = 9,5 \cdot 10^{-8}$$

200 – 400 metrů

$$F_j = F_{in} \cdot f_{in} + F_{out} \cdot f_{out}$$

$$F_{in} = 0,1 \cdot 0,82 = 0,082 = 8,2\%$$

$$f_{in} = 0,93 = 93\%$$

$$F_{out}(200-400) = \overline{P_u(200-400)} = \frac{P_u(200) + P_u(300) + P_u(400)}{3} = \frac{1 + 0,86 + 0,6}{3} = 0,82 = 82\%$$

$$f_{out} = 0,07 = 7\%$$

$$F_j = F_u = 0,082 \cdot 0,93 + 0,82 \cdot 0,07 = 0,13 = 13\%$$

$$N_u(200-400) = \sum \Delta N_u(200-400) = 26$$

$$\Delta S_{S,\varphi}(200-400) = f_S \cdot P_\varphi \cdot P_{MS} \cdot N_u(200-400) = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} \cdot 26 = 0,63 \cdot 10^{-7} = 6,3 \cdot 10^{-8}$$

400 – 800 metrů

$$F_j = F_{in} \cdot f_{in} + F_{out} \cdot f_{out}$$

$$F_m = 0,1 \cdot 0,2 = 0,02 = 2\%$$

$$f_m = 0,93 = 93\%$$

$$F_{out}(400-800) = \overline{P_u(400-800)} = \frac{P_u(400) + P_u(500) + P_u(600) + P_u(700) + P_u(800)}{5} =$$

$$= \frac{0,6 + 0,26 + 0,11 + 0,04 + 0}{5} = 0,2 = 20\%$$

$$f_{out} = 0,07 = 7\%$$

$$F_j = F_u = 0,02 \cdot 0,93 + 0,2 \cdot 0,07 = 0,032 = 3,2\%$$

$$N_u(400-800) = \sum \Delta N_u(400-800) = 32$$

$$\Delta S_{S,\varphi}(400-800) = f_S \cdot P_\varphi \cdot P_{MS} \cdot N_u(400-800) = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} \cdot 32 = 0,78 \cdot 10^{-7} = 7,8 \cdot 10^{-8}$$

4.3.5 Výpočet kritéria přijatelnosti rizika

Počet potenciálních úmrtí osob při úniku čpavku ze železniční cisterny je 97

Kritérium

Individuální riziko

$$\Delta IR_{S,\varphi}(200) = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 2,4 \cdot 10^{-9} < 10^{-5}$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(400) = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot 0,6 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 1,4 \cdot 10^{-9} < 10^{-5}$$

$$\Delta IR_{S,\varphi}(600) = 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot 0,11 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{6} = 2,7 \cdot 10^{-10} < 10^{-5}$$

Společenské riziko

Podmínka přijatelnosti společenského rizika (viz. tab. 6):

$$F_m = \frac{10^{-3}}{N^2} \quad (3-23)$$

F_m frekvence události

N počet potenciálních úmrtí osob

Přípustný počet úmrtí nehody s únikem čpavku na železničním nádraží v Liberci

$$N = \sqrt{\frac{10^{-3}}{1,17 \cdot 10^{-7}}} = 93$$