

Postupy a metodiky analýz a hodnocení rizik pro účely zákona o prevenci závažných havárií

Ředitel VÚBP Praha: **Ing. Miloš Paleček, CSc.**

Řešitelský tým (abecedně):

Ing. Jan Bumba

RNDr. Lubomír Kelnar

Ing. Vilém Sluka

Praha 2000

(Aktualizace týkající se terminologie spolehlivosti - duben 2005)

OBSAH

1. Pojem „riziko“	10
1.1 Úvod k pojmu „riziko“	10
1.2 Definice rizika	10
1.2.1 Zdroje – příjemci rizika	12
1.3 Míry rizika	13
1.3.1 Individuální riziko	13
1.3.2 Společenské riziko.....	13
1.3.3 Oblast rizika.....	15
1.3.4 Ostatní kategorie rizika.....	15
1.4 Závěry k pojmu „riziko“	16
2. Úvod k analýzám a hodnocení rizika.....	18
2.1 Analýza rizika	20
2.2 Hodnocení rizika.....	22
2.3 Neurčitosti kvantitativního ocenění rizika.....	23
3. Analýza rizika	24
3.1 Techniky identifikace zdrojů rizika.....	24
3.1.1 Bezpečnostní prohlídka (SR).....	28
3.1.2 Analýza kontrolním seznamem (CL)	30
3.1.3 Relativní klasifikace (RR)	31
3.1.4 Předběžná analýza zdrojů rizika (PHA).....	33
3.1.5 Analýza „Co se stane, když ...“ (W-I)	35
3.1.6 Studie nebezpečí a provozuschopnosti (studie HAZOP)	36
3.1.7 Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA)	38
3.2 Techniky analýzy systémů.....	39
3.2.1 Analýza stromu poruch (poruchových stavů) (FTA)	39
3.2.2 Analýza stromu událostí (ETA).....	41
3.2.3 Analýza příčin a následků (CCA).....	42
3.2.4 Analýza lidské spolehlivosti (HRA).....	43
3.3 Analýza a modelování následků	44
3.3.1 Povaha následků a struktura jejich hodnocení	45
3.3.2 Modely zdrojového členu.....	47

3.3.2.1	Popis jevů.....	47
3.3.2.2	Modely.....	48
3.3.2.3	Vstupy a výstupy.....	49
3.3.2.4	Vztah k jiným modelům.....	49
3.3.3	Modely rozptylu	49
3.3.3.1	Popis jevů.....	49
3.3.3.2	Meteorologické podmínky - topografie.....	50
3.3.3.3	Modely.....	50
3.3.3.4	Vstupy a výstupy.....	52
3.3.3.5	Vztah k jiným modelům.....	52
3.3.4	Modely požárů a výbuchů.....	52
3.3.4.1	Modely požárů	52
3.3.4.2	Modely výbuchů	53
3.3.5	Modely zranitelnosti.....	54
3.3.5.1	Popis jevů.....	54
3.3.5.2	Modely.....	54
3.3.6	Integrace výsledků.....	57
3.3.7	Počítačové programy pro hodnocení následků	57
3.3.8	Neurčitosti při hodnocení následků	58
3.4	Analýza frekvencí a pravděpodobností událostí	59
3.4.1	Modelování reality	62
3.4.1.1	Definování reality a její model.....	62
3.4.1.2	Deterministický model reality	63
3.4.1.3	Pravděpodobnostní model reality	64
3.4.1.4	Jednoduché modely pro pravděpodobnosti událostí v čase	64
3.4.1.5	Jednoduché modely pro pravděpodobnosti událostí na výzvu.....	70
3.4.1.6	Shrnutí o pravděpodobnostních modelech v QRA	72
3.4.2	Modelovací techniky	73
3.4.2.1	Analýza stromu poruch (poruchových stavů)	73
3.4.2.2	Analýza stromu událostí.....	80
3.4.2.3	Aplikace postupů na operační jednotku	85
3.4.3	Závěry pro praktické aplikace QRA.....	93
3.4.3.1	Zdroje spolehlivostních dat	93
3.4.3.2	Některé problémy s daty	94
4.	Hodnocení rizika	96
4.1	Povaha závažných zdrojů rizika v procesním průmyslu.....	96
4.2	Metodologie analýzy rizika.....	97
4.3	Kvalitativní a semikvantitativní přístupy k integraci rizika.....	98
4.3.1	Otázka kvantifikace	98
4.3.2	Problémy kvalitativního přístupu.....	100
4.4	Integrace kvantitativního přístupu	100

5. Přehled použité a doporučené literatury.....	102
6. Příloha č. 1 - případové studie	110
6.1 Zařízení pro nakládání chloru do železniční cisterny – 1. případ. studie	110
6.1.1 Úvod	110
6.1.2 Popis.....	111
6.1.3 Identifikace, výčet a výběr událostí.....	112
6.1.4 Odhad následků události	113
6.1.4.1 Výpočty výtokové rychlosti.....	113
6.1.4.2 Výpočet toxicity chloru	118
6.1.4.3 Výpočty rozptylů.....	119
6.1.5 Odhad četnosti události	121
6.1.6 Odhad rizika	123
6.1.6.1 Individuální riziko	123
6.1.6.2 Společenské riziko	125
6.1.6.3 Jednoduchá čísla a indexy jako míry rizika	128
6.1.7 Závěry.....	130
6.2 Destilační kolona – 2. případová studie	131
6.2.1 Úvod	131
6.2.2 Popis.....	131
6.2.3 Identifikace, výčet a výběr událostí.....	132
6.2.4 Odhad následků událostí.....	136
6.2.4.1 Výpočty rychle se odpařujícího výtoku a rozptylu (události A, B a C)	136
6.2.4.2 Stromy událostí	139
6.2.4.3 Následky výsledků událostí	140
6.2.5 Odhad frekvence událostí.....	143
6.2.5.1 Frekvence reprezentativních souborů událostí.....	143
6.2.5.2 Pravděpodobnosti výsledků událostí	144
6.2.5.3 Příprava frekvencí pro případy výsledků událostí.....	146
6.2.6 Odhad rizika	148
6.2.6.1 Individuální riziko	148
6.2.6.2 Sociální riziko	151
6.2.7 Závěry.....	152
7. Příloha č. 2 – soubor příkladů	154
7.1 Úvod do pojmu rizika	154
7.2 Technika identifikace nebezpečí.....	155
7.3 Technika analýzy systému.	159
7.4 Analýza následků a modelování	163
7.5 Frekvence události a analýza pravděpodobnosti	169

7.6 Integrace rizika a rozhodování.....	174
7.7 Systémy řízení bezpečnosti a bezpečnostní zprávy	181
7.8 Územní plánování.....	185
8. Příloha č. 3 – soubor obrázků	188

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Struktura modelů hodnocení následků.....	47
Obrázek 2: Příklad výskytu pravděpodobností použitím Poissonova rozdělení.....	66
Obrázek 3: Graf pravděpodobnosti bezporuchového provozu a pravděpodobnosti poruchy s intenzitou poruch $\lambda = 0,05/\text{hod}$	67
Obrázek 4: Typický příklad pravděpodobnosti poruchy a nepohotovosti systému pro $\lambda = 0,3/\text{hod}$ a $\mu = 0,4/\text{hod}$	70
Obrázek 5: Příklad výskytu pravděpodobností událostí s binomickým rozdělením pro $\lambda_D = p = 0,04/\text{výzvu}$	72
Obrázek 6: Logický diagram pro aplikaci analýzy stromu poruch (FTA).....	75
Obrázek 7: Standardní symboly stromu poruch	77
Obrázek 8: Strom poruch pro příklad nesvítící pokojové lampy	78
Obrázek 9: Příklad pre-nehodového stromu událostí	82
Obrázek 10: Příklad post-nehodového stromu událostí.....	82
Obrázek 11: Logický diagram pro aplikaci analýzy stromu událostí (ETA).....	84
Obrázek 12: P&ID skladovacího tanku s hořlavou kapalinou	86
Obrázek 13: Analýza stromu poruch pro tank s hořlavou kapalinou (1. část).....	88
Obrázek 14: Analýza stromu poruch pro tank s hořlavou kapalinou (2. část).....	89
Obrázek 15: Analýza stromu událostí pro skladovací tank s LPG	92
Obrázek 16: Příklad křivky F – N.....	155
Obrázek 17: Blokové schéma k příkladu 6	161
Obrázek 18: První strom poruch k příkladu 6	161
Obrázek 19: Druhý strom poruch k příkladu 6	162
Obrázek 20: Podmíněné (relativní) riziko versus vzdálenost od zařízení	168

Obrázek 21: Křivka skupinového rizika F - N pro příklad 10.....	168
Obrázek 22: Časově závislé chování pravděpodobností z příkladu 11	170
Obrázek 23: Typické křivky stejných hodnot individuálního rizika	188
Obrázek 24: Typická křivka F – N	188
Obrázek 25: Křivka F – N pro uvedený příklad ze str. 14	189
Obrázek 26: Typický diagram I – N	189
Obrázek 27: Hloubka studie pro první případovou studii.....	190
Obrázek 28: Schéma zařízení pro nakládání chloru do železniční cisterny	190
Obrázek 29: Zjednodušený postup nakládání kapal. chloru do železniční cisterny.	191
Obrázek 30: Umístění zařízení pro nakládání kapal. chloru do železniční cisterny.	192
Obrázek 31: Strom poruch pro událost 3.....	193
Obrázek 32: Izokřivky individuálního rizika kolem zařízení pro nakládání chloru	194
Obrázek 33: Zóny účinků pro událost číslo 3.....	195
Obrázek 34: Křivka sociálního rizika F – N pro případ nakládání kapalného chloru do železniční cisterny	196
Obrázek 35: Hloubka studie pro případ destilační kolony	197
Obrázek 36: Destilační kolona, přidružená zařízení a podmínky.....	198
Obrázek 37: Prostorový plán zařízení destilační kolony a okolí	199
Obrázek 38: Větrná růžice pro studii případu destilační kolony.....	200
Obrázek 39: Strom událostí pro událost A studie destilační kolony.....	201
Obrázek 40: Strom událostí pro události B a C studie destilační kolony	202
Obrázek 41: Strom událostí pro událost A, jednorázový únik; vítr od JZ, Z a SZ směrem do obytné oblasti	203
Obrázek 42: Strom událostí pro událost A, jednorázový únik; vítr ze všech ostatních směrů od obytné oblasti	204
Obrázek 43: Strom událostí pro události B a C, kontinuální únik; vítr od JZ, Z a SZ působící do obytné oblasti.....	205
Obrázek 44: Strom událostí pro události B a C, kontinuální únik; vítr ze všech ostatních směrů od obytné oblasti.....	206
Obrázek 45: Zóny účinků následků v prostorovém plánu zařízení pro výsledky událostí 1, 2, 3, a 5 ve východním směru.....	207
Obrázek 46: Profil rizika pro výsledek události 1 – BLEVE.....	208

Obrázek 47: Profil rizika pro výsledek události 2 – UVCE	208
Obrázek 48: Profil rizika pro výsledek události 3 – Bleskový požár (jednoráz. únik).....	209
Obrázek 49: Profil rizika pro výsledek události 5 – Bleskový požár (kont. únik)	209
Obrázek 50: Individuální riziko versus vzdálenost ve východním směru	210
Obrázek 51: Celkové společenské riziko ze systému frakční destilace	211

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled technik identifikace zdrojů rizika a jejich použití v jednotlivých etapách života zařízení	26
Tabulka 2: Techniky identifikace zdrojů rizika	27
Tabulka 3: Přepočet hodnoty probit funkce na podíl ovlivněné populace	56
Tabulka 4: Prahové hodnoty účinků tepelné radiace na osoby a stavby	56
Tabulka 5: Úrovně zničení budov a konstrukcí přetlakem	57
Tabulka 6: Pravidla pro výpočet stromu poruch technikou hradlo-za-hradlem *	80
Tabulka 7: Vstupní data k příkladu 3 pro strom událostí	90
Tabulka 8: Koncové stavy sekvencí stromu událostí k příkladu 3 a jejich frekvence ..	91
Tabulka 9: Výstup ze studie metodou HAZOP průtokového zařízení pro nakládání chloru do železniční cisterny (pouze výtah).....	114
Tabulka 10: Reprezentativní sada událostí vybraných z tabulky 9	115
Tabulka 11: Odhadnuté rychlosti úniku chloru pro tři reprezentativní události.....	118
Tabulka 12: Výsledky odhadu expozice LC_{50} pro chlor	119
Tabulka 13: Koncentrace chloru pro tři reprezentativní události případové studie ..	121
Tabulka 14: Vzdálenost, ve které dosáhne koncentrace chloru hodnoty LC_{50}	121
Tabulka 15: Odhad četnosti selhání součástí systému pro nakládání chloru	122
Tabulka 16: Souhrn odhadů četností reprezentativních událostí.....	123
Tabulka 17: Souhrn reprezentativních událostí s přidruženými zónami účinku a četnostmi událostí	124
Tabulka 18: Seznam případů výsledku události uvažující 8 bodovou větrnou růžici.....	127
Tabulka 19: Odhad počtu úmrtí pro případy výsledku události ovlivňující obydlenu oblast.....	127

Tabulka 20: Data pro výpočet křivky společenského rizika F - N	128
Tabulka 21: Přehled jednoduchých čísel a indexů jako vyjádření míry rizika	130
Tabulka 22: Fyzikální vlastnosti hexanu a heptanu *	132
Tabulka 23: Data použitá pro výpočty jednorázového rozptylu těžkého plynu	138
Tabulka 24: Výsledky výpočtů rozptylu pro jednorázový únik (událost A)	138
Tabulka 25: Data použitá pro výpočty kontinuálního rozptylu těžkého plynu.....	139
Tabulka 26: Výsledky výpočtů rozptylu pro kontinuální únik (událost B a C).....	139
Tabulka 27: Příklad frekvence poruch (pro ilustrativní účely)	143
Tabulka 28: Pravděpodobnosti stromu událostí – jednoráz. únik (obrázky 41 a 42).....	145
Tabulka 29: Pravděpodobnosti stromu událostí – kont. únik (obrázky 43 a 44)	145
Tabulka 30: Frekvence případů nehodových následků	147
Tabulka 31: Celkové individuální riziko ve vzdálenostech ve východním směru	150
Tabulka 32: Odhad individuálního rizika.....	151
Tabulka 33: Odhad počtu úmrtí pro každý případ výsledku události	152
Tabulka 34: Odhad sociálního rizika	153
Tabulka 35: Zadání údajů příkladu k vyhodnocení společenského rizika	154
Tabulka 36: Konstrukce F-N křivky.....	154
Tabulka 37: Příprava čaje: zařízení.....	156
Tabulka 38: Příprava čaje: postupové kroky	156
Tabulka 39: Příklad záhlaví formuláře zprávy o identifikaci nebezpečí	157
Tabulka 40: Rizika a problémy, které mohou být identifikovány při přípravě čaje ...	158
Tabulka 41: Příklad zprávy o identifikaci nebezpečí	158
Tabulka 42: Maticové schéma k příkladu 11	170
Tabulka 43: Stanovení nového pravděpodobnostního rozdělení použitím Bayesovy metody (k příkladu 13).....	173
Tabulka 44: Vyhodnocení frekvence a závažnosti následků chemické výroby.....	175
Tabulka 45: Rizika osmi zdrojů v matici rizika	176
Tabulka 46: Srovnání rizik dvou podniků pomocí matice rizik	177
Tabulka 47: Profil rizika chemických zařízení podniku	177

Tabulka 48: Pracovní formulář k výpočtu úrovně rizika spojeného s každou nebezpečnou vlastností.....	179
Tabulka 49: Vyplněný pracovní formulář k výpočtu úrovně rizika spojeného s každou nebezpečnou vlastností.....	180
Tabulka 50: Zásady HSE pro umístění uvnitř konzultačních zón	187
Tabulka 51: Minulá a současná holandská kritéria přijatelnosti rizika	187

SEZNAM PŘÍKLADŮ

Příklad 1: Únik ze zásobního tanku hořlavé kapaliny – analýza stromem poruch	85
Příklad 2: Ochrana proti párování frekvence-frekvence u AND hradel.....	89
Příklad 3: Velký únik stlačeného LPG ze skladovacího tanku – analýza ETA	90
Příklad 4: Sestrojení křivky společenského rizika ze zadaných údajů	154
Příklad 5: Cvičení ve stylu HAZOP	155
Příklad 6: Cvičení na sestavování logických diagramů.....	159
Příklad 7: Posloupnost dějů (model) události	163
Příklad 8: Odhad expozice toxickým plynem	166
Příklad 9: Výběr modelu rozptylu toxického plynu	166
Příklad 10: Odhad skupinového rizika	167
Příklad 11: Určování frekvence a pravděpodobnosti událostí.....	169
Příklad 12: Určování frekvence a pravděpodobnosti událostí.....	170
Příklad 13: Určování frekvence a pravděpodobnosti událostí.....	171
Příklad 14: Určování frekvence a pravděpodobnosti událostí.....	174
Příklad 15: Kvalitativní vyhodnocení rizika a použití matice rizika	174
Příklad 16: Profil rizika.....	177
Příklad 17: Role bezpečnostní zprávy při rozvoji podnikání	181
Příklad 18: Porovnání různých přístupů přijatelnosti rizika	185
Příklad 19: Řešení problematiky jednorázových aktivit	186
Příklad 20: Dopad změny kritérií přijatelnosti rizika na průběh povolené výstavby..	186

1. Pojem „riziko“

Tato kapitola se týká úvodu k pojmu „riziko“. Ačkoliv riziko je běžný termín široce používaný v každodenním životě, ve vědě a technice má speciální smysl: *je to kombinace nežádoucích následků události a „nejistoty“ spojené s jejím výskytem*. Bude objasněn vztah rizika k těmto dvěma parametrům a odlišení rizika od ostatních podobných termínů, jako je např. nebezpečí. Bude krátce diskutováno o zdrojích a potenciálních příjemcích rizika. Konečně budou uvedeny nejběžněji používané míry rizika, jako je individuální riziko, společenské riziko a oblast rizika a budou uvedeny některé příklady.

1.1 Úvod k pojmu „riziko“

„Riziko“ je termín široce užívaný jak v každodenním životě, tak ve světě vědy. Např. při každodenní konverzaci je možno říci, že „riziko úmrtí padajícím meteoritem je velmi nízké, zatímco riziko náklady chřipkou během zimy je docela vysoké“. Podobně inženýr potvrdí, že riziko zřícení letadla je velmi nízké a psycholog se bude snažit vysvětlit lidskou reakci na riziko. Ve většině těchto a podobných oborů vědy má termín „riziko“ rozdílný význam. Existuje tudíž potřeba objasnit pojem „riziko“ a vysvětlit způsob, jak je definováno a použito v souvislosti s direktivou Seveso II.

Kapitola je sestavena následujícím způsobem: v podkapitole 1.2 je dána definice rizika spolu s analýzou hlavních pojmů. V této souvislosti jsou zmíněny hlavní složky rizika, je osvětlen rozdíl mezi rizikem a nejistotou, jakož i rozdíl mezi rizikem a nebezpečím. Důraz byl položen na definici rizika a dalších významných pojmů podle direktivy Seveso II. Podkapitola 1.2.1 Zdroje – příjemci rizika pojednává jak o zdrojích tak o příjemcích rizika, zatímco míry rizika a způsob jejich výpočtu jsou uvedeny v podkapitole 1.3 Míry rizika. V podkapitole 1.3.4 Ostatní kategorie rizika jsou definovány některé další kategorie rizika a jsou uvedeny a analyzovány pojmy jako „dobrovolné“ a „nedobrovolné“ riziko a „skutečné“ a „vnímané“ riziko.

1.2 Definice rizika

Podle obvyklého slovníkového významu je riziko „vyhlídka na špatné následky“. V oboru ekonomie a zejména v pojišťovnictví je riziko určeno jako matematické očekávání peněžní hodnoty (ceny) poškození (škod) způsobených nebezpečným zdrojem. V inženýrských oborech existuje názor, že „jakákoli možnost způsobit škodu je předpokládána jako riziko, jestliže existuje nejistota o tom, zda tyto škody budou nebo nebudou realizovány“ [Hauptmann & Werner]. Další jasná a srozumitelná technická definice zní: „Riziko je možnost výskytu nežádoucích následků z neovládané (neřízené) události“. [Rowe].

Pracovní skupina BRITSKÉHO INSTITUTU CHEMICKÝCH INŽENÝRŮ definuje riziko jako: „Pravděpodobnost specifického nežádoucího jevu vzniklého během specifické periody nebo za specifických okolností. Může se jednat buď o frekvence (počet událostí vyskytujících se v časové jednotce) nebo o pravděpodobnosti (specifické události následující po předchozí události), které mohou být závislé na okolnostech“.

Ve všech výše uvedených pokusech definovat riziko, se objevují dvě hlavní složky:

- výskyt nežádoucích následků,
- nejistota (pravděpodobnost) s jakou tyto následky nastanou

Rozlišení mezi rizikem a nejistotou

Nežádoucí následky a nejistota s nimi spojená mohou být považovány za hlavní složky rizika. Aby se určilo riziko technologického systému nebo nebezpečné činnosti, je nezbytné vyhodnotit oba parametry. Pokud jedna z obou složek neexistuje, neexistuje také riziko. Jako příklad může posloužit loterie: když si někdo koupí los a očekává, že v blízké se loterii vyhraje, bezpochyby je takový člověk v nejistotě. Avšak těžko lze říci, že taková osoba je konfrontována s rizikovou situací. Co zde chybí, to jsou nežádoucí následky. Bez nežádoucích následků neexistuje žádné riziko. Na druhé straně neexistuje riziko bez nejistoty. Jestliže někdo ví, že zítra určitě nastane rozsáhlé zemětřesení a že základy jeho domku se zřítí, může člověk bezpochyby učinit nezbytná opatření k vyloučení nežádoucích následků této události (přinejmenším tím, že tento den nebude pobývat v domku) a tudíž v takovém případě riziko neexistuje. Riziko je tedy kombinace nejistoty a nežádoucích následků, což může být shrnuto do symbolické rovnice:

$$\text{RIZIKO} = \text{NEJISTOTA} \times \text{NEŽÁDOUCÍ NÁSLEDKY}$$

Rozlišení mezi rizikem a nebezpečím

Zmatek v pojmech riziko a nebezpečí (hazard) je velmi obvyklý. Podle slovníků je nebezpečí často popisováno jako „zdroj rizika“, zatímco riziko jako „vyhlídka vzniku nežádoucích následků“. Nebezpečí tudíž jednoduše představuje původ (zdroj) rizika. Riziko na druhé straně zahrnuje „pravděpodobnost“, se kterou tento zdroj může být převeden na skutečné škody. Např. oceán je nepochybně zdroj rizika, nebezpečí. Pokud se ho někdo pokusí překonat na raftu (prámu), představuje to velké riziko. Na druhé straně překoná-li člověk oceán na velké lodi, riziko je téměř nulové. Při použití přiměřených ochranných opatření je riziko podstatně zredukováno. Riziko tudíž závisí nejen na nebezpečí, ale též na ochranných opatřeních přijatých proti nebezpečí. Může být tedy napsána rovnice, opět v symbolickém tvaru:

$$\text{RIZIKO} = \frac{\text{NEBEZPEČÍ (HAZARD)}}{\text{OCHRANNÁ OPATŘENÍ}}$$

Tato rovnice zavádí pojem lidské intervence a řízení rizika. Otázka „Jaká by mohla být adekvátní ochranná opatření, aby úroveň rizika z daného nebezpečí byla dosti nízká (nižší než zadaná mezní úroveň)?“ je určitě smysluplná. Avšak vzhledem k příkladu uvedenému výše by užití velké lodi přiměřené k přeplutí oceánu mohlo být plýtváním prostředků, kdyby byla použita pro přeplutí klidného jezera. Nebezpečí (hazard) je vždy zdrojem rizika. Je to fyzikální situace s potenciálem (možností) způsobit nežádoucí jevy pro člověka, majetek a životní prostředí.

Definice rizika v direktivě Seveso II

Po této obecné analýze je třeba se zaměřit na způsob, jak definuje tyto termíny direktiva Seveso II. Článek 3 Směrnice podává následující definice:

„Pro účely této směrnice:

6. „nebezpečím“ bude míněna skutečná (vnitřní) vlastnost nebezpečné látky nebo fyzikální situace s potenciálem pro vytvoření škod na lidském zdraví a/nebo na životním prostředí;
7. „rizikem“ bude míněna pravděpodobnost specifických účinků, nastávajících během specifického období nebo za specifických podmínek.“

Rozdíl mezi nebezpečím a rizikem je nyní jasný: zatímco nebezpečí je právě vlastnost látky nebo situace, riziko je definováno jako „pravděpodobnost“ vzniku specifického (nežádoucího) jevu. Nejistá povaha rizika je touto definicí osvětlena. Proto, aby se určilo riziko, musí se určit různé účinky spolu s významnými „pravděpodobnostmi“ takto vzniklých jevů. Je třeba též poznamenat, že riziko se vztahuje i ke specifickému časovému úseku (např. 1 rok).

1.2.1 Zdroje – příjemci rizika

S ohledem na zdroje rizika mohou být rozlišeny 2 hlavní kategorie: přírodní rizika a technologická rizika. V dávných dobách lidstva byla příroda jediným zdrojem rizika. Lidstvo muselo bojovat proti nepřátelské přírodě a bylo vystaveno mnoha různým nebezpečím: divokým zvířatům, špatným povětrnostním podmínkám, povodním, požárům atd. V dnešní době je příroda – ačkoliv ve velké míře využívána – stále zdrojem rizika. Zemětřesení, povodně a hurikány jsou stále nepředvídatelné jevy s nežádoucími nebo dokonce katastrofálními následky. Avšak často mnohem důležitější než přírodní nebezpečí jsou zdroje rizika vytvořené lidstvem samotným: technologická rizika. Jako příklad: využití ohně bylo jedním z prvních zdrojů rizika odvozených od lidské činnosti. V nynější době jsou technologická rizika vztažena k prakticky všem lidským činnostem: energetický sektor, průmyslová výroba, chemické technologie, doprava, domácnosti, stavebnictví atd.

Je hodné poznamenání, že směrnice Seveso se týká pouze rizik určitých průmyslových aktivit podléhajících předpisům. Určité kategorie technologických aktivit jsou vyloučeny z jejího dosahu zejména proto, že již existuje specifická legislativa pro jejich kontrolu a pokus o jejich zařazení pod směrnici Seveso by zavedl významný nadbytek legislativy a tudíž případné střety.

Příjemci rizika – obvykle jsou to lidé a životní prostředí. Obecně může být příjemcem rizika též podnikatelský objekt, uvažuje-li se finanční riziko, nebo posuzují-li se škody na majetku (stavby, stroje, zařízení, jiné budovy a pod.). Avšak hlavními objekty vystavenými riziku jsou člověk a životní prostředí, které zahrnuje floru a faunu, ekosystém, vzduch, vodu a půdu v okolí technologického zařízení.

Existují některé speciální kategorie příjemců, jako jsou zaměstnanci podniku nebo aktivní či pasivní účastníci sportovních činností. Tito příjemci budou uvažováni odděleně, jelikož riziko, kterému jsou vystaveni, vykazuje některé speciální charakteristiky. „Pracovní riziko“ a „chtěné riziko“ spolu s dalšími speciálními typy rizika jsou detailně zmapovány v podkapitole 1.3.4 Ostatní kategorie rizika.

1.3 Míry rizika

Je-li definováno riziko, dalším problémem je, jak ho vlastně měřit. Z dřívějších úvah by již mělo být jasné, že žádná jednoduchá míra rizika neexistuje. Bylo navrženo a používá se mnoho takových měřítek, každé poskytuje jiný (rozdílný) pohled na určitou situaci. Mezi těmito mírami jsou pravděpodobně nejběžněji užívané tyto:

- individuální riziko,
- společenské riziko,
- oblast rizika.

1.3.1 Individuální riziko

Individuální riziko poukazuje na riziko přijímané osobou v blízkosti zdroje rizika. Tato míra zahrnuje povahu poškození osoby, „pravděpodobnost“, že toto poškození nastane a časové období, během kterého toto poškození může nastat. Existuje riziko **individuální fatality**, vztahuje-li se poškození k usmrcení osoby, **individuální riziko zranění** (např. popálením), jestliže jde o zranění příjemce právě takovým poškozením, nebo **individuální riziko obdržení nebezpečné toxické dávky**, jestliže se poškození vztahuje k určité expozici (koncentrace toxické látky $\times$ čas) toxickou látkou.

Detailněji, **individuální riziko je pravděpodobnost výskytu nežádoucích následků způsobených událostí osobě nacházející se v bodě (x, y) v okolí nebezpečného zařízení**. Z této definice je jasné, že individuální riziko je skutečně pravděpodobnost, tedy číslo mezi 0 a 1. Typické „číslo rizika“ je např. 10^{-6} za rok. Mělo by být doplněno periodou času, ke které se tato míra vztahuje („referenční čas“).

Hodnoty individuálního rizika v různých bodech dávají geografické rozdělení rizika a jsou charakteristikou oblasti okolo nebezpečného zařízení. **Křivka rizika** je definována jako množina bodů (x, y) okolo zařízení, kde individuální riziko má stejnou hodnotu. Obrázek 23 na str. 188 zobrazuje typické izorizikové křivky. Tyto křivky zvané též **kontury (obrysy, vrstevnice) individuálního rizika** většinou závisí na samotném zařízení, jsou nezávislé na hustotě populace v okolí a poskytují jasnou představu o riziku okolo zařízení.

1.3.2 Společenské riziko

Je-li zkonstruováno mnoho scénářů událostí, pak individuální riziko, vycházející ze všech těchto scénářů se vypočítá z rovnice:

$$R = \sum_i p_i \cdot c_i$$

kde p_i je pravděpodobnost výskytu scénáře i ,

c_i jsou jeho následky.

Podle této rovnice „hodnota“ individuálního rizika 0,01 může znamenat:

- 99 případů (scénářů události) s nulovými (0) následky a 1 případ s následky měřitelnými 1 jednotkou, nebo
- 999999 případů s nulovými (0) následky a 1 případ s následky měřitelnými 10000 jednotkami.

Pro vyloučení této nesrovnalosti dává mnoho rizikových analytiků přednost použití rizikových tripletů, tj. popisu rizika ne jen číslem, ale spíše trojicí čísel odpovídajících scénáři události s_i , „pravděpodobnosti“ jejího výskytu p_i a jejím následkům c_i . Potom riziko sestává z řady trojic:

$$R = \langle s_i, p_i, c_i \rangle$$

Z výše uvedené diskuse je jasné, že ve většině případů existuje skupina osob zasažených případnou událostí a tudíž všechny tyto osoby jsou vystaveny téže hladině rizika. Pro přiměřenou představu tohoto rozměru rizika se používá dodatečná míra rizika: *skupinové* nebo *společenské riziko*. Společenské riziko je riziko, jemuž je vystavena skupina osob ovlivněných událostí. Je vyjádřeno jako vztah mezi frekvencí a počtem lidí, kteří v dané populaci při realizaci určitého rizika budou určitým způsobem poškozeni. Toto riziko závisí nejen na typu zařízení s nebezpečnou látkou a typu události, ale také na rozdělení populace okolo zařízení. Představuje rozsah následků možných událostí a je vizualizováno (zviditelněno) křivkami $F - N$ (viz Obrázek 24 na str. 188). Jak označuje název, $F - N$ křivky představují grafický vztah frekvence události (F), při které může nastat určitý počet nežádoucích následků (N). Předpokládejme, že může nastat určitý počet následků (N) a že jako nežádoucí následky nás budou zajímat úmrtí lidí. Distribuce úmrtí (fatalit), tj. graf vyjadřující pravděpodobnost určitého počtu úmrtí, vede nejen k individuálnímu riziku, ale také ukazuje, jak mnoho lidí je vystaveno této hladině rizika. Je-li z rozdělovací funkce pravděpodobnosti odvozena komplementární kumulativní distribuční funkce, pak tato funkce udává $F - N$ křivku. Bod na křivce $F - N$ udává frekvenci F výskytu události s úmrtností vyšší než počet N lidí.

Příklad: Předpokládejme, že analýza rizika chemického procesního zařízení identifikovala 4 hlavní scénáře úniku nebezpečné látky. Tyto scénáře spolu s pravděpodobností výskytu a významnými následky (v kategorii očekávaných úmrtí) jsou uvedeny v následující tabulce:

Příklad společenského rizika			
	Scénář události	Následky (očekávaná úmrtí)	Pravděpodobnost výskytu
S1	Únik z potrubí	2	10^{-4}
S2	Katastrofická ruptura zásobníku	5000	10^{-8}
S3	Únik z otvoru v zásobníku	110	10^{-6}
S4	Ruptura nakládacího/vykládacího ramena	15	$2 \cdot 10^{-5}$

Pro sestrojení křivky $F - N$ tohoto příkladu je třeba přeskupit scénáře podle míry následků. Očekávaná frekvence („pravděpodobnost“) výskytu 5000 úmrtí je 10^{-8} za rok (scénář S2). Očekávaná frekvence 110 úmrtí (scénář S3) nebo více je suma očekávané frekvence scénáře S3 (10^{-6} za rok) a očekávané frekvence scénáře S2, $10^{-6} + 10^{-8} = 1,01 \cdot 10^{-6}$ za rok, viz následující tabulku. Použití této jednoduché procedury na všechna data množiny dává $F - N$ křivku, viz Obrázek 25 na str. 189.

Konstrukce křivky $F - N$				
	Scénář události	Následky (počet úmrtí)	Pravděpodobnost výskytu	Součtová frekvence (za rok)
S1	Únik z potrubí	2	10^{-4}	$1,2101 \cdot 10^{-4}$
S4	Ruptura nakládacího a/nebo vykládacího ramena	15	2×10^{-5}	$2,101 \cdot 10^{-5}$
S3	Únik z otvoru zásobníku	110	10^{-6}	$1,01 \cdot 10^{-6}$
S2	Katastrofický únik zásobníku	5000	10^{-8}	10^{-8}

1.3.3 Oblast rizika

Třetí často užívanou mírou rizika je **oblast rizika**. Tato míra je velmi užitečná, když k celkovému riziku určité zeměpisné oblasti přispívá více než jeden zdroj. Zde by mohly být zkombinovány míry rizika z různých zdrojů, aby daly buď zeměpisné rozdělení rizika na oblasti zájmu nebo rozdělení fatalit. Potom pro vizualizaci rizika v takovém případě jsou použity jak izokřivky rizika tak také křivky $F - N$. Navíc pečlivou analýzou je možné vyšetřit příspěvek každého zdroje rizika (např. průmyslového zařazení) k paušální celkové ploše rizika, což dává určitý náhled do povahy a původu určitého rizika a dovoluje vydedukovat závěry, jak upřednostnit opatření k redukci rizika.

Důležitý nástroj znázornění rizika v oblasti je histogram $I - N$ (viz Obrázek 26 na str. 189). Jeho význam je podobný významu společenského rizika a křivkám $F - N$. Udává počet osob N v oblasti účinků události, vystavené individuálnímu riziku (např. mezi $10^{-7} - 10^{-6}$ úmrtími za rok). I když tato míra může být odvozena přímo z křivek $F - N$, její užití se osvědčilo jako srozumitelný, názorný a pružnější nástroj pro rozhodování týkající se rizika.

1.3.4 Ostatní kategorie rizika

V této podkapitole budou diskutovány některé další kategorie rizika. Speciálně bude zájem věnován vyjasnění pojmů dobrovolné a nedobrovolné riziko, rozlišení mezi skutečným a vnímaným rizikem a diskusi pojmu rizika při práci.

V případě **dobrovolného rizika** příjemce dobrovolně vybírá svůj stupeň spoluzodpovědnosti a ohrožení vlastním rizikem. Týká se to např. rizika při určitých sportovních aktivitách (např. horolezectví), rizika požívání určitých léků a podrobení se lékařským procedurám, rizika na pracovišti a rizika určitých návyků, jako je např. kouření. Spoluodpovědnost za všechny tyto činnosti byla příjemcem dobrovolně vybrána.

Rozlišení mezi dobrovolným a nedobrovolným rizikem má ovšem hodně co do činění s **přijatelností rizika**. V mnoha studiích bylo popsáno, že „typický“ člověk dokáže přijmout mnohem vyšší hladiny rizika, pokud si riziko vybere sám, než když mu bylo riziko vnuceno někým jiným. Podle jedné takové studie je riziko kouření 50 000 krát vyšší než riziko výroby elektrické energie v nukleárním zařízení. Přesto riziko kouření je mnohem přijatelnější, než riziko výroby elektřiny zmíněným způsobem. Toto „typické“ chování není příliš překvapivé, jelikož příjemce dobrovolného rizika se obvykle domnívá, že se mu dostávají jakoby protiúctem některé přímé pozitivní z „rizikové činnosti“ a věří, že celou činnost, a tudíž případné riziko, má pod svou kontrolou.

Jiný důležitý problém je **vnímání rizika**. Podle definice uvedené v podkapitole Definice rizika na str. 10 a podle míry rizika vysvětlené v podkapitole 1.3 na str. 13 je riziko měřitelná veličina (vycházející v „číslech“). I když je odhad rizika technicky možný a dobře určitelný a může poskytovat objektivní míry rizika, jeho vnímání velmi závisí na subjektivních charakteristikách hodnotitele rizika. Každá osoba vnímá hladinu rizika absolutně rozdílným způsobem podle své kultury, charakteru, víry a začlenění v životě. Jinými slovy, každá osoba používá svoji „hodnotovou funkci“ k „objektivním“ mírám rizika popsaným výše a činí rozhodnutí podle této hodnotové funkce a podle vnímané hladiny rizika. Pro tento názor je důležitým problémem informovanost veřejnosti. Mají se brát v úvahu nejen technické výsledky a parametry, ale také kulturní a psychologické aspekty dotčené společnosti.

Nakonec by měla být učiněna zmínka o riziku povolání. Ačkoliv toto riziko nespadá pod pole působnosti směrnice Seveso, pro úplnost by zde o něm mělo být stručně pojednáno. Lidé, pracující uvnitř zařízení zpracovávajícího nebezpečnou látku, jsou určitě vystaveni vyšší hladině rizika než veřejnost. Tento rozdíl je dobře známý a přijatelný, jelikož riziko, jemuž čelí pracující, je ve skutečnosti dobrovolné riziko. Jinými slovy, pracující si jsou – nebo by měli být – dobře vědomi rizika, kterým jsou obklopeni, přijali ho a dostávají za něj nějaké pozitivní jako náhradu. Přesto by toto riziko mělo být bezpochyby také zmenšováno. Pracovníci by měli být dobře informováni o specifických nebezpečích na pracovištích. Bezpečnostní opatření a přístroje by měly být všem dostupné a neustále by měla být veškerá činnost zaměřena tak, aby byla neustále snižována hladina vystavení pracovníků riziku. Dobrovolný charakter jejich angažovanosti v problémech kolem rizika nemůže být nikdy důvodem pro jejich vystavení takovým hladinám rizika, které by mohly být „jinak“ nepřijatelné.

1.4 Závěry k pojmu „riziko“

V této kapitole byly uvedeny a diskutovány pojmy rizika. Povaha a složky rizika byly analyzovány, byly definovány míry rizika a vysvětlen jejich výpočet. Bylo popsáno použití křivek izorizika a křivek F - N pro adekvátní prezentaci rizika. Konečně byly diskutovány další kategorie, jako dobrovolné, vnímané a pracovní riziko.

Nepochybně není žádoucím stavem být vystaven riziku. Přesto se zdá, že být pod rizikem je protiváhou technologických výhod a úspěchů naší éry. Je jasné, že situace s nulovým rizikem neexistují, protože dokonce výběr možnosti „vůbec žádný rozvoj“ zavádí přídatná rizika nedostupnosti vhodné léčebné péče, dopravních prostředků, nedostatku elektrické energie atd. Co by mohlo být pravděpodobně vhodným

řešením této záležitosti je to, co Perikles naznačil ve své „Pohřební řeči“ za Athéňany zabitě během prvního roku peloponézske války:

„My Athéňané (jako jednotlivci) činíme naše rozhodnutí o politice a podrobujeme je vhodné diskusi. Nejhorší věc je hrnout se do akce předtím, než byly jak se patří prodebatovány následky. A zde je další bod, ve kterém se lišíme od ostatních lidí. My jsme schopni současně **přijmout riziko** a předem ho **odhadnout**. Ostatní jsou stateční z neznalosti a když přestanou myslet, začnou se bát. Ale člověk, který může být nejopravdověji považován za statečného, je ten, kdo nejlépe zná význam toho, co je v životě sladké a co je strašné, a ten pak vychází nezastrašený, aby se setkal s tím, co přijde.“

(Thukydides „Dějiny peloponézske války“)

2. Úvod k analýzám a hodnocení rizika

Celý logický proces CPQRA, čili kvantitativní analýza rizika chemických procesů, zahrnuje následující kroky:

1. Definice CPQRA
2. Popis analyzovaného systému
3. Identifikace a popis zdrojů rizika
4. Identifikace scénářů nehodových událostí
5. Výběr reprezentativních scénářů nehodových událostí
6. Sestavení modelu CPQRA
7. Odhad následků
8. Odhad pravděpodobností
9. Odhad rizika
10. Zhodnocení a prezentace rizika.

Dále je podáno stručné vysvětlení role jednotlivých kroků:

- **Definice CPQRA** převádí požadavky uživatele analýzy rizika na cíle studie a na její naplánování. Rozsah opatření plynoucí z analýzy rizika a formáty prezentace rizika se vyberou po určení celkového rozsahu činností pro CPQRA. Následuje stanovení hloubky studie založené na specifických definovaných cílech a na dostupných zdrojích. Rovněž jsou uvažovány potřeby pro specifické studie v rámci CPQRA (např. zhodnocení domino efektů, poruchy či selhání výpočetního systému, nedostupnost ochranného systému). Definování CPQRA končí stanovením specifických informačních požadavků studie tak, aby mohla být vytvářena databáze údajů pro analýzu.
- **Popis analyzovaného systému** je kompilace informací o analyzovaném procesu / podniku potřebných pro analýzu rizika. Např. informace o lokalitě, o přírodních poměrech, počasí a podnebí, diagramy procesních toků, diagramy potrubí a instrumentace (P&ID), nákresy rozvržení zařízení, instrukce pro provoz a údržbu, technologická dokumentace, chemie procesu, termofyzikální data. Tyto informace se shromažďují do databáze analýzy pro pozdější použití při vlastní analýze rizika.
- **Identifikace a popis zdrojů rizika** je první rozhodující krok CPQRA. Vynechaný zdroj rizika nemůže být analyzován. Existuje mnoho pomůcek pro určení zdrojů rizika, např. využití: zkušeností, inženýrských klasifikací, kontrolních seznamů, detailních znalostí o procesu, zkušenosti s poruchami zařízení. Existují indexové techniky pro klasifikaci zdrojů rizika, analýza „Co se stane, když ...“, technika identifikace zdrojů rizika a provozuschopnosti (HAZOP), analýza způsobů poruch a jejich účinků (FMEA), předběžná analýza zdrojů rizika (PHA).

- **Identifikace scénářů nehodových událostí** je identifikace a tabulace všech možných nehodových událostí bez ohledu na jejich důležitost nebo iniciační událost. Je to druhý rozhodující krok, protože vynechaná nehodová událost nemůže být analyzována.
- **Výběr reprezentativních scénářů nehodových událostí** je proces, pomocí kterého se podobné nehodové události sdruží do jednoho zástupce, který reprezentuje skupinu podobných nehodových událostí. V tomto kroku se také určí koncové stavy scénářů a rovněž fyzikální projevy koncových stavů scénářů.
- **Sestavení modelu CPQRA** zahrnuje výběr vhodných následkových modelů, metod odhadu frekvencí a pravděpodobností a jejich integraci do souhrnného algoritmu tak, aby byl získán a prezentován odhad rizika studovaného systému.
- **Odhad následků** je metodologie používaná pro stanovení možných škod od jednotlivých nehodových událostí. Jednotlivá nehodová událost (např. prasknutí tanku s hořlavou kapalinou zkapalněnou tlakem) může mít více odlišných koncových stavů (např. exploze neohrazeného oblaku par (UVCE), exploze vroucích rozpínajících se par kapaliny (BLEVE), pomalejší vyhoření). Tyto koncové stavy jsou analyzovány užitím zdrojových a rozptylových modelů a modelů explozí a požárů. Modely účinků jsou následně použity pro stanovení následků na lidech, zvířatech, majetku a životním prostředí. Činnosti jako ukrytí nebo evakuace mohou snížit rozsah následků a proto mohou být zahrnuty do analýzy.
- **Odhad pravděpodobností** je metodologie používaná pro odhad frekvence nebo pravděpodobnosti výskytu nehodové události. Odhady mohou být získány z historických dat o frekvencích poruch nebo z historických dat o frekvencích nehodových událostí. Pomocnými nástroji zde jsou stromy poruch a stromy událostí. Ve většině systémů se musí uvažovat faktory poruch se společnou příčinou (jediný faktor vedoucí k současnému selhání více než jednoho systému, např. výpadek napájení, lidská spolehlivost, externí události).
- **Odhad rizika** kombinuje ocenění následků a pravděpodobností všech koncových stavů scénářů všech vybraných nehodových událostí pro stanovení míry rizika. Rizika všech vybraných nehodových událostí jsou jednotlivě odhadnuta a sumarizována za účelem obdržení výsledné míry rizika analyzovaného provozu. Měly by se vyhodnotit citlivosti a neurčitosti odhadů rizika a důležitosti různých přispívajících nehodových událostí.
- **Zhodnocení a prezentace rizika** je proces, pomocí kterého se využijí výsledky analýzy rizika s cílem učinit rozhodnutí o opatřeních ať už přes relativní srovnání strategií snižování rizika, nebo přes srovnání specifických rizikových cílů.

2.1 Analýza rizika

Všechny lidské činnosti jsou spojeny s nebezpečím a neurčitostmi různého původu. Člověk byl vždy konfrontován s možností, že výsledky jeho činů nebudou totožné s těmi zamýšlenými. Byly učiněny snahy o zavedení řídicích mechanismů za účelem snížení nejistot a zvláště za účelem snížení „pravděpodobnosti“ vzniku koncových stavů nehodových událostí, zvláště pak „rizika“. Technologický rozvoj vždy čelil skutečnosti, že může vyvolat závažné nehody, protože průmyslová výroba, skladování a přeprava zacházejí s velkým množstvím energie a látek v procesu, schopných zničit člověka i jeho prostředí. Proto vyvstala potřeba přiměřeného právního prostředí, v rámci kterého by průmysl, státní správa a občanská společnost hrál důležitou roli při řízení rizik týkajících se průmyslových nehod.

Tyto metodiky jsou zaměřeny na řízení nebezpečí závažných havárií spojených se skladováním a výrobou nebezpečných látek v chemických a petrochemických zařízeních. Řídicí proces je v Evropské Unii regulován tzv. Direktivou Seveso II. V ČR platí zákon č. 353/1999 Sb., který je naší obdobou evropské direktivy.

Abychom zůstali konzistentní s pojmy Direktivy Seveso II, bez toho abychom se pouštěli do „terminologických“ diskusí, je důležité si zopakovat hlavní definice citované v Direktivě, které se týkají pojmů „zdroj rizika“ (hazard), „závažná havárie“ (major accident) a „riziko“ (risk).

- „zdroj rizika“ má znamenat vnitřní vlastnost nebezpečné látky nebo fyzikální situace, která má potenciál k vzniku škody na lidském zdraví, zvířatech, majetku a životním prostředí (pro vymezení definičního záběru je vytvořen seznam látek nebo tříd látek; např. radioaktivní látky nejsou zahrnuty pod zákonem 353/99 Sb.);
- „závažná havárie“ má znamenat výskyt takového závažného úniku, požáru nebo exploze vyplývajícího z nekontrolovaného vývoje během provozu jakéhokoli zařízení spadajícího pod zákon č. 353/1999 Sb., vedoucího k vážné újmě na lidském zdraví a/nebo zvířatech, majetku a životním prostředí, ať už bezprostřední nebo opožděné, uvnitř nebo vně zařízení, a zahrnujícího jednu nebo více nebezpečných látek.
- „riziko“ má znamenat „pravděpodobnost“ specifických (nebezpečných) účinků vyskytujících se během sledovaného časového úseku nebo za specifických okolností.

Jinými slovy, „riziko“ je komplexní funkce:

- zdroje rizika spojeného s určitým technologickým systémem nebo systémem okolního prostředí,
- „pravděpodobnosti“ toho, že zdroj rizika povede k nežádoucí události, a
- zranitelnosti okolního prostředí, na které nežádoucí událost může rozvíjet své následky.

Rizikový management může být definován jako proces ustavený pro řízení rizika. Má se za to, že analýza tohoto rizika je vlastním jádrem procesu rizikového

managementu. A skutečně, až po spolehlivé analýze rizika mohou být stanovena patřičná nápravná opatření.

Analýza rizika zahrnuje:

- *identifikaci zdrojů rizika*, tj. nebezpečných látek (přítomných nebo pravděpodobně se tvořících při plánovaných reakcích nebo vznikajících za abnormálních podmínek) a nebezpečných fyzikálních situací (tlak a teplota, okolnosti zvyšující nebezpečí exploze nebo požáru, atd.) a možných selhání řídicích mechanismů (celistvost systému, projekt proti uplatnění externích událostí, řídicí a bezpečnostní systémy, zásah operátora, atd.). Tato selhání mohou vyústit v události, při kterých se uvolní citované látky a/nebo energie, a mají potenciál poškodit člověka nebo prostředí;
- *ocenění „pravděpodobnosti“*, že takové události nastanou;
- *ocenění možných následků* takových událostí na člověka a prostředí s přihlédnutím na „zranitelnost“ potenciálně zasaženého prostředí. V tomto smyslu je zranitelnost spojena:
 - s citlivostí člověka k toxickým a karcinogenním látkám, k tepelné radiaci a přetlaku,
 - s počtem zasažených lidí a s délkou jejich ohrožení,
 - s citlivostí faktorů prostředí (fauna, flora, voda, půda a situace kolem zařízení) k látkám a energiím, které se mohou potenciálně uvolnit, a
 - s účinností odezvy na situace ohrožení včetně varování a připravenosti veřejnosti.

Operátor zařízení musí v souvislosti se zákonem 353/99 Sb. přijmout politiku prevence závažných havárií a zavést bezpečnostní program.

Tyto systémy by měly být založeny na analýze rizika a nakonec operátora vést:

- k snížení nebezpečnosti zdrojů rizika pomocí snížení obsahu nebezpečných látek a přechodem k vnitřně méně nebezpečným procesům,
- k snížení „pravděpodobnosti“ výskytu nežádoucích událostí zvýšením spolehlivosti zařízení a organizačními opatřeními, a
- k snížení zranitelnosti pomocí havarijní připravenosti a odezvy na nežádoucí události v rámci podniku.

Zákon rovněž předepisuje státním úřadům, aby jednaly tak,

- aby zaručovaly veřejnosti, že operátor splnil své povinnosti (schválení bezpečnostní zprávy, řízení bezpečnostního programu a systémů inspekce) a že riziko je přiměřené existující situaci,
- aby snižovaly zranitelnost vnějšího prostředí zabezpečením vnějšího varování, připravenosti a schopnosti reagovat v nouzových situacích, ale také řízením územního plánování.

Analýza rizika by měla být založena na systematické analýze zdrojů rizika a na tom, co se může pokazit či porouchat (identifikace zdrojů rizika), dále na snaze

o rozvinutí možných nehodových scénářů, které jsou obvykle založeny na systematických přístupech jako jsou stromy událostí a historické zkušenosti (např. databáze nehodových událostí z minulosti). Následky jsou obecně oceňovány pomocí výpočetních nástrojů z důvodu rozsáhlosti jejich fyzikálních projevů (požáry, exploze, koncentrace) a z důvodu odezvy osob a faktorů prostředí na tyto projevy. Pravděpodobnost událostí může být někdy vyjádřena kvalitativním způsobem s využitím expertního úsudku založeného na znalostech odborníků (expertní odhad), výsledcích identifikace zdrojů rizika a historických zkušenostech pomocí kvalitativních termínů jako jsou „nevěrohodné scénáře“, „maximálně věrohodné scénáře“, „referenční scénáře“, atd. Avšak, rovněž v závislosti na legislativním kontextu, se stále víc prosazuje použití důkladných pravděpodobnostních metod pro ocenění pravděpodobnosti událostí – pro kvantifikaci nebezpečí pro člověka vlivem pravděpodobnosti úmrtí nebo zranění nebo nebezpečí pro prostředí vlivem pravděpodobnosti nevratných škod v určitém časovém úseku. To jsou důvody proč se obracet k úplné kvantitativní analýze rizika (QRA).

QRA by mohla být jádrem bezpečnostní strategie a mohla by tedy být užita v bezpečnostní zprávě pro demonstraci adekvátnosti bezpečnostních opatření. Dále by QRA mohla být využita jako základ pro územní plánování a v menším rozsahu pro havarijní plánování. Územní plánování je rozhodovací proces, ve kterém je QRA stále více používána. Proto jsou kvantitativní kritéria založená na rizikových modelech rozvíjena pro podporu formulace závažných rozhodnutí.

2.2 Hodnocení rizika

Hodnocení rizika jako část risk managementu se týká ustavení škály zdrojů rizika a frekvence jejich očekávaného negativního uplatnění. Naším cílem je skrze vyhodnocení rizik ukázat, že byla přijata příslušná opatření ve vztahu ke každému zdroji rizika, nebo jinak, že byly alespoň vedeny úvahy o takových opatřeních. Pokud je riziko vyhodnoceno jako nepřijatelné, následuje uplatnění takových kroků, které učiní riziko přijatelným. Přitom se zaměřujeme na ty zdroje rizika, u kterých jsou opatření nezbytná. Efektivní hodnocení rizika by nám mělo umožnit zaměřit naši pozornost na důležité zdroje rizika s nejpravděpodobnějším negativním uplatněním. To můžeme provádět jen na základě vyhodnocení výsledků analýzy rizika.

Na hodnocení rizika se můžeme dívat z pohledu kvalitativního a kvantitativního. Kvalitativní aspekt hodnocení rizika může být hrubě rozdělen na identifikaci zdrojů rizika, analýzu systému a analýzu následků. Kvantitativní analýza rizika nezbytná pro efektivní risk management je pak dosažena pomocí frekvence událostí a pravděpodobnostní analýzou a hodnocením následků.

- *Kvalitativní aspekty* hodnocení rizika se týkají náležitého popisu zdrojů rizik (z pohledu příčinných a následkových modelů). Klíčovým bodem pro tyto aspekty jsou úplnost, důslednost a správnost.
- *Kvantitativní aspekty* hodnocení rizika se týkají číselného ocenění frekvence negativního uplatnění zdrojů rizika a následků nebezpečných událostí. Klíčovým bodem jsou spolehlivé matematické modely a hodnoty frekvencí a pravděpodobností.

Činnosti spojené s hodnocením rizika se budou významně lišit zařízení od zařízení a zdroj rizika od zdroje rizika. Proto dalším klíčovým bodem bude příslušný rozsah hodnocení rizika a v tomto kontextu také důsledná aplikace vhodných metod pro každý prvek hodnocení rizika.

2.3 Neurčitosti kvantitativního ocenění rizika

Pracovníci přijímající rozhodnutí na základě velikosti rizika jsou postaveni před rozdílné přístupy k oceňování a prezentaci specifického rizika. Proto je také obtížné srovnávat číselné výsledky studií různých autorů. Navíc obsáhlá vyšetřování neurčitostí spojených s výsledky rizikových studií zatím chybí. Nezdá se, že by tím ale vznikaly nějaké překážky pro širší užití QRA.

Výsledky srovnávacích cvičení různých autorských týmů postavených před stejný úkol ukazují, že nejenom předpoklady užívané pro identifikaci zdrojů rizika a výběr frekvencí / pravděpodobností poruch přispívají k všeobecně vysokému rozptylu výsledků mezi jednotlivými týmy, ale také způsoby modelování úniků, rozptylů a toxických účinků (čili následková část analýzy rizika) mají rovněž významný vliv na celkový rozptyl výsledků. Samozřejmě, že hlavním výsledkem cvičení nebylo porovnávat jednotlivé výsledky, ale najít příčiny tak značných rozdílů. A to se zdá být jen počátečním bodem ve snaze ustálit procedury v QRA.

3. Analýza rizika

3.1 Techniky identifikace zdrojů rizika

Účelem této kapitoly je podat přehled technik použitelných pro identifikaci zdrojů rizika jakožto první základní podmínky úspěšné analýzy rizika.

Zdroj rizika je pro tyto účely definován jako „vnitřní vlastnost nebezpečné látky“ nebo „fyzikální situace s potenciálem pro vznik škody na lidském zdraví, na zvířatech, majetku nebo životního prostředí“.

S identifikovanými zdroji rizik se většinou dál pracuje. Následuje obvykle ocenění závažnosti zdrojů rizika a výběr tzv. závažných zdrojů rizika. Teprve tyto závažné zdroje rizika se dál podrobněji analyzují.

Prvním krokem vlastní analýzy rizika a pozdějšího hodnocení rizika je identifikace zdrojů rizika. Pokud by nebyl některý z vážnějších zdrojů rizika vůbec objeven, pak by celkové cíle v rámci risk managementu nemohly být uspokojivě dosaženy. Identifikace by měla proběhnout nejen pro tzv. normální stavy, ale rovněž pro stavy, které mohou nastat za rozumně očekávaných okolností, tj. pro mimořádné stavy jako jsou najíždění, odstávky, testování, poruchy, havárie, likvidace, apod.

Při diskusi o zdrojích rizika je třeba mít na paměti spodní hranici následků, pro kterou je zdroj rizika ještě zajímavý z hlediska pozdější podrobnější analýzy. V zákoně č. 353/1999 Sb. se hovoří o tzv. závažných haváriích. Tyto závažné havárie mohou nastat na závažných zdrojích rizika. Pokud máme stanovenou takovouto spodní hranici, pak nemusí být obtížné sestavit úplný seznam nebezpečného inventáře, který může přispívat k takovým závažným nehodám. Povaha závažných zdrojů rizika může být za normálních okolností oceněna pomocí vlastností látek jako jsou hořlavost, toxicita a explozivnost a pomocí takových rysů zařízení jako jsou skladované zásoby, reakční zóny (potenciální a plánované), materiálové toky a externí události.

Avšak existují také složitější aspekty identifikace zdrojů rizika. Zahrnují identifikaci méně zřejmých scénářů, a to:

- při nichž mohou být nebezpečné látky uvolněny;
- scénáře, při kterých se bude nebezpečná vlastnost látky zvětšovat;
- scénáře, při kterých se nebezpečná látka normálně nevyskytuje, ale může být vytvořena;
- scénáře, při kterých by mohl být únik menšího množství nebezpečné látky nebo únik méně nebezpečné látky považován za závažnou nehodu.

Následuje stručný popis nejčastěji používaných metod pro identifikaci zdrojů rizika:

- Bezpečnostní prohlídka (Safety Review - SR),
- Analýza kontrolním seznamem (Checklist Analysis - CA),

- Relativní klasifikace (Relative ranking - RR),
- Předběžná analýza zdrojů rizika (Preliminary hazard analysis - PHA),
- Analýza „Co se stane, když ...“ („What if?“ – W-I),
- Studie nebezpečí a provozuschopnosti (Hazard and Operability Analysis - HAZOP),
- Analýza způsobů a důsledků poruch (Failure Mode and Effects Analysis - FMEA),
- Analýza stromu poruch (poruchových stavů) (Fault Tree Analysis - FTA),
- Analýza stromu událostí (Event Tree Analysis - ETA),
- Analýza příčin a následků (Cause-Consequence Analysis - CCA),
- Analýza lidské spolehlivosti (Human Reliability Analysis - HRA).

Nejlepších výsledků však lze dosáhnout kombinací několika postupů, i když chybí návody na to, které z nich vybrat a zkombinovat v konkrétním případě. Americká příručka „Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis“ doporučuje strukturovanou metodu jako je HAZOP nebo FMEA, a to jako doplněk k obecnějším metodám (jako je „expertní prohlídka“). Příručka uvádí, že obecnějším přístupem budou identifikovány „frekventovanější nehodové události a náhodný výběr těch méně častých událostí“. Kombinace obou přístupů zajistí nalezení kompletnějšího seznamu zdrojů rizika a s nimi spojených příslušných scénářů. Je rozumné očekávat, že úsilí vynaložené na identifikaci zdrojů rizika by mělo být určeno důležitostí těchto zdrojů rizika, jež budou odhaleny, což ovšem není známo předem. Určitý subjektivní přístup založený na zkušenosti a úsudku je do jisté míry nevyhnutelný. Další dimenzí pro metody identifikace zdrojů rizika je úroveň detailů v popisu analyzovaného provozu, na které je technika aplikována.

Výběr patřičného souboru technik bude úzce souviset se složitostí a novostí prováděných provozních operací. Pro určité nepřiliš složité nebo nové provozy (co se týče skladování nebo provozování nebezpečných materiálů) bude dostatečný jednoduchý přístup. Naopak u provozů, kde je významné zpracovávání nebezpečných látek, bude přirozené použití hlubších technik, jako je HAZOP, které mohou být doplněny speciální technikou vztahující se k jednotlivým provozním operacím nebo zařízeními.

Tam, kde se budou uplatňovat novinky, bude zapotřebí dodatečných technik. Novinky se mohou týkat fáze návrhu projektu, technologie, jevů použitých při vylepšení, provozu, nebo jakéhokoliv jiného aspektu daného zařízení. Významnost novinky nemusí být na první pohled zřejmá. Např. možné zdroje rizika plynoucí z použití jakéhokoli nového konstrukčního materiálu (a nemusí být nijak neobvyklý) ve vztahu k jinak již dlouho provozovanému zařízení musí být velmi důkladně uváženy. Při použití povrchního přístupu k identifikaci zdrojů rizika by měla následovat rozsáhlá kontrola potvrzující, že dané zařízení není ani složité ani nemá novinky ve srovnání s podobnými zařízeními. Ve všech případech bude užitečný a použitelný kontrolní seznam. Obecné kontrolní seznamy se často rozšiřují o specifické informace toho kterého odvětví průmyslu. Další možnost identifikace

zdrojů rizika leží ve studiu předešlých výskytů nežádoucích událostí a skoronehod. Proto bude identifikace zdrojů rizika zahrnovat i přehled nehod a skoronehod, které se vyskytly v minulosti.

Úspěšná aplikace technik identifikace zdrojů rizika vyžaduje:

- jasnou definici rozsahu práce, která má být provedena,
- jasnou specifikaci technik, které mají být použity,
- dodání úplných, správných a přiměřených informací o zařízení,
- vykonání práce zručným a zkušeným týmem za vhodných podmínek, a
- provedení výstupů tak, aby se daly použít při dalších fázích analýzy rizika.

Následující tabulka 1 uvádí přehled technik identifikace zdrojů rizika a jejich použití v jednotlivých etapách života zařízení, tabulka 2 souhrnně sumarizuje techniky identifikace zdrojů rizika. Uvedená varianta platí pro případy, kdy uvažovaná zařízení neprošla ve fázi přípravy projektu žádnou z doporučených a obecně používaných technik identifikace zdrojů rizika tak, jak jsou uvedeny v této tabulce. Tento případ platí pro většinu tuzemských chemických technologií.

Tabulka 1: Přehled technik identifikace zdrojů rizika a jejich použití v jednotlivých etapách života zařízení

	SR	CL	RR	PHA	W-I	W-I/CL	HAZOP	FMEA	FTA	ETA	CCA	HRA
Výzkum a vývoj	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Koncepční návrh	○	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Poloprovoz	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Detailní inženýring	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Konstrukce/ Najíždění	●	●	○	○	●	●	○	○	○	○	○	●
Běžný provoz	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Rozšíření/ Modifikace	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Vyšetřování událostí	○	○	○	○	●	○	●	●	●	●	●	●
Vyřazení z provozu	●	●	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○

● Metoda běžně používaná,

○ Metoda používaná buď výjimečně, nebo nevhodná metoda

Tabulka 2: *Techniky identifikace zdrojů rizika*

Zkratka	Anglický název	Český název
SR	Safety Review	Bezpečnostní prohlídka
CL	Checklist Analysis	Analýza kontrolním seznamem
RR	Relative Ranking	Relativní klasifikace
PHA	Preliminary Hazard Analysis	Předběžná analýza zdrojů rizika
W-I	What-If	„Co se stane, když ...“
W-I/CL	What-If/Checklist	„Co se stane, když ...“ / kontrolní seznam
HAZOP	Hazard and Operability Analysis	Studie nebezpečí a provozuschopnosti
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis	Analýza způsobů a důsledků poruch
FTA	Fault Tree Analysis	Analýza stromu poruch (poruchových stavů)
ETA	Event Tree Analysis	Analýza stromu událostí
CCA	Cause-Consequence Analysis	Analýza příčin a následků
HRA	Human Reliability Analysis	Analýza lidské spolehlivosti

Stručný popis technik užívaných pro identifikaci zdrojů rizika

Účelem této podkapitoly je podat stručný přehled nejčastěji používaných technik a shrnout jejich důležité aspekty. Ačkoli je všem technikám věnována stejná pozornost, ne všechny se hodí na jednotlivé případy identifikace zdrojů rizika. Několik z nich se lépe hodí na obecnější méně podrobné zmapování zdrojů rizika velkých podniků nebo složitějších procesů – obvykle se užívají na ranější stadia vývoje procesu (např. Bezpečnostní prohlídka, Analýza kontrolním seznamem, Relativní klasifikace, Předběžná analýza zdrojů rizika, Analýza „Co se stane, když ...“). Jejich použití před kolaudací výrobního procesu může významně ušetřit prostředky pro pozdější zvyšování bezpečnosti.

Ostatní dále zmíněné techniky (např. „What if?“ / Kontrolní seznam, HAZOP, FMEA) jsou vynikající volbou pro uskutečnění detailních analýz širokého spektra zdrojů rizik jak během projektové, tak také během rutinní provozní fáze procesu. Tyto přístupy se rovněž používají pro identifikaci nebezpečných situací, které potom mohou být studovány podrobnějšími analytickými metodami.

Některé z technik identifikace zdrojů rizika by měly být uplatňovány ve zvláštních případech vyžadujících podrobnou analýzu jedné nebo více uvažovaných nebezpečných situací. Tyto techniky (např. Analýza stromu poruch, Analýza stromu událostí, Analýza příčin a následků, Analýza lidské spolehlivosti) vyžadují speciálně trénované a zručné pracovníky. Analytici jsou varováni používat tyto metody na úzce zaměřené problémy, protože vyžadují výrazně více času a úsilí než běžně používané přístupy.

Pro každou techniku je uveden *popis, účel, typy výsledků a požadavky na zdroje*. Popis, účel a typy výsledků podtrhují, co může zadavatel od technik očekávat. Tato informace je podstatná pro porozumění významnosti faktorů, které mají vliv na výběr příslušné techniky. Část věnovaná požadavkům na zdroje poskytuje některé základní informace o dovednostech, materiálech a úsilí pro provedení dané techniky. Nicméně odhad času a úsilí je ovlivňován řadou faktorů, z nichž některé nejsou kvantifikovatelné.

Jeden z významných faktorů je složitost a velikost problému. Aby byl dán analytikovi určitý náhled o potřebném úsilí pro vykonání studie identifikace zdrojů rizika, jsou odhady založeny na dvou typech (velikostech) analyzovaných systémů: jednoduchý / malý systém a složitý / velký proces.

- *jednoduchý / malý systém* – např. systém chemického skladování včetně napouštění a vypouštění sestávající z železniční vykládací stanice, přepravního potrubí, čerpadel, skladovacího tanku a tlakově řízených parních vratných tras.
- *složitý / velký proces* – např. proces s chemickou reakcí sestávající z napájecího systému, reakční části, části separace produktu a regenerace, systému nouzového vypouštění a z připojených potrubí a řídicích systémů. Takový proces může obsahovat 10 až 20 hlavních nádob, včetně reaktorů, kolon a zásobníků.

Tyto dva příklady ilustrují hrubý odhad časové náročnosti pro každého účastníka studie identifikace zdrojů rizika. Pro každou techniku je provedení studie rozděleno do tří základních fází: *příprava, vyhodnocení a dokumentace*. Příprava zahrnuje sběr informací, definování rozsahu analýzy a organizaci počátečních schůzek. Vyhodnocení zahrnuje vlastní analytickou činnost spojenou s vybranou technikou. Dokumentace nezahrnuje pouze záznam významných výsledků z týmových schůzek, ale i vypracování závěrečné zprávy obsahující stručný popis procesu, diskusi důležitých výsledků, tabulky logických modelů (pokud jsou) a krátké vysvětlení významu prováděných bodů.

Odhady časové náročnosti v tabulkách u každé techniky jsou jen orientační. Existuje řada faktorů, které ovlivňují analytikovu práci. Skutečné doby potřebné na identifikaci zdrojů rizika mohou být mnohem delší (nebo o něco kratší) než hodnoty uváděné v tabulkách.

3.1.1 Bezpečnostní prohlídka (SR)

Popis

Bezpečnostní prohlídka byla nepochybně první technika použita kdy pro identifikaci zdrojů rizika. Může být aplikována v jakékoli fázi vývoje procesu. Pro existující zařízení se obvykle skládá z inspekčních pochůzek, které se mohou lišit od informačních, rutinních vizuálních až po přesná metodická týmová vyšetřování trávající několik týdnů. U procesu, který již byl navržen, by mohl projektový tým během schůzek např. zkontrolovat sérii náskizů.

Bezpečnostní prohlídky jsou určeny pro identifikaci podmínek nebo provozních činností v podniku, které by mohly vést k nehodě a následně ke zranění, významné ztrátě na majetku nebo na životním prostředí. Typická bezpečnostní prohlídka zahrnuje rozhovory s mnoha lidmi podniku: operátory, údržbáři, inženýry, manažery, bezpečnostními pracovníky a jinými, v závislosti na organizační struktuře. Na bezpečnostní prohlídky by mělo být nahlíženo spíš jako na společné úsilí ke zlepšení všeobecné bezpečnosti podniku než jako na narušování normálních činností nebo trest za nalezené nedostatky. Spolupráce je základem.

Bezpečnostní prohlídka se v první řadě soustřeďuje na závažné rizikové situace a doplňuje ostatní bezpečnostně procesní činnosti (jako je rutinní vizuální kontrola) a ostatní techniky identifikace zdrojů rizika (jako jsou Analýza kontrolním seznamem a Analýza „Co se stane, když ...“).

Na konci bezpečnostní prohlídky analytik navrhuje a doporučuje potřebná opatření a jejich opodstatnění, doporučuje odpovědnosti a termíny splnění. Může být naplánováno vyhodnocení nebo opakovaná inspekce k ověření, že nápravná opatření byla správně splněna.

Účel

Bezpečnostní prohlídky se používají pro ověření, že podnik a jeho provozní a údržbářské postupy odpovídají záměrům a normám. Bezpečnostní prohlídka:

- udržuje provozní personál v ostražitosti před procesními nebezpečími,
- posuzuje provozní činnosti pro nezbytné revize,
- vyhledává a identifikuje změny v zařízení a procesech, které mohou mít za následek vznik nových zdrojů rizika,
- provádí hodnocení projektové základny řídicích a bezpečnostních systémů,
- přezkoumává užití nových technologií vzhledem k existujícím nebezpečím,
- přezkoumává úměrnost údržbářských a bezpečnostních inspekcí.

Technika bezpečnostní prohlídky se obvykle uplatňuje před naještěním procesu.

Typy výsledků

Výsledky bezpečnostní prohlídky jsou kvalitativní popisy možných bezpečnostních problémů a podnětů k jejich nápravě. Zpráva inspekčního týmu zahrnuje odchylky od projektových záměrů stejně jako od schválených postupů a seznam nově objevených bezpečnostních problémů. Odpovědnost za uplatnění nápravných opatření zůstává na podnikovém managementu.

Požadavky na zdroje

Pro vytvoření obsažné studie potřebují mít členové týmu přístup k použitelným kódům a standardům; k předešlým bezpečnostním studiím; k podrobnému popisu procesu (P&ID, procesní toky); k procedurám pro najíždění, normální provoz,

odstávku a nouzové situace; k zprávám o zraněních; k zprávám o nehodových událostech; k zprávám o údržbě (revize přístrojů, testy pojistných ventilů, inspekce

tlakových nádob) a k charakteristikám procesních materiálů (toxicita, informace o reaktivitě apod.).

Personál vykonávající bezpečnostní prohlídku musí být velmi dobře obeznámen s bezpečnostními standardy a postupy. Speciální technické dovednosti a zkušenosti jsou vítány pro vyhodnocování přístrojů, elektrických systémů, tlakových nádob, procesních materiálů a chemismu, atd. Následující tabulka uvádí odhady doby potřebné pro každého člena týmu k provedení bezpečnostní prohlídky.

Rozsah	Příprava *	Vyhodnocení	Dokumentace *
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	2 až 4 hod	6 až 12 hod	4 až 8 hod
<i>Složitý / velký proces</i>	1 až 3 dny	3 až 5 dnů	3 až 6 dnů

* v první řadě vedoucí týmu

3.1.2 Analýza kontrolním seznamem (CL)

Analýza kontrolním seznamem používá psaný seznam položek nebo kroků k ověření stavu systému. Tradiční kontrolní seznamy se značně liší, co se týče úrovně detailů, a jsou široce využívány k označení splnění standardů a zvyklostí. Analýza kontrolním seznamem se používá jednoduše a může být aplikována v kterémkoli stadiu života procesu. Kontrolní seznamy mohou být použity k detailnímu seznámení nezkušeného personálu s procesem pomocí srovnávání procesních vlastností s různými požadavky kontrolního seznamu. Kontrolní seznamy rovněž zajišťují společný základ pro posouzení analytikova hodnocení procesu nebo provozu managementem.

Podrobný kontrolní seznam poskytuje základ pro standardní zhodnocení procesních zdrojů rizika. Může být rozsáhlý do té míry, aby odpovídal specifické situaci, ale měl by být aplikován svědomitě, aby byly odhaleny problémy vyžadující pozdější podrobnou analýzu. Obecné kontrolní seznamy jsou často kombinovány s jinou technikou identifikace zdrojů rizika. Jsou limitovány zkušenostmi jejich autora; proto by měly být vytvořeny autory s rozličným technickým vzděláním, kteří mají rozsáhlé zkušenosti s podobnými systémy, jako je ten analyzovaný. Často mají kontrolní seznamy strukturu informací podle příslušných běžných kódů, standardů a předpisů či pravidel. Kontrolní seznamy by měly být živé dokumenty a měly by být pravidelně kontrolovány a aktualizovány.

Řada organizací používá standardní kontrolní seznamy pro řízení vývoje projektu – od počátečního projektu až po likvidaci. Vyplněný kontrolní seznam musí být často schválen různými členy personálu a manažerů před tím, než se projekt může přesunout z jedné etapy do další. Tímto způsobem působí jako komunikační prostředek i jako forma řízení.

Účel

Tradiční kontrolní seznamy slouží především jako pojistka toho, že se organizace shodují se standardní praxí. V některých případech analytikové používají obecnější

kontrolní seznam v kombinaci s jinou metodou odhalování zdrojů rizika, aby nedošlo k opomenutí některého z nich.

Typy výsledků

Analytik pro vytvoření tradičního kontrolního seznamu definuje standardní projektové nebo provozní postupy, pak je používá k vytvoření seznamu otázek založených na nedostacích nebo rozdílech. Vyplněný kontrolní seznam obsahuje na dané otázky odpovědi typu „ano“, „ne“, „neaplikovatelný“ nebo „potřeba více informací“. Kvalitativní výsledky se liší podle jednotlivé situace, ale obecně vedou k rozhodnutí typu „ano“ nebo „ne“ podle shody se standardními postupy.

Požadavky na zdroje

Abychom správně provedli tuto techniku, potřebujeme patřičný kontrolní seznam, inženýrské projektové postupy a provozní manuál a pro vyplnění seznamu někoho, kdo má základní znalosti o revidovaném provozu. Pokud je patřičný kontrolní seznam dostupný z předchozí činnosti, analytik by měl být schopen jej použít. Pokud patřičný kontrolní seznam dostupný není, pak jedna osoba (někdy i více lidí) musí připravit kontrolní seznam a provést vyhodnocení. Zkušený manažer nebo vedoucí inženýr by měl zkontrolovat výsledky analýzy kontrolním seznamem a nasměrovat další postup.

Analýza kontrolním seznamem je proměnlivá metoda. Typ ohodnocení takto získaný se může měnit: technika může být rychle použita pro jednoduchá vyhodnocení nebo pro nákladnější podrobnější výsledky. Je to úsporný způsob jak identifikovat tradičně rozpoznatelné zdroje rizika. Následující tabulka uvádí odhady doby potřebné k provedení analýzy kontrolním seznamem.

Rozsah	Příprava	Vyhodnocení	Dokumentace
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	2 až 4 hod	4 až 8 hod	4 až 8 hod
<i>Složitý / velký proces</i>	1 až 3 dny	3 až 5 dnů	2 až 4 dny

3.1.3 Relativní klasifikace (RR)

Popis

Relativní klasifikace je ve skutečnosti spíše analytická strategie než jednoduchá dobře definovaná analytická metoda. Tato strategie umožňuje analytikům porovnat vlastnosti několika procesů nebo činností a určit tak, zda tyto procesy nebo činnosti mají natolik nebezpečné charakteristiky, že to analytiku opravňuje k další podrobnější studii. Relativní klasifikace může být použita rovněž pro srovnání několika návrhů

umístění procesu nebo zařízení a zajistit tak informace o tom, která z alternativ je nejlepší nebo méně nebezpečná. Tato porovnání jsou založena na číselných srovnáních, která reprezentují relativní úroveň významnosti každého zdroje rizika. Studie relativní klasifikace by měly být normálně uskutečněny v časném stadiu života procesu před konečným sestavením detailního projektu nebo brzy po zavedení

programu analýz zdrojů rizika v podniku. Nicméně, relativní klasifikace může být také aplikována na existující proces pro vypíchnutí zdrojů rizika z různých provozních aspektů.

Existuje několik široce používaných přesných metod relativní klasifikace. Např. Dow Fire and Explosion Index (F&EI) již existuje mnoho let – nyní je již sedmá verze publikovaná AIChE. Tento Dow F&EI vyhodnocuje existenci a závažnost zdrojů rizika z požárního a explozivního hlediska v mnoha velkých oblastech procesního zařízení. Analytik si rozdělí proces nebo činnost do jednotlivých procesních jednotek a přidělí indexy založené na materiálových, fyzikálních a chemických charakteristikách; procesních podmínkách; uspořádání podniku a umístění zařízení; a na dalších faktorech. Různé faktory jsou kombinovány za vzniku F&EI skóre, které může být porovnáno se skóre z dalších analyzovaných procesních jednotek. Dow F&EI může být také použit pro získání přehledu o nutnosti vylepšení obecných bezpečnostních systémů (např. požární ochrany).

Jinou méně známou metodou dokumentovanou v USA je ICI Mond Index. Tento index je používán pro vyhodnocení chemických a toxicitních zdrojů rizika, stejně jako zdrojů rizika nebezpečných z požárního a explozivního hlediska.

Mnoho organizací si vytvořilo svou vlastní speciální indexaci pro seřazení zdrojů rizika přidružených jejich podniku, procesům a činností. Např. chemická společnost Dow má několik indexů, které používá pro vyhodnocování a řízení rizik svých procesů a činností. Jeden z nich se nazývá index chemického ohrožení (Chemical Exposure Index – CEI). Index CEI se používá pro řazení relativního akutního zdravotního nebezpečí spojeného s potenciálními chemickými úniky. Index CEI užívá jednoduchou formulaci pro zařazení jakékoliv toxické chemikálie založenou na 5 faktorech: (1) míra toxicity, (2) množství odpařitelného materiálu schopného úniku, (3) vzdálenost ke každé uvažované ploše, (4) molekulová hmotnost vyhodnocované látky a (5) procesní proměnné, které mohou ovlivnit podmínky úniku, jako jsou teplota, tlak, reaktivita atd.

Účel

Hlavní účel metod relativní klasifikace je stanovení procesních úseků nebo činností, které jsou nejvýznamnější s ohledem na dotčené zdroje rizika v dané studii. Teorie stojící za metodami relativní klasifikace má své kořeny ve třech základních otázkách používaných v rizikových analýzách: (1) Co se může porouchat?, (2) jak často to může nastat? a (3) Jaké mohou být následky? Filozofie v přístupech relativní klasifikace je ve stanovení relativní důležitosti procesů a činností z hlediska bezpečnosti ještě před tím, než se provedou další dodatečná a nákladnější hodnocení zdrojů rizika nebo analýzy rizika.

Aby bylo možno určit, která oblast představuje větší relativní nebezpečí nebo riziko, jsou srovnány přibližné vztahy procesních charakteristik. Následně mohou být další studie hodnocení zdrojů rizika věnovány uvažovaným významnějším oblastem.

Typy výsledků

Výsledkem všech metod relativní klasifikace by měl být seřazený seznam procesů, zařízení, provozních činností. Tento seznam může mít několik vrstev reprezentujících úroveň důležitosti. Další výsledky, jako jsou indexy, skóre, stupnice faktorů, grafy apod., záleží na druhu použité techniky relativní klasifikace. Je důležité poznamenat,

že zatímco se všechny tyto techniky pokouší určitým způsobem odpovědět na tři otázky rizikové analýzy, analytik by neměl považovat výsledky takových studií za příliš rozhodující ohodnocení rizik spojených s daným procesem nebo činností. Technika relativní klasifikace obvykle není založena na specifických nehodových scénářích, takže se sama nemůže podílet na formulaci specifických bezpečnostních doporučení.

Požadavky na zdroje

Požadované informace pro studii relativní klasifikace záleží na zvláštních potřebách každé z nich. Obecně bude studie relativní klasifikace vyžadovat základní fyzikální a chemická data sloučenin nacházejících se v procesu nebo při činnostech. Tyto studie obvykle nepožadují detailní nákresy schémat; nicméně informace o maximálních kapacitách látek, procesních podmínkách podniku a geografických umístěních skladů látek jsou zpravidla potřebné.

Studie relativní klasifikace může být provedena jedním analytikem. Několik analytiků může pracovat společně na velkém, složitém procesu, pokud mají zkušenosti s technikou relativní klasifikace a mají přístup ke všem vstupním datům potřebným pro studii. Pokud pracuje více analytiků na stejné studii, je důležité, aby byli „kalibrováni“ stejným způsobem, aby jejich úsudek byl shodný.

Doba a cena provedení studie relativní klasifikace záleží na vybrané technice, na požadavcích na vstupní data a na počtu hodnocených procesů a zdrojů rizika. Následující tabulka uvádí odhady doby potřebné k provedení studie technikou relativní klasifikace.

Rozsah	Příprava	Vyhodnocení	Dokumentace
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	2 až 4 hod	4 až 8 hod	4 až 8 hod
<i>Složitý / velký proces</i>	1 až 3 dny	3 až 5 dnů	3 až 5 dnů

3.1.4 Předběžná analýza zdrojů rizika (PHA)

Popis

Předběžná analýza zdrojů rizika (PHA) je technika odvozená z požadavků bezpečnostního programu vojenského standardního systému z USA. PHA se obecným způsobem soustřeďuje na nebezpečné látky a hlavní procesy v podniku. Je nejčastěji vedena časně při vývoji procesu, kdy je ještě málo informací o navrhovaných detailech nebo provozních činnostech, a je často předchůdce další

analýzy zdrojů rizika. Díky svému vojenskému původu je technika PHA někdy užívána k prohlídce procesních oblastí s možností nekontrolovatelného uvolnění energie.

PHA formuluje seznam zdrojů rizika a všeobecně nebezpečných situací uvažováním následujících procesních charakteristik:

- suroviny, meziprodukty, konečné produkty; jejich reaktivita,
- zařízení procesu a jeho umístění,
- provozní okolí,
- provozní činnosti (testování, údržba, apod.),
- rozhraní mezi komponentami systému.

Jeden nebo více analytiků zhodnotí významnost procesních zdrojů rizika a seřadí podle naléhavosti každou jednotlivou situaci. Pořadí v seznamu je užíváno k upřednostňování jakýchkoli doporučení plynoucích z analýzy pro zlepšení bezpečnosti.

Účel

PHA je často užívána pro vyhodnocení zdrojů rizika v časném stadiu života procesu. PHA je obecně aplikována během koncepčního návrhu procesu a může být velmi užitečná při výběru umístění procesního zařízení. Je často užívána jako nástroj pro revizi projektu procesu před vývojem procesního P&ID.

Zatímco je technika PHA normálně užívána v přípravné fázi vývoje procesu pro případy, kdy existují malé nebo žádné zkušenosti s potenciálními bezpečnostními problémy, může být PHA rovněž užitečná při analýze velkých existujících zařízení nebo při výběru zdrojů rizika podle závažnosti pro případ, kdy okolnosti brání použití rozsáhlejší techniky.

Typy výsledků

PHA umožňuje kvalitativní popis zdrojů rizika vztažených k projektu procesu. PHA rovněž poskytuje kvalitativní seřazení nebezpečných situací, což může být použito k upřednostnění doporučení pro snížení nebo omezení nebezpečí v následných fázích života procesu.

Požadavky na zdroje

Použití PHA vyžaduje, aby analytici měli přístup k projektovým kritériím procesu, údajům o zařízeních, údajům o látkách a materiálech a dalším druhům informací. PHA může být provedena jedním nebo dvěma analytiky, kteří znají základy bezpečnosti procesu. Méně zkušený personál může také provést PHA, ale studie pak nemusí být tak vyčerpávající nebo tak detailní, protože tento přístup vyžaduje na analytických značné množství úsudku. Následující tabulka uvádí odhady doby potřebné k provedení studie zdrojů rizika technikou PHA.

Rozsah	Příprava *	Vyhodnocení	Dokumentace *
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	4 až 8 hod	1 až 3 dny	1 až 2 dny
<i>Složitý / velký proces</i>	1 až 3 dny	4 až 7 dnů	4 až 7 dnů

* pouze vedoucí týmu

3.1.5 Analýza „Co se stane, když ...“ (W-I)

Popis

Technika „Co se stane, když ...“ je přístup spontánní diskuse a hledání nápadů, ve které skupina zkušených lidí dobře obeznámených s procesem klade otázky nebo vyslovuje úvahy o možných nežádoucích událostech. Není to vnitřně strukturovaná technika jako některé jiné (např. HAZOP a FMEA). Namísto toho po analytikovi požaduje, aby přizpůsobil základní koncept určitému účelu. Bylo publikováno velmi málo informací o metodě „Co se stane, když ...“ a jejím použití. Přesto je v průmyslu často používána v téměř každém stádiu života procesu a má dobrý zvuk mezi ostatními technikami.

Analýza „Co se stane, když ...“ povzbuzuje tým hledající zdroje rizika v přemýšlení nad otázkami, které začínají na „Co se stane, když ...“. Může však být vyslovena jakákoliv úvaha, i když to není otázka, např.:

- Uvažuji o možném dodání nesprávné látky.
- Co se stane, když se čerpadlo A zastaví při najíždění?
- Co se stane, když operátor otevře ventil A místo B?

Zapisovatel obvykle zaznamenává všechny otázky. Potom jsou otázky rozděleny podle jednotlivých zkoumaných oblastí (obvykle se vztahujících k příslušným následkům), jako jsou elektrická bezpečnost, požární ochrana nebo bezpečnost personálu. Každá oblast je následně zkoumána jedním nebo více odborníky. Otázky jsou formulovány na základě zkušeností a aplikovány na existující nákresy a procesní popisy; u provozovaného procesu mohou vyšetřování zahrnovat i rozhovory s personálem, který není zastoupen v týmu pro hodnocení zdrojů rizika. Není stanoven žádný pevný vzor nebo pořadí pro takové otázky, ledaže by vedoucí týmu provedl logické rozdělení procesu do funkčních částí. Otázky se mohou týkat jakýchkoli zvláštních podmínek vztahujících se k procesu a nejen selhání komponent nebo odchylek procesu.

Účel

Účelem analýzy „Co se stane, když ...“ je identifikovat zdroje rizika, nebezpečné situace nebo určité nehodové události, které mohou způsobit nežádoucí následky. Zkušený tým lidí odhaluje možné nehodové situace, jejich následky a existující bezpečnostní opatření, poté navrhuje alternativy na snížení rizika. Metoda může zahrnovat vyšetřování možných odchylek od projektu, stavby, modifikace nebo

provozního záměru. Vyžaduje základní porozumění účelu procesu a schopnost rozumově kombinovat možné odchylky od zamýšleného účelu, které mohou vést k nehodě. Pokud je personál zkušený, je to účinná procedura, jinak budou výsledky pravděpodobně neúplné.

Typy výsledků

Ve své nejjednodušší formě se při použití techniky „Co se stane, když ...“ vytváří seznam otázek a odpovědí o procesu. Může také vést k tabulkovému seznamu nebezpečných situací (bez nějakého řazení nebo kvantitativních důsledků odhalených možných nehodových scénářů), k seznamu jejich ochrany proti následkům a k seznamu možných návrhů pro snížení rizika.

Požadavky na zdroje

Protože analýza „Co se stane, když ...“ je tak přizpůsobivá, může být prováděna s využitím libovolných informací a znalostí o procesu v jakékoliv fázi jeho života. K provedení analýzy jsou pro každou oblast procesu přiděleni dva až tři lidé, ale větší tým je lepší. Větší skupina se hodí pro složitý proces. Pokud si proces rozdělíme na menší části, pak lze menší skupinu po delší dobu využít pro celý proces.

Doba a náklady pro analýzu „Co se stane, když ...“ jsou úměrné složitosti procesu a počtu analyzovaných oblastí. Následující tabulka uvádí odhady doby potřebné k provedení vyhodnocení zdrojů rizika technikou analýzy „Co se stane, když ...“.

Rozsah	Příprava *	Vyhodnocení	Dokumentace *
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	4 až 8 hod	4 až 8 hod	1 až 2 dny
<i>Složitý / velký proces</i>	1 až 3 dny	3 až 5 dnů	1 až 3 týdny

* zejména vedoucí týmu a zapisovatel

3.1.6 Studie nebezpečí a provozuschopnosti (studie HAZOP)

Popis

Studie nebezpečí a provozuschopnosti (HAZOP) je technika vyvinutá pro identifikaci a vyhodnocení zdrojů rizika v procesním podniku a pro identifikaci provozních problémů (a nejen nebezpečných), které by mohly snižovat schopnost procesu dosáhnout plánované kapacity. Ačkoliv byla původně vyvinuta pro předvídaní nebezpečí a provozních problémů pro technologii, se kterou měl podnik malé zkušenosti, byla rovněž shledána efektivní pro použití na již existující procesy. Její použití vyžaduje podrobné zdroje informací týkající se projektu a provozu analyzovaného procesu. Proto je nejčastěji užívána pro analýzy procesů během nebo po detailní projektové fázi. V praxi chemického průmyslu existuje několik variant techniky HAZOP. Uvedená technika je standardizována jako **ČSN IEC 61882 Studie nebezpečí a provozuschopnosti (studie HAZOP)**. Při její aplikaci se doporučuje užívat terminologii uvedenou v normě.

Při analýze HAZOP používá multidisciplinární tým tvořivý systematický přístup pro odhalení problémů se zdroji rizika a provozuschopností, které vyplývají z odchylek od procesního projektu či záměru a které by mohly vést k nežádoucím následkům. Zkušený vedoucí systematicky provádí tým přes jednotlivá schémata procesu a používá k tomu stálou sadu slov (nazývaných „klíčová slova“). Tato klíčová slova jsou aplikována na jednotlivé body nebo „studijní uzly“ v procesních schématech

a kombinována se specifickými procesními parametry tak, aby byly identifikovány možné odchylky od zamýšlených provozních ukazatelů.

Např. klíčové slovo „Není“ kombinované s procesním parametrem „Průtok“ dává odchylku „Není průtok“. Někdy vedoucí týmu využívá kontrolní seznamy nebo zkušenosti z procesu, aby týmu pomohl rozvíjet potřebný seznam odchylek, které tým nachází během HAZOP schůzek. Tým se pak shodne na možných případech odchylek (např. operátor chybně blokuje čerpadlo), na možných důsledcích odchylek (např. čerpadlo se přehřívá) a na nápravných opatřeních použitelných na odchylky (např. pojistný ventil na výtlačné trase čerpadla). Pokud jsou příčiny a následky významné a opatření nedostačující, může tým navrhnout managementu další prošetřování. V některých případech může tým identifikovat odchylku se skutečnou příčinou ale neznámými následky (např. neznámý reakční produkt) a doporučit podrobnější studie pro určení možných následků.

Účel

Účelem analýzy HAZOP je pozorně a systematickým způsobem prozkoumat proces nebo činnost a stanovit, zda procesní odchylky mohou vést k nežádoucím následkům. Tato technika může být použita jak pro dávkové tak i kontinuální procesy a může být přizpůsobena pro vyhodnocování psaných postupů. HAZOP tým prochází a probírá seznam možných příčin a následků odchylky stejně jako existující ochrany zabraňující dané odchylce. Pokud tým zjistí nedostatečnou ochranu proti existující věrohodné odchylce, obvykle doporučí přijmout opatření pro snížení rizika.

Typy výsledků

Výsledky analýzy HAZOP jsou zjištění týmu, které zahrnují identifikaci zdrojů rizika a provozních problémů; doporučení změn projektu a postupů atd. pro zlepšení systému; a doporučení pro vypracování studií těch problémů, u kterých nebylo možné přijmout pro nedostatek informací žádné rozhodnutí. Výsledky diskusí týmu týkající se příčin, účinků a opatření pro jednotlivé odchylky a pro každý uzel nebo sekci procesu jsou zaznamenávány tabulkovou formou.

Požadavky na zdroje

Analýza HAZOP vyžaduje přesné, aktualizované nákresy P&ID (nebo jiná schémata) a další podrobné informace o procesu, jako jsou provozní předpisy. Analýza HAZOP rovněž vyžaduje dobrou znalost daného procesu, přístrojového vybavení a provozu. Tyto informace jsou obvykle zajišťovány členy týmu, kteří jsou odborníci v těchto oblastech. Trénování a zkušenosti vedoucí jsou prvotní podmínkou účinné a vysoce kvalitní analýzy HAZOP.

Tým HAZOP se pro velké, složité procesy může skládat z 5 až 7 lidí s různými zkušenostmi: projektant, technolog, provozní údržbář atd. Jeden člen týmu vede analýzu a jiný (zapisovatel) zaznamenává úvahy týmu. Pro jednoduchý proces nebo

limitovaný rozsah posudku může mít tým 3 až 4 členy, pokud mají nezbytné technické dovednosti a zkušenosti. Následující tabulka udává odhady doby potřebné k provedení identifikace zdrojů rizika pomocí techniky HAZOP.

Rozsah	Příprava *	Vyhodnocení	Dokumentace **
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	8 až 12 hod	1 až 3 dny	2 až 6 dnů
<i>Složitý / velký proces</i>	2 až 4 dny	1 až 3 týdny	2 až 6 týdnů

* Zejména vedoucí týmu a zapisovatel, ačkoliv ostatní se mohou na této fázi také podílet. ** Pouze vedoucí týmu a zapisovatel.

3.1.7 Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA)

Popis

Při analýze způsobů a důsledků poruch (FMEA) je vytvářena tabulka způsobů poruch zařízení a jejich účinků na systém nebo podnik. Poruchový stav popisuje, jak zařízení selže (v otevřené poloze, zavřené poloze, v chodu, ve vypnutém stavu, únik, atd.). Účinek způsobené poruchy je určen reakcí systému na selhání zařízení. FMEA identifikuje jednoduché způsoby poruchy, které buď přímo vedou k nehodě, nebo k ní významně přispějí. Chyby člověka-operátora obvykle nejsou vyšetřovány přímo pomocí FMEA, nicméně účinky špatné funkce jako výsledek lidské chyby jsou obvykle indikovány nějakým způsobem poruchou zařízení. FMEA není účinná pro identifikování vyčerpávajícího seznamu kombinací poruch zařízení, které vedou k nehodám. Uvedená analýza je standardizována jako **ČSN IEC 812 Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA)**. Při její aplikaci se doporučuje užívat terminologii uvedenou v normě.

Účel

Účelem FMEA je identifikovat způsoby poruch jednotlivého zařízení a systému a potenciální účinek nebo účinky každého způsobu poruchy na systém nebo podnik. Tato analýza typicky vytváří doporučení pro zvýšení spolehlivosti zařízení a tím také pro zlepšení bezpečnosti procesu.

Typy výsledků

FMEA vytváří kvalitativní, systematický seznam odkazů na zařízení, způsoby poruch a účinky. Součástí je i vyhodnocení následků nejhoršího případu plynoucího z jednotlivých poruch. FMEA může být snadno aktualizována po změnách v projektu nebo systému podniku. Výsledky FMEA jsou obvykle dokumentovány v tabulkové podobě. Analytik obvykle uvede návrhy pro zlepšení bezpečnosti u příslušných položek v tabulce.

Požadavky na zdroje

Analýza FMEA vyžaduje následující zdroje dat a informací: seznam zařízení systému nebo podniku nebo P&ID, znalost funkcí zařízení a způsobů poruch a znalost funkcí systému nebo podniku a odezev na selhání zařízení.

Analýzy FMEA mohou být prováděny jedním analytikem, ale takové analýzy by měly být revidovány dalšími odborníky, aby byla zajištěna úplnost. Požadavky na personál se budou různit podle velikosti a složitosti položek zařízení, které se mají analyzovat.

Všichni analytici zapojení do FMEA by měli být obeznámeni s funkcemi zařízení a způsoby poruch a s tím, jak mohou poruchy ovlivnit ostatní části systému nebo podniku.

Doba a náklady analýzy FMEA jsou úměrné velikosti procesu a počtu analyzovaných komponent. V průměru je jedna hodina dostatečná doba pro analýzu dvou až čtyř položek zařízení. Stejně jako při jakékoli studii hodnocení zdrojů rizika systémů s podobným zařízením, které vykonává podobné funkce, je potřebná doba výrazně zkrácena díky opakující se povaze těchto hodnocení. Následující tabulka odhaduje dobu potřebnou k provedení studie hodnocení zdrojů rizika použitím techniky FMEA.

Rozsah	Příprava	Vyhodnocení	Dokumentace
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	2 až 6 hod	1 až 3 dny	1 až 3 dny
<i>Složitý / velký proces</i>	1 až 3 dny	1 až 3 týdny	2 až 4 týdny

3.2 Techniky analýzy systémů

Kapitola stručně pojednává o nejpoužívanějších technikách analýzy systémů jako základu pro hodnocení rizika takových systémů. Obsah kapitoly se prolíná s obsahem kapitoly pojednávající o identifikaci zdrojů rizika, protože dále popisované techniky slouží v rámci CPQRA rovněž k identifikaci zdrojů rizika stejně jako v pozdějších krocích k oceňování frekvencí iniciačních událostí a pravděpodobností koncových stavů scénářů.

3.2.1 Analýza stromu poruch (poruchových stavů) (FTA)

Popis

Analýza stromu poruch (poruchových stavů) je deduktivní technika, která se zaměřuje na jednu určitou nehodu nebo velké selhání systému a ozřejmuje metodu pro stanovení příčin takové události. Strom poruch je grafický model, který zobrazuje různé kombinace poruch zařízení a lidských chyb, které mohou vyústit ve vážnou systémovou poruchu, která nás zajímá (tzv. vrcholová událost). Síla FTA jako kvalitativního nástroje je v její schopnosti identifikovat kombinace základních poruch zařízení a lidských chyb, které mohou vést k nehodě. To analytikovi umožňuje zaměřit se na preventivní nebo zmírňující opatření týkající se významných základních příčin tak, aby byla snížena pravděpodobnost vzniku nehody. Uvedená technika je standardizována jako **ČSN IEC 1025 Analýza stromu poruchových stavů**. Při její aplikaci se doporučuje užívat terminologii uvedenou v normě.

Účel

Účelem FTA je nalezení kombinací poruch zařízení a lidských chyb, které mohou vyústit v nehodu. FTA se dobře hodí pro analýzy velmi obširných systémů. Pro systémy obzvláště náchylné na určité poruchy, které mohou vést k nehodě, je lepší

použít techniku orientovanou na jednoduché poruchy, jako jsou analýzy FMEA nebo HAZOP. Analýza FTA se využívá v situacích, kdy jiná technika analýzy zdrojů rizika (např. analýza HAZOP) vypíchla důležitou nehodu, která vyžaduje detailnější analýzu.

Typy výsledků

FTA vytváří logické modely poruch systému. Tyto modely používají Booleanových logických hradel (např. AND, OR) pro popis způsobu, jak mohou být selhání systému a lidské chyby zkombinovány, aby zapříčinily velkou systémovou poruchu. Mnoho modelů stromů poruch může vzniknout při analýze velkých procesů; aktuální počet modelů závisí na tom, jak podrobně analytik vybíral zajímavé vrcholové události. Analytik obvykle řeší každý logický model, aby vytvořil seznam poruch, nazývaný minimální kritické řezy, které mohou vyústit ve vrcholovou událost. Tyto seznamy minimálních kritických řezů mohou být kvantitativně seřazeny podle čísel a typu poruch v každém kritickém řezu (např. selhání hardware, lidské chyby). Kritické řezy obsahující více poruch jsou méně pravděpodobné než ty, které obsahují méně poruch. Kontrola takových seznamů minimálních kritických řezů odhaluje slabiny projektu nebo provozování systému. Pro tyto systémy může analytik navrhnout alternativy možných bezpečnostních vylepšení.

Požadavky na zdroje

Použití techniky FTA vyžaduje detailně porozumět tomu, jak podnik nebo systém fungují, detailně porozumět nákresem a postupům, detailně znát způsoby selhání komponent a účinků takových selhání. Podniky, které chtějí provést FTA, by měly pro záruku účinné a vysoce kvalitní analýzy použít služby dobře trénovaných a zkušených analytiků.

Kvalifikovaný analytik vyvine stromy poruch svými silami, ale musí detailně porozumět procesu. I tak by měly být modely překontrolovány inženýry, operátory a ostatním personálem, kteří mají provozní zkušenosti se systémy a zařízením, které jsou předmětem analýzy. Přístupem „jediný analytik / jediný strom poruch“ se podporuje spojitost v rámci celého stromu poruch, nicméně analytik musí mít přístup ke všem informacím potřebným pro definování poruch, které přispívají k vrcholové události. Týmový přístup se používá v případě, kdy je daný proces velmi složitý nebo pokud se vytváří více než jeden samostatný strom poruch. Vzájemná spolupráce mezi členy týmu a dalším zkušeným personálem je pak nezbytná, aby byla zajištěna návaznost ve vývoji souvisejících nebo navazujících modelů.

Doba a náklady na provedení FTA závisí na složitosti systémů, kterých se analýza týká, a na stupni podrobnosti této analýzy. Modelování jediné vrcholové události jednoduchého procesu zkušeným týmem by vyžadovalo i méně než jeden den. Složité systémy nebo velké problémy s množstvím potenciálních nehodových událostí by vyžadovaly mnoho týdnů nebo měsíců i se zkušeným týmem analytiků. Následující tabulka uvádí odhady doby potřebné k provedení studie zdrojů rizika s použitím techniky FTA.

Rozsah	Příprava	Konstrukce modelu	Kvalitativní vyhodnocení	Dokumentace
--------	----------	-------------------	--------------------------	-------------

Rozsah	Příprava	Konstrukce modelu	Kvalitativní vyhodnocení	Dokumentace
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	1 až 3 dny	3 až 6 dnů	2 až 4 dny	3 až 5 dnů
<i>Složitý / velký proces</i>	4 až 6 dnů	2 až 3 týdny	1 až 4 týdny	3 až 5 týdnů

3.2.2 Analýza stromu událostí (ETA)

Popis

Strom událostí graficky ukazuje možné koncové stavy nějaké nehody, která následovala po iniciační události (určitá porucha zařízení nebo lidská chyba). Analýza stromu událostí uvažuje odezvy bezpečnostních systémů a operátorů na iniciační událost a určuje možné koncové stavy této nehody. Výsledkem analýzy ETA jsou scénáře nehody; tj. soubor poruch nebo chyb, které vedou k nehodě. Tyto výsledky popisují možné koncové stavy nehody pomocí sekvence událostí (úspěchy nebo selhání bezpečnostních funkcí), které následují po iniciační události. Analýza ETA je vhodná pro analýzu složitých procesů, které mají několik úrovní bezpečnostních systémů nebo postupů pro případ nouze vhodných pro odezvu na určité iniciační události.

Účel

Stromy událostí jsou užívány pro identifikaci různých nehod, které se mohou objevit u složitého procesu. Po identifikaci těchto nehodových sekvencí mohou být určeny typické kombinace poruch pomocí analýzy stromu poruch, které mohou vést k těmto nehodám.

Typy výsledků

Výsledkem analýzy stromu poruch jsou modely stromu poruch a úspěchy nebo neúspěchy bezpečnostních systémů, které vedou ke každému definovanému koncovému stavu. Nehodové sekvence zobrazené ve stromu událostí představují logické AND kombinace událostí; tudíž tyto sekvence mohou být převedeny na formu modelu stromu poruch pro další kvalitativní analýzu. Analytikové používají těchto výsledků pro identifikaci projektových a procesních slabých míst a poskytují doporučení pro snížení pravděpodobnosti a / nebo následků analyzovaných možných nehod.

Požadavky na zdroje

Použití ETA vyžaduje znalost možných iniciačních událostí (tj. selhání zařízení nebo nerovnováha systému, jež mohou potenciálně zapříčinit nehodu) a znalost funkcí bezpečnostních systémů nebo nouzových procedur, které zmírňují účinky každé iniciační události.

Analýzu ETA může provádět jednotlivý analytik, pokud zná podrobně systém, ale preferován je tým ze dvou až čtyř lidí. Týmový přístup podporuje spontánní diskusi a hledání nápadů, což vede ke kvalitnějšímu modelu stromu poruch. Tým by měl obsahovat alespoň jednoho člena se znalostí analýzy ETA a zbytek členů se znalostí procesů se systémy zařazenými do analýzy.

Doba a náklady na analýzu ETA závisí na počtu a složitosti iniciačních událostí a bezpečnostních funkcích zahrnutých do analýzy. Týmu by mělo stačit několik dnů pro vyhodnocení několika iniciačních událostí jednoduchého procesu. Složitější procesy by mohly vyžadovat až mnoho týdnů. Následující tabulka uvádí odhady doby potřebné k provedení studie analýzy zdrojů rizika použitím techniky ETA.

Rozsah	Příprava	Konstrukce modelu	Kvalitativní vyhodnocení	Dokumentace
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	1 až 2 dny	1 až 3 dny	1 až 2 dny	3 až 5 dnů
<i>Složitý / velký proces</i>	4 až 6 dnů	1 až 2 týdny	1 až 2 týdny	3 až 5 týdnů

3.2.3 Analýza příčin a následků (CCA)

Popis

Analýza příčin a následků je směs analýzy stromu poruch a analýzy stromu událostí. Největší předností CCA je její použití jako komunikačního prostředku: diagram příčin a následků zobrazuje vztahy mezi koncovými stavy nehody (následky) a jejich základními příčinami. Protože grafická forma, jež kombinuje jak strom poruch tak strom událostí do stejného diagramu, může být hodně detailní, užívá se tato technika obvykle nejvíce v případech, kdy logika poruch analyzovaných nehod je poměrně jednoduchá.

Účel

Jak už napovídá název, účelem analýzy příčin a následků je odhalit základní příčiny a následky možných nehod.

Typy výsledků

Analýza příčin a následků vytváří diagramy s nehodovými sekvencemi a kvalitativními popisy možných koncových stavů nehod.

Požadavky na zdroje

Použití CCA vyžaduje znalosti následujících dat a informačních zdrojů: znalosti poruch komponent nebo nerovnováh procesu, které by mohly způsobit nehody, znalosti bezpečnostních systémů nebo nouzových procedur, které mohou ovlivnit koncový stav nějaké nehody, a znalosti potenciálních dopadů všech těchto selhání.

Analýza CCA se nejlépe provádí v malém týmu (dva až čtyři lidé) s rozličnými zkušenostmi. Jeden člen týmu by měl mít zkušenosti s CCA (nebo s analýzami FTA nebo ETA), zatímco ostatní členové by měli mít zkušenosti s projektem a provozem systémů začleněných do analýzy.

Doba a náklady na analýzu CCA velmi závisí na počtu, složitosti a úrovni rozlišení událostí začleněných do analýzy. Typově rozsáhlé analýzy pro několik iniciačních událostí mohou být dokončeny během jednoho týdne nebo i dříve. Detailní studie CCA vyžadují několik týdnů v závislosti na složitosti jakéhokoliv podpůrného stromu poruch. Následující tabulka udává odhady doby potřebné k provedení studie použitím techniky CCA.

Rozsah	Příprava	Konstrukce modelu	Kvalitativní vyhodnocení	Dokumentace
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	1 až 2 dny	1 až 3 dny	1 až 3 dny	3 až 5 dnů
<i>Složitý / velký proces</i>	4 až 6 dnů	1 až 2 týdny	1 až 2 týdny	3 až 5 týdnů

3.2.4 Analýza lidské spolehlivosti (HRA)

Popis

Analýza lidské spolehlivosti je systematické hodnocení faktorů, které ovlivňují výkonnost operátorů, údržbářů, techniků a ostatního personálu podniku. Zahrnuje jeden z několika typů obtížných analýz; tyto typy analýz popisují fyzikální charakteristiky a charakteristiky prostředí společně s dovednostmi, znalostmi a schopnostmi vyžadovanými od těch, kdo provádějí zkoumané úkony. Analýza lidské spolehlivosti identifikuje situace náchylné k chybám nebo omylům, které mohou vést k nehodám. Analýza lidské spolehlivosti může být také použita ke stopování příčin lidských chyb. Analýza lidské spolehlivosti se obvykle provádí ve spojení s jinými technikami hodnocení zdrojů rizika.

Účel

Účelem analýzy lidské spolehlivosti je identifikovat potenciální lidské chyby a jejich účinky nebo identifikovat příčiny lidských chyb.

Typy výsledků

Analýza lidské spolehlivosti systematicky vyjmenovává chyby, které se mohou vyskytnout během normálního nebo nouzového provozu, faktory přispívající k takovým chybám a navrhané změny systému pro snížení pravděpodobnosti takových chyb. Výsledky jsou povahy kvalitativní, ale mohou být i kvantifikovány. Taková analýza v sobě zahrnuje identifikování vzájemných vztahů systému ovlivněných jednotlivými chybami a seřazení těchto chyb ve vztahu k ostatním na základě pravděpodobnosti výskytu nebo závažnosti následků. Výsledky jsou snadno

aktualizovatelné při změnách projektu, systému, podniku nebo trénovanosti personálu.

Požadavky na zdroje

Použití analýzy lidské spolehlivosti vyžaduje následující data a informační zdroje: procesní postupy; informace z rozhovorů s personálem procesu; znalosti o rozmístění, funkci a rozložení procesu; umístění řídicího panelu a výstražného systému.

Požadavky na počet lidí v týmu se liší podle rozsahu analýzy. Obecně by měli být schopni provést HRA pro proces jeden nebo dva analytici znalí problematiky lidského faktoru. Analytik nebo analytici by měli ovládat techniky rozhovorů a měli by mít přístup k personálu podniku, k souvisejícím informacím, jako jsou postupy a schématické nákresy, a k zařízení. Analytik by měl být obeznámen (nebo znát někoho, kdo je obeznámen) s odezvou podniku nebo procesu na nejruznější lidské chyby nebo s následky způsobenými takovými chybami.

Doba a náklady na analýzu lidské spolehlivosti jsou úměrné velikosti a počtu úkolů, systémů nebo chyb, které mají být analyzovány. Pouze jedna hodina by měla stačit na provedení zběžné HRA pro úkoly spojené s jednoduchým procesním postupem. Doba požadovaná pro identifikaci pravděpodobných zdrojů daného typu chyby se bude různit podle složitosti obsažených úkolů, ale tato analýza by měla být dokončena také v době jedné hodiny. Pokud byly výsledky analýzy jednoduchého úkolu použity pro zkoumání několika zdrojů možných lidských chyb, pak by se doba na jeden zdroj významně zkrátila. Identifikování potenciálních změn pro snížení dopadu lidských chyb by podstatně nezvýšilo časovou náročnost na analýzu lidských chyb. Následující tabulka uvádí odhady doby potřebné k provedení studie vyhodnocení zdrojů rizika technikou HRA.

Rozsah	Příprava	Konstrukce modelu	Kvalitativní vyhodnocení	Dokumentace
<i>Jednoduchý / malý systém</i>	4 až 8 hodin	1 až 3 dny	1 až 2 dny	3 až 5 dnů
<i>Složitý / velký proces</i>	1 až 3 dny	1 až 2 týdny	1 až 2 týdny	1 až 3 týdny

3.3 Analýza a modelování následků

Hodnocení následků je společně s určováním pravděpodobností a frekvencí významný krok při kvantifikaci rizika.

V této kapitole jsou diskutovány následky závažných havárií. Je prezentována povaha těchto následků a metody používané pro jejich modelování a hodnocení.

Jsou popsány kroky a struktura procedury hodnocení následků: různé modely pro definici zdrojového členu úniku, modely pro rozptyl, požár a explozi, modely pro dávkové účinky (zranitelnost). Představení modelů je zaměřeno na popis fyzikálních jevů, dostupné principy matematického modelování, vstupní a výstupní proměnné a vztahy k dalším modelům. Jsou diskutovány kombinace různých modelů a získány významné míry rizika integrací jednotlivých výsledků. Nakonec jsou popsány povaha a původ neurčitostí v proceduře hodnocení následků a zmíněny možné způsoby, jak s nimi naložit.

Cílem této kapitoly není podání vyčerpávajícího výkladu popisu modelů používaných pro hodnocení následků ani vyčerpávající seznam všech dostupných modelů. Cílem je ukázat, jak jsou různé modely propojovány za účelem hodnocení následků potenciálních nehod.

3.3.1 Povaha následků a struktura jejich hodnocení

Při pokusu klasifikovat následky může být určeno několik jejich skupin:

- následky na lidech,
- následky na okolním prostředí,
- sociálně-ekonomické následky.

Středem zájmu je přirozeně první kategorie. Týká se to nepříznivých účinků nehod na zaměstnance podniku a populaci v okolí. Tyto účinky mohou být dále rozděleny na akutní a chronické, na úmrtí a zranění (popáleniny, dýchací problémy, atd.). Druhá kategorie uvažuje účinky nehod na životní prostředí a ekosystém. Třetí kategorie slučuje ekonomické ztráty vlastníků podniků a škody na stavbách způsobených nehodou (ztráta produkce, surovin, zařízení, škody na budovách, atd.).

Hlavní důraz se klade na ztráty a poškození lidských bytostí. Pokud se týče závažných nehod, existuje mnoho studovaných účinků následků na lidský organismus:

- toxické účinky z inhalace a vystavení vlivu toxickým látkám (přímá a nepřímá expozice různými cestami),
- účinky tepelné radiace (popálení) způsobené během hoření hořlavých látek,
- účinky tlakové vlny způsobené během výbuchu hořlavých nebo výbušných látek nebo prachů,
- letící trosky, tj. mechanické části, které jsou vrženy jako střely během výbuchu,
- účinky karcinogenních látek, jež mohou po expozici na člověka způsobit rakovinu a nádory.

Hodnocení následků je základní součástí jakéhokoliv pokusu o kvantifikaci a hodnocení rizika. Hodnocení rizika je strukturovaná procedura, která vyhodnocuje a srovnává úroveň rizika přítomného vlivem zdrojů rizika identifikovaných uvnitř nebo vně zařízení. Obecně se tato procedura pokouší zodpovědět na čtyři důležité otázky týkající se zařízení:

- co se může pokazit?
- jak budou přítomné bezpečnostní systémy reagovat na tyto události?
- jak často se to stane?
- jaké budou následky, pokud selžou bezpečnostní systémy?

První krok této procedury sestává ze systematické identifikace iniciačních událostí, které mohou vést k nehodě (viz kapitoly výše). Dále jsou analyzovány reakce bezpečnostních systémů a bezpečnostních opatření na tyto události a vyhodnocena pravděpodobnostní složka koncových stavů sekvencí vyplývajících z možných nehod společně s následkovou složkou. Nakonec jsou všechna tato hodnocení integrována do konečné míry rizika.

Po identifikaci možných iniciačních událostí, dále po analýze odezev instalovaných bezpečnostních systémů na tyto události a po pravděpodobnostních hodnoceních končí procedura určitým počtem možných koncových stavů poškození podniku, které musí být brány v úvahu (uplatňují se pravděpodobnostní kritéria pro výběr „realistických“ koncových stavů poškození podniku). Tyto stavy obsahují všechny nezbytné informace o podniku, takže je možné kvantifikovat následky potenciálních nehod.

Podmínky, na kterých závisí stupeň poškození podniku a okolí, jsou: meteorologické podmínky, osídlení v okolí, místní topografie, životní prostředí podniku a okolí atd. Protože je počet možných kombinací všech těchto a dalších parametrů ohromný, je nutná určitá klasifikační procedura. Kombinace, které vedou k podobným následkům jsou seskupeny a tvoří kategorie úniků.

Proto je stanovena kategorie úniků pomocí hodnot parametrů určujících stav poškození podniku a pomocí reprezentativních hodnot meteorologických a ostatních dat (populace, topografie, atd.). V další fázi jsou spočteny následky takových kombinací dat, která reprezentují celou kategorii. K těmto výsledkům, které odpovídají celé kategorii, jsou přiřazeny frekvence nebo pravděpodobnosti.

Abychom spočítali následky nehody na lidi a okolní prostředí, budeme simulovat proceduru hodnocení následků vývojem nehody s pomocí příslušných fyzikálních jevů. Běžný vývoj nehody bývá následující:

- Na počátku existuje výtok nebezpečné látky do prostředí. Tento výtok může být v plynné fázi, v 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 neiniciovaná okamžitě, pak se bude plynná forma rozptylovat do atmosféry.
- Toxická látka může být inhalována lidmi. Pokud dávka dosáhne určité prahové hodnoty, existuje možnost zranění nebo dokonce úmrtí.
- Hořlavá látka může být zapálena. Osoby v blízkosti budou ohroženy tepelnými a přetlakovými účinky požáru a / nebo výbuchu.

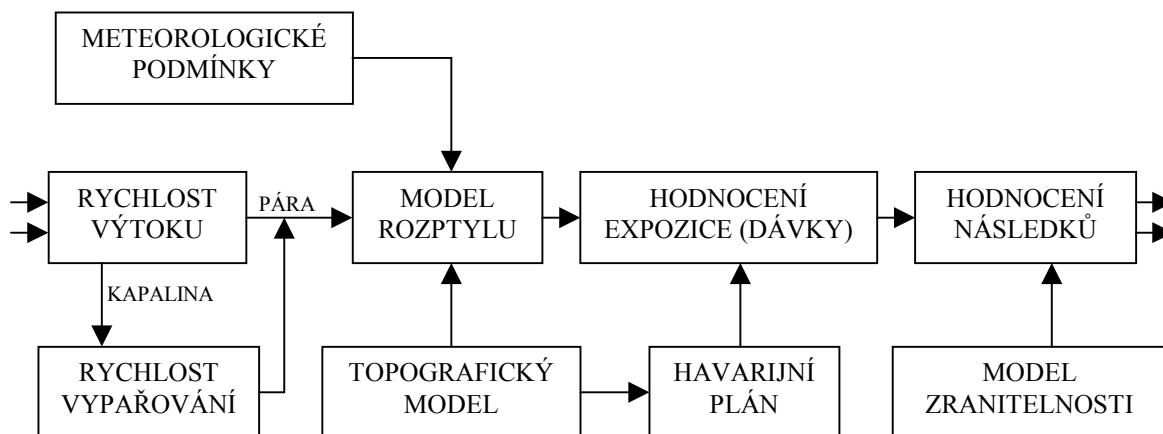
- Pokud je hořlavá látka uvolněna v kapalně formě, pak se bude vytvářet kaluž. Pokud se zde dodatečně objeví zdroj zapálení, dojde k požáru této kaluže.

Aby analytik ocenil následky nehody, musí modelovat všechny výše citované jevy. Modely musí být vyvinuty a dostupné pro všechny tyto jevy. Proto analytik simuluje vývoj nehody použitím příslušných kombinací modelů. Analytik tedy používá sadu modelů pro:

- definici zdrojových členů,
- modelování rozptylů,
- modelování požárů,
- modelování výbuchů,
- vyhodnocení zranitelnosti příjemců.

Následující obrázek schématicky ukazuje strukturu modelů hodnocení následků.

V následujících podkapitolách bude podán stručný popis těchto modelů. Popis bude obecný, protože výklad tématu není založen na žádných specifických modelech ani počítačových kódech; výklad podává hlavně popis daných jevů, obvyklé vstupy a výstupy modelů, jejich účel a postavení v celkové struktuře hodnocení následků. Je třeba rovněž poznamenat, že zde popisované modely a s nimi související jevy jsou jevy nejběžnější. Existuje přemíra dalších jevů objevujících se v určitých případech, pro které jsou modely také dostupné, ale pro jejich složitost na ně zde není místo.



Obrázek 1: Struktura modelů hodnocení následků

3.3.2 Modely zdrojového členu

3.3.2.1 Popis jevů

Prvním krokem při hodnocení následků je definice zdrojového členu, což znamená stanovení množství a podmínek uvolnění látky. Protože většina nebezpečných nehodových událostí začíná výtokem hořlavé nebo toxické látky z jejího okolí

určitým způsobem odděleného zařízení (tank, nádoba, reaktor, potrubí), je hodnocení zdrojových členů velmi důležité pro další kroky hodnocení následků.

Důležitým parametrem, který řídí sekvence jevů, je doba trvání úniku. Pokud je tato doba velmi krátká, únik může být považován za *jednorázový* nebo *kvazi-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 3 až 5 minut.

Uniklé množství látky může být v plynné nebo kapalné 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, kapičky, kapalná fáze). Páry kapaliny se začleňují do plynné fáze a výsledkem je zvýšení množství rozptýlené látky.

3.3.2.2 Modely

Modely výtoku

Modely pro výtok kapaliny a plynu jsou dobře známy z inženýrské praxe (např. Bernouliova rovnice). Výběr vhodného modelu závisí na fázi (tj. zda únik je či není ve formě kapalně, plynné nebo dvoufázové) a podmínkách unikající látky. Typickým jednoduchým příkladem modelu úniku kapaliny je Bernouliova rovnice:

$$\dot{m}_L = C_d \cdot A \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2(p - p_a)}{d} + 2gH}$$

kde: $\dot{m}_L$ je hmotnostní rychlost úniku kapaliny (kg/s)

C_d je únikový koeficient

A je plocha otvoru (m²)

d je hustota kapaliny (kg/m³)

p je absolutní skladovací tlak (N/m²)

p_a je absolutní tlak okolí (N/m²)

g je gravitační tíhové zrychlení (m/s²)

H je 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). Jiným případem úniku v plynné fázi, který stojí za zmínku, je únik z pojišťovacích ventilů, tj. ventilů specificky určených k tomu, aby odlehčily zvýšenému tlaku v nádobě a tak zabránily jejímu roztržení vlivem přetlaku.

Pro dvoufázové úniky byly navrženy empirické modely.

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, tj. úvahou, kdy je celkový tepelný tok ze vzduchu a podkladu využit pro zahřívání a vypařování uniklé látky. Pokročilejší modely musíme brát v úvahu v případech, kdy se poloměr kaluže zvětšuje (neexistuje záchytná nádrž).

3.3.2.3 Vstupy a výstupy

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:

- vyteklé množství nebo hmotnostní rychlost výtoku,
- trvání výtoku,
- podmínky vytékající látky, tj. zda se jedná o kapalnou nebo plynnou fázi, nebo o mžikově se odpařující látku – dvoufázový výtok.

Modely vypařování obvykle vyžadují proměnné počítané výtokovými modely a proměnné meteorologických podmínek.

3.3.2.4 Vztah k jiným modelům

Modely zdrojového členu vyžadují data z popisu scénáře nehody, podrobnosti o zařízení a meteorologických podmínkách. Výstupy modelů zdrojového členu vstupují do výpočtů rozptylů.

3.3.3 Modely rozptylu

3.3.3.1 Popis jevů

Látka po úniku do atmosféry vytváří oblak, který je pak rozptylován ve směru větru. Existují dva rozdílné mechanismy rozptylu:

- Vznášivý rozptyl pro plyny lehčí než vzduch. Tyto oblaky jsou pasivně transportovány větrem.
- Rozptyl těžkého plynu pro plyny nebo směsi těžší než vzduch. V tomto případě existuje nejdříve klesavá fáze, během níž je dominantní silou gravitace, protože oblak je těžší než vzduch. Během této fáze vstupuje do oblaku

vzduch, který ho zahřívá a zředí a tím ho činí lehčím. Existuje přechodná fáze a potom pasivní rozptylová fáze, protože hustota oblaku se významně snížila a oblak se stal lehčí než vzduch.

3.3.3.2 Meteorologické podmínky - topografie

Obecně jsou meteorologické podmínky a místní topografie důležitými parametry ve většině kroků procedury hodnocení následků, zvláště při rozptylových jevech pak hrají jednu z nejdůležitějších rolí.

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. To bylo navrženo Pasquilem a Giffordem a jejich členění sestává z 6 tříd v rozsahu od A (extrémně nestabilní) po F (extrémně stabilní). Obecně platí, že když je počasí stabilní (třídy F, E) nebo neutrální (třída D), pak se očekává, že uniklé látky budou putovat na delší vzdálenosti než se jejich koncentrace sníží. Z tohoto důvodu se stabilitní třídy F až D považují za „špatné“ povětrnostní podmínky pro rozptyl nebezpečných látek.

Dalším parametrem, o kterém stojí za to diskutovat, je místní topografie. Znovu připomeňme, že tento parametr hraje důležitou roli při rozptylu uniklých látek – a tím také při hodnocení následků – protože fyzikální překážky nebo terénní zvláštnosti mohou ochránit určité oblasti a prostory nebo naopak způsobit velké problémy jiným prostorům a oblastem. Např. rozptyl nebezpečných látek v údolích se velmi liší od

rozptylů v rovném terénu. Topografie nějakého místa 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 řídce rozptýlenými budovami, obydlené oblasti a městské oblasti (s vysokými budovami, mrakodrapy, atd.).

3.3.3.3 Modely

Existuje mnoho rozptylových modelů, které se dají rozdělit podle:

- Chování vytvořeného mraku. Jsou to modely pro vznášivý rozptyl (známé také pod označením pasivní nebo Gaussův rozptyl) a modely pro rozptyl těžkého plynu.
- Trvání úniku, tj. zda může být únik považován za okamžitý (puff) nebo kontinuální (plume).
- Složitosti modelování. Existují jednoduché „box“ modely a složité 3-D modely, které berou v úvahu reliéf terénu.

Gaussův model rozptylu

Jeden z nejjednodušších a snad také nejvíce užívaných modelů, Gaussův model rozptylu, je aplikován pro plyny lehčí než vzduch nebo obecně během pasivní rozptylové fáze. Je založen na předpokladu, že koncentrace nebezpečné látky je normálně (Gauss) distribuována na horizontální i vertikální ose. Pro kontinuální únik z vyvýšeného bodového zdroje o výšce H je koncentrace v bodě (x, y, z) dána:

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

kde:	x, y, z	jsou vzdálenosti od zdroje (x = po směru větru, y = kolmo na směr větru, z = vertikální)
	$c(x, y, z)$	je koncentrace látky v bodě (x, y, z) (kg/m^3)
	$\dot{m}$	je hmotnostní rychlost výtoku (kg/s)
	u	je rychlost větru (m/s)
	H	je výška zdroje nad terénem (m)
	σ_y	je horizontální rozptylový koeficient (m) závislý na vzdálenosti ve směru větru a stabilitní třídě
	σ_z	je vertikální rozptylový koeficient (m) závislý na vzdálenosti ve směru větru, stabilitní třídě a drsnosti povrchu.

Pro okamžitý únik je koncentrace v bodě (x, y, z) od zdroje dána:

$$c(x,y,z) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \left\{ -\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right\} \right] \left[\exp \frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp \frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right]$$

kde:	M	je množství uvolněné látky (kg)
	t	je doba, která uplynula od úniku (s).

Lagrangianův model

Lagrangianův 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

Je to nejjednodušší 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. Jelikož je válec 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 ze shora, celá

směs se ohřívá a zředuje. Existuje určitý bod během této fáze, ve kterém je oblak natolik zředěn, že se stává lehčí než vzduch, a je neutrálně rozptýlován vzduchem. Od tohoto bodu může být pro popis rozptylu uplatňován Gaussův model. Co se týče kontinuálního úniku, zformovaná významná vlečka (plume) je modelována jako sled tenkých pravoúhlých vrstev, pro které jsou aplikovány stejné principy.

Computational Fluid Dynamics (CFD)

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. Tímto způsobem je popisována dynamika proudění. Bez problémů mohou být brány v úvahu složitý terén, překážky různého tvaru a ohraničení a zvláštnosti proudění. Nevýhodou této skupiny modelů je jejich větší složitost vyžadující vysoký stupeň odbornosti analytiků a také vysoké náklady na provedení výpočtů.

Mělo by být zdůrazněno, že výběr adekvátního modelu není snadná věc a závisí na požadavcích studie, dostupnosti modelů a požadované přesnosti výsledků.

3.3.3.4 Vstupy a výstupy

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.

Meteorologická data pravděpodobně tvoří jedny z nejdůležitějších vstupních parametrů rozptylových modelů. Jak už bylo uvedeno dříve, týkají se rychlosti a směru větru, stabilitní třídy, teploty okolí, atmosférického tlaku a relativní vlhkosti. Topografie se obvykle bere v úvahu pomocí nadmořské výšky každého bodu kolem podniku a pomocí drsnosti povrchu v okolní oblasti.

3.3.3.5 Vztah k jiným modelům

Rozptylové modely vyžadují data z modelů zdrojového členu a meteorologické podmínky. Dávají jako výstup profil koncentrace, který je požadován pro výpočet dávky u toxických látek a pro výpočet hořlavého nebo výbušného množství u hořlavých látek.

3.3.4 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.

3.3.4.1 Modely 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 (závisí na relativní poloze příjemce vůči plameni)

a berou se v úvahu meteorologické podmínky. Výstupem modelu je přijatá intenzita tepelného toku (kW/m^2).

Tryskavé požáry

Tryskavé požáry jsou výsledkem úniku stlačených hořlavých plynů nebo kapalin. Jsou modelovány jako válec s průměrem D a délkou L (délka plamene), které jsou počítány hlavně z empirických rovnic. Potom je spočtena přijatá 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, zatímco vzniklý přetlak není podstatný.

3.3.4.2 Modely výbuchů

Výbuch je velmi rychlé hoření, takže rozpínání plynů vyústí v rychle se pohybující tlakovou vlnu. Rozlišují se dva různé případy:

- Deflagrace, kdy je rychlost tlakové vlny nižší než rychlost zvuku (za daných podmínek).
- Detonace, kdy je rychlost tlakové vlny vyšší než rychlost zvuku.

Dobře prostudovaným typem výbuchů je výbuch neohraničeného oblaku par (UVCE). Pro jeho vyhodnocení se v literatuře používají dvě metody:

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

Je třeba poznamenat, že UVCE je obvykle výsledkem *zpožděné iniciace* uniklé hořlavé látky. Jinými slovy, v době úniku nebyl přítomen žádný iniciační zdroj, a proto vzniklý oblak pokračoval ve svém rozptylu ve směru větru, dokud nenalezl iniciační zdroj. Výpočet hmotnosti látky účastníci se výbuchu vyžaduje rozptylové modelování a výpočet koncentrace v každém bodě, protože pro každou látku existuje horní a dolní mez výbuchu (DMV a HMV) a pouze mezi těmito dvěma koncentračními mezemi může být směs látky a oxidovadla (většinou vzduch) zapálena. To znamená, že pouze množství odpovídající části oblaku mezi HMV a DMV se bude podílet na výpočtech UVCE (ačkoliv se mnoho analytiků domnívá, že množství hořlavého materiálu je větší než zmíněné a že výpočty by měly být rozšířeny tak, aby zahrnovaly i tu část oblaku, která odpovídá koncentraci větší nebo rovné $\frac{1}{2}$ DMV).

Letící trosky

Nežádoucím účinkem obvykle následujícím po výbuchu tanků 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).

Obecně je velice těžké předvídat a modelovat počet, velikost, směr a vzdálenost dopadu těchto trosek. Z tohoto důvodu jsou pokusy o modelování takových jevů obvykle založeny na empirických rovnicích a statistických datech z předešlých nehod.

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, hlavně co se týče hořlavých látek, by měla být pozornost zaměřena nejen na účinky na zdraví, ale také na odolnost ostatního strojního zařízení (tanky, čerpadla, potrubí, atd.) vůči určité tepelné radiační úrovni.

3.3.5 Modely zranitelnosti

3.3.5.1 Popis jevů

Výše popisované modely zdrojového členu, rozptylů, požárů a výbuchů poskytují ohodnocení koncových stavů nehodových událostí z důvodu kvantifikace hlavních fyzikálních parametrů (koncentrace, tepelná radiace, tlak). Na druhé straně modely zranitelnosti (modely dávek či odezvy) poskytují ohodnocení účinků těchto fyzikálních jevů na příjemce. Jinými slovy, účelem modelů zranitelnosti je kvantifikace odezvy příjemců na tyto nepříznivé fyzikální jevy.

Detailněji budou popsány tři kategorie účinků:

- účinky toxických plynů,
- účinky tepelné radiace,
- účinky nárazové tlakové vlny.

3.3.5.2 Modely

Modely toxických účinků

Modely toxických účinků se používají pro hodnocení následků expozice toxickým plynům na lidské zdraví. Z mnoha důvodů je obtížné přesně ocenit účinek expozice toxickým látkám. Hlavními důvody jsou skutečnosti, že existují rozmanité účinky (např. podráždění, dušení, slepota, poškození smyslových orgánů, smrt) a rozmanité stupně odezvy jednotlivců v typické populaci. Navíc existuje výrazný nedostatek dat týkajících se těchto účinků a experimentování není možné. Data jsou obvykle

získávána z řízených experimentů na laboratorních zvířatech. Extrapolace těchto dat na člověka je proto jedinou dostupnou technikou.

Při pokusu studovat a analyzovat účinky toxických látek byly definovány následující prahové hodnoty:

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

Další metodou, jak se vypořádat s toxickými účinky látek, je použití *probit funkce*. Tato metoda je založena na statistické analýze daného účinku na populaci zvířat (výsledky správně extrapolovány na lidské bytosti). Je potvrzeno, že se škody způsobené populaci stejnou dávkou stejné látky významně liší v závislosti na síle, zdravotním stavu a charakteristice jednotlivců. Z tohoto důvodu je pojem toxické dávky určen takto:

$$D = \int_0^T c^n(t) dt$$

Riziko definované jako pravděpodobnost úmrtí je následně vypočítáno jako:

$$R = 0,5 \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left((P - 5) / \sqrt{2} \right) \right]$$

kde *erf* je chybová funkce a *P* je probit hodnota.

Z toxické dávky, tepelné radiace a přetlakové vlny je vypočtena probit (**probability unit**) funkce:

- Pro toxické látky: $probit = a + b \ln(D)$,
kde $D = \int_0^T c^n(t) dt$
- Pro hořlavé látky: $probit = -14,9 + 2,56 \ln(D)$
kde $D = \int_0^T \frac{I^{4/3}(t) dt}{10^4}$
- Pro přetlakové vlny: $probit = -18,1 + 2,79 \ln(\Delta p)$

Krátké shrnutí přepočtu hodnoty probit funkce na podíl ovlivněné populace uvádí následující tabulka. Např. pokud vyjde *probit* = 6,08, znamená to, že je ovlivněno 86% populace.

Tabulka 3: Přepočet hodnoty probit funkce na podíl ovlivněné populace

%	0	2	4	6	8
0	-	2,95	3,25	3,45	3,59
10	3,72	3,82	3,92	4,01	4,08
20	4,16	4,23	4,29	4,36	4,42
30	4,48	4,53	4,59	4,64	4,69
40	4,75	4,80	4,85	4,90	4,95
50	5,00	5,05	5,10	5,15	5,20
60	5,25	5,31	5,36	5,41	5,47
70	5,52	5,58	5,64	5,71	5,77
80	5,84	5,92	5,99	6,08	6,18
90	6,28	6,41	6,55	6,75	7,05
99	7,33	7,41	7,46	7,65	7,88

Modely tepelné radiace

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

Tabulka 4: Prahové hodnoty účinků tepelné radiace na osoby a stavby

<i>Intenzita tepelného toku (kW/m^2)</i>	<i>Pozorované účinky</i>
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	Práh 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	Tato intenzita nevádí po dlouhou dobu

Kromě uvedených prahových hodnot se používá i výše zmíněné probit metody.

Modely nárazové přetlakové vlny

Pro kvantifikaci účinků nárazové přetlakové vlny se může použít podobných tabulek jako pro účinky tepelné radiace nebo výše uvedené probit metody. Následující tabulka uvádí hrubé úrovně zničení budov a konstrukcí přetlakem na čele tlakové vlny.

Tabulka 5: Úrovně zničení budov a konstrukcí přetlakem

Zóna	Úroveň zničení	Přetlak na čele tlakové vlny (kPa)
A	Úplné zničení	>83
B	Vážné škody	>35
C	Střední škody	>17
D	Lehké škody	>3,5

3.3.6 Integrace výsledků

Rozsah a konečný výstup analýzy následků závisí na rozsahu, souhrnné struktuře a cílech přístupu k hodnocení rizika, pomocí něhož je analýza prováděna. Pro některé přístupy je dostatečné počítat *fyzikální účinky* (tj. koncentrace, tepelnou radiaci, přetlak) jako funkci vzdálenosti od zdroje pro omezený počet nehodových scénářů. Jiné přístupy potřebují udělat krok kupředu, aby mohlo být požadováno *riziko*, vyjádřené jako pravděpodobnost úmrtí jednotlivce nacházejícího se na určitém místě. Rovněž může být jako výsledek požadován rozsah následků vyjádřený očekávaným počtem úmrtí jako funkce frekvence nehodových scénářů (F-N křivka). Mimoto počet analyzovaných nehodových scénářů by mohl být omezený nebo docela velký.

Především u kvantitativního hodnocení rizika (QRA) je požadována integrace rizika. To znamená, že jednotlivé výsledky hodnocení rizika pro různé kategorie úniků musí být zkombinovány pro poskytnutí konečných měr rizika.

Nechť $k = 1, 2, \dots, K$ jsou únikové kategorie, p_k jsou příslušné očekávané frekvence a $R_k(x,y)$ jsou *podmíněná* individuální rizika (pravděpodobnost úmrtí) udávající, že k -tý únik se uskuteční. Pak:

$$R(x,y) = \sum_{k=1}^K p_k \cdot R_k(x,y)$$

Tato míra rizika představuje nepodmíněné (nebo celkové) riziko a bere v úvahu všechny zdroje rizika.

3.3.7 Počítačové programy pro hodnocení následků

Záměrem zde není vyjmenovat všechny dostupné počítačové programy z této oblasti, nýbrž jen informovat o typických příkladech.

Nejznámější a nejpoužívanější kódy jsou:

Výtoky dvou fází:

- DEERS (Jaycor Inc.),

- PIPEPHASE (Simulation Sciences Inc.).

Rozptyl těžkého plynu

- DENZ/CRUNCH (UKAEA),
- CHARM (Radian corp.),
- SLAB (Lawrence Livermore National Laboratory, USA),
- HEGADAS/DEGASIS (US Coast Board).

Celková analýza následků (únik, vypařování, rozptyl, požár, výbuch, zranitelnost):

- WHAZAN, PHAST, SAFETI (Technica Int'l),
- RISKAT (Health and Safety Executive, VB),
- EFFECTS/DAMAGE, RISKCURVES (TNO, Holandsko),
- SOCRATES (NCSR Demokritos, Řecko).

3.3.8 Neurčitosti při hodnocení následků

Celá výše popsaná procedura hodnocení následků je plná neurčitostí.

Obecně existují dva typy neurčitostí: neurčitosti vlivem náhodné povahy jevů a neurčitosti v důsledku nedokonalých znalostí. První typ bere v úvahu některé jevy a proměnné, které se náhodně mění s časem. Meteorologické podmínky jsou takovým příkladem; není možné se 100%ní jistotou předpovědět směr a rychlost větru v určitém místě prostoru a určitém čase v budoucnu, i kdybychom přesně znali podmínky v současnosti i minulosti. Druhý typ uvažuje nedostatek informací, který je přítomen téměř v každém kroku analýzy. Naše znalosti jevů následujících po neočekávaném úniku nejsou dokonalé a obvykle se zakládají na empirických pravidlech a pozorováních omezeného počtu nehod. Vstupní parametry jsou také neurčité, protože přesné podmínky nehod nemohou být definovány předem. Aby se analytik mohl vypořádat s těmito neurčitostmi a nedostatečnými znalostmi, musí obvykle učinit hrubé předpoklady a vnést subjektivní úsudek, tj. dodatečný zdroj nejistoty, do celkové procedury. Výsledek je pak charakterizován jako výstup hodnocení následků s výskytem řady neurčitostí. Analytik a rozhodovací článek by si měli být vědomi těchto neurčitostí spojených s výsledky hodnocení rizika a brát je v úvahu při rizikově orientovaných rozhodnutích.

Jako příklad slouží některé zdroje neurčitostí:

- meteorologické podmínky,
- podmínky v uzavřených zařízeních (např. tlak, skupenství látky, množství látky v nádobě v čase prasknutí),
- velikost a umístění otvoru,
- podíl odsáté kapaliny,

- kapičky v uniklé látce,
- přítomnost iniciačního zdroje a přesný čas iniciace,
- chování letících trosek,
- zranitelnost osob a budov, atd.

Jeden způsob, jak ošetřit tyto neurčitosti, je opakování výpočtů pro všechny možné kombinace neurčitých vstupních hodnot a všechny možné změny použitých modelů a přidělit jim jednotlivé pravděpodobnosti. To normálně vede k nezvládnutelně vysokému počtu počítaných scénářů. Aby byl tento problém překonán, je buď pozornost zaměřena jen na několik důležitých proměnných (ostatní jsou známy), nebo jsou vybrány některé reprezentativní kategorie, podrobně analyzovány a vypočítány významné očekávané frekvence, nebo je vyhodnoceno velké množství scénářů, nebo je nakonec aplikován přístup simulací Monte Carlo. V každém případě by pozornost měla být věnována korelaci mezi nejistými proměnnými.

3.4 Analýza frekvencí a pravděpodobností událostí

Terminologie spojená s pojmy používanými při analýze frekvencí a pravděpodobností událostí vychází z norem oboru spolehlivosti. Spolehlivost je chápána jako souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a faktorů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržitelnost a zajištěnost údržby. Pojem spolehlivost se používá pouze pro obecný nekvantitativní popis. Vyčíslení spolehlivosti se provádí prostřednictvím souboru ukazatelů spolehlivosti, jejichž hodnoty pak kvantifikují jednotlivé parametry spolehlivosti. Základní normou, ze které se proto terminologicky vychází je **ČSN IEC 50(191) Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spolehlivost a jakost služeb.**

Tato kapitola ve stručnosti uvádí základní pojmy pravděpodobnosti a statistiky se zaměřením na matematické vyjádření a vyčíslení odpovědí na otázky typu:

- jak je pravděpodobné, že určitý systém, který nepřetržitě pracuje v určitém průmyslovém procesu, selže při své funkci v určitém časovém intervalu, např. mezi dvěma údržbami? ($\rightarrow$ *pravděpodobnost poruchy = pravděpodobnost selhání v časové periodě*),
- jak je pravděpodobné, že určitý záložní systém, který má přerušit určitý průmyslový proces, nebude fungovat při jeho aktivaci, např. v případě potřeby nouzového odstavení? ($\rightarrow$ *nepohotovost = pravděpodobnost selhání na výzvu v čase potřeby, tj. v určitém časovém okamžiku*),
- jak je pravděpodobné, že operátor ve stresové situaci splní svůj úkol? (*pravděpodobnost lidské chyby*).

Každá z těchto otázek má co do činění s rozhodovacím procesem a požaduje odpověď v podobě čísel, která popisují, jak jsou události „pravděpodobné“, tj. „frekvence“ (událostí z minulosti) a „pravděpodobnosti“ (událostí budoucích vycházejících z událostí minulých). Tato čísla představují základní vstup / výstup v pravděpodobnostní části kvantitativního hodnocení rizika (QRA).

Zatímco analýza následků operuje s „klasickými“ nástroji fyzikálních věd (sady diferenciálních rovnic sestávajících z fyzikálních množství reprezentovaných jako proměnné a vyčíslitelných pomocí pozorovatelných dat), pak „možnost“ toho, že se nějaké události vyskytnou, musí být vyhodnocena pomocí koncepčně jiných metod, tj. *pravděpodobnosti a statistiky*.

Terminologie a některé pojmy pravděpodobnosti

V přírodních vědách má být **model** chápán jako taková reprezentace, kdy vědomosti týkající se modelu poskytují pochopení modelované fyzikální situace. První hypotéza v jakémkoli takovém modelovacím úsilí je definice „relevantního“ **fyzikálního množství**, tj. zhuštění neuvěřitelného množství jevů existujících ve ‘fyzikálním světě’ do jedné speciální charakteristiky v souladu s daným problémem. Všechna fyzikální množství musí být kvantifikovatelná (alespoň v principu) jedinečným a nezaměnitelným způsobem jako je prostor, čas, hmota – nebo události. Všechna taková množství jsou (alespoň v principu) **kvantifikovatelná** (tj. převoditelná na **čísla**) buď **přímo** jako výsledek pozorování, nebo **nepřímo** jako výsledek vyhodnocení matematického vztahu. **Matematické vztahy** vyjadřují nějaký model jednoznačným způsobem a skládají se z **proměnných** a z modelu-specifických fixních hodnot, které jsou navzájem stavěny v určitém kontextu odrážející určitý řešený ‘svět’. Z takového vztahu může být neznámá proměnná kvantifikována, tj. realizace neznámé proměnné může být vyhodnocena a odpovídající hodnota (číslo) vytvořena. Jak **pravděpodobnost**, tak **statistika** pojednávají o modelech sestávajících z **náhodných proměnných**. Na rozdíl od pravděpodobnosti má být statistika chápána jako teorie o sekvencích události založená na frekvencích událostí z *minulosti*. Náhodná proměnná je funkcí výsledku **náhodného experimentu**, se kterým je číslo spojeno. Náhodný experiment je takový, který má různé možné

výsledky, takže není možné předem říci, který z nich se zrovna objeví či nastane.

„Čísla“, která používáme v QRA, se vždy vztahují k fyzikálním množstvím (náhodné proměnné v pravděpodobnostním modelu) a jsou buď přímo pozorovatelná prostřednictvím experimentu („objektivní data“), nebo prostřednictvím odhadu („subjektivní data“), nebo jsou nepřímo pozorovatelná přes matematické vztahy s jinými přímo pozorovatelnými množstvími.

Existují dva hlavní typy čísel, se kterými se musí pracovat při provádění QRA:

- relativní „frekvenční číslo“ $F(E)$, což je číslo udávající kolikrát se určitá událost E vyskytla v minulosti během N opakování identických pokusů („frekvence z minulosti“) a
- „pravděpodobnostní číslo“ $P(E)$, které může být, například, interpretováno tak, že se určitá (náhodná) událost E stane v budoucnosti na základě pozorování události E v minulosti (často nazývané „budoucí“ nebo „očekávaná frekvence“).

Podle toho je „pravděpodobnostní číslo“ $P(E)$ vztažené k určité události E (tj. pravděpodobnost události E) limita jeho „frekvenčního čísla“:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(F(E) = \left(\frac{x}{N} \right) \right) = P(E).$$

Protože v praxi není možné provádět nekonečně velké počty pokusů, ve kterých se N vyskytne x -krát, nahrazuje se $P(E)$ matematickým vztahem $r = \left(\frac{x}{N}\right)$ s „velkým počtem“ N (r je relativní frekvenční proměnná). Zvětšováním N zlepšíme odhad $P(E)$.

Axiomatický základ pravděpodobností

„Axiomatická teorie pravděpodobností“ je založena na axiomech, na kterých může být konstruován pravděpodobnostní teorém. Pro jakoukoli událost E , která je podmnožinou prostoru S sestávajícího ze všech možných výsledků náhodného pokusu (např. házení mincí), postulujeme axiomatická teorie existenci čísla $P(E)$, které je nazýváno pravděpodobností události E a které vyhovuje následujícím třem axiomům podle Kolmogorova (z raných třicátých let):

1. pro jakoukoli událost je $P(E) \geq 0$,
2. pro všechny vzájemně neslučitelné události platí $P\left(\bigcup_{i=1}^n E_i\right) = \sum_{i=1}^n P(E_i)$,
3. $P(S) = 1$.

Jinými slovy:

1. Pravděpodobnosti jsou čísla vždy větší nebo rovna nule,
2. pro jakýkoli spočetný soubor vzájemně neslučitelných událostí platí, že pravděpodobnost sjednocení jednotlivých událostí (tj. logický součet těchto událostí), je vždy součet jejich pravděpodobnostních čísel,
3. pravděpodobnost všech možných výsledků pokusu (tj. sjednocení všech jednotlivých událostí v prostoru) je vždy rovna 1.

Velkou výhodou tohoto axiomatického přístupu je jeho přesvědčivost, která se odráží v pozorovaných jevech kolem nás.

Pravděpodobnost jako stupeň víry

Na totéž axiomatické základě ale založený na myšlence, že na rozdíl od v praxi nedosažitelné limity relativní frekvence událostí je pravděpodobnost číslo mezi 0 a 1 a že kdokoli se rozhodne, může prosazovat jako platné tvrzení, jak „pravděpodobná“ je událost, byl rozvinut zcela odlišný koncepční přístup k pravděpodobnosti autory de Finettim a Savageem mezi 30. a 60. léty. Například, pokud někdo řekne, že pravděpodobnost jednoho výsledku náhodného pokusu (událost E_j v prostoru S sestávajícího ze všech možných výsledků E_i ($i=1,2,\dots,j,\dots,n$)) má hodnotu 0,5, pak to znamená, že ten někdo tvrdí, že daná událost E_j je víc „pravděpodobná“ než všechny ostatní pokusy z prostoru S , které mají pravděpodobnostní hodnotu $< 0,5$. Tento „subjektivistický“ přístup k pravděpodobnosti nevyžaduje množství stejných pokusů a je tak nezávislý na „objektivním“ stavu reality.

Pravděpodobnostní čísla zde nejsou nic jiného, než názor jednotlivce zcela závislý na jeho vzdělání a zkušenostech z minulosti s událostí E_j nebo „podobnými“ událostmi, a tak jsou vysoce subjektivní. Samozřejmě, že tato pravděpodobnostní čísla musí vyhovovat výše uvedeným třem axiomům.

Protože tato čísla jsou tím, co „kdokoli někdy něco říká, to platí“, je typickou kritikou této teorie to, že jiný člověk může mít rozdílné pravděpodobnosti pro stejné události. Tak se může zdát, že subjektivní pravděpodobnosti mají menší vypovídací schopnost a jsou otažitější od reálného světa. Avšak pokud zkušená osoba („expert“) souvisle přiřazuje pravděpodobnosti k myslitelným událostem a aktualizuje je, jakmile má nové poznatky (např. pozorovaná data z praxe), pak fyzikální skutečnost povede k vyjádření jejich názoru ve shodě se světem, který nás zajímá.

V situaci typické pro QRA není dostatek „objektivních dat“ (tj. frekvencí „podobných“ událostí z minulosti) pro přímou aplikaci přístupu s relativními frekvencemi, a proto se přistupuje k použití dodatečných informací pocházejících z jiných zdrojů, např. expertní odhad („subjektivní data“). Ústředním nástrojem pro kombinaci takových rozdílných typů informací je Bayesův klasický teorém:

$$P(E_1|E_2)=P(E_1) \cdot \{P(E_2|E_1)/P(E_2)\}.$$

Mějme dva výroky, které mohou být buď pravdivé, nebo nepravdivé, např. při výskytu události E_1 (první výrok) a při výskytu události E_2 (druhý výrok). Pravděpodobnost toho, že se E_1 vyskytuje za podmínky, že se E_2 už vyskytla, tj. $P(E_1|E_2)$ (druhotná pravděpodobnost – anglický ekvivalent je *posterior probability*), tj. pravděpodobnost, že první výrok je pravdivý potom, co jsme zjistili, že druhý výrok je pravdivý, tak tato pravděpodobnost se rovná stupni naší víry (před tím, než se dozvíme o pravděpodobnosti $P(E_2)$), tj. rovná se stupni naší víry v pravděpodobnost $P(E_1)$ násobené faktorem $P(E_2|E_1)/P(E_2)$, který aktualizuje náš stupeň víry ve světle nových poznatků.

Můžeme říci, že „subjektivní“ a „objektivní“ přístupy k pravděpodobnosti jsou dvě zcela odlišná pojetí, která obě vedou k číslům, se kterými se pracuje podle stejných pravidel (založených na pravděpodobnostních axiomech), ale jinak spolu nesouvisí. Pro určité situace (typicky pro situace v QRA, tj. pro **vzácný** výskyt událostí) jednoduše není aplikovatelný přístup pomocí relativních frekvencí. Na druhou stranu musí být použity subjektivní pravděpodobnosti, které musí formulovat „experti“ na základě pravděpodobnostních axiomů a které musí být neustále aktualizovány objektivními daty, tj. pozorováním, zkušenostmi z minulosti.

3.4.1 Modelování reality

3.4.1.1 Definování reality a její model

V kvantitativní analýze rizika definujeme následky, které nás zajímají, jako např. únik určitého množství nebezpečné látky z průmyslového zařízení. Problém definice spočívá v jasném pochopení a popisu vrcholové události, v jejích omezeních připadajících v úvahu a v úrovni podrobností.

Jako příklad můžeme uvažovat explozi určitého systému v provozu, např. tlakové nádoby, která je natlakovávána vzduchovým vysokotlakým čerpadlem. K explozi dojde vlivem přepumpování. Obvykle pak vyvstanou dvě otázky:

1. Pokud nádoba exploduje, jak rychle poletí její fragmenty?
2. Jak dlouhá doba uplynula od poslední údržby?

Obě otázky se ptají na číselné hodnoty fyzikálních veličin (rychlost a doba), které mohou být matematicky modelovány pomocí vztahů s různými proměnnými, např.:

1. rychlost fragmentu (= proměnná s neznámou hodnotou) s určitým průměrem (= proměnná s námi definovanou hodnotou) a hmotností (= proměnná s námi definovanou hodnotou) pod určitým tlakem v nádobě (= proměnná s hodnotou definovanou v úloze), a
2. „typická“ doba (= proměnná s neznámou hodnotou) od poslední údržby do prasknutí nádoby vlivem přepumpování – nádoba má určité charakteristiky (= množina proměnných s hodnotami definovanými v úloze).

Musí být učiněna řada předpokladů, týkajících se např. tlakového rozsahu v nádobě během (ab)normálního provozu, projektu nádoby, jejích materiálových charakteristik, charakteristik čerpadla atd.

3.4.1.2 Deterministický model reality

S ohledem na obě výše položené otázky nyní provedeme úvod do matematického modelování reality.

Studium chování fyzikálních systémů znamená studovat chování souborů pohybujících se objektů. Newtonův 2. pohybový zákon, *univerzální* vztah $F = m \frac{\partial v}{\partial t}$, popisuje chování jakéhokoliv fyzikálního objektu s hmotností m (např. jednotlivá část celé tlakové nádoby), co se týče jeho zrychlení $\frac{\partial v}{\partial t}$ (=změna jeho rychlosti v za dobu t), pokud na něj působí síla F .

Analytické řešení tohoto problému může být „snadno“ dosaženo řešením integrálu:

$$\int_{v_1}^{v_2} dv = \int_{t_1}^{t_2} dt \frac{F(t, s, v)}{m}.$$

Jinými slovy, pokud budeme znát přesné počáteční (t_1) podmínky jakéhokoliv fyzikálního objektu (m , s , v) a všechny příslušné faktory, které jej ovlivňují (síla F), pak je možné přesně předpovědět jeho budoucnost (od t_1 do t_2). To, co tento model umožňuje, je předvídatelnost jakékoliv události na fyzikálním systému, v kterémkoliv budoucím čase a s jakoukoliv přesností.

Toto „deterministické“ pojetí je založeno na myšlence, že následky mají své příčiny. Čím více se dozvíme o příčinách, tím více se dozvíme o následcích. Pokud víme všechno o příčinách (v minulosti), pak víme všechno o následcích (v budoucnosti). Tento determinismus nevyžaduje žádné pravděpodobnosti. V našem příkladu pokud známe hmotnosti všech částic tlakové nádoby, jejich polohu a rychlosti v čase t_1 , (např. v první sekundě provozu nádoby) stejně jako všech ostatních částic ve vesmíru (odkud plyne síla F na nádobu), pak známe rovněž jejich hmotnosti, jejich polohu a rychlosti v jakémkoli čase t_2 , (např. 2 sekundy po explozi) a můžeme tak snadno vypočítat rychlosti kteréhokoliv fragmentu (= soubor částic nádoby) v důsledku exploze.

Co se týče pravděpodobnosti, tak pro jakoukoliv událost E modelovanou deterministickým modelem je $P(E)$ buď 1 nebo 0 v závislosti na tom, zda se událost E nachází mezi sekvencemi analytického řešení deterministického modelu ($P(E)=1$), nebo ne ($P(E)=0$). Proto pokud by někdo znal polohy všech objektů ve vesmíru a síly, které na ně působí, v jednom okamžiku, pak by mohl vypočítat celou další budoucnost. Samozřejmě že to není z různých důvodů možné.

Ale vraťme se zpět k našemu příkladu s explozí tlakové nádoby. Nemůžeme použít řešení pro každou jednotlivou částici, ze které se skládá nádoba ($\cong 10^{23}$ částic) a na kterou působí síla F . Na druhé straně je ale v případě exploze síla F v principu známa a může být nepřímo vyčíslena, např. stanovením vnitřního tlaku π v nádobě. Proměnná π není náhodná proměnná, nýbrž její hodnota může být stanovena extrapolací uvažovaných specifických fyzikálních situací. Protože analytické řešení celého problému není dostupné či známé, musíme se uchýlit k metodickým přístupům a odvodit vzorec spojující rychlost fragmentu s jinými pozorovatelnými a významnými fyzikálními veličinami, pro které jsou pozorovatelná data k dispozici.

3.4.1.3 Pravděpodobnostní model reality

Deterministické teorie nemohou odpovědět na všechny otázky kladené ve fyzice. Např. nemůže být zodpovězena jednoduchá otázka, a to:

- Jak dlouhá doba uplynula od poslední údržby nádoby k její explozi?

To jasně představuje fyzikální problém, který nemůže být neuvažován v hodnocení rizika. A protože se původně ptá na statistickou otázku, musí být zodpovězen statistickou nebo pravděpodobnostní teorií. Abychom to objasnili, mohli bychom znovu zkusit kvantifikovat hodnotu „typické“ doby od poslední údržby nádoby k její explozi pomocí Newtonova druhého univerzálního zákona a řešit integrál pro t :

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{v_1}^{v_2} dv \frac{m}{F(t, s, v)}.$$

Znovu však podobně jako v předchozí kapitole nemůžeme rovnici v praxi použít, avšak pro zcela odlišný důvod. Počáteční podmínky jsou nyní zcela skryté a v principu nám není známo, jaká síla se v průběhu doby vyvine z nesčetně možných a přispívajících událostí a která nakonec vzroste natolik, že se stane skutečným iniciátorem exploze.

Jinými slovy, máme maximální nejistotu počátečních podmínek, a proto se musíme uchýlit k metodám, které jsou v podstatě založeny na nejistých počátečních podmínkách, tj. na pojetí náhodných procesů. Modely postavené na takových teoriích pracují s pravděpodobnostmi $P(E)$ události E , kde $0 < P(E) < 1$.

3.4.1.4 Jednoduché modely pro pravděpodobnosti událostí v čase

Jak už bylo řečeno výše, mnohé fyzikální jevy vztahující se k hodnocení rizika nemohou být modelovány deterministickým způsobem s použitím matematických vztahů jako v klasické fyzice. Například neexistuje žádný vzorec udávající dobu do poruchy (doba od poslední údržby do výskytu poruchy) pro jednotlivý fyzikální objekt,

např. pro určitý typ zařízení (systém, komponentu) v procesním závodě. K zodpovězení takových otázek byla navržena celá řada modelů. Mezi nimi ten nejjednodušší počítá pravděpodobnost přesně x výskytů události za časovou periodu T použitím Poissonova rozdělení (viz kterákoli učebnice pravděpodobnosti nebo statistiky). Toto rozdělení popisuje pravděpodobnostní hodnoty náhodných proměnných, které mohou nabývat hodnot $x = 0, 1, 2, \dots, N$ (N_0 , přirozená čísla a nula) a které mají charakteristický parametr θ .

$$P(x) = \frac{e^{-\theta} \theta^x}{x!} \quad \text{pro všechna } x \in S_x = N_0.$$

„Očekávaná hodnota“ pravděpodobnostního rozdělení dává její střed („průměr“) a je definována (v případě diskrétního pravděpodobnostního rozdělení) jako $\bar{x} = \sum_{x \in S_x} x P(x)$.

Pro Poissonovo rozdělení je $\bar{x} = \theta$, takže θ může být interpretováno jako průměrný počet výskytů námi uvažované události (např. nějaká porucha). Jeden z hlavních předpokladů tohoto modelu je **nezávislost výskytu všech událostí**.

Příklad: Předpokládejme, že v daném průmyslovém závodě je určitý výrobní proces vybaven 50 čerpadly stejného typu, která běží nepřetržitě nezávisle na sobě. Předpokládejme, že je známo, že v průměru 5% čerpadel během tohoto procesu selže ($\theta = 0,05 \cdot 50 = 2,5$). Pak pravděpodobnosti výskytu $x = 0, 1, 2, \dots, 50$ poruch během sledovaného procesu mohou být odhadnuty pomocí výše uvedeného vzorce. Výpočtem vychází a z obrázku 2 je patrná „nejpravděpodobnější“ hodnota $P(x)=0,26$ pro $x = 2$, tzn. že nejpravděpodobněji selžou 2 čerpadla. Pravděpodobnost, že neselže žádné, je poměrně nízká $P(0)=0,08$ a je vysoce nepravděpodobné, že selže víc než 10 čerpadel $P(10) \ll 0,01$.

Průměrný počet poruch θ může být uvažován jako součin časové periody délky t , ve které se vyskytne přesně x poruch, a rychlosti výskytu poruch λ , která je v QRA pro kontinuálně pracující provoz obvykle nazývána jako „intenzita poruch“ systému. Je definována jako:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)dt}{dt(1-F(t))},$$

kde: $f(t)dt$ je pravděpodobnost poruchy v infinitezimálním intervalu dt podle času t ,
 $\lambda(t)dt$ je pravděpodobnost poruchy v intervalu dt podle t , přičemž systém vydržel až do času t , $1-F(t)$ je pravděpodobnost, že systém neselže dříve než v čase t .

Pro systém, u kterého víme, že byl funkční v čase $t = 0$, je pravděpodobnost selhání v intervalu $[0, t]$ rovna $F(t)$, což je ve vztahu k „hustotě pravděpodobnosti“ podle rovnice

$$F(t) = \int_0^t f(t') dt'.$$

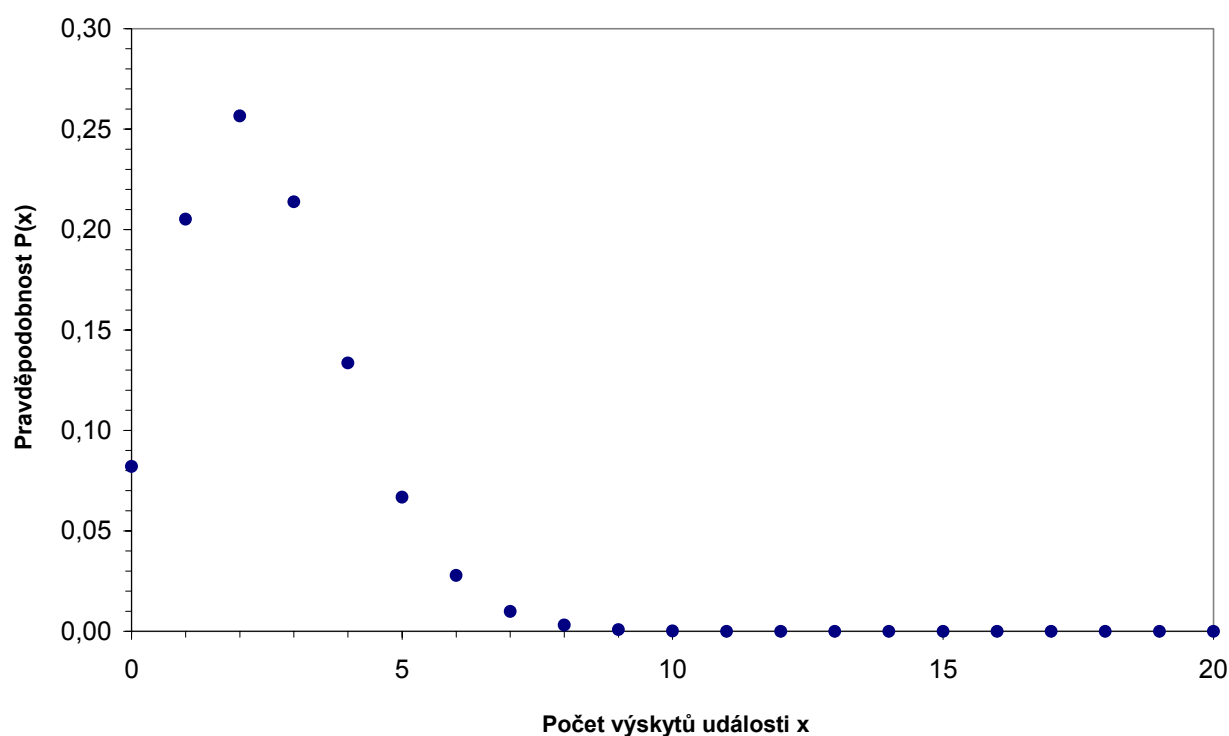
V QRA se obvykle předpokládá, že každý systém je na začátku provozu bez poruchy a že nakonec musí selhat, proto platí následující dvě rovnice během života systému:

$$F(0) = 0 \quad \text{a} \quad F(\infty) = 1.$$

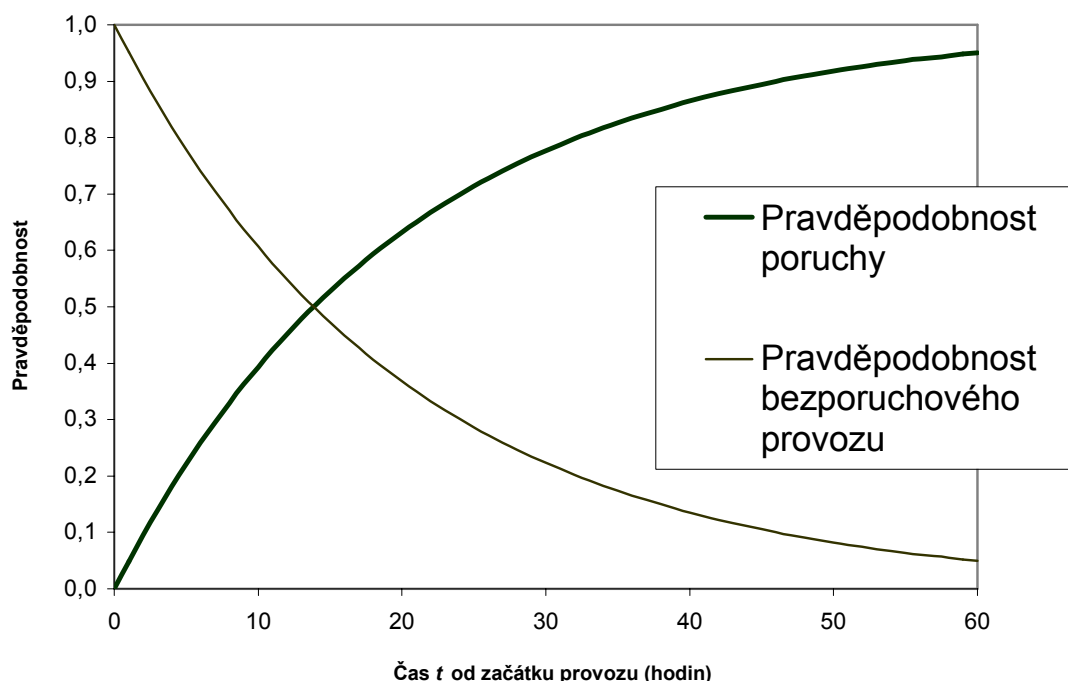
Výše uvedená rovnice pro $F(t)$ může být podle těchto okrajových podmínek derivována a dostaneme $\frac{dF(t)}{dt} = f(t)$ a spolu s definicí pro $\lambda(t)$ dostaneme diferenciální rovnici:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)} = \frac{-d \ln(1 - F(t))}{dt},$$

kteřá může být integrována na výsledek: $1 - F(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t') dt'} \equiv R(t)$



Obrázek 2: Příklad výskytu pravděpodobností použitím Poissonova rozdělení



Obrázek 3: Graf pravděpodobnosti bezporuchového provozu a pravděpodobnosti poruchy s intenzitou poruch $\lambda = 0,05/\text{hod}$

Jelikož se v QRA studiích obvykle předpokládá, že se poruchy vyskytují s konstantní frekvencí po dlouhou dobu, může být **pravděpodobnost bezporuchového provozu**, jakožto míra pravděpodobnosti, že se daná událost nevyskytne v daném systému po dané časové období t a za daných specifikovaných provozních podmínek, snadno vyčíslena následovně:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t') dt'} = e^{-\lambda t}.$$

Obrázek 3 ukazuje funkci pravděpodobnosti bezporuchového provozu jednoho z čerpadel z naší předchozí sady 50 čerpadel za předpokladu, že výrobní proces, ve kterém bylo čerpadlo provozováno, trval 1 hodinu. Pozorovaný průměrný počet poruch v této časové periodě, tj. $\theta = 2,5$, dělená počtem čerpadel (= 50) dává hodnotu intenzity poruch $\lambda = 0,05$ pro jedno čerpadlo s jednotkou [1/hodina].

Pravděpodobnost bezporuchového provozu je jedním ze základních ukazatelů spolehlivosti a je uvedena v def. 191-12-01 ČSN IEC 50(191). Doplňková (komplementární) funkce $F(t)$ k pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$, $F(t)=1-R(t)$, je nazývána **pravděpodobností poruchy** systému a odpovídá pravděpodobnosti, že systém selže ne později než v čase t . Jak je patrné z obrázku č.3, pravděpodobnost bezporuchového provozu se s rostoucím časem snižuje exponenciálně od 1 prakticky k nule a pravděpodobnost poruchy vykazuje opačný trend. V tomto případě je střední hodnota pravděpodobnosti bezporuchového provozu čerpadla během předpokládaného provozu ($t = 1$ hodina) poměrně vysoká a neklesne pod 0,95.

Při diskusích o kvantitativních mírách spolehlivosti je třeba vycházet z normovaných ukazatelů spolehlivosti definovaných v ČSN IEC 50(191). Dalším užitečným ukazatelem spolehlivosti může být pojem „střední doba do poruchy“ MTTF (z anglického „Mean Time to Failure“) uvedený v def. 191-12-07 ČSN IEC 50(191). Je to první aspekt („očekávání“ nebo „střední hodnota“) hustoty pravděpodobnosti poruch $f(t)$ systému a může být vysvětlen jako průměrná doba do selhání systému. MTTF je zvláště jednoduchá v případě náhodných poruch (případ kontinuálního pravděpodobnostního rozdělení):

$$MTTF = \frac{\int_0^{\infty} tf(t)dt}{\int_0^{\infty} f(t)dt} = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Předpokládejme, že bylo pozorováno x poruch určité komponenty v časovém intervalu délky T . V tomto případě a za výše uvedeného předpokladu výskytu jen náhodných poruch může být „maximální pravděpodobný odhad“ pro MTTF počítán jako:

$$MTTF = \frac{T}{x}.$$

Pokud se vrátíme k našemu příkladu s tlakovou nádobou, předpokládejme, že v závodě, kde provádíme QRA, je pouze jedna nádoba takového typu a že během 20 let provozu nedošlo k jejímu prasknutí vlivem přepumpování ($x = 0$ a tím $MTTF = „\infty“$). Nicméně víme, že na celém světě se provozuje celkem 1000 tlakových nádob stejného typu. Dále víme z dostupných záznamů o nehodách, že se během $T = 20000$ provoz-roků (tj. $1000 \text{ nádob} \times 20 \text{ let}$) staly $x = 2$ katastrofické události s prasknutím nádoby vlivem přepumpování. Proto můžeme v prvním přiblížení vyhodnotit, že pro tento typ tlakové nádoby je průměrná doba do exploze vlivem přepumpování 10000 let a průměrná frekvence takového prasknutí $\lambda = 10^{-4}/\text{rok}$. „Nejistota“ takového odhadu by mohla být vyčíslena vyhodnocením statistického konfidenčního intervalu „čísla“ generovaného z náhodné proměnné x v Poissonově rozdělení podle:

$$\frac{1}{2} \chi^2_{2x; \frac{\alpha}{2}} \leq x \leq \frac{1}{2} \chi^2_{2(x+1); 1-\frac{\alpha}{2}}$$

kde: x je počet poruchových nebo nehodových událostí
 $\chi^2_{a;b}$ je „b“ percentil χ^2 rozdělení s „a“ stupni volnosti na hladině významnosti $1-\alpha$
 (tabelováno v kterékoli učebnici statistiky).

„Nejistota“ odhadu intenzity poruch $\lambda = 10^{-4}/\text{rok}$ může být na hladině významnosti 95% ($1-\alpha = 0,95$) vyčíslena následovně:

$$\frac{1}{2T} 0,5 \leq \lambda \leq \frac{1}{2T} 14,4,$$

což dává $1,3 \cdot 10^{-5}/\text{rok} \leq \lambda \leq 3,6 \cdot 10^{-4}/\text{rok}$ a což zároveň znamená, že pravděpodobnost, že „pravdivá“ hodnota intenzity poruch leží v intervalu $1,3 \cdot 10^{-5}$ a $3,6 \cdot 10^{-4}$ za rok, je 0,95.

U realistické QRA musí být uvažováno „pásma nejistoty“ pro každou modelovanou proměnnou (např. intenzitu poruch a oprav) a musí být zahrnuto do modelu.

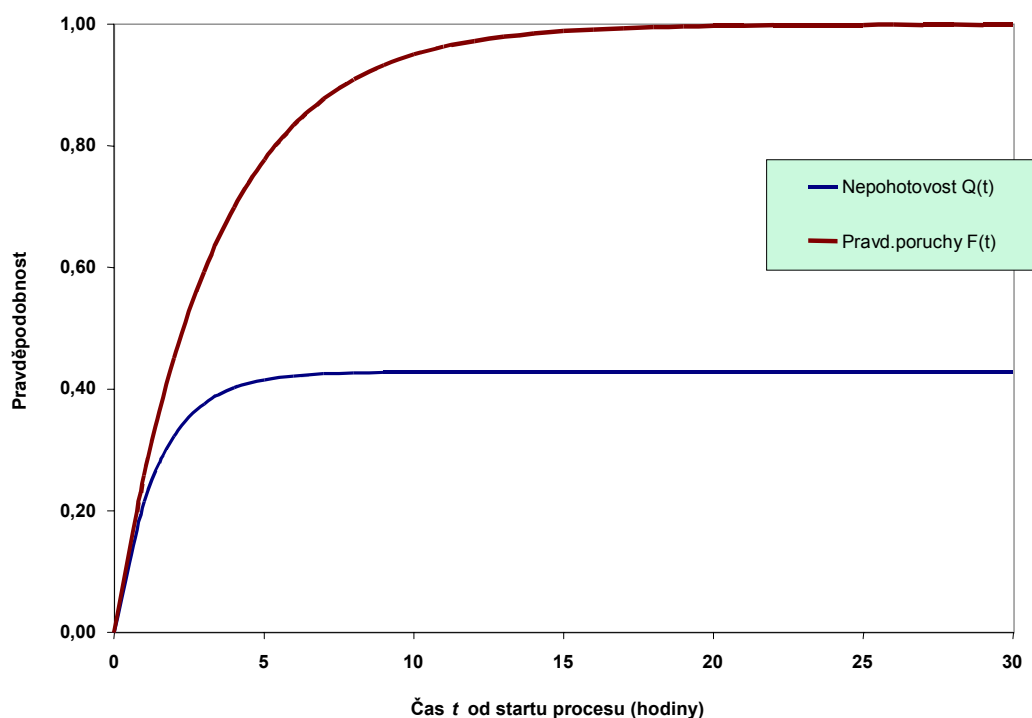
Mělo by se zdůraznit, že všechny výše uvedené vztahy pro bezporuchovost jsou platné pro analýzu určitého systému, který kromě jiných přiblížení nedegraduje s časem (časové vlivy na intenzitu poruch se neuvažují) a nemůže být opravován. Takové *neopravovatelné* systémy se nacházejí pouze ve dvou možných stavech: buď jsou v provozu, nebo v poruše. Avšak v reálném životě a reálné QRA musí být uvažován další stav, a to oprava, protože většina systémů ve výrobních procesech je *opravitelná*. Proto znalost spolehlivosti systému není až tak důležitá, jako pohotovost systému v okamžiku, kdy hrozí nehoda.

Funkce okamžité pohotovosti $A(t)$ systému je definována jako pravděpodobnost, že systém je ve stavu schopném plnit v daných podmínkách a v daném časovém okamžiku požadovanou funkci (def. 191-11-01 ČSN IEC 50(191)). Pravděpodobnost $Q(t) \equiv 1 - A(t)$ se nazývá funkce okamžité nepohotovosti (def. 191-11-02 ČSN IEC 50(191)) a může být stanovena následovně:

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \frac{\lambda}{\lambda + \mu}.$$

Zde je λ intenzita poruch systému a μ intenzita opravy systému. Analogicky k inverzní intenzitě poruch je μ^{-1} „Střední doba do opravy“ (MTTR), tj. průměrná doba odstávky systému vlivem oprav. Samozřejmě že pokud je systém pojímán jako neopravovaný, nepohotovost přechází v pravděpodobnost poruchy, tj. $Q(t; \mu=0) = F(t)$.

Důležitým rozdílem mezi nepohotovostí $Q(t)$ a pravděpodobností poruchy $F(t)$ je jejich chování po dlouhou časovou periodu. S rostoucím t blíží se $F(t)$ hodnotě 1, zatímco $Q(t)$ dosahuje ustálené hodnoty $\frac{\lambda}{\lambda + \mu}$, jak znázorňuje obrázek 4 pro náhodně zvolená čísla pro λ a μ .



Obrázek 4: Typický příklad pravděpodobnosti poruchy a nepohotovosti systému pro $\lambda = 0,3/\text{hod}$ a $\mu = 0,4/\text{hod}$

3.4.1.5 Jednoduché modely pro pravděpodobnosti událostí na požadavek

Jiný příklad fyzikální situace, která nemůže být popsána deterministickými vztahy, je otázka systému, který funguje na požadavek (např. systém nouzového odstavení) a u kterého nás zajímá počet požadavků do poruchy. Poruchy na požadavek se u systému objevují během jeho přerušovaných, eventuálně opakujících se činností: buď systém funguje na k -tý požadavek (událost 1, úspěch), nebo nefunguje (událost 2, neúspěch). I když systém pracoval po $(k-1)$ požadavků, neznamená to, že bude také fungovat na k -tý požadavek. Proto musíme nalézt rovnici pro podmíněnou pravděpodobnost, že systém bude fungovat na k -tý požadavek s tím, že fungoval po $(k-1)$ požadavků.

Znovu byl použit stochastický (náhodný) model pomocí binomického rozdělení (viz jakoukoli učebnici pravděpodobnosti a statistiky). Toto rozdělení popisuje pravděpodobnostní hodnoty náhodných veličin, které mohou dosahovat právě jen dvou hodnot, a to $x = 1$ nebo $x = 0$, a $P(x=1) = p$, zaznamenávaných v řadách (náhodné pokusy). Pokud uvažujeme m nezávislých opakování náhodného pokusu (tj. požadavků), pak pravděpodobnostní hodnoty pro k poruch či selhání, které nás zajímají, jsou:

$$P(k) = \binom{m}{k} p^k (1-p)^{m-k}$$

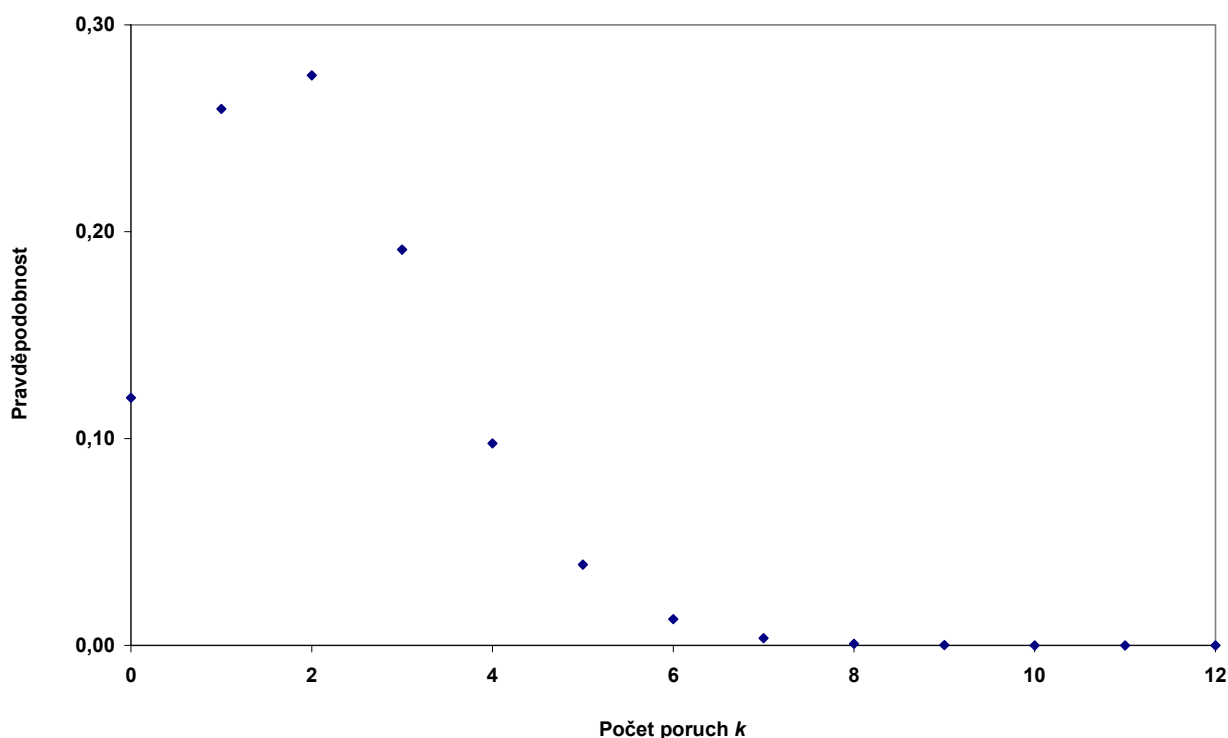
pro všechna $k \in S_k = N_0$, přičemž výraz $\binom{m}{k}$ má následující řešení: $\binom{m}{k} = \frac{m!}{k!(m-k)!}$.

V aplikacích QRA se obvykle používá $P(x=1) = p$ pro pravděpodobnost selhání systému „na požadavek“ (často nazývaná intenzita selhání na požadavek, λ_D) a $P(x=0)=1-p$ pro pravděpodobnost doplňkové (komplementární) události čili úspěch systému na požadavek. Střední hodnota tohoto rozdělení, $\bar{k}$, je součin m a p . Může být snadno dokázáno (a intuitivně je to zřejmé), že limita binomického rozdělení (tj. „nekonečný počet“ opakování náhodného pokusu, $m \rightarrow \infty$) vede k Poissonovu rozdělení.

Jako příklad předpokládejme, že v daném průmyslovém podniku má určité čerpadlo (např. čerpadlo připojené k tlakové nádobě) „maximální možnost“ intenzity selhání na požadavek:

$$\lambda_D = p = \frac{\text{počet selhání}}{\text{počet pokusů (výzev)}} = \frac{2}{52} = 0,04 / \text{výzvu}$$

(např. čerpadlo, které je startováno jednou za týden za účelem iniciace určitého výrobního procesu a které bylo sledováno po dobu jednoho roku). Na tomto základě mohou být stanoveny pravděpodobnosti výskytu $k = 1, 2, \dots, 52$ poruch čerpadel během jednoho roku provozu ($m = 52$). Výsledky ukazuje obrázek 5, z něhož je patrné, že „nejpravděpodobnější“ jsou $k = 2$ poruchy ($P(2)=0,28$) a „velmi nepravděpodobné“ je mít víc než 7 poruch ($P(>7) \ll 0,01$).



Obrázek 5: Příklad výskytu pravděpodobností událostí s binomickým rozdělením pro $\lambda_D = p = 0,04/\text{požadavek}$

V zásadě je pravděpodobnost selhání na požadavek totožná s nepohotovostí. Prezentovaný příklad výpočtu vycházel z vyhodnocení podílu počtu neúspěšných pokusů k celkovému počtu pokusů. Stejně tak lze postupovat při vyhodnocení podílu dob, kdy hodnocený objekt je v poruše k celkové době hodnocení.

3.4.1.6 Shrnutí o pravděpodobnostních modelech v QRA

Shrňme:

- Ve studiích QRA obecně přicházejí v úvahu dva typy systémů: jednak ty, co pracují na požadavek, jednak ty, co pracují kontinuálně.
- Existují dva typy podmíněné pravděpodobnosti, jež nás zajímají: „intenzita poruch na požadavek“ pro přerušovaně pracující systémy a „intenzita poruch za určitou provozní dobu“ pro systémy vykovávající nepřetržitou činnost.
- Intenzita poruch $\lambda(t)$ obsahuje všechny informace nutné pro popis poruch systému; pokud pro $\lambda(t)$ není známa časová závislost, je obvykle aproximována konstantní hodnotou λ (časově průměrná hodnota).
- Pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ může být použita pro popis bezporuchovosti systému, který nemůže být opraven, zatímco funkce okamžité pohotovosti $A(t)$ je použita pro systémy, které projdou opravou.

Takže existují dvě základní pravděpodobnostní míry úrovně spolehlivosti zařízení, a to: **pohotovost** a **bezporuchovost**. Komplementární neboli doplňkové výrazy jsou **nepohotovost** a **poruchovost**. Nepohotovost je oceněna počtem hodin, kdy je zařízení odstaveno v daném časovém období (toto období zahrnuje všechny

příspěvky k odstavení, tj. nejenom od samotných poruch, ale i od plánovaných a neplánovaných testů a oprav). Poruchovost je oceněna počtem poruch v daném časovém období. Poruchovost a nepohotovost určují různé stránky úrovně spolehlivosti zařízení. Zařízení, které selhává často, ale je rychle opraveno, má nízkou úroveň bezporuchovosti a vysokou úroveň pohotovosti, zatímco zařízení, které selhává zřídka, ale zůstává po dlouhou dobu odstaveno, má vysokou úroveň bezporuchovosti a nízkou úroveň pohotovosti.

Oba pojmy, **pohotovost** a **bezporuchovost**, jsou důležité pro bezpečnost a rizikovost. Zařízení musí být pohotové provést svou funkci a musí být bezporuchové pro opravdové vykonávání své funkce. Ukazateli pohotovosti se kvantifikuje schopnost zařízení vykonávat svou funkci v daném časovém okamžiku nebo na požadavek. Ukazateli bezporuchovosti se kvantifikuje schopnost zařízení vykonávat svou funkci bez poruchy. Příslušné ukazatele spolehlivosti sice kvantifikují různé aspekty funkceschopnosti systému, ale mají přímou spojitost s rizikovostí provozu či podniku.

3.4.2 Modelovací techniky

3.4.2.1 Analýza stromu poruch (poruchových stavů)

Analytik za normálních okolností počítá několik spolehlivostních charakteristik. Jsou to očekávaný počet poruch za rok, pravděpodobnost selhání na výzvu a pravděpodobnost poruchy. Například, chce-li analytik vyhodnotit frekvenci velkého úniku toxické látky, musí za použití technik stromu poruch/událostí spočítat (1) očekávanou frekvenci ztráty chlazení reaktoru (s exotermickou reakcí a možností úniku látky), (2) pravděpodobnost, že blokáda reaktoru selže na výzvu odstavit reaktor a (3) pravděpodobnost poruchy nouzové pračky plynu.

Důležitou úvahou při CPQRA je výběr patřičného spolehlivostního parametru pro jakoukoli událost, která se vyskytne ve stromu poruch/událostí, a určení, zda událost je či není nahraditelná. Špatný výběr spolehlivostního parametru nebo nesprávné zacházení s událostí jako nahraditelnou (nebo nenahraditelnou) může způsobit významné nadhodnocení nebo podhodnocení očekávané frekvence události.

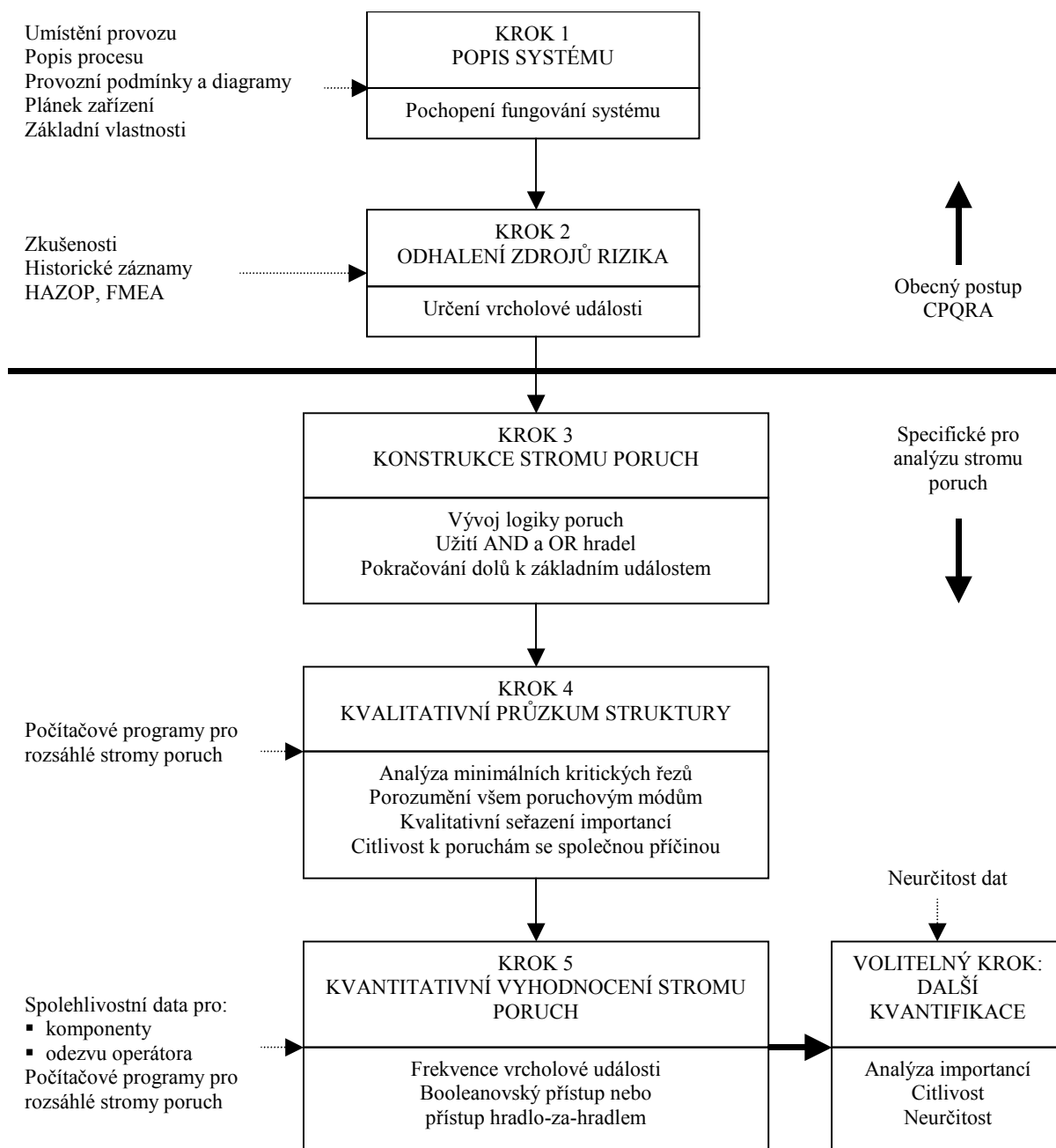
Jednoduchý model stromu poruch může být analyzován metodou hradlo-za-hradlem, velký nebo komplexní strom vyžaduje použití metody redukce stromu poruch na tzv. minimální kritické řezy.

Analýza stromu poruch umožňuje odhad frekvence nebezpečné události (vrcholová událost) z logického modelu poruchového mechanismu systému. Takový model je založen na kombinacích poruch: (1) níže systémově postavených komponent, (2) bezpečnostních systémů a (3) lidské spolehlivosti. Příkladem může být předpověď frekvence velkého požáru vlivem selhání čerpadla hořlavé kapaliny, které má speciální ventily a protipožární ochranu. Z důvodu speciálních konstrukčních provedení nemohou být použita historická data o požárech čerpadel, ale frekvence požáru musí být stanovena na základě užívání čerpadla, dále na základě frekvence úniků přes těsnění, spolehlivosti ventilů a zařízení protipožární ochrany a reakcí operátora.

Současná technika analýzy stromu poruch používá kombinaci relativně jednoduchých logických hradel (obvykle AND a OR hradla) pro syntézu poruchového modelu určitého zařízení. Frekvence nebo pravděpodobnost vrcholové události je spočtena z poruchových dat jednodušších událostí. Vrcholovou událostí může být BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), vypuštění z odlehčovacího systému do atmosféry nebo nezvládnutá reakce. Strom událostí nám kromě kvantitativních informací o vrcholové události může dát cenné kvalitativní pohledy na možné poruchové módy komplexního systému díky analýze minimálních kritických řezů.

Základním předpokladem v FTA (analýza stromu poruch) je binární chování všech poruch. To znamená, že operátor nebo komponenta buď provede činnost úspěšně, nebo úplně selže. Podobně se předpokládá, že systém úspěšně vykonává svou funkci, pokud všechny jeho komponenty pracují. Stromy poruch neumožňují pracovat s částečně degradovanými systémy nebo jejich komponentami. Podobně, FTA pracuje pouze s okamžitými (rychlými) poruchami. Časové prodlevy se v FTA neuvažují, ačkoliv jsou časté u reálných událostí.

FTA se dosud uplatňovala především na poli spolehlivosti, v CPQRA se užití poněkud odlišuje od spolehlivostních aplikací, protože vrcholová událost je obvykle nebezpečná událost (ohraničená exploze, únik hořlavé látky atd.).



Obrázek 6: Logický diagram pro aplikaci analýzy stromu poruch (FTA)

Popis techniky FTA

Obvyklými cíli aplikace FTA jsou některé z následujících:

- odhad frekvence výskytu nehodové události (nebo pravděpodobnosti poruchy zařízení),
- určení kombinací poruch zařízení, provozních podmínek, podmínek prostředí a lidských chyb, které přispívají k nehodové události,
- zjištění nápravných opatření pro zlepšení spolehlivosti nebo bezpečnosti a určení jejich dopadu.

Obrázek 6 schematicky znázorňuje postup při provádění techniky analýzy stromu poruch. Z jednotlivých kroků se podrobněji zastavíme u konstrukce stromu poruch, u kvalitativního průzkumu struktury stromu poruch a kvantitativního vyhodnocení stromu poruch.

Krok 3 - Konstrukce stromu poruch

Ruční konstrukce stromu poruch je spíše umění než věda. Strom poruch je logický diagram, který ukazuje, jak může systém selhat. Obvykle se postupuje shora dolů. Je vybrána nežádoucí událost, která se stane vrcholovou událostí a u které se identifikují nezbytné a dostačující příčiny spolu s jejich logickými vztahy. Aby toho analytik dosáhl, ptá se: „Jak se to mohlo stát?“ nebo „Jaké jsou příčiny této události?“. Tento proces deduktivního usuzování pokračuje, dokud se analytik nedomnívá, že bylo dosaženo dostatečného rozlišení, aby to stačilo pro pozdější přidělování pravděpodobností nebo frekvencí základním událostem.

Na zcela běžném příkladu vrcholové události „porucha pokojové lampy, lampa nesvítí“ si názorně osvětlíme konstrukci stromu poruch. Začínáme úvahou, jaký může být důvod, že lampa nesvítí. Analytik odhalí dva důvody:

- porucha žárovky,
- selhání elektřiny, která se nedostala k lampě.

Analytik pak zkoumá příčiny obou těchto možností. Důvody pro „selhání žárovky“ mohou být:

- žárovka je spálená,
- v lampě není žárovka.

Důvody pro „selhání elektřiny, která se nedostala k lampě“ mohou být:

- porucha vypínače,
- lampa není zapnuta do zásuvky,
- není elektřina v zásuvce ve zdi.

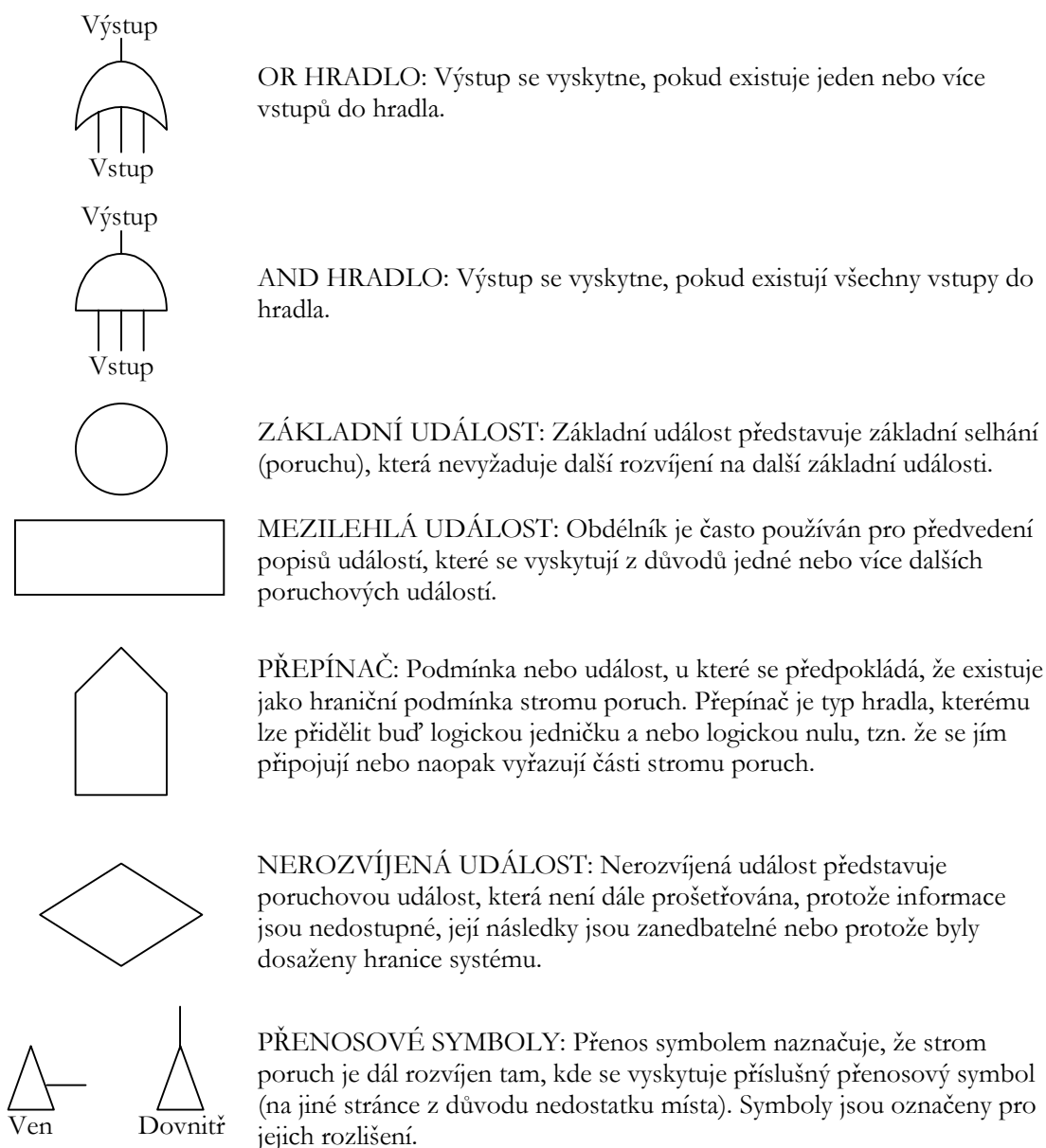
Analytik dále může prošetřit důvody, proč není elektřina v zásuvce ve zdi:

- krátká elektrická instalace,
- spálená pojistka v hlavní skříni,
- není elektřina v domě.

Tento dotazovací proces pokračuje tak dlouho, dokud analytik není spokojen s tím, že poruchový model patřičně popisuje studovaný problém.

Je zřejmé, že tento proces by mohl pokračovat pořád. Mohli bychom se ptát, proč není elektřina v domě, jaké jsou problémy v rozvodné síti, proč není palivo na výrobu elektřiny atd., což souvisí s definováním hranic analýzy.

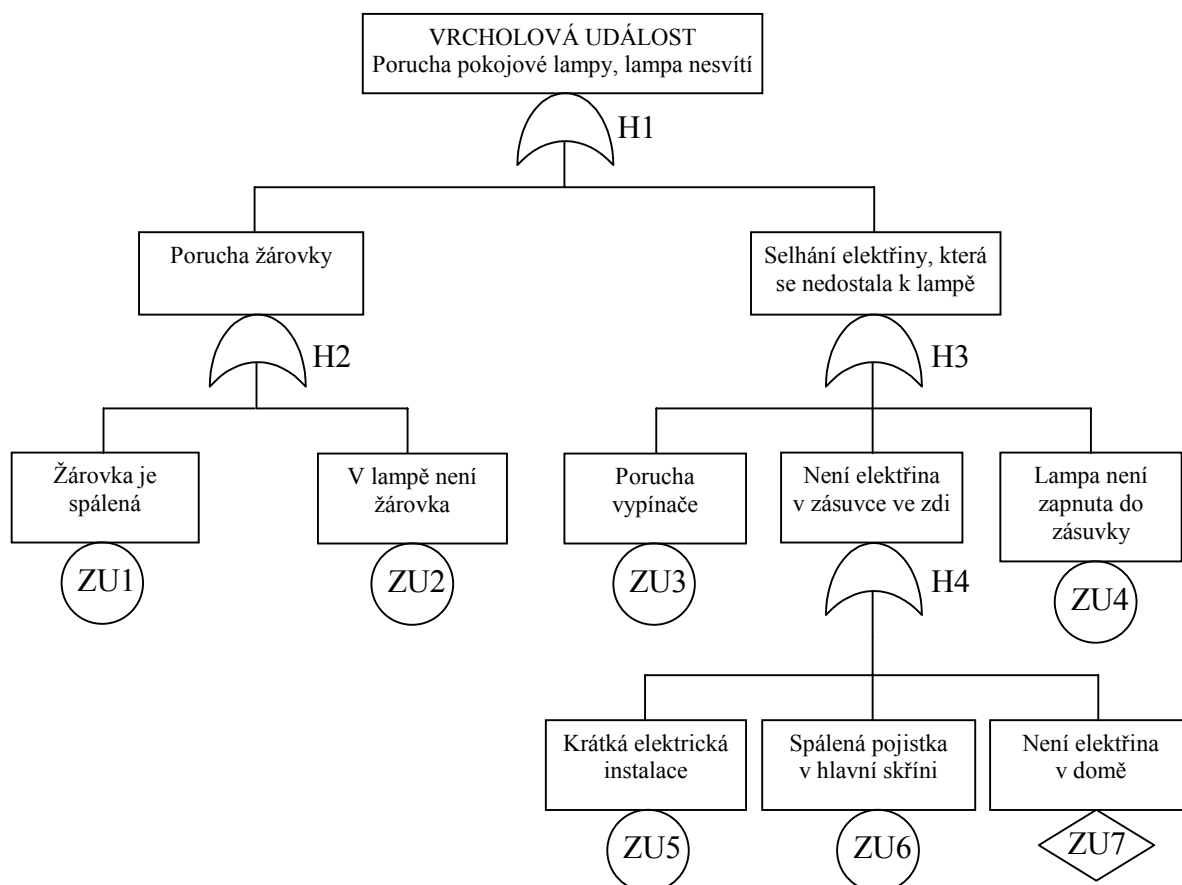
Jakmile je ukončen dotazovací proces, může být konstruován strom poruch pomocí standardně používaných symbolů (viz obrázek 7).



Obrázek 7: Standardní symboly stromu poruch

V rozsáhlých stromech poruch je běžné označovat každé logické hradlo a základní událost jedinečným identifikátorem, např. logická hradla mohou být označena H1, H2 atd. a základní události ZU1, ZU2 atd. Tato označení jsou pak používána jako logické vstupy počítačových programů pro výpočet frekvence vrcholové události. Taková označení byla použita u stromu poruch pro náš příklad s lampou (viz obrázek 8). Všimněme si, že nerozvíjená událost ZU7 představuje podmínku „není elektřina v domě“. Vnější zdi domu jsou u tohoto příkladu hranice systému.

Je nutno podotknout, že ručně konstruovanému stromu poruch je vlastní subjektivnost a může být neúplný. Avšak umožňuje získat úplnou analytickou představu a porozumění systému a poruchovým módům. Ruční konstrukce stromu poruch je nejpoužívanější přístup.



Obrázek 8: Strom poruch pro příklad nesvítící pokojové lampy

Některé běžné chyby, kterých se dopouštějí začátečníci při konstrukci stromu poruch:

- rychlý rozvoj jedné větve stromu bez systematického postupu dolů úrovní po úrovni (sklon dosáhnout základních událostí co nejdříve bez obsáhlých popisů dílčích událostí),
- vynechání (opominutí) důležitého poruchového mechanismu nebo chybný předpoklad o zanedbatelném příspěvku,
- nesprávné kombinace frekvence nebo pravděpodobnosti do logických hradel,
- nevhodné vyvážení mezi poruchami komponent a lidskými chybami,
- nerozpoznání vztahu (závislosti) mezi poruchami.

Existují rovněž pokročilejší techniky konstrukce stromu poruch, jako jsou algoritmický přístup nebo zvláště s nástupem počítačů automatizované sestavování stromu poruch.

Krok 4 - Kvalitativní průzkum struktury stromu poruch

Jakmile je strom poruch sestrojen, může být kvalitativně vyšetřen pro porozumění mechanismům poruch. Tato informace je cenná proto, že vnáší jasno do možných poruchových módů, tj. do všech kombinací událostí, které vedou k vrcholové události. Tento postup je znám jako analýza minimálních kritických řezů.

Jednoduché stromy událostí sestávající jen z několika hradel mohou být přezkoumány jen důkladnou prohlídkou. U složitějších stromů musíme použít metodicky přesnější prostředky, jako je Booleanova analýza. Strom poruch může být převeden na ekvivalentní Booleanův výraz definující vrcholovou událost jako kombinaci všech nižších událostí. Tento výraz se obvykle rozvíjí pomocí zákonů Booleanovy algebry, dokud nevyjadřuje vrcholovou událost jako součet všech minimálních kritických řezů.

Kvalitativní importance (důležitost) – hlavně pořadí řady základních událostí ve všech poruchových skupinách – může být stanovena z minimálních kritických řezů. Kritické řezy jsou řazeny v pořadí počtu základních událostí, které musí být kombinovány, aby výsledkem byla vrcholová událost. Je dokázáno, že jednoduché poruchové kritické řezy (jednoduché ohrožení) je vysoce nežádoucí, protože jen jedna porucha (selhání) může vést k vrcholové události; dva poruchové kritické řezy (zdvojené ohrožení) jsou lepší atd. Nicméně kvalitativní přístup může být zavádějící. Je dost možné, že větší kritické řezy budou mít vyšší frekvenci selhání než menší kritické řezy. Kvantitativní zhodnocení je požadováno pro určení nejfrekventovanější příčiny vrcholové události.

Samostatným problémem jsou poruchy se společnou příčinou, kdy se může jednou poruchou vyřadit několik komponent nebo systémů najednou.

Krok 5 - Kvantitativní vyhodnocení stromu poruch

Jakmile máme konečnou strukturu stromu poruch a odhadnuty frekvence pro každou základní událost nebo nerozvinutou událost, je možné spočítat frekvenci nebo pravděpodobnost vrcholové události. Tento výpočet se za normálních okolností provádí užitím přístupu minimálních kritických řezů vyjádřených Booleanovým výrazem diskutovaným v kroku 4. Tento přístup je použitelný pro velké i malé stromy.

Alternativním je jednodušší přístup hradlo-za-hradlem, který není vhodný pro rozsáhlejší stromy poruch. Je náchylný k numerické chybě při výpočtu frekvence vrcholové události, pokud má strom v různých větvích opakující se události, které jsou odděleny AND hradlem.

Technika hrdlo-za-hradlem začíná u základních událostí stromu poruch a pokračuje nahoru k vrcholové události. Před výpočtem výstupu z hradla musí být definovány všechny vstupy do hradla. Všechna spodní hradla musí být spočtena před pokračováním do další vyšší hladiny. Použití techniky hradlo-za-hradlem je předvedeno na příkladu 1 na straně 85 a dále.

Matematické vztahy použité v technice hradlo-za-hradlem uvádí tabulka 6, str. 80. Předpokládá se, že všechny vstupy do hradel jsou statisticky nezávislé a že strom je koherentní, tzn. že používá jen hradla typu AND a OR pro vyjádření logiky poruch. Časově závislá hradla, blokové podmínky nebo „NOR“ hradla se nepřipouští (na

toto pokročilé téma zde není místo). Tyto matematické vztahy mohou být rozšířeny na více než dva vstupy (součty pro OR hradla a součiny pro AND hradla). Pokud má OR hradlo několik vstupů, které se sčítají, všechny součinné členy se zanedbávají a tím výstupní součet bude o něco málo vyšší (viz tabulku 6). Toto zjednodušení způsobí pro malé pravděpodobnosti zanedbatelnou chybu a je vždy konzervativní. Do hradla AND může být vneseno několik pravděpodobnostních členů, ale jen jedna frekvence (viz tabulku 6).

Po spočtení celého stromu poruch může být provedeno několik dalších volitelných výpočtů pro lepší využití vypovídací schopnosti metody FTA. Takovými výpočty jsou analýzy citlivosti, neurčitosti a důležitosti (importance). Citlivostní analýza se používá pro stanovení citlivosti frekvence vrcholové události k možným chybám v základních poruchových datech. Analýza neurčitosti určuje chybové meze vrcholové události (běžně se k tomu používají simulace metodou Monte Carlo). Analýza důležitosti řadí různé minimální kritické řezy v pořadí jejich příspěvku k celkové frekvenci selhání systému.

Příklad z praxe s aplikací jednotlivých 5 kroků uvádí příklad 1 na str. 85.

Tabulka 6: Pravidla pro výpočet stromu poruch technikou hradlo-za-hradlem *

Hradlo	Párování vstupů	Výpočet pro výstup	Jednotky
OR	$P_A \text{ OR } P_B$	$P(A \text{ OR } B) = 1 - (1 - P_A) \cdot (1 - P_B) = P_A + P_B - P_A \cdot P_B \cong P_A + P_B$	-
	$F_A \text{ OR } F_B$	$F(A \text{ OR } B) = F_A + F_B$	t^{-1}
	$P_A \text{ OR } F_B$	Není dovoleno	-
AND	$P_A \text{ AND } P_B$	$P(A \text{ AND } B) = P_A \cdot P_B$	-
	$F_A \text{ AND } F_B$	Neobvyklé párování, nutno převést na $F_A \text{ AND } P_B$	-
	$F_A \text{ AND } P_B$	$F(A \text{ AND } B) = F_A \cdot P_B$	t^{-1}

* P – pravděpodobnost; F – frekvence (čas⁻¹); t – čas (obvykle rok)

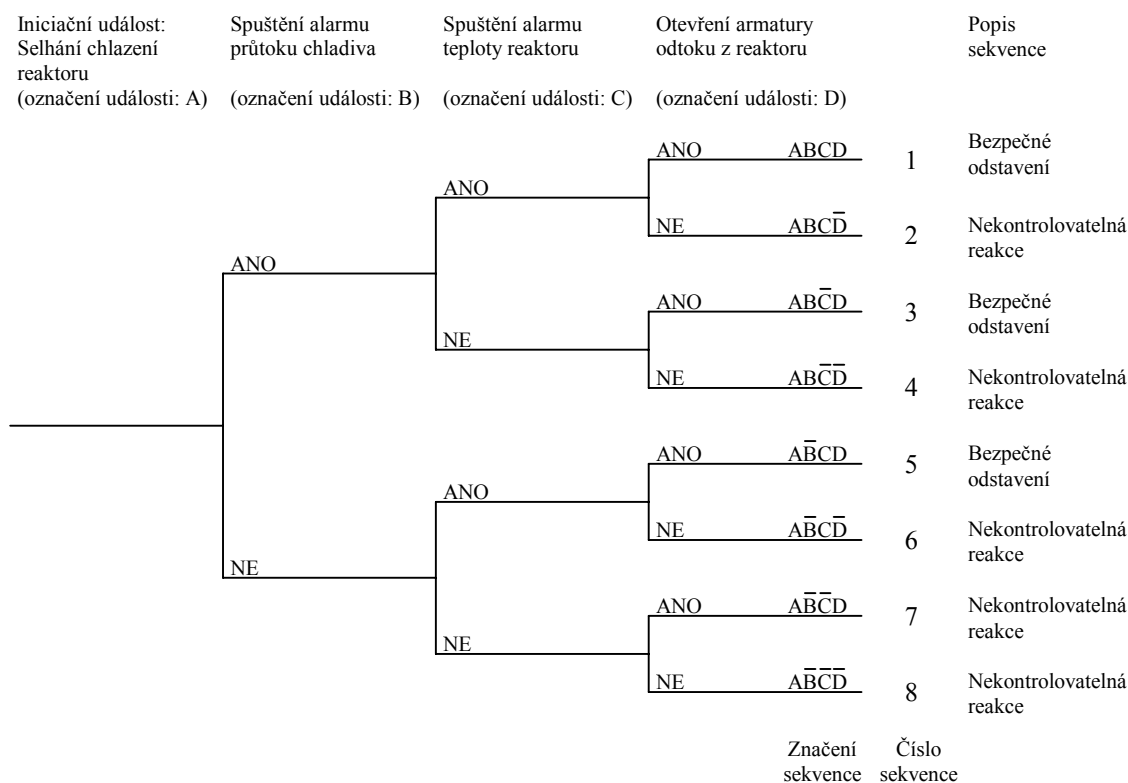
3.4.2.2 Analýza stromu událostí

Strom událostí je grafický logický model, který identifikuje a kvantifikuje možné výsledky iniciační události. Strom událostí systematicky pokrývá časové sekvence vývoje události, a to buď skrze sérii činností bezpečnostního systému a zásahů operátora (pre-nehodová aplikace), nebo, pokud se objeví ztráta celistvosti, skrze řadu možných koncových stavů - následků (post-nehodová aplikace). Následky mohou být přímé (např. požáry, exploze) nebo nepřímé (např. domino efekty na sousedním zařízení).

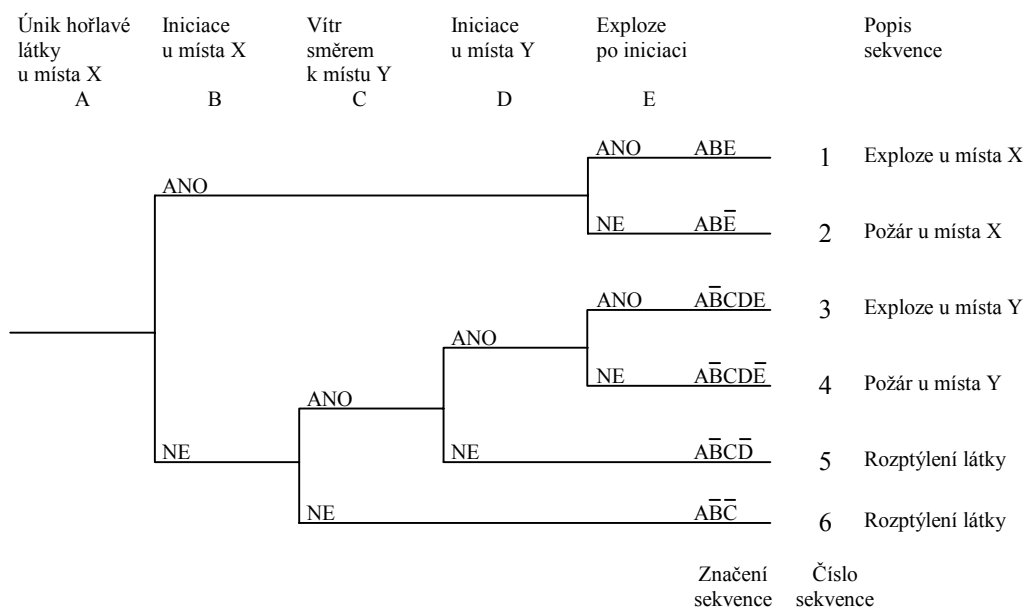
Každá událost následující po iniciační události je podmíněna výskytem své předchozí události. Výsledky každé předchozí události jsou nejčastěji binárního charakteru (ÚSPĚCH nebo SELHÁNÍ, ANO nebo NE), ale může se jednat také o více výsledků (např. 100%, 20% nebo 0% uzavření regulačního ventilu).

Rozlišují se dvě použití stromu událostí. Tzv. pre-nehodová aplikace se zabývá systémy, které mohou zabránit vzniku nehodových událostí z prekurzorů těchto událostí, např. účinnost víceprvkového ochranného systému. Tzv. post-nehodová aplikace se užívá ke zjištění koncových stavů nehodové události, např. zahoření oblaku par, UVCE, BLEVE, rozptýl oblaku par). Rovněž analýza lidské spolehlivosti používá techniku stromu událostí. Obrázky 9 a 10 ukazují použití obou aplikací v chemickém kontextu. Pre-nehodový příklad je ztráta chladiva v reaktoru s exotermickou reakcí následovaná nekontrolovatelnou reakcí, post-nehodový příklad je únik hořlavé látky v místě X a výsledky této iniciační události v místě Y po větru. Ve skutečnosti se obě aplikace doplňují: post-nehodový strom událostí může být připojen do těch větví pre-nehodového stromu událostí, jejichž výsledkem je SELHÁNÍ bezpečnostního systému.

Stromy poruch jsou často užívány, aby modelovaly rozvětvení z nějakého uzlu stromu událostí. Proto také může být vrcholová událost stromu poruch iniciační událostí stromu událostí. Tak může být stanovením frekvence vrcholové události stromu poruch stanovena frekvence odpovídající větve nebo iniciační události stromu událostí. Rozlišujeme přitom význam termínu „iniciační událost“ v analýze stromu poruch a v analýze stromu událostí. Strom poruch může mít celou řadu iniciačních událostí, které vedou k jediné vrcholové události, ale strom událostí bude mít jen jednu iniciační událost, která vede k řadě možných projevů (koncových stavů).



Obrázek 9: Příklad pre-nehodového stromu událostí



Obrázek 10: Příklad post-nehodového stromu událostí

Konstrukce stromu událostí se provádí zleva doprava směrem od iniciační události k jednotlivým projevům postupným přidáváním všech důležitých bezpečnostních funkcí nebo událostí. Každá větev stromu událostí představuje samostatnou sekvenci událostí a koncový stav. Postup konstrukce stromu událostí znázorňuje obrázek 11.

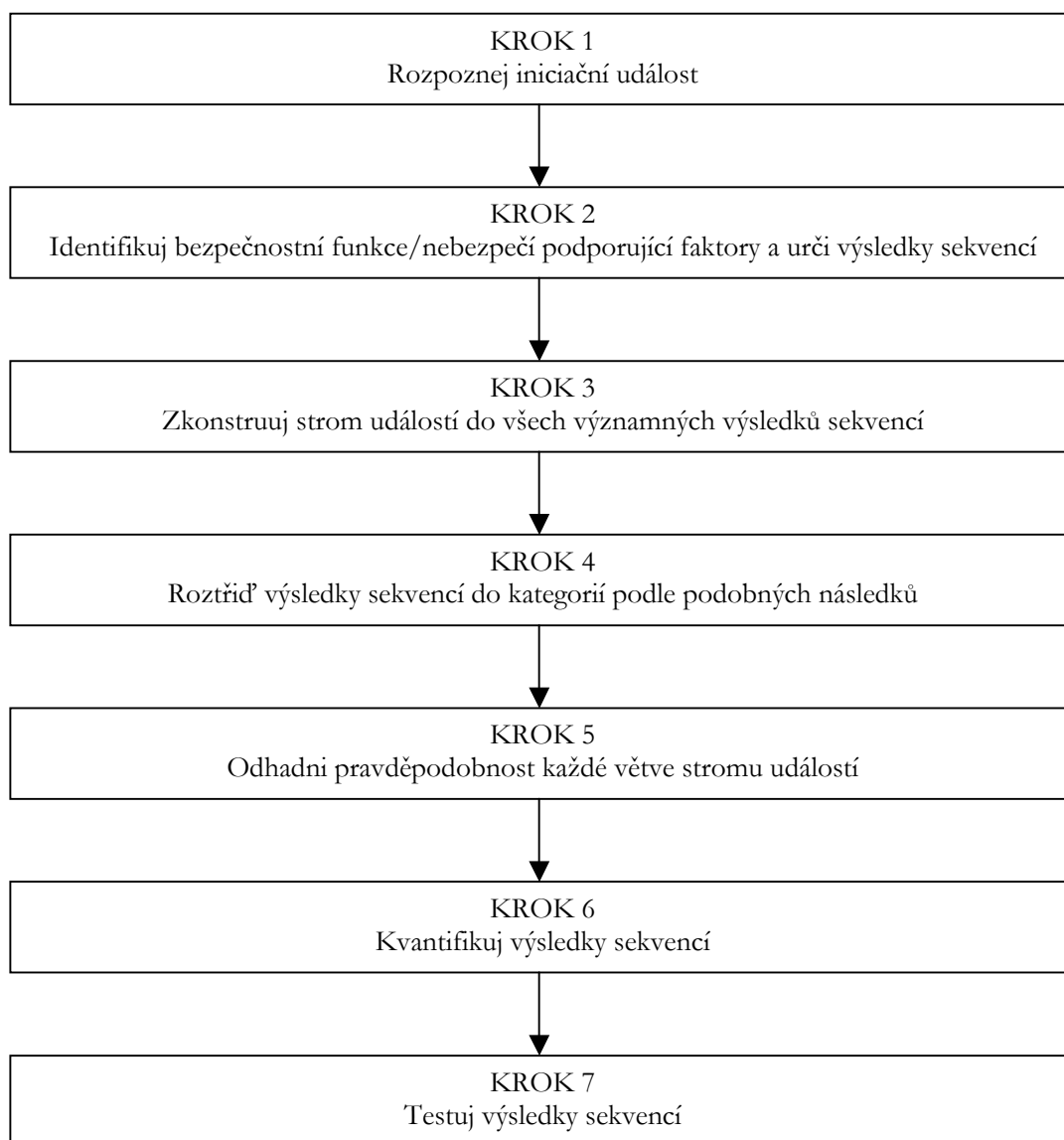
Popis techniky ETA

Krok 1: V mnoha CPQRA studiích se jedná o poruchovou událost spojenou s únikem nebezpečné látky (únik z potrubí, prasknutí nádoby, vnitřní exploze atd.). Frekvence takové události se určuje z historických záznamů nebo analýzou FTA.

Krok 2: Bezpečnostní funkce jsou zařízení, bariéry nebo činnosti, které mohou přerušit sekvenci od iniciační události po nebezpečné koncové stavy iniciační události (např. automatické bezpečnostní systémy, alarmy upozorňující operátory, bariéry nebo kontejnmenty k omezení účinků nehody). Nebezpečí podporující faktory mohou změnit koncový stav sekvence (např. z rozptýlujícího se mraku na zahoření nebo UVCE), jsou rozmanitější než bezpečnostní funkce a zahrnují:

- zapálení či nezapálení úniku,
- explozi nebo zahoření,
- rozlití kapaliny do záchytné nádrže nebo mimo ni,
- denní nebo noční dobu,
- meteorologické podmínky.

Záhlaví stromu událostí se užívá k označení bezpečnostních funkcí a faktorů podporujících nebezpečí. Většina větví je binárního charakteru, ale např. meteorologické podmínky mohou představovat široký rozsah síly a směru větrů a atmosférické stability. Analytik musí v záhlaví pečlivě vyjmenovat všechny možnosti, které mohou podstatně ovlivnit koncové stavy sekvencí iniciační události. Záhlaví musí být seřazena v časovém sledu výskytu bezpečnostních funkcí a faktorů podporujících nebezpečí. Tak se v záhlaví může několikrát objevit i stejná funkce nebo faktor v závislosti na tom, co se děje v čase, např. vícenásobné iniciační zdroje.



Obrázek 11: Logický diagram pro aplikaci analýzy stromu událostí (ETA)

Krok 3: Strom událostí je grafické vyjádření časového vývoje nehodové události. Obvykle se konstruuje zleva doprava od iniciační události. U každého záhlaví či uzlu jsou analyzovány dvě nebo více alternativ, dokud není získán koncový stav sekvence pro každý uzel. Některé větve mohou být rozmodelovány podrobněji než jiné. Důležitým výstupem analýzy je seznam bezpečných a naopak nehodových koncových stavů sekvencí. Je obvyklé používat větev ÚSPĚCH neboli ANO směrem nahoru a větev NEÚSPĚCH neboli NE směrem dolů. Pokud si označíme záhlaví nějakým identifikátorem (např. písmenem), můžeme každému koncovému stavu sekvence přiřadit jedinečný identifikátor. Proužek nad písmenem značí, že se navrhovaná událost nevyskytla (viz obrázky 9, 10 a 15).

Krok 4: Cílem konstrukce stromu událostí je nalezení důležitých koncových stavů sekvencí, které se dále použijí v CPQRA. Pokud jsou následky některé větve malé nebo zanedbatelné, může zůstat tato větev nerozvinuta. V krajním případě se takto může jednat o všechny výstupy, a proto se příslušná iniciační událost dále

neanalyzuje. Mnoho koncových stavů sekvencí rozvinutých z různých větví může být stejných, např. exploze může vzniknout jako výsledek více než jedné sekvence událostí.

Krok 5: Každé záhlaví ve stromu událostí (kromě iniciační události) odpovídá podmíněné pravděpodobnosti určitého výstupu za podmínky výskytu předchozí události. Tak pravděpodobnosti spojené s každým ramenem musí dávat součet 1,0 pro každé záhlaví a musí to platit jak pro binární (viz obrázek 15), tak pro vícenásobné výstupy z uzlu. Zdrojem dat podmíněných pravděpodobností mohou být historické záznamy, provozní data, chemická data, data životního prostředí, spolehlivostní data zařízení, data o lidské spolehlivosti, expertní úsudek.

Krok 6: Frekvence každého koncového stavu sekvence může být stanovena vynásobením frekvence iniciační události a podmíněných pravděpodobností podél každé cesty vedoucí ke koncovému stavu sekvence. Jako kontrola správnosti výpočtů slouží součet frekvencí všech koncových stavů sekvencí, jež musí být roven frekvenci iniciační události. Předpokladem však je **nezávislost** mezi událostmi a dále, že se nevyskytne jen **částečný** úspěch nebo porucha.

Krok 7: Stejně jako u FTA i zde může špatná ETA vést k nepřesným (např. vlivem špatných dat) nebo nesprávným výsledkům (např. byly vynechány důležité větve). Proto je důležitým bodem ETA ověření reálnosti výsledků zdravým rozumem a proti historickým záznamům, což nejlépe provede nezávislý kontrolor.

Aplikaci uvedeného postupu uvádí příklad 1.

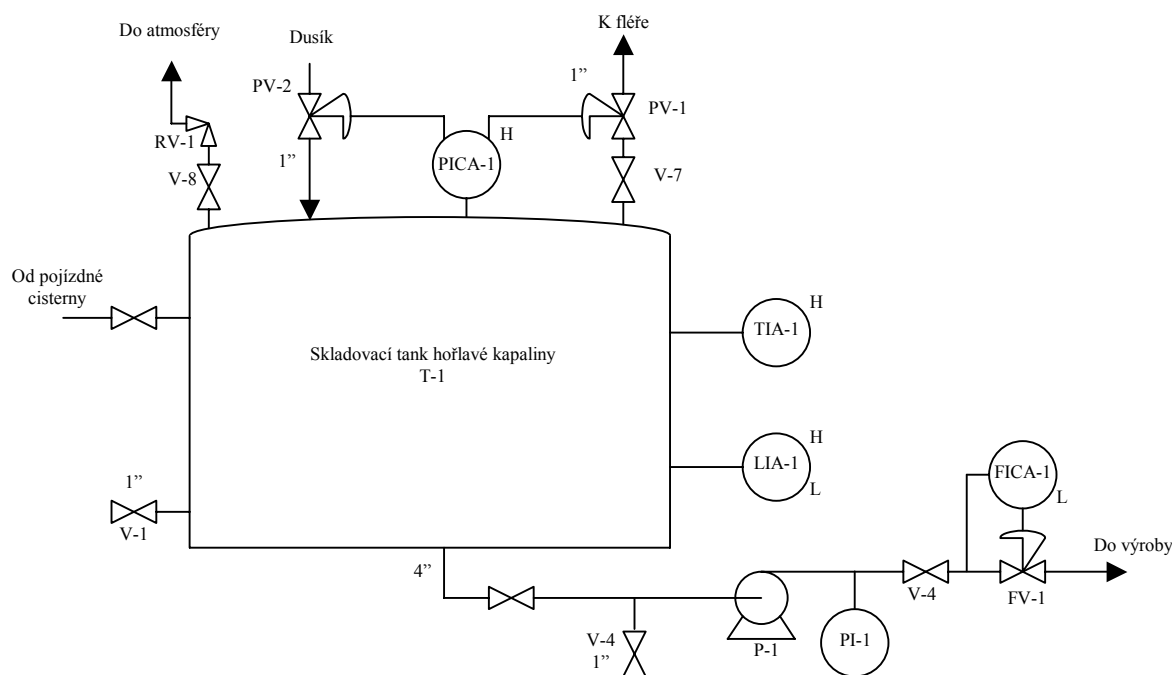
3.4.2.3 Aplikace postupů na operační jednotku

V této kapitole jsou uvedeny příklady aplikace teoretických postupů na chemických zařízeních.

Příklad 1: Únik ze zásobního tanku hořlavé kapaliny – analýza stromem poruch

Schéma zařízení včetně legendy je na následujícím obrázku. Budeme postupovat podle kroků znázorněných na obrázku 6 na str. 75.

Krok 1 – Popis systému: Zásobní tank T-1 je navržen pro skladování hořlavé kapaliny pod slabým přetlakem dusíku. Řídicí systém PICA-1 udržuje tlak. Tank je spojen s pojistným ventilem pro případ nouzové situace. Kapalina je do tanku dodávána z cisterny na nákladním automobilu. Čerpadlo P-1 dodává hořlavou kapalinu do výroby.



Legenda P&ID			
ZAŘÍZENÍ A ARMATURY		PŘÍSTROJE	
FV	Armatura řízení průtoku	P	Tlak
T	Tank	T	Teplota
P	Čerpadlo	L	Hladina
PV	Armatura řízení tlaku	F	Průtok
RV	Pojistný ventil	I	Indikátor
V	Ventil	C	Ovládání
1''	Velikost 1 palce	A	Alarm
		H	Vysoko
		L	Nizko

Obrázek 12: P&ID skladovacího tanku s hořlavou kapalinou

Krok 2 – Odhalení zdrojů rizika: K odhalení nejvýznamnějších zdrojů rizika byla použita metoda HAZOP. Jako vrcholová událost byla určena nehodová událost „významný hořlavý únik z tanku“.

Krok 3 – Konstrukce stromu poruch: Na základě znalostí systému a iniciačních událostí ze studie HAZOP je strom konstruován ručně. Každá událost je postupně označena písmenem B pro základní nebo nerozvíjenou událost, M pro mezilehlou událost, T pro vrcholovou událost. Postup začíná u vrcholové události, „významný hořlavý únik“ a určuje možné události, které by vedly k této nehodové události:

- M1: rozlítí při čerpání z cisterny,
- M2: prasknutí tanku vlivem externí události,
- B1: prasknutí odtoku z tanku,

- M3: prasknutí tanku vlivem imploze,
 M4: prasknutí tanku vlivem přetlakování.

Události M1, M2, M3 a M4 vyžadují další rozvoj. Pro událost B1 však existují historická/spolehlivostní data, která ji umožňují považovat za základní událost. Analýza pokračuje směrem dolů postupně po jednotlivých úrovních, dokud nebyl vyšetřen poruchový mechanismus do patřičné hloubky. Základní události a nerozvíjené události jsou symbolizovány kolečky, resp. kosočtverečky. Další rozvoj nerozvíjených událostí není možný nebo nezbytný.

Konečný strom poruch znázorňují obrázky 13 a 14 na str. 88 a 89.

Krok 4 – Kvalitativní prověrka struktury: Nejlépe se provede analýzou minimálních kritických řezů pro tento případ. Nicméně samotná kontrola ukazuje pět hlavních mechanismů vedoucích k velkému hořlavému úniku. Například samotné události B1, B3, B4, B5 a B6 vedou k vrcholové události.

V tomto kroku by analytik měl posoudit minimální kritické řezy, aby se ujistil, že představují reálné a možné nehody. Minimální kritický řez, který nezapříčiní vrcholovou událost, je znamením chyby při konstrukci stromu poruch nebo chyby ve stanovení minimálních kritických řezů.

Krok 5 – Kvantitativní hodnocení stromu poruch: V našem příkladu tanku s hořlavou kapalinou byla pro kvantifikaci stromu poruch použita metoda analýzy hradlo-za-hradlem. Strom musí být pečlivě prohlížen, aby se odhalily opakující se události, které mohou vést k numerické chybě. Po ujištění, že neexistují žádné opakující se události, musí analytik přiřadit číselné hodnoty frekvencí (za rok) a pravděpodobností (bezrozměrné) každé základní události.

Výpočet začíná na spodní úrovni stromu a pokračuje nahoru k vrcholové události. Ukázka výpočtu bude provedena pro rozvětvenou část stromu z obrázku 13 po událost M1, rozlití při čerpání z cisterny. Pro jednoduchost byla v tomto příkladu použita čísla ve tvaru jednička krát deset na určitý exponent. Použitá pravidla jsou z tabulky 6, str. 80.

Nejnižší hradlo je M9, přeplnění tanku a únik přes RV-1. Dva vstupy do tohoto AND hradla jsou pravděpodobnosti:

$$P(M9)=P(B15) \cdot P(B16)=1E-2 \cdot 1E-2=1E-4.$$

Na stejné úrovni jako M9 je hradlo M10, prasknutí tanku z důvodu reakce. Existují čtyři vstupy do tohoto AND hradla, samé pravděpodobnosti, a podle tabulky 6 může být zobrazeno:

$$P(M10)=P(B17) \cdot P(B18) \cdot P(B19) \cdot P(B20)=1E-3 \cdot 1E-2 \cdot 1E-1 \cdot 1E-1=1E-7.$$

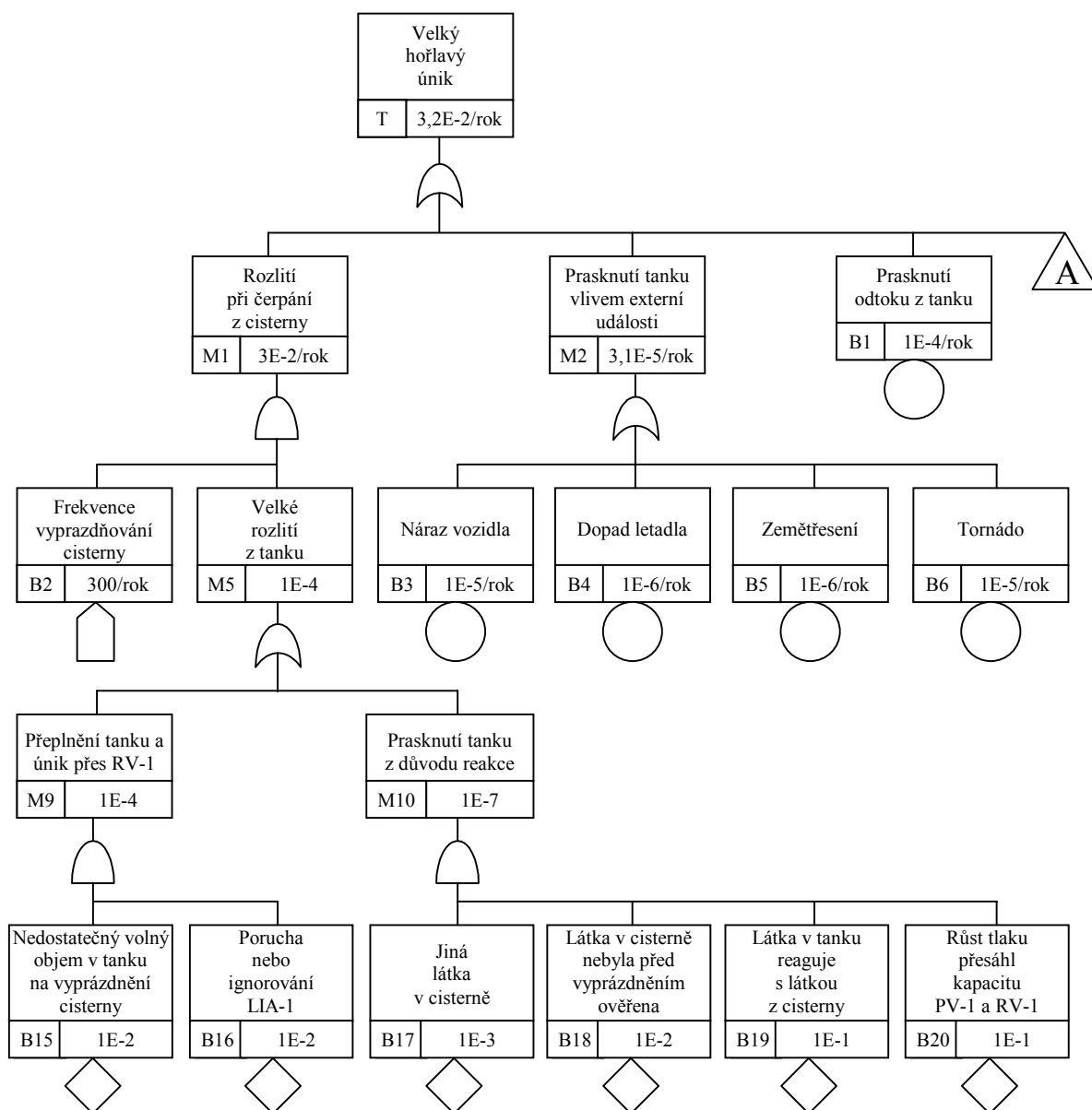
Hradla M9 a M10 jsou vstupy do hradla M5, velké rozlití z tanku. Existují dvě číselné pravděpodobnosti vstupující do tohoto hradla:

$$P(M5)=1-[1-P(M9)] \cdot [1-P(M10)] \cong P(M9)+P(M10) \cong (1E-4)+(1E-7) \cong 1E-4.$$

Hradlo M1 je rameno mezilehlé události a toto AND hradlo má dva vstupy, frekvenci a pravděpodobnost:

$$F(M1)=F(B2) \cdot P(M5)=(300/\text{rok}) \cdot (1\text{E}-4)=3\text{E}-2/\text{rok}.$$

Podobným způsobem mohou být spočteny ostatní frekvence a pravděpodobnosti až po vrcholovou událost T, velký hořlavý únik, jejíž frekvence je $3\text{E}-2/\text{rok}$, což znamená průměrně jeden velký hořlavý únik za 30 let. Tato hodnota může být použita dále v CPQRA k výpočtu a hodnocení rizika.



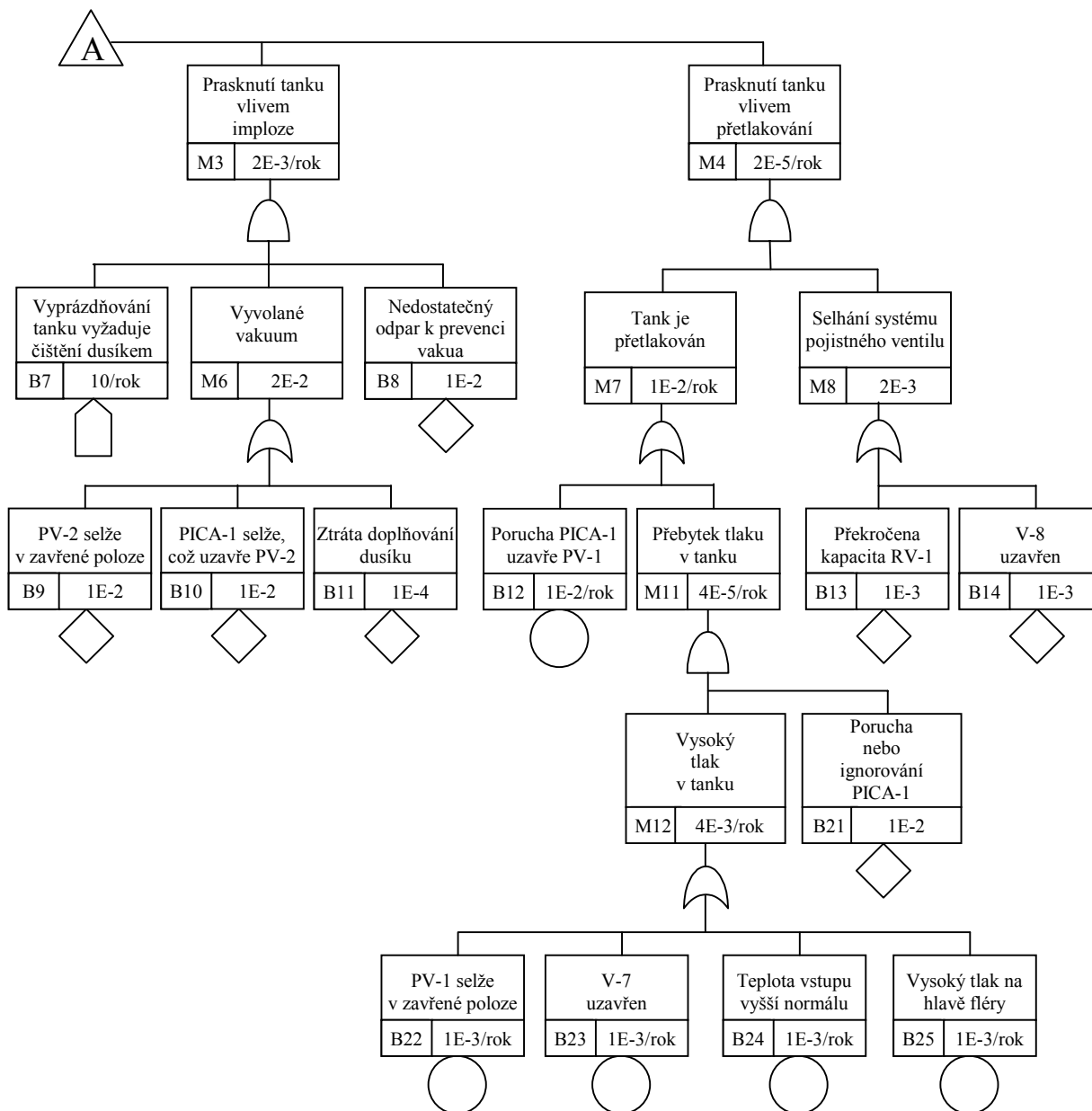
Obrázek 13: Analýza stromu poruch pro tank s hořlavou kapalinou (1. část)

Frekvence pěti hlavních mezilehlých událostí vedoucích k vrcholové události jsou:

M1:	rozlití při čerpání z cisterny	3E-2/rok
M2:	prasknutí tanku vlivem externí události	3E-5/rok
B1:	prasknutí odtoku z tanku	1E-4/rok

M3: prasknutí tanku vlivem imploze 2E-3/rok
M4: prasknutí tanku vlivem přetlakování 2E-5/rok.

Podle tohoto kvantitativního vyhodnocení nejvíce k vrcholové události přispívají M1 a M3, proto by nápravná opatření měla směřovat do těchto oblastí.



Obrázek 14: Analýza stromu poruch pro tank s hořlavou kapalinou (2. část)

Příklad 2: Ochrana proti párování frekvence-frekvence u AND hradel

Mějme frekvenci 1E-6/rok pro BLEVE jednotlivého tanku s LPG a dále frekvenci 10 krát za rok po 8 hodinách pro používání blízké veřejné plochy. Frekvence AND hradla pro kombinaci BLEVE a ohrožených lidí by měla být převedena na frekvenci BLEVE a podmíněnou pravděpodobnost přítomnosti lidí.

Tato podmíněná pravděpodobnost přítomnosti lidí je:

$$(10\text{krát/rok} \times 8\text{hod}) / (365/\text{rok} \times 24\text{hod/d}) = 0,009.$$

Výsledek frekvence AND hradla coby ohrožení lidí jevem BLEVE je pak:

$$\text{frekvence} = 1\text{E-6/rok} \times 0,009 = 9\text{E-9/rok}.$$

Příklad 3: Velký únik stlačeného LPG ze skladovacího tanku – analýza ETA

Jde o post-nehodovou analýzu velkého úniku stlačeného LPG z izolovaného skladovacího tanku. Potenciální následky zahrnují také BLEVE tanku, pokud by byl únik zapálen (buď okamžitě nebo zpětným zášlehem). V případě, že únik nebude zapálen okamžitě, může být látka unášena směrem k obydlené oblasti s několika iniciačními zdroji a explodovat (UVCE) nebo zahořet. Ostatní oblasti po větru mají nižší pravděpodobnost iniciace. Data potřebná pro strom událostí jsou uvedena v následující tabulce.

Tabulka 7: Vstupní data k příkladu 3 pro strom událostí

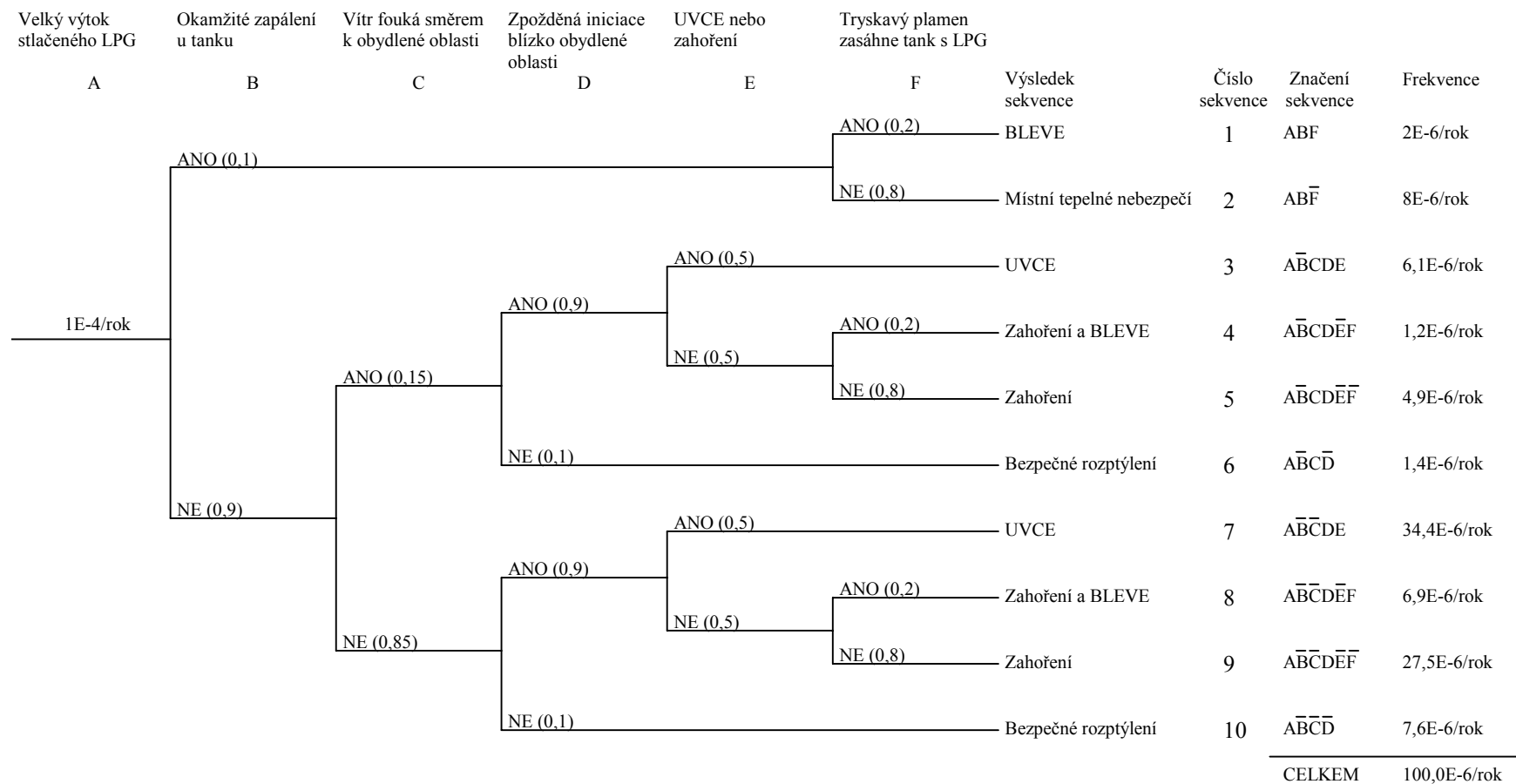
Událost	Frekvence nebo pravděpodobnost	Zdroj dat
A: Velký výtok stlačeného LPG	0,0001/rok	FTA
B: Okamžité zapálení u tanku	0,1	Expertní úsudek
C: Vítr fouká směrem k obydlené oblasti	0,15	Data z větrné růžice
D: Zpožděná iniciace blízko obydlené oblasti	0,9	Expertní úsudek
E: Spíš UVCE než zahoření	0,5	Historická data
F: Tryskavý plamen zasáhne tank s LPG	0,2	Geometrie umístění tanku

Údaje z této tabulky jsou použity k předpovězení možných koncových stavů sekvencí stromu událostí, který je uveden na obrázku 15. Tento strom událostí není vyčerpávající. Ne všechny koncové stavy sekvencí jsou dovedeny až do konce, některé jsou ukončeny na vstupu do specifických konsekventních modelů. Například BLEVE může mít tři další účinky - tepelné účinky, přetlakovou vlnu a rozlet trosek. V praxi by byly tyto účinky prošetřovány ještě ve zvláštních modelech.

Z obrázku 15 vyplývá celkem šest možných koncových stavů sekvencí, jež jsou včetně jejich frekvencí zachyceny v následující tabulce. Celkový součet frekvencí všech koncových stavů sekvencí (tj. $100,0\text{E-6/rok}$) musí být roven frekvenci iniciační události 1E-4/rok , což je splněno. Tato kontrola je ověřením správných konstrukčních a výpočetních vztahů ve stromu událostí.

Tabulka 8: Koncové stavy sekvencí stromu událostí k příkladu 3 a jejich frekvence

Koncové stavy sekvencí	Sekvence vedoucí ke koncovým stavům	Frekvence (za rok)
BLEVE	ABF	$2,0E-6 = 2,0E-6$
Zahoření	$\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E}\overline{F} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E}\overline{F}$	$4,9E-6 + 27,5E-6 = 32,4E-6$
Zahoření a BLEVE	$\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E}\overline{F} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E}\overline{F}$	$1,2E-6 + 6,9E-6 = 8,1E-6$
UVCE	$\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E}$	$6,1E-6 + 34,4E-6 = 40,5E-6$
Místní tepelné nebezpečí	$\overline{A}\overline{B}\overline{F}$	$8,0E-6 = 8,0E-6$
Bezpečné rozptýlení	$\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}$	$1,4E-6 + 7,6E-6 = 9,0E-6$
Celkem všechny koncové stavy sekvencí		$= 100,0E-6$



Obrázek 15: Analýza stromu událostí pro skladovací tank s LPG

3.4.3 Závěry pro praktické aplikace QRA

3.4.3.1 Zdroje spolehlivostních dat

Přiměřená kolekce spolehlivostních dat je velmi důležitý prvek QRA studií. Základními požadavky na data ke zhodnocení činnosti systému pro QRA studie jsou počet jednotlivých typů poruch („poruchové módy“) jednotlivých typů zařízení (systém, komponenta) za určitou dobu (doba pozorování) a délka trvání těchto poruch za daných podmínek (např. doba opravy). Hlavními parametry pro modelování v QRA jsou intenzita poruch komponent (za čas, na výzvu) a rychlost opravy (za čas). Ostatní parametry, jež nebyly zahrnuty do předchozího výkladu, jsou doba periodické údržby, lidské chyby a pravděpodobnosti poruch se společnou příčinou.

Databáze obsahující takovéto druhy spolehlivostních informací (tj. zhodnocení průměrných spolehlivostních parametrů) jsou k dispozici na konzultační bázi pro několik různých druhů použití, jako jsou jaderný, letecký, elektrotechnický a chemický průmysl. V několika zemích a mezinárodních organizacích byly zřízeny systémy souborů dat, které obsahují spolehlivostní data pro mechanické a elektrické komponenty. Tyto systémy jsou pravidelně doplňovány a aktualizovány. Všechny tyto zdroje dat jsou pro použití dostupné zdarma nebo jen za konzultační poplatek buď ve formě publikované literatury, nebo ve formě počítačových databank (tištěné knihy s daty, elektronické soubory dat, data na CD-ROM, data na www stránkách).

Kromě specifických datových souborů konkrétního provozu, které by měly být v každém případě vždy upřednostňovány před generickými daty, jsou ocenění pravděpodobnostních parametrů pro QRA studie typicky získávány z následujících zdrojů:

- Generická data získávána z publikací EUREDATA a ESReDA,
- Knižní soubor generických dat IEEE Std 500,
- OREDA, příručka spolehlivostních dat pro zařízení v pobřežních vodách nebo na volném moři,
- Databáze spolehlivostních parametrů jaderných elektráren USA, zvláště WASH-1400, Connecticut Yankee, Oconee, Seabrook a Zion,
- T-book, sbírka spolehlivostních dat pro zařízení z jaderných elektráren ve Švédsku a Finsku,
- Swain & Guttman, příručka pravděpodobností lidských chyb.

Ve srovnání s jaderným průmyslem je základna pro statistické zpracování spolehlivostních dat zařízení prozatím ve vývoji, ale situace od doby vydání první Seveso Direktivy v roce 1982 již pokročila. Navíc můžeme vidět, že spolehlivostní data pro běžná zařízení (tlakové nádoby, potrubí, armatury a čerpadla) pocházející z „generických“ zdrojů, (tj. data z podobných zařízení buď z té samé, nebo podobné průmyslové aplikace) mají pro dané použití jak významnou kvalitu, tak je dostatečné i jejich množství pro provádění QRA v procesním průmyslu.

3.4.3.2 Některé problémy s daty

Podobnosti zdrojů

Jakékoli kvantitativní hodnocení rizika plynoucí ze studie QRA má smysl porovnávat pouze tehdy, pokud použítá data mají stejný „technický základ“ (např. poruchy stejného typu čerpadel v podobném provozním prostředí) a pokud byla analyzována s ohledem ke stejnému kritériu (např. k poruchovému módu čerpadla „porucha startu“). Zdroje dat by měly být vybírány s ohledem na dostupnost jasného a nedvojsmyslného popisu základu zařízení (systémy, komponenty) a nehodových událostí, ze kterých byla spolehlivostní data původně sbírána. Avšak neměly by být činěny příliš velké úvahy o použití „generických“ dat, protože intenzita poruch se obecně příliš neliší mezi komponentami stejného typu. Důvodem je to, že máme co do činění s lidskou přirozeností a s pravděpodobností poruch. Všechny zkonstruované a provozované komponenty toho samého typu byly navrženy a jsou provozovány lidmi, kteří podvědomě pracují se stejnými skrytými bezpečnostními hranicemi, ať už jde o více nebo méně stejný typ hardware, se kterým pracují, nebo o více nebo méně stejné provozní podmínky. Proto není chyba vnesená do QRA použitím „generických“ zdrojů obvykle tak velká a může být s úspěchem vyvážena analýzou nejistoty a citlivosti bezpečnostně kritických systémů a komponent.

Sdružování dat

Důležitý faktor, jehož efekt je často v průběhu QRA podceňován je ten, že konsekvenci scénáře musí být dobře definovány v tom smyslu, že je zajištěna dostupnost dostatečné a významné sbírky dat pro kvantifikaci odpovídajících scénářů událostí. Například „v praxi“ existuje nekonečné množství nejrozličnějších možných způsobů, jak se může vyskytnout únik nebezpečných látek. Únik z nádoby se může uskutečnit množstvím různých velikostí otvorů, protože tento parametr je nekonečně různorodý. Ale frekvence úniku s *přesnou* velikostí únikového otvoru je extrémně malá. To, co je známo ze statistických dat obvykle publikovaných v datových příručkách, je celková frekvence všech únikových kategorií (velikostí otvorů), které musí být brány v úvahu při provádění QRA studie. Analýza by neměla odstranit žádnou část tohoto celku, ani by neměla s některými údaji počítat dvakrát. Frekvence musí být zachovány. Hlavní břímě analytika provádějícího QRA je proto v ujištění se, že tato informace z literatury o celkové frekvenci pokrývá celý rozsah únikových otvorů takovým způsobem, že to zachovává celkovou frekvenci a také že to souhlasí s jakoukoli informací dostupnou z historických dat týkajících se rozložení velikostí otvorů. Tento vědní obor mimochodem také vede analytika k tomu, že nevynechá případy s vysokými následky nebo nízkými frekvencemi.

Bayesovské metody

Prvotním zdrojem dat pro QRA jsou „objektivní“ data z historických záznamů (na základě pozorování). Až druhotným zdrojem jsou „subjektivní“ data založená na expertním odhadu. Bayesův teorém dovoluje činit odhady dokonce pro případy s nulovým výskytem poruchových událostí (nebo s nulovým pozorovaným výskytem poruchových událostí). Avšak není to tvorba z ničeho – musí existovat a být dostupné určité „prvotní informace“, jako je doba úspěšného provozu systému nebo nejlepší expertní úsudek o střední době do poruchy. Bayesovské metody nabízejí mnoho pro maximální využití dostupných informací, aby vytvářely významné odhady, zvláště v případech vzácných událostí (malé kolekce dat). Souhrnně může být

řečeno, že pokud existuje potřeba použít expertního odhadu, což je obvyklý případ v QRA studiích, pak by měla být využita Bayesova statistika.

Časové závislosti

Existuje řada teorií o časové závislosti intenzity poruch systémů, tj. o skutečné podobě $\lambda(t)$. Jak už bylo řečeno dříve, v QRA studiích se obvykle předpokládá konstantní časový poměr výskytu poruch, tj. $\lambda(t) = \lambda$. Nehledě na výpočetní potíže plně časově závislého pravděpodobnostního modelování chování provozu / systému / komponenty (QRA může zahrnovat tisíce modelů jednotlivých komponent!), existuje také druhý, závažnější praktický důvod pro toto zjednodušení: Statistická data obvykle dostupná vyjadřují široký průměr přes celou životnost zařízení (zprůměrování počátečního období „dětských nemocí“ a degradace zařízení zestárnutím). Avšak ve většině případů QRA by se otázkou časových závislostí nemělo zabývat, protože QRA je obvykle založena na více či méně hypotetické provozní době života průmyslového zařízení, během kterého se neočekávají jeho významné fyzické změny. Na úrovni systému / komponent je zjednodušení oprávněné, pokud je cyklus oprav a údržby patřičných systémů a komponent krátký ve srovnání s provozní dobou života zařízení.

Skoronehody

V závislosti na „závažnosti“ nějaké nehody nebo poruchové události mohou být pozorovány určité nesrovnalosti mezi počtem takových událostí, které se skutečně vyskytují, a mezi těmi, které jsou zaznamenány. Jelikož závažné nehody nebo poruchy kritických komponent obvykle způsobí skutečnou škodu nebo alespoň znatelné nebezpečí, mají tyto relativně vzácné události vysokou pravděpodobnost, že budou diskutovány mezi provozními údržbáři, publikovány a nakonec zaneseny do databází. V poslední době je zvýšená pozornost věnována nejen závažným nehodám a poruchám, ale i množství malých nehod a poruch (často předchůdce závažných nehod a poruch), tzv. „skoronehodám“, jež mají často skutečný nebo potenciální dopad na bezpečnostně významné systémy a komponenty a které nemohou být přehlíženy. Skoronehody jsou důležitým předmětem úvah a úsilí sběru spolehlivostních dat, protože vyloučení množství malých nehod a poruch z úvah pravděpodobnostních modelů dává možnost významně podhodnotit „pravdu“ o hodnotách rizika v QRA a tak ovlivnit rozhodování o opatřeních na snížení rizika.

4. Hodnocení rizika

V této kapitole jsou rozebrány metody pro konečná vyjádření a prezentaci rizika na základě výsledků analýzy rizika. Jsou zde znovu zopakovány techniky kvalitativní a kvantitativní analýzy a podány principy rozhodovacího procesu spojeného s číselným projevem rizika.

Kapitola podává přehled o přístupu kvantitativního hodnocení rizika (QRA) a zaměřuje se na jeho různé důležité kroky, jako lidský faktor, úvahy o neurčitostech, porovnávání rizika, použití profilu rizika.

4.1 Povaha závažných zdrojů rizika v procesním průmyslu

Je nevyhnutelným faktem, že mnoho chemických výrobků, které mají velký význam pro společnost a které hrají významnou roli v našem hospodářství, jsou zároveň nebezpečné nebo jejich výrobu komplikují nebezpečné meziprodukty. Je záměrem Direktivy Seveso a české obdoby zákona č. 353/1999 Sb., aby tato nebezpečí byla již pořád pod kontrolou, což znamená zavedení účinného systému řízení bezpečnosti vlastníky podniků.

Při zacházení s takovými zdroji rizika je někdy možné dosáhnout „ideálního“ řešení nalezením nových procesních směrů, které dovolí velmi významné snížení zásob látek, méně drastické provozní podmínky nebo vyhnout se nebezpečným mezilehlým stavům. Nicméně v mnoha případech takové řešení není možné nebo s sebou nese nesmírné ekonomické vklady. V takových situacích musí podnikové vedení, státní správa a projektoví inženýři přijmout fakt, že nebezpečné zdroje rizika nemohou být zcela odstraněny a že vždy zůstává zbytkové riziko. Řízení tohoto rizika je hlavním cílem hodnocení rizika a rizikového managementu. Většina dalších kapitol popisuje dostupné techniky pro tento účel.

Riziko je charakterizováno *následkem*, což je velikost škody způsobené uplatněním zdroje rizika, a *frekvencí* (nebo pravděpodobností), která odráží stupeň integrity vložené do projektu podniku a kvalitu provozního výkonu. Ačkoli je z těchto dvou pojmů v „denním životě“ rozměr frekvence / pravděpodobnosti méně známý, je životně důležitý pro průmysl, protože vzbuzuje důvěru ve vysokou integritu projektu a dobrou provozní praxi, na což průmysl často spoléhá při zajišťování bezpečnosti. Možnost použít pravděpodobnostního přístupu je výslovně uvedena v Direktivě Seveso II i v českém zákonu č. 353/1999 Sb.

Analýza rizika je technickým prostředkem pro ocenění frekvencí / pravděpodobností a následků, zatímco **hodnocení rizika** vyhodnocení takových ocenění srovnáním s cíli nebo kritérii. **Rizikový management** se týká celého procesu identifikace zdrojů rizika, analýzy, hodnocení a zmírňování.

4.2 Metodologie analýzy rizika

Analýza rizika je technika pro kvantifikaci rizika dané průmyslové činnosti. Obvykle se vyjadřuje pomocí očekávaných frekvencí nebo úmrtí, ale stále více průmyslu rozvíjí širší rizikové profily zahrnující zranění, dopady na životní prostředí, zdravotní rizika a finanční dopady. Principy analýzy rizika jsou pro všechny tyto profily stejné, hlavní rozdíl je ten, že modely následků musí být rozšířeny.

Analýza rizika zahrnuje 4 úkoly:

1. **Identifikace poruchových případů:** Seznam poruchových případů musí být kompletní, reprezentativní a nepřekrývající se. Metody používané pro identifikaci poruchových případů zahrnují: kontrolní seznam, HAZOP, FMEA. Poslední dvě jmenované jsou systematické metody pro identifikaci poruchových mechanismů na úrovni komponent.
2. **Ocenění frekvence:** Pravděpodobnosti poruch mohou být oceněny na základě historických dat o intenzitách poruch nebo ze statistik o extrémních událostech, jako jsou zemětřesení nebo velké vlny, nebo (pokud je daný systém složitý) z detailního vyšetřování možných příčin selhání systému vinou poruch jejich komponent nebo činností, prováděného většinou pomocí analýzy stromu poruch.
3. **Analýza následků:** Znamená to použití teoretických modelových řetězců událostí, jako jsou výtok nebezpečné látky, rozptyl ve vzduchu, zapálení, výbuch, požár atd. Existuje velký rozsah dobře testovaných modelů pro tyto účely a vývoj stále pokračuje. Submodely jsou často připojeny ke stromům událostí.
4. **Sumace a vyhodnocení rizika:** Tento úkol obnáší kombinování frekvencí / pravděpodobností a následků získaných v úkolech 2 a 3 a vyjádření celkového rizika ve formě, která vyhovuje rozhodovacímu procesu, pro nějž slouží hodnocení rizika jako podpora. Na tento proces se někdy odkazuje jako na „integraci rizika“ a je hlavním předmětem této kapitoly.

Existuje hodně možných způsobů, jak prezentovat informace o riziku, např. riziko pro jednotlivce stojícího na určitém místě; riziko nehody, která způsobí 100 nebo více úmrtí; riziko nějaké události, která přesáhne projektovou základnu podniku, atd. Vybraná metoda v jakémkoli jednotlivém případě závisí na cíli, pro který se hodnocení provádí. Pokud má být např. uvažovaným rozhodnutím výběr mezi dvěma konkurenčními návrhy, mohou být vytvořeny ukazatele celkového rizika podniku pro každou navrhovanou alternativu a pak porovnány.

Zvláštní výhodou těchto forem prezentace rizika je, že reprezentují jak pravděpodobnostní tak následkové aspekty *celého rozsahu* možných nehod. To je důležité proto, že pokud byly uvažovány jenom následky, pozornost by byla nevyhnutelně upřena na ten nejhorší případ z hlediska následků. To není prospěšné, protože (a) je nemožné navrhovat proti nejhorším možným následkům a (b) tento nejhorší případ může být tak nepravděpodobný, že bude mít zanedbatelnou důležitost.

4.3 Kvalitativní a semikvantitativní přístupy k integraci rizika

4.3.1 Otázka kvantifikace

V minulosti existovaly určité spory nad potřebou kvantifikace rizika ve vztahu k lidskému životu. Námitky spočívaly hlavně v přítomnosti významných neurčitostí v analytické metodě samotné a ve strachu z konečných výsledků u lidí, kteří byli buď neochotní nebo neschopní je objektivně vyhodnotit. Zatímco tyto námitky mají reálný základ, tak jen ta dostupná alternativa, že se jedná o životně důležitý rizikový charakter závažných nehod (určitá forma kvalitativního hodnocení rizika), je rovnocenně otevřena těmito kritikám. Jelikož technický rozvoj a výzkum pokročil kupředu, metody rizikových analýz a data se enormně zlepšily, takže většina původních námitek je pryč.

Pozitivní stránka kvalitativní analýzy je v tom, že může být provedena s relativně malým úsilím a je vhodná pro použití personálem, který není odborníkem v rizikových analýzách. Např. hodně průmyslových odvětví si přeje dělat hodnocení rizika samo, protože vnitřní management si vybral použít kvalitativní přístup. To je obvykle uplatňováno definováním několika „kategorií náročnosti“, jak pro frekvence tak pro následky, a zařazením každého zdroje rizika do jedné bezpečnostní kategorie.

Následující schéma je příkladem takových kategorií:

(a) Kategorie frekvencí

Závažnost kategorie	Kvalitativní definice	Kvantitativní definice (počet za rok)
A	Asi jednou v příštím roce	0,3 až 3
B	Možná, ale málo pravděpodobná	0,03 až 0,3
C	Nepravděpodobná	0,003 až 0,03
D	Velmi nepravděpodobná	0,0003 až 0,003
E	Skoro nemožná	0,00003 až 0,0003

(b) Kategorie následků

Závažnost kategorie	Kvalitativní definice	Kvantitativní definice
1	Katastrofické	Mnohonásobná úmrtí
2	Závažné	Jednotlivá úmrtí, mnohonásobná zranění
3	Velmi vážné	Zranění s trvalými následky
4	Vážné	Vážná zranění bez následků
5	Podružné	Krátkodobá zranění, krátká pracovní neschopnost

Povšimněme si, že v těchto schématech je pro srovnání a zajištění konzistence rovněž uvedena kvantitativní definice vedle kvalitativní, avšak při aplikaci metody není nutné těchto kvantitativních definicí používat.

Hodnotící tým, který obvykle sestává ze středního managementu, bezpečnostních inženýrů a provozního personálu, nejdříve ve schématech tohoto typu identifikuje všechny zdroje rizika použitím metody HAZOP nebo podobného přístupu a potom označí závažnost kategorie, a to jak pro frekvence tak pro následky.

Riziko spojené s jednotlivými zdroji rizika se skládá ze své kategorie závažnosti jak pro frekvence tak pro následky a je často vyjádřeno jako dvojice znaků, např. „B3“, což znamená zdroj rizika s frekvencí B a následky 3. Tato myšlenka dovoluje jak frekvenci tak i následky vážit dohromady, avšak bez použití matematiky.

„Matice rizika“ je definována jako matice 5×5, kde každá strana odpovídá jedné kategorii závažnosti (viz následující obrázek). Buňky této matice vyjadřují kategorii frekvence / následky, ke které byl každý jednotlivý zdroj rizika přidělen.

		Kategorie závažnosti následků				
		5	4	3	2	1
Kategorie závažnosti frekvencí	A					
	B					
	C					
	D					
	E					

Stínování v matici naznačuje ocenění závažnosti zdrojů rizika. Zdroje s vysokým oceněním, jako jsou A1, B1 a A2 v černých polích, jsou považovány za velmi vážné a vyžadují okamžitou nápravu pro snížení závažnosti. Zdroje s nízkým oceněním, jako jsou E5, E4 a D5 v bílých polích, nevyžadují další bezpečnostní úpravy. Zdroje rizika nacházející se mezi těmito dvěma póly matice si zasluhují určité úpravy a vylepšení, pokud bude nalezeno finančně schůdné řešení. Čím blíže je výsledek černému rohu matice, tím naléhavěji se musí hledat zlepšení.

Schéma podobného druhu může ukázat účinnou metodu jak získat jednoduchý přehled o struktuře zdrojů rizika a o jejich výběru pro nápravné akce.

4.3.2 Problémy kvalitativního přístupu

Ačkoli kvalitativní přístup může fungovat a je užitečným prvním krokem, má několik technických nedostatků.

Zaprvé: Je obtížné dosáhnout jednotného souladu v kategoriích následků a frekvencí bez vnesení určitých forem kvantifikace. Frekvence je číselné povahy už ve své podstatě, zatímco většina forem následků (např. úmrtí, ztráta hodnoty, atd.) je číselně měřitelná. Kvalitativní analýza často končí jako semi-kvantitativní nebo plně kvantitativní, protože se studijní tým snaží dosáhnout jednotného souladu.

Zadruhé: Je obtížné přidělit kategorii frekvence jedné jediné události. Přísně vzato, pro jakoukoli jednotlivou událost je velmi nepravděpodobné, že se vyskytne *přesně*. Např. nikdy nenastane únik tekutiny s hodnotou přesně 1 kg/s. Naproti tomu můžeme pozorovat úniky v rozsahu např. 0,5 až 1,5 kg/s. To znamená, že ocenění frekvence musí pečlivě odpovídat rozsahu uvažovaných událostí.

Oceněná událost je jedna specifická událost, která stojí mezi řadou reálných událostí, které společně mají oceněny frekvence a jejichž průměrné následky spadají do oceňovaného rozsahu. To je dost složitá myšlenka, která se může obtížně hodnotícímu týmu správně uplatňovat. Často to pak vede k podhodnocení frekvence vlivem příliš úzkého definování události.

Zatřetí: Je nejasné, jak ocenit celý podnik, který obsahuje mnoho jednotlivých zdrojů rizika, z nichž každý spadá do určité oblasti matice rizika. Např. jak by se srovnával jeden podnik s 10 zdroji rizika (každý kategorie C3) s jiným podnikem s pouze 5 takovými zdroji rizika? Matice rizika sama o sobě nedává na tuto otázku odpověď.

Začtvrté: Matice rizika nevede přirozeně k systému souhrnných rizik napříč obchodním členěním. Riziková manažerka korporace mají potřebu prezentovat úplný rizikový profil jejich vrcholovému vedení, a ti chtějí vidět příspěvky každé jednotlivé pobočky. To není zřejmé ze samotných kvalitativních kategorií. Problém může být vyřešen pouze zavedením číselné hodnoty ke každé kategorii a zavedením nějakého pravidla pro přidání zdrojů rizika (takového jako přidání hodnot frekvencí zdrojům rizika ve stejné kategorii následků) – což metodu přivede velmi těsně k plně kvantifikované analýze.

4.4 Integrace kvantitativního přístupu

Kvantifikace rizika spojuje analytika s matematickou disciplínou, která je nezbytná, abychom se vyhnuli chybným hodnocením a dosáhli prokazatelně úplné analýzy. Jakmile musí být použita čísla, analytik si uvědomuje, že jeho výpočty mohou být podrobeny zkoumavému pohledu třetí strany a zpochybněny. Dobrá riziková analýza bude obsahovat nezávislou kontrolu, která nejen ospravedlní původní výsledky, ale rovněž dovolí bystré úvahy o alternativních hypotézách nebo změnách projektu. Cílem kvantitativního hodnocení rizika (QRA) je vyčíslit jak frekvenční / pravděpodobnostní, tak i následkový rozměr rizika. Výpočty frekvence musí být prováděny takovým způsobem, aby byly vzaty v úvahu všechny možné události. To znamená, že byly identifikovány všechny zdroje rizika, a že se při výpočtech frekvencí správně uvažil rozsah možných zdrojů rizika a rozsah možných odezev (jako jsou hašení požáru, nouzové odstavení, evakuace, atd.).

Existuje základní princip QRA týkající se celkové frekvence, se kterou musí být počítáno: analýza by neměla vynechat žádnou část tohoto celku, ani by je neměla dublovat. Hlavní břemeno práce na frekvenční části QRA spočívá v záruce, že frekvence je správně přiřazena nehodovým scénářům takovým způsobem, aby zachovala celkovou frekvenci a odpovídala důkazům dostupných z historických dat. Pro chemický podnik výpočty příznačně berou zřetel na každý případ úniku s různorodými meteorologickými podmínkami a směry větru, na rozdílnou denní dobu a intenzitu zdroje. Následná protiriziková opatření vystihují celkový rizikový dopad podniku na jeho okolí a míru rizika v jednotlivých místech kolem podniku.

Metody pro začlenění rizika mají opakující se charakter a jsou výpočetně obtížné. Proto jsou v praxi prováděny s využitím výpočetních programů známých jako „Integrátory rizika“. Příklady takových programů jsou (v závorce je uveden výrobce): SAFETI (DNV Technica), RiskPlot II (Four Elements Limited), RiskCurves (TNO) a RiskAT (UK Health and Safety Executive).

Tyto programy vykonávají následující činnosti:

1. reagují na každý případ úniku v čase,
2. volí si meteorologickou situaci,
3. vyhledají nebo spočítají *následky* v „účinných zónách“ ve směru větru, ve kterých se objeví nadprahové úrovně poškození,
4. umístí místo úniku na mapu podniku,
5. vyberou směr větru,
6. překryjí zóny úniků na mapě s ohledem na směr větru,
7. vypočítají počet zasažených osob na základě rozmístění populace (N_i),
8. vypočítají na základě frekvence úniku a meteorologické statistiky *frekvencí* úniků (F_i),
9. shromáždí hodnoty F_i pro každý bod okolí, který spadá do zóny úniků,
10. opakují pro další směr větru (bod 5),
11. opakují pro další meteorologickou situaci (bod 2),
12. opakují pro další případ úniku (bod 1).

Tento proces vede ke shromáždění hodnot frekvencí pro každý bod okolí (použitých k vytváření izolinií rizika) a velkého souboru párovaných hodnot F_i a N_i (použitých k vytváření F-N křivek). Pro účely vnitřního managementu by měly být s každou párovanou hodnotou F_i a N_i zaznamenávány další parametry. Např. je potřeba zaznamenat charakteristické znaky každého scénáře: zdroj rizika, meteorologické podmínky, atd. Tyto údaje jsou potřebné pro činnosti následující po analýze a pro profilování rizika.

5. Přehled použité a doporučené literatury

Pro sestavení tohoto dokumentu byla použita následující literatura:

- /1/ C. Kirchsteiger (ed.): Risk Assessment and Management in the Context of the Seveso II Directive, Elsevier, 1998.
- /2/ Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (Second Edition with Worked Examples), AIChE - CCPS, New York, 1992.
- /3/ Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, AIChE - CCPS, New York, 1989.

Všechny probírané problémy oblasti analýzy a hodnocení rizika ve značně podrobné formě rovněž uvádí fundamentální encyklopedické dílo:

- /4/ F. P. Lees (ed.): Loss Prevention in the Process Industries, second edition, Butterworth - Heinemann, 1996, reprinted 2001.

Další odkazy na různé příručky týkající se probíraných oblastí analýzy a hodnocení rizika jsou:

- /5/ D., A. Jones: Nomenclature for Hazard and Risk Assessment in the Process Industries, second edition, Institution of Chemical Engineers, 1992, reprinted 1994.
- /6/ M. Ferjenčík, J. Nejedlý: Metodologie hodnocení míry rizika velkých havárií – kvantitativní analýza rizika chemických procesů, CEMC Praha, 1992.
- /7/ A. Mykiska: Spolehlivost technických systémů, Vydavatelství ČVUT, ČVUT Praha, 2000.
- /8/ F. Jaroš a kol.: Pravděpodobnost a statistika, VŠCHT Praha, 1994.
- /9/ Methods for Determining and Processing Probabilities („Red Book“), CPR 12E, First edition, Committee for the Prevention of Disasters, The Hague, 1988.
- /10/ Methods for Determining and Processing Probabilities („Red Book“), CPR 12E, Second edition, Committee for the Prevention of Disasters, The Hague, 1997.
- /11/ D. Swain, H. E. Guttman, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-1278, 1983.
- /12/ Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries, IAEA-TECDOC-727 (Rev. 1), IAEA, Vídeň, 1996.
- /13/ Dow's Chemical Exposure Index Guide, 1st edition, AIChE, New York, 1994.

- /14/ Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide, 7th edition AIChE, New York, 1994.
- /15/ Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables, AIChE - CCPS, New York, 1989.

Obsahu směrnice Seveso II a jeho realizace se týkají např. tyto práce:

- /16/ Council Directive 96/82/EC on the control of major accident hazards involving dangerous substances. [Směrnice Rady 96/82/ES, o omezování zdrojů nebezpečí velkých havárií s přítomností nebezpečných látek].
- /17/ Council Directive 89/391/EEC on the introduction of Measures to Encourage Improvements in the Health and Safety at Work. [Směrnice rady 89/391/EHS, o zavedení opatření k podpoře zlepšení ochrany zdraví při práci a bezpečnosti práce].
- /18/ Drogaris G. "Review of accidents involving chlorine" ["Přehled havárií s přítomností chloru"] EUR 14444 EN, 1992, JRC Ispra, Itálie.
- /19/ HS(G)28 (1986) "Safety Advice for Bulk Chlorine Installations" ["Bezpečností rady pro zařízení mající hromadně skladovaný a zpracováváný chlor"]. Health and Safety Executive United Kingdom [Úřad pro hygienu a bezpečnost práce Velké Británie].
- /20/ ILO Code of Practice (MOP, (1991) "Prevention of Major Industrial Accidents" ["Prevence velkých průmyslových havárií"]. International Labour Office [Sekretariát Mezinárodní organizace práce].
- /21/ B. De Marchi, S. Funtowicz (1994): General Guidelines for Content of Information to the Public. Directive 82/501/EEC - Annex VII.[Obecný návod k obsahu informace pro veřejnost, Směrnice 82/501/EHS - příloha VII.], EUR 15946.
- /22/ Papadakis G. A. and A. Amendola (Eds.) (1997): Guidance on the preparation of a Safety Report to meet the requirements of Council Directive 96/82/EC (Seveso II), [Návod pro vypracování bezpečnostní zprávy, která splňuje požadavky Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)]. EUR 17690 EN. JRC Ispra.
- /23/ N. Mitchison and Sam Porter (Eds.) (1998): Guidelines on a major accident prevention policy and safety management system, as required by Council Directive 96/82/EC (Seveso II), [Návod přístupu k prevenci velkých havárií a systému řízení bezpečnosti podle požadavků Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)]. EUR 18123 EN. JRC Ispra.
- /24/ Papadakis G. A and S. Porter (Eds.) (1999): Guidance on Inspections as Required by Article 18 of the Council Directive 96/82/EC (Seveso II), [Návod k inspekci podle požadavků článku 18 Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)]. EUR 18692. JRC Ispra.

Řízení bezpečnosti se týkají např. tyto práce:

- /25/ AIChE. (1993). *Guidelines for Auditing Process Safety Management Systems* [Návod pro provádění auditů systémů řízení bezpečnosti

- procesů*]. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers [Středisko pro bezpečnost chemických procesů Amerického institutu chemických inženýrů]. 136 stran.
- /26/ AIChE. (1994). *Guidelines for Implementing Process Safety Management Systems* [Návod pro zavádění systémů řízení bezpečnosti procesů]. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers [Středisko pro bezpečnost chemických procesů Amerického institutu chemických inženýrů]. 219 stran.
 - /27/ API (1990) Management of process hazards, API recommended practice 750 [Omezování zdrojů nebezpečí procesů, Doporučené postupy API 750]. American Petroleum Institute [Americký petrolejářský institut], Washington, Spojení státy americké.
 - /28/ British Standards Institute [Britský úřad pro normalizaci] (1996). BS 8800 Guide to occupational health and safety management systems [Návod pro systémy řízení ochrany zdraví a bezpečnosti práce], Velká Británie.
 - /29/ CONCAWE (1989) *Managing safety* [Řízení bezpečnosti]. Report No. 4/89 [Zpráva č. 4/89], CONCAWE, Brusel, Belgie.
 - /30/ IAEA (1988). *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants* [Základní zásady bezpečnosti jaderných elektráren]. Safety Series No 75-INSAG-3 [Řada o bezpečnosti č. 75-INSAG-3]. International Atomic Energy Agency [Mezinárodní agentura pro atomovou energii], Vídeň 1988.
 - /31/ IAEA (1991). *Safety Culture. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group* [Kultura bezpečnosti. Zpráva Poradní skupiny pro bezpečnost Mezinárodní organizace pro atomovou energii]. Safety Series No 75-INSAG-4 [Řada o bezpečnosti č. 75-INSAG-4]. International Atomic Energy Agency [Mezinárodní agentura pro atomovou energii], Vídeň 1991.
 - /32/ ISO 14001:1996(E), 1996, Environmental management systems - specification with guidance for use [Systémy řízení ochrany životního prostředí – Obecná vodítka o principech, systémech a podpůrných metodách].
 - /33/ ISO 14004:1996(E), 1996, Environmental management systems – General guidelines on principles, systems and supporting techniques [Systémy řízení ochrany životního prostředí – Obecná vodítka o principech, systémech a podpůrných metodách].
 - /34/ ISO 8402, Quality-Vocabulary [Kvalita – slovníček pojmů].
 - /35/ ISO 9000-1:1994, 1994, Quality management and quality assurance standards - Part 1: Guidelines for selection and use [Řízení kvality a normy kvality – část 1. Návod pro výběr a použití].
 - /36/ ISO 9001:1994, 1994, Quality systems - Model for quality assurance in design, development, production, installation and servicing [Systémy řízení kvality při projekci, konstrukci, vývoj, výrobu, instalaci, údržbu a opravy]

- /37/ ISO/CD (1995). Petroleum and natural gas industries - Health, Safety and Environmental Management Systems [Těžba a zpracování ropy a plynu – Systémy řízení ochrany zdraví, bezpečnosti a ochrany životního prostředí], ISO/CD 14 690, circulated as International Standards Organisation Committee draft [šířeno jako koncept Výboru Mezinárodní organizace pro normalizaci].
- /38/ MAHB (1997). *Guidance on the preparation of a safety report to meet the requirements of council directive 96/82/EC (Seveso II)* [Návod pro vypracování bezpečnostní zprávy splňující požadavky směrnice rady 96/82/ES (Seveso II)]. Major Accident Hazards Bureau. Joint Research centre. European Commission [Úřad pro velké havárie, Spojené výzkumné středisko, Evropská komise]. EUR 17690 EN. 66 stran.
- /39/ MAHB (1998). *Guidelines on a major accident prevention policy and safety management system, as required by council directive 96/82/EC (Seveso II)* [Návod pro vypracování přístupu k prevenci velkých havárií a systému řízení bezpečnosti splňující požadavky směrnice rady 96/82/ES (Seveso II)]. Major Accident Hazards Bureau. Joint Research centre. European Commission [Úřad pro velké havárie, Spojené výzkumné středisko, Evropská komise]. EUR 18123 EN. 33 stran.
- /40/ OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), (1992) *Guiding principles for chemical accident prevention, preparedness and response* [Principy pro prevenci a připravenost na velké havárie a zásah při nich], Environment Monograph No 51 [Monografie o životním prostředí č. 51], OCDE/GD (92) 43, OECD Environment Directorate [Úřad OECD pro životní prostředí], Paříž.
- /41/ OSHA (1992). *Process safety management of highly hazardous chemicals*, titla 29, Code of Federal Regulations, Part 1910.119. Occupational Safety and Health Administration [Řízení bezpečnosti procesů se zvláště nebezpečnými chemickými látkami, hlava 26, Federální sbírka zákonů, část 1910.199, Úřad bezpečnosti a hygieny práce], Washington DC, United States of America. (dá se najít na Internetu na stránce: http://www.osha-slc.gov/OshStd_data/1910_0119.html)
- /42/ Reason, J. (1990). *Managing the Management of Risk: New Approaches to Organisational Safety* [Řízení zvládání rizik: nový přístup k bezpečnosti organizace], koncept pro Seminář o řízení nových technologií, Bad Homborg, 3.-5. května 1990.
- /43/ Reason, J. (1991). *Identifying the latent causes of Aircraft Accidents Before and After the Event* [Identifikace skrytých příčin leteckých neštěstí před a po události]. 22. výroční seminář, Canberra, Austrálie, 4.-7. listopadu 1991, The International Society of Air Safety Investigations [Mezinárodní společnost pro vyšetřování leteckých havárií]. 14 stran.
- /44/ Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents* [Zvládání rizik havárií způsobených organizací]. Ashgate Publishing Limited, 1997. ISBN 1 84014 105 0

Identifikace zdrojů rizika a metod analýzy se týkají např. tyto práce:

- /45/ CCPS (Center for Chemical Plant Safety) [Středisko pro bezpečnost chemických závodů], (1992), *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures* [Návod pro postupy hodnocení rizika], The American Institute of Chemical Engineers (AIChE) [Americký institut chemických inženýrů], New York. ISBN 0-8169-0491-X
- /46/ Lees, F.P. (1996) *Loss Prevention in the Process Industries* [Prevence ztrát ve zpracovatelském průmyslu]. Butterworth & Co.
- /47/ Papadakis, G. A.; Amendola, A. (editors) (1997). *Guidance on the preparation of a safety report to meet the requirements of council directive 96/82/EC (Seveso II)* [Návod pro vypracování bezpečnostní zprávy, která splňuje požadavky Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)]. Joint Research Centre. European Commission [Spojené výzkumné středisko Evropské unie]. EUR 17690 EN. 66 stran.
- /48/ Rasmussen, B.; Whetton, C. (1997). "Hazard identification based on plant functional modelling" [Identifikace zdrojů nebezpečí založená na funkčním modelování], *Reliability Engineering & System Safety* [], 55, 77-84.
- /49/ Soukas, J.; Pyy, P. (1988). Evaluation of the validity of four hazard identification methods with event descriptions [Vyhodnocení platnosti čtyř metod identifikace zdrojů nebezpečí s popisem událostí]. VTT Research Report No. 516 [Výzkumná zpráva č. 516]. 55pp.
- /50/ Wells, G. (1996), *Hazard identification and risk assessment* [Identifikace zdrojů nebezpečí a hodnocení rizika], Institution of Chemical Engineers [Institut chemických inženýrů], Rugby, Warwickshire CV21 3HQ, UK.

Hodnocení rizika se týkají např. tyto práce:

- /51/ CCPS (Center for Chemical Plant Safety) [Středisko pro bezpečnost chemických závodů], (1992), *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures* [Návod pro postupy hodnocení rizika], The American Institute of Chemical Engineers (AIChE) (Americký institut chemických inženýrů), New York.
- /52/ Malmén, Y.; Nissilä, N.; Rasmussen, B.; Rouhiainen, V. (1992). *Nordic experiences concerning future trends for the preparation of safety reports* [Severské zkušenosti týkající se budoucích směrů vývoje pro zpracování bezpečnostní zprávy]. Nordic Council of Ministers, [Severská ministerská rada] Nord 1992:46, 178 stran.
- /53/ Papadakis, G.A.; Amendola, A. (editors) (1997). *Guidance on the preparation of a safety report to meet the requirements of council directive 96/82/EC (Seveso II)* [Návod pro vypracování bezpečnostní zprávy, která splňuje požadavky Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)]. Joint Research Centre. European Commission [Spojené výzkumné středisko Evropské unie]. EUR 17690 EN. 66 stran.

Bezpečnostní zprávy se týkají např. tyto práce:

- /54/ ILO Code of Practice [Provozní předpisy MOP], Prevention of major industrial accidents [Prevence velkých průmyslových havárií]. MOP Ženeva 1991.
- /55/ CCPS (Center for Chemical Plant Safety) [Středisko pro bezpečnost chemických závodů], (1992), *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures* [Návod pro postupy hodnocení rizika], The American Institute of Chemical Engineers (AIChE) (Americký institut chemických inženýrů), New York.
- /56/ Malmén, Y.; Nissilä, N.; Rasmussen, B.; Rouhiainen, V. (1992). *Nordic experiences concerning future trends for the preparation of safety reports* [Severské zkušenosti týkající se budoucích směrů vývoje pro zpracování bezpečnostní zprávy]. Nordic Council of Ministers, (Severská ministerská rada) Nord 1992:46, 178 stran.
- /57/ Papadakis, G.A.; Amendola, A. (editors) (1997). *Guidance on the preparation of a safety report to meet the requirements of council directive 96/82/EC (Seveso II)* [Návod pro vypracování bezpečnostní zprávy, která splňuje požadavky Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)]. Joint Research Centre. European Commission [Spojené výzkumné středisko Evropské unie]. EUR 17690 EN. 66 stran.

Vnímání rizika a sdělování rizika se týkají např. tyto práce:

- /58/ Davidsson, G., Lindgren, M., Mett, L., (1997) *Värdering av risk (Risk assessment, in Swedish [Hodnocení rizika, švédsky])*, Räddningverket, Karlstad, Švédsko, P21-182/97.
- /59/ De Marchi, B., Funtowicz, S., (1994) *General guidelines for the content of information to the public Directive 82/501/EEC-Annex VII, European Commission* [Obecná osnova obsahu informací určených veřejnosti podle směrnice Evropské komise 82/501/EHS přílohy VII.], DG-XIII, Report EUR 15946 [Zpráva EUR 15946], Office for Official Publications of the European Communities, Lucembursko, ISBN 92-826-9053-9.
- /60/ R.E. Kasperson, O. Renn, P. Slovic, H.S. Brown, J. Emel, R. Goble, J. X. Kasperson, S. Ratick (1988) *The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework* [Sociální zesílení rizika: rámcová koncepce], Risk Analysis [Analýza rizika], ročník 8, č 2, strany 177-187.
- /61/ Maslow, A. (1954). *Motivation and personalitv* [Motivace a osobnost]. New York: Harper.
- /62/ O. Renn, *Risk Perception and Risk management: A Review, Part 1 : Risk Perception* [Vnímání rizika a omezování rizik: přehled, část 1: Vnímání rizika], Risk Abstract [Abstrakty o riziku] 7(1), strany 1-9 (1990)
- /63/ P.J.M. Stallen, A. Tomas, *Public Concern About Industrial Hazards* [Obavy veřejnosti z průmyslových zdrojů nebezpečí], Risk Analysis [Analýza rizika], 8(2), strany 237-245, (1988)

- /64/ Stern, P.C. & Fineberg, H.V. (1996). *Understanding risk. Informing decisions in a democratic society* [Pochopení rizika: informování o rozhodnutích v demokratické společnosti], National Academy Press, Washington, 249 stran.

Územního plánování se týkají např. tyto práce:

- /65/ Cristou, M.D. (1997). An overview of the approaches followed across Europe in support to land-use planning decisions concerning industries handling hazardous materials [Přehled přístupů používaných v Evropě pro podporu územního rozhodování (řízení) ohledně průmyslových odvětví, která zacházejí s nebezpečnými látkami.]. Joint Research Centre [Spojené výzkumné středisko], Ispra, ISIS/SMA 3211/96, 102 stran.
- /66/ Christou, M.D., Porter, S. (1999) Guidance on land use planning as required by council directive 96/82/EC (Seveso II) [Návod k tvorbě územních plánů podle požadavků směrnice 96/82/ES (Seveso II)], Report EUR 18695 [Zpráva EUR 18695], Office for publications for the EC [Vydavatelský úřad ES], L-2985 Lucembursko.
- /67/ DEPPR – Secretary of State to the Prime Minister for the Environment and the Prevention of major technological and natural risks [Státní tajemník předsedy vlády pro životní prostředí a prevenci velkých technických a přírodních rizik] – DEPPR – Industrial Environment Department [Oddělení průmyslového prostředí] (1990). Control of Urban Development Around High Risk Industrial Sites [Řízení výstavby měst okolo vysoce rizikových průmyslových objektů].
- /68/ Grønberg, C.D.; Burchard, V.; Duijm, N.J.; Rasmussen, B. (1998). “Multi-objective decisions in land-use planning involving chemical sites” [Rozhodnutí s mnoha cíli v územním řízení s přítomností chemických závodů], Safety and Reliability (ESREL '98) [Bezpečnost a spolehlivost] edited by S. Lydersen, G.K. Hansen, H.A. Sanders, Trondheim (Norsko), 16.-19. června 1998, strany 79-88.
- /69/ Janssen, R. (1992). Multiobjective Decision Support for Environmental Management [Podpora rozhodnutí s mnoha cíli pro řízení ochrany životního prostředí], Kluwer Academic Publishers, Nizozemsko, 230 stran.
- /70/ Keeney, R.L. & Raiffa, H. (1993). Decisions with multiple objectives. Preferences and value tradeoffs [Rozhodnutí s mnoha cíli], Cambridge University Press, 569 stran.
- /71/ Stern, P.C. & Fineberg, H.V. (1996). *Understanding risk. Informing decisions in a democratic society* [Pochopení rizika. Informování o rozhodnutích v demokratické společnosti], National Academy Press, Washington, 249 stran.
- /72/ Walker, G. (1995). Land-use planning, industrial hazards and the “COMAH” Directive, Land Use Policy [Tvorba územních plánů, průmyslové zdroje nebezpečí a směrnice “COMAH”, přístup k územnímu plánování], Elsevier Science Ltd. svazek 12, č. 3, strany 187-191.

- /73/ Inspekce prováděné pověřeným příslušným úřadem podle požadavků článku 18 Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)
- /74/ Papadakis G.A. a A. Amendola (Eds.) (1997): Guidance on the preparation of a Safety Report to meet the requirements of Council Directive 96/82/EC (Seveso II) [Návod pro vypracování bezpečnostní zprávy splňující požadavky Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)]. EUR 17690 EN. JRC Ispra
- /75/ N. Mitchison a S. Porter (Eds.) (1998): Guidelines on a major accident prevention policy and safety management system, as required by Council Directive 96/82/EC (Seveso II) [Návod pro vypracování přístupu k prevenci velkých havárií a systému řízení bezpečnosti, které splňují požadavky Směrnice Rady 96/82/ES (Seveso II)]. EUR 18213 EN. JRC Ispra
- /76/ Papadakis G. A. a S. Porter (Eds.) (1999) Guidance on Inspections as Required by Article 18 of the Council Directive 96/82/EC (Seveso II) [Návod pro inspekce podle požadavků článku 18 Směrnice Rady 96/82/ES]. EUR 18692. JRC Ispra
- /77/ ILO Code of Practice, 1991 "Prevention of Major Industrial Accidents" [„Prevence velkých průmyslových havárií“] Mezinárodní organizace práce, Ženeva

Odkazy týkající se obou případových studií uvedených v kapitole 6:

- /78/ Considine, M. and Grint, G. C. (1984), „Rapid Assessment of the Consequences of LPG Releases.“ „Proceedings of the Gastech 84 LNG/LPG Conference. Nov. 6-9. Gastech Ltd., Rickmansworth, UK, 1985, pp. 187-200
- /79/ Kaiser, G. D. and Walker, B. C. (1978). „Releases of Anhydrous Ammonia from Pressurized Containers-The Importance of Denser Than Air Mixtures“ Atmosphere Environment 12, 2289-2300
- /80/ McMullen, R. W. (1975), „The Change of Concentration Standard Deviations with Distance.“ JAPCA 25 (10, October), 1057
- /81/ Rijnmond Public Authority (1982). A Risk Analysis of 6 Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area-A Pilot Study. D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands and Boston, MA. (ISBN 90-277-1393-6)
- /82/ Withers, R. M. J. and Lees, F. P. (1985). „The Assessment of Major Hazards: The Lethal Toxicity of Chlorine.“ (Parts 1 and 2). Journal of Hazard Materials 12 (3, December), 231-282 and 283-302.

6. Příloha č. 1 - případové studie

Kapitola 6 a uvádí dva příklady studií kvantitativní analýzy rizika chemických procesů (CPQRA) jako pomůcku pro porozumění a použití technik pojednaných v těchto metodických pokynech. První příklad (kapitola 6.1) odhaduje riziko nakládání chloru do železniční cisterny z důvodu možné expozice toxickými výpary. Druhý, složitější příklad (kapitola 6.2) odhaduje riziko provozu destilační kolony s hořlavou kapalinou. Důraz v obou příkladech je kladen na předvedení požadovaných výpočtů a vykonaných odhadů během realizace CPQRA, nikoli na přesném určení rizika pocházejícího z vlastní činnosti. Odhadované riziko by proto nemělo být považováno za představitele opravdového rizika skutečného zařízení, které by bylo mnohem složitější v konstrukci a v provozu, jakož i v topografii a demografii okolí.

Čtenář by si měl povšimnout, že vypracované příklady případových studií jsou nabídnuty pouze pro ilustrační účely a že nepředstavují skutečné studie CPQRA. Sestavené odhady rizika nemají žádný význam pro "skutečný svět" studovaných systémů. Podobně data o poruchovosti a další rozhodující informace jsou vymyšleny pro účely osvětlení technik a neměly by být citovány nebo užívány v jiných studiích, kde jsou takové informace a data potřebné. Čtenář musí taková data získat ze zdrojů vhodných pro jednotlivé studie (viz kapitola 3.4.3.1).

6.1 Zařízení pro nakládání chloru do železniční cisterny – 1. případ. studie

6.1.1 Úvod

Tato případová studie znázorňuje užití kvantitativní analýzy rizika chemických procesů pro zjednodušené zařízení k nakládání chloru do železniční cisterny. Používá zjednodušené metodiky pro počítání profilů individuálního rizika (viz kapitolu 1.3.1) a křivek F - N pro vyjádření společenského rizika (viz kapitolu 1.3.2). Jsou demonstrovány všechny kroky týkající se kvantitativní analýzy rizika chemických procesů (viz kapitolu 2). Jsou vypočteny obrysy rizika pro diagram individuálního rizika, křivka F – N pro diagram společenského rizika a některé další indexové míry rizika. Kroky při analýze jsou následující:

1. Popis systému
2. Identifikace události, výběr a výpočet
3. Odhad následků včetně
 - a) výpočtu rychlosti výtoku
 - b) výpočtu toxických účinků
 - c) výpočtu rozptylu
4. Odhad četnosti
5. Odhad rizika, tedy

- a) individuální riziko
- b) společenské riziko
- c) indexy míry rizika

6. Shrnutí

Předmětem této studie je odhad rizika úmrtí obyvatel v sousední obci. Reprezentativní řada událostí vybraných pro tuto studii nezahrnuje lokalizované události, které by mohly způsobit ztráty pouze v místě zařízení.

Pro účely orientace lokalizuje Obrázek 27 na str. 190 výběr hloubky studie pro tento příklad na studijní krychli. Postupně se uvažuje každá z tří os krychle. Aby byly splněny cíle studie, vyžaduje odhad rizika použít všechny významné dílčí techniky CPQRA. K omezení složitosti příkladu se užívají poměrně jednoduché modely pro odhad následků. Jak již bylo uvedeno, je vytvořena reprezentativní řada událostí.

Aby čtenáři mohli sledovat detaily všech kalkulací, počet uvažovaných událostí je malý a povětrnostní podmínky jsou omezeny na jeden typ počasí, charakterizovaný rychlostí větru a třídou stability. Pro skutečnou studii by bylo vhodnější uvážit alespoň dvě atmosférické třídy stability a dvě kombinace rychlosti větru pro poskytnutí reprezentativnější ukázky vlivu povětrnostních podmínek. Na rozdíl od složitého modelu rozptylu těžkého plynu byl vybrán jednoduchý atmosférický model rozptylu, a to neutrálně vztlínavý model Gaussovy vlečky. Realistická studie by mohla zlepšit analýzu v této oblasti, jak je ukázáno v druhé případové studii (kapitola 0). Úroveň zpracování odpovídající tomuto příkladu by mohla odpovídat projektu v raných obdobích projektu.

6.1.2 Popis

Projekt systému pro nakládání chloru byl dobře připraven a byl podřízen řádné revizi. Návrhy projektů se obvykle významně neodchylují od standardních technologií, ale pro tento příklad jsou provedena některá podstatná uzpůsobení typických projektů z důvodu zjednodušení výpočtů.

Zjednodušené schéma nakládacího systému kapalného chloru do železniční cisterny uvádí obrázek č. 28 Obrázek 28 na str. 190. Zásobní tank je namontován 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 odstavné ventily, tank má havarijní ventil. Zásobní tank chloru a podnikový rozvod dusíku jsou chráněny před zpětným tokem jednosměrně propustnými ventily.

Atmosférická železniční cisterna na 10 000 galonů chloru (50 tun) je opatřena pojistným ventilem a čtyřmi přípojkami (vždy dvě pro páru a dvě pro kapalinu) a je odvodušněna do atmosféry. Potrubí pro kapalinu dosahují až na dno cisterny a jsou opatřena přetokovými ventily. Železniční cisterna na chlor je izolovaná 10 cm vrstvou korku nebo polyuretanové pěny. Železniční cisterna je po zkontrolování a požadované údržbě umístěna na váhu a řádně zafixována pomocí brzd

a zaklínování kol. Vagón a nakládací systém jsou pak elektricky uzemněny. Postup pro nakládání kolejové železniční cisterny uvádí Obrázek 29 na str. 191.

Pro zjednodušení výpočtů, jsou uvažovány pouze jediné typické povětrnostní podmínky: rychlost větru 13 ft/s (4 m/s) a neutrální atmosférická stabilita D. Pro další usnadnění výpočtů se předpokládá rovnoměrné rozložení vanutí větru ve všech směrech.

Plán zařízení pro nakládání chloru a jeho okolí uvádí Obrázek 30 na str. 192. Zařízení pro nakládání chloru je umístěno cca 100 m západně od osídlené čtvercové oblasti o hraně 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, disponují potenciálem způsobit požár kaluže na ploše pro nakládání chloru.

6.1.3 Identifikace, výčet a výběr událostí

Kvantitativní analýza rizika chemických procesů je založena na seznamu specifických událostí uvolnění chloru. V souladu s hloubkou studie vymezené ve specifikaci problému, sdružování událostí do skupin musí být reprezentativní úplnému seznamu událostí, ale nemusí být vyčerpávající. Vyčerpávající seznam by byl nezvládnutelný. Cíl studie (odhad rizika pro veřejnost) dovolí vytřídit úplný seznam událostí, který je založen na následujících kritériích:

- Lokalizované události, jejichž následky nepřesáhnou hranici oplocení a nemusí být hodnoceny pro účely odhadu rizika pro veřejnost.
- 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 řada událostí by měla pokrýt řadu výsledků událostí schopných způsobit následky v obci. Řada by měla zahrnovat nejen rozsáhlé, vzácné události, ale také častější události středního rozsahu, které mohou často představovat největší příspěvky k souhrnnému riziku.

Nebezpečí a specifické události v zařízení pro nakládání chloru mohou být určeny několika způsoby, jak je uvedeno v citaci /2/. Inženýrský odhad, zkušenosti a historické záznamy mohou identifikovat frekventovanější události a náhodný výběr nějaké vzácnější události. Ačkoli tato informace je podstatná, není postačující pro výčet všech událostí.

Strukturované metody, jako je studie HAZOP nebo FMEA se často využívají k vyjmenování úplnějšího seznamu událostí. Procedury HAZOP a FMEA jsou uvedeny v řadě informačních zdrojů včetně citace /2/. Studie HAZOP by měla být provedena pro celý postup nakládání a také pro každou příbuznou činnost (např. vzorkování) nebo vzájemně propojené technické vybavení (např. rozvod dusíku).

Typický výstup ze zprávy o studii HAZOP uvádí Tabulka 9 na str. 114. V tabulce je uveden pouze výtah; úplná zpráva o studii HAZOP by tvořila mnoho stránek podobných poznámek a věnovala by se mnoha dalším problémům. Pro další studium jsou určeny události z tabulky 9, které uvádí Tabulka 10 na str. 115. Popis události

(velikost a trvání) je založen na historických datech a inženýrských odhadech a je určen k znázornění spektra možných skutečných událostí.

Analyzovány nebyly úniky otvory z jakéhokoliv potrubí nebo zařízení, protože byly shledány jako příliš malé, aby způsobily dopad na veřejnost. Spontánní katastrofická porucha zásobního tanku chloru nebo železniční cisterny, ačkoli je teoreticky možná, byla posouzena jako příliš nepravděpodobná, aby přispěla jakýmkoliv významným způsobem k riziku pro tento příklad. Avšak následky této události by byly velmi rozsáhlé a taková událost musí být uvážena při analýze skutečného zařízení.

Znovu je nutno poznamenat, že seznam událostí uvažovaných v tomto příkladu byl významně omezen, aby se zjednodušily demonstrační výpočty. Mohly by být identifikovány i jiné události, které by mohly představovat důležité příspěvky k riziku, například že železniční cisterna bude po připojení odtažena, že dojde k poruše velkých potrubí nebo delšímu trvání úniků.

Události a výsledky událostí pro tento příklad jsou totožné. Každá událost úniku chloru má jediný výsledek události - toxický mrak putující po směru větru. Umístění zóny toxických účinků závisí na povětrnostních podmínkách a směru vanutí větru. Proto každá kombinace události, povětrnostních podmínek a směru vanutí větru má za následek samostatný výsledek případu události. Protože v tomto příkladu jsou uvažovány pouze jedny povětrnostní podmínky, výsledky případů události se liší pouze co do směru vanutí větru. Zóny účinků mají stále stejné fyzikální rozměry pro všechny případy výsledků událostí.

6.1.4 Odhad následků události

Pro každou událost z tabulky 10 se použije kombinace modelů pro určení zón účinků, kde mohou nastat úmrtí lidí. Pro každou událost se vypočítá hmotnostní výtoková rychlost, 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_{50} pro každou událost. Výpočty atmosférického rozptylu poskytnou vzájemnou vazbu *koncentrace - vzdálenost*, která dovolí odhadnout zónu účinku.

6.1.4.1 Výpočty výtokové rychlosti

Tři reprezentativní události (1, 2, a 3 z tabulky 10) vyžadují tři různé výpočty výtokové rychlosti. Modely pro počítání výtokových rychlostí jsou posouzeny v části 2.1.1 citace /3/. Výpočty jsou jasné pro úniky kapaliny nebo páry z otvorů poblíž cisteren nebo z potrubí o velkém průměru. Rychlosti úniku ze vzdálenějších míst potrubí budou zmenšeny třením v potrubí. Pro tuto případovou studii se však předpokládá, že úniky nejsou neovlivněny ani délkou potrubí ani jeho geometrií.

Tabulka 9: Výstup ze studie metodou HAZOP průtokového zařízení pro nakládání chloru do železniční cisterny (pouze výtah).

Klíčové slovo	Odchylka	Možné příčiny	Následky	Požadovaná činnost
I. Žádný	Průtok	A. Ruční ventily zavřeny B. Havarijní uzavírací ventil zavřený C. Hadice blokováné D. Potrubí blokováná	A-D Provozní zpoždění	A-D Ověřit provozní předpisy přiměřené pro bezpečné korekce všech případů "žádného průtoku"
II. Vysoký	Průtok	A. Únik přírubou B. Únik ventilem C. Únik z potrubí způsobený nárazem D. Špatná funkce pojistného ventilu na železniční cisterně E. Únik z hadice	A. Nebezpečí otravy B. Nebezpečí otravy C. Nebezpečí otravy D. Nebezpečí otravy E. Nebezpečí otravy	A.1. Minimalizovat přírubová spojení A.2. Ověřit přiměřenost specifikace těsnění A.3. Postarat se, aby aktivací body havarijních uzavíracích ventilů byly vhodně umístěny, uvážit 2 ovládací body A.4. Překontrolovat umístění dýchacího přístroje B. Podobně jako únik přírubou C. Minimalizovat činnosti poblíž potrubí obsahujícího chlor D. Zkontrolovat pojistný ventil před nakládáním. Požadována analýza nebezpečí E. Zdokonalit program preventivní údržby hadic
III. Vysoká	Hladina	A. Chyba vážení	A. Chlor prochází pojistným ventilem-nebezpečí otravy	A. Nevhodná stávající konstrukce a systém vážení považován za přiměřený
IV. Vysoká	Teplota	Požár v okolí (1) na koleji, kde se manipuluje s hořlavým materiálem; (2) zvýšeného potrubí s hořlavým materiálem	A.1. Velký průtok par pojistným ventilem-nebezpečí otravy A.2. Katastrofální porucha, protržení pláště - nebezpečí otravy	A. Požadována analýza nebezpečí. Zařízení protipožární ochrany přiměřená, požár kaluže přibližně 60 min. pod kontrolou. Katastrofické protržení nepravděpodobné před přivedením požáru pod kontrolu
V. Vysoký	Tlak	A. Přetlak v přívodu dusíku	A. Pojistný ventil zareaguje havarijním odfukem - nebezpečí otravy	A. Není požadována žádná činnost; řídicí systém tlaku na přívodu dusíku a regulace tlaku na havarijním odfuku přiměřené
VI. Ostatní	Koroze	A. Vnitřní koroze cisteren nebo potrubních armatur	A. Únik kapaliny nebo páry, nebezpečí otravy	A. Periodické vnitřní inspekce (v intervalu 1-5 roků) by měly objevit každou počínající korozi

Tabulka 10: Reprezentativní sada událostí vybraných z tabulky 9

Pořadové číslo události	Popis události	Odkaz na tabulku 9
1	Malý výtok kapaliny (otvor ekvivalentní 12 mm (1/2 in.)) Trvání = 10 min. (odhad) Příčiny: Netěsnost ventilů (7 ventilů a přidružených přírub) Únik z hadice Porucha potrubí s kapalinou způsobená nárazem	 II A, II B II E II C
2	Malý výtok par (otvor ekvivalentní 12 mm (1/2 in.)) Trvání = 20 min. (odhad) Příčiny: Únik ventily (5 ventilů a přidružených přírub) Únik hadicí Porucha potrubí s parami nárazem Únik pojistným ventilem	 II A, II B II E II C II D
3	Velký únik par Trvání = 60 min. (čas odhadnutý pro protipožární opatření zahrnující ochlazování cisterny s chlorem a zastavení úniku) Příčina: Vnější požár způsobí reakci pojistného ventilu	 IV A

Událost číslo 1: Vytékání kapalin otvorem 1/2 in. (12 mm). Zařízení pro kapalný chlor je udržováno pod mírným přetlakem dusíku 6,3 baru (absolutní tlak $6,3 \times 10^5$ N/m²). 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 = výtoková rychlost kapaliny (kg/s)

C_d = výtokový součinitel (pro kapaliny se užívá 0,61) (bezrozměrná veličina)

A = plocha otvoru (pro 12 mm, $1,13 \times 10^{-4}$ m²)

ρ = hustota kapalného chloru (1420 kg/m³)

p = tlak v zařízení ($6,3 \times 10^5$ N/m² absolutní)

p_a = tlak vzduchu ($1,0 \times 10^5$ N/m² absolutní)

h = geometrická výška otvoru (předpoklad 0 m)

g = gravitační konstanta (9,8 m/s²).

Pomocí těchto dat, se vypočte výtoková rychlost kapaliny $G_L = 2,7$ kg/s. Tuto rychlost je nutno porovnat s charakteristikou uzavíracího ventilu nadměrného průtoku. Pro účely tohoto příkladu se předpokládá, že ventil nadměrného průtoku se neuzavře.

Když otvorem vytéká kapalný chlor pod tlakem, určitý podíl se okamžitě odpařuje. To může být odhadnuto pomocí následujícího vztahu:

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

- kde F_v = zlomek okamžitého odpařování kapaliny na páru
 C_p = průměrná tepelná kapacita kapaliny v rozmezí T až T_b
 (0,950 kJ/kg°C)
 T = počáteční teplota (18 °C)
 T_b = konečná teplota = atmosférický bod varu (- 34 °C)
 h_{fg} = výparné teplo (při - 34 °C, 285 kJ/kg).

Pomocí těchto dat se vypočte, že zlomek okamžitého odpařování je 0,17.

Podle pravidla dvojnásobku (část 2.1.2 citace /3/) je možné předpokládat, že podíl aerosolu (kapičky kapaliny suspendované v páře) může být stejný jako je podíl okamžitého odpařování. Tedy pro tento příklad představuje mrak 34% (17% pára a 17% aerosol) úniku, 66% vyprší jako kapalina na zem. Pro malé úniky se většina této kapaliny bezprostředně vypaří při styku s teplou zemí. Skutečná rychlost vypařování může být odhadnuta podle teploty chloru (- 34 °C), místní teploty země a množství kapaliny ve vztahu k tepelné kapacitě země (část 2.1.2 citace /3/). V tomto případě pro únik trvající 10 minut obsahuje kaluž kapaliny asi 1000 kg chloru ($600 \text{ s} \times 0,66 \times 2,7 \text{ kg/s}$). Je možno ukázat, že všechen tento materiál se vypaří velmi rychle, a tak základ pro výpočet rozptylu by mohl být založen na plné rychlosti výtoku, tj. 2,7 kg/s. Větší nebo delší trvání úniku by mělo být modelováno precizněji. Pro tento příklad (událost 1) je vstupní údaj výtokové rychlosti pro výpočet rozptylu 2,7 kg/s.

Událost čis. 2: Výtok par otvorem 1/2 in. (12 mm). Výpočet výtoku par musí také vzít v úvahu kompresibilitu plynu (část 2.1.1 citace /3/). 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

γ = 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 výtok.

Rovnice (vztah) pro výtok plynu otvorem je:

$$G_v = C_d \frac{A p}{a_0} \psi$$

Faktor výtoku ψ pro sonický výtok je dán výrazem:

$$\psi = \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$$

a_0 (sonická rychlost plynu při teplotě T) je dána vztahem:

$$a_0 = \left(\frac{\gamma R T}{M} \right)^{1/2}$$

Tyto vztahy mohou být sloučeny, takže dají následující rovnici pro sonický výtok plynu:

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

- kde G_v = rychlost zúženého výtoku plynu (kg/s)
 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 ($6,3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)
 M = molekulová váha (kg/kmol) (pro chlor 71)
 R = plynová konstanta (8310 J/kmol/K)
 T = počáteční teplota (291 K).

Pro událost 2 je rychlost úniku par jako vstupní údaj pro model rozptýlu 0,26 kg/s.

Událost čís. 3: Výtok páry pojistným ventilem železniční cisterny. Množství par vytvořených v tlakové nádobě zachvácené vnějším požárem může být odhadnuto pomocí vzorce podle NFPA 58 (kapitola 2.1.1 citace /3/).

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

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

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

Rychlost výtoku plynu pojistným ventilem je:

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

- kde G_{rv} = rychlost výtoku plynu (kg/s)
 Q_{in} = vstup tepla stěnou nádoby (kJ/s)
 A = celková plocha povrchu nádoby (přibližně 650 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 kJ/kg)

Potom

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

a

$$G_{rv} = (614 \text{ kJ/s}) / (257 \text{ kJ/kg}) = 2,4 \text{ kg/s}$$

Doba úniku je odhadována na 60 min. podle času odhadnutého pro zásah hasičů při ochlazování nádoby vodními proudy. Páry chloru vytékající pojistným ventilem nejsou vznosné (vzlínavé), protože var uvnitř nádoby je udržuje chladné a mají vyšší molekulovou váhu než vzduch. Rychlost úniku chloru pro událost 3 je 2,4 kg/s.

Následující tabulka shrnuje odhadnuté rychlosti úniku pro tři reprezentativní události.

Tabulka 11: Odhadnuté rychlosti úniku chloru pro tři reprezentativní události

Událost	Popis	Odhad rychlosti úniku (kg/s)
1	Únik kapaliny	1,7
2	Únik páry	0,26
3	Výtok pojistným ventilem	2,4

6.1.4.2 Výpočet toxicity 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 (viz kapitolu 3.3.5.2 nebo v citaci /3/ kapitolu 2.3.1). Withers a Lees (1985) předložili vztah pro výpočet pravděpodobnostní probit funkce pro smrtelné účinky chloru na průměrnou populaci:

$$\text{Pr} = -8,29 + 0,92 \ln C^2 t$$

kde Pr = hodnota pravděpodobnostní probit funkce (viz tabulku 2.9 v citaci /3/)

C = koncentrace chloru (ppm)

t = doba expozice (min.).

Pro účely tohoto příkladu se předpokládá, že všechny osoby nacházející se v mraku, jehož hranice jsou vymezeny LC₅₀ (koncentrací smrtelnou pro 50% nechráněných osob) chlor zahubí 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 LC₅₀ 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 rámcem tohoto příkladu. Výše

uvedený předpoklad připouští použití zjednodušených metod pro odhad individuálního a společenského rizika.

Aby se určila velikost mraku chloru pro každou událost, je třeba určit LC_{50} chloru pro dobu expozice odpovídající příslušné události. Je možné předpokládat, že čas požadovaný pro to, aby mrak minul nějakou usedlost, je roven času trvání úniku látky při události. V podrobnější studii by mohl být použit model rozptylu pro odhad přesné toxické dávky v jakékoliv usedlosti.

V tomto příkladu události 1 a 2 mají trvání 10 min., událost 3 trvá 60 min. Koncentrace chloru odpovídající LC_{50} pro $t = 10$ a 60 min. může být stanovena dosazováním $Pr = 5,0$ (podmínka pro LC_{50}) a řešením výše uvedené rovnice pro C . Výsledky odhadu expozice LC_{50} pro chlor udává následující tabulka:

Tabulka 12: Výsledky odhadu expozice LC_{50} pro chlor

Doba expozice (min.)	Událost	Odhadnutá LC_{50} (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 (výtok pojistným ventilem po dobu 60 min.) je zóna účinku definována koncentrací chloru 175 ppm.

6.1.4.3 Výpočty rozptylů

Rozptyly mraků par jsou stručně uvedeny a diskutovány v kapitole 3.3.3 nebo podrobněji v části 2.1.3 citace [3]. Mraky uniklého chloru v této případové studii jsou zpočátku hustší než vzduch. Je však možno prokázat, že nastane přechod do neutrální vztlínivosti dávno předtím než budou zasaženy obydlené oblasti 100 m východně. Za těchto okolností mohou být získány odhady požadované přesnosti pomocí modelu Gaussovy vlečky podle Pasquilla - Gifforda. Vhodný tvar Pasquill - Giffordovy rovnice pro kontinuální zdroj neabsorbovatelného materiálu je:

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

kde x, y, z = vzdálenosti od zdroje v (m) (x = po směru větru, y = kolmo na směr větru, z = vertikální výška)

C = koncentrace (kg/m³) v poloze x, y, z

G = rychlost výtoku (kg/s)

H = výška zdroje nad úrovní terénu (m)

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = parametry rozšíření v (m), funkce vzdálenosti po směru větru

u = rychlosti větru (m/s)

Pro tento příklad se předpokládá, 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 mraku 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 kg/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 ($0,082 \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K}$)

T = teplota (K)

M = molekulová váha (kg/kmol)

P = tlak (atm).

Následující vztahy (McMullen, 1975) se používají pro výpočet parametrů rozptylování σ_y a σ_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 kg/s (událost čís. 1)

= 0,26 kg/s (událost čís. 2)

= 2,4 kg/s (událost čís. 3).

T = 18 °C = 291 K

u = 4 m/s

M = 71 kg/kmol

P = 1 atm

Tabulka 13 shrnuje výsledky těchto výpočtů. Vzdálenost, ve které koncentrace chloru v úrovni terénu ve střední linii po směru vanutí 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} . Tyto výsledky jsou shrnuty v tabulce 14.

Tabulka 13: Koncentrace chloru pro tři reprezentativní události případové studie

Událost 1 Únik kapaliny (2,7 kg/s, 10 min)		Událost 2 Únik páry (0,26 kg/s, 10 min)		Událost 3 Výtok pojistným ventilem (2.4 kg/s, 60 min)	
x (m)	C (ppm)	x (m)	C (ppm)	x (m)	C (ppm)
100	2000	50	690	100	1700
200	550	64	430	150	830
230	430	100	190	200	490
250	370			250	330
300	270			300	240
				360	175
				400	145

Tabulka 14: Vzdálenost, ve které dosáhne koncentrace chloru hodnoty LC_{50}

Událost	Popis	Trvání (min)	Chlor LC_{50} (ppm)	Vzdálenost po směru vanutí větru, ve které koncentrace = LC_{50} (m)
1	Únik kapaliny	10	430	230
2	Únik páry	10	430	64
3	Výtok pojistným ventilem	60	175	360

Samotná vzdálenost po směru vanutí větru plně necharakterizuje zónu účinku pro mrak par. Je také třeba znát rozměr šířky mraku nebo jeho roztažení. Model Gaussovy vlečky (rovnice na str. 119) může být vyřešen pro řadu vzdáleností přechodných a kolmých na směr vanutí větru, aby bylo možno nakreslit úplnou izočáru odpovídající koncentraci LC_{50} . Jednodušší přístup, přiměřený pro tento příklad, je aproximovat vlečku jako část ve tvaru rybího 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 vanutí větru (např. ve středu délky). Tento výpočet dává horizontální úhel vlečky zhruba 15° pro tři události (skutečné rozpětí $14 - 18^\circ$).

6.1.5 Odhad četnosti události

Pro každou identifikovanou reprezentativní událost může být odhadnuta pravděpodobnost. Pokud je konstrukce zařízení dostatečně podobná zařízením známým z historických záznamů, četnost události může být odvozena z historických statistik (viz kapitolu 3.1 citace /3/); toto je rozhodně pravda pro události 1 a 2 v

tomto příkladu. Tam, kde je konstrukce zařízení podstatně rozdílná nebo závažná historická data neexistují, může být k odhadu četnosti poruchy použita metoda stromu poruch (viz kapitolu 3.4.2 nebo kapitolu 3.2.1 citace /3/); 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 procesního průmyslu (viz kapitolu 3.4.3). Taková data musí být posouzena, aby se určilo, zda místní podmínky (např. teplota, tlak, koroze, vibrace) se podstatně neliší od výchozích údajů. Pro tento příklad byly historické záznamy přiměřeně posouzeny pro odhad četnosti úniků, ekvivalentních 1/2 in. (12 mm) otvorům v potrubích kapaliny a páry, ventilech a hadicích. Odhadem určené četnosti v tabulce 15 pro úniky představované 1/2-in (12 mm) otvorem pocházejí z řady zdrojů, včetně Rijnmonda (1952).

Použitím těchto dat mohou být odhadnuty četnosti nehod 1 a 2. Četnost každé události je rovna součtu četností selhání všech jednotlivých složek, jejichž selhání může nastat v rámci reprezentativní události (tabulka 10):

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

kde F_i = celková četnost reprezentativní události i

f_j = četnost selhání komponenty j, která spadá do reprezentativní události i

Tabulka 15: Odhad četnosti selhání součástí systému pro nakládání chloru

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

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

Odtud pro událost 1 je četnost představující únik kapaliny (7 ventilů, 1 hadice, 1 selhání potrubí nárazem) (použita data z tabulky 15):

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

Pro událost 2 je četnost představující únik par (5 ventilů, 1 hadice, 1 selhání potrubí nárazem a 1 únik pojistným ventilem) (použita data z tabulky 15):

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

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 externího požáru je vytvořen jednoduchý model stromu poruch (viz Obrázek 31 na str. 193) pro výpočet četnosti ze základních kauzálních faktorů. Použitím postupu hradlo za hradlem, popsaného v části 3.2.1 citace /3/, je vypočten odhad četnosti události 3 na $3 \cdot 10^{-6}$ za rok.

Tabulka 16 shrnuje výsledky kroku odhadu četnosti. Tyto četnosti selhání pro tři reprezentativní události se sdruží s následky v zónách účinků pro odhad rizika.

Tabulka 16: Souhrn odhadů četností reprezentativních událostí

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

6.1.6 Odhad rizika

6.1.6.1 Individuální riziko

Odhady individuálního rizika tří reprezentativních událostí v okolí zařízení pro nakládání chloru mohou být vypočítány z údajů o pravděpodobnosti jejich výskytu, o jejich zónách účinku a o rozdělení směrů vanutí větru. Nejsou uvažovány žádné faktory zmírnění, jako jsou úkryt nebo evakuace. Pro tento příklad se použijí předpoklady vyjmenované pro zjednodušený přístup k výpočtu individuálního rizika v části 4.4 citace /3/ a může být použit zjednodušený postup podle obrázku 4.7 citace /3/. Byly provedeny všechny kroky popsané v obrázku 4.7 citace /3/ pro seznam výsledků událostí (událostí pro tento příklad) s příslušnými zónami účinku a četnostmi výskytu událostí. Tabulka 17 shrnuje všechna tato data vybraná z tabulek 10 až 16. Následující kroky při generování mapy obrysu individuálního rizika by měly být přešetřeny vzhledem k obrázku 32.

Dalším krokem (podle obrázku 4.7 citace /3/) je zvolit výsledek události s nejdelší zónou účinku. Pro tento příklad to je událost 3. Směr vanutí větru ovlivní umístění

zóny účinku (protáhne se od otvoru úniku po směru vanutí 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 výsledku události i, která ovlivní situaci v jakémkoliv směru za předpokladu rovnoměrného rozdělení směru vanutí větru

f_i = odhadnutá četnost výskytu případu výsledku události i

θ = úhel pokrytý zónou účinku pro případ výsledku události i.

Pro událost 3, $f_3 = 3 \times 10^{-6} \cdot \text{rok}^{-1}$ a $\theta_3 = 15^\circ$

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

Dalším krokem je narýsovat kružnici (obrys rizika) kolem zařízení pro nakládání 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 výsledku události (rok^{-1})

IRC_{i-1} = hodnota individuálního rizika na vedlejším obrysu rizika, f_i , $f_{i,d}$ 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 vanutí větru, takže četnost musí být znovu redukována činitelem směru:

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

Tabulka 17: Souhrn reprezentativních událostí s přidruženými zónami účinku a četnostmi událostí

Událost	Popis	Rychlost výtoku chloru (kg/s)	Doba trvání úniku (min)	LC ₅₀ (ppm)	Zóna účinku		Četnost výskytu události (rok^{-1})
					Vzdálenost k mezi LC ₅₀ (m)	Úhel vlečky (deg)	
1	Únik kapaliny otvorem ekvivalentním 1/2-in.	2,7	10	430	230	15	$5,8 \times 10^{-4}$
2	Únik par otvorem ekvivalentním 1/2-in	0,26	10	430	64	15	$6,6 \times 10^{-4}$
3	Výtok par pojistným ventilem následkem požáru	2,4	60	175	360	15	$3,0 \times 10^{-6}$

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

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

K dokončení analýzy je četnost poslední události (číslo 2) korigována činitelem směru [vztah $f_{i,d} = f_i(\theta_i/360)$]:

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

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 $IRC_i = f_i$ (nebo $f_{i,d}$) + IRC_{i-1} v následujícím tvaru:

$$\begin{aligned} IR_{\text{obrys události 2}} &= f_{2,d} + IR_{\text{obrys události 1}} \\ &= 2,8 \times 10^{-5} + 2,4 \times 10^{-5} \\ &= 5,2 \times 10^{-5} \cdot \text{rok}^{-1} \end{aligned}$$

Obrázek 32 představuje konečnou mapu obrysu individuálního rizika pro tento příklad. Vyšetřování mapy ukazuje, že událost 2 (únik par) nedosáhne k obydlené oblasti, ale události 1 a 3 ano. Událost 3, výtok pojistným ventilem, ovlivní významnou část obydlené oblasti, ale s nižší četností než jiné události.

6.1.6.2 Společenské riziko

Výpočet společenského rizika vyžaduje spíše provést odhad počtu lidí usmrčených při každém případě výsledku události než odhad pravděpodobnosti úmrtí v konkrétním místě. Metodika popsaná v části 4.4 a obrázku 4.10 citace /3/ se používá pro vytvoření křivky F - N. Rozdělení populace v okolí místa pojednaného v příkladu je specifikováno na obrázku 30 na str. 192. Tabulka 17 podává přehled množiny reprezentativních událostí, které mohou potenciálně ovlivnit populaci. Pro tento příklad je seznam událostí totožný se seznamem výsledků událostí, protože každá událost (únik chloru) má pouze jeden výsledek (toxický mrak). Tudíž, s odvoláním na obrázek 4.10 citace /3/, seznam událostí v tabulce 17 představuje seznam možných výsledků událostí.

Další krok při analýze (obrázek 4.10 citace /3/) je vytvoření seznamu případů výsledku události. Pro tento příklad se uvažuje pouze jeden typ počasí (atmosférická stabilita D, rychlost větru 4 m/s), ale směr vanutí větru se bude měnit. Pro účely

následujících výpočtů, je směr vanutí 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 17 má 8 případů výsledků události takto sdružených, jeden případ pro každý směr vanutí větru. Ve specifikaci úlohy je upřesněno, že vanutí větru je stejně pravděpodobné pro jakýkoliv směr. Tudíž pravděpodobnost, že vítr bude foukat v nějakém z 8 možných směrů je 1/8, a četnost každého případu výsledku události je rovna 0,125 krát odpovídající četnost události.

Výběr osmisměrné větrné růžice je libovolný a přináší výsledky s určitou úrovní rozlišení. Lepší rozlišení by bylo získáno při použití dvanáctisměrné nebo šestnáctisměrné větrné růžice, ale na účet dodatečných výpočtů. Nicméně, tvar F - N křivky by byl v podstatě tentýž. Mohla by být také použita větrná růžice s nestejným rozdělením. V tomto případě by četnost každého případu výsledku události (pro směr větru) byla určena násobením pravděpodobností četnosti události pro vanutí větru v tomto směru.

Tabulka 18 uvádí seznam všech případů výsledku události v této studii, každý s odhadem četnosti výskytu. Většina případů výsledku události (indikovaných poznámkou "B") neovlivní obydlenou oblast a nejsou dále uvažovány.

S odvoláním opět na obrázek 4.10 citace /3/, existuje nyní seznam všech případů výsledku události. Byla také určena četnost každého případu výsledku události (Tabulka 18) a zóna jeho účinků (Tabulka 17). Nyní lze určit počet úmrtí pro každý případ výsledku události. Použije se zjednodušená metoda popsaná v části 4.4 citace /3/, spočívající na grafické technice a vztahu 4.4.10 citace /3/.

Zjednodušená procedura spočívá v tom, že se lokální populační mapa překryje zónou účinku každého případu výsledku události. Obrázek 33 na str. 195 to ukazuje pro případy výsledku události označené 3 JZ, 3 Z a 3 SZ. Je provedeno sčítání počtu lidí v každé zóně účinku. Například, zóna účinku v případě výsledku události 3 Z pokrývá asi 15000 m² obydlené oblasti. Při zadané hustotě zalidnění 25 osob na 10000 m² tato zóna účinku ovlivní 38 lidí (15000 m² · 25 lidí / 10000 m²). Počet úmrtí je pak určen z následujícího vztahu:

$$N_i = P_i p_{f,i}$$

kde N_i = počet úmrtí vycházejících pro případ výsledku události i

P_i = celkový počet lidí v zóně účinku pro případ výsledku události i

$p_{f,i}$ = pravděpodobnost úmrtí v zóně účinku pro případ výsledku události i

Při výpočtu individuálního rizika bylo např. předpokládáno, že všechny osoby v zóně účinku vymezené koncentrací LC₅₀ jsou usmrceny, takže $p_{f,i} = 1$. Proto pro všechny případy výsledku události v tomto příkladu:

$$N_i = P_i$$

Pro případ výsledku události 3 Z, $N_i = P_i = 38$ úmrtí. Podobná analýza případů výsledků události 3 JZ a 3 SZ (viz Obrázek 33) ukazuje, že pro tyto případy výsledku události se každý rovná 20 úmrtím. Analýza případů výsledků událostí 1 JZ, 1 Z a 1 SZ je provedena podobným způsobem. Analýza zbývajících událostí v tabulce 18

ukazuje, že ty nemají vliv na obydlenou oblast. Výsledky analýzy všech případů výsledku události jsou shrnuty v tabulce 19. Je třeba si všimnout, že případy výsledku události, které neovlivnily žádné osoby, byly vynechány.

Tabulka 18: Seznam případů výsledku události uvažující 8 bodovou větrnou růžici

Událost	Četnost události (rok ⁻¹)	Případ výsledku události			Poznámky *
		Čís.	Pravděpodobnost směru větru	Četnost (rok ⁻¹)	
1	$5,8 \times 10^{-4}$	1 JZ	0,125	$7,3 \times 10^{-5}$	A
		1 Z	0,125	$7,3 \times 10^{-5}$	A
		1 SZ	0,125	$7,3 \times 10^{-5}$	A
		1 S	0,125	$7,3 \times 10^{-5}$	B
		1 SV	0,125	$7,3 \times 10^{-5}$	B
		1 V	0,125	$7,3 \times 10^{-5}$	B
		1 JV	0,125	$7,3 \times 10^{-5}$	B
		1 J	0,125	$7,3 \times 10^{-5}$	B
2	$6,6 \times 10^{-4}$	2 JZ	0,125	$8,2 \times 10^{-5}$	B
		2 Z	0,125	$8,2 \times 10^{-5}$	B
		2 SZ	0,125	$8,2 \times 10^{-5}$	B
		2 S	0,125	$8,2 \times 10^{-5}$	B
		2 SV	0,125	$8,2 \times 10^{-5}$	B
		2 V	0,125	$8,2 \times 10^{-5}$	B
		2 JV	0,125	$8,2 \times 10^{-5}$	B
		2 J	0,125	$8,2 \times 10^{-5}$	B
3	$3,0 \times 10^{-6}$	3 JZ	0,125	$3,8 \times 10^{-7}$	A
		3 Z	0,125	$3,8 \times 10^{-7}$	A
		3 SZ	0,125	$3,8 \times 10^{-7}$	A
		3 S	0,125	$3,8 \times 10^{-7}$	B
		3 SV	0,125	$3,8 \times 10^{-7}$	B
		3 V	0,125	$3,8 \times 10^{-7}$	B
		3 JV	0,125	$3,8 \times 10^{-7}$	B
		3 J	0,125	$3,8 \times 10^{-7}$	B

* A zóna účinku ovlivnění obydlené oblasti; B zóna účinku neovlivňující obydlenou oblast

Tabulka 19: Odhad počtu úmrtí pro případy výsledku události ovlivňující obydlenou oblast

Případ výsledku události	Četnost F (rok ⁻¹)	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

Dalším krokem postupu podle obrázku 4. 10 citace /3/ je uvést údaje do podoby kumulativní četnosti použitím následujícího vztahu pro všechny případy výsledku události i , při kterém $N_i \geq N$:

$$F_N = \sum_i F_i$$

kde F_N = četnost všech případů výsledku události ovlivňujících N nebo více lidí

F_i = četnost případu výsledku události i

N_i = počet úmrtí lidí ovlivněných výsledkem případu události i

Tabulka 20 ukazuje použití předchozího vztahu pro údaje z tabulky 19, který udává kumulativní četnost F_N případů výsledků události majících za následek N nebo více úmrtí. Data z prvních 2 sloupců tabulky 20, F_N a N , jsou nakreslena jako křivka $F - N$ v logaritmických souřadnicích na obrázku 34 na str. 196.

Tabulka 20: Data pro výpočet křivky společenského rizika $F - N$

Odhad počtu úmrtí*	Kumulativní četnost N nebo více úmrtí, F_N (rok ⁻¹)	Případy výsledku 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, 2 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.

6.1.6.3 Jednoduchá čísla a indexy jako míry rizika

Pro tuto vzorovou úlohu může také být vypočteno několik jednoduchých čísel a indexů jako měřítka rizika:

1. Maximální individuální riziko. Člověk vystavující se maximálnímu individuálnímu riziku se nachází ve středu západního okraje obydlené oblasti (viz obrázek 32, str. 194). Individuální riziko úmrtí v tomto místě je maximální individuální riziko (pro tento příklad $2,4 \times 10^{-5}$ / rok).
2. Střední míra úmrtí. Střední míra úmrtí ($SMÚ$) se vypočítá ze vztahu:

$$SMÚ = \sum_{i=1}^n F_i N_i$$

Tabulka 19 shrnuje F_i a N_i pro šest případů výsledku 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 mohutnosti averze vůči riziku ($p > 1$).

Při použití hodnoty navrhané Okrentem, $p = 1,2$:

$$\begin{aligned} ESN_{Ok} &= (7,3 \times 10^{-5})(13)^{1,2} + (7,3 \times 10^{-5})(14)^{1,2} \\ &\quad + (7,3 \times 10^{-5})(13)^{1,2} + (3,8 \times 10^{-7})(20)^{1,2} \\ &\quad + (3,8 \times 10^{-7})(38)^{1,2} + (3,8 \times 10^{-7})(20)^{1,2} \\ &= 4,9 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Při použití hodnoty navrhané holandskou vládou, $p = 2$:

$$\begin{aligned} ESN_N &= (7,3 \times 10^{-5})(13)^2 + (7,3 \times 10^{-5})(14)^2 \\ &\quad + (7,3 \times 10^{-5})(13)^2 + (3,8 \times 10^{-7})(20)^2 \\ &\quad + (3,8 \times 10^{-7})(38)^2 + (3,8 \times 10^{-7})(20)^2 \\ &= 3,7 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

Jednotky ekvivalentu společenských nákladů nemají význam.

4. Průměrné individuální riziko. Vztah (4.4.6 z citace /3/) se používá pro výpočet průměrného individuálního rizika z individuálních rizik odhadnutých pro každé místo okolo zařízení. Je možno ukázat, že průměrné individuální riziko může také 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 nejvíce vzdáleného obrysu rizika).

Pro tento příklad nejvíce vzdálený obrys rizika uzavře poněkud více než 1/2 obydlené plochy (obrázek 32). Při zadané rovnoměrné hustotě zalidněnosti je odhad počtu lidí na této ploše 240 ($O_R = 240$) a

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

Riziko může také být zprůměrováno přes celkový počet obyvatel 400:

$$IR_{PR} (\text{všechno obyvatelstvo}) = (3,0 \times 10^{-3}) / 400$$

$$IR_{PR} (\text{všechno obyvatelstvo}) = 7,5 \times 10^{-6} / \text{rok}.$$

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 (nízký) odhad rizika.

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

$$SN = IR_{PR} (1,14 \times 10^4) \text{ úmrtí} / 108 \text{ hodin expozice}$$

SN je normálně používaná míra rizika pro zaměstnance v místě. Za předpokladu, že by část podniku s provozem představovala obydlenou plochu, kde jsou lidé přítomni v každém čase, pak SN může být pro tento příklad 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 21 shrnuje různá jednoduchá čísla a indexy jako míry rizika vypočítané pro tento příklad.

Tabulka 21: Přehled jednoduchých čísel a indexů jako vyjádření míry rizika

Míra rizika	Hodnota
Maximální individuální riziko	$2,4 \times 10^{-5} / \text{rok}$
Průměrné individuální riziko:	
Nechráněné obyvatelstvo	$1,2 \times 10^{-5} / \text{rok}$
Všechno obyvatelstvo	$7,5 \times 10^{-6} / \text{rok}$
Smrtelná nehodovost	0,14 úmrtí/ 108 člověkohodin expozice
Střední míra úmrtí	$3 \times 10^{-3} \text{ úmrtí} / \text{rok}$
Ekvivalentní společenské náklady:	
Okrent	$4,9 \times 10^{-3}$
Holandsko	$3,7 \times 10^{-2}$

6.1.7 Závěry

Tato případová studie vysvětluje použití jednoduché kvantitativní analýzy rizika reprezentativního souboru událostí pro výpočet rizika jednoduchého nakládání zařízení chloru do železniční cisterny. Je odhadnuto a předvedeno jak individuální tak společenské riziko. Tato rizika mohou být srovnána s podnikovým nebo jinak zaměřeným rizikem. Opatření pro zmírnění rizika, která by zmenšila následky událostí nebo četnosti jejich výskytu nebo uvažování podstatných parametrů projektu, jako je třeba umístění zařízení, mohou být ohodnocena kvantitativně. Pro každou volbu může být odvozeno nákladové optimum a zajištěn rozumný základ pro úvahy o opatřeních pro zmenšení rizika.

6.2 Destilační kolona – 2. případová studie

6.2.1 Úvod

Tato druhá studie případu se týká rizik spojených se systémem obsahujícím hořlavé materiály. Hloubka studie tohoto případu (viz Obrázek 35 na str. 197) reprezentuje střední úroveň komplexnosti.

První případová studie (kapitola 6.1) použila k identifikaci potenciálních událostí techniku HAZOP. Pro rozptyl byl použit jednoduchý neutrální model vznosného plynu, pro odhad frekvence byly použity historický záznam a analýza stromu poruch, individuální a společenské riziko pro odhad rizika.

Tato případová studie demonstruje odlišnou hloubku studie použitím jiných způsobů (technik). Nehody jsou identifikovány za předpokladu poruch pouze základních potrubí a nádob a jejich frekvence jsou odhadnuty z historických záznamů. Externí události a domino efekty nejsou zahrnuty, aby se zjednodušila analýza v tomto příkladu. Výsledné úniky mraku par jsou modelovány použitím rozptylového modelu těžkého plynu. Různé výsledky událostí s požárem a výbuchem jsou rozvíjeny analýzou stromu událostí a zkoumány použitím různých modelů následků s uvažováním jak přetlakových, tak tepelně radiačních účinků. Jednoduché povětrnostní podmínky a nestejněměrná osmibodová větrná růžice redukuje počet případů výsledku události. Výsledkem je odhad jak individuálního tak společenského rizika pro okolní komunitu.

6.2.2 Popis

C₆ destilační kolona je používána k separaci hexanu a heptanu z nástřikového proudu obsahujícího 58% hm. hexanu a 42% hm. heptanu. Do této studie jsou zahrnuty vrchní kondenzátor, vařák se samočinným oběhem a sběrný zásobník. Liniový diagram kolony, přidružená zařízení, průtoková množství a velikost potrubí znázorňuje Obrázek 36 na str. 198.

Provozní tlak kolony je 4 bary a teplotní rozsah je 130 – 160 °C od hlavy ke spodku kolony. Hrubá 5 min. zádrž spodku kolony a vařáku je 6000 kg a na patrech je asi 10000 kg kapaliny. U kondenzátoru se nepředpokládá žádná kapalná zádrž a obsah válcového sběrného zásobníku je 12000 kg (hrubá 10 min. zádrž z nástřikového množství). Materiál ve spodku kolony je přibližně 90% heptanu a 10% hexanu a v hlavě kolony je přibližně 90% hexanu a 10% heptanu. Fyzikální vlastnosti vztahující se na tyto materiály uvádí Tabulka 22.

Situační plán zařízení je na obrázku 37 na str. 199. Východním směrem ve vzdálenosti 80 m je obytná oblast s 200 lidmi, rovnoměrně rozptýlenými na 2 ha (100 × 200 m) krajiny. Zbývající oblast okolo stanoviště je otevřený terén.

Tabulka 22: Fyzikální vlastnosti hexanu a heptanu *

Fyzikální vlastnost	Hexan	Heptan
Bod varu (°C)	69	99
Molekulová hmotnost (kg/kmol)	86	100
HMV (% obj.)	7,5	7,0
DMV (% obj.)	1,2	1,0
Spalné teplo (J/kg)	$4,5 \times 10^7$	$4,5 \times 10^7$
Poměr specifických tepel, γ	1,063	1,054
Hustota kapaliny při b.v. (kg/m ³)	615	614
Výparné teplo při b.v. (J/kg)	$3,4 \times 10^5$	$3,2 \times 10^5$
Měrné teplo kapaliny (J/kg/°K)	$2,4 \times 10^3$	$2,8 \times 10^3$

* z *DIPPR Handbook* – AIChE, 1987

Předmětem studie je odhad rizika na společenství obyvatelstva ze systému frakční destilace z perspektivy jak individuálního, tak společenského rizika.

Aby se limitovalo množství výpočtů, byly uvažovány pouze jedny průměrné meteorologické podmínky – rychlost větru 1,5 m/s a stabilita ovzduší F – reprezentující nejhorší podmínky počasí s přiměřenou pravděpodobností výskytu. Důkladnější odhad rizika by měl zahrnovat množství různých meteorologických podmínek reprezentujících spektrum těchto podmínek, které se vyskytují v dané lokalitě. Důsledek použití nejhoršího případu povětrnostních podmínek je konzervativnost výsledků rizika s ohledem na frekvenci.

Obrázek 38 na str. 200 zobrazuje větrnou růžici použitou v tomto příkladu, která ukazuje pravděpodobnost větru v každém z osmi směrů.

6.2.3 Identifikace, výčet a výběr událostí

Jednou z metod definování počátečního seznamu událostí je uvažovat všechny možné praskliny nebo ruptury částí zařízení, které by mohly vést ke ztrátě soudržnosti. Tento počáteční seznam může pak být modifikován v počtu cest, aby se získal revidovaný seznam. V této studii případu nejsou uvažovány speciální problémy, jako je polymerizace, koroze, blokování, přetlakování atd.

Ovšem každé potrubí nebo nádoba se může porušit nebo prasknout nekonečným počtem způsobů. Např. porušení potrubí může být jakékoliv velikosti od špendlíkové dírky až po rupturu plné světlosti a může být v jakémkoliv místě mezi konci potrubí. Toto spektrum událostí je potřeba redukovat na reprezentativní sadu událostí, jak je definováno v hloubce studie. V tomto příkladu jsou možné poruchy potrubí

reprezentovány buď rupturou plné světlosti nebo dírou 20% průměru potrubí. Menší lokalizované události (např. netěsnosti přírub, netěsnosti ucpávek čerpadel) samy o sobě nejsou schopny způsobit účinky na dlouhé vzdálenosti, ale mohou způsobit požár kaluže. Jímka kolem kolony omezuje velikost kaluže na 10 m². Přibližné pravidlo, že by „bezpečné“ intenzity tepelných toků (4,7 kW/m²) existovaly ve vzdálenostech mezi 3 až 5 násobkem průměru kaluže, předpokládá, že požár kaluže by neměl ohrozit obytnou oblast. Avšak, pokud se bude provádět separátní studie rizika pro pracovníky pracující na zařízení, měla by se tato událost uvažovat.

V našem případě by měl rizikový analytik uvažovat jako výsledky událostí požáry nebo výbuchy, protože uvedené látky jsou hořlavé. Úniky zapříčiněné různými událostmi mohou vést k podobným výsledkům událostí a tyto mohou být kombinovány, aby se zredukovalo množství výpočtů. Konečný výběr událostí, které by měly být modelovány, je obtížný vyžadující úsudek analytika. V úvahu by se měly brát následující faktory:

- Velikost úniku,
- Zda únik je jednorázový nebo kontinuální,
- Zda unikající látka je kapalina nebo pára.

Konečný výběr výsledků událostí pro modelování je také obtížný a je obvykle určen po revizi provedených výpočtech následků. Pro hořlavé úniky by měla být uvažována jak možnost okamžité, tak zpožděné iniciace.

Revidovaný seznam vybraných událostí je následující:

1. Úplná ruptura
 - kolony
 - sběrné nádrže
 - vařáku
 - kondenzátoru
2. Úniky kapaliny (ruptura plné světlosti a díra ekvivalentní 20% průměru)
 - nástřikové potrubí kolony
 - nástřikové potrubí vařáku
 - čerpadlo heptanu (čerpadlo 2) sací potrubí (včetně přírub a čerpadla)
 - čerpadlo heptanu (čerpadlo 2) výtlačné potrubí (včetně přírub)
 - výtlačné potrubí z kondenzátoru
 - čerpadlo refluxu (čerpadlo 1) sací potrubí (včetně přírub a čerpadla)
 - čerpadlo refluxu (čerpadlo 1) výtlačné potrubí (včetně přírub)
 - únik z pláště (kolony, sběrné nádrže, vařáku nebo kondenzátoru) z díry velikosti ekvivalentní pouze 20% průměru potrubí
3. Úniky páry (ruptura plného průřezu a díra ekvivalentní 20% průměru)

- potrubí z hlavy kolony
- výtlačné potrubí z vařáku
- unikání z pláště (kolony, sběrné nádrže, vařáku nebo kondenzátoru) z díry velikosti ekvivalentní pouze 20% průměru potrubí

Toto je zpracovatelné počítačovou formou, zatímco tento seznam nehod je příliš rozsáhlý pro manuální výpočet. Seznam obsahuje mnoho událostí, které by mohly mít podobné nebo identické výsledky událostí. Proto může být tento seznam redukován na reprezentativní sadu událostí následujícími předpoklady a úvahami:

1. Neexistují žádné oddělovací ventily uvnitř tohoto systému. Avšak předpokládá se, že existuje automatické oddělení na hranicích systému tak, že žádná další hořlavina, jiná než hořlavina přítomná v systému v čase události, nepřispívá k úniku. Proto okamžitá porucha jedné nádoby povede k rychlému úniku celého obsahu všech jiných připojených nádob.

Navíc únik z pojišťovacího ventilu je spojen s prudkým poklesem tlaku. Opačný tok pojišťovacím ventilem – vlivem protitlaku během jakéhokoliv ze scénářů úniku, který by mohl přispívat dodatečným únikem, není považován za věrohodný.

2. Všechna potrubí s kapalinou mají průměry buď 0,10 nebo 0,15 m. Pro jednoduchost všech potrubí s kapalinou se předpokládá, že mají průměr 0,15 m. Rychlý odhad výtokové rychlosti může být použit ke stanovení, zda ruptura plné světlosti těchto potrubí může být považována za jednorázový nebo kontinuální únik. K odhadu výtokové rychlosti při katastrofickém lomu v potrubí s kapalinou je uvažováno jako přiměřené použít raději model výtoku kapaliny než model dvoufázový. Úniky z uzavřených nádob jsou dobře aproximovatelné modelem kapaliny, úniky z potrubí používající model úniku kapaliny budou konzervativní. Detailnější studie by měla rozlišit mezi několika umístěními úniků a použít přesnější modelování pro každý únik.

Rovnice výtoku pro kontinuální úniky kapaliny z potrubí o průměru 0,15 m je následující:

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

kde

G_L = výtoková rychlost kapaliny (kg/s)

C_d = výtokový koeficient (0,61 pro kapaliny)

A = průřez díry (pro průměr 0,15 m je 0,0177 m²)

ρ = hustota kapaliny (615 kg/m³)

p = tlak proti proudu (5 bar = 5x10⁵ N/m² absolutní)

p_a = tlak po proudu (1 bar = 1x10⁵ N/m² absolutní)

h = výška hladiny kapaliny (předpoklad, že bude zanedbatelná) (m)

g = gravitační zrychlení (9,8 m/s²)

Z této rovnice je výtoková rychlost 240 kg/s pro únik kapaliny z jednoho konce potrubí. Je možné, že by průtoková rychlost mohla být dvojnásobkem této hodnoty, jestliže by se potrubí přerušilo tak, že by tok nebyl zadržován z obou konců.

Při této počáteční výtokové rychlosti veškerý obsah kolony, vařáku a sběrného zásobníku vyteče během 2 minut. V praxi by to bylo o něco déle, protože tlak v systému by během úniku klesal. Proto se zdá být rozumné zpracovat rupturu plné světlosti kapalinového potrubí tímto způsobem, jako katastrofickou poruchu jakékoliv nádoby v systému frakční destilace.

3. Obě potrubí s plynnou fází mají průměr 0,5 m.

Zde může být opět použit rychlý odhad výtokové rychlosti pro stanovení, zda ruptura plné světlosti těchto potrubí má být zpracována jako jednorázový nebo kontinuální únik.

Pro stanovení skutečné výtokové rychlosti z katastrofického lomu potrubí s plynnou fází by měl být první výpočet proveden za účelem zjištění, zda je výtok sonický.

Z rovnice :

$$r_{krit} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{(\gamma / \gamma - 1)}$$

kde

γ = poměr specifických tepel plynu (1,063 pro hexan, 1,054 pro heptan)

r_{krit} = 1,687 pro hexan

r_{krit} = 1,682 pro heptan

protože $p = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (absolutní) a $p_a = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (absolutní)

$p/p_a = 5,0 > r_{krit} = 1,687$, proto bude únik páry sonický.

Výtoková rychlost sonického úniku je dána rovnicí:

$$G_v = C_d \frac{A p \psi}{\alpha_0}$$

kde

G_v = výtoková rychlost plynu pro zvolený tok plynu (kg/s)

C_d = výtokový koeficient (předpoklad hodnota 1 pro plyn)

A = průřez díry (pro 10% 0,5 m potrubí, m^2)

p = absolutní tlak proti proudu (N/m^2)

α_0 = sonická rychlost plynu při $T = (\gamma R T / M)^{1/2}$

ψ = průtokový faktor = $\gamma [1/r_{krit}]^{(\gamma+1)/2 \gamma}$

M = molekulová hmotnost (kg/kmol): 86 pro hexan, 100 pro heptan

R = plynová konstanta (8310 J/kmol/K)

T = teplota proti proudu (403 K pro hexan, 433 K pro heptan)

γ = poměr specifických tepel plynu (1,063 pro hexan, 1,054 pro heptan)

r_{crit} = 1,687 pro hexan, 1,682 pro heptan

Výtoková rychlost páry je 303 kg/s pro čistý hexan a 320 kg/s pro čistý heptan.

Proto ruptura plné světlosti na parních potrubích je také zpracována stejným způsobem jako katastrofická porucha jakékoliv nádoby v systému frakční destilace.

Výše provedené předpoklady poskytují následující reprezentativní sadu událostí:

(A) katastrofická porucha kolony, vařáku, kondenzátoru, sběrného zásobníku nebo jakákoliv ruptura plné světlosti potrubí s kapalinou nebo párou

(B) únik kapaliny dírou o průměru rovném 20% průměru potrubí 0,15 m

(C) únik páry dírou o průměru rovném 20% průměru potrubí 0,5 m

Tyto události zahrnují jeden velmi rozsáhlý, ale vzácný únik (událost A – katastrofická porucha nádoby nebo ruptura plné světlosti) a dva prostřední únikové případy (události B a C). Odvození výsledků událostí pro události A, B a C budou uskutečněny později s pomocí stromů událostí.

6.2.4 Odhad následků událostí

6.2.4.1 Výpočty rychle se odpařujícího výtoku a rozptylu (události A, B a C)

Výpočty okamžitě se odpařujícího výtoku a rozptylu pro události A, B a C definované výše jsou provedeny použitím metod popsanych v odstavcích 2.1.1, 2.1.2 a 2.1.3.

Událost A: Katastrofická porucha

Při události katastrofické poruchy jedné z nádob nebo ruptury plné světlosti se předpokládá, že všechny obsah kolony, vařáku, kondenzátoru a sběrného zásobníku jsou okamžitě uvolněny. V následujícím výpočtu je okamžitě se odpařující frakce

stanovena za předpokladu, že kolona, vařák a sběrný zásobník obsahují čistý heptan a čistý hexan, resp. pravděpodobněji než směsi:

$$F_v = C_p \left(\frac{T - T_b}{H_{fg}} \right)$$

kde

F_v = podíl okamžitě se odpařující kapaliny

C_p	= průměrná tepelná kapacita kapaliny (rozsah od T do T_b) (2400 J/kg/K pro hexan, 2800 J/kg/K pro heptan)
T	= provozní teplota (130 °C pro hexan, 160 °C pro heptan)
T_b	= atmosférický bod varu (69 °C pro hexan, 99 °C pro heptan)
H_{fg}	= latentní výparné teplo při T_b ($3,4 \times 10^5$ J/kg pro hexan, $3,2 \times 10^5$ J/kg pro heptan)

Vypočtené mžikově odpařené podíly jsou 0,43 pro hexan a 0,51 pro heptan. Proto, oba tyto materiály vykazují okamžitě odpařené podíly přibližně 0,5. Je rozumné předpokládat, že všechen unikající hexan a heptan budou unikat jako plyn a aerosol. Dále se předpokládá, že aerosolové kapičky jsou dosti malé na to, aby zůstaly vznášivé a odpařovaly se, namísto toho, aby padaly na zem.

Při podmínkách úniku jsou jak hexan, tak heptan významně těžší než vzduch, s relativními hustotami 2,0 a 2,3. Jelikož úniky jsou relativně rozsáhlé, rozptyl jednorázového úniku definovaného výše je vypočten použitím modelu těžkého plynu. Model Coxe a Carpentera začleněný do programu WHAZAN je použit ke stanovení rozptylu úniků pro rychlost větru 1,5 m/s a stabilitu F. Ačkoliv byl použit pro tento problém WHAZAN, mohou být použity i jiné softwarové produkty používající model těžkého plynu.

Termofyzikální vlastnosti hexanu a heptanu jsou podobné. Pro tuto studii případu bylo rozhodnuto založit rozptylové výpočty na hexanu, který zaujímá přibližně 2/3 obsahu systému. Stanovení zdrojových podmínek pro jednorázový únik a předpokládaných atmosférických podmínek je podáno v tabulce 23 a diskutováno níže.

Protože únik by měl sestávat pouze z plynu a aerosolových kapiček, které se eventuálně odpaří do mraku, použije se všechen plynný únik pro rozptylovou analýzu.

Použitá teplota je 69 °C, což je teplota, do které se bude kapalný hexan částečně okamžitě odpařovat, když unikne do atmosféry.

Je nezbytné určit počáteční zředění, které je množství objemu vzduchu obsahující jeden objem plynu v mraku po expanzi do atmosférického tlaku a před přenosem tepla a začátkem procesu rozptylu. Hodnota 10 byla vybrána na základě předpokládaného zředovacího rozsahu od 10:1 až po 100:1 Kaiserem a Walkerem (1978) z empirických zkušeností a fotografií specifických událostí.

Počáteční poloměr mraku je položen rovný výšce mraku, což je nejobvyklejší pro cylindrické modely.

Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce 24. Vlečka vytvořená jednorázovým únikem může ve střední ose dosáhnout koncentrace 1,2% ve vzdálenosti přibližně 85 m, která je právě uvnitř rezidenční oblasti.

Události B a C: Únik kapaliny a páry z díry v potrubí

Pro únik kapaliny je podíl okamžitého odpaření stejný jako při události A. Je učiněn identický předpoklad, že veškerý únik je plynný a aerosolový mrak, bez vypadávání kapek.

Tabulka 23: Data použitá pro výpočty jednorázového rozptylu těžkého plynu

Množství	Okamžitý únik
Uvolněná hmota	28000 kg
Rychlost úniku	-
Teplota	69 °C
Zředovací faktor	10
Poloměr mraku	Rovný výšce
Atmosférická stabilita	Stabilní (F)
Rychlost větru	1,5 m/s
Parametr drsnosti povrchu	0,1 m
Okolní teplota	20 °C
Okolní vlhkost	80%

Tabulka 24: Výsledky výpočtů rozptylu pro jednorázový únik (událost A)

Doba (s)	Vzdálenost po větru (m)	Poloměr mraku (m)	Výška mraku (m)	Koncentrace ve střední ose (% obj.)	Teplota mraku (K)
0	0	32	32	7,8 *	309
20	30	91	14	2,2	297
40	60	125	11	1,5	296
57	85	148	9,5	1,2	295

* Počáteční koncentrace je vypočtena pro desetinasobné zředění horkého hexanu do okolního vzduchu. Při míšení se vzduch oteplí, hexan se ochladí a celkový objem mraku se bude zvyšovat. Toto má výsledek počáteční koncentraci 7,8%obj.

Výtoková rychlost pro kapalný únik (událost B) může být určena použitím rovnice 2.1.7 z citace [3], za předpokladu průměru díry 0,03 m. Výsledná výtoková rychlost je 9,6 kg/s. Výtoková rychlost pro únik plynu (událost C) může být určena pomocí rovnice 2.1.2), z citace [3], za předpokladu průměru díry 0,10 m. Vypočtená výtoková rychlost je 12,6 kg/s.

Protože u obou úniků se předpokládá, že probíhají v plynné fázi a výtokové rychlosti jsou podobné, události B a C jsou pro jednoduchost spojeny do jednoho reprezentativního průměrného úniku plynu s výtokovou rychlostí 11 kg/s.

U těchto úniků se dá očekávat, že poskytnou kontinuální únik materiálu po delší časové období. Model těžkého plynu zahrnutý do WHAZANu je opět použit k určení rozptylu při úniku. Tabulka 25 uvádí údaje použité ve zdrojových podmínkách a tabulka 26 ukazuje výsledky výpočtu.

Pásmo hořlavosti z kontinuálního úniku se bude rozprostírat do obytné oblasti.

Tabulka 25: Data použitá pro výpočty kontinuálního rozptylu těžkého plynu

Veličina	Kontinuální únik
Uvolněná hmota	-
Rychlost úniku	11 kg/s
Teplota	69 °C
Zředovací faktor	10
Poloměr mraku	Rovný výšce
Stabilita atmosféry	Stabilní (F)
Rychlost větru	1,5 m/s
Parametr drsnosti povrchu	0,1 m
Okolní teplota	20 °C
Okolní vlhkost	80%

Tabulka 26: Výsledky výpočtů rozptylu pro kontinuální únik (událost B a C)

Doba (s)	Vzdálenost po větru (m)	Poloměr mraku (m)	Výška mraku (m)	Koncentrace ve střední ose (% obj.)	Teplota mraku (K)
0	0	3,7	3,7	7,8 *	309
20	30	24	1,8	2,4	297
40	60	38	1,6	1,7	296
60	90	50	1,5	1,4	295
71	106	56	1,5	1,2	294

* Počáteční koncentrace je vypočtena pro desetinásobné zředění horkého hexanu do okolního vzduchu. Při míšení se vzduch oteplí, hexan se ochladí, a celkový objem mraku se bude zvyšovat. Toto má výsledek počáteční koncentraci 7,8%obj.

6.2.4.2 Stromy událostí

Pro události A, B a C závisí počet různých výsledků událostí:

1. na tom, zda a kdy nastane iniciace,
2. na následcích iniciace.

Abychom určili výsledky událostí pro tyto úniky, byly zkonstruovány dva stromy událostí (viz obrázky 39 na str. 201 a 40 na str. 202). Při vyvíjení těchto stromů událostí je uvažována buď okamžitá nebo zpožděná iniciace. Ve skutečnosti může iniciace nastat v množství poloh během vývoje mraku v závislosti na přítomnosti zdrojů iniciace. Ve zjednodušených analýzách je obvyklé uvažovat iniciaci pouze ve dvou pozicích pro každý směr větru (tj. okamžitou a zpožděnou iniciaci).

Předpokládá se, že okamžitá iniciace způsobí BLEVE z jednorázového úniku a tryskový plamen z kontinuálního úniku. Jestliže je iniciace zpožděná až po vývinu

mraku, následky budou buď UVCE, nebo bleskový požár. V případě kontinuálního úniku (události B a C) ukazuje tabulka 26, že DMV je dosaženo po 71 s. Protože rychlost úniku je 11 kg/s, celková hmota úniku je 781 kg. Toto je právě pod hraničním množstvím 1 tuny, které se předpokládá jako požadavek pro UVCE hexanu nebo heptanu (kapitola 2.2.1 citace /3/). Pro zjednodušení problému je v této analýze ignorována možnost UVCE z událostí B a C a jako výsledek je uvažován pouze bleskový požár. Komplexnější studie by zahrnovala i možnost vzniku UVCE.

Jestliže se jedná o katastrofické selhání nádoby bez iniciace, je možné, aby obsažená PV energie vytvořila tlakovou vlnu a způsobila ohrožení založené na samotném přetlaku. Tento dílčí následek není v této analýze uvažován. Při katastrofické ruptuře nádoby mohou být také vytvořeny projektily, ale nebezpečí z toho plynoucí se předpokládá relativně zanedbatelné vzhledem k efektům požáru a výbuchu.

Ze stromů událostí byly pro analýzu rizika identifikovány následné výsledky událostí:

- BLEVE následkem okamžité iniciace jednorázového úniku
- UVCE následkem zpožděné iniciace jednorázového úniku
- Bleskový požár následkem zpožděné iniciace jednorázového úniku
- Tryskavý požár následkem okamžité iniciace kontinuálního úniku
- Bleskový požár následkem zpožděné iniciace kontinuálního úniku

6.2.4.3 Následky výsledků událostí

Následky výsledků událostí jsou vypočteny použitím metod popsanych v kapitolách 2.2.1, 2.2.3 a 2.2.5 citace /3/. Pro tento příklad jsou hořlavé účinky definovány použitím přístupu oddělených zón účinků, uvnitř kterých se předpokládá, že všichni lidé zemřou, a mimo které se předpokládá, že všichni lidé zůstanou na živu. Tento přístup přeceňuje podíl úmrtí uvnitř zóny a podceňuje je mimo zónu. Zóny pro fatální účinky pro různé výsledky událostí jsou vypočteny následovně:

Výsledek události č. 1: BLEVE následkem okamžité iniciace jednorázového úniku

Pro BLEVE zahrnující 28000 kg hexanu (M) jsou následující parametry vypočteny z rovnic v kapitole 2.2.3 citace /3/:

- Maximální průměr BLEVE ($D_{\max}$) = $6,48 \cdot M^{0,325} = 181$ m
- Trvání BLEVE (t_{BLEVE}) = $0,825 \cdot M^{0,26} = 12$ s
- Výška středu BLEVE (H_{BLEVE}) = $0,75 \cdot D_{\max} = 136$ m

Jak bylo diskutováno výše, některé z případů úniku zahrnuté ve výsledcích události BLEVE zahrnují uvolnění 28000 kg obsahu během doby větší než zde vypočtených 12 s (např. ruptura plné světlosti potrubí) a pravděpodobně by nevyústily v klasický BLEVE. Toto znamená, že následky BLEVE jsou přeceněny.

Pro dobu trvání 12 s je intenzita radiace potřebná pro smrt průměrného jednotlivce přibližně 75 kW/m². Toto je odvozeno z obrázku 2.33 citace /3/ pro křivku 50% úmrtnosti při 12 s.

Intenzita radiace v důsledku vzniku BLEVE je dána rovnicí:

$$Q_R = \tau E F_{21}$$

kde

τ = transmisivita

F_{21} = projekční faktor

E = intenzita povrchem emitovaného toku (kW/m²)

Transmisivita je dána rovnicí

$$\tau = 2,02 (P_w \chi)^{-0,09}$$

kde

P_w = parciální tlak vodních par při okolních podmínkách (N/m²)

χ = vzdálenost mezi povrchem plamene a příjemcem (m)

Vzdálenost χ se vypočte jako

$$\chi = (H_{BLEVE}^2 + r^2)^{1/2} - 0,5 \cdot D_{max} = (136^2 + r^2)^{1/2} - 90,5$$

kde r je horizontální vzdálenost od kolony k příjemci.

Za předpokladu, že $P_w = 2820$ N/m² (viz kapitulu 2.2.3 citace /3/ s příkladem), se rovnice $\tau = 2,02 (P_w \chi)^{-0,09}$ redukuje na

$$\tau = 0,99 [(136^2 + r^2)^{0,5} - 90,5]^{-0,09}$$

Použitím rovnice 2.7.6 citace /3/ pro $D = D_{max}$:

$$F_{21} = \frac{D_{max}^2}{4r^2}$$

tudíž

$$F_{21} = 8190 \cdot r^{-2}$$

A z energetické rovnováhy pro emitovanou energii (viz rovnici 2.2.14 citace /3/)

$$E = \frac{E_{rad} \cdot M \cdot H_c}{\pi \cdot D_{max}^2 \cdot t_{BLEVE}}$$

$E_{rad} = 0,25$ a spalné teplo pro hexan je $4,5 \times 10^7$ J/kg. Proto $E = 255$ kW/m². Tato hodnota se může vložit do rozšířené rovnice $Q_R = \tau E F_{21}$:

$$Q_R = 0,99 [(136^2 + r^2)^{0,5} - 90,5]^{-0,09} \times 8190 \times r^{-2} \times 255$$

Pro úroveň radiace $Q_R = 75 \text{ kW/m}^2$ může být tato rovnice řešena iterací a poskytne $r = 135 \text{ m}$. Proto oblast smrtelných účinků je kruh o poloměru 135 m, s kolonou uprostřed, který by zasáhl do rezidenční oblasti.

Výsledek události č. 2: Výbuch neohraničeného mraku par (UVCE) následkem zpožděné iniciace jednorázového úniku

Tento výsledek události postihuje 28000 kg hexanu. Použitím modelu TNT ekvivalentu (kapitola 2.2.1 citace /3/) je ekvivalentní hmotnost TNT dána rovnicí:

$$W = \eta \cdot M \frac{E_c}{E_{c-TNT}}$$

kde

W = ekvivalentní hmotnost TNT (kg)

M = aktuální hmotnost uhlovodíku (28000 kg)

η = empirický výtěžek exploze (předpoklad, že je 0,1)

E_C = spalné teplo uhlovodíku ($4,5 \times 10^7 \text{ J/kg}$ pro hexan)

E_{C-TNT} = spalné teplo TNT ($4,6 \times 10^6 \text{ J/kg}$)

Proto ekvivalentní hmotnost TNT je 27400 kg.

Použití empirického výtěžku exploze 0,1 by mělo reprezentovat rozumný nejhorší výsledek pro explozi jako výsledek události.

Přetlak 3 psi je použit k výpočtu rozsahu smrtelných účinků (kapitola 2.3.3 citace /3/). Z obr. 2.18 citace /3/ vychází vzdálenost (Z_G) pro přetlak 3 psi $20 \text{ ft/lb}^{1/3}$. Při přepočtu na aktuální vzdálenost je:

$$R_G = Z_G W^{1/3} = 20 \times 60350^{1/3} = 785 \text{ ft (239 m)}.$$

Proto je oblast smrtelného účinku pro UVCE s 28000 kg hexanu kruh o poloměru 239 m, se středem 85 m po větru od kolony, který by se také rozprostřel do obytné oblasti.

Výsledek události č. 3: Bleskový požár následkem zpožděné iniciace jednorázového úniku

Přibližný odhad pro rozlohu zóny smrtelného účinku je pro bleskové požáry oblast, nad kterou se rozkládá mrak s koncentrací nad DMV (kapitola 2.2.1 citace /3/). Předpokládá se, že se tato oblast nezvětší expanzí mraku během hoření. Zde to je kruhová zóna o poloměru 148 m se středem 85 m po větru (viz tabulku 24).

Výsledek události č. 4: Tryskavý požár následkem okamžité iniciace kontinuálního úniku

Velmi hrubé výpočty používající zjednodušené metody Considineho a Grinta (1984), třebaže striktně aplikovatelné na LPG, poskytují konečný rozsah nebezpečí 50% úmrtnosti v 31 m pro expozici po dobu 100 s. Tento výsledek naznačuje, že

neexistuje žádné přímé ohrožení pro obytnou oblast a tento výsledek události není dále uvažován.

Výsledek události č. 5: Bleskový požár následkem zpožděné iniciace kontinuálního úniku

Oblast, přes kterou mrak vytvořený kontinuálním únikem je nad koncentrací DMV, může být odvozena z tabulky 26. Toto dává „koláčovitou“ zónu nebezpečí 127 m dlouhou po větru (71 m vzdálenost + 56 m poloměr) s úhlem 48° (tj. $2 \cdot \arctan 56/127$).

Tato událost může mít vliv na obytnou oblast a je dále v této studii uvažována.

Výsledkem těchto výpočtů účinků následků je to, že čtyři výsledky událostí (č. 1, 2, 3 a 5) mohou zasáhnout rezidenční oblast.

Další krok v postupu výpočtu je stanovit frekvenci události a frekvenci výsledku události.

6.2.5 Odhad frekvence událostí

6.2.5.1 Frekvence reprezentativních souborů událostí

Pro tento příklad byly pro odhad frekvence reprezentativního souboru událostí použity údaje z historického záznamu (kapitola 3.1 citace /3/). Tato metoda je aplikovatelná na případy, kdy uvažované prvky jsou konstrukčně podobné těm, pro které existují historické záznamy o poruchovosti. V tomto případě kolona, nádoby, potrubí a čerpadla jsou standardní procesní zařízení a historické záznamy poruchovosti jsou pro takové prvky dostupné (např. Rijnmond Public Authority, 1982).

Tabulka 27: Příklad frekvence poruch (pro ilustrativní účely)

Prvek		Velikost poruchy	Poruchovost
Potrubí:			
Malé	≤ 50 mm průměr	Ruptura plné světlosti	8,8×10 ⁻⁷ (m·rok ⁻¹)
		Ruptura 20% průměru	8,8×10 ⁻⁶ (m·rok ⁻¹)
Střední	> 50 mm průměr ≤ 150 mm průměr	Ruptura plné světlosti	2,6×10 ⁻⁷ (m·rok ⁻¹)
		Ruptura 20% průměru	5,3×10 ⁻⁶ (m·rok ⁻¹)
Velké	> 150 mm průměr	Ruptura plné světlosti	8,8×10 ⁻⁸ (m·rok ⁻¹)
		Ruptura 20% průměru	2,6×10 ⁻⁶ (m rok ⁻¹)
Systém frakční destilace (s vyloučením potrubí)		Závažný únik	1,0×10 ⁻⁵ (rok ⁻¹)
		Katastrofická ruptura	6,5×10 ⁻⁶ (rok ⁻¹)

Základní údaje o poruchovosti jsou uváděny v tabulce 27. Pro každý prvek zařízení jsou uvedeny frekvence různých velikostí poruch. Tyto frekvence jsou udávány v jednotkách prvek/rok vyjma potrubí, pro které to je metr/rok.

Použitím tabulky 27 a počtu nádob, čerpadel a délky potrubí zahrnutých do reprezentativního souboru událostí, jsou vypočteny frekvence:

Incident A: Jednorázový únik

Tato událost zahrnuje následující poruchy:

- Katastrofickou rupturu jakéhokoliv prvku v systému frakční destilace
- Katastrofickou rupturu (plné světlosti) v jakémkoliv potrubním systému

Existuje asi 25 m potrubí o průměru 0,5 m a 55 m potrubí o ekvivalentním průměru 0,15 m zahrnutého do této události. Proto je frekvence vypočtena následovně:

Katastrofická ruptura systému frakční destilace:	$6,5 \times 10^{-6}$	$= 6,5 \times 10^{-6} \times \text{rok}^{-1}$
Ruptura plné světlosti:	55 m středního potrubí	$55 \times 2,6 \times 10^{-7} = 1,4 \times 10^{-5} \times \text{rok}^{-1}$
	25 m velkého potrubí	$25 \times 8,8 \times 10^{-8} = 2,2 \times 10^{-6} \times \text{rok}^{-1}$
Celkem		$= 2,3 \times 10^{-5} \times \text{rok}^{-1}$

Události B a C: Kontinuální únik

Tato událost zahrnuje díry 20% průměru pro všechna potrubí a vážné uniky z nádob.

Existuje asi 25 m velkého potrubí o průměru 0,5 m a 55 m středního potrubí o průměru 0,15 m zahrnutého do této události. Proto je frekvence vypočtena následovně:

Úniky z 55 m středního potrubí	$55 \times 5,3 \times 10^{-6}$	$= 2,9 \times 10^{-4} \text{ rok}^{-1}$
25 m velkého potrubí	$25 \times 2,6 \times 10^{-6}$	$= 6,5 \times 10^{-5} \text{ rok}^{-1}$
Vážný únik ze systému frakční destilace	$1,0 \times 10^{-5}$	$= 1,0 \times 10^{-5} \times \text{rok}^{-1}$
Celkem		$= 3,7 \times 10^{-4} \times \text{rok}^{-1}$

6.2.5.2 Pravděpodobnosti výsledků událostí

Pravděpodobnost každého výsledku události je určena sečtením pravděpodobností všech větví stromů událostí na obrázcích 39 a 40 na str. 201 a 202. Některé z pravděpodobností jsou závislé na směru (tj. podíl příslušné zasažené rezidenční oblasti ovlivňuje pravděpodobnost iniciace). Pro tuto případovou studii byly pro každou událost vyvinuty dva stromy událostí – první, který uvažuje směry větru k obytné oblasti, a druhý, který uvažuje všechny ostatní směry větru. Výsledky zobrazují obrázky 41 až 44 na str. 203 až 206. Pro tuto případovou studii, byly pravděpodobnosti větví pro tyto stromy událostí odvozeny použitím inženýrského odhadu. V reálném hodnocení rizika by bylo vhodnější preferovat ověřené zdroje. Je důležité, aby takové předpoklady byly dokumentovány pro pozdější zprávu a analýzu

citlivosti. Shrnutí těchto vybraných hodnot a jejich odůvodnění uvádí Tabulka 28 a Tabulka 29.

Tabulka 28: Pravděpodobnosti stromu událostí – jednorázový únik (obrázky 41 a 42)

Větev	Číslo větve	Pravděpodobnost	Podklad
Okamžitá iniciace (BLEVE)	1	0,25	Příčinou pro poruchu může být požár a únik bude počátečně rozšířen do široké oblasti
Bez okamžité iniciace	2	0,75	
Z obrázku 41 (vítr ze směrů JZ, Z a SZ)			
Zpožděná iniciace	3A	0,9	Iniciace pravděpodobně díky velké rozlehlosti mraku a přítomnosti populace s výsledkem velkého počtu zdrojů
Žádná iniciace	4A	0,1	
UVCE	5	0,5	Vysoká pravděpodobnost UVCE, protože únik je velmi velké množství okamžitě se odpařující kapaliny
Bleskový požár	6	0,5	
Z obrázku 42 (vítr ze všech jiných směrů)			
Zpožděná iniciace	3B	0,2	Nižší pravděpodobnost iniciace díky menšímu počtu zdrojů iniciace
Žádná iniciace	4B	0,8	

Tabulka 29: Pravděpodobnosti stromu událostí – kont. únik (obrázky 43 a 44)

Větev	Číslo větve	Pravděpodobnost	Podklad
Okamžitá iniciace	7	0,1	Nízká pravděpodobnost okamžité iniciace díky nedostatku místních zdrojů iniciace a nízké rychlosti úniku
Bez okamžité iniciace	8	0,9	
Z obrázku 43 (vítr ze směrů JZ, Z a SZ)			
Zpožděná iniciace	9A	0,75	Vysoká pravděpodobnost zpožděné iniciace díky přítomnosti populace
Žádná iniciace	10A	0,25	
Z obrázku 44 (vítr ze všech jiných směrů)			
Zpožděná iniciace	9B	0,1	Nízká pravděpodobnost zpožděné iniciace díky menšímu počtu zdrojů iniciace
Žádná iniciace	10B	0,9	

6.2.5.3 Příprava frekvencí pro případy výsledků událostí

Předchozí analýza revidovaného seznamu potenciálních událostí (odpovídajících kompletní ruptuře, úniku kapaliny a úniku páry) dává reprezentativní soubor tří potenciálních událostí (událost A, B a C). Předpokládá se, že s minimální ztrátou přesnosti, mohou být tyto události charakterizovány jako jednoduchá katastrofická událost (událost A) a jednoduchý kontinuální únik (události B a C). Analýza stromu událostí rozvinula události jednorázového a kontinuálního úniku do čtyř specifických výsledků událostí, které mohou zasáhnout obytnou oblast. Jsou to:

Číslo výsledku události	Výsledek události
1	BLEVE následkem okamžité iniciace jednorázového úniku
2	UVCE následkem zpožděné iniciace jednorázového úniku
3	Bleskový požár následkem zpožděné iniciace jednorázového úniku
4	Bleskový požár následkem zpožděné iniciace kontinuálního úniku

Frekvence případů výsledků událostí, které jsou závislé na směru větru, jsou vypočteny v tabulce 30. V této tabulce jsou záhlaví definována takto:

Událost	Událost z reprezentativní sady vybraná pro analýzu
Výsledek události	Výsledky událostí vztažené na dílčí událost, která byla ukázána, že má potenciál pro důsledky na veřejnost

Frekvence události (rok^{-1})	Frekvence každé události v reprezentativní sadě
Pravděpodobnost výsledku události	Pravděpodobnost výsledku události založená na analýze stromu událostí udávající, že pravděpodobnost události je 1,0
Frekvence výsledku události (rok^{-1})	Produkt frekvence události a pravděpodobnosti výsledku události
Směrová pravděpodobnost	Pravděpodobnost vanutí větru v dílčím směru znázorněném na větrné růžici
Frekvence případu výsledku události (rok^{-1})	Produkt frekvence výsledku události a směrové pravděpodobnosti

Tabulka 30: Frekvence případů nehodových následků

Událost	Výsledek události	Frekvence události	Pravděpodobnost výsledku události *	Frekvence výsledku události (rok ⁻¹)	Směr větru		Směrová pravděpodobnost **	Frekvence případu výsledku události (rok ⁻¹)
					odkud	kam		
A	1-BLEVE	2,3×10 ⁻⁵	0,25	5,7×10 ⁻⁶	-	-	-	5,7×10 ⁻⁶
A	2-UVCE	2,3×10 ⁻⁵	0,34	7,8×10 ⁻⁶	JZ	SV	0,20	1,6×10 ⁻⁶
			0,34	7,8×10 ⁻⁶	Z	V	0,15	1,2×10 ⁻⁶
			0,34	7,8×10 ⁻⁶	SZ	JV	0,10	7,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	S	J	0,10	1,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	SV	JZ	0,10	1,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	V	Z	0,10	1,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	JV	SZ	0,10	1,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	S	N	0,15	2,8×10 ⁻⁷
A	3-Bleskový požár	2,3×10 ⁻⁵	0,34	7,8×10 ⁻⁶	JZ	SV	0,20	1,6×10 ⁻⁶
			0,34	7,8×10 ⁻⁶	Z	V	0,15	1,2×10 ⁻⁶
			0,34	7,8×10 ⁻⁶	SZ	JV	0,10	7,8×10 ⁻⁶
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	S	J	0,10	1,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	SV	JZ	0,10	1,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	V	Z	0,10	1,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	JV	SZ	0,10	1,8×10 ⁻⁷
			0,08	1,8×10 ⁻⁶	J	S	0,15	2,8×10 ⁻⁷
B a C	5-Bleskový požár	3,7×10 ⁻⁴	0,68	2,5×10 ⁻⁴	JZ	SV	0,20	5,0×10 ⁻⁵
			0,68	2,5×10 ⁻⁴	Z	V	0,15	3,8×10 ⁻⁵
			0,68	2,5×10 ⁻⁴	SZ	JV	0,10	2,5×10 ⁻⁵
			0,09	3,3×10 ⁻⁵	S	J	0,10	3,3×10 ⁻⁶
			0,09	3,3×10 ⁻⁵	SV	JZ	0,10	3,3×10 ⁻⁶
			0,09	3,3×10 ⁻⁵	V	Z	0,10	3,3×10 ⁻⁶
			0,09	3,3×10 ⁻⁵	JV	SZ	0,10	3,3×10 ⁻⁶
			0,09	3,3×10 ⁻⁵	J	S	0,15	5,0×10 ⁻⁶

* z obrázků 41 až 44 na stranách 203 až 206;

** z obrázku 38 na str. 200

6.2.6 Odhad rizika

6.2.6.1 Individuální riziko

Individuální riziko v oblasti okolo kolony je odhadnuto z horních frekvencí případů výsledků událostí a zón účinků následků (kapitola 4 citace /3/). Oddělené zóny účinků následků byly určeny dříve.

Výsledky událostí

- 1-BLEVE - kruh o poloměru 135 m s kolonou uprostřed
- 2-UVCE - kruh o poloměru 239 m se středem 85 m od kolony
- 3-Bleskový požár (jednorázový únik) - kruh o poloměru 148 m se středem 85 m od kolony
- 5-Bleskový požár (kontinuální únik) - „koláčová“ sekce (úhel 48°), která se rozprostírá na celých 127 m od kolony. Poloměr je 56 m se středem umístěným 71 m od kolony.

Tyto čtyři zóny účinků následků byly v měřítku promítnuty do umístění zařízení ve východním směru na obrázku 45 na str. 207. Pouze z hlediska následků můžeme účinky následků seřadit v klesajícím pořadí takto: UVCE, bleskový požár (okamžitý únik), BLEVE a bleskový požár (kontinuální únik).

Čtyři účinky následků popsané výše mohou být rozděleny do 3 společných typů:

1. kruhová podoba, se středem v koloně (výsledek události 1),
2. kruhová podoba, se středem vzdáleným 85 m od kolony (výsledky událostí 2 a 3),
3. „koláčová“ podoba, vznikající u kolony (výsledek události 5).

Každý z těchto typů musí být zpracován mírně odlišně ve výpočtu individuálního rizika, ale tato procedura se dá přímo aplikovat na jakoukoliv polohu a podobu zóny účinku.

Obrázky 46 až 49 na str. 208 až 209 ilustrují obecnou podobu profilu individuálního rizika jako funkci vzdálenosti pro každý ze čtyř výsledků události podél jakéhokoliv směru větru (včetně východního směru, který obsahuje obytnou oblast). Nulový bod v každém z obrázků je umístění systému frakční destilace.

V odhadu individuálního rizika je velmi důležité (a jak bude ukázáno později i v odhadu společenského rizika), aby překrývající se události byly řádně uváženy.

Proto pokud by se u rozlehlé zóny účinků následku UVCE uvažovaly pouze případy větru od Z k V, mohlo by být významně podceněno riziko pro obyvatele žijící na východě, protože události UVCE přispívají k riziku ze všech 8 směrů.

Výpočet individuálního rizika v jakémkoliv bodě předpokládá, že příspěvky všech případů výsledků událostí jsou aditivní. Proto celkové individuální riziko v každém bodě se rovná sumě individuálních rizik ze všech možných případů výsledků událostí.

Individuální riziko v této studii není symetrické okolo kolony z důvodu směrové pravděpodobnosti větru a iniciace. V ideálním případě by mohla být konstruována kontura (vrstevnice) individuálního rizika, která by zahrnovala body v každém z osmi směrů větru. Avšak v této studii je populace situována pouze východně od zařízení, proto křivka individuálního rizika bude konstruována pouze pro tyto východní směry.

Každý z obrázků 46 až 49 obsahuje sadu vzdáleností pro ten který výsledek události. Každá vzdálenost uvedená na dílčím obrázku reprezentuje podsoubor případů výsledku událostí, které dosahují tuto vzdálenost. Avšak jiné výsledky událostí mohou také vyplynout z případů, které se aplikují na tutéž vzdálenost. Proto pro každou vzdálenost na obrázcích 46 až 49 by měl být proveden výpočet, který sumarizuje všechny celkové případy výsledků událostí, které přispívají v této vzdálenosti.

Tabulka 32 na str. 151 prezentuje sumaci individuálního rizika pro vzdálenost 0 až 63 metrů ve východním směru od kolony. Všechny případy výsledků událostí přispívají v tomto výpočtu s výjimkou bleskového požáru (kontinuální únik), směry větru od S k J, SV k JZ, V k Z, JV k SZ a J k S.

Tabulka 31 na str. 150 byla vytvořena pro prezentaci změn celkového individuálního rizika, které vyplývají pro každou jednotlivou vzdálenost. To dovoluje zkonstruovat křivky celkového individuálního rizika ve východním směru – viz obrázek 50 na str. 210.

Některá pozorování z výsledků jsou

1. Riziko poblíž kolony bylo pravděpodobně podceněno, protože malé události, které mohly přispívat k riziku v této oblasti byly vyloučeny z analýzy (např. nebezpečí tryskavého plamene).
2. Výběr pouze dvou míst pro iniciaci (okamžitá a zpožděná až po dosažení koncentrace DMV), zjednodušuje reálnou situaci a nebere v úvahu zdroje iniciace v rezidenční oblasti, u zařízení procesů s otevřeným ohněm, na silnici atd. Může být uvažováno odlišné rozdělení iniciace, ale se zvýšenými výpočetními náklady.
3. Použití pouze jedné meteorologické situace (F stabilita, rychlost větru 1,5 m/s) obecně vede k přecenění rizika při dané vzdálenosti, protože nejdelší vzdálenosti rozptylu jsou obvykle spojovány s F stabilitou a nízkými rychlostmi větru.
4. Riziko UVCE je pravděpodobně přeceněno, protože byl vybrán vysoký výtěžek exploze.

Tyto předpoklady byly vybrány pro provedení rozumného, ale konzervativního odhadu rizika použitím minimálního počtu ručních výpočtů. Kde výsledné odhady rizika indikují potenciální problém, může se analytik rozhodnout pro některé realističtější zjednodušující předpoklady a výpočty opakovat. Avšak každá změna v předpokladech pravděpodobně reprezentuje významné zvýšení počtu případů výsledků událostí. Alternativním přístupem je použití výpočetních nástrojů (viz kapitulu 3.3.7 na str. 57), které automatizují výpočetní proceduru a dovolují analýzu většího počtu případů výsledků událostí.

Tabulka 31: Celkové individuální riziko ve vzdálenostech ve východním směru

Část vzdálenosti (m)	Případy výsledků událostí, které nemají větší vliv na celkové individuální riziko	Celkové individuální riziko (rok ⁻¹)
Od 0 až k 63	Bleskový požár (kontinuální)	$1,3 \times 10^{-4}$
	S k J	
	SV k JZ	
	V k Z	
	JV k SZ	
	J k S	
Od 63 až k 70	Bleskový požár (jednorázový)	$1,3 \times 10^{-4}$
	V k Z	
Od 70 až k 120	Bleskový požár (jednorázový)	$1,3 \times 10^{-4}$
	JV k SZ	
	SV k JZ	
Od 120 až k 127	Bleskový požár (jednorázový)	$1,3 \times 10^{-4}$
	J k S	
	S k J	
Od 127 až k 135	Bleskový požár (kontinuální)	$1,4 \times 10^{-5}$
	JZ k SV	
	Z k V	
	SZ k JV	
Od 135 až k 154	BLEVE	$3,6 \times 10^{-6}$
Od 154 až k 170	UVCE	$8,4 \times 10^{-6}$
	V k Z	
Od 170 až k 190	UVCE	$8,0 \times 10^{-6}$
	SV k JZ	
	JV k SZ	
Od 190 až k 233	Bleskový požár (jednorázový)	$5,6 \times 10^{-6}$
	JZ k SV	
	SZ k JV	
Od 233 až k 305	Bleskový požár (jednorázový)	$4,0 \times 10^{-6}$
	Z k V	
	UVCE	
	J k S	
	S k J	
Od 305 až k 324	UVCE	$1,2 \times 10^{-6}$
	JZ k SV	
	SZ k JV	
> 324	UVCE	0
	Z k V	

Tabulka 32: Odhad individuálního rizika

Vzdálenost od kolony (m)	Přispívající výsledky událostí	Přispívající případy výsledků událostí	Frekvence přispívajících případů výsledků událostí (rok ⁻¹)	Celková frekvence pro každý případ výsledku události (rok ⁻¹)
0 až 63	1	směr větru nezávislý	5,7×10 ⁻⁶	5,7×10 ⁻⁶
	2	JZ k SV	1,6×10 ⁻⁶	4,6×10 ⁻⁶
		Z k V	1,2×10 ⁻⁶	
		SZ k JV	7,8×10 ⁻⁷	
		S k J	1,8×10 ⁻⁷	
		SV k JZ	1,8×10 ⁻⁷	
		V k Z	1,8×10 ⁻⁷	
		JV k SZ	1,8×10 ⁻⁷	
		J k S	2,8×10 ⁻⁷	
	3	Totéž jako 2		
	5	JZ k SV	5,0×10 ⁻⁵	1,1×10 ⁻⁴
		Z k V	3,8×10 ⁻⁵	
		SZ k JV	2,5×10 ⁻⁵	
Celkové individuální riziko =				1,3×10 ⁻⁴ rok ⁻¹

Z údajů v tabulce 31 může být vytvořena křivka pro celkové individuální riziko, která je zobrazena na obrázku 50 na str. 210.

6.2.6.2 Sociální riziko

Prvním krokem v odhadu sociálního rizika je výpočet počtu úmrtí pro každý případ výsledku událostí. Pro tuto případovou studii jsou zóny účinku následků ostře

odděleny (uvnitř zóny bude úmrtnost 100%) a je učiněn předpoklad, že obytná oblast má rovnoměrné rozdělení populace. Proto podíl z obytné oblasti pokryté každým výsledkem události bude reprezentovat podíl z 200 úmrtí, které by byly výsledkem.

Tabulka 33 na str. 152 shrnuje tyto výsledky, které reprezentují hrubou informaci, z které může být odvozen odhad společenského rizika. Údaje musí být převedeny na kumulativní frekvence, aby mohla být nakreslena F-N křivka. To je provedeno uspořádáním případů výsledků událostí podle klesajícího počtu úmrtí a pak vypočtením frekvence znamenající N nebo více fatálních. Tato procedura je prezentována v tabulce 34 na str. 153.

Údaje ve třetím a čtvrtém sloupci jsou zaneseny v logaritmickém měřítku, aby mohla být vytvořena F-N křivka zobrazená na obrázku 51 na str. 211. Přidání většího počtu případů výsledků událostí povede k vytvoření hladší křivky, což ale nemusí nutně znamenat významný posun křivky směrem nahoru nebo dolů.

Tabulka 33: Odhad počtu úmrtí pro každý případ výsledku události

Případ výsledku události	Frekvence případu výsledku události	Odhadnutý počet úmrtí
1-BLEVE	$5,7 \times 10^{-6}$	50
2-UVCE		
JZ k SV	$1,6 \times 10^{-6}$	200
Z k V	$1,2 \times 10^{-6}$	200
SZ k JV	$7,8 \times 10^{-7}$	200
S k J	$1,8 \times 10^{-7}$	130
SV k JZ	$1,8 \times 10^{-7}$	90
V k Z	$1,8 \times 10^{-7}$	70
JV k SZ	$1,8 \times 10^{-7}$	90
J k S	$2,8 \times 10^{-7}$	130
3-bleskový požár (okamžitý)		
JZ k SV	$1,6 \times 10^{-6}$	100
Z k V	$1,2 \times 10^{-6}$	150
SZ k JV	$7,8 \times 10^{-7}$	100
S k J	$1,8 \times 10^{-7}$	40
SV k JZ	$1,8 \times 10^{-7}$	0
V k Z	$1,8 \times 10^{-7}$	0
JV k SZ	$1,8 \times 10^{-7}$	0
J k S	$2,8 \times 10^{-7}$	40
5-bleskový požár (kontinuální)		
JZ k SV	$5,0 \times 10^{-5}$	5
Z k V	$8,8 \times 10^{-5}$	40
SZ k JV	$2,5 \times 10^{-5}$	5

6.2.7 Závěry

Největší příspěvek k individuálnímu riziku poblíž kolony je z bleskových požárů z ruptury potrubí ekvivalentní 20% průměru potrubí. Nápravná opatření mohou zahrnovat častější inspekci nebo monitorování tloušťky stěny, jestliže jsou očekávány významnější korozivní a/nebo erozivní účinky.

Největší přispěvatel k společenskému riziku, nikoli však neočekávaně, plyne z okamžitého úniku obsahů a zpožděné iniciace vedoucí k UVCE. Poloměr zóny účinků je úměrný třetí odmocnině z uniklého množství. Proto pouze velmi podstatné

snížení množství má významný vliv na redukci tohoto poloměru. Nicméně může být požadována dodatečná dálkově ovládaná izolace systému. Hlavním zájmem je integrita nádob a potrubí. Může být požadována dodatečná důkladná kontrola založená na různých metodách.

Konečně z důvodu velikosti společenského rizika může dodatečná studie uvažovat i jiné příčiny poruch nádoby, jako je přetlakování, které mohou vést k identickým následkům. Tyto studie, využívající pravděpodobně FTA, mohou ukázat, zda hrozba přetlakování je významně vyšší než základní porucha nádoby, a mohou být včleněny inženýrské nebo procesní kontroly, aby redukovaly toto riziko.

Tabulka 34: Odhad sociálního rizika

Počet úmrtí	Případ výsledku události	Frekvence případu výsledku události (rok ⁻¹)	Souhrnná frekvence N nebo více úmrtí (rok ⁻¹)
200	2-UVCE JZ k SV	$1,6 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$
200	2-UVCE Z k V	$1,2 \times 10^{-6}$	
200	2-UVCE SZ k JV	$7,8 \times 10^{-7}$	
150	3-bleskový požár (okamžitý) Z k V	$1,2 \times 10^{-6}$	$4,8 \times 10^{-6}$
130	2-UVCE J k S	$2,8 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-6}$
130	2-UVCE S k Jsou	$1,8 \times 10^{-7}$	
100	3-bleskový požár (okamžitý) JZ k SV	$1,6 \times 10^{-6}$	$7,6 \times 10^{-6}$
100	3-bleskový požár (okamžitý) SZ k JV	$7,8 \times 10^{-7}$	
90	2-UVCE SV k JZ	$1,8 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-6}$
90	2-UVCE JV k SZ	$1,8 \times 10^{-7}$	
70	2-UVCE V k Z	$1,8 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-6}$
50	1-BLEVE	$5,7 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-5}$
40	5-bleskový požár (kontinuální) Z k V	$3,8 \times 10^{-5}$	$5,2 \times 10^{-5}$
40	3-bleskový požár (okamžitý) J k S	$2,3 \times 10^{-7}$	
40	3-bleskový požár (okamžitý) S k J	$1,8 \times 10^{-7}$	
5	5-bleskový požár (kontinuální) JZ k SV	$5,0 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$
5	5-bleskový požár (kontinuální) SZ k JV	$2,5 \times 10^{-5}$	

7. Příloha č. 2 – soubor příkladů

Následující příklady jsou převzaty z publikace *Risk Assessment and Management in the Context of the Seveso II Directive* (citace /1/). Tématicky jsou rozděleny do podkapitol 7.1 až 7.8.

7.1 Úvod do pojmu rizika

Příklad 4: Sestrojení křivky společenského rizika ze zadaných údajů

Předpokládejme, že analýza rizika chemického procesu identifikuje 4 hlavní scénáře úniku nebezpečné látky. Tyto scénáře společně s frekvencemi (pravděpodobnostmi) jejich výskytu a závažnými následky (údaje o očekávaných smrtelných úrazech) jsou shromážděny v následující tabulce:

Tabulka 35: Zadání údajů příkladu k vyhodnocení společenského rizika

	Scénář události	Následky, N (očekávané smrtelné úrazy)	Pravděpodobnost výskytu, F (za rok)
S ₁	Únik z potrubí	2	10 ⁻⁴
S ₂	Katastrofická porucha zásobníku	5000	10 ⁻⁸
S ₃	Únik dírou v zásobníku	110	10 ⁻⁶
S ₄	Zlomení nakládacího a/nebo vykládacího ramena	15	2×10 ⁻⁵

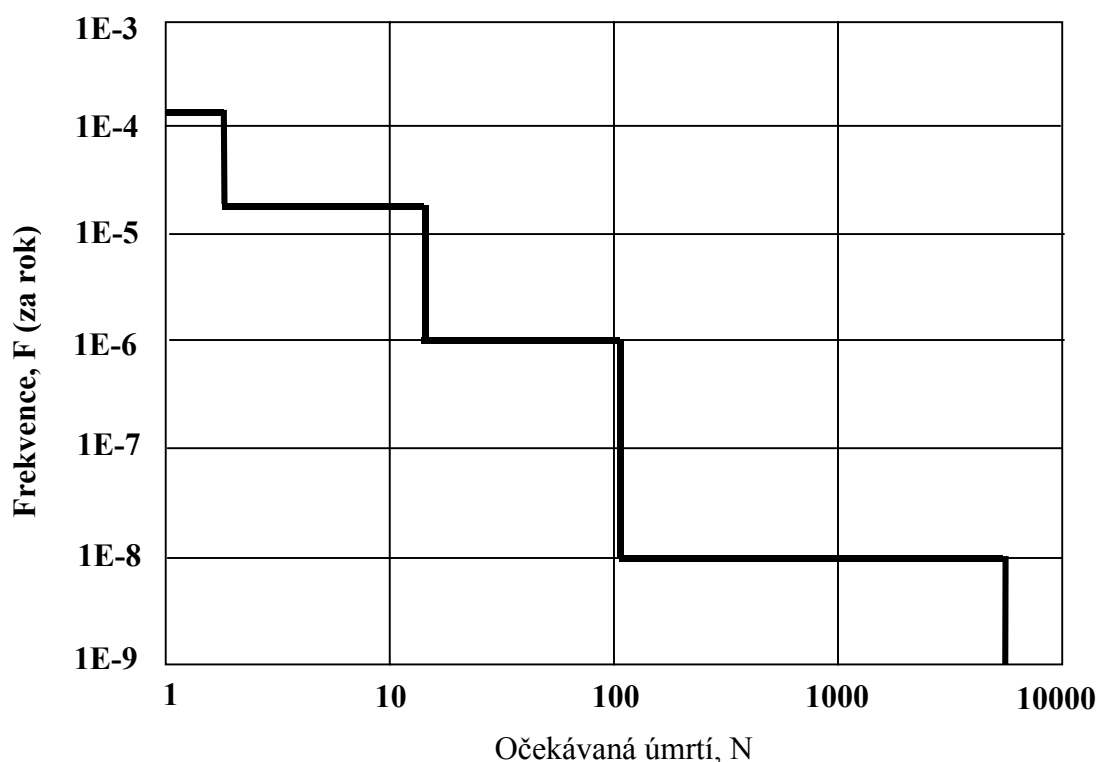
Úkol: Sestrojit ze zadaných údajů křivku skupinového rizika F – N.

Pro vytvoření křivky F - N podle zadání příkladu musíme nejdříve uspořádat scénáře podle míry následků (viz tabulku níže). Očekávaná frekvence („pravděpodobnost“) výskytu úmrtí 5000 osob je 10⁻⁸ za rok (scénář S₂). Očekávaná frekvence úmrtí 110 nebo více osob (scénář S₃) je dána součtem očekávané frekvence scénáře S₃ (10⁻⁶ ročně) a očekávané frekvence scénáře S₂, tj. 10⁻⁶ + 10⁻⁸ = 1,01×10⁻⁶ za rok. Převedením tohoto jednoduchého postupu na všechny údaje se vytvoří F-N křivka znázorněná na obrázku 16.

Tabulka 36: Konstrukce F-N křivky

	Scénář události	Důsledky (očekávané smrtelné úrazy)	Pravděpodobnost výskytu (ročně)	Kumulativní frekvence (KKDF)
S ₁	Únik z potrubí	2	10 ⁻⁴	1.2101×10 ⁻⁴
S ₄	Zlomení nakládacího /vykládacího ramena	15	2×10 ⁻⁵	2.101×10 ⁻⁵
S ₃	Únik dírou v zásobníku	110	10 ⁻⁶	1.01×10 ⁻⁶
S ₂	Katastrofická porucha zásobníku	5000	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸

Pozn.: KKDF – komplementární kumulativní distribuční funkce



Obrázek 16: Příklad křivky $F - N$

7.2 Technika identifikace nebezpečí

Příklad 5: Cvičení ve stylu HAZOP

Úvod

Námětem tohoto cvičení je běžná činnost – příprava šálku čaje. Účelem je použít techniky HAZOP k vyšetření kroků postupu přípravy čaje.

Doufejme, že to ukáže čtenáři jak:

- jsou identifikovány problémy nebezpečí a provozuschopnosti, z nichž některé jsou zřetelné a jiné ne,
- se technický postup může zabývat identifikací nebezpečí různých charakterů a závažností,
- čtenáři nemusí souhlasit s relativní důležitostí navržených scénářů a s tím, zda jsou žádoucí změny hardwaru (zařízení) nebo softwaru (instrukcí),
- výsledky závisí na prahu zájmu (v tomto případě je to ponecháno na týmovém rozhodnutí),

- stejný problém může být identifikován různými pracovními skupinami pomocí jiných klíčových slov.

Tento příklad byl navržen pro čtenáře, kteří by se za normálních okolností nemohli na HAZOPu podílet, aby získali představu, jak HAZOP pracuje. Zejména je toto cvičení vhodné pro čtenáře bez teoretických nebo praktických znalostí procesního inženýrství a způsobů selhání komponent a čtenáře, kteří byli informováni o pojmu HAZOP jen v rozsahu distančního studia. Jakýkoliv skutečný případ, vztahující se k nebezpečí vzniku závažných havárií, by vyžadoval kvalifikaci a zkušenosti takovýmto čtenářům nedosažitelné a dokonce kdyby takové schopnosti měli, tak by to dodatečně vyžadovalo velké úsilí, aby se sžili s informacemi o problému před jeho řešením. Ze zkušenosti je známo, že se více získá aplikováním nového postupu na běžný problém, protože to odděluje problémy techniky aplikace postupu od problémů odborných znalostí oboru. Pokud čtenáři budou mít problémy s tímto příkladem, bude to nejpravděpodobněji z důvodu nejistoty při postupu, který je aplikován a ne z důvodu nejistoty, jak připravit čaj!

Pro spolupráci na HAZOPu je doporučováno důkladné školení a další školení pro vedení HAZOPu. Účelem tohoto příkladu není ani procvičovat kvalitu identifikace průmyslového nebezpečí, ani by nemělo být žádoucí pokoušet se o to.

Zadání problému

Účastníkům tohoto výcviku jsou zadány údaje o zařízení vhodném pro přípravu čaje (Tabulka 37) a pokyny nebo kroky postupu (Tabulka 38):

Tabulka 37: Příprava čaje: zařízení

Zdroj vody
Konvice
Elektrický vaříč
Obsluha
Výlevka
Sáčky čaje

Tabulka 38: Příprava čaje: postupové kroky

Naplň konvici vodou
Ohřej vodu
Vlož do nádoby na čaj sáčky čaje
Nalij vodu do nádoby na čaj
Dej mléko do šálku
Přelij čaj do šálku
Vyhod' odpadky

Výsledky šetření se zapisují do formuláře, jehož záhlaví znázorňuje Tabulka 39.

Tabulka 39: Příklad záhlaví formuláře zprávy o identifikaci nebezpečí

Formulář zprávy o identifikaci nebezpečí					
Členové týmu Krok postupu					
1. Klíčové slovo	2. Odchylka	3. Možná příčina	4. Následky	5. Prevence	6. Požadovaná činnost

Úkol: Proved'te bezpečnostní analýzu přípravy čaje (ve stylu HAZOP).

Účastníci jsou rozděleni do skupin ne větších než 5 osob a rozdělá se jim formulář pro záznam jejich práce (Tabulka 39). Pro každý krok v procesu vaření čaje musí skupina použít klíčové slovo z HAZOPu pro identifikaci problematiky nebezpečí a provozuschopnosti. Klíčová slova a některé návody pro jejich výklad jsou uvedeny ve formuláři. Pro každý krok, pro každé klíčové slovo by měla skupina zaznamenat všechny odchylky, jejich příčiny a následky, všechny ochranné činnosti, všechny požadavky a další potřebné činnosti v závislosti na všech scénářích, které účastníci diskutují.

Objasnění

Skupiny jsou vedeny k vymýšlení všemožných podrobností v průběhu vyšetřování, přičemž jsou všechny názory zaznamenávány. V případě nutnosti jsou také povzbuzovány k hledání výkladu problému nebo postupu.

Odpovědi (reakce)

Hlavním záměrem cvičení bylo vyzkoušet si, jak může být použit strukturovaný přístup na jedné straně k prozkoumání jakékoliv situace, aby bylo nalezeno potenciální nebezpečí, a na druhé straně, v případě HAZOPu, k vyšetření problémů provozuschopnosti. V tomto zvláštním případě se samozřejmě nejedná o žádné závažné nebezpečí ve smyslu směrnice Seveso II, ale existuje zde řada nebezpečí, počínaje pádem předmětů a konče zabitím elektrickým proudem. Některá nebezpečí a problémy provozuschopnosti, které mohou být identifikovány při kompletní analýze, jsou uvedeny v seznamu (Tabulka 40). Řadu problémů při interpretaci pracovních postupů si mohou frekventanti kurzu v tomto cvičení vyzkoušet. Zvláště stojí za zdůraznění, že „činnosti“ plynoucí z HAZOPu se obecně týkají prevence výskytu nebezpečí (při změnách hardwaru – zařízení, nebo softwaru – instrukcí). I když mohou obsahovat diskusi, co by se mělo udělat v případě události, spíše budou ve stádiu projektu uvažovány možnosti prevence, kdy je HAZOP aplikován nejefektivněji. Neexistuje „perfektní“ řešení uvedeného problému. Je to částečně proto, že nemáme dostatek podrobností pro specifikaci problému, částečně díky nejednoznačnosti postupu a částečně díky rozdílným názorům na to, co by mělo být zaznamenáno a které situace vyžadují řešení. Při aplikaci metody HAZOP v průmyslové výrobě tato variabilita také existuje, i když ne v takové míře.

Příklad výstupu, o kterém se předpokládá, že skupina vytvoří v tomto cvičení, uvádí Tabulka 41, která může být prezentována skupinám tak, aby jim pomohla začít a formálně vysvětlit záznam cvičení.

Tabulka 40: Rizika a problémy, které mohou být identifikovány při přípravě čaje

Opaření / popálení od páry, horké vody, horkého povrchu
Zabití elektrickým proudem
Padající předměty
Otrava z usazenin z vody, špatně odměřené suroviny, kyselého mléka atd.
Výrobní vady: slabý / příliš vyluhovaný / studený čaj atd.
Poškozené zařízení: spálená součást elektrického spotřebiče, prasklý šálek atd.

Tabulka 41: Příklad zprávy o identifikaci nebezpečí

Formuláře zprávy o identifikaci nebezpečí					
Osoby ve skupině					
Krok postupu: Plnění konvice vodou					
1. Klíčové slovo	2. Odchylka	3. Možná příčina	4. Následky	5. Prevence	6. Požadovaná činnost
Není	V konvici není voda.	Není zdroj vody, kohoutek se porouchá v uzavřené poloze.	Není čaj.		Zajistit spolehlivý zdroj vody.
Více (větší)	Příliš mnoho vody v konvici.	Kohoutek se porouchá v otevřené poloze nebo je otevřen příliš dlouho.	Rozlití.	Výlevka a kanalizace pro zachycení a zneškodnění.	
		Konvice přeplněna.	V dalších krocích možné přetečení.		Před pokračováním vyžaduje operátorovu kontrolu úrovně, zda je pod označením akceptovatelné úrovně.

7.3 Technika analýzy systému.

Příklad 6: Cvičení na sestavování logických diagramů

Úvod

Předmětem tohoto cvičení je dobře známá činnost – vyplňování písemných testů. Problém spočívá v úspěšné nebo neúspěšné odpovědi na zkušební otázku. Jsou vytvářena bloková schémata a stromy poruch ukazující závislost úspěchu a selhání (neúspěchu) na specifických složkách nebo událostech. To dovolí čtenáři, aby viděl jak:

- bloková schémata znázorňují závislost systému na jednotlivých složkách,
- strom poruch spojuje základní události se specifikovanými „vrcholovými událostmi“,
- tento strom poruch může být zavádějící, jestliže jsou přehlíženy některé základní události, které by mohly přispět k vrcholové události.

Systémové analýzy obvykle v praxi vyžadují dialog mezi systémovým odborníkem (většinou konstruktérem) a analytikem. V tomto cvičení žádný takový dialog není možný, a tak je potřeba velmi jasně definovat problém. To lze obejít, i přes zjednodušenou verzi problému, opakovanou analýzou s doplňkovými informacemi (včetně uvažování více základních událostí). Tato druhá analýza neilustruje pouze, jak pro vyšetřovaný problém lze vytvořit více pravděpodobných scénářů selhání, ale také, jak snadno může být vytvořen strom (při první analýze), který je zdánlivě věrohodný, ale který je jako model systému nedostatečný.

Cvičení bylo navrženo tak, aby umožnilo čtenáři, který by normálně nezískal praxi v systémových analýzách, získat určitou představu o jejich charakteristikách. Zvláště vhodné je cvičení pro čtenáře bez teoretických nebo praktických znalostí procesního inženýrství a způsobů selhání složek a pro čtenáře, kteří mají být pouze seznámeni s pojetím systémových analýz v rámci distančního studia. Jakýkoliv reálný příklad systémových analýz, vztahující se k nebezpečí vzniku závažné havárie, by měl vyžadovat znalosti a zkušenosti, které nebývají těmto čtenářům běžně dostupné.

Pro systémové analýzy se doporučuje základní trénink. Není záměrem tohoto cvičení ani provádět kvalitativní analýzy průmyslového systému v praxi, ani by nebylo žádoucí pokoušet se je takto dělat.

Zadání problému

Problém se týká doplnění výpočtu při písemném testu a záznamu vypočítané hodnoty. Čtenáři je poskytnuta následující definice úkolů:

a) Představte si, že máte doplnit výpočet a zapsat výsledek.

Máte k dispozici logaritmické pravítko, kalkulačku, tužku a pero.

Výpočet můžete provádět buď za použití logaritmického pravítka, nebo kalkulačky. Odpověď můžete zapsat perem nebo tužkou. Platí následující logické výroky:

A - "Logaritmické pravítko pracuje úspěšně",

B - "Kalkulačka pracuje úspěšně",

C - "Tužka pracuje úspěšně",

D - "Pero pracuje úspěšně".

S ohledem na systém je úspěch definován jako provedení výpočtu a zápis správné odpovědi.

Úkol ad a): Vytvořte blokové schéma pro systém s použitím předchozích pokynů.

b) Pro systém popsaný výše vytvořte strom poruch pro vrcholovou událost "selhání systému "

Strom poruch by měl zahrnout vrcholovou událost a čtyři základní události (negace logických výroků):

A' představuje selhání logaritmického pravítka,

B' představuje selhání kalkulačky,

C' představuje selhání tužky,

D' představuje selhání pera.

Úkol ad b): Znázorněte graficky strom poruch pro tento případ. Udejte názvy všech přechodových událostí (uzlů mezi logickými operátory).

c) Pro systém popsaný výše vytvořte nový strom poruch, který zahrne také následující události, definované negacemi logických výroků:

E' představuje otázka nesprávně přečtená,

F' představuje pouzdro (obsahující pero a tužku) ztraceno,

G' představuje (správně vypočítáno, ale) odpověď je nesprávně zapsaná,

H' představuje zvukové signály požárního poplachu (tj. cvičení přerušeno před dokončením).

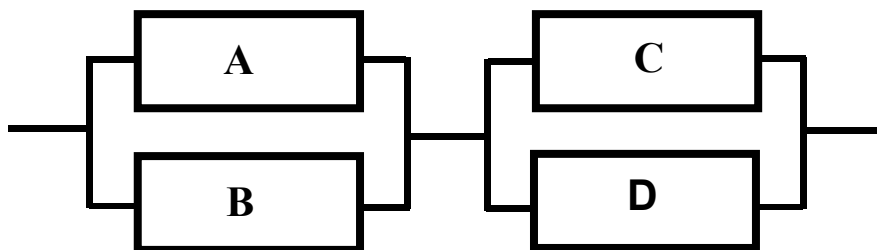
Úkol ad c): Znázorněte graficky strom poruch pro tento případ. Pojmenujte všechny přechodové události.

d) Navrhněte další základní události, které by mohly být zahrnuty v analýzách.

Každá část cvičení je navržena tak, aby odhalila různé vlastnosti blokového schématu a techniky analýzy stromem poruch.

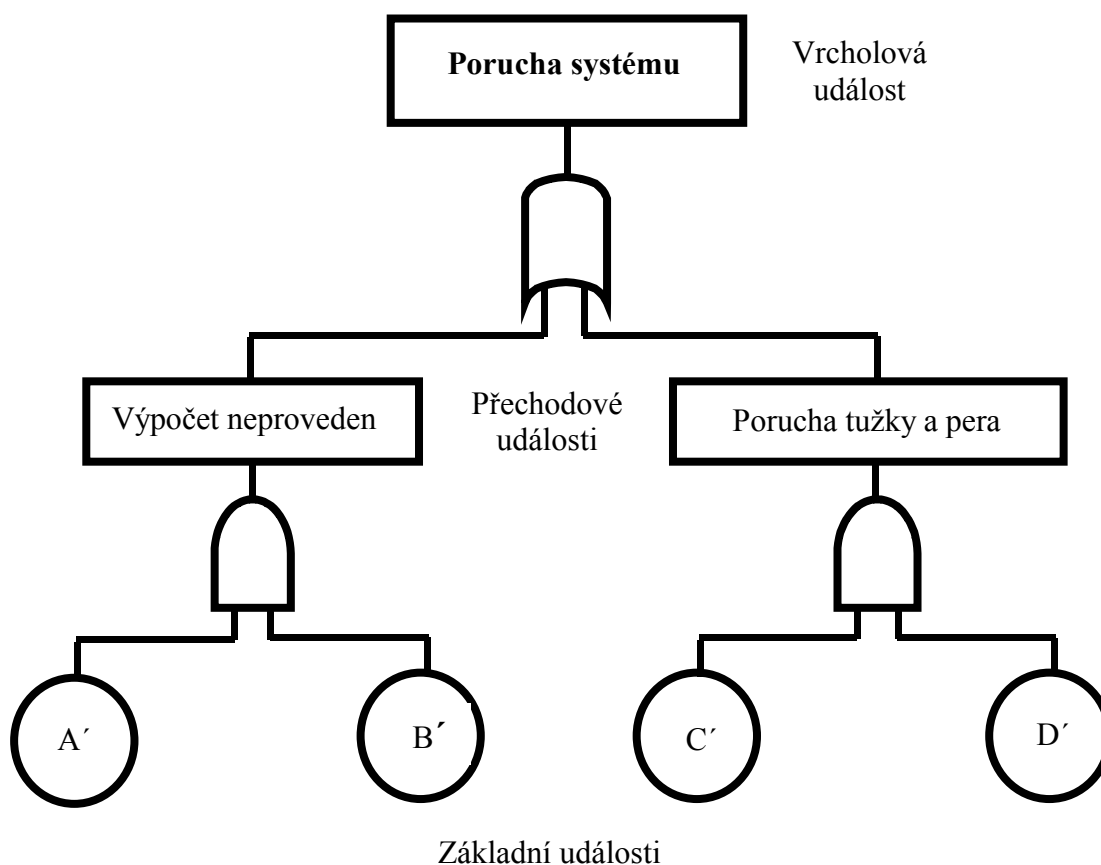
Řešení pro Příklad 6 jsou uvedena na následujících obrázcích:

Blokové schéma, řešení části a) uvádí Obrázek 17.



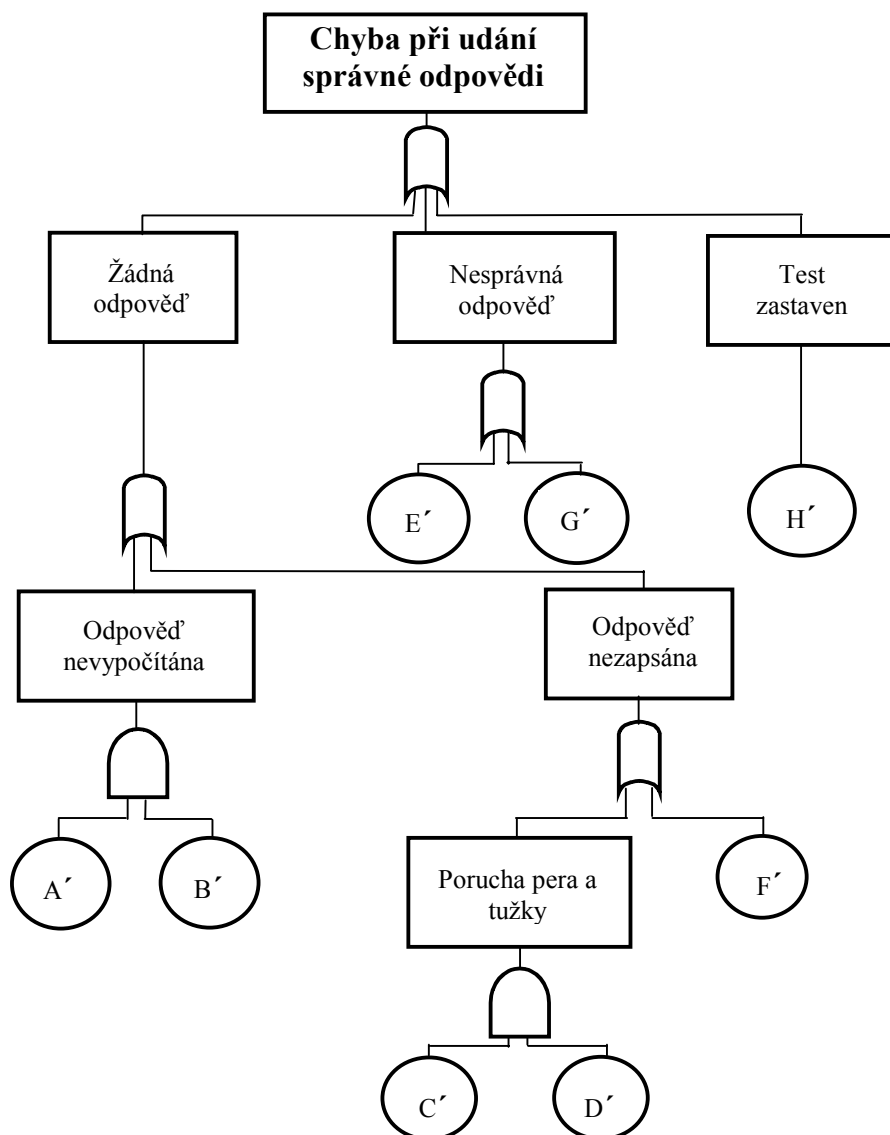
Obrázek 17: Blokové schéma k příkladu 6

Strom poruch, řešení části b) uvádí Obrázek 18.



Obrázek 18: První strom poruch k příkladu 6

Strom poruch, řešení části c) uvádí Obrázek 19.



Obrázek 19: Druhý strom poruch k příkladu 6

Jmenovité události E, F, G a H jsou zaměřeny na ilustraci významu (důležitosti) zahrnutí lidského faktoru, běžných příčin selhání a vnějších událostí do jakýchkoli analýz.

V analýzách reálných systémů ovšem nejsou předepsány identifikace složek systémů a relevantních základních událostí selhání. Významnou součástí znalostí analytika je, po konzultacích se systémovými experty, schopnost zajistit, aby všechna relevantní selhání byla řešena na příslušné úrovni detailů.

Neexistuje kompletní řešení stanoveného problému. Budou vždy existovat další základní události, které by mohly být zahrnuty do analýz a možnost dalšího rozkladu systémových složek a odhalení více závislostí uvnitř systému. Vhodnou otázkou je, zdali analýzy jsou dostatečné s ohledem na jejich účel.

7.4 Analýza následků a modelování

Příklad 7: Posloupnost dějů (model) události

Předpokládejme, že jako analytik rizika máte odhadnout následky scénářů událostí týkajících se podniku. Hlavní zařízení podniku pro takové odhady jsou:

1. válcový zásobník pro skladování topného oleje (z důvodu energetických požadavků podniku),
2. kulový zásobník používaný pro skladování chloru zkapalněného pod tlakem.

Komentáře k zadání:

Ad 1): První scénář události se týká roztržení zásobníku topného oleje. Kolem zásobníku existuje jámka, mohou být přítomny zdroje iniciace a existují čerpadla v jámce, která mohou být použita v případě nouze. Avšak aby se odhadly potenciální následky, můžete učinit předpoklad, že čerpadla ve vaší analýze zanedbáte.

Ad 2): Druhý scénář události se týká protržení horní části kulového zásobníku s chlorem. V literatuře naleznete, že v takovém případě přichází v úvahu únik jak kapalného, tak plynného chloru.

Úkol (návod k řešení):

Ze seznamu dostupných modelů vyberte takové, abyste mohli provést úplnou analýzu následků. Které modely použijete pro vyhodnocení scénáře první události a které pro vyhodnocení scénáře druhé události? Uveďte modely v jejich správném pořadí použití tak, aby výstup jednoho mohl být použit jako vstup pro následující model. Vypracujte jednoduchý logický diagram posloupnosti kroků pro odhad následků (případně jednoduchý strom událostí). Potřebujete meteorologická data pro váš odhad?

Dostupné modely:

Gaussův model rozptylu	model vypařování	model požáru kaluže
model výtoku plynů	model výtoku kapaliny	model zranitelnosti
model dvoufázového výtoku	model rozptylu těžkého plynu	model tryskavého požáru
model UVCE – TNO	TNT ekvivalent modelu UVCE	model rozptylu 3-D
probit pro toxické účinky	model BLEVE	probit pro tepelné účinky
model rozmetání úlomků	probit pro účinky přetlakové vlny	

Úkol ad 1): Sestrojte blokový diagram procedury analýzy následků pro případ úniku topného oleje. Sestrojte jednoduchý strom událostí pro daný případ.

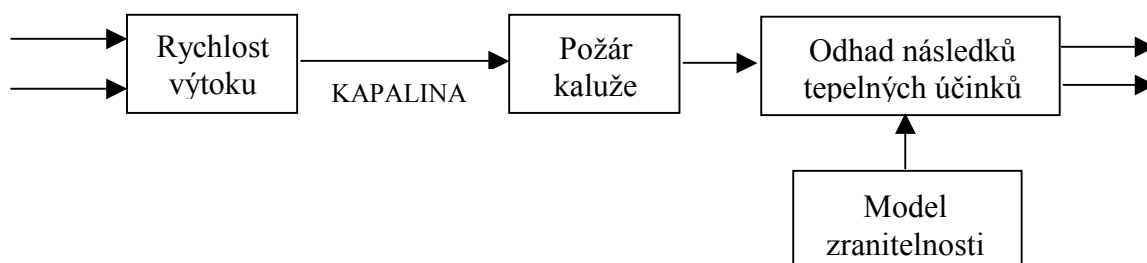
Úkol ad 2): Sestrojte blokový diagram procedury analýzy následků pro případ úniku kapalného chloru. Znázorněte graficky souvislost pojmů „událost – výsledek události – případ výsledku události“ pro daný případ.

Řešení pro Příklad 7:

Ad 1): Pro scénář první události (roztržení zásobníku topného oleje) jsou třeba následující modely:

Model výtoku kapaliny – model požáru kaluže – model zranitelnosti a zvláště probit funkce pro tepelné účinky.

Blokové schéma modelu události (havárie zásobníku topného oleje):



Logický strom modelu události (havárie zásobníku topného oleje):

Roztržení zásobníku	Bezprostřední iniciace	Pořad. číslo události	Výsledek události
	ANO	1.10 ⁻³ /rok	
		1.	POŽÁR KALUŽE
		2.	BEZ NÁSLEDKŮ
	NE		

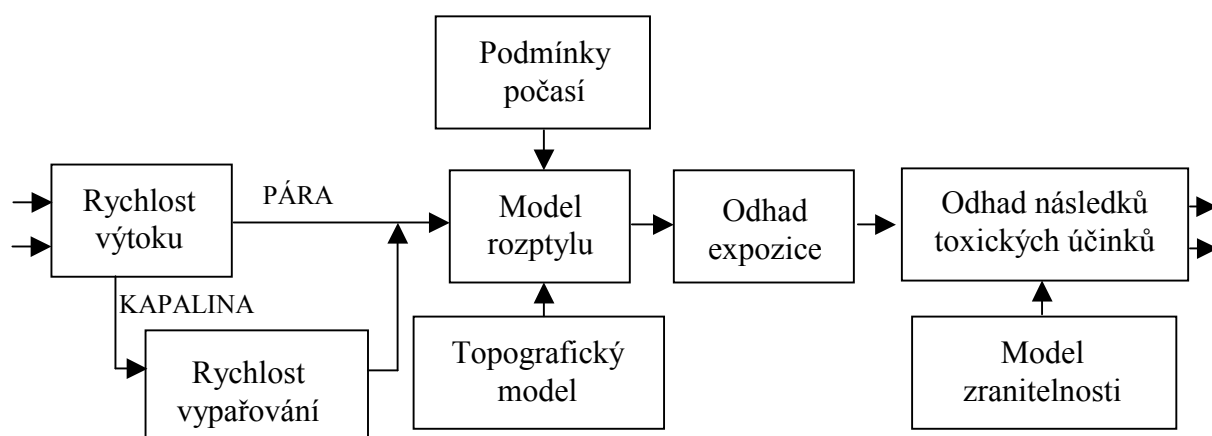
První jev spojený se scénářem události je únik nebezpečné látky ze zařízení. Jelikož topný olej je kapalina, první model, který se užije, je výtok kapaliny. Výstupem tohoto modelu je rychlost výtoku jako funkce času. Dále je unikající olej shromažďován v jímce a vytváří kaluž. Množství topného oleje přítomné v jímce se vypočítá jednoduchým matematickým postupem. Za předpokladu, že je přítomen zdroj iniciace, dojde k zapálení kaluže hořlavé kapaliny. Aby se vypočítal účinek požáru, a zejména tepelné radiace, pro každý bod okolo kaluže jako funkce času, užije se modelu požáru kaluže. Meteorologická data – zvláště rychlost větru a jeho směr – jsou potřeba k výpočtu „nachýlení“ plamene. Konečně z důvodu odhadu celkového

rizika se užije model zranitelnosti, sestávající z probit funkce pro tepelné účinky. Tento model převádí profil tepelné dávky přes čas expozice na pravděpodobnost úmrtí (číslo mezi 0 a 1). Nerovnost povrchu je nepodstatná pro celkový jev.

Ad 2): Pro scénář druhé události (protržení kulového zásobníku s chlorem) jsou třeba následující modely:

Model dvoufázového výtoku – model odpařování – model rozptylu těžkého plynu nebo model rozptylu 3-D – výpočty dávky – model zranitelnosti a zvláště probit funkce pro toxické účinky.

Blokové schéma modelu události (havárie kulového zásobníku s chlorem):



Vztah pojmů pro modelování události (havárie kulového zásobníku s chlorem):

Událost	Výsledek události	Případy výsledku události
Únik toxické látky	Rozptyl toxických plynů a par v atmosféře	Vítr 2 m/s, třída stability počasí F
		Vítr 5 m/s, třída stability počasí D
		atd.

Jak je uváděno v literatuře, bude unikat jak kapalný tak plynný chlor; takže by měl být pro modelování úniku užit model dvoufázového výtoku. Výstupem je rychlost výtoku jako funkce času. Kapalný podíl úniku se dále bude odpařovat, takže je třeba model odpařování. Jelikož chlor je těžší než vzduch, následuje model rozptylu těžkého plynu. Též může být užit model 3-D. Model rozptylu znázorní koncentraci chloru pro každý bod okolo zásobníku jako funkci času. Z toho může být vypočítána dávka přijatá jednotlivci za celou dobu expozice (výpočty dávky) a při použití modelu zranitelnosti sestávajícího z probit funkce pro toxické účinky je vypočítáno riziko (tj. pravděpodobnost úmrtí). Meteorologická data (rychlost větru a jeho směr, třída stability počasí, okolní teplota a vlhkost) jsou třeba pro výpočet rozptylu. Nerovnost povrchu je rovněž vstupním parametrem pro model rozptylu.

Příklad 8: Odhad expozice toxickým plynem

Předpokládejte, že jako poradce místních správních orgánů pro problematiku rizika musíte zpracovat havarijní plán pro scénář události týkající se úniku amoniaku. Jelikož existují pouze omezené prostředky, máte rozhodnout, zda – pro případ nouze – poradíte lidem, aby zůstali na místě, kde je očekávána koncentrace na hladině C po dobu T , nebo se přesunuli do místa, kde je koncentrace $2C$ a zdržovali se tam po dobu $T/2$.

Probit funkce pro amoniak je $P = -15,9 + 1,85 \ln(c^2t)$

Úkol: Proved'te porovnání obou alternativ a vysvětlete svůj výběr.

Řešení pro Příklad 8:

Nepochybně bude rozhodnutí založeno na úvahách o ohrožení. Úroveň ohrožení bude tím vyšší, čím vyšší bude hodnota probit funkce. Ta zase bude vyšší, když bude vyšší c^2t (dávka). Tudíž:

- 1. případ: koncentrace $c_1 = C$, čas expozice $t_1 = T \Rightarrow$ dávka $D_1 = C^2T$
- 2. případ: koncentrace $c_2 = 2C$, čas expozice $t_2 = T/2 \Rightarrow$ dávka $D_2 = (2C)^2(T/2) = 2C^2T$

Jelikož v druhém případě je dávka vyšší, hodnota probit funkce je též vyšší a pravděpodobnost úmrtí (individuální riziko) bude také vyšší.

Jako obecný závěr je zřejmé, že pro skupinu lidí je přijatelné pobývat na místě s nižší koncentrací dokonce po poněkud prodlouženou dobu, než zůstat na „horkém místě“ (tj. místě s vyšší hladinou koncentrace) i kratší dobu. Toto je též ponaučení pro záchranné složky, aby se vyhnuly „horkým místům“, když přemísťují obyvatelstvo na místa, kde je koncentrace již dosti nízká, i když ještě není nulová.

Příklad 9: Výběr modelu rozptylu toxického plynu

Máte odhadnout následky vyplývající ze scénáře havárie zařízení obsahujícího zkapalněný amoniak. Zajímáte se především o výpočet následků uvnitř objektu, kde se zařízení nachází (např. se potřebujete ujistit, že velín nebo další důležitá místa nebudou v rizikové oblasti). Pro rozptyl plynů nebo par nebezpečných látek můžete použít následující modely:

- Gaussův model,
- model rozptylu těžkého plynu pro plochý terén nebo
- 3-dimenzionální model pro členitý terén

Úkol: Vysvětlete jaký model rozptylu použijete pro daný případ?

Řešení pro Příklad 9:

Výběr vhodného modelu závisí na dvou parametrech: hustotě vytvořeného mraku (tj. zda je lehčí nebo těžší než vzduch) a topografií terénu.

Za běžných okolností je amoniak lehčí plyn než vzduch. Avšak pro výběr vhodného modelu rozptylu je třeba analyzovat průběh jevu takto:

Jakmile zkapalněný amoniak (bod varu – 39°C) unikne do vzduchu, bude absorbovat teplo ze vzduchu, zvyšovat svoji teplotu a vypařovat se. Po určitý časový úsek od počátku úniku se v mraku současně vyskytne kapalný i plynný amoniak. Dále se vzduch, který je ve styku s mrakem, ochladí a nějaké množství vzdušné vlhkosti (vody) zkapalní. Utvořený mrak bude obsahovat:

- amoniak v plynné fázi
- amoniak v kapalně fázi ve formě kapiček
- vzduch a
- (kapalnou) vodu ve formě kapiček.

Celá směs se chová jako plyn těžší než vzduch. Z tohoto důvodu je Gaussův model nepoužitelný. Kromě toho jde o modelování rozptylu amoniaku uvnitř objektu, kde je třeba vzít v úvahu přítomnost různých překážek a budov. Terén není tudíž plochý, a proto je nejvhodnější použít pro modelování rozptylu amoniaku 3-dimenzionální model pro členitý terén.

Příklad 10: Odhad skupinového rizika

Provedli jste odhad následků a vykalkulovali křivku podmíněného (relativního) rizika oproti vzdálenosti od zařízení s nebezpečnou chemickou látkou, která je znázorněna na níže uvedeném obrázku 20. Tato křivka není závislá na směru větru, závisí jenom na rychlosti větru, kterou předpokládáte 2 m/s.

V okruhu 2 km od zařízení s nebezpečnou látkou jsou dvě obce:

- obec A se 100 obyvateli - je umístěna ve vzdálenosti 500 m severně od zařízení,
- obec B s 300 obyvateli - je umístěna ve vzdálenosti 900 m jižně od zařízení.

Četnost větru vanoucího na sever je 10%, zatímco četnost větru vanoucího na jih je 30%.

Úkol: Vytvořte křivku skupinového rizika F- N pro zadaný příklad.

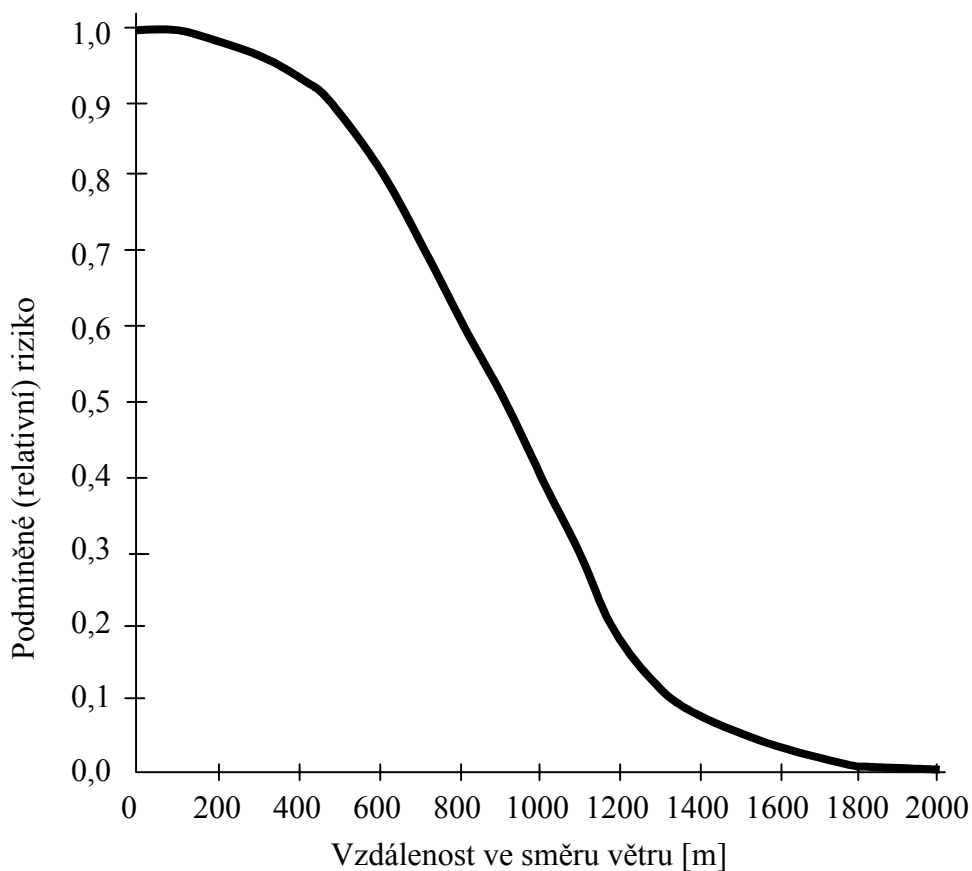
Řešení pro Příklad 10:

Analyzujeme případy, kdy se každá obec bude nacházet v nebezpečné oblasti.

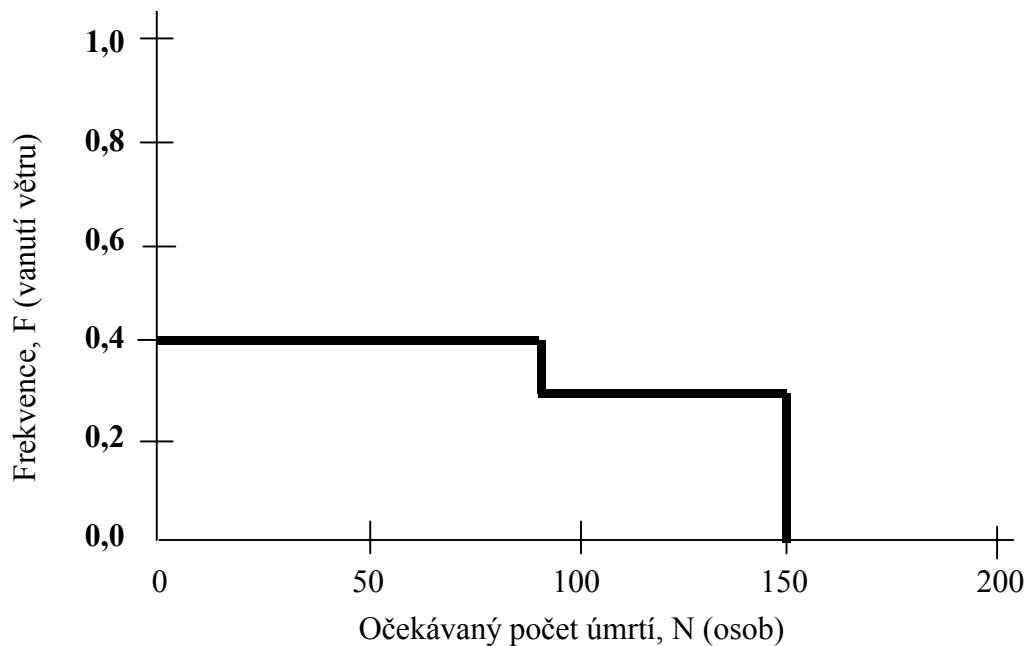
Případ A: Vítr vane k severu a obec A je v nebezpečné oblasti. Frekvence scénáře je $f_1 = 0,1$. Z křivky podmíněného (relativního) rizika v závislosti na vzdálenosti vidíme, že toto riziko ve vzdálenosti 500 m je $R_1 = 0,9$. Při zadání, že počet lidí v obci je 100, je očekávaný počet úmrtí $N_1 = 0,9 \times 100 = 90$. Výsledkem události podle tohoto scénáře je $N_1 = 90$ úmrtí s frekvencí $f_1 = 0,1$.

Případ B: Vítr vane k jihu a obec B je v nebezpečné oblasti. Frekvence scénáře: $f_2 = 0,3$. Z křivky podmíněného (relativního) rizika v závislosti na vzdálenosti vidíme, že toto riziko ve vzdálenosti 900 m je $R_2 = 0,5$. Při zadání, že počet lidí v obci je 300,

je očekávaný počet úmrtí $N_2 = 0,5 \times 300 = 150$. Výsledkem události podle tohoto scénáře je $N_2 = 150$ úmrtí s frekvencí $f_2 = 0,3$.



Obrázek 20: Podmíněné (relativní) riziko versus vzdálenost od zařízení



Obrázek 21: Křivka skupinového rizika $F-N$ pro příklad 10

Výslednou vytvořenou křivku F-N ukazuje Obrázek 21.

7.5 Frekvence události a analýza pravděpodobnosti

Příklad 11: Určování frekvence a pravděpodobnosti událostí

Mějme chladicí systém se třemi nezávislými smyčkami, každá uchladí 50% kapacity (smyčka A a B jsou v kontinuálním provozu, smyčka C jako rezerva) a každá má intenzitu poruch $\lambda=10^{-3}$ za hodinu (např. pro poruchový mód čerpadla „selže při běhu“) a $\lambda_D=10^{-1}$ na výzvu (např. pro poruchový mód čerpadla „selže při startu“). Jaká je pravděpodobnost, že v průběhu $t=48$ hodin provozní doby:

- může být 100% kapacity chladicího systému udrženo (nezávisle na tom, kterých smyček se to bude týkat),
- bude kapacita redukována na 50% vinou poruchy smyček,
- bude kapacita redukována na 0% vinou poruchy smyček?

Předpokládejme, že smyčky A a B úspěšně naběhly v čase $t=0$.

Řešení pro Příklad 11:

Zprvė musíme definovat pravděpodobnostní míry pro možné poruchové módy systému:

- pravděpodobnost pro mód „selže při běhu“ je pro smyčku A, B a C (P_A, P_B, P_C) definována pomocí nespolehlivosti $F(t)=1-e^{-\lambda t}$ (pro $\lambda=10^{-3}$ za hodinu pro každou smyčku),
- pravděpodobnost pro mód „selže při startu“ (p_C) je $\lambda_D=10^{-1}$ na výzvu.

Možné „stavy“ systému jako funkce stavů smyček mohou být například definovány použitím následujícího maticového schématu („0“ značí úplnou ztrátu funkce, „1“ značí úspěšný provoz, což znamená v případě smyček A a B žádnou poruchu při běhu a v případě smyčky C ani poruchu při startu, ani poruchu při běhu). Podle tohoto schématu můžeme psát rovnice pro pravděpodobnost 100%, 50% a 0% chladicí kapacity systému (zanedbání členů vyššího řádu při vyhodnocení „OR“-kombinace; např. použitím „aproximace pro vzácnou událost“):

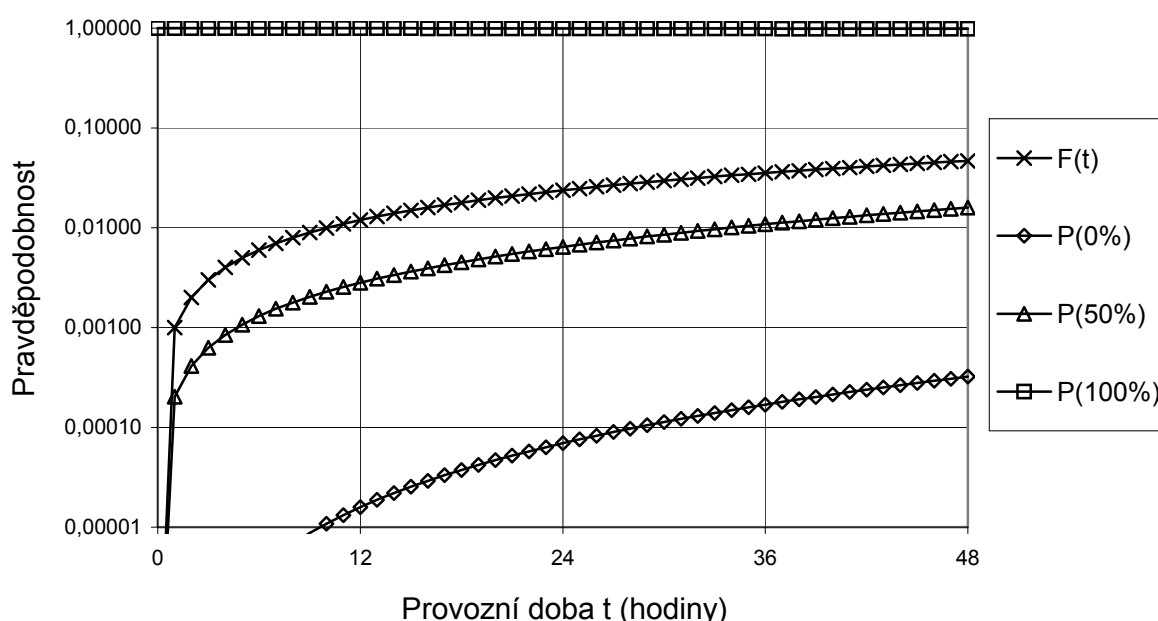
$$P(0\%)=P_AP_B(p_C+P_C)$$

$$P(50\%)=P_A(p_C+P_C)+P_AP_B+P_B(p_C+P_C)$$

$$P(100\%)=1-P(0\%)-P(50\%)=1-P_AP_B(p_C+P_C)-P_A(p_C+P_C)+P_AP_B+P_B(p_C+P_C)$$

Tabulka 42: Maticové schéma k příkladu 11

stav smyčky A	stav smyčky B	stav smyčky C	stav systému (kapacita)
0	0	0	0%
0	1	0	50%
0	0	1	50%
0	1	1	100%
1	0	0	50%
1	1	0	100%
1	0	1	100%
1	1	1	100%



Obrázek 22: Časově závislé chování pravděpodobností z příkladu 11

Jak je patrné z obrázku 22, na konci $t=48$ hodin provozní doby se pravděpodobnost, že 100% chladicí kapacity bude snížena na 0% nebo 50%, zvýšila o několik řádů, ale přesto pravděpodobnost, že 100%-ní chladicí kapacita může být udržena, zůstává relativně vysoká (0,984).

Příklad 12: Určování frekvence a pravděpodobnosti událostí

Ze specifických záznamů o poruchách bylo určeno, že elektrické motory určitého typu mají intenzitu poruch $\lambda=1,5$ poruchy za rok (stejnou hodnotu intenzity poruch uplatňují u všech motorů). Jaká je pravděpodobnost, že 5 nebo více motorů selže v určitém roce?

Řešení pro Příklad 12:

Předpoklad, že intenzita poruch pro jeden typ komponenty je stejná, znamená, že pravděpodobnost pro jednoduchou poruchu x komponent odpovídá pravděpodobnosti x poruch jedné komponenty (házení jednou mincí x -krát nebo jeden hod x mincemi představuje stejný typ náhodného experimentu).

Protože $P(x \geq 5) = 1 - P(x \leq 4)$, postačí vyhodnotit $P(x \leq 4) = \sum_{x=0}^4 P(x)$ použitím Poissonova

rozdělení $P(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$ s parametrem $\lambda = 1,5$ poruchy za rok. Výsledkem jsou:

$$P(0) = 0,22$$

$$P(1) = 0,33$$

$$P(2) = 0,25$$

$$P(3) = 0,13$$

$$P(4) = 0,05$$

Potom $P(x \leq 4) = P(0) + P(1) + P(2) + P(3) + P(4) = 0,98$ a $P(x \geq 5) = 0,02$.

Výběr Poissonova rozdělení je oprávněn pro jakýkoli systém, který je podroben náhodným přechodům z jednoho stavu s n výskyty nějaké události do jiného stavu s $(n+1)$ výskyty v procesu, který je ireverzibilní. To je splněno pro sadu komponent (např. elektrické motory v našem příkladě), u kterých se vyskytují události (např. poruchy) za určitou dobu (např. během jednoho roku).

Příklad 13: Určování frekvence a pravděpodobnosti událostí

Předpokládejme, že diskutujete se státním úředníkem o tom, zda je či není určitý průmyslový proces prováděný ve vaší továrně s určitým typem technologie „dostatečně bezpečný“. Úředník požaduje, aby ve vaší továrně byla instalována pokročilejší (a tím i dražší) technologie a tím aby se snížila pravděpodobnost selhání. Můžete úředníka přesvědčit, že dosud bylo provedeno 1000 takových provozů bez jakýchkoliv problémů. Avšak úředník argumentuje, že takové záznamy o bezpečných provozech „nezahrnují dostatečnou statistiku“ pro odvození ocenění „skutečné“ očekávané frekvence selhání. Je 1000 takových úspěšných provozů dostatečným důkazem pro provedení takového úsudku?

Řešení pro Příklad 13:

Předpokládejme, že svědectví o 1000 takových úspěšných provozech není známo, a že úředník vás požádal o hodnotu očekávané frekvence poruchové události. Vy vyjádříte stav vašich znalostí přidělením následujícího *pravděpodobnostního rozdělení (prvotního rozdělení)*:

$$P(E_{1,1}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,1} = 10^0/\text{rok}) = 0,01$$

$$P(E_{1,2}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,2} = 10^{-1}/\text{rok}) = 0,01$$

$$P(E_{1,3}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,3} = 10^{-2}/\text{rok}) = 0,01$$

$$P(E_{1,4}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,4} = 10^{-3}/\text{rok}) = 0,01$$

$$P(E_{1,5}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,5} = 10^{-4}/\text{rok}) = 0,05$$

$$P(E_{1,6}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,6} = 10^{-5}/\text{rok}) = 0,2$$

$$P(E_{1,7}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,7} = 10^{-6}/\text{rok}) = 0,25$$

$P(E_{1,8}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,8} = 10^{-7}/\text{rok}) = 0,25$

$P(E_{1,9}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,9} = 10^{-8}/\text{rok}) = 0,2$

$P(E_{1,10}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,10} = 10^{-9}/\text{rok}) = 0,01$

Jak jste přišli k tomuto prvotnímu rozdělení? – Tato konkrétní volba prvotního rozdělení by například mohla být založena na vašem předpokladu, že „skutečná“ očekávaná frekvence je „nejpravděpodobnější“ někde mezi 10^{-6} a $10^{-7}/\text{rok}$ (nejvyšší hodnoty 0,25, tj. nejpravděpodobněji se vyskytnou právě frekvence 10^{-6} a $10^{-7}/\text{rok}$) a že celé rozdělení je – v logaritmickém měřítku – docela symetrické.

Proč nepoužít jiné prvotní rozdělení? – Na tuto stále pokládanou otázku v Bayesově analýze můžete odpovědět jednoduše tím, že to vyjadřuje stupeň vašich znalostí založený na vašich celkových zkušenostech a úsudku. Kdokoli, kdo má jiný názor, by měl podat své důvody, potom byste je měli prodiskutovat a možná přijít s jiným prvotním rozdělením.

Podle našeho empirického příkladu máme: „ E_2 : 1000 výrob bez nehody“, můžeme „aktualizovat“ prvotní $P(E_{1,i})$ ($i=1, 2, \dots, 10$) použitím Bayesova teorému:

$$P(E_{1,i}|E_2) = P(E_{1,i}) \frac{P(E_2|E_{1,i})}{P(E_2)}$$

Druhý člen na pravé straně této rovnice může být vysvětlen jako „korekční faktor“, který koriguje subjektivní prvotní $P(E_{1,i})$ na základě faktu, že nyní máte empirické svědectví E_2 .

Pokud je očekávaná frekvence selhání $F_{1,i}$, pak pravděpodobnost pro E_2 (1000 instalací bez nehody) je $P(E_2|E_{1,i}) = (1 - F_{1,i})^{1000}$. Použitím rovnice

$P(E_2) = \sum_{i=1}^{10} P(E_{1,i})P(E_2|E_{1,i})$ můžeme spočítat korekční faktory a stanovit tak nové *pravděpodobnostní rozdělení (druhotné rozdělení)*, jak sumarizuje následující tabulka.

Jak je vidět z výsledků, má uplatnění E_2 malý vliv na hodnoty $E_{1,6}$ až $E_{1,10}$. Avšak zatímco E_2 snižuje pravděpodobnost $E_{1,5}$ o zhruba 6%, ostatní pravděpodobnosti $E_{1,1}$ až $E_{1,4}$ až o několik řádů.

Proto, pokud máte ve své továrně 1000 úspěšných činností, je „vysoce nepravděpodobné“, že skutečně očekávaná frekvence poruchy je $\geq 10^{-3}$ za rok. Důkazy jsou natolik pádné, že můžeme tvrdit, že „skutečná“ očekávaná frekvence bude $\leq 10^{-4}$ za rok.

Tabulka 43: Stanovení nového pravděpodobnostního rozdělení použitím Bayesovy metody (k příkladu 13)

F1,i	prvotní pravděpodobnost výskytu F1,i P(E1,i: očekáv. frekvence =F1,i)	P(E2 E1,i)	P(E1,i)*P(E2 E1,i)	korekční faktor	druhotná pravděpodobnost P(E1,i E2)
1,00E+00	0,01	0,000000	0,000000	0	0
1,00E-01	0,01	0,000000	0,000000	1,82707E-46	1,83E-48
1,00E-02	0,01	0,000043	0,000000	4,51274E-05	4,51E-07
1,00E-03	0,01	0,367695	0,003677	0,384356469	0,003844
1,00E-04	0,05	0,904833	0,045242	0,945832754	0,047292
1,00E-05	0,2	0,990050	0,198010	1,034910999	0,206982
1,00E-06	0,25	0,999000	0,249750	1,04426729	0,261067
1,00E-07	0,25	0,999900	0,249975	1,045207554	0,261302
1,00E-08	0,2	0,999990	0,199998	1,045301627	0,209060
1,00E-09	0,01	0,999999	0,010000	1,045311034	0,010453
součet=	1	P(E2)=	0,956652	součet=	1

Je zajímavé podívat se na účinek použití jiných, „více pochybných“ prvotních pravděpodobností. Předpokládejme relativně jednotné rozdělení prvotních pravděpodobností, např.

$P(E_{1,1}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,1} = 10^0/\text{rok}) = 0,05$
 $P(E_{1,2}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,2} = 10^{-1}/\text{rok}) = 0,05$
 $P(E_{1,3}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,3} = 10^{-2}/\text{rok}) = 0,10$
 $P(E_{1,4}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,4} = 10^{-3}/\text{rok}) = 0,15$
 $P(E_{1,5}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,5} = 10^{-4}/\text{rok}) = 0,15$
 $P(E_{1,6}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,6} = 10^{-5}/\text{rok}) = 0,15$
 $P(E_{1,7}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,7} = 10^{-6}/\text{rok}) = 0,15$
 $P(E_{1,8}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,8} = 10^{-7}/\text{rok}) = 0,10$
 $P(E_{1,9}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,9} = 10^{-8}/\text{rok}) = 0,05$
 $P(E_{1,10}: \text{očekávaná frekvence} = F_{1,10} = 10^{-9}/\text{rok}) = 0,05,$

jejichž výsledkem po uplatnění Bayesovského přístupu jsou:

$P(E_{1,1} | E_2) << 0,01$
 $P(E_{1,2} | E_2) << 0,01$
 $P(E_{1,3} | E_2) << 0,01$
 $P(E_{1,4} | E_2) = 0,080$
 $P(E_{1,5} | E_2) = 0,197$
 $P(E_{1,6} | E_2) = 0,215$
 $P(E_{1,7} | E_2) = 0,217$
 $P(E_{1,8} | E_2) = 0,145$
 $P(E_{1,9} | E_2) = 0,073$
 $P(E_{1,10} | E_2) = 0,073$

E_2 opět snižuje pravděpodobnosti $P(E_{1,1} | E_2)$ až $P(E_{1,4} | E_2)$ o několik řádů. A nyní si znovu dovolíme tvrdit: důkazy jsou natolik pádne, že „skutečná“ očekávaná frekvence bude $\leq 10^{-4}/\text{rok}$.

Příklad 14: Určování frekvence a pravděpodobnosti událostí

Předpokládejme, že zkušený opravář (váš „expert“) vám řekl, že má za to, že hodnota MTTR pro určitou komponentu při určitém poruchovém módu je „někde mezi 5 a 15 hodinami“. Jaká hodnota „může být nejpravděpodobněji očekávána“ a může být použita ve vašich QRA modelech?

Řešení pro Příklad 14:

Na první pohled by mohl být „samozřejmý“ aritmetický průměr, tj. 10 hodin, takže „porucha je na obě strany vyvážená“. Avšak mohli byste také „z dobrých důvodů“ vybrat hodnotu takovým způsobem, že maximální porucha na obě strany je stejná:

$$\frac{MTTR - 5}{5} = \frac{15 - MTTR}{15},$$

což vede k MTTR=7,5 hodin.

K otestování skutečnosti, jak moc je interpretace „může být nejpravděpodobněji očekávána“ za těchto podmínek citlivá, použijme extrémnější příklad: Jaká by byla „nejpravděpodobněji očekávaná“ hodnota MTTR, pokud pouze víme, že „skutečná“ hodnota MTTR leží mezi 1 a 100 hodinami? V tomto případě vede výše uvedený postup k hodnotě blízké 2 (MTTR=1,98) a aritmetický průměr k MTTR=50,5. Může se předpokládat, že pouze několik lidí bude skutečně věřit, že 1,98 je „rozumné“ vyhodnocení čísla, o kterém pouze víme, že se nachází v rozmezí 1 až 100.

Odpověď na tuto otázku je taková, že za výše daných podmínek neexistuje „nejpravděpodobněji očekávaná“ hodnota! Pokud nemáme doplňující informace, pak žádné číslo z daného intervalu není „dostatečně dobré“. Pro účely QRA to znamená, že by se muselo předpokládat stejné rozdělení pro MTTR s hustotou pravděpodobnosti

$$f(MTTR') = \frac{1}{b-a} I_{[b-a]}(MTTR'),$$

kde a je minimální „věrohodná“ hodnota (např. 5 hodin)

b je maximální „věrohodná“ hodnota (např. 15 hodin) a

$$I_{[b-a]}(MTTR') \text{ je indikační funkce } I(x)_A = \begin{cases} 1 & \text{pro } x \in A \\ 0 & \text{pro } x \notin A \end{cases},$$

a adekvátně vyhodnotit pravděpodobnostní modely. To podtrhuje důležitost analýzy neurčitostí v QRA.

7.6 Integrace rizika a rozhodování

Příklad 15: Kvalitativní vyhodnocení rizika a použití matice rizika

Tým hodnotící riziko vzal v úvahu výběr nebezpečí v provozech chemické výroby a vyhodnotil frekvenci a závažnost následků následujícím způsobem (Tabulka 44):

Tabulka 44: Vyhodnocení frekvence a závažnosti následků chemické výroby

Typ (druh) nebezpečí	Frekvence (za rok)	Následky (kvalitativní)
1. Rozsáhlý únik chlóru z železniční cisterny	0,0001	katastrofické
2. Velký iniciovaný únik (výbuch) LPG z potrubí	0,02	rozsáhlé
3. Rozsáhlý tryskový požár	0,00015	velmi vážné
4. Požár kaluže	0,007	vážné
5. Malý tryskový požár	0,002	vážné
6. Malý iniciovaný únik (výbuch) LPG z čerpadla	0,1	velmi vážné
7. Neovladatelná reakce	0,001	rozsáhlé
8. Výbuch pece	0,008	velmi vážné

Úkol a): Vyneste těchto osm rizik do níže uvedené matice rizika.

Kategorie frekvencí	Kategorie závažnosti následků				
	5	4	3	2	1
A					
B					
C					
D					
E					

Odhad rizika se provede uplatněním níže uvedených kategorií frekvencí a následků.

Kategorie frekvencí:

Kategorie závažnosti (frekvencí)	Kvalitativní definice	Kvantitativní definice (za rok)
A	pravděpodobná (napřesrok)	0,3 až 3
B	málo pravděpodobná	0,03 až 0,3
C	nepravděpodobná	0,003 až 0,03
D	velmi nepravděpodobná	0,0003 až 0,003
E	velmi vysoce nepravděpodobná	0,00003 až 0,0003

Kategorie následků:

Kategorie závažnosti (následků)	Kvalitativní definice	Kvantitativní definice (za rok)
1	katastrofické	četná úmrtí
2	rozsáhlé	jedno úmrtí, četná zranění
3	velmi vážné	zranění s trvalými následky
4	vážné	vážná zranění plně vyléčitelná
5	malé	lehká zranění, krátká absence v zaměstnání

Úkol b): Představuje další pokračování provozu takového zařízení nepřijatelné riziko?

Úkol c): Vytvořte seznam rizik podle priority pro plánování akcí sloužících ke zvýšení bezpečnosti provozu.

Druhý podnik má deset zdrojů rizika vyhodnocených v kategorii D3, dva zdroje rizika v kategorii D1 a po jednom zdroji rizika v kategoriích E1, E3, C4, D4, D2 (celkem 17 zdrojů rizika).

Úkol d): Můžete říci, že tento druhý podnik představuje celkově větší riziko při porovnání s prvním podnikem?

Řešení pro Příklad 15:

Ad a): Vyneseme rizika osmi zdrojů rizika prvního podniku do matice následovně:

riziko č. 1 vyneseme do pole E1, č. 2 do C2, č. 3 do E3, č. 4 do C4, č. 5 do D4, č. 6 do B3, č. 7 do D2 a č. 8 do C3.

Tabulka 45: Rizika osmi zdrojů v matici rizika

Kategorie frekvencí	Kategorie závažnosti následků				
	5	4	3	2	1
A					
B			Riziko č. 6		
C		Riziko č. 4	Riziko č. 8	Riziko č. 2	
D		Riziko č. 5		Riziko č. 7	
E			Riziko č. 3		Riziko č. 1

Ad b): Představuje další činnost zařízení nepřijatelné riziko?

Riziko není nepřijatelné, protože žádné ze sledovaných rizik neleží v oblasti nejtmaší plochy vpravo nahoře.

Ad c): Seznam rizik pro pořadí plánu akcí ke zvýšení bezpečnosti provozu je následující:

Priorita v pořadí rizik:

- 6, 2
- 8, 7, 1
- 4
- 5, 3

Ad d): Nejprve vyneseme zadaná rizika do matice rizik.

Tabulka 46: Srovnání rizik dvou podniků pomocí matice rizik

Kategorie frekvencí	Kategorie závažnosti následků				
	5	4	3	2	1
A					
B			B3		
C		C4	10×C3		
D		D4		D2	2×D1
E			E3		E1

Potom provedeme srovnání, přičemž pro druhý podnik platí:

1. Jednotlivá rizika E1, E3, C4, D4 a D2 jsou stejná jako rizika v prvním závodě.
2. Deset rizik typu C3 je ekvivalentní jednomu riziku B3, protože frekvence podobných událostí se sčítají. Faktor 10 posunuje kategorii frekvence o jeden stupeň výše. Tudíž těchto 10 rizik se rovná jednomu riziku B3 v prvním podniku.
3. Dvě rizika kategorie D1 leží na té stejné úhlopříčce jako rizika B3 a C2 prvního podniku, která sousedí s „nepřijatelnou“ oblastí rizika, takže mohou být považována za rovnocenná rizika.
4. Tedy oba podniky mohou být celkově považovány za podniky se srovnatelným celkovým rizikem.

Shrnutí a ponaučení pro Příklad 15:

Je těžké porovnat rizika pouze použitím matice rizika a také je obtížné odhadnout celkové riziko způsobené několika zdroji rizika. Kvantitativní analýza může odhalit důležité rozdíly, které nejsou prokazatelné při kvalitativním přístupu.

Příklad 16: Profil rizika

Předpokládejme, že studie analýzy rizika chemických zařízení již byla v podniku provedena. Výsledky studie shrnuje

Tabulka 47.

Tabulka 47: Profil rizika chemických zařízení podniku

Nebezpečí	Vlastnosti			Frekvence	Následky	Riziko
	Chemická látka	Zařízení	Velikost otvoru			
1. Únik a požár	LPG	Sklad	malá	0,00001	1	
2. Únik a požár	LPG	Čerpadlo	malá	0,0001	1	
3. BLEVE	LPG	Sklad	zlom	0,00001	10	
4. BLEVE	LPG	Silniční cisterna	zlom	0,0001	10	
5. Exploze	LPG	Potrubí	střední	0,00001	20	

Nebezpečí	Vlastnosti			Frekvence	Následky	Riziko
	Chemická látka	Zařízení	Velikost otvoru			
6. Únik a požár	LPG	Potrubí	velká	0,000001	30	
7. Únik a požár	LPG	Potrubí	střední	0,00001	10	
8. Toxický plyn	Amoniak	Sklad	malá	0,00001	5	
9. Toxický plyn	Amoniak	Potrubí	malá	0,0001	5	
10. Toxický plyn	Amoniak	Silniční cisterna	střední	0,0001	20	
11. Toxický plyn	Amoniak	Sklad	zlom	0,000001	100	
12. Toxický plyn	Amoniak	Potrubí	střední	0,00001	30	

Úkoly:

Vyplňte hodnoty rizika v prázdném posledním sloupci, který uvádí

1. *Tabulka 47.* Poznámka: Následky se vztahují k počtu smrtelných úrazů (úmrtí).
2. Použijte pracovní formulář (Tabulka 48) k výpočtu úrovně rizika spojeného s každou nebezpečnou vlastností.
3. Která chemikálie představuje největší riziko?
4. Která velikost otvoru způsobuje největší riziko?
5. Který jednotlivý prvek v rámci úplného profilu rizika představuje největší riziko?

Řešení pro Příklad 16:

Ad 1) Poslední sloupec z tabulky 47 vyplníme výsledky násobení hodnot z kolonek Frekvence a Následky. Výsledky obsahuje následující tabulka.

Nebezpečí	Riziko	Nebezpečí	Riziko
1. Únik a požár	0,00001	7. Únik a požár	0,0001
2. Únik a požár	0,0001	8. Toxický plyn	0,00005
3. BLEVE	0,0001	9. Toxický plyn	0,0005
4. BLEVE	0,001	10. Toxický plyn	0,002
5. Exploze	0,0002	11. Toxický plyn	0,0001
6. Únik a požár	0,00003	12. Toxický plyn	0,0003

Tabulka 48: Pracovní formulář k výpočtu úrovně rizika spojeného s každou nebezpečnou vlastností

Nebezpečí	Riziko	Materiál		Zařízení				Velikost otvoru			
		LPG	Amoniak	Sklad	Čerpadlo	Silniční cisterna	Potrubí	malá	střední	velká	zlom
1. Únik a požár											
2. Únik a požár											
3. BLEVE											
4. BLEVE											
5. Exploze											
6. Únik a požár											
7. Únik a požár											
8. Toxický plyn											
9. Toxický plyn											
10. Toxický plyn											
11. Toxický plyn											
12. Toxický plyn											
CELKEM:											

Tabulka 49: Vyplněný pracovní formulář k výpočtu úrovně rizika spojeného s každou nebezpečnou vlastností

Nebezpečí	Riziko	Materiál		Zařízení				Velikost otvoru			
		LPG	Amoniak	Sklad	Čerpadlo	Silniční cisterna	Potrubí	malá	střední	velká	zlom
1. Únik a požár	0,00001	0,00001		0,00001				0,00001			
2. Únik a požár	0,0001	0,0001			0,0001			0,0001			
3. BLEVE	0,0001	0,0001		0,0001							0,0001
4. BLEVE	0,001	0,001				0,001					0,001
5. Exploze	0,0002	0,0002					0,0002		0,0002		
6. Únik a požár	0,00003	0,00003					0,00003			0,00003	
7. Únik a požár	0,0001	0,0001					0,0001		0,0001		
8. Toxický plyn	0,00005		0,00005	0,00005				0,00005			
9. Toxický plyn	0,0005		0,0005				0,0005	0,0005			
10. Toxický plyn	0,002		0,002			0,002			0,002		
11. Toxický plyn	0,0001		0,0001	0,0001							0,0001
12. Toxický plyn	0,0003		0,0003				0,0003		0,0003		
CELKEM:	0,00449	0,00154	0,00295	0,00026	0,0001	0,003	0,00113	0,00066	0,0026	0,00003	0,0012

Ad 2) Použijeme pracovní formulář, který znázorňuje Tabulka 48 ke kalkulaci úrovně rizika spojeného s každou vlastností nebezpečí (viz *Vyplněný pracovní formulář k výpočtu úrovně rizika spojeného s každou nebezpečnou vlastností*, který znázorňuje Tabulka 49).

Ad 3) Chemikálie představující největší riziko je **amoniak** (cca 66% - viz stínované pole v tabulce 49).

Ad 4) Velikost otvoru způsobující největší riziko je **střední velikost** (cca 58% - viz stínované pole v tabulce 49).

Ad 5) Zkoumáte-li poslední řadu čísel v pracovním formuláři čís. 2, zjistíte, že silniční cisterny jsou spojeny s totálním rizikem okolo 67% - viz stínované pole v tabulce 49. Žádná další vybraná vlastnost nedosahuje tak vysokého procenta. Také amoniak se blíží stejnému číslu (cca 66%). Proto odpověď na otázku: „Který jednotlivý prvek v rámci úplného profilu rizika představuje největší riziko“, zní:

„Silniční cisterny (zejména silniční cisterny s amoniakem)“.

Shrnutí a ponaučení pro Příklad 16:

Profil rizika ve své podstatě dovoluje identifikovat hlavní přispěvatele k celkovému riziku. Protože riziko je funkce frekvence událostí a závažnosti následků, hlavní přispěvatelé nejsou nutně jen zdroje nebezpečí s největšími odhady následků. Aby se našlo, co skutečně dominuje v celkovém riziku, je nutné vyzkoušet mnoho rozdílných vlastností profilu rizika.

7.7 Systémy řízení bezpečnosti a bezpečnostní zprávy

Příklad 14: Role bezpečnostní zprávy při rozvoji podnikání.

Příklad 17: Role bezpečnostní zprávy při rozvoji podnikání

Úvod

Propan je palivo široce používané v západní Evropě v obytném, obchodním a dopravním sektoru (65%) a méně v průmyslovém sektoru (30%). Účinnost propanu jako paliva je vysoká ve srovnání s jinými tradičními palivy a má podstatný přínos pro životní prostředí, zvláště když je užíván konečným uživatelem přímo bez přeměny na elektrickou energii. Západní Evropa je jedním z hlavních světových trhů, kde spotřeba činí přibližně 8 milionů tun ročně, ale prodej propanu vykazuje v posledních deseti letech celosvětově mírný růst.

Nedávná studie jeho trhu a cen ukazuje, že dostupnost propanu bude pokračovat a bude převyšovat tradiční poptávku primárního použití v západní Evropě až do roku 2010. Z tohoto nadbytku bude roční podíl pro region okolo Středozemního moře představovat cca 4 milionů tun.

Výklad problému

Nadnárodní společnost má rozhodující ekonomickou sílu v provozování množství rafinerií, situovaných v blízkosti přístavů na Sicílii, v Řecku a v středozemních oblastech Španělska a Francie. Všechny tyto rafinerie vyrábějí různá paliva, mezi kterými je propan. Velká množství produkce jsou uskladněna ve velkých skladovacích zásobnících na stanovištích výhodně situovaných poblíž hlavních výrobních jednotek.

Všechny podniky mají vyhotoveny bezpečnostní zprávy, pojednávající též o jejich skladech, zhodnocené příslušnými národními orgány státní správy od té doby, co jsou předmětem působnosti „směrnice Seveso“. Nová „směrnice Seveso II“ vešla v platnost po implementaci do národní legislativy (v členských státech EU nejpozději do 3. února 1999). Mezi novými požadavky Směrnice je zavedení systému řízení bezpečnosti (Safety Management System – SMS) v podnicích, který by měl být dokumentován jako doplňující informace v jejich bezpečnostních zprávách.

Průměrná produkce propanu společností ze všech jejích rafinerií je 500 000 t/rok, daná rozsahem produkce ostatních hlavních výrobků. Vrcholový management je konfrontován s předpovědí přebytku propanu ve středozemní oblasti a uvažuje několik alternativ pro minimalizaci předvídaných ztrát zisku zapříčiněných intenzivním tlakem na ceny. Nejpravděpodobnější směry vývoje jsou diskutovány v následujících třech alternativách:

1. Společnost bude řídit trh prostřednictvím dlouhodobého prodeje (nejméně 10 let) a nabízet celkovou výrobu propanu v jejích rafineriích za cenu 150 \$/t. V tomto případě ztráta odhadnutá společností pro období končící v roce 2010 nebude větší než průměrně 10 \$/t za rok. Podniky produkující energii na některých středomořských ostrovech (cca 1 milion obyvatel), provozované jednou elektrárenskou společností, používají k pohonu generátorů propanu. Je vysoce pravděpodobné, že elektrárenská společnost využije výhody takového dlouhodobě cenově příznivého prodeje. I když v takových kontraktech existuje podmínka, že by mělo být odebráno ročně minimálně množství 500 000 t propanu pro pokrytí všech požadavků na palivo a aby tudíž byla pokryta celková produkce rafinérií. Byly odhadnuty krajní energetické požadavky na těchto ostrovech a to, že nebudou menší než 350 MW (vzrůst 50%). Rozšíření energetických závodů bude ukončeno do r. 2000. Výdaje na spotřebu energie uživatelů v průmyslu, které nejsou vyšší než 5% celkových výdajů, budou redukovány o 20%; místní uživatelé (usedlíci a obchodníci) budou projekt podporovat. Protože je v létě turistická sezóna, pak na těchto ostrovech je letní odběrová špička dobře vyrovnána zimní odběrovou křivkou.
2. Společnost bude zachovávat běžnou politiku prodeje (obchod jako takový) s využitím vrcholových cen během zimního odběrového vrcholu jako na pevnině ve středozemní oblasti. Toto bude vyžadovat, aby společnost podržela svůj přebytek propanu ve skladu a tudíž se rozšiřuje dostupné skladování propanu stavbou nového tankoviště se zásobníky pro uskladnění špiček. Zásobníky a celá projektovaná instalace jsou stejné jako ty dosavadní, které pracují v rafinériích; kapacita nových zásobníků je odhadnuta celkem na 1 milion tun, aby absorbovala několikaletý přebytek produkce propanu v rafinériích.

Analýza využitelnosti nákladů poukazuje na vhodné umístění nového zařízení poblíž přístavu v jižní Itálii. Námořní přepravci, kteří již operují v oblasti Středozemního moře, mohou přepravovat propan z rafinérií do nového tankoviště společnosti. Tento projekt předpokládá zprovoznění tankoviště do poloviny r. 1998, s odhadovanými náklady na výstavbu 75 milionů \$ a celkovými provozními náklady 0,5 milionů \$ za rok. Výstavba bude vysoce subvencovaná (40%) veřejným kapitálem, protože se očekává, že poskytne ekonomické posílení místních přidružených činností a tím přispěje k úsilí snížit vysokou nezaměstnanost v oblasti.

3. Společnost bude dodávat propan novým zákazníkům, které v tomto případě představují místní plynárenské rozvodné potrubní sítě. Tyto sítě by měly být dále rozšířeny, dříve než budou schopny absorbovat celkový nadbytek propanu, ale takové rozšiřující projekty již byly iniciovány místními distribučními společnostmi. Uvedení nových odboček potrubní sítě do provozu se předpokládá před polovinou r.1998. Tato alternativa bude požadovat, aby propan byl přepravován jako lodní náklad hustou sítí námořních cest, s častým nakládáním a/nebo vykládáním v přístavech, intenzivní operace na terminálech, zvýšenou silniční a železniční přepravu. Dodávky propanu do vybraných sítí budou vyžadovat, aby společnost koupila přiměřeně velká plavidla a postavila středně velké koncové tankoviště blízko u zákaznickova přívodu; celkové náklady na tento účel jsou odhadovány na minimálně 50 milionů \$. Místní obce (potenciální uživatelé) vyjádřily takovému projektu svůj nesouhlas, protože intenzivní přeprava nebezpečných látek v jejich oblasti zvýší pravděpodobnost závažné havárie s katastrofickými následky. Také přispívá větším rizikem k již vysokým rizikům přepravy nebezpečných látek v těchto oblastech. Veřejnost si však neuvědomuje, že nová technologie, aplikovaná při konstrukci produktovodů, vykazala nápadné výsledky v prevenci úniku a/nebo detekci plynu, a tak bylo významně sníženo riziko katastrofického selhání potrubí.

Objasnění

Všechny tři alternativy jsou uvažovány ve společnosti jako hlavní investiční záměry, také orgány státní správy je uvažují jako hlavní energetické plány pro období 2000 – 2010. Budou diskutovány mezi managementem společnosti a výborem, reprezentujícím orgány státní správy dotčených regionů. Státní správa bude prezentovat veřejný zájem a bude také uvažovat náklady důležité pro životní prostředí. Všechny výhledy zahrnují vysoká rizika, neboť jsou skladovány a přepravovány nebezpečné látky. Jak zástupci společnosti, tak i členové výboru, by si měli připravit své priority pro porovnání s dostupnými informacemi v bezpečnostních zprávách rafinérií:

- v *prvním případě* nejsou plánována žádná nová zařízení, protože bude použita již existující infrastruktura pro dopravu propanu;
- v *druhém případě* nový podnik musí získat povolení k provozu po doložení nové skutečnosti v kompletní bezpečnostní zprávě, že pro všechna identifikovaná nebezpečí přijímá adekvátní preventivní opatření;
- v *třetím případě* bude úplná bezpečnostní zpráva požadována pouze pro nové terminály a ne pro rozšíření potrubních sítí.

Všechny údaje a umístění použité v tomto cvičení jsou fiktivní, ale náležitá péče byla věnována uvedení reálných čísel, představujících skutečné technicko-ekonomické podmínky, aby tak nebyla porušena rovnováha v relativní důležitosti problémů vybraných z reálných situací.

Úkol 1.: Budou informace obsažené v bezpečnostních zprávách rafinérií užitečné pro diskusi mezi managementem společnosti a orgány státní správy? Pro které alternativy zejména?

Úkol 2.: Bude vyžadována zpráva o systému řízení bezpečnosti (SMS) stanoviště a/nebo společnosti pro vyhotovení nové bezpečnostní zprávy nového zařízení a proč?

Úkol 3.: Kvalitativně seřadte a prodiskutujte všechny tři alternativy a udělejte seznam vašich kritérií.

Řešení pro Příklad 17:

1. Ad 1): Ano, protože se očekává, že bezpečnostní zprávy rafinérií budou obsahovat údaje vztažené na nebezpečí zahrnutá v aktivitách podobných těm plánovaným. Zvláště nové tankoviště v druhém případě je plánováno stejné, jako ta, která jsou již v provozu v rafinériích; navíc, zásobníky na terminálu v třetím případě jsou zařízení velmi podobná skladovacím zařízením již existujícím v rafinériích a bezpečnostní zprávy by měly normálně zahrnovat všechny údaje vztažené k bezpečnosti operací v takových zařízeních.
2. Ad 2): Ne, protože se očekává, že všechna nová zařízení (ve druhém a třetím případě) byla kompletovaná a připravená pro posouzení před koncem roku 1998, zatímco nové požadavky na systém řízení bezpečnosti (SMS) "Sevesa II" vstoupily v platnost po implementaci do národních legislativ (tj. po 3. 2. 1999).
3. Ad 3): Kvalitativní seřazení alternativních řešení může měnit v závislosti na kritériích dohlížitelů, kteří jim mohou určit různou relativní váhu. V každém případě ale mohou být úvahy založeny na jistých faktech, vycházejících z dostupných údajů, jako je:
 - perioda zájmu (zde 10 let: 2000 – 2010), a proto všechny výpočty jsou dělány pro tento časový horizont;
 - náklady (ceny) uvažované ve všech třech řešeních jsou pro společnost stejné v soulase se zadanými údaji:
 - řešení 1: $10 \text{ let} \times 500\,000 \text{ t/r} \times 10 \text{ \$/t} = 50 \text{ milionů \$}$
 - řešení 2: $\text{konstrukce a provoz: } 75\,000\,000 \times 60\% + 500\,000 \times 10 \text{ let} = 50 \text{ milionů \$}$
 - řešení 3: $\text{lodě a terminály} = 50 \text{ milionů \$}$
 - Úspory v průmyslovém sektoru v prvním řešení: $20\% \times (5\% \times 1050 \text{ MW}) \times (0,5 \text{ Mt za rok} / 1050 \text{ MW}) \times 150 \text{ \$ / t} = 0,75 \text{ milionů \$ za rok}$

Uvážíme-li:

- stejné náklady zahrnuté ve všech řešeních,

- vysoký příspěvek kombinovaný s faktorem nezaměstnanosti v řešení 2,
- dlouhou životnost nové potrubní infrastruktury proti veřejnému odporu v řešení 3,
- a absenci nového rozvoje (společnosti i oblasti) v rámci řešení 1 a relativně nízké úspory průmyslníků,

pak možný výsledek kvalitativního seřazení řešení je : 2 – 3 – 1.

Ohledy na životní prostředí mohou podporovat řešení 3 a 2, protože v prvním případě palivo není konvertováno na elektrickou energii a v druhém případě je palivo skladováno a tudíž není použito. Avšak bezpečnostní požadavky by spíše podporovaly projekty s nejnižšími riziky, např. řešení 1. Další zpracování kvalitativních údajů na úrovni možných nebezpečí, výnosy z investic, časový faktor, veřejné priority, atd. mohou vyvolat různé srovnávací kombinace.

7.8 Územní plánování

Příklad 18: Porovnání různých přístupů přijatelnosti rizika

Závod je umístěn poblíž hranic země A se zemí B. Závod je na území země A, avšak vzdálenost od hranic se zemí B je velmi malá. V zemi A byl přijat přístup orientovaný na riziko, zatímco země B se řídí přístupem orientovaným na následky.

Úkol: Vidíte nějaký rozpor v této situaci, pokud se týká otázek územního plánování? Zdůvodněte svoji odpověď.

Řešení pro Příklad 18:

Pro demonstraci možných rozporů předpokládejme při hranicích obou zemí dvě malé obce OA a OB, příslušející do zemí A, resp. B.

Jelikož závod je umístěn na pozemcích země A, měl by být použit přístup orientovaný na riziko pro jeho umístění a povolení jeho provozu. Podle principů metody poblíž hranic (tj. v obci OA) je riziko pravděpodobně přijatelné, i když není nulové. To znamená, že zde mohou existovat některé scénáře událostí se značnými následky, jejichž frekvence jsou ale velmi nízké a tudíž vedou k úrovním přijatelného rizika. Pro obec OB by byly následky prakticky tytéž, avšak nepřijatelné pro zemi B, která se řídí přístupem orientovaným na následky. Jsme tudíž postaveni před situací, kdy dvě sousední obce považují totéž nebezpečí za přijatelné, resp. nepřijatelné. Jinými slovy, plánování výstavby obytných domků v obci OA by bylo považováno za přijatelné, zatímco v obci OB by bylo považováno za nepřijatelné. To určitě představuje rozpor.

Pro řešení takovýchto rozporů mezi zeměmi, vyvstávajících z rozdílných nástrojů řízení a praxe, byla vydána Úmluva o přeshraničních účincích závažných havárií (UN/ECE) podepsaná mnoha zeměmi OSN.

Příklad 19: Řešení problematiky jednorázových aktivit

Ačkoli oblast působnosti 'Směrnice Seveso' je omezena pouze na stabilní zařízení, podobné pojmy a přístupy jsou aplikovatelné na přepravu nebezpečných látek. Předpokládejte, že pracovník územního plánování je postaven před situaci, kdy má urychleně učinit rozhodnutí o svolení průjezdu vlaku s nebezpečným nákladem poblíž území výstavby. Z důvodu nedostatku zkušenosti s podobnými přístupy, pracovník územního plánování rozhodne vyřešit problém, jako kdyby to byl problém územního plánování, tj. jako kdyby dal svolení k provozu stabilního zařízení lokalizovaného v místě, kde se železnice nejvíce přibližuje obytným domům. Avšak žádná bezpečnostní zpráva nebyla předložena a výsledky kvantitativního odhadu rizika a analýzy následků nejsou dostupné.

Úkol: Na jakém základě by měl učinit rozhodnutí?

- užitím 'generických' vzdáleností (tj. vytvořených bez přesných pravidel)?
- aplikováním přístupu orientovaného na následky?
- aplikováním přístupu orientovaného na riziko?

Řešení pro Příklad 19:

Pro použití přístupu orientovaného na riziko by měl mít pracovník územního plánování řadu informací o profilu rizika, tj. úroveň rizika pro každý bod podél vlaku za předpokladu, že se vlak nepohybuje. K tomu je nezbytné provést kvantitativní odhad rizika nebo přinejmenším mít k dispozici dosti informací o frekvenci a následcích scénářů různých událostí. Podobně je pro užití přístupu orientovaného na následky požadována analýza následků. Jelikož nejsou dostupné ani QRA, ani odhad následků – a tudíž pracovník územního plánování nemůže jednoduše použít jejich výsledky – měl by užít 'generické' vzdálenosti. To obvykle závisí na povaze přepravované látky a na jejím množství, tj. parametrech, které jsou v tomto případě známy.

Příklad 20: Dopad změny kritérií přijatelnosti rizika na průběh povolené výstavby

Mezinárodní hotelová společnost plánuje výstavbu velkého hotelu v blízkosti závodu zpracovávajícího nebezpečné látky. Země, kde se hotel staví, se řídí přístupem pro vyhodnocení rizika a územní plánování obvyklým ve Spojeném království. Společnosti se právě podařilo dosáhnout písemného souhlasu (tj. stavba hotelu je povolena) a stavební práce začínají. Avšak vláda země náhle rozhodne o změně postupu týkajícího se rozhodnutí při územním plánování ve prospěch holandského přístupu. Následně je třeba případ výstavby hotelu přešetřit.

Úkol: Za okolností, kdy se nebudou provádět žádné dodatečné výpočty rizika, domníváte se, že je pravděpodobné, že se rozhodnutí změní?

Jestliže úřad provádějící šetření požaduje dodatečná data, která to podle vašeho mínění budou?

Řešení pro Příklad 20:

Zprv musí být poznamenáno, že oba přístupy jsou založeny na riziku. Podle následující tabulky 50, aby hotel získal stavební povolení, měl by být buď ve vnější

zóně (úroveň rizika mezi 3×10^{-7} a 10^{-6}), nebo ve střední zóně (úroveň rizika mezi 10^{-6} a 10^{-5}), ale nesměl by přestoupit 75 osob. Za předpokladu, že termín „velký hotel“ pravděpodobně znamená více než 100 ubytovaných a za okolností, že hotel v našem příkladu získal stavební povolení, uzavíráme, že by měl být umístěn ve vnější zóně, tj. že úroveň rizika je mezi 3×10^{-7} až 10^{-6} . Jelikož individuální riziko nepřesahuje úroveň 10^{-6} , což je kritérium holandského přístupu, je velmi pravděpodobné, že hotel opět získá stavební povolení.

Tabulka 50: Zásady HSE pro umístění uvnitř konzultačních zón

Kategorie rozvoje	Vnitřní zóna Individuální riziko přesahuje 10^{-5}	Střední zóna Individuální riziko přesahuje 10^{-6}	Vnější zóna Individuální riziko přesahuje 3×10^{-7}
Ubytovací (domy, hotely, rekreace)	Rozvoj se nedoporučuje (>25 lidí)	Nezbytné speciální vyhodnocení (jestliže >75 lidí, rozvoj se nedoporučuje)	Povolený rozvoj

Druhé kritérium holandského přístupu se týká skupinového rizika. Aby bylo získáno povolení pro hotel, vypočítané sociální riziko by mělo být pod hodnotou kritéria pro F–N křivku (viz tabulku 51). Výpočty skupinového rizika vyžadují jako vstup *hustotu zalidnění v okolí závodu* a rovněž tak *přesný počet osob přítomných v hotelu* (a denní změny), aby bylo možno vypočítat počet úmrtí spojených s každým scénářem události.

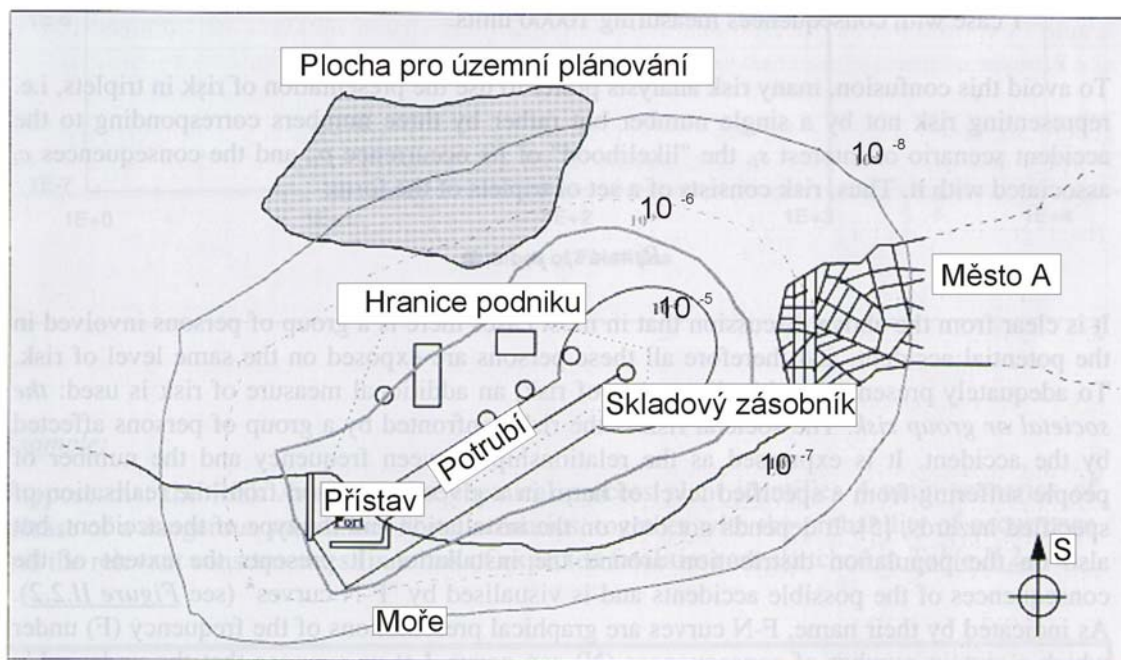
Tabulka 51: Minulá a současná holandská kritéria přijatelnosti rizika

	Kritéria individuálního rizika		Kritéria skupinového rizika	
	Současné:	Předchozí:	Současné:	Předchozí:
Existující zařízení	10^{-5} /rok	10^{-5} /rok	$10^{-3}/N^2$	$10^{-1}/N^2$
Nové zařízení	10^{-6} /rok	10^{-6} /rok	$10^{-3}/N^2$	$10^{-3}/N^2$
Zanedbatelné riziko	Vždy použít ALARA	10^{-8} /rok	Vždy použít ALARA	$10^{-5}/N^2$

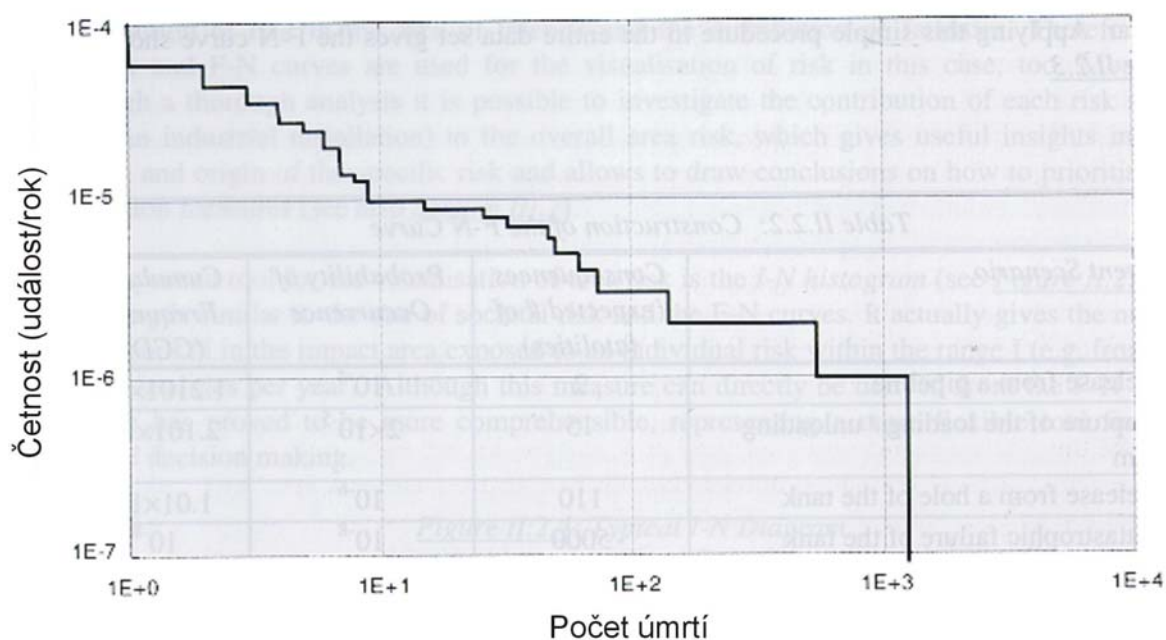
ALARA = As Low As Reasonably Achievable – tak nízká, jak rozumně dosažitelná

Poznámka: Mělo by být zdůrazněno, že toto srovnání je teoretické a usiluje o zlepšení pochopení přístupů k územním plánování, která se používají v těchto dvou zemích. Existuje však jiný důležitý rozdíl, a to fakt, že holandský přístup je založen na uvažování rizika úmrtí, zatímco ve Spojeném království je uvažované riziko rizikem obdržení nebezpečné nebo vyšší dávky. V některých případech výsledky vyplývající z těchto dvou definic mohou být srovnávány, ale obecně tyto dvě definice srovnatelné nejsou.

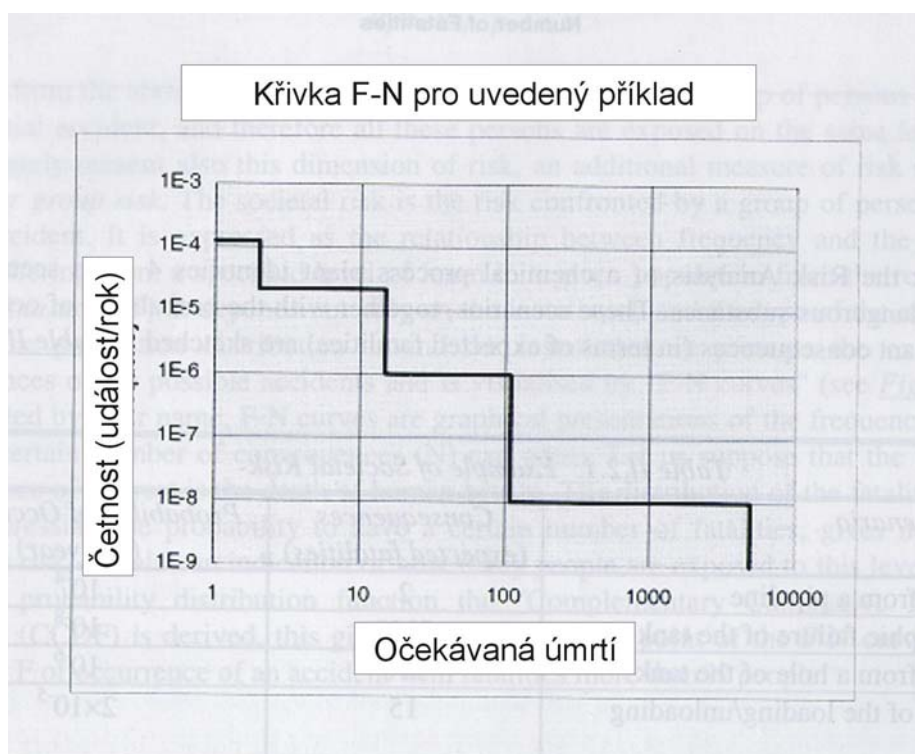
8. Příloha č. 3 – soubor obrázků



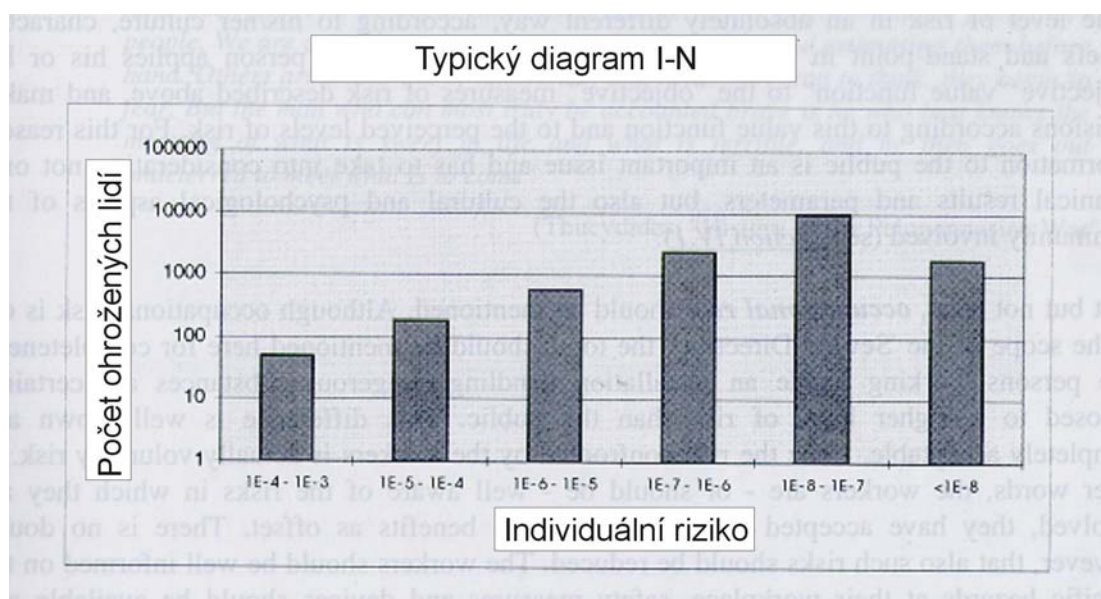
Obrázek 23: Typické křivky stejných hodnot individuálního rizika



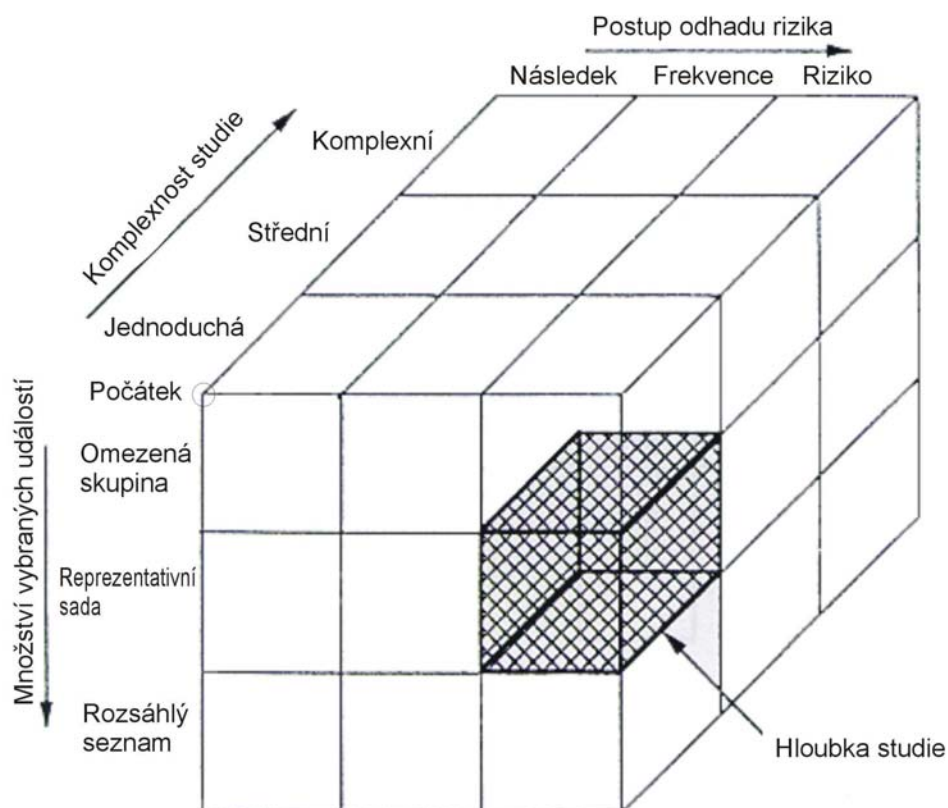
Obrázek 24: Typická křivka $F - N$



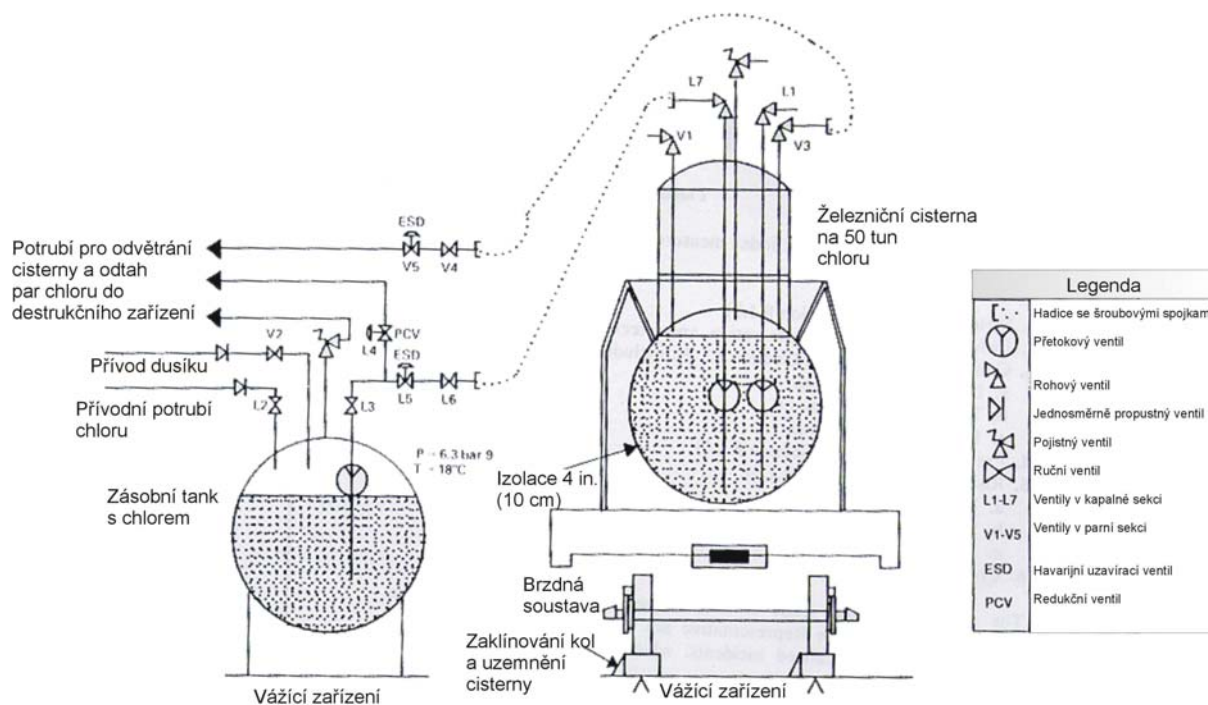
Obrázek 25: Křivka $F - N$ pro uvedený příklad ze str. 14



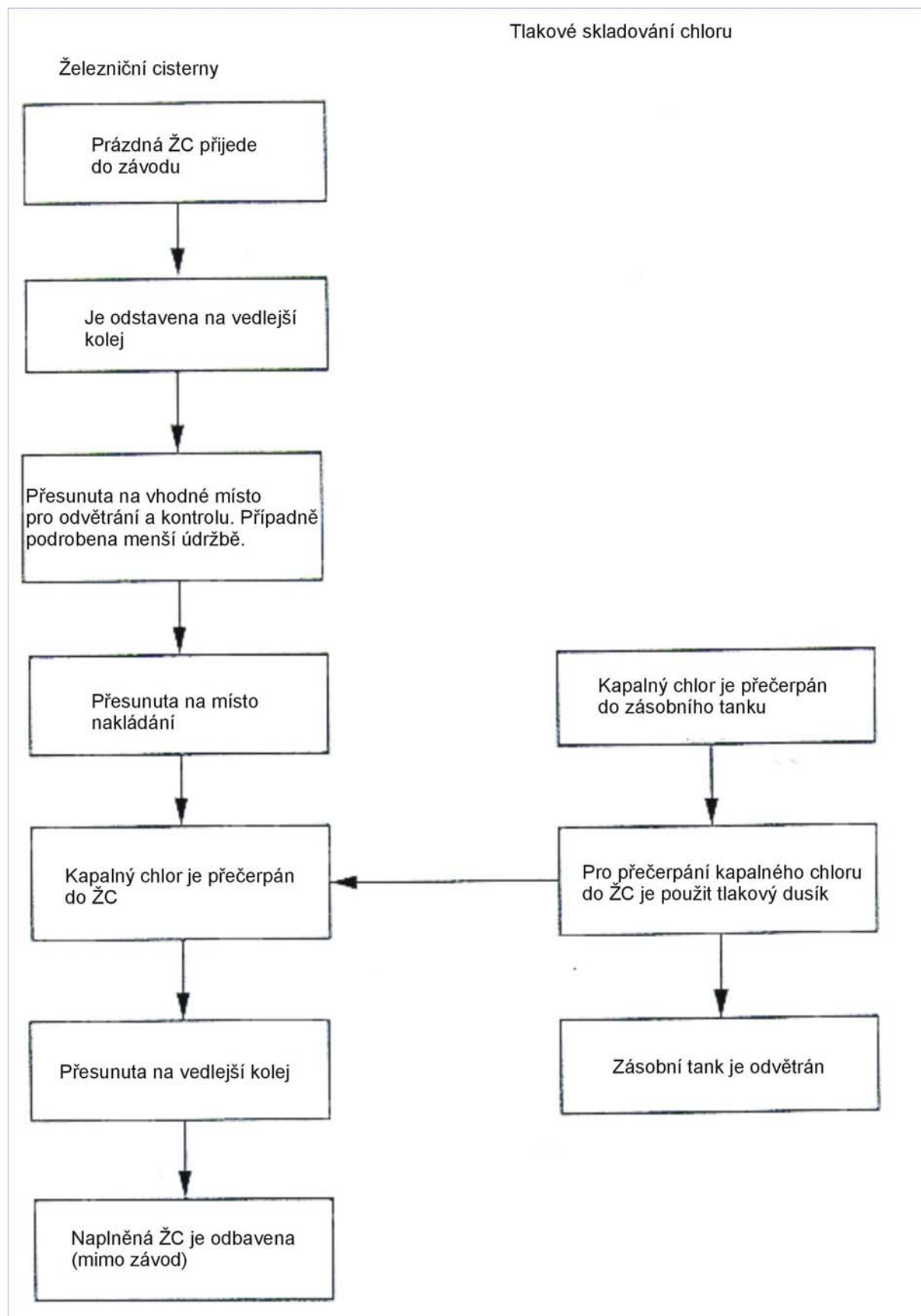
Obrázek 26: Typický diagram $I - N$



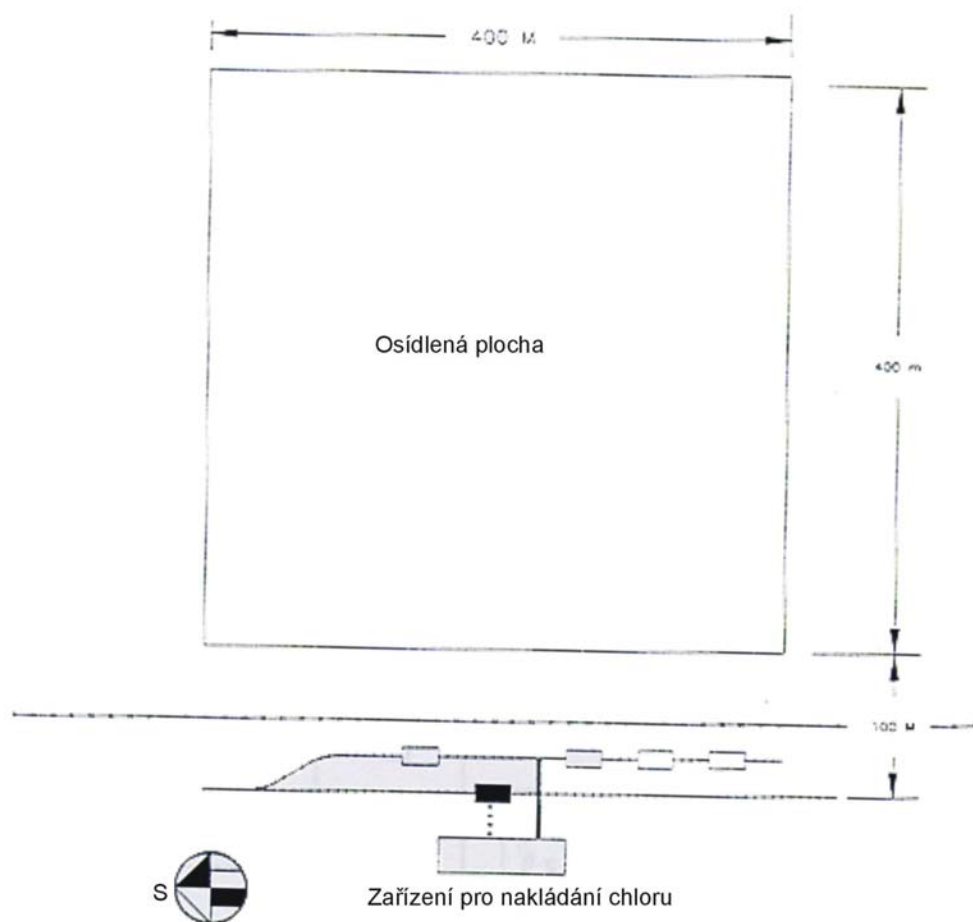
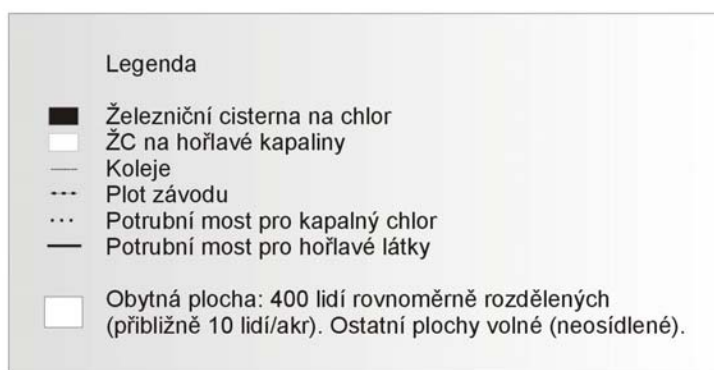
Obrázek 27: Hloubka studie pro první případovou studii



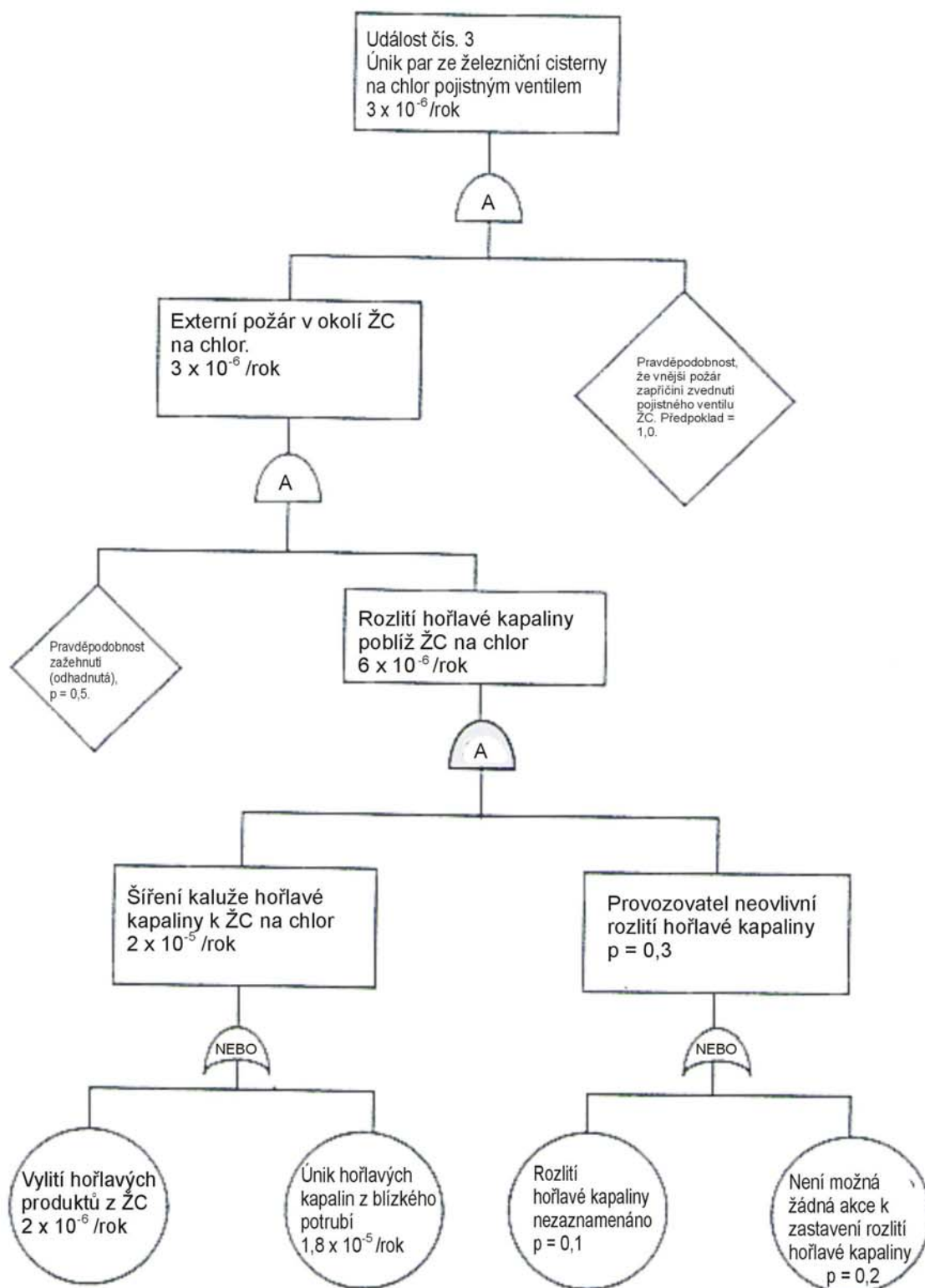
Obrázek 28: Schéma zařízení pro nakládání chloru do železniční cisterny



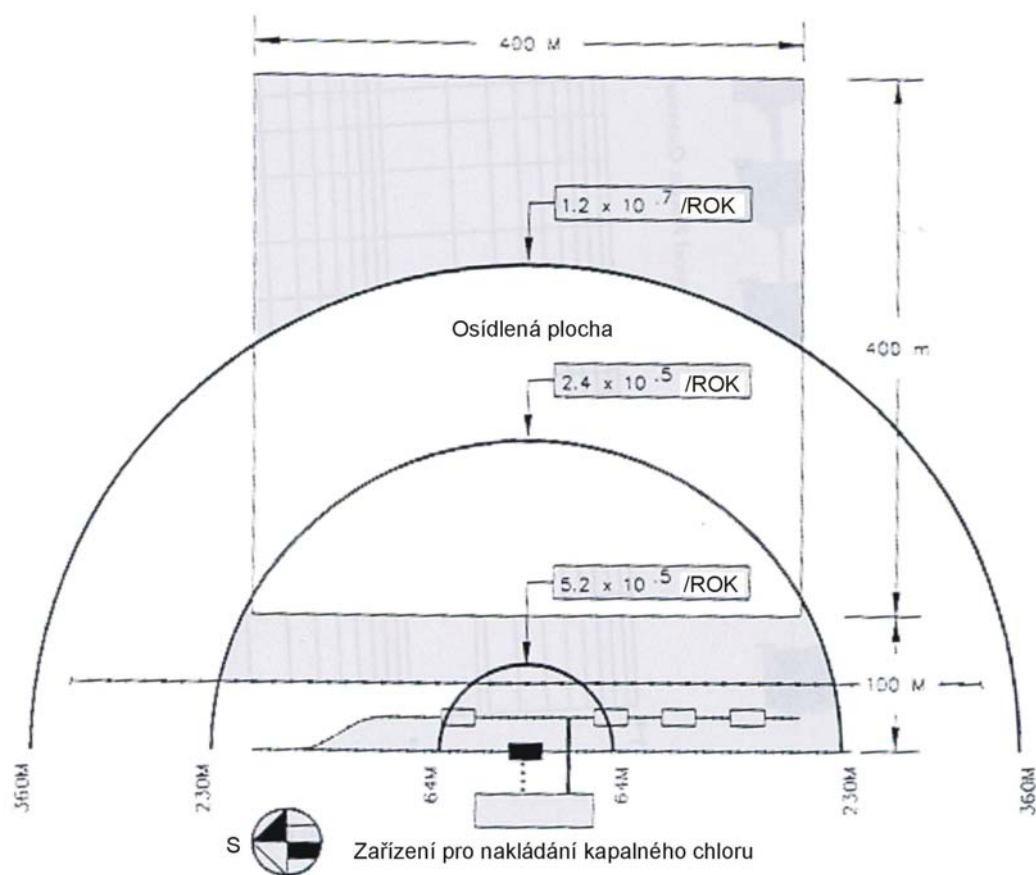
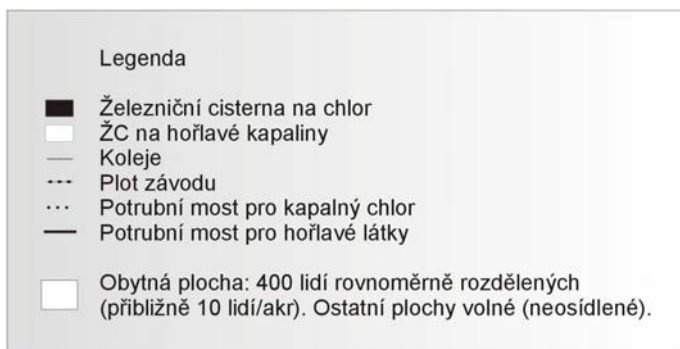
Obrázek 29: Zjednodušený postup nakládání kapal. chloru do železniční cisterny



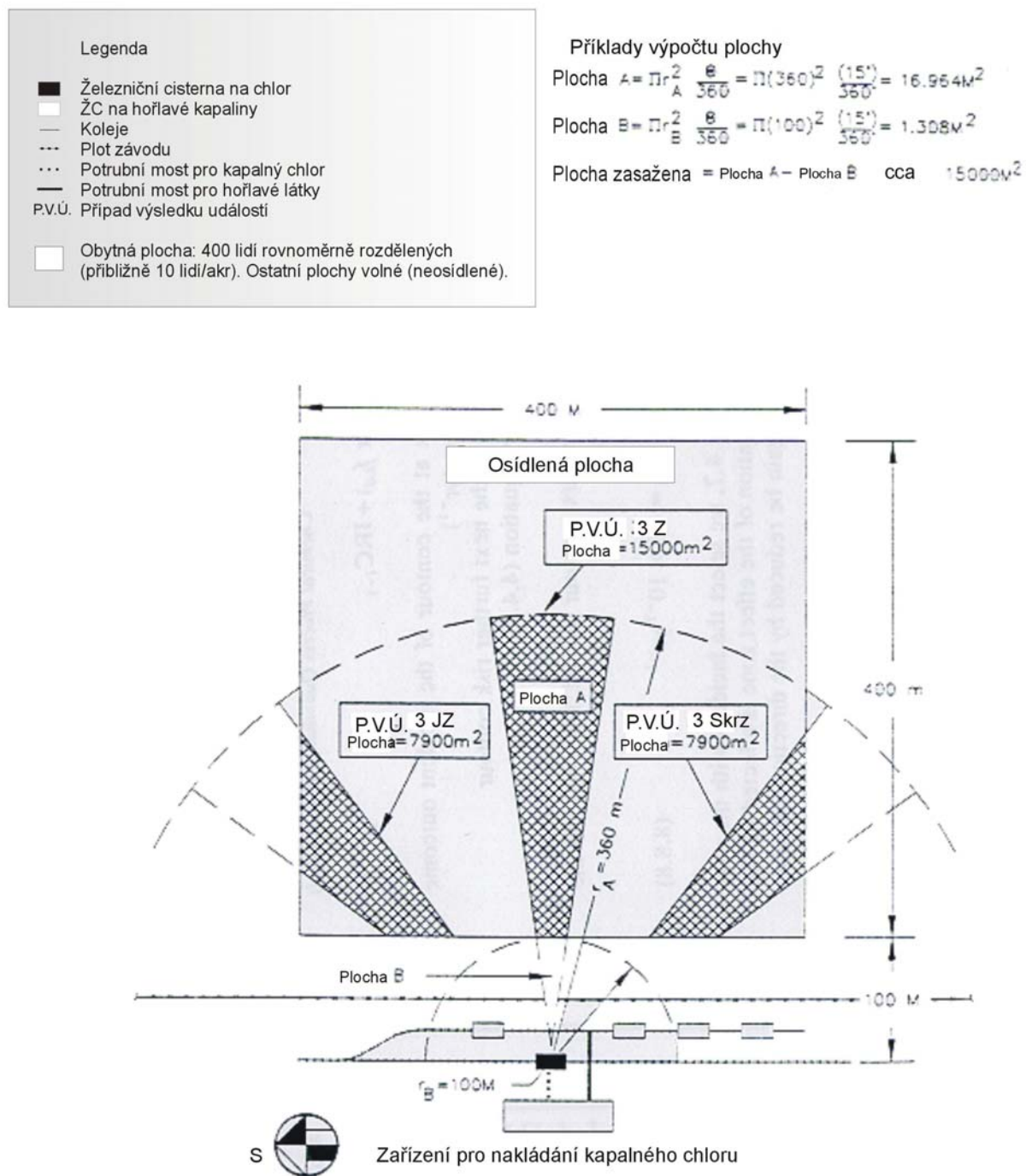
Obrázek 30: Umístění zařízení pro nakládání kapal. chloru do železniční cisterny



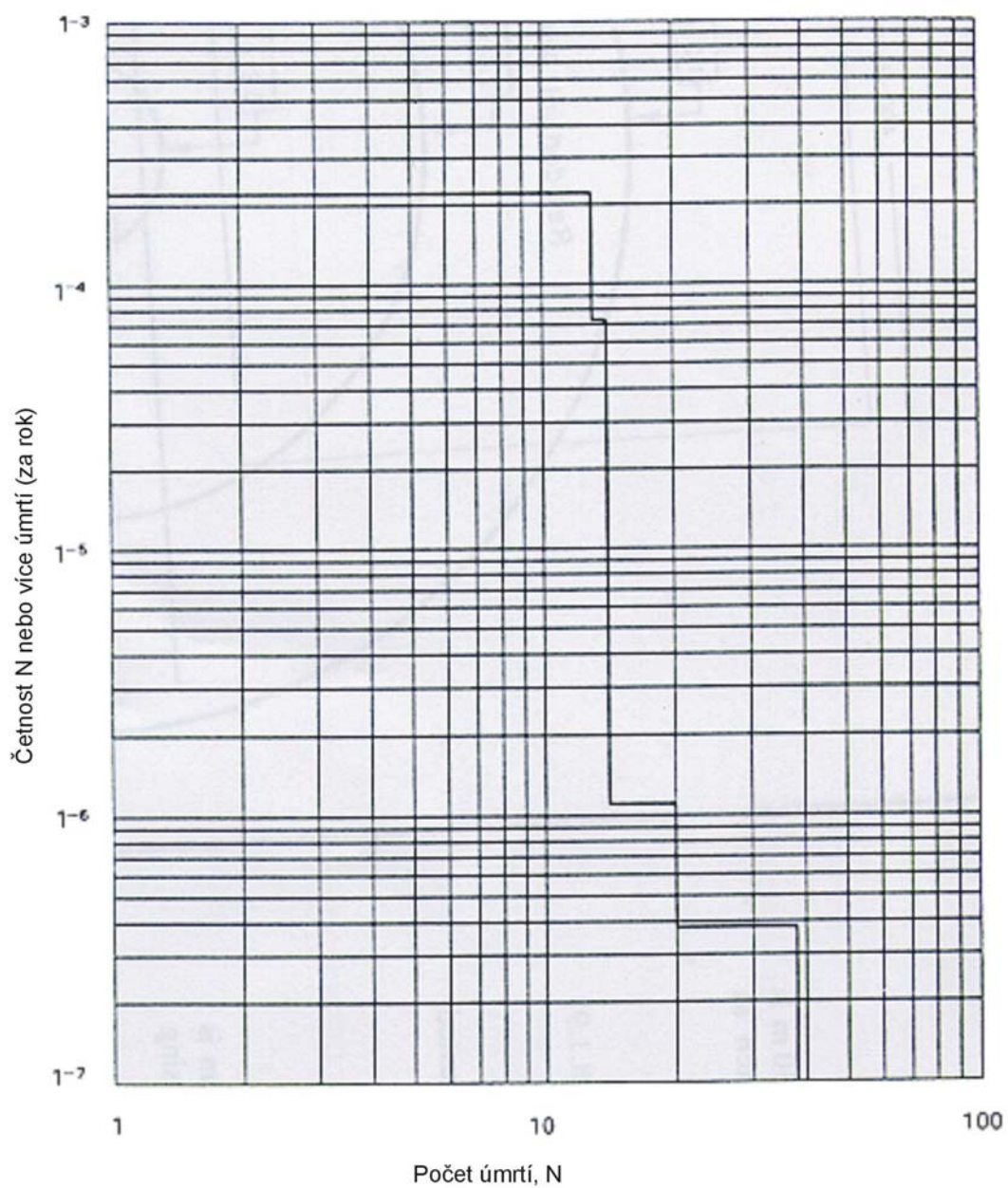
Obrázek 31: Strom poruch pro událost 3



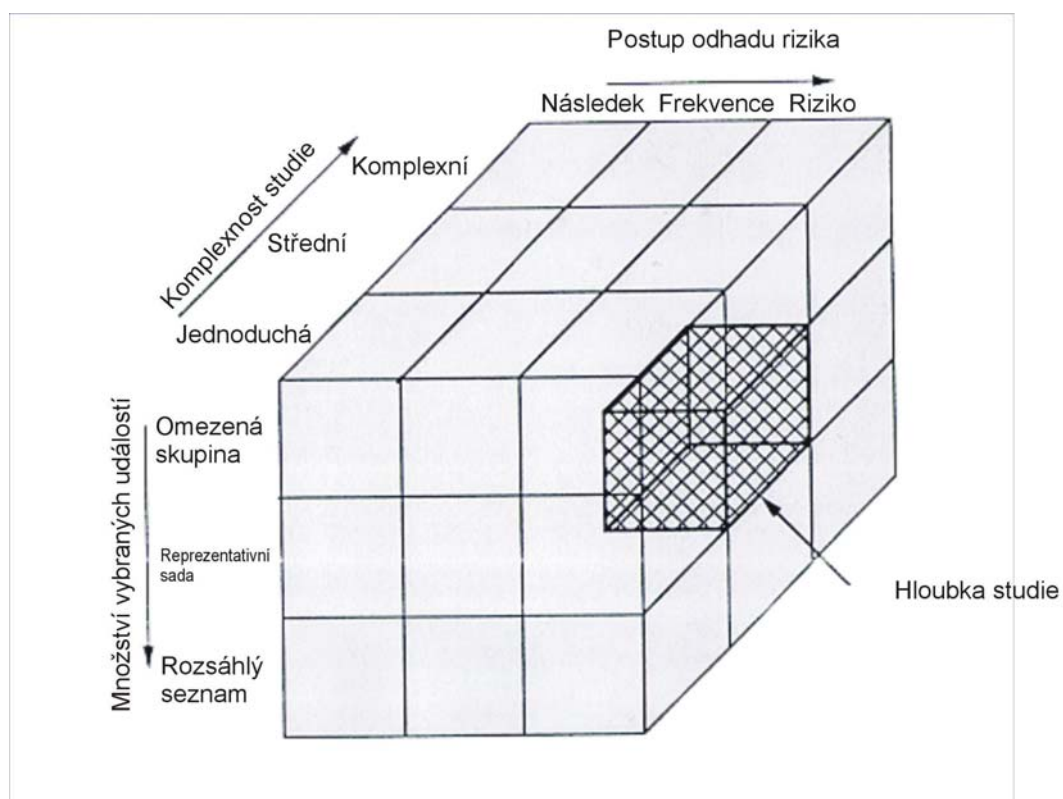
Obrázek 32: Izokřivky individuálního rizika kolem zařízení pro nakládání chloru



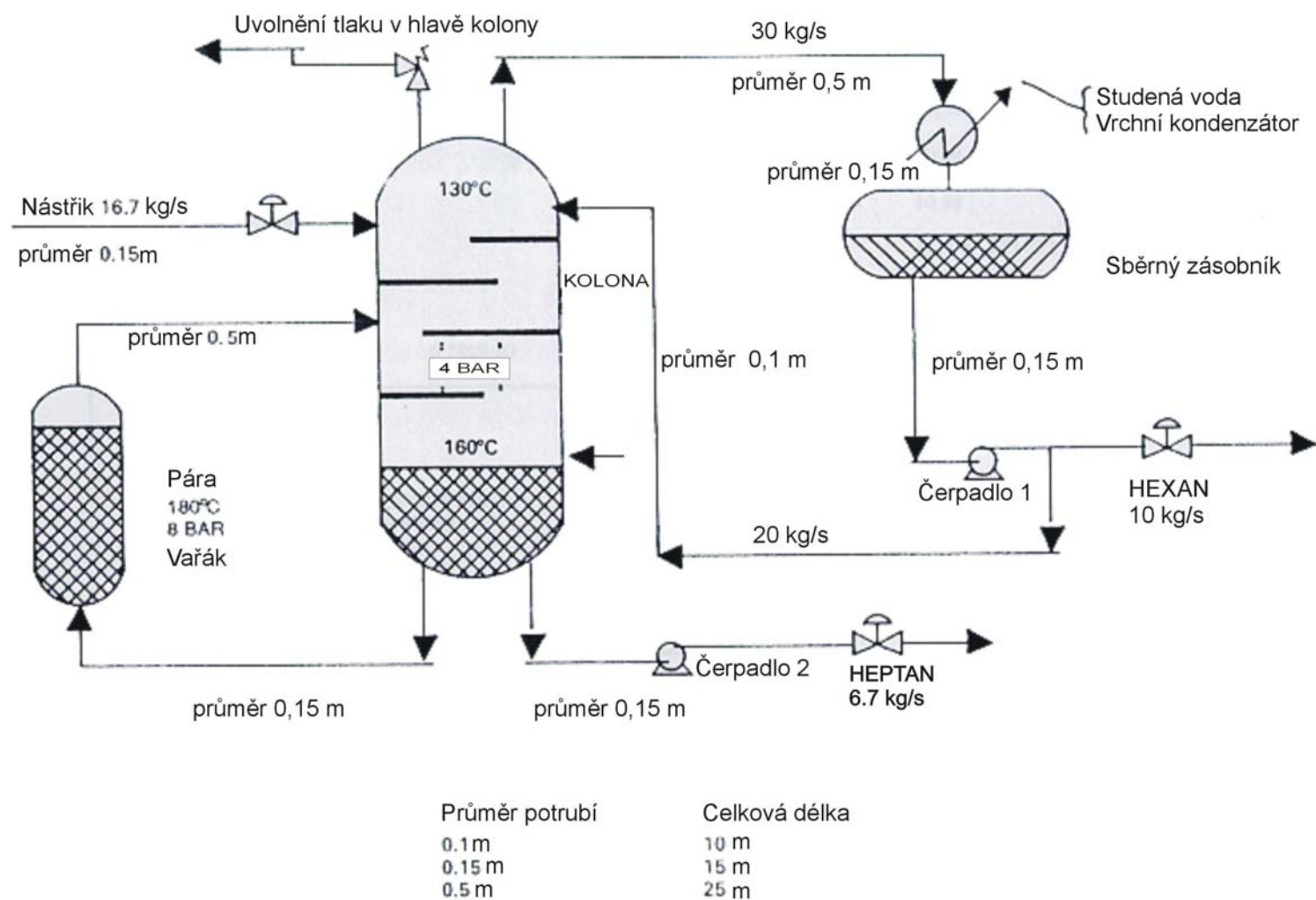
Obrázek 33: Zóny účinků pro událost číslo 3



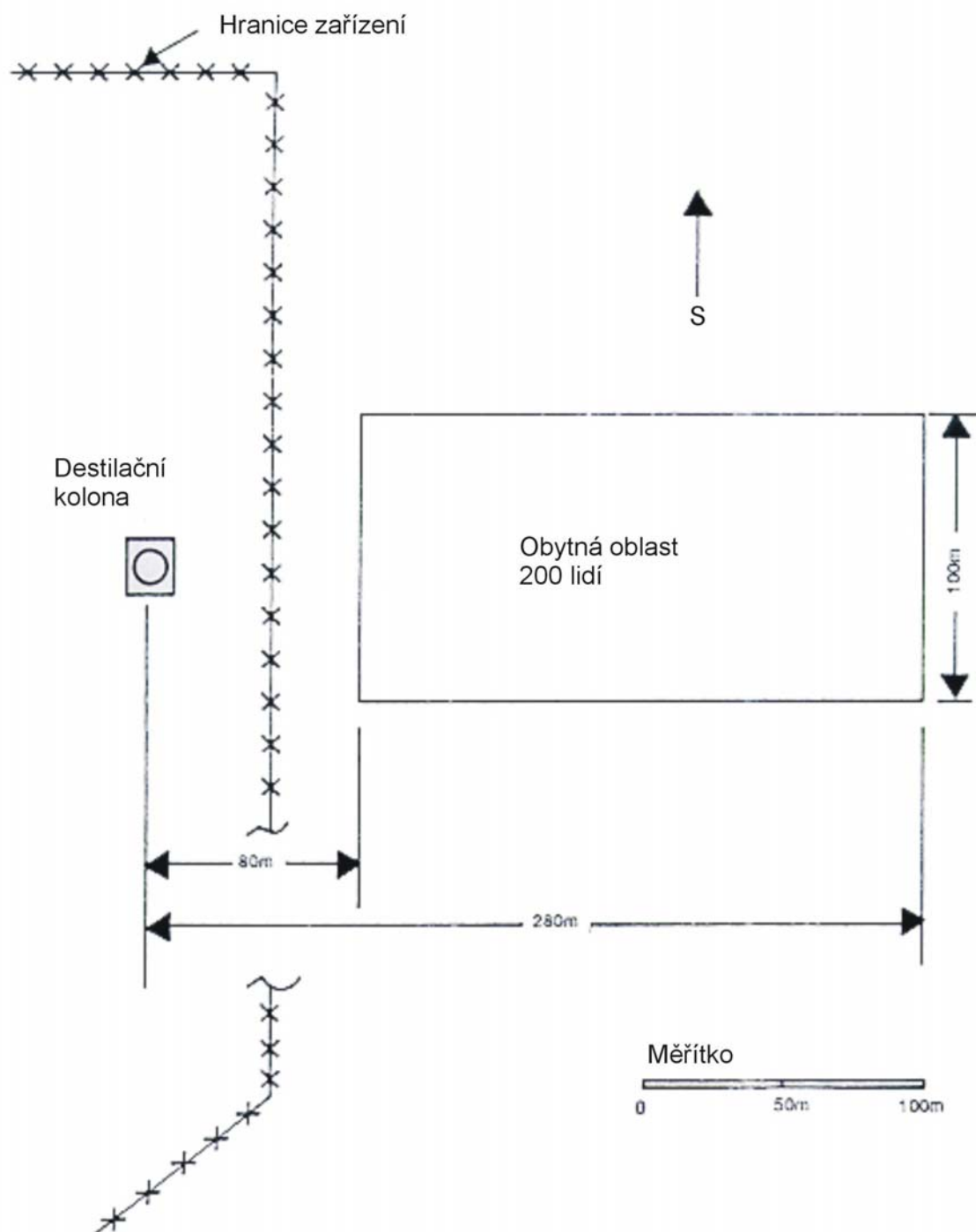
Obrázek 34: Křivka sociálního rizika $F - N$ pro případ nakládání kapalného chloru do železniční cisterny



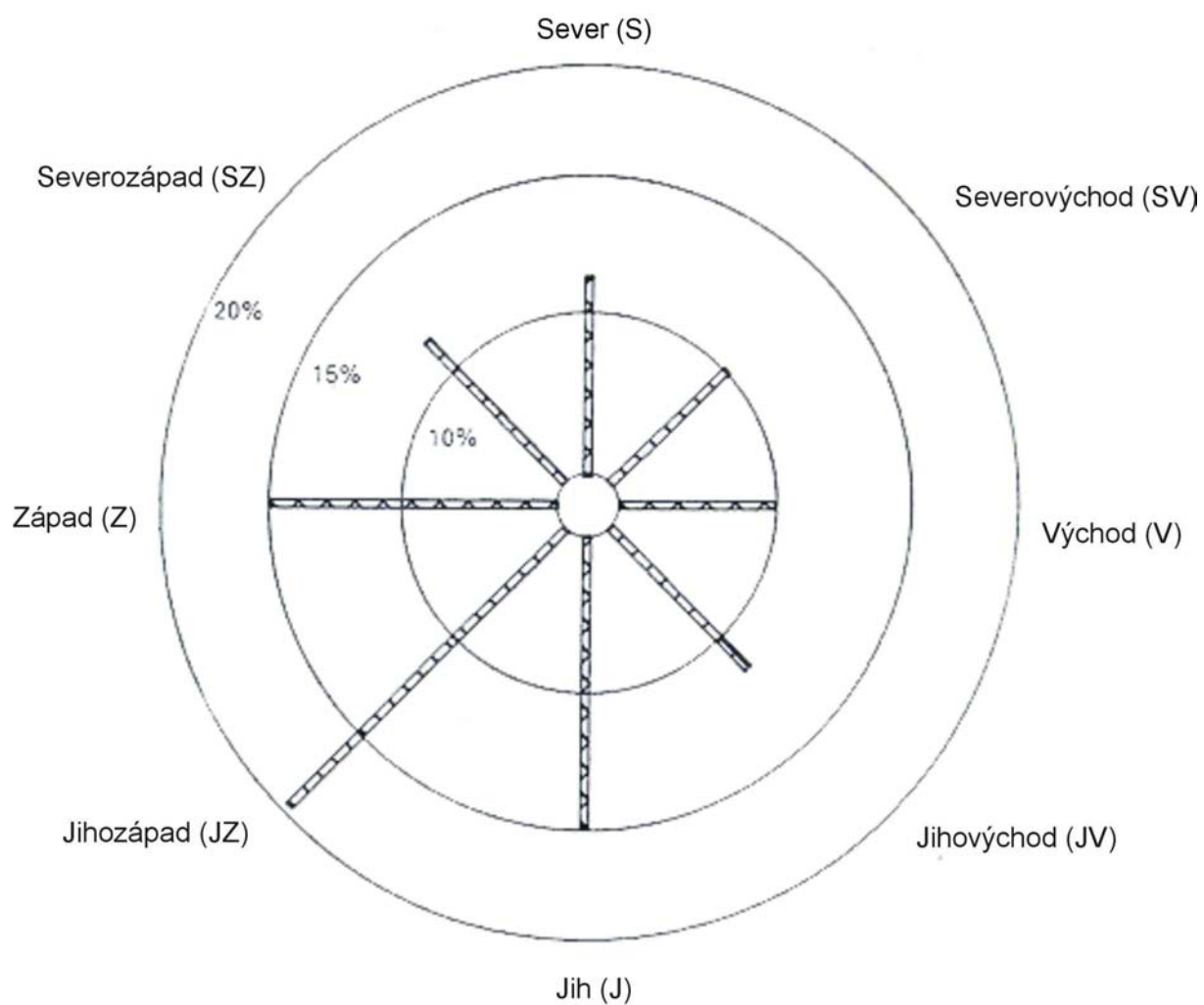
Obrázek 35: Hloubka studie pro případ destilační kolony



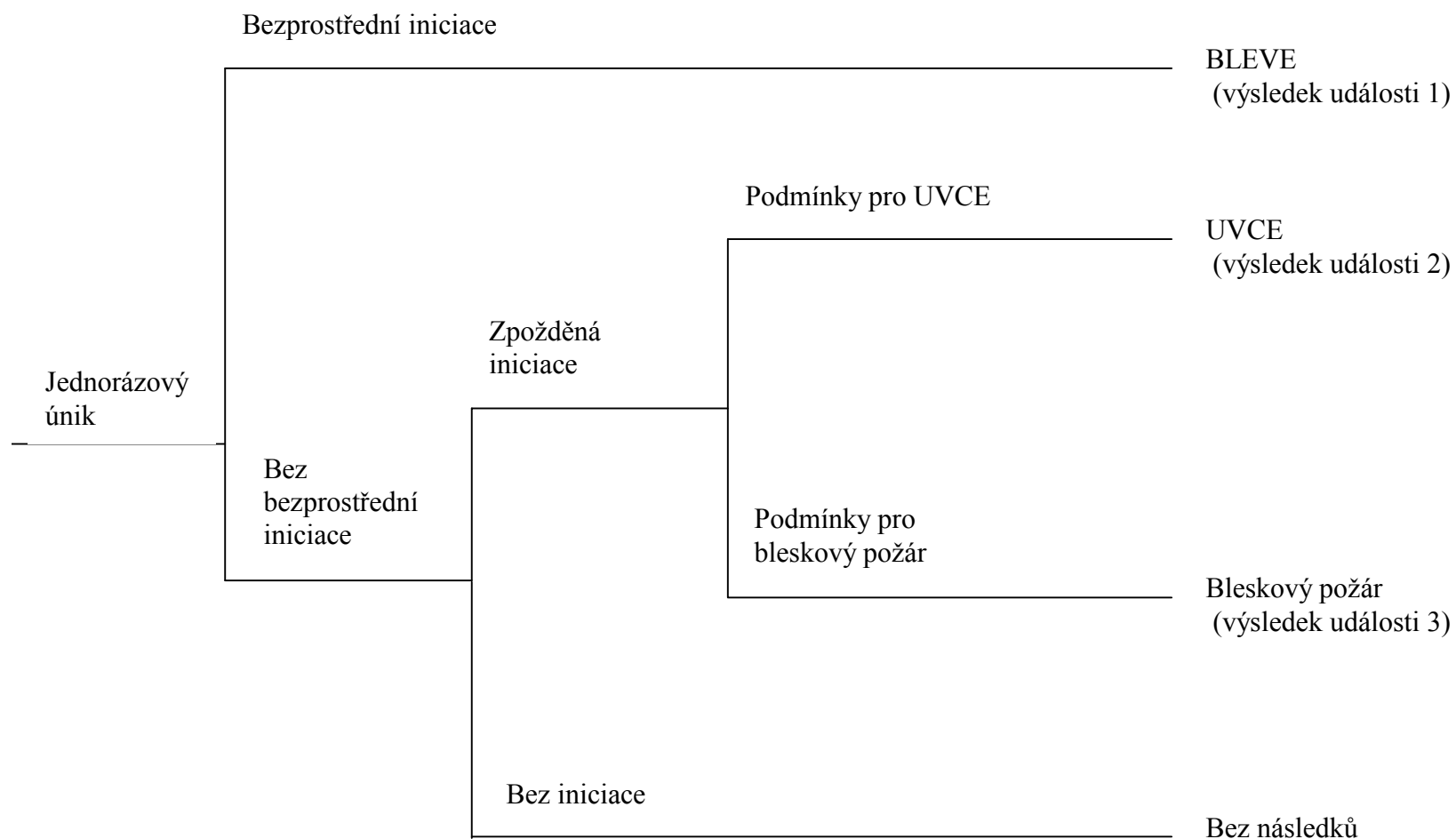
Obrázek 36: Destilační kolona, přidružená zařízení a podmínky



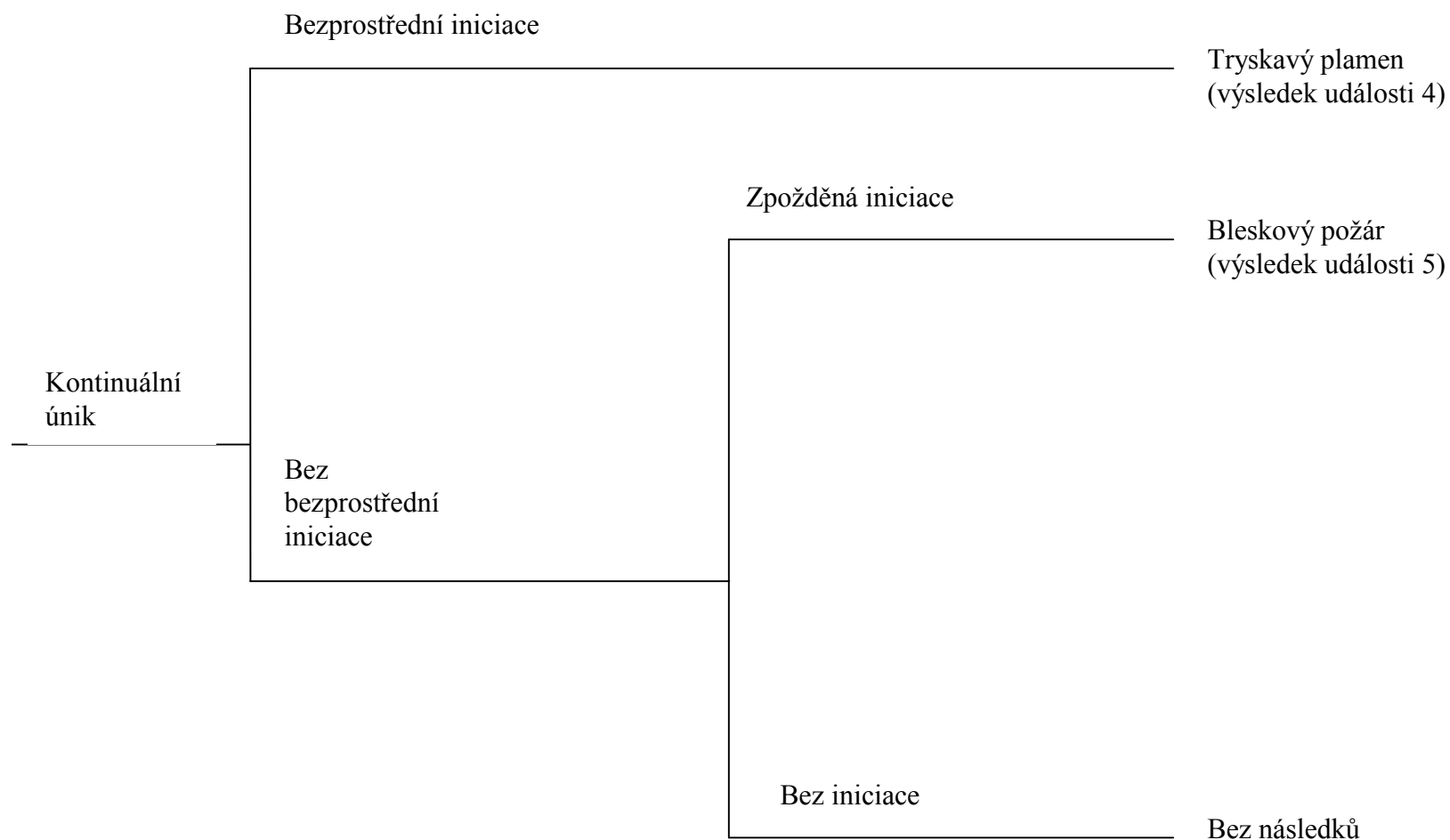
Obrázek 37: Prostorový plán zařízení destilační kolony a okolí



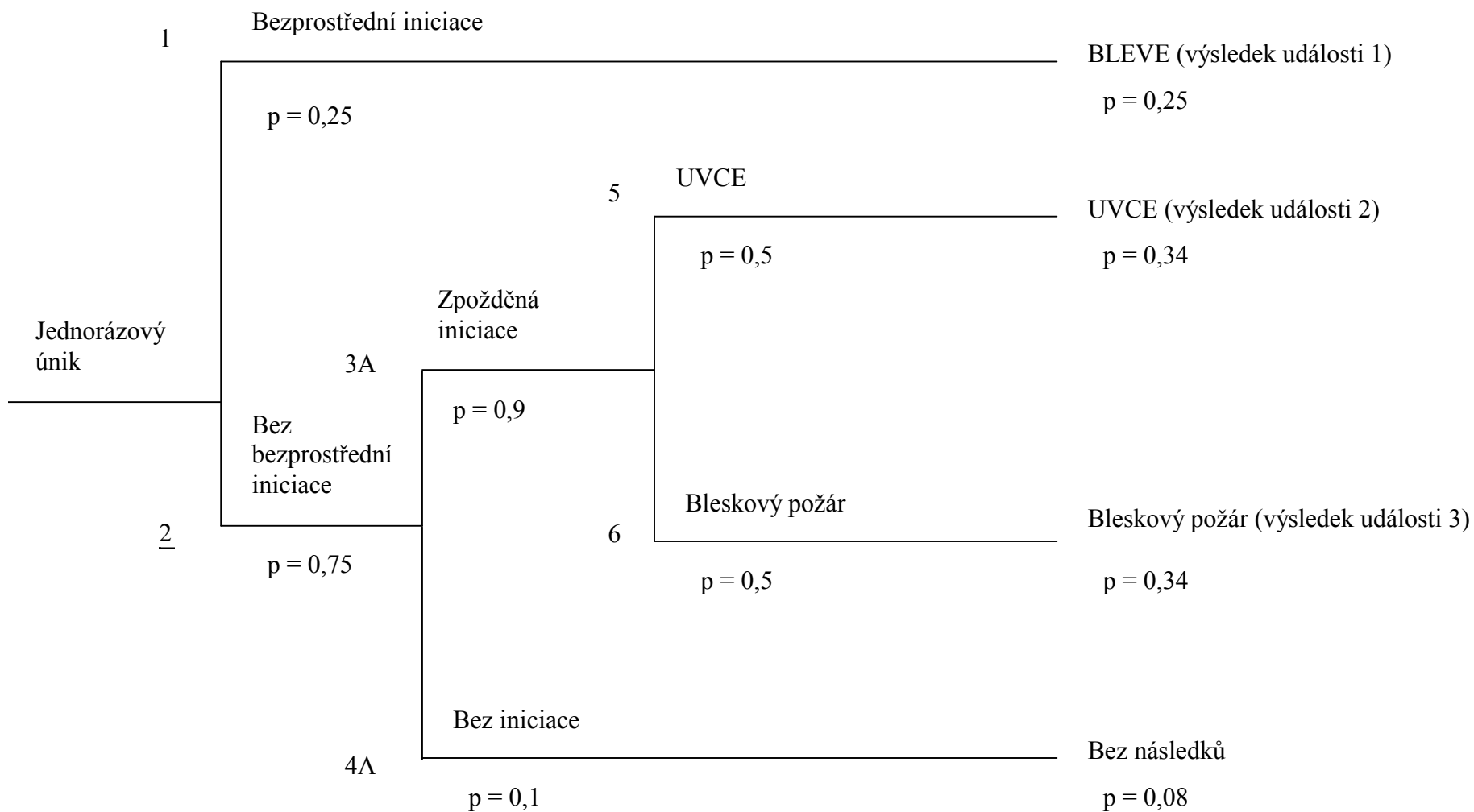
Obrázek 38: Větrná růžice pro studii případu destilační kolony



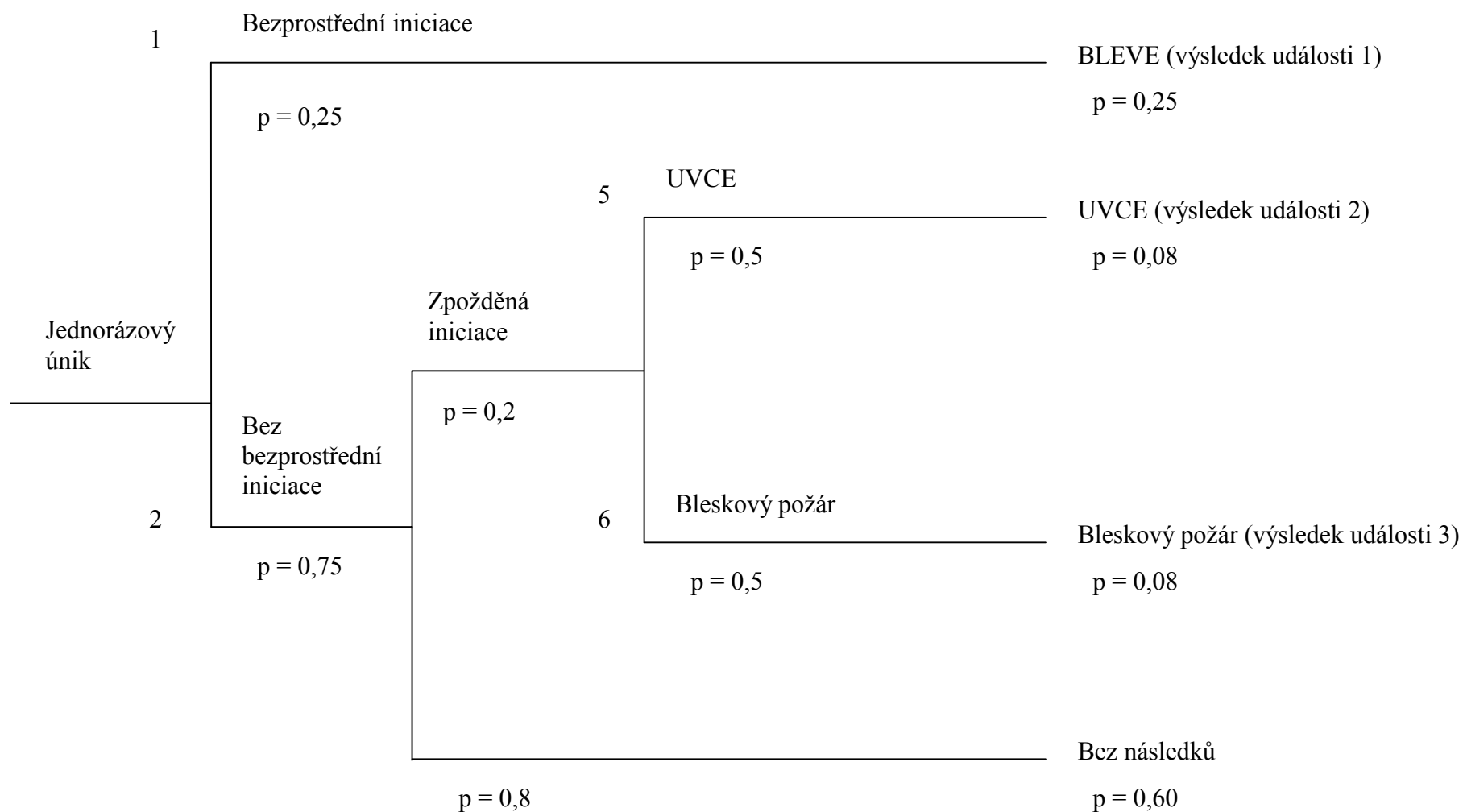
Obrázek 39: Strom událostí pro událost A studie destilační kolony



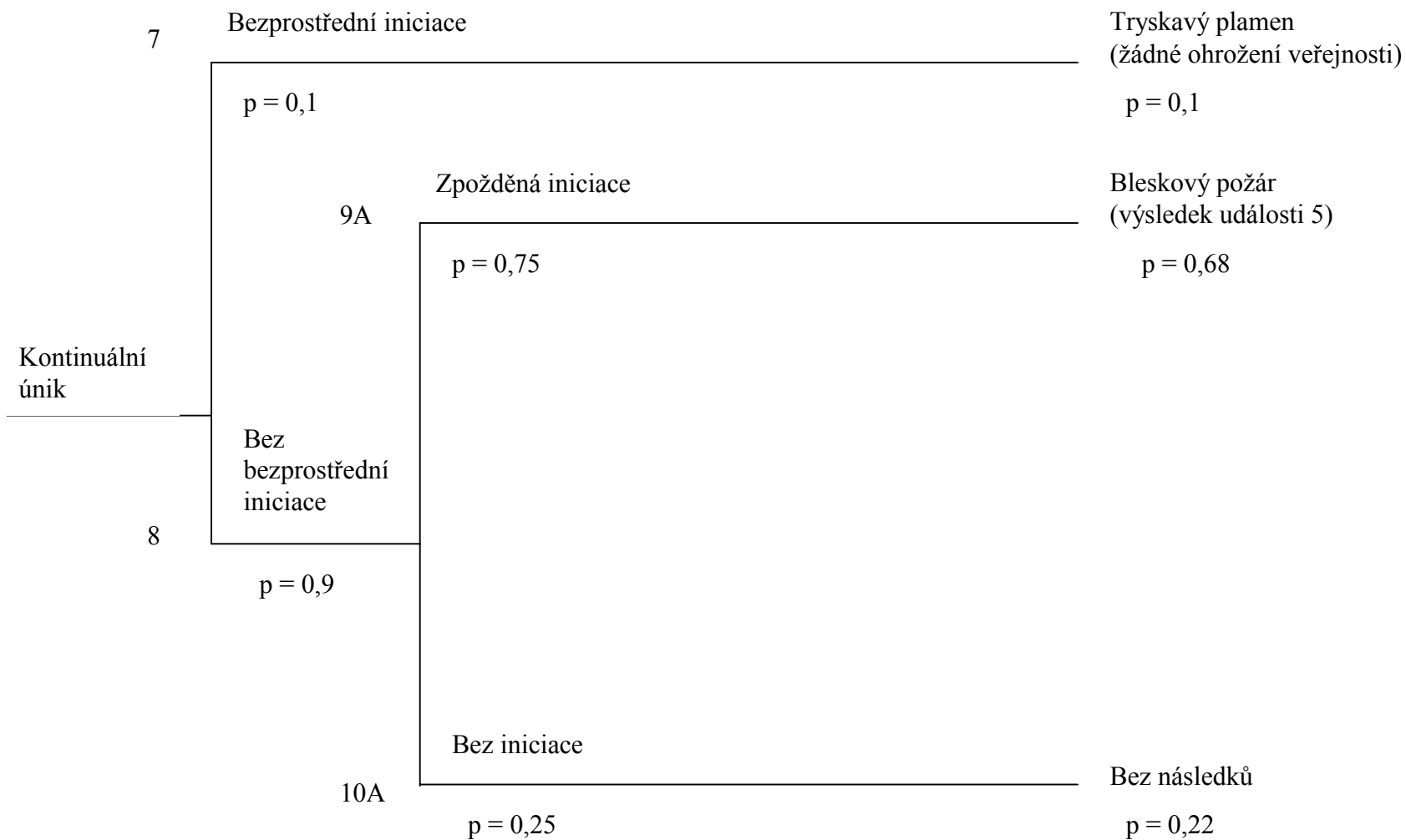
Obrázek 40: Strom událostí pro události B a C studie destilační kolony



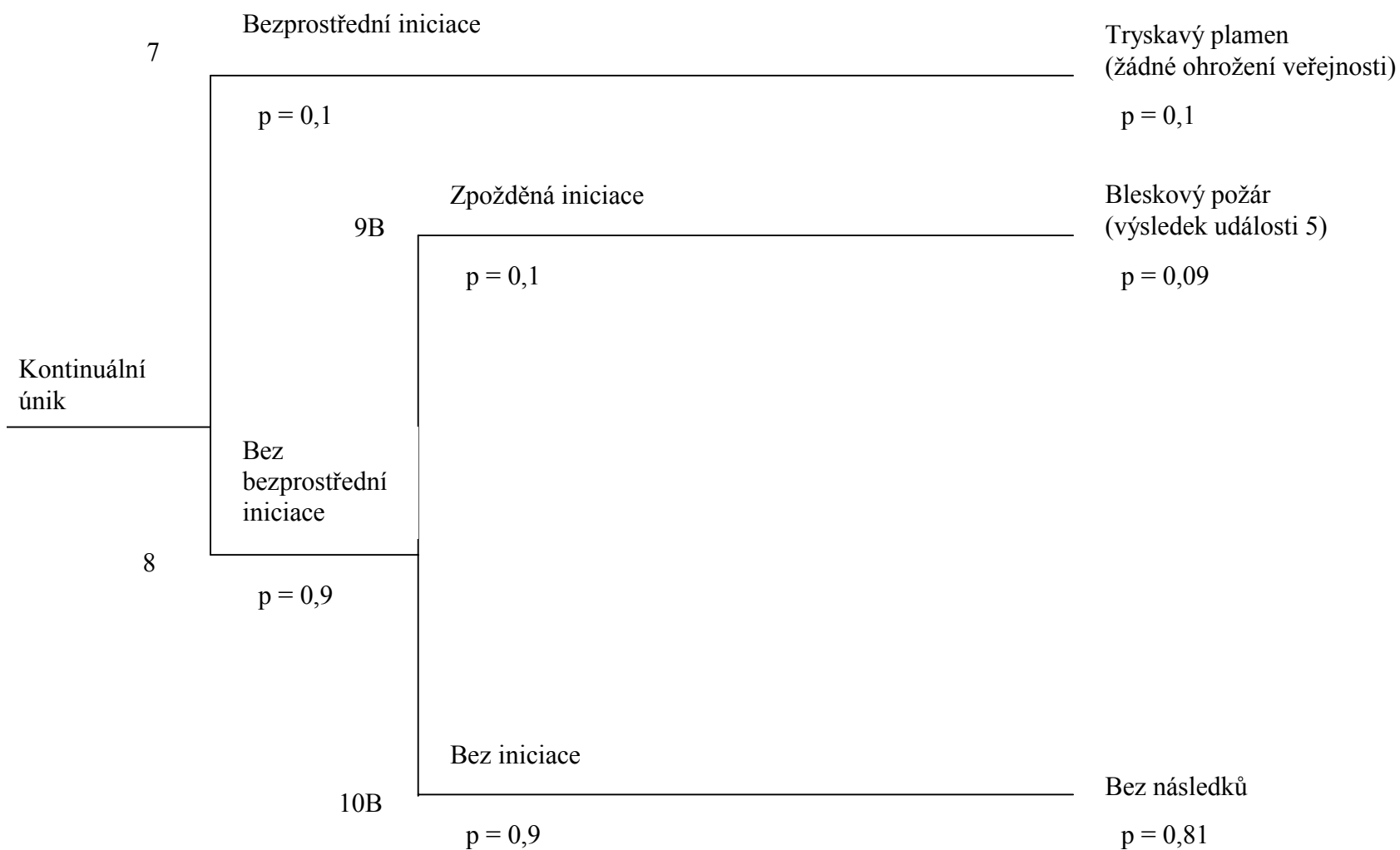
Obrázek 41: Strom událostí pro událost A, jednorázový únik; vítr od JZ, Z a SZ směrem do obytné oblasti



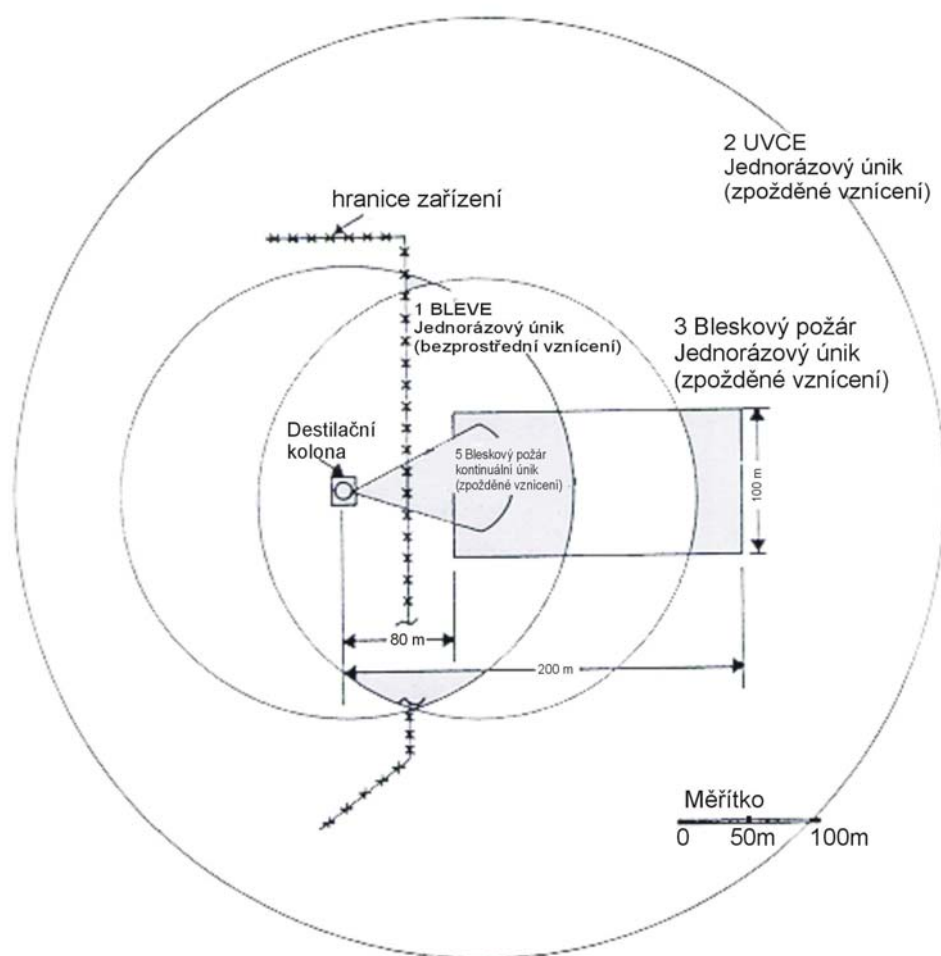
Obrázek 42: Strom událostí pro událost A, jednorázový únik; vítr ze všech ostatních směrů od obytné oblasti



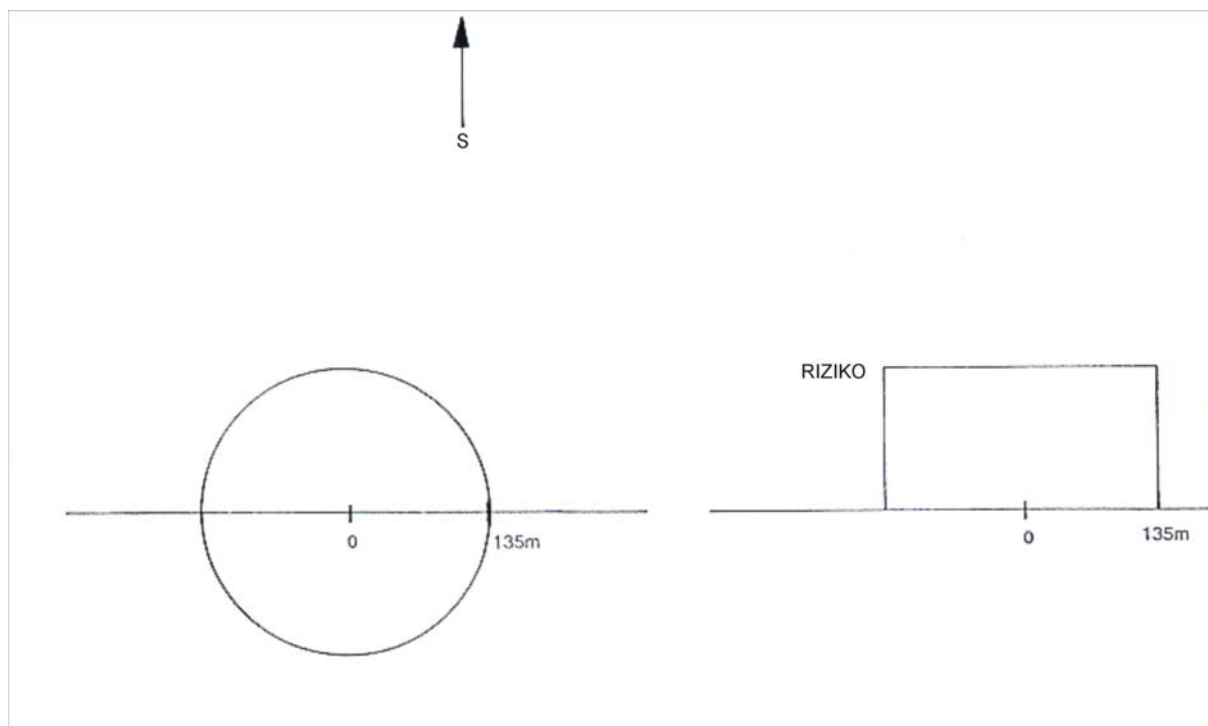
Obrázek 43: Strom událostí pro události B a C, kontinuální únik; vítr od JZ, Z a SZ působící do obytné oblasti



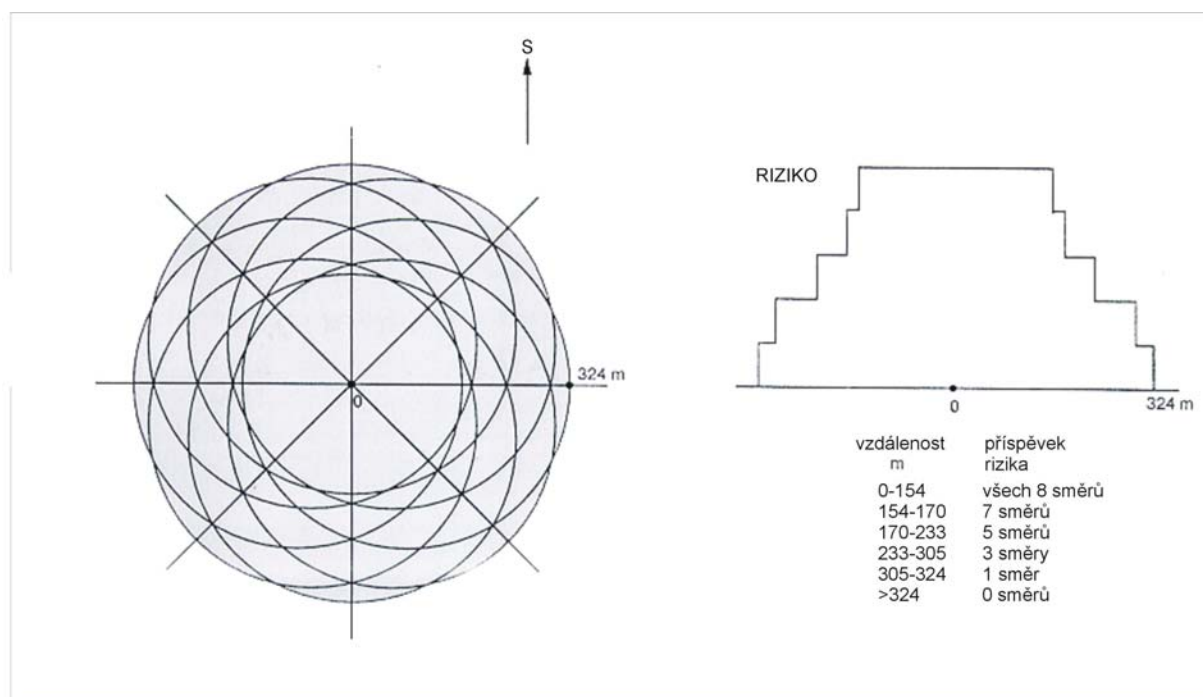
Obrázek 44: Strom událostí pro události B a C, kontinuální únik; vítr ze všech ostatních směrů od obytné oblasti



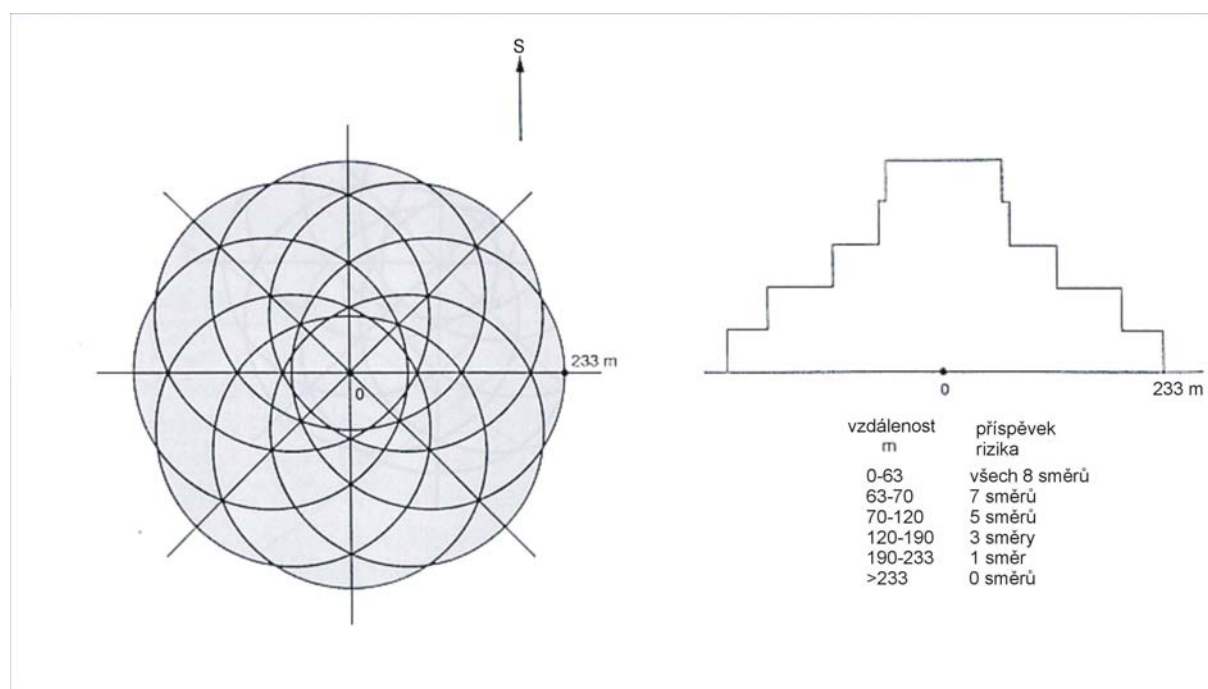
Obrázek 45: Zóny účinků následků v prostorovém plánu zařízení pro výsledky událostí 1, 2, 3, a 5 ve východním směru



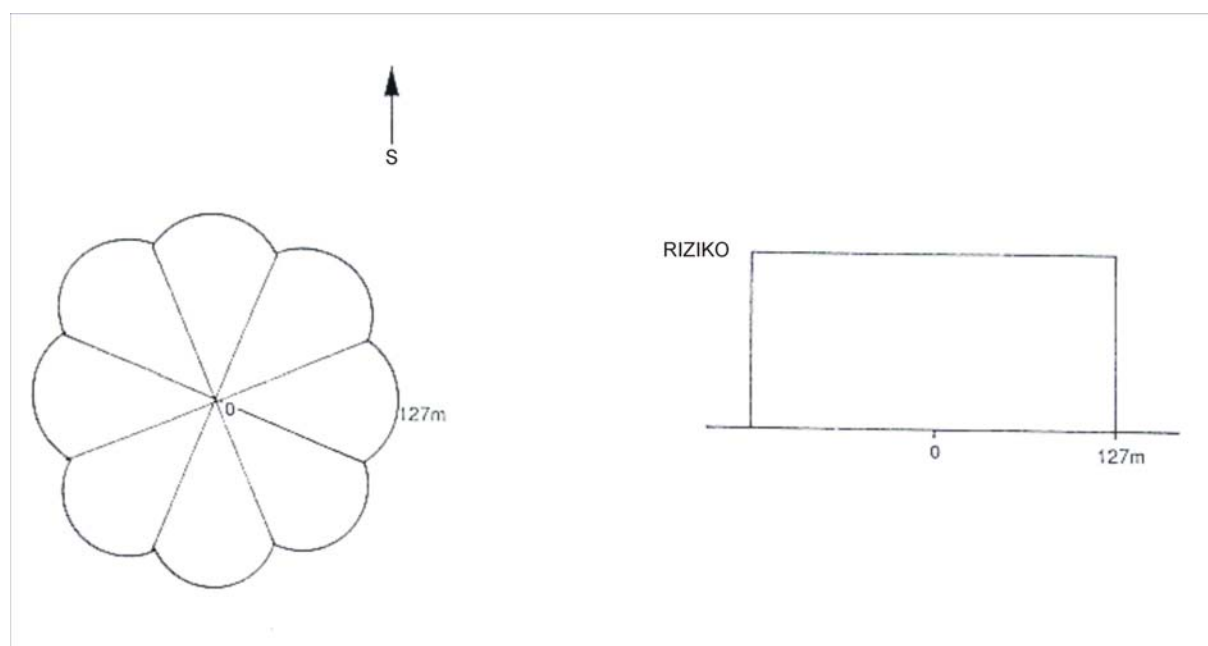
Obrázek 46: Profil rizika pro výsledek události 1 – BLEVE



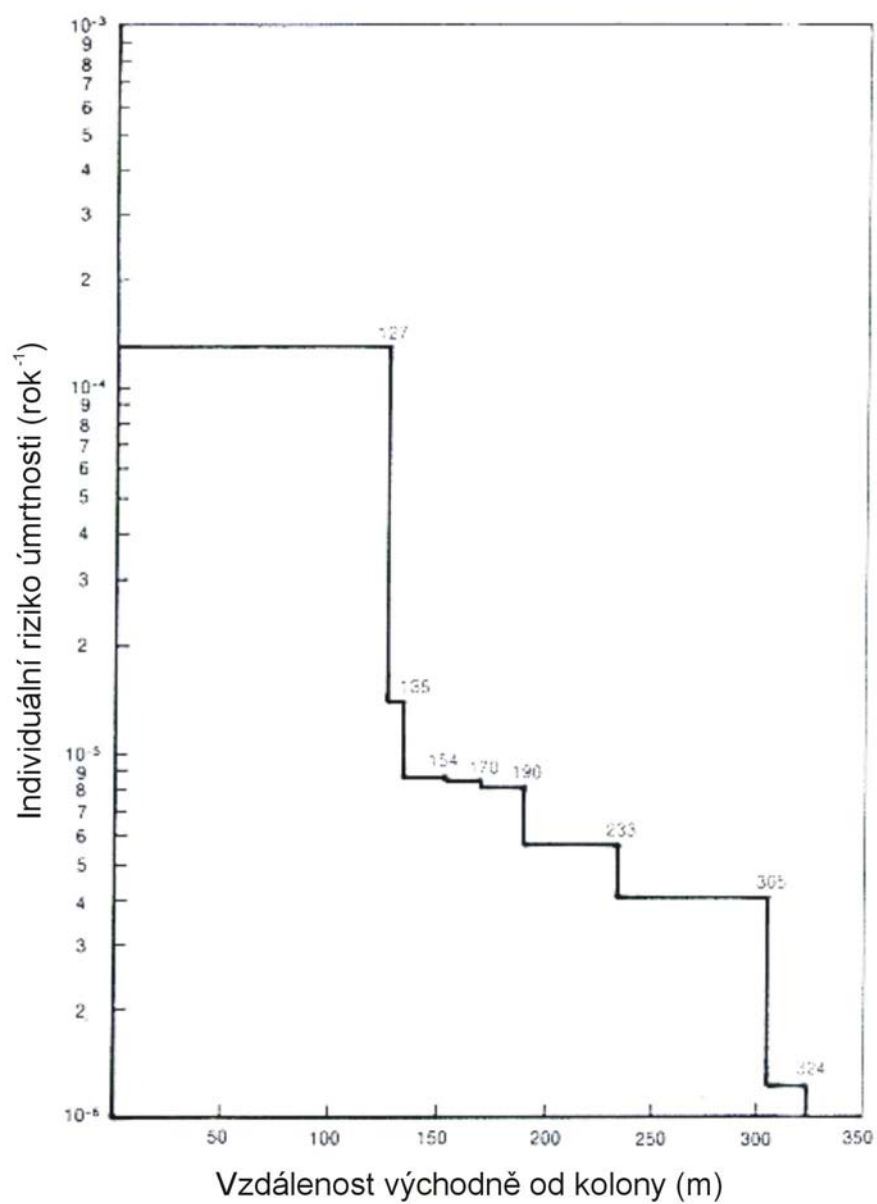
Obrázek 47: Profil rizika pro výsledek události 2 – UVCE



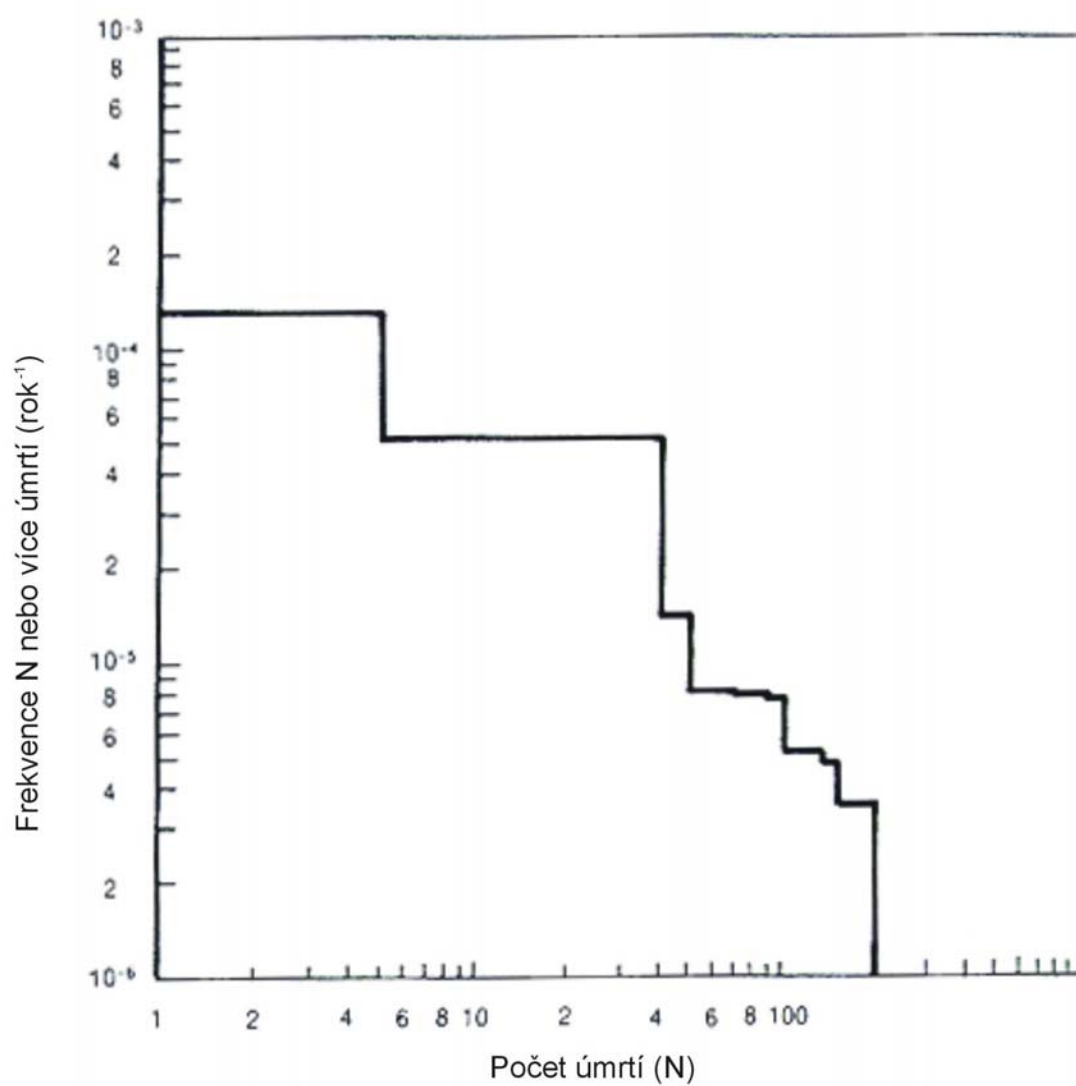
Obrázek 48: Profil rizika pro výsledek události 3 – Bleskový požár (jednoráz. únik)



Obrázek 49: Profil rizika pro výsledek události 5 – Bleskový požár (kont. únik)



Obrázek 50: Individuální riziko versus vzdálenost ve východním směru



Obrázek 51: Celkové společenské riziko ze systému frakční destilace