

Lubomír KELNAR\*

## PŘÍPADOVÁ STUDIE K METODIKÁM ANALÝZ A HODNOCENÍ RIZIKA

### CASE STUDY OF METHODOLOGIES FOR RISK ANALYSES AND ASSESSMENT

#### Abstrakt

Případová studie objasňuje na příkladu stáčení chloru z železniční cisterny obecný postup analýzy rizika chemických zařízení. Postup je vysvětlen v několika na sebe navazujících krocích, jejichž výsledkem je vstup do kroku dalšího. Analýza začíná popisem systému, následuje identifikace zdrojů rizika, výčet a výběr událostí pro výpočty jejich následků a četností. V další fázi je odhadována velikost individuálního a společenského rizika a ukázány i další možné míry rizika.

#### Abstrakt

Through the example of transferring chlorine from the tank wagon, the case study clarifies a general procedure for risk analysis in the case of chemical plants. The procedure is explained in several following steps, the result of which is the entry into the next step. The analysis begins with system description; what follows is the identification of sources of risk, the itemization and selection of events for calculations of their consequences and frequencies. In the next phase, the level of individual and societal risks is estimated and other possible risk levels are shown.

**Key words:** risk analysis, risk, individual risk, societal risk, risk level, risk calculations, accident

#### Úvod

Příklad má sloužit k osvětlení postupů používaných pro naplňování tzv. hodnocení rizika pro účely zákona č. 353/1999 Sb. o prevenci závažných havárií.

Případová studie znázorňuje užití všech kroků metodologie kvantitativní analýzy rizika chemických procesů (CPQRA) pro jednoduché zařízení k stáčení chloru do železniční cisterny. Používá zjednodušené metodiky pro výpočet a znázornění profilů individuálního rizika, křivek F - N pro vyjádření společenského rizika a některých dalších indexových měr rizika. Příklad je po drobných úpravách převzat z publikace *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AICHE - CCPS, New York, 1989.

---

\* RNDr., Poradenství v oboru bezpečnosti a rizik chemických zařízení, 250 70 Odolena Voda 385  
Kroky při analýze jsou následující:

1. Popis systému
2. Identifikace zdrojů rizika, výčet a výběr událostí
3. Odhad následků havarijní události (výpočet rychlosti úniku, rozptylu a toxických účinků)
4. Odhad četnosti vzniku havarijní události
5. Odhad rizika (individuálního, společenského, odhad indexů dalších měř rizika)
6. Shrnutí

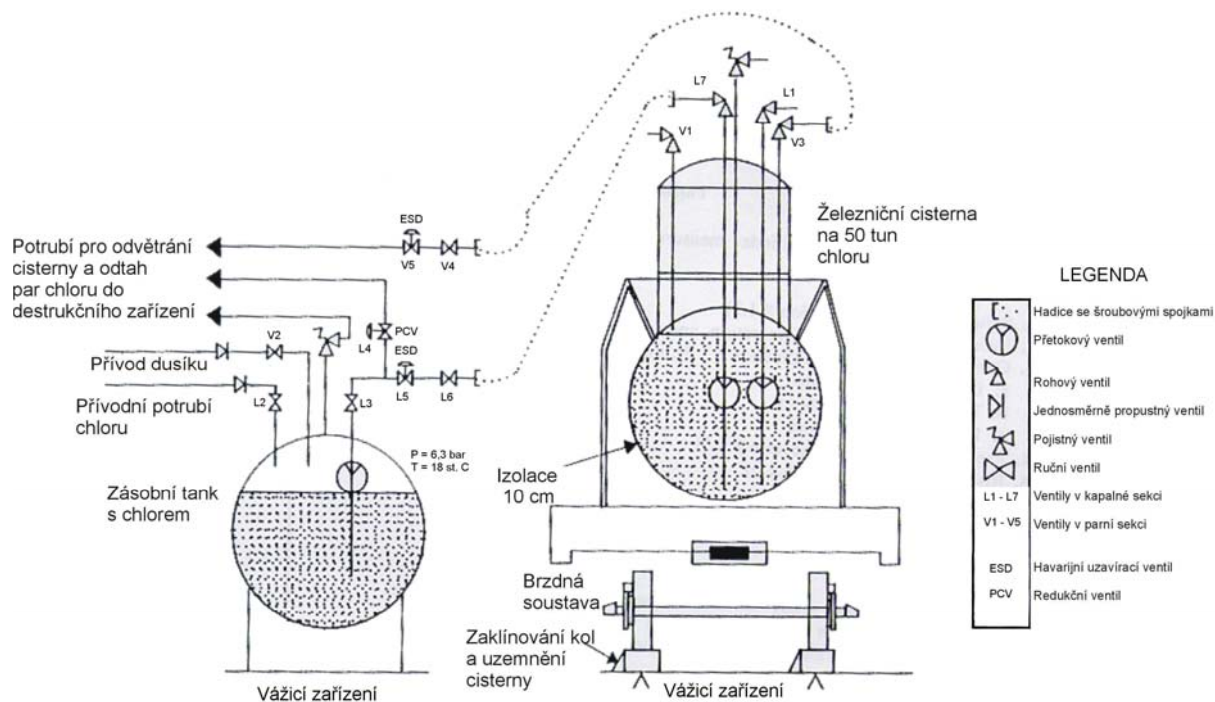
Předmětem této studie je odhad rizika úmrtí obyvatel v obci sousedící se stáčecím zařízením chloru. Počet uvažovaných událostí je malý a povětrnostní podmínky jsou omezeny na jeden typ počasí charakterizovaný jednou rychlostí větru a jednou třídou atmosférické stability. Na rozdíl od složitějšího modelu rozptylu těžkého plynu byl vybrán jednoduchý atmosférický model rozptylu, a to neutrálně vzlínavý model Gaussovy vlečky. Realistická studie by mohla v této oblasti analýzu zlepšit. Úroveň podrobnosti této studie by mohla odpovídat etapě počátečního stavu zpracování projektu.

## Popis systému

Obrázek 1 uvádí zjednodušené schéma stáčecího systému kapalného chloru do železniční cisterny. Zásobní skladovací nádrž je namontována na váze a kapalný chlor se přečerpává do železniční cisterny pomocí tlakového dusíku. Plnicí kapalinová a vratná parní přípojka k železniční cisterně jsou realizovány krátkými hadicemi opletenými antikorozi ocelí se šroubovými přípojkami. Podle obrázku jsou umístěny dva dálkově ovládané havarijní uzavírací ventily, zásobní skladovací nádrž chloru má pojistný ventil a je, včetně podnikového rozvodu dusíku, chráněna před zpětným tokem chloru zpětnými ventily.

Atmosférická železniční cisterna na 50 tun chloru je opatřena pojistným ventilem a čtyřmi přípojkami (vždy dvě pro plynnou fázi a dvě pro kapalinu) a je odzdušněna do atmosféry. Potrubí pro kapalinu dosahují až na dno cisterny a jsou opatřena přetokovými ventily. Cisterna je izolována 10 cm vrstvou korku nebo polyuretanové pěny. Po zkontrolování a požadované údržbě je umístěna na váhu a řádně zafixována pomocí brzd a zaklínování kol. Vagón a stáčecí systém jsou pak elektricky uzemněny.

Pro zjednodušení výpočtů, jsou uvažovány pouze jediné typické povětrnostní podmínky: rychlost větru  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a neutrální atmosférická stabilita D. Pro další usnadnění výpočtů se předpokládá rovnoměrné rozložení proudění větru ve všech směrech.



Obrázek 1: Schéma zařízení pro stáčení chloru do železniční cisterny

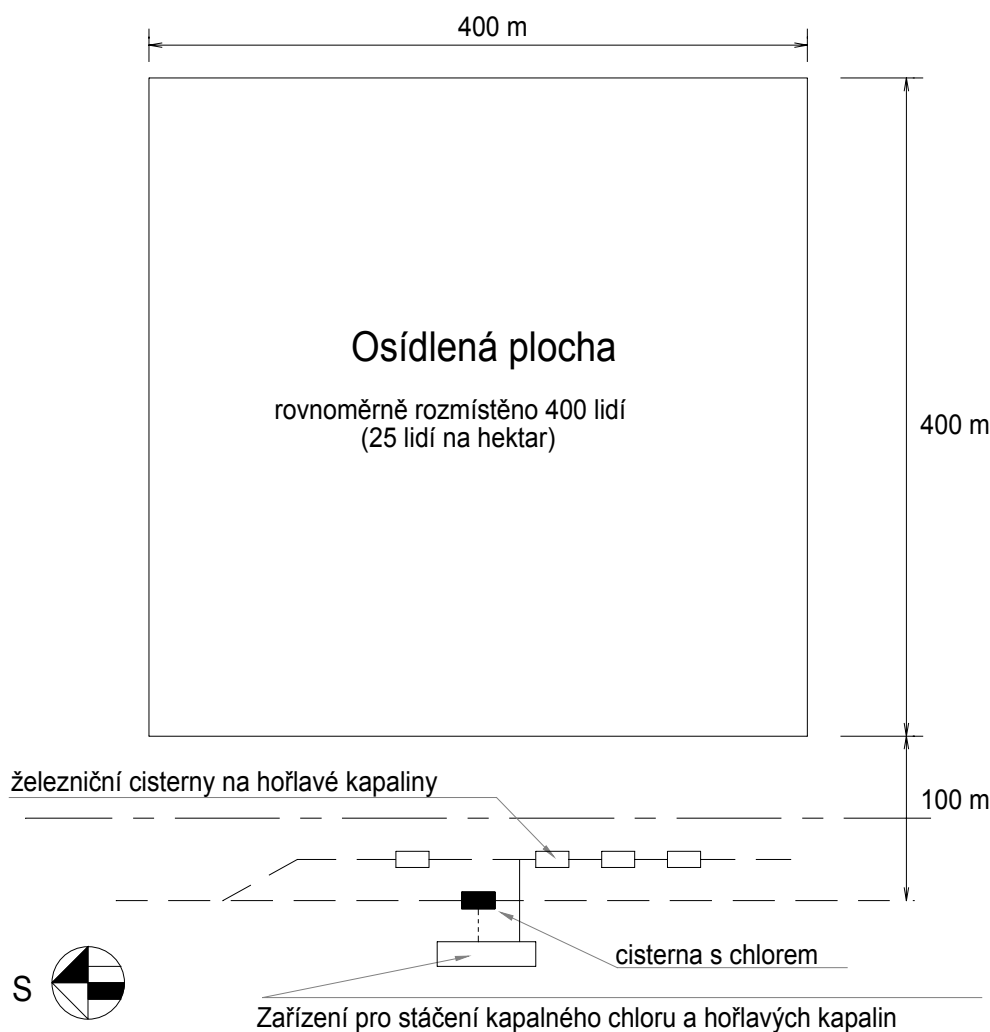
Obrázek 2 uvádí umístění zařízení pro stáčení chloru vzhledem k jeho okolí. Zařízení je umístěno cca 100 m západně od osídlené čtvercové oblasti o straně cca 400 m, kde žije rovnoměrně rozděleno 400 lidí. Blízké potrubí pro přepravu hořlavých materiálů a železniční cisterny pro hořlavé kapaliny, umístěné na sousední koleji, představují potenciál vzniku plošného požáru v místě pro stáčení chloru.

### Identifikace zdrojů rizika, výčet a výběr událostí

Kvantitativní analýza rizika chemických procesů je založena na seznamu specifických událostí úniku chloru. Sdružování událostí do skupin musí být reprezentativní vzhledem k úplnému seznamu událostí, ale nemusí být vyčerpávající. Vyčerpávající seznam by byl nevládnutelný. Cíl studie (odhad rizika pro obyvatelstvo) dovolí vytrýdit úplný seznam událostí, který je založen na následujících kritériích:

- Lokalizované události, jejichž následky nepřesáhnou hranici oplocení, nemusí být hodnoceny pro účely odhadu rizika pro obyvatelstvo.
- Závažnější a katastrofální události podobného rozsahu mohou být seskupeny a znázorněny jednoduchými událostmi s frekvencemi určenými z příspěvků všech individuálních událostí v každé skupině.

Reprezentativní soubor událostí by měl pokrýt řadu projevů událostí schopných způsobit následky v blízké obci. Soubor by měl zahrnovat nejen rozsáhlé, málo pravděpodobné události, ale také častější události středního rozsahu, které mohou často představovat největší příspěvek k celkovému riziku.



Obrázek 2: Umístění zařízení pro stáčení chloru do železniční cisterny

Zdroje rizika a specifické události v zařízení pro stáčení chloru mohou být určeny několika způsoby. Inženýrský odhad, zkušenosti a historické záznamy mohou identifikovat frekventovanější události a náhodný výběr nějaké méně pravděpodobné události. Ačkoli tato informace je podstatná, není postačující pro výčet všech událostí.

Strukturované metody, jako je HAZOP nebo FMEA, se často využívají k výčtu úplnějšího seznamu událostí. Metody HAZOP a FMEA jsou uvedeny v řadě informačních zdrojů. Studie metodou HAZOP by měla být provedena pro celý postup stáčení a také pro každou příbuznou činnost (např. vzorkování) nebo vzájemně propojené technické vybavení (např. rozvod dusíku).

Tabulka 1 uvádí 3 reprezentativní sady událostí, které byly pro další fázi analýzy určeny metodou HAZOP. Popis událostí (velikost a trvání) je založen na historických datech a inženýrských odhadech a je určen k znázornění spektra možných skutečných událostí. Nebyly analyzovány příliš malé úniky a nebyla posouzena ani spontánní katastrofická porucha zásobní skladovací nádrže chloru nebo železniční cisterny, ačkoli je teoreticky možná. Následky takové velmi nepravděpodobné události by byly velmi rozsáhlé, a proto musí být taková událost uvážena při skutečné analýze podobného zařízení.

Události a jejich projevy pro tento příklad jsou totožné. Každá událost úniku chloru má jediný projev - toxický oblak putující po směru větru. Umístění zóny toxických účinků závisí na povětrnostních podmínkách a směru proudění větru. Proto každá kombinace události, povětrnostních podmínek a směru proudění větru má samostatný případ projevu události. Protože v tomto příkladu jsou uvažovány pouze jedny povětrnostní podmínky, případy projevů události se liší pouze co do směru proudění větru. Zóny účinků mají stále stejné fyzikální rozměry pro všechny případy události.

Tabulka 1: Reprezentativní soubor událostí pro případovou studii

Pořadové číslo události	Popis události
1	<p><u>Malý únik kapaliny</u> (ekvivalentní otvor o průměru 12 mm) Trvání = 10 min. (odhad)</p> <p><i>Příčiny:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- netěsnost ventilů (7 ventilů a přidružených přírub)</li> <li>- únik z hadice</li> <li>- porucha potrubí s kapalným chlorem způsobená nárazem</li> </ul>
2	<p><u>Malý únik par</u> (ekvivalentní otvor o průměru 12 mm) Trvání = 20 min. (odhad)</p> <p><i>Příčiny:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- únik ventily (5 ventilů a přidružených přírub)</li> <li>- únik hadic</li> <li>- porucha potrubí s parami chloru důsledkem nárazu</li> <li>- únik pojistným ventilem</li> </ul>
3	<p><u>Velký únik par</u> Trvání = 60 min. (čas odhadnutý pro protipožární opatření zahrnující ochlazování cisterny s chlorem a zastavení úniku)</p> <p><i>Příčina:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- reakce pojistného ventilu na okolní požár</li> </ul>

## Odhad následků havarijní události

Pro každou ze tří událostí z tabulky 1 se použije kombinace modelů pro určení zón se smrtelnými účinky na osoby. Pro každou událost se vypočítá hmotnostní rychlost úniku, aby se mohl určit vstupní údaj pro Gaussův model rozptylu do atmosféry. Pro modelování toxických účinků se použije pravděpodobnostní probit funkce k odhadu koncentrace chloru LC<sub>50</sub> pro každou událost. Výpočty atmosférického rozptylu poskytnou vzájemnou vazbu *koncentrace - vzdálenost*, která dovolí odhadnout zónu účinku.

## Výpočty únikové rychlosti

Tři reprezentativní události (1, 2, a 3 z tabulky 1) vyžadují tři různé výpočty únikové rychlosti. Pro tuto případovou studii se předpokládá, že úniky nejsou ovlivněny ani délkou potrubí ani jeho geometrií.

**Událost číslo 1:** Vytékání kapaliny ekvivalentním otvorem 12 mm. Zařízení pro kapalný chlor je udržováno pod mírným přetlakem dusíku 6,3 baru (absolutní tlak  $6,3 \times 10^5$  Pa). Rovnice (vztah) pro výpočet úniku kapaliny je:

$$G_L = C_d A \rho \left( \frac{2(p - p_a)}{\rho} + 2gh \right)^{1/2}$$

kde  $G_L$  = úniková rychlost kapaliny ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $C_d$  = výtokový součinitel (bezrozměrná veličina, pro kapaliny se užívá 0,61);  $A$  = plocha otvoru (pro 12 mm,  $1,13 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ );  $\rho$  = hustota kapalného chloru ( $1420 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $p$  = tlak v zařízení ( $6,3 \times 10^5$  Pa absolutní);  $p_a$  = tlak vzduchu ( $1,0 \times 10^5$  Pa absolutní);  $h$  = geometrická výška otvoru (předpoklad 0 m);  $g$  = gravitační konstanta ( $9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ).

Pomocí těchto dat se vypočte úniková rychlost kapaliny  $G_L = 2,7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Když otvorem vytéká kapalný chlor pod tlakem, určitý podíl se okamžitě vypařuje. Tento tzv. mžikový odpar může být odhadnut pomocí následujícího vztahu:

$$F_v = C_p \frac{(T - T_b)}{h_{fg}}$$

kde  $F_v$  = zlomek okamžitého vypařování kapaliny (mžikový odpar);  $C_p$  = průměrná tepelná kapacita kapalného chloru v rozmezí  $T$  až  $T_b$  ( $0,950 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ );  $T$  = počáteční teplota ( $18^\circ\text{C}$ );  $T_b$  = konečná teplota = atmosférická teplota varu chloru ( $-34^\circ\text{C}$ );  $h_{fg}$  = výparné teplo chloru (při  $-34^\circ\text{C}$ ,  $285 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

Pomocí těchto dat se vypočte, že mžikový odpar chloru je za daných podmínek 0,17.

Podle pravidla dvojnásobku je možné předpokládat, že podíl aerosolu (kapičky kapaliny suspendované v páře) může být stejný jako je podíl okamžitého odpařování. Tedy pro tento příklad představuje oblak 34% úniku (17% pára a 17% aerosol), 66% vyteče jako kapalina na povrch. Pro malé úniky se většina této kapaliny bezprostředně vypaří při styku s teplejším povrchem. Skutečná rychlost vypařování může být odhadnuta z teploty vyteklého chloru ( $-34^\circ\text{C}$ ), místní teploty povrchu a množství kapaliny ve vztahu k tepelné kapacitě povrchu. V tomto případě úniku trvajících 10 minut obsahuje louže kapaliny asi 1000 kg chloru ( $600 \text{ s} \times 0,66 \times 2,7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Je možno dokázat, že všechen tento materiál se vypaří velmi rychle, a tak základ pro výpočet rozptylu by mohl být založen na plné rychlosti úniku, tj.  $2,7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ . Větší nebo delší trvání úniku by mělo být modelováno precizněji. Pro tento příklad (událost 1) je vstupní údaj únikové rychlosti pro výpočet rozptylu  $2,7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Událost číslo 2:** Únik par otvorem 12 mm. Výpočet úniku par musí také vzít v úvahu kompresibilitu plynu. Jestliže rozdíl tlaků mezi systémem s chlorem a atmosférou překročí kritický tlak, rychlost průtoku otvorem bude omezena rychlostí zvuku ve vytékajícím plynu. Kritický tlak je dán vztahem:

$$P_{krit} = \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma / \gamma - 1} = \left( \frac{2,32}{2} \right)^{(1,32 / 0,32)} = 1,84$$

kde  $P_{krit}$  = kritický tlak;  $\gamma$  = poměr tepelných kapacit (pro chlor 1,32).

Absolutní tlak uvnitř systému je 6,3 bar, tedy poměr tlaků je  $6,3/1,0 = 6,3$ . Protože je kritický tlak překročen, je výsledkem sonický únik podle rovnice:

$$G_v = C_d A p \left[ \frac{\gamma M}{RT} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1/\gamma-1)} \right]^{1/2}$$

kde  $G_v$  = rychlost zúženého úniku plynu ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $C_d$  = výtokový součinitel (přibližně 1,0 pro plyn);  $A$  = plocha otvoru (pro 12 mm,  $1,13 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ );  $p$  = výchozí tlak ( $6,3 \times 10^5 \text{ Pa}$ );  $M$  = molekulová hmotnost ( $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ ) (pro chlor 71);  $R$  = plynová konstanta ( $8310 \text{ J}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ );  $T$  = počáteční teplota (291 K).

Pro událost 2 se vypočte rychlost úniku par  $0,26 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  jako vstupní údaj pro model rozptylu.

**Událost číslo 3:** Únik páry pojistným ventilem železniční cisterny. Množství par vytvořených v tlakové nádobě zachvácené vnějším požárem může být odhadnuto pomocí vzorce podle NFPA 58.

$$Q_{in} = 34500 \cdot FA^{0,82}$$

K výpočtu  $Q_{in}$  v jednotkách SI se musí užít převodní faktor:

$$Q_{in} = 34500 \cdot FA^{0,82} [2,93 \cdot 10^{-4} (\text{kJ} / \text{s}) / (\text{Btu} / \text{hod})]$$

Rychlost úniku plynu pojistným ventilem je:

$$G_{rv} = Q_{in} / h_{fg}$$

kde  $G_{rv}$  = rychlost úniku plynu ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $Q_{in}$  = vstup tepla stěnou nádoby ( $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $A$  = celková plocha povrchu nádoby (přibližně  $650 \text{ ft}^2$ );  $F$  = činitel okolního prostředí (z API RP-520 se použije  $F = 0,3$  pro izolovanou cisternu).

$h_{fg}$  = výparné skupenské teplo při pojistném tlaku ( $257 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Potom  $Q_{in} = 34500 \cdot 0,3 \cdot 650^{0,82} \cdot 2,93 \cdot 10^{-4} = 614 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$

a  $G_{rv} = (614 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}) / (257 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = 2,4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Doba úniku je odhadována na 60 min. podle času odhadnutého pro zásah hasičů při ochlazování nádoby vodními proudy. Páry chloru unikající pojistným ventilem nejsou vzhledně, protože var uvnitř nádoby je udržuje chladné a mají vyšší molekulovou hmotnost než vzduch. Rychlost úniku chloru pro událost 3 je  $2,4 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Tabulka 2: Odhadnuté rychlosti úniku chloru pro tři reprezentativní události

Událost	Popis	Odhad rychlosti úniku ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	Malý únik kapaliny	2,7
2	Malý únik par	0,26
3	Velký únik par pojistným ventilem	2,4

## Výpočet toxických účinků chloru

Před započítáním rozptylové analýzy je třeba určit spojitost mezi toxicitou používanou pro odhad úmrtnosti a expozicí parami chloru. Pro odhad smrtelných účinků se často používá metoda pravděpodobnostní probit funkce pro smrtelné účinky chloru na průměrnou populaci podle Witherse a Leese (1985):  $\text{Pr} = -8,29 + 0,92 \ln C^2 t$

kde  $\text{Pr}$  = hodnota pravděpodobnostní probit funkce (jsou tabelovány pro běžné látky),  $C$  = koncentrace chloru (ppm),  $t$  = doba expozice (min.).

Pro účely tohoto příkladu se předpokládá, že všechny osoby nacházející se v oblaku, jehož hranice jsou vymezeny LC<sub>50</sub> (koncentrací smrtelnou pro 50% nechráněných osob), chlor usmrtí a všechny osoby vně této hranice přežijí. Ve skutečnosti všichni lidé ve vymezeném oblaku nezahynou tímto způsobem a naopak někteří lidé vně takového oblaku mohou zahynout. Předpoklad je, že počet lidí, kteří přežijí uvnitř hranice LC<sub>50</sub> bude vyvážen úmrtími vně této hranice. Skutečná kvantitativní analýza rizika chemických procesů může určit pravděpodobnost úmrtí pro každého jednotlivce v zóně účinků, ale takový výpočet je nad rámecem tohoto příkladu. Výše uvedený předpoklad připouští použití zjednodušených metod pro odhad individuálního a společenského rizika.

Aby se určila velikost oblaku chloru pro každou událost, je třeba určit LC<sub>50</sub> chloru pro dobu expozice odpovídající příslušné události. Je možné předpokládat, že čas požadovaný pro to, aby oblak minul nějakou lokalitu, je roven času trvání úniku látky při události. V podrobnější studii by mohl být použit model rozptylu pro odhad přesné toxické dávky v jakékoliv lokalitě.

V této studii mají události 1 a 2 trvání 10 min., událost 3 trvá 60 min. Koncentrace chloru odpovídající LC<sub>50</sub> pro t = 10 a 60 min. může být stanovena dosazováním Pr = 5,0 (podmínka pro LC<sub>50</sub>) a řešením výše uvedené rovnice pro C. Výsledky odhadu expozice LC<sub>50</sub> pro chlor udává následující tabulka:

Tabulka 3: Výsledky odhadu expozice LC<sub>50</sub> pro chlor

Doba expozice (min.)	Událost	Odhadnutá LC <sub>50</sub> (ppm)
10	1 a 2	430
60	3	175

Pro události 1 a 2 (únik kapaliny nebo páry po dobu 10 min.) je zóna účinků definována koncentrací chloru 430 ppm. Pro událost 3 (únik pojistným ventilem po dobu 60 min.) je zóna účinků definována koncentrací chloru 175 ppm.

## Výpočty rozptylů

Oblaky uniklého chloru v této případové studii jsou zpočátku těžší než vzduch. Je však možno prokázat, že nastane přechod do neutrálního vzhledu ještě předtím než budou zasaženy obydlené oblasti 100 m východně. Za těchto okolností mohou být získány odhady s požadovanou přesností pomocí modelu Gaussovy vlečky podle Pasquilla - Gifforda. Vhodný tvar Pasquilla - Giffordovy rovnice pro kontinuální zdroj neabsorbovatelného materiálu je:

$$C = \frac{G}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left( \exp \frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right) \left[ \exp \left( \frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp \frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$

kde  $x, y, z$  = vzdálenosti od zdroje v (m) ( $x$  = po směru větru,  $y$  = kolmo na směr větru,  $z$  = vertikální výška);  $C$  = koncentrace ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) v místě  $x, y, z$ ;  $G$  = rychlost úniku ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $H$  = výška zdroje nad úrovní terénu (m);  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  = parametry rozšíření v (m), funkce vzdálenosti po směru větru;  $u$  = rychlost větru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Předpokládá se, že úniky nastávají v úrovni terénu, takže  $H = 0$ . Protože je důležitá koncentrace chloru v úrovni terénu, také  $z = 0$ . Kromě toho se počítá maximální koncentrace



(např. koncentrace odpovídající středové linii) chloru v oblaku pro každou vzdálenost po směru větru, proto také  $y = 0$ .

Tak se pro maximální koncentraci ve středové linii a pro zdroj v úrovni terénu a pro příjemce (obyvatele) výše uvedená rovnice zjednodušuje na tvar:

$$C = \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u}$$

Tato rovnice udává koncentraci  $C$  v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Aby se získala  $C$  v ppm, musí se použít převodní faktor:

$$C_{ppm} = \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \cdot \frac{RT}{MP} \cdot 10^6$$

kde  $R$  = plynová konstanta ( $0,082 \text{ atm}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ );  $T$  = teplota (K);  $M$  = molekulová hmotnost ( $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ );  $P$  = tlak (atm).

Následující vztahy (McMullen, 1975) se používají pro výpočet parametrů rozptylování  $\sigma_y$  a  $\sigma_z$  pro atmosférickou stabilitu D:

$$\sigma_z = \exp \left[ 3,141 + 0,7371 \ln \left( \frac{x}{1000} \right) - 0,0316 \left[ \ln \left( \frac{x}{1000} \right) \right]^2 \right]$$

$$\sigma_y = \exp \left[ 4,23 + 0,9222 \ln \left( \frac{x}{1000} \right) - 0,0087 \left[ \ln \left( \frac{x}{1000} \right) \right]^2 \right]$$

Následující hodnoty jsou dosazeny do posledních tří rovnic k výpočtu koncentrace ve středové linii v ppm jako funkce vzdálenosti od zdroje ( $x$ ):

$G = 2,7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  (pro událost č. 1);  $0,26 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  (pro událost č. 2);  $2,4 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  (pro událost č. 3);  $T = 18^\circ\text{C} = 291 \text{ K}$ ;  $u = 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $M = 71 \text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ ;  $P = 1 \text{ atm}$

**Tabulka 4** shrnuje výsledky těchto výpočtů. Vzdálenost, ve které koncentrace chloru v úrovni terénu ve střední linii po směru proudění větru dosáhne  $LC_{50}$  (430 ppm pro události 1 a 2, 175 ppm pro událost 3) je pro každou událost zvýrazněna. Z údajů v této tabulce může být určena vzdálenost, ve které koncentrace chloru dosáhne hodnoty  $LC_{50}$  (viz tabulku 5).

Samotná vzdálenost po směru proudění větru plně necharakterizuje zónu účinku pro oblak par. Je také třeba znát rozměr šířky oblaku nebo jeho roztažení. Model Gaussovy vlečky (rovnice v kapitole 0) musí být vyřešen pro řadu vzdáleností přechodných a kolmých na směr proudění větru, aby bylo možno znázornit úplnou izočáru odpovídající koncentraci  $LC_{50}$ . Jednodušší přístup, přiměřený tomuto příkladu, je aproximovat vlečku jako část ve tvaru rybiho těla a definovat její délku a její úhel. Horizontální úhel vlečky může být odhadnut pomocí bočních spojnic bodů na čáře zájmové koncentrace s bodem úniku v nějaké střední vzdálenosti po směru proudění větru (např. ve středu délky). Tento výpočet dává horizontální úhel vlečky zhruba  $15^\circ$  pro naše tři události (skutečné rozpětí  $14 - 18^\circ$ ).

Tabulka 4: Koncentrace chloru pro tři reprezentativní události případové studie

Událost č. 1 Malý únik kapaliny (2,7 kg.s <sup>-1</sup> , 10 min)		Událost č. 2 Malý únik par (0,26 kg.s <sup>-1</sup> , 10 min)		Událost č. 3 Velký únik par pojistným ventilem (2,4 kg.s <sup>-1</sup> , 60 min)	
x (m)	C (ppm)	x (m)	C (ppm)	x (m)	C (ppm)
100	2000	50	690	100	1700
200	550	<b>64</b>	<b>430</b>	150	830
<b>230</b>	<b>430</b>	100	190	200	490
250	370			250	330
300	270			300	240
				<b>360</b>	<b>175</b>
				400	145

Tabulka 5: Vzdálenost, ve které dosáhne koncentrace chloru hodnoty LC<sub>50</sub>

Událost	Popis	Trvání (min)	Chlor LC <sub>50</sub> (ppm)	Vzdálenost po směru proudění větru, ve které koncentrace = LC <sub>50</sub> (m)
1	Malý únik kapaliny	10	430	230
2	Malý únik par	10	430	64
3	Velký únik par pojistným ventilem	60	175	360

## Odhad četnosti vzniku havarijní události

Pro každou identifikovanou reprezentativní událost může být odhadnuta četnost jejího vzniku. Pokud je konstrukce zařízení dostatečně podobná zařízením známým z historických záznamů, četnost události může být odvozena z historických statistik; toto platí pro události 1 a 2. Tam, kde je konstrukce zařízení podstatně rozdílná nebo historická data neexistují, může být k odhadu četnosti poruchy použita metoda stromu poruch; tato metoda se použije pro událost 3.

Data selhání pro prvky procesních zařízení (např. přírub, ventilů, hadic) mohou být získána z různých databank spolehlivosti odvozených z historických záznamů na podobných zařízeních za podobných podmínek. Odhadem určené četnosti v tabulce 6 pro úniky 12 mm otvorem pocházejí z řady zdrojů, včetně Rijnmonda (1982). Použitím těchto dat mohou být odhadnuty četnosti havárií 1 a 2. Četnost každé události je rovna součtu četností selhání všech jednotlivých složek, jejichž selhání může nastat v rámci reprezentativní události (tabulka 1):

$$F_i = \sum_{j=1}^n f_j$$

kde  $F_i$  = celková četnost reprezentativní události  $i$ ;  $f_j$  = četnost selhání komponenty  $j$ , která spadá do reprezentativní události  $i$ .

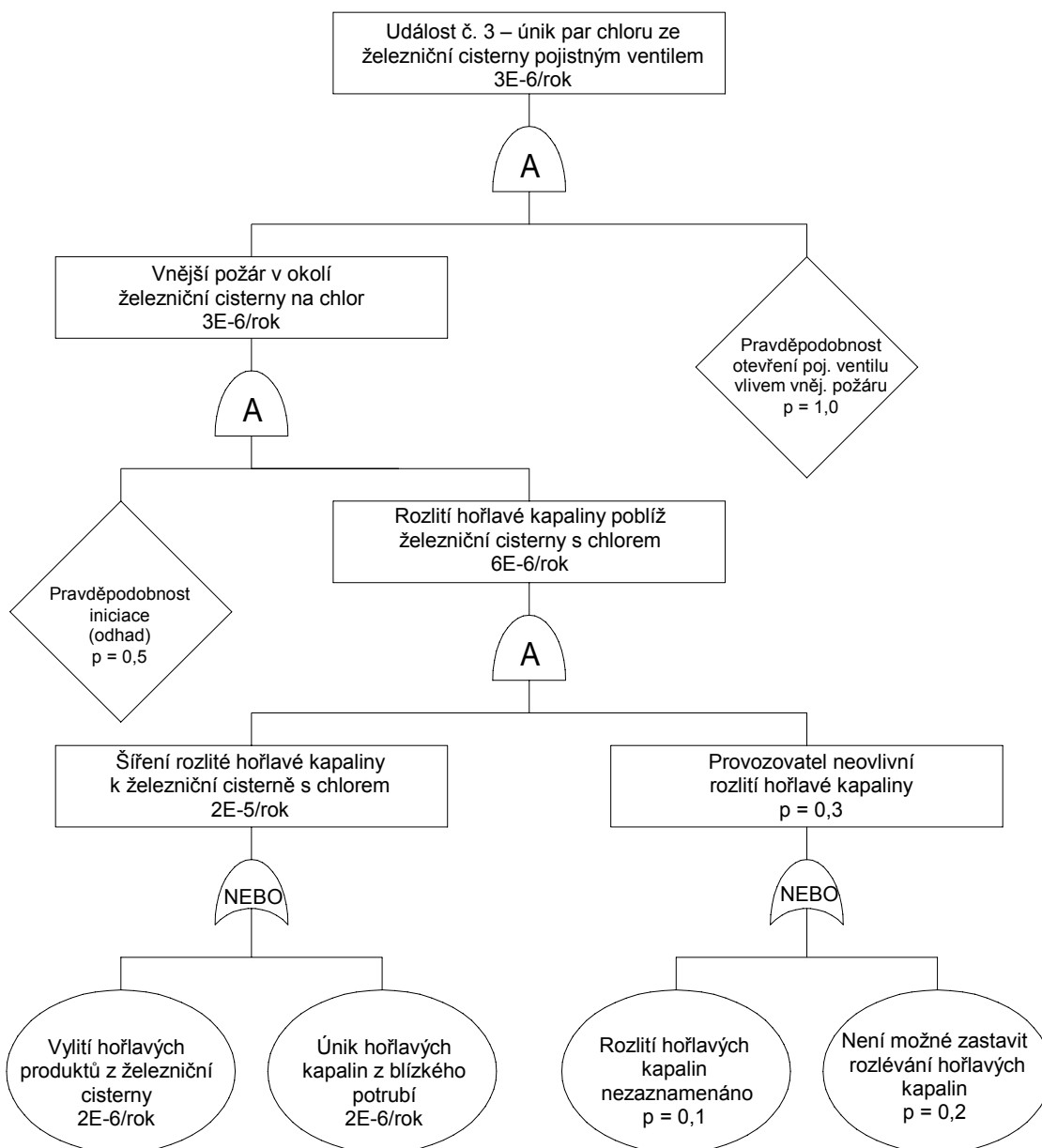
Odtud pro událost 1 je četnost představující únik kapaliny (7 ventilů, 1 hadice, 1 porucha potrubí nárazem - použita data z tabulky 6):

$$F_1 = (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (5 \times 10^{-4}) + (1 \times 10^{-5}) = 5,8 \times 10^{-4} \text{ za rok}$$

Pro událost 2 je četnost představující únik par (5 ventilů, 1 hadice, 1 porucha potrubí nárazem a 1 únik pojistným ventilem - použita data z tabulky 6):

$$F_2 = (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-5}) + (5 \times 10^{-4}) + (1 \times 10^{-5}) + (1 \times 10^{-4}) = 6,6 \times 10^{-4} \text{ za rok}$$

Pro událost 3 (velký únik par způsobený externím požárem) nejsou pro odhad četnosti přiměřená historická data. Četnosti výskytu externích požárů jsou silně závislé na vlastnostech každého jednotlivého místa. Pro scénář vnějšího požáru je vytvořen jednoduchý model stromu poruch (viz Obrázek 3) pro výpočet četnosti ze základních událostí. Použitím postupu hradlo za hradlem pro odhad četnosti události 3 je vypočtena hodnota  $3 \times 10^{-6}$  za rok.



Obrázek 3: Strom poruch pro událost 3

Tabulka 7 shrnuje výsledky kroku odhadu četnosti. Tyto četnosti pro tři reprezentativní události se pro odhad rizika zkombinují s následky v zónách účinků.

Tabulka 6: Odhad četnosti poruch systému pro stáčení chloru

Popis poruchy	Četnost selhání při průměrné údržbě (událost/rok)
Únik ventilem	$1 \times 10^{-5}$
Únik hadicí	$5 \times 10^{-4}$
Porucha potrubí nárazem *	$1 \times 10^{-5}$
Únik pojistným ventilem při normálním provozním tlaku	$1 \times 10^{-4}$

\*Je nutno poznamenat, že mezi mnoha faktory při odhadu poruchovosti potrubí je třeba uvážit také délku potrubí a jeho průměr.

Tabulka 7: Souhrn odhadů četností reprezentativních událostí

Událost	Popis	Odhad četnosti (za rok)
1	Únik kapaliny	$5,8 \times 10^{-4}$
2	Malý únik páry	$6,6 \times 10^{-4}$
3	Velký únik páry pojistným ventilem	$3,0 \times 10^{-6}$

## Odhad rizika

### Individuální riziko

Izolinie individuálního rizika vyznačují pro každý bod v okolí zařízení, s jakou pravděpodobností by osoba, která by celý rok v tomto bodě pobývala, zahynula v důsledku havárie zařízení. Izolinie se kreslí do mapy rozmístění osob v okolí zařízení.

Odhady individuálního rizika tří reprezentativních událostí v okolí zařízení pro stáčení chloru mohou být vypočítány z údajů o pravděpodobnosti jejich výskytu, o jejich zónách účinku a o rozdělení směrů proudění větru. Nejsou uvažovány žádné faktory zmírnění, jako jsou úkryt nebo evakuace. Pro tento příklad se použijí předpoklady pro zjednodušený přístup k výpočtu individuálního rizika a může být použit zjednodušený postup. Byly provedeny všechny kroky pro seznam projevů událostí s příslušnými zónami účinku a četnostmi výskytu událostí. Tabulka 8 shrnuje všechna tato data vybraná z tabulek 1 až 7. Následující kroky při generování mapy obrysů individuálního rizika se musí provést s použitím údajů obrázku 4.

Dalším krokem je zvolit projev události s nejdelší zónou účinku. Pro tuto studii to je událost 3. Směr proudění větru ovlivní umístění zóny účinku (protáhne se od únikového otvoru po směr proudění větru), a proto musí být četnost události před přiřazením hodnoty k obrysu individuálního rizika redukována činitelem směru. Činitel směru je dán následujícím vztahem:

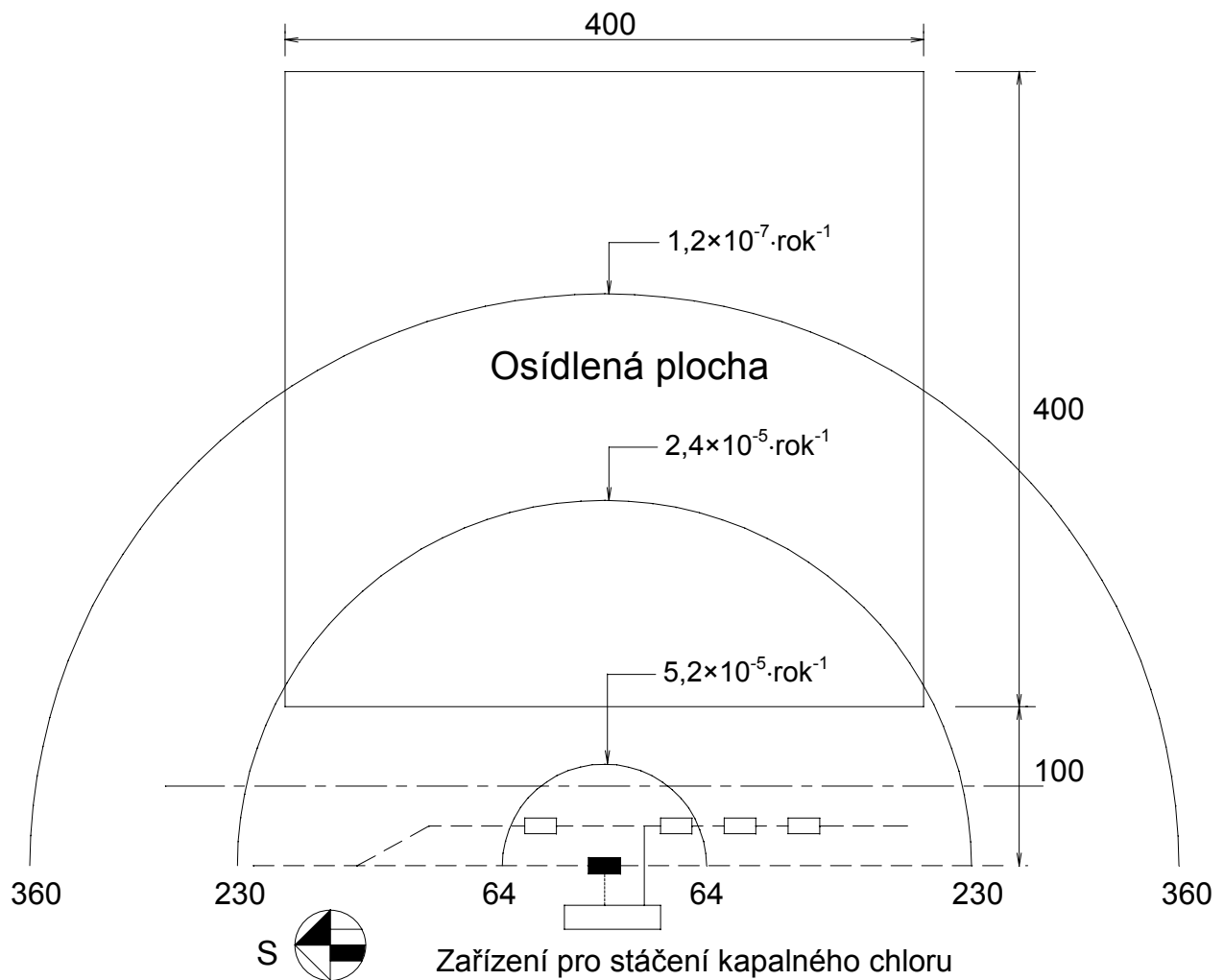
$$f_{i,d} = f_i(\theta_i / 360)$$

kde  $f_{i,d}$  = četnost případu projevu události  $i$ , která ovlivní situaci v jakémkoliv směru za předpokladu rovnoměrného rozdělení směru proudění větru;  $f_i$  = odhadnutá četnost výskytu případu projevu události  $i$ ;  $\theta$  = úhel pokrytý zónou účinku pro případ projevu události  $i$ .  
Pro událost 3,  $f_3 = 3 \times 10^{-6} \cdot \text{rok}^{-1}$  a  $\theta_3 = 15^\circ$

$$f_{3,d} = (3 \times 10^{-6} \cdot \text{rok}^{-1}) \cdot (15/360) = 1,2 \times 10^{-7} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Tabulka 8: Souhrn reprezentativních událostí se zónami účinku a četnostmi událostí

Událost	Popis	Rychlost úniku chloru (kg.s <sup>-1</sup> )	Doba trvání úniku (min)	LC <sub>50</sub> (ppm)	Zóna účinku		Četnost výskytu události (rok <sup>-1</sup> )
					Vzdálenost LC <sub>50</sub> (m)	Úhel vlečky (deg)	
1	Únik kapaliny ekvivalentním otvorem o průměru 12 mm	2,7	10	430	230	15	$5,8 \times 10^{-4}$
2	Malý únik par ekvivalentním otvorem o průměru 12 mm	0,26	10	430	64	15	$6,6 \times 10^{-4}$
3	Velký únik par pojistným ventilem následkem požáru	2,4	60	175	360	15	$3,0 \times 10^{-6}$



Obrázek 4: Izolinie individuálního rizika v okolí zařízení pro stáčení chloru

Dalším krokem je narýsovat kružnici (obrys rizika) kolem zařízení pro stáčení chloru o poloměru rovném poloměru zóny účinku (v tomto případě 360 m). Tomuto obrysu je pak přidělena hodnota individuálního rizika podle následujícího vztahu:

$$IRC_i = f_i(\text{nebo } f_{i,d}) + IRC_{i-1}$$

kde  $IRC_i$  = hodnota individuálního rizika na uvažovaném obrysu případu projevu události ( $\text{rok}^{-1}$ );  $IRC_{i-1}$  = hodnota individuálního rizika na vedlejším obrysu rizika;  $f_i$  a  $f_{i,d}$  jsou definovány jako pro činitele směru (viz výše).

Protože obrys rizika události 3 je první narýsovaný obrys, je  $IRC_{i-1} = 0$  a hodnota individuálního rizika pro narýsovaný obrys je:

$$IRC_{\text{obrys události 3}} = f_{3,d} = 1,2 \times 10^{-7} \cdot \text{rok}^{-1}.$$

Nyní se vybere událost s další nejdelší zónou účinku (událost 1). Umístění zóny účinku je ovlivněno směrem proudění větru, takže četnost musí být znovu redukována činitelem směru:

$$f_{i,d} = f_1(\theta_1/360) = (5,8 \times 10^{-4} \cdot \text{rok}^{-1})(15/360) = 2,4 \times 10^{-5} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Kolem zařízení s chlorem se pak narýsuje obrys rizika o poloměru rovném vzdálenosti zóny účinku události 1, tj. 230 m. Vztah  $IRC_i = f_i(\text{nebo } f_{i,d}) + IRC_{i-1}$  může být napsán následujícím způsobem, aby bylo možno přiřadit četnost dalšímu obrýsu rizika:

$$IRC_{\text{obrys události 1}} = f_{1,d} + IRC_{\text{obrys události 3}} = 2,4 \times 10^{-5} + 1,2 \times 10^{-7} = 2,4 \times 10^{-5} \cdot \text{rok}^{-1}$$

K dokončení analýzy je četnost poslední události (číslo 2) opět korigována činitelem směru podle výše uvedeného vztahu a vychází:

$$f_{2,d} = f_2(\theta_2/360) = (6,6 \times 10^{-4}) \times (15/360) = 2,8 \times 10^{-5} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Kolem zařízení s chlorem se pak narýsuje obrys rizika o poloměru rovném vzdálenosti zóny účinku události 2, tj. 64 m, a jemu přiřazená četnost za použití vztahu  $IRC_i = f_i(\text{nebo } f_{i,d}) + IRC_{i-1}$  v následujícím tvaru:

$$IRC_{\text{obrys události 2}} = f_{2,d} + IRC_{\text{obrys události 1}} = 2,8 \times 10^{-5} + 2,4 \times 10^{-5} = 5,2 \times 10^{-5} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Obrázek 4 představuje pro tuto studii konečnou mapu izolinií individuálního rizika. Mapa ukazuje, že událost 2 (malý únik par) nedosáhne k obydlené oblasti, kdežto události 1 a 3 ano. Událost 3, velký únik par pojistným ventilem, ovlivní významnou část obydlené oblasti, ale s nižší četností než jiné události.

## Společenské riziko

Křivka společenského (sociálního) rizika je zobrazena ve čtvrtovině, kde vodorovná osa znázorňuje následky (počty úmrtí) a svislá osa znázorňuje příslušné četnosti za rok. Každý bod této křivky říká, že nejvýše s četností, která tomuto bodu přísluší, budou následky představovat příslušný počet úmrtí.

Výpočet společenského rizika vyžaduje spíše provést odhad počtu lidí usmrčených při každém případě projevu události než odhad pravděpodobnosti úmrtí v konkrétním místě. Metodika se používá pro vytvoření křivky F - N. Rozdělení populace v okolí stáječícího místa je specifikováno na obrázku 2. Tabulka 8 podává přehled množiny reprezentativních událostí, které mohou potenciálně ovlivnit populaci. Pro tuto studii je seznam událostí totožný se seznamem projevů událostí, protože každá událost (únik chloru) má pouze jeden projev (toxický oblak). Tudíž seznam událostí v tabulce 8 představuje seznam možných projevů událostí.

Další krok při analýze je vytvoření seznamu případů projevu události. Pro tento příklad se uvažuje pouze jeden typ počasí (atmosférická stabilita D, rychlost větru  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), ale směr proudění větru se bude měnit. Pro účely následujících výpočtů je směr proudění větru rozdělen podle osmisměrné větrné růžice (S, SV, V, JV, J, JZ, Z, SZ – tyto zkratky označují tu světovou stranu, odkud vítr vane). Tak každá událost v tabulce 8 má 8 případů projevu události takto sdružených, jeden případ pro každý směr proudění větru. Ve specifikaci úlohy je upřesněno, že proudění větru je stejně pravděpodobné pro jakýkoliv směr. Tudíž pravděpodobnost, že vítr bude proudit v nějakém z 8 možných směrů, je  $1/8$  a četnost každého případu projevu události je rovna  $0,125$  krát odpovídající četnost události. Mohla by být také použita větrná růžice s nestejným rozdělením. V takovém případě by četnost každého případu projevu události (pro směr větru) byla určena násobením pravděpodobností četnosti události pro proudění větru v tomto směru.

Tabulka 9 uvádí seznam všech případů projevu události v této studii, každý s odhadem četnosti výskytu. Většina případů projevu události (indikovaných poznámkou "B") neovlivní obydlenou oblast a nejsou dále uvažovány.



Tabulka 9: Seznam případů projevu události uvažující 8 bodovou větrnou růžici

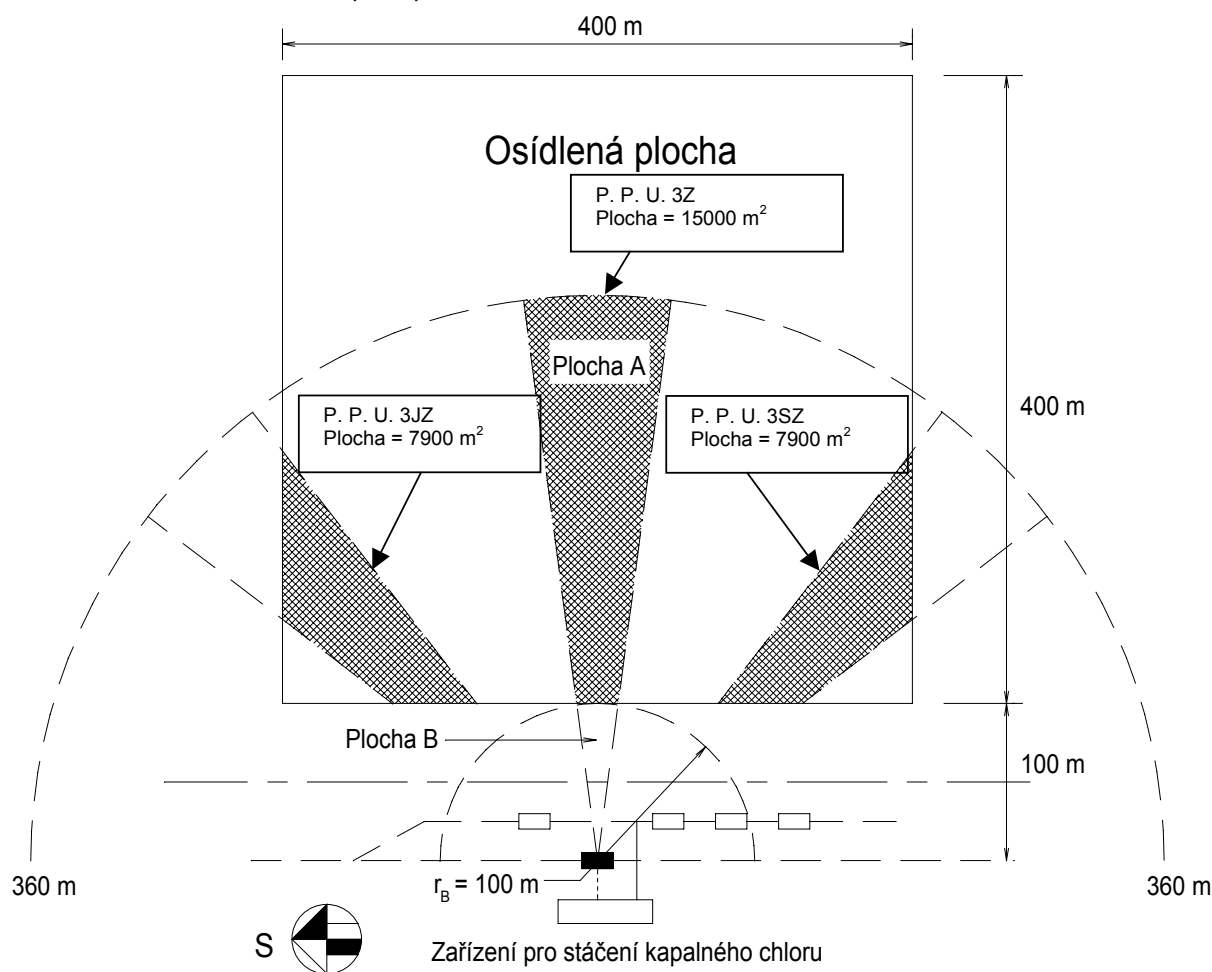
Událost	Četnost události (rok <sup>-1</sup> )	Případ projevu události			Poznámky *
		Čís.	Pravděpodobnost směru větru	Četnost (rok <sup>-1</sup> )	
1	5,8×10 <sup>-4</sup>	1 JZ	0,125	7,3×10 <sup>-5</sup>	A
		1 Z	0,125	7,3×10 <sup>-5</sup>	A
		1 SZ	0,125	7,3×10 <sup>-5</sup>	A
		1 S	0,125	7,3×10 <sup>-5</sup>	B
		1 SV	0,125	7,3×10 <sup>-5</sup>	B
		1 V	0,125	7,3×10 <sup>-5</sup>	B
		1 JV	0,125	7,3×10 <sup>-5</sup>	B
		1 J	0,125	7,3×10 <sup>-5</sup>	B
2	6,6×10 <sup>-4</sup>	2 JZ	0,125	8,3×10 <sup>-5</sup>	B
		2 Z	0,125	8,3×10 <sup>-5</sup>	B
		2 SZ	0,125	8,3×10 <sup>-5</sup>	B
		2 S	0,125	8,3×10 <sup>-5</sup>	B
		2 SV	0,125	8,3×10 <sup>-5</sup>	B
		2 V	0,125	8,3×10 <sup>-5</sup>	B
		2 JV	0,125	8,3×10 <sup>-5</sup>	B
		2 J	0,125	8,3×10 <sup>-5</sup>	B
3	3,0×10 <sup>-6</sup>	3 JZ	0,125	3,8×10 <sup>-7</sup>	A
		3 Z	0,125	3,8×10 <sup>-7</sup>	A
		3 SZ	0,125	3,8×10 <sup>-7</sup>	A
		3 S	0,125	3,8×10 <sup>-7</sup>	B
		3 SV	0,125	3,8×10 <sup>-7</sup>	B
		3 V	0,125	3,8×10 <sup>-7</sup>	B
		3 JV	0,125	3,8×10 <sup>-7</sup>	B
		3 J	0,125	3,8×10 <sup>-7</sup>	B

\* A - zóna účinku ovlivňuje obydlenu oblast; B - zóna účinku neovlivňuje obydlenu oblast  
 Nyní existuje seznam všech případů projevu události. Byla také určena četnost každého případu projevu události (Tabulka 9) a zóna jeho účinků (Tabulka 8). Nyní lze určit počet úmrtí pro každý případ projevu události. Použije se zjednodušená grafická metoda, která spočívá v tom, že se lokální populační mapa překryje zónou účinku každého případu projevu události. Obrázek 5 to ukazuje pro případy projevu události označené 3 JZ, 3 Z a 3 SZ. Je provedeno sčítání počtu osob v každé zóně účinku. Například, zóna účinku v případě projevu

události 3 Z pokrývá asi 15000 m<sup>2</sup> obydlené oblasti. Při zadané hustotě zalidněnosti 25 osob na 10000 m<sup>2</sup> tato zóna účinku ovlivní asi 38 lidí (15000 m<sup>2</sup> × 25 lidí / 10000 m<sup>2</sup>). Počet úmrtí je pak určen ze vztahu  $N_i = P_i \cdot p_{f,i}$ ,

kde  $N_i$  = počet úmrtí vycházejících pro případ projevu události  $i$ ;  $P_i$  = celkový počet lidí v zóně účinku pro případ projevu události  $i$ ;  $p_{f,i}$  = pravděpodobnost úmrtí v zóně účinku pro případ projevu události  $i$ .

Při výpočtu individuálního rizika bylo předpokládáno, že všechny osoby v zóně účinku vymezené koncentrací LC<sub>50</sub> jsou usmrceny, takže  $p_{f,i} = 1$ . Proto pro všechny případy projevu události v této studii platí  $N_i = P_i$ .



P.P.U. znamená „případ projevu události“

Obrázek 5: Zóny účinků pro událost číslo 3

Pro případ události 3 Z,  $N_i = P_i = 38$  úmrtí. Podobná analýza případů projevů události 3 JZ a 3 SZ (Obrázek 5) ukazuje, že pro tyto případy projevu události se každý rovná 20 úmrtím. Analýza případů projevů událostí 1 JZ, 1 Z a 1 SZ je provedena podobným způsobem. Analýza zbývajících událostí v tabulce 9 ukazuje, že nemají vliv na obydlenou oblast. Výsledky analýzy všech případů projevu události jsou shrnuty v tabulce 10. Případy projevu události, které neovlivnily žádné osoby, už byly vynechány.

Dalším krokem postupu je uvést údaje do podoby kumulativní četnosti použitím následujícího vztahu pro všechny případy projevu události  $i$ , při kterém  $N_i \geq N$ :

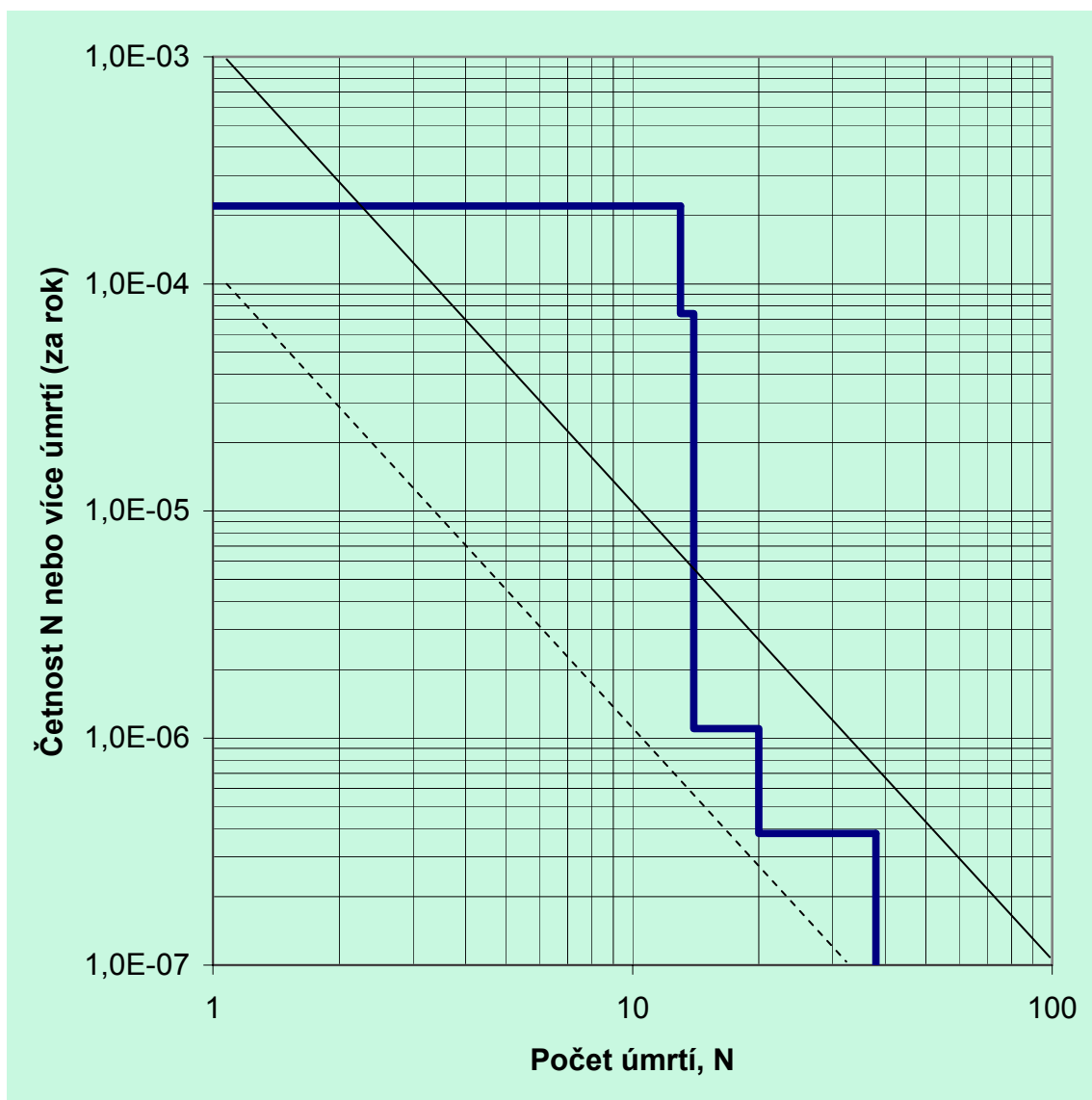
$$F_N = \sum_i F_i$$

kde  $F_N$  = četnost všech případů projevu události ovlivňujících  $N$  nebo více osob;  $F_i$  = četnost případu projevu události  $i$ ;  $N_i$  = počet úmrtí osob ovlivněných projevem případu události  $i$ .

Tabulka 11 ukazuje použití předchozího vztahu pro údaje z tabulky 10, který udává kumulativní četnost  $F_N$  případů projevu události majících za následek  $N$  nebo více úmrtí.

Tabulka 10: Odhady úmrtí případů projevu události směrem k obydlené oblasti

Případ projevu události	Četnost $F$ (rok <sup>-1</sup> )	Odhad počtu úmrtí
1 JZ	$7,3 \times 10^{-5}$	13
1 Z	$7,3 \times 10^{-5}$	14
1 SZ	$7,3 \times 10^{-5}$	13
3 JZ	$3,8 \times 10^{-7}$	20
3 Z	$3,8 \times 10^{-7}$	38
3 SZ	$3,8 \times 10^{-7}$	20
Ostatní	-	0



Obrázek 6: F – N křivka sociálního rizika pro studii stáčení chloru

Data z prvních 2 sloupců tabulky 11,  $F_N$  a  $N$ , jsou znázorněna jako křivka F - N v logaritmických souřadnicích na obrázku 6.

Tabulka 11: Data pro výpočet křivky společenského rizika F - N

Odhad počtu úmrtí*	Kumulativní četnost N nebo více úmrtí, $F_N$ (rok <sup>-1</sup> )	Případy projevu události
$N > 38$	0	žádný
$20 < N \leq 38$	$3,8 \times 10^{-7}$	3 Z
$14 < N \leq 20$	$1,1 \times 10^{-6}$	3 Z, 3 JZ, 3 SZ
$N = 14$	$7,3 \times 10^{-5}$	3 Z, 3 JZ, 3 SZ, 1 Z
$N \leq 13$	$2,2 \times 10^{-4}$	3 Z, 3 JZ, 3 SZ, 1 Z, 1 JZ, 1 SZ

\* N musí být celé číslo.

## Další jednoduché míry rizika

Pro tuto vzorovou studii může být také vypočteno několik dalších jednoduchých měr rizika:

1. **Maximální individuální riziko.** Člověk vystavující se maximálnímu individuálnímu riziku se nachází uprostřed západního okraje obydlené oblasti (viz obrázek 4). Individuální riziko úmrtí v tomto místě je maximální individuální riziko (pro tuto studii  $2,4 \times 10^{-5}$  / rok).

2. **Střední míra úmrtí.** Střední míra úmrtí (SMÚ) se vypočítá ze vztahu:

$$SMÚ = \sum_{i=1}^n F_i N_i$$

Tabulka 10 shrnuje  $F_i$  a  $N_i$  pro 6 případů projevu události, které mají za následek úmrtí.

$$SMÚ = (7,3 \times 10^{-5})(13) + (7,3 \times 10^{-5})(14) + (7,3 \times 10^{-5})(13) + (3,8 \times 10^{-7})(20) + (3,8 \times 10^{-7})(38) + (3,8 \times 10^{-7})(20) = 3,0 \times 10^{-3} \text{ úmrtí/rok}$$

3. **Index ekvivalentních společenských nákladů.** Ekvivalentní společenské náklady (ESN) se vypočítají pomocí následujícího vztahu:

$$ESN = \sum_{i=1}^n f_i N_i^p$$

kde  $p$  = činitel velikosti averze vůči riziku ( $p > 1$ ). Při použití hodnoty  $p = 1,2$  navrhované Okrentem vychází:

$$ESN_{\text{Okrent}} = (7,3 \times 10^{-5})(13)^{1,2} + (7,3 \times 10^{-5})(14)^{1,2} + (7,3 \times 10^{-5})(13)^{1,2} + (3,8 \times 10^{-7})(20)^{1,2} + (3,8 \times 10^{-7})(38)^{1,2} + (3,8 \times 10^{-7})(20)^{1,2} = 4,9 \times 10^{-3}$$

Při použití hodnoty  $p = 2$  navrhované holandskou vládou vychází:

$$ESN_{\text{holandská vláda}} = (7,3 \times 10^{-5})(13)^2 + (7,3 \times 10^{-5})(14)^2 + (7,3 \times 10^{-5})(13)^2 + (3,8 \times 10^{-7})(20)^2 + (3,8 \times 10^{-7})(38)^2 + (3,8 \times 10^{-7})(20)^2 = 3,7 \times 10^{-2}$$

4. **Průměrné individuální riziko.** Je možno ukázat, že průměrné individuální riziko může být vypočteno ze střední míry úmrtí (SMÚ) podle vztahu:

$$IR_{PR} = SMÚ / O_R$$

kde  $O_R$  = celkový počet obyvatel vystavených nějakému riziku pocházejícímu ze zařízení (např. celkový počet obyvatel uvnitř nejméně vzdáleného obrysu rizika).

Pro tento příklad nejméně vzdálený obrys rizika uzavře poněkud více než 1/2 obydlené plochy (viz obrázek 4). Při zadané rovnoměrné hustotě zalidněnosti je odhad počtu lidí na této ploše 240 ( $O_R = 240$ ) a pak:

$$IR_{PR} = SMÚ / O_R = (3 \times 10^{-3}) / 240 = 1,2 \times 10^{-5} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Riziko může být také zprůměrováno přes celkový počet obyvatel 400:

$$IR_{PR} (\text{všechno obyvatelstvo}) = (3,0 \times 10^{-3}) / 400 = 7,5 \times 10^{-6} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Tento průměr není dobrá míra rizika, protože 160 lidí, kteří nejsou vystaveni žádnému riziku z chlorového zařízení, je zahrnuto do počtu obyvatel, kteří jsou vystaveni riziku průměrnému. To poskytuje upravený (nižší) odhad rizika.

5. **Smrtelná nehodovost.** Smrtelná nehodovost (SN) pro nechráněné obyvatelstvo se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$SN = IR_{PR} (1,14 \times 10^4) \text{ úmrtí} / 10^8 \text{ hodin expozice}$$

SN je normálně používaná míra rizika pro zaměstnance v místě. Za předpokladu, že by část podniku s provozem představovala obydlenu plochu, kde jsou lidé přítomni neustále, pak SN může být pro tuto studii vypočtena následujícím způsobem:

$$SN = (1,2 \times 10^{-5} \text{ rok}^{-1})(1,14 \times 10^4) = 0,14 \text{ úmrtí} / 10^8 \text{ člověkohodin expozice}$$

Tabulka 12: Přehled jednoduchých měr rizika pro studii stáčení chloru

Míra rizika	Hodnota
Maximální individuální riziko	$2,4 \times 10^{-5} \cdot \text{rok}^{-1}$
Průměrné individuální riziko:	
Nechráněné obyvatelstvo	$1,2 \times 10^{-5} \cdot \text{rok}^{-1}$
Veškeré obyvatelstvo	$7,5 \times 10^{-6} \cdot \text{rok}^{-1}$
Smrtelná nehodovost	0,14 úmrtí / $10^8$ člověkohodin expozice
Střední míra úmrtí	$3 \times 10^{-3}$ úmrtí. $\text{rok}^{-1}$
Ekvivalentní společenské náklady:	
Okrent	$4,9 \times 10^{-3}$
Holandsko	$3,7 \times 10^{-2}$

## Literatura

1. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, AIChE - CCPS, New York, 1989

## Summary

The contribution deals with substantiation of the conception of an acceptable technogenic risk (PTR) for the safety of complex technical systems, people and the environment. The acceptable technogenic risk is defined as a stochastic quantitative index, a functional property of safety in the man-machine-environment system. The use of it must become a basis for the selection of an optimum value of the degree of safety of technogenic complex (TK).

The author of the contribution analyses the specific features of TK and discusses advantages and disadvantages of inductive and deductive methods of mathematical modelling the acceptable technogenic risk. The deductive method of creation of a hierarchic system of the mathematical model is taken as a suitable methodological approach to the assessment of level of technogenic risk acceptability in the case of TKs.