

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Pohled moderního řízení bezpečnosti na havárii v Záluží 1974

Diplomová práce

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Vitík**
Osobní číslo: **C22345**
Studijní program: **N0531A130027 Inženýrství energetických materiálů**
Téma práce: **Pohled moderního řízení bezpečnosti na havárii v Záluží 1974**
Zadávající katedra: **Ústav energetických materiálů**

Zásady pro vypracování

1. Získejte podklady o havárii v Záluží 1974 a seznamte se s nimi.
2. Seznamte se s postupem původního vyšetřování nehody a s jeho závěry.
3. Doplňte stanovení příčin nehody o moderní přístupy a porovnejte výsledky s původními závěry.
4. Seznamte se s dnes platnou legislativou prevence závažných havárií.
5. Shromážděte dostupné poznatky o prevenci vzniku havárií na původním zařízení v Záluží.
6. Ilustrujte použití současných požadavků prevence závažných havárií na havarovaném zařízení.
7. Diskutujte zjištěné rozdíly.
8. Získané výsledky zpracujte formou diplomové práce.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Miloš Ferjenčík, Ph.D.**
Ústav energetických materiálů

Oponent diplomové práce: **doc. Ing. Břetislav Janovský, Dr.**
Ústav energetických materiálů

Datum zadání diplomové práce: **29. února 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jiří Pachman, Ph.D.
vedoucí ústavu

Prohlašuji: Práci s názvem Pohled moderního řízení bezpečnosti na havárii v Záluží 1974 jsem vypracoval(a) samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil(a), jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 10.5.2024

Michal Vitík v. r.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu panu doc. Ing. Miloši Ferjenčíkovi, Ph.D. za jeho vedení, rady, pomoc a ochotu při zpracovávání této diplomové práce. Na závěr bych rád poděkoval také rodině a přátelům za jejich podporu po celou dobu vypracovávání této práce.

ANOTACE

Podnětem k této diplomové práci je výročí jedné z největších průmyslových havárií, která se stala na našem území. Práce si klade otázku, jak by havárii a havarované zařízení hodnotil současný pohled řízení bezpečnosti. Práce se ve své teoretické části věnuje moderní oblasti řízení bezpečnosti, která je rozdělena mezi analýzu nehod, analýzu rizik a dnes používanou legislativu a metody. Praktická část se zaměřuje na popis původní nehody a popis havarovaného výrobního zařízení. Dále popisuje moderní postup při vyšetřování nežádoucích událostí a jednu z metod moderní analýzy následků průmyslových havárií, včetně hodnocení bezpečnostního rizika v podobě přijatelnosti tohoto zařízení z moderního pohledu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Analýza kořenových příčin, analýza rizik, řízení bezpečnosti

TITLE

The accident in Záluží 1974 from the point of view of modern safety management.

ANNOTATION

The impulse for this thesis is the anniversary of one of the biggest industrial accidents that happened on our territory. The thesis asks how the accident and the crashed facility would be evaluated by the current safety management perspective. The theoretical part of the thesis discusses the modern field of safety management, which is divided between accident analysis, risk analysis and the legislation and methods used today. The practical part focuses on the description of the original accident and the description of the crashed production equipment. It also describes the modern procedure for the investigation of adverse events and one of the methods of modern analysis of the consequences of industrial accidents, including the safety risk assessment in the form of acceptability of this equipment from a modern perspective.

KEYWORDS

Root cause analysis, risk analysis, safety management

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK	8
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	10
ÚVOD.....	12
1 TEORETICKÁ ČÁST	13
1.1 Řízení bezpečnosti	13
1.2 Analýza nehod	13
1.2.1 Úvod do analýzy nehod	13
1.2.2 Analýza kořenových příčin.....	15
1.2.3 Metoda IPICA.....	15
1.3 Analýza rizik.....	16
1.3.1 Certifikovaná metodika k analýze a posouzení rizik	16
1.4 Legislativa a návody	18
1.4.1 Direktiva Seveso III	18
1.4.2 Zákon o prevenci závažných havárií	20
1.4.3 Vyhláška č.225/2015 Sb.....	23
1.4.4 Metoda HAZOP	23
1.4.5 Metoda FMEA	24
1.4.6 Metoda FTA	24
1.4.7 Metoda Multi Energy	24
1.4.8 Metoda IOI.....	25
2 PRAKTICKÁ ČÁST	28
2.1 Výrobní technologie	28
2.2 Událost.....	32
2.3 Původní analýza nehody	33
2.3.1 Odhad minimální celkové velikosti úniku	33
2.3.2 Druh uniklé látky	34
2.3.3 Vymezení oblasti úniku.....	34
2.3.4 Přesnější určování místa úniku	35
2.3.5 Srovnání možných míst úniku s odhadem minimální velikosti úniku.....	36
2.3.6 Údaje o úpravách a údržbě zařízení v možných místech úniku.....	36
2.3.7 Pravděpodobná odezva na zjištění úniku.....	37
2.3.8 Závěry znaleckých posudků.....	37
2.3.9 Souhrnný závěr původního vyšetřování	39
2.3.10 Určení příčin podle původního vyšetřování.....	40

2.4	Doplnění analýzy nehody moderním pohledem	41
2.4.1	Použití matice faktů a hypotéz	41
2.4.2	Grafické znázornění nehody	42
2.4.3	Doplnění analýzy příčin	44
2.4.4	Rozšíření analýzy metodou IPICA	45
2.4.5	Doplnění grafického znázornění nehody	53
2.4.6	Doplnění příčin původního vyšetřování	53
2.5	Původní řízení bezpečnosti	54
2.6	Doplnění řízení bezpečnosti moderním pohledem za využití metodiky přístupu k identifikaci, analýze a hodnocení rizik	55
2.6.1	Základní doplnění	56
2.6.2	Analýza rizik pro oblast kolena č. 69b a ethylenových kolon	56
2.6.3	Analýza rizik pro oblast kolektoru sání 1. stupně chladicího okruhu	68
2.6.4	Návaznost dalších oblastí řízení bezpečnosti na výsledky analýzy rizika	76
3	VÝSLEDKY A DISKUZE	78
3.1	Doplnění analýzy nehody	78
3.1.1	Výsledky matice faktů a hypotéz	78
3.1.2	Výsledky analýzy kořenových příčin	78
3.1.3	Výsledky analýzy metodou IPICA	78
3.2	Výsledky doplnění řízení bezpečnosti moderním pohledem	78
3.2.1	Výsledky analýzy kolena č. 69b	79
3.2.2	Výsledky analýzy kolektoru sání	81
	ZÁVĚR	84
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	85

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1	Postup při analýze nežádoucí události [4]	14
Obrázek 2	Výroba syntetického lihu před nehodou, v popředí budova kompresorovny, následují rektifikační kolony a vlevo v pozadí budova ethylbenzenu[18]	29
Obrázek 3	Zjednodušené schéma výroby, červená šipka = plynná frakce, modrá šipka = kapalná nebo pevná frakce	31
Obrázek 4	Výroba syntetického lihu po výbuchu, vlevo poničená budova ethylbenzenu[18]	33
Obrázek 5	Náčrt zasažené oblasti	35
Obrázek 6	Fotografie prasklého kolena č. 69b[1]	39
Obrázek 7	Časový vývoj nehody	40
Obrázek 8	Základní analýza příčin	42
Obrázek 9	Rozvinutá analýza příčin	43

Obrázek 10 Určení příčinných faktorů	43
Obrázek 11 Konečné grafické znázornění nehody	53
Obrázek 12 Strom poruch pro celkové prasknutí kolena.....	64
Obrázek 13 Strom poruch pro částečné prasknutí kolena.....	65
Obrázek 14 Strom událostí pro celkové prasknutí kolena	66
Obrázek 15 Strom událostí pro částečné prasknutí kolena	67
Obrázek 16 Strom poruch pro celkové prasknutí kolektoru	74
Obrázek 17 Strom poruch pro částečné prasknutí kolektoru	74
Obrázek 18 Strom událostí pro celkové prasknutí kolektoru	75
Obrázek 19 Strom událostí pro částečné prasknutí kolektoru	75
Tabulka 1 Složení pyrolyzních plynů	28
Tabulka 2 Popis produktů výroby[1]	32
Tabulka 3 Matice faktů a hypotéz.....	41
Tabulka 4 Analýza kořenových příčin	44
Tabulka 5 Porovnání původního řízení bezpečnosti s vyhláškou č. 227/2015Sb.....	55
Tabulka 6 Základní charakteristiky ethanu a ethylenu	56
Tabulka 7 Počty úmrtí v případě celkového prasknutí kolena při scénáři UVCE	63
Tabulka 8 Výsledky pravděpodobností jednotlivých scénářů pro celkové prasknutí kolena ..	67
Tabulka 9 Výsledky pravděpodobností jednotlivých scénářů pro částečné prasknutí kolena ..	67
Tabulka 10 Základní charakteristiky propanu a propylenu.....	68
Tabulka 11 Počty úmrtí v případě celkového prasknutí kolektoru při scénáři UVCE.....	73
Tabulka 12 Výsledky pravděpodobností jednotlivých scénářů pro celkové prasknutí kolektoru	76
Tabulka 13 Výsledky pravděpodobností jednotlivých scénářů pro částečné prasknutí kolektoru	76
Tabulka 14 Přijatelnost jednotlivých scénářů pro celkové prasknutí kolena	80
Tabulka 15 Přijatelnost jednotlivých scénářů pro částečné prasknutí kolena.....	81
Tabulka 16 Přijatelnost jednotlivých scénářů pro celkové prasknutí kolektoru	82
Tabulka 17 Přijatelnost jednotlivých scénářů pro částečné prasknutí kolektoru	83

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

°C = stupeň Celsia

ata = atmosféra technická absolutní

atp = atmosféra technická přetlaku

CH₄ = methan

C₂H₄ = ethylen

C₂H₆ = ethan

C₃ = propan-propylenová fáze

C₄ = butylenová fáze

C₄H₁₀ = butan

C₅ = pentan

CCPS = Center for Chemical Process Safety = Centrum pro bezpečnost chemických procesů

CF = causal factor = příčinný faktor

ČIŽP = Česká inspekce životního prostředí

ČSN = československá státní norma

ČSSR = Československá socialistická republika

(g) = plyn

H₂ = vodík

H₂S = sulfan

HZS = Hasičský záchranný sbor

IOI = International Oil Insurers = sdružení pojišťoven petrochemického průmyslu

ITPM = inspections, tests and preventive maintenance = prohlídky, zkoušky a preventivní údržba

IZS = Integrovaný záchranný sbor

Js = jmenovitá světlost

kg = kilogram

kp/cm² = kilopound na centimetr čtvereční

(l) = kapalina

m = metr

m/m = hmotnostní

mm = milimetr

MPa = megapascal

NaOH = hydroxid sodný

n.p. = národní podnik

RCA = Root Cause Analysis = Analýza kořenových příčin

RBPS = Risk-based process safety = Bezpečnost procesu založena na riziku

t = tuna

TNT = 2,4,6-trinitrotoluen

UVCE = výbuch neohraničeného oblaku plynu

VŠCHT = Vysoká škola chemicko technologická

ÚVOD

V roce 1974 došlo v Záluží u Litvínova k výbuchu a masivnímu požáru ve výrobě syntetického lihu. Tato nehoda si vyžádala celkem 17 mrtvých a 129 zraněných.[1] Jedná se tak o nejtragičtější průmyslovou katastrofu v naší historii. Jako viníci byli tehdy určeni pracovníci údržby, přičemž tři z nich byli odsouzeni k trestům odnětí svobody.[2]

Jelikož letos uběhlo 50 let od katastrofy, a místo katastrofy se nachází přibližně 20 km od mého bydliště, připadla mi možnost vytvořit moderní pohled na tuto nehodu jako zajímavé téma pro diplomovou práci. Prvním cílem této práce je pokusit se získat dostupné informace o původní nehodě a tehdejších závěrech vyšetřování. Na základě získaných informací je dalším krokem pokusit se analyzovat nehodu pomocí moderních vyšetřovacích metod za účelem hlubšího prozkoumání příčin vzniku. Tyto výsledky budou následně porovnány s původními závěry vyšetřování a pokusíme se zjistit, zda se opravdu jednalo pouze o pochybení zaměstnanců údržby, jak zní původní závěr vyšetřování, a nebo zda na pozadí nehody stojí souhrn hlubších příčin, jejichž spojením vznikla nejtragičtější průmyslová nehoda v naší historii. V závěrečné části se chci zaměřit na moderní postupy analýzy možných následků průmyslových nehod a pomocí vypočtených výsledků zjistit, zda by v dnešní době podle současných standardů v oblasti průmyslové bezpečnosti bylo možné zkoumanou technologii postavit, případně zda z dnešního pohledu výrobní zařízení nesplňuje bezpečnostní standardy a proto by muselo být upraveno.

1 TEORETICKÁ ČÁST

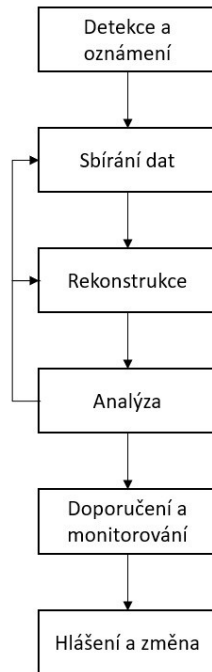
1.1 Řízení bezpečnosti

Řízení bezpečnosti je jedním z primárních úkolů každého podniku. Oproti minulosti, kdy se řízení bezpečnosti opíralo čistě o zákony a pravidla vytvořené na základě zkušeností, je cílem moderního řízení bezpečnosti aktivně fungovat pomocí systému analýz. Jedná se o analýzy zaměřené na prognózy v podobě zkoumání rizik, retrospektivní analýzy v podobě rozboru nehod, a analýzu struktury bezpečnosti. Spojením těchto analýz vzniká řízení bezpečnosti a standardizované postupy v rámci bezpečnosti, které se běžně používají. Mezi organizace, které vydávají bezpečnostní postupy a doporučení patří například Centrum pro bezpečnost chemických procesů (CCPS) z USA, které se zaměřuje na oblast chemického a výrobního průmyslu. Souhrn různých opatření, která mají za úkol analyzovat a zajišťovat bezpečnost jednotlivých výrobních zařízení se označuje jako systém řízení bezpečnosti. Základní body tohoto systému popisují například publikace ze zmíněného Centra pro bezpečnost chemických procesů nebo Evropská legislativa.[3]

1.2 Analýza nehod

1.2.1 Úvod do analýzy nehod

Každá nežádoucí událost se může stát zdrojem cenných informací ohledně možností zlepšení bezpečnosti. Analýza nežádoucí události však musí být provedena tak, aby její výsledky byly konzistentní a dokumentovatelné. K provedení příslušné analýzy je nutné jako první posbírat všechna data. Tato data slouží k vytvoření možných hypotéz příčin události.[4] Obecný postup analýzy nežádoucí události znázorňuje Obrázek 1.



Obrázek 1 Postup při analýze nežádoucí události [4]

Jak znázorňuje Obrázek 1, postup vyšetřování události není vždy pouze jedním směrem. Postupně dochází k upřesňování a odhalování nových skutečností, proto dochází k návratům na předchozí body a jejich úpravám. První myšlenku ohledně vlastního poučení z nežádoucích události představil v roce 2001 Trevor Kletz. Kletzův přístup pro poučení z nežádoucích události se skládá ze tří částí. Nejprve je nutné, aby došlo k bezprostředním technickým změnám, které by zabránily opakování incidentu. Následuje kontrola dalších zařízení, aby došlo k odstranění podobných bezpečnostních závad i jinde. Posledním bodem Kletzova postupu je zlepšení systému řízení, jelikož vznikem nežádoucí události došlo k jeho selhání, a tím zabránit vzniku dalších nežádoucích incidentů.[4]

K analýze nežádoucích událostí lze použít tři modely přístupu k vyšetřování. Prvním přístupem je postup sekvenční, druhým je postup epidemiologický a poslední je postup systémový. Sekvenční přístup využívá diagramy. Tyto diagramy popisují chronologický vývoj události a jejich cílem je stanovení příčinných faktorů, přičemž jako příčinné faktory lze popsat nežádoucí událost nebo stav, který pokud by byl odstraněn, k nežádoucímu incidentu by nedošlo. Naopak systémový postup pracuje s cílem stanovit všechny kořenové příčiny, jejichž rozvoj vedl až ke vzniku nežádoucí události. Spojením obou lze získat takzvaný Integrovaný postup pro analýzu příčin, známý pod zkratkou IPICA.[4]

1.2.2 Analýza kořenových příčin

Analýza kořenových příčin (RCA) je jedna z metod, které se využívají při vyšetřování nehod a nežádoucích událostí. Hlavním cílem metody je odpovědět na dvě základní otázky. Jak se nežádoucí událost stala? Proč se nežádoucí událost stala? Bez těchto znalostí nelze vypracovat doporučení k zabránění opakování. Při analýze je nutné se nezastavit u prvního zjištěného problému, avšak pokračovat dále do hloubky. Bez tohoto průniku do větší hloubky problému není možné efektivně zabránit opakování incidentu. Nejhlubší příčina vzniklého problému se označuje jako kořenová. Definice kořenové příčiny není pevná a je možné najít jich několik. Obecně je lze definovat tak, že je to vždy základní příčina události. Tyto příčiny mohou být rozumně a spolehlivě identifikovatelné, management může příčiny ovlivnit (je to naše chyba), a lze na konkrétní příčiny aplikovat konkrétní nápravná opatření. Analýza kořenových příčin se skládá se čtyř kroků. Prvním krokem je posbírání všech potřebných dat, pomocí těchto dat je možné sestavit mapu příčinných faktorů.[5] Mapa se tvoří od konce. Známe tedy co se stalo a jaký měl incident následky. Od tohoto známého výsledku se následně postupuje přes souběh událostí předcházející incidentu až k úplnému počátku řetězce událostí.[6] Z této mapy následně určíme kořenové příčiny a navrhneme vylepšení. Výsledky jsou pro větší přehlednost uváděny v tabulce. První sloupec tabulky obsahuje obecný popis příčinného faktoru, druhý sloupec popisuje cestu skrz mapu kořenových příčin a třetí sloupec obsahuje doporučení na zlepšení.[5]

Analýzu kořenových příčin lze rozdělit do dvou kategorií. Kategorie A používá k vypracování logické stromy, naopak metoda B používá předdefinované stromy. Metoda B je velice rozšířená v průmyslové praxi. Na druhou stranu jsou metody analýzy kořenových příčin, a to primárně metoda B využívající předdefinované stromy, podrobovány značné kritice některých akademiků z důvodu subjektivity a tendence soustředit se pouze na některé události. Z tohoto důvodu je snaha o vylepšení metody.[6]

1.2.3 Metoda IPICA

Metoda IPICA představuje vylepšení analýzy kořenových příčin. Vylepšení je zajištěno pomocí předdefinovaných stromů a obsahují čtyři základní myšlenky. První myšlenka říká, že každý nežádoucí incident představuje nedostatek v zasaženém procesu. Druhá myšlenka říká, že procesy a příčiny lze spojit do společné hierarchie, přičemž výše postavené procesy přímo ovlivňují níže postavené. Třetí myšlenka praví, že systém řízení bezpečnosti je možné použít pro všechny procesy. Poslední myšlenkou je, že pokyny CCPS jsou univerzální systém pro

řízení bezpečnosti. Zároveň mohou být tyto pokyny přeměněny do univerzální RBPS mapy kořenových příčin.[6]

Vedle metody analýzy kořenových příčin existuje ještě metoda systémově teoretických modelů nehod a procesů, známý jako STAMP. Tato metoda předpokládá, že za každou nehodu stojí selhání řídicího systému, který adekvátně neodstranil vnitřní nebo vnější poruchy, následkem nedostatečné kontroly nebo špatným prosazováním bezpečnosti. Systém se zde považuje za dynamický celek, který se neustále mění a tomu se musí neustále přizpůsobovat i otázka bezpečnosti.[7]

Následným vylepšením je spojení obou popsaných metod za vzniku metody zvané IPICA. Problém této metody je však skutečnost, že spojuje dvě odlišné metody, proto může být náročná. Proto je snaha o další úpravu a zjednodušení. Tato upravená a zjednodušená metoda se označuje jako IPICA_Lite. Výsledkem je zlepšení původní Analýzy kořenových příčin metodou B v oblasti každodenního používání za cenu částečně vyšší složitosti. Prvním krokem je zdůraznění skutečnosti, že přítomnost kořenové příčiny značí nedostatečnost procesu. Druhým krokem bylo rozdělení příčin do celkem čtyř úrovní, které mají hierarchické postavení. První úroveň se označuje jako implementační a odpovídá příčinným faktorům. Jako příklad lze například uvést špatně provedenou údržbu zařízení. Druhou úroveň představují příčiny organizační, které jsou nadřazené prvnímu stupni. Příkladem je například špatný plán údržby. Třetí úroveň reprezentuje přístup vedení k bezpečnosti samotného provozu, například zda je zřízena a udržována kultura bezpečnosti. Poslední čtvrtou úroveň představuje vliv okolní lidské společnosti, který může mít zásadní vliv na postoje vedení. Na základě zmíněných úprav je možné připravit potřebný strom, který lze následně použít pro analýzy. Zároveň výše postavené úrovně mohou mít vliv na více faktorů na nižších úrovních.[6]

1.3 Analýza rizik

1.3.1 Certifikovaná metodika k analýze a posouzení rizik

Certifikovaná metoda přístupu k analýze a hodnocení rizik průmyslových havárií v rámci jejich prevence byla vytvořena Výzkumným ústavem bezpečnosti práce a firmou TLP na žádost Ministerstva životního prostředí ČR. Popisuje postup k identifikaci zdrojů rizika, následně analýze zjištěných zdrojů rizika a konečně zhodnocení zjištěných rizik. Jednotlivé kapitoly mají stanovené postupy a zadané výpočetní vzorce.[8] Tyto vzorce jsou vypsány níže, včetně popisu jednotlivých členů, a jsou následně využity i v praktické části práce.

$$A = \frac{Q \cdot O_1 \cdot O_2 \cdot O_3}{G} \quad (1)$$

A představuje skutečné nebezpečí vybraného zdroje

Písmeno Q značí hmotnost zjištěné nebezpečné látky v zařízení v kg

Hodnoty O_1 , O_2 a O_3 definují provozní podmínky zařízení

Písmeno G značí maximální přípustnou hmotnost látky v kg

$$S^F = \left(\frac{100}{L}\right)^3 * A \quad (2)$$

S představuje míru rizika pro okolí.

Písmeno L značí vzdálenost jiného zařízení od analyzovaného zařízení v metrech, přičemž nejnižší možná hodnota je 100. Pokud je číslo S větší než 1, je nutné se rizikem zabývat.

Dalším krokem je výpočet celkové frekvence vzniku havárie za jeden rok F_h . K tomuto výpočtu je potřeba znát vypočtené frekvence iniciačních událostí a jednotlivých scénářů, dále pravděpodobnost výskytu osob, pravděpodobnost přítomnosti nebezpečné látky a vliv počasí.

$$F_h = F_S * P_{VNL} * P_{VO} * P_{atm} \quad (3)$$

F_S značí frekvenci vzniku koncového scénáře nežádoucí události, P_{VNL} představuje pravděpodobnost výskytu nebezpečné látky, P_{VO} značí pravděpodobnost výskytu osob a P_{atm} představuje pravděpodobnost výskytu atmosférických podmínek.

Dále je možné vypočítat celkovou míru rizika MR pomocí vzorce

$$MR = F_h * N^2 \quad (4)$$

N představuje možný počet obětí

Z vypočtené frekvence vzniku závažných havárií F_h je možné následně posoudit přijatelnost tohoto rizika pomocí následujícího vzorce. Riziko je považováno za přijatelné, pokud F_h je nižší než F_p .

$$F_p = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{N^2} \quad (5)$$

N představuje opět možný počet obětí havárie.

Pokud dojde ke zjištění, že vypočtená frekvence vzniku je vyšší než přípustná frekvence, je stav zařízení považován za nepřijatelný a je nutné navrhnout a aplikovat odpovídající opatření, které povedou ke snížení frekvence vzniku na přijatelnou úroveň.[8]

1.4 Legislativa a návody

1.4.1 Direktiva Seveso III

Direktiva Seveso III, celým názvem SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2012/18/EU ze dne 4. července 2012 o kontrole nebezpečí závažných havárií s přítomností nebezpečných látek a o změně a následném zrušení směrnice Rady 96/82/ES, je aktuální směrnice platná v EU, která se zabývá prevencí, předcházení a snižování následků velkých průmyslových havárií. Za závažnou nehodu se považuje nehoda s přítomností nebezpečných látek, které vedou k závažnému nebezpečí pro lidské zdraví nebo životní prostředí. Jedná se tedy hlavně o masivní únik nebezpečné látky, požár nebo výbuch. Direktiva zavádí povinnost každého státu zřídit kontrolní orgány. Těmto orgánům bude každý provozovatel spadající pod tuto direktivu povinný poskytnout kompletní informace o závodu, a to včetně přítomnosti nebo možné přítomnosti nebezpečných látek, dále množství těchto látek a také okolní faktory, které by mohly zhoršit případnou havárii, například okolní závody nebo provozy. Konkrétní podobu příslušného zákona si stanoví každý stát samostatně. Tento zákon musí cílit na vysokou úroveň ochrany obyvatel a životního prostředí, zároveň musí zahrnovat cíle a povinnosti pro provozovatele závodů ohledně prevence závažných havárií. Kontrolní orgán stanoví všechny závody, u kterých hrozí riziko závažné havárie. Tyto závody mají následně povinnost vypracovat bezpečnostní zprávu, pomocí které bude potvrzeno, že byla zavedena politika prevence závažných havárií, že byly zjištěná možná rizika a byly provedeny kroky k zabránění těmto haváriím a k omezení případných následků. Dále je ve zprávě zkoumáno vypracování vnitřních havarijních plánů a přiměřená bezpečnost a spolehlivost při návrhu a stavbách uvnitř závodu. V případě stavebních, technologických, výrobních nebo skladovacích změn je nutné v případě potřeby zaslat příslušnému orgánu aktualizovanou verzi.[9]

Každý závod má povinnost vypracovat vnitřní havarijní plány a zároveň poskytnout informace příslušným orgánům pro vypracování vnějších havarijních plánů. Cílem havarijních plánů je omezit následky případných nehod, zajistit informovanost příslušných orgánů a veřejnosti, přičemž dotčená veřejnost musí mít možnost se k havarijním plánům vyjádřit a podat připomínky. Po havárii musí závod zajistit obnovu a vyčištění životního prostředí. Tyto havarijní plány musí být pravidelně přezkoumávány a aktualizovány. V případě územního plánování je nutné brát v potaz přítomnost okolních závodů, které by mohly případně zhoršit

následky havárie a dále veřejné aktivity v okolí. Z toho důvodu je nutné udržovat odpovídající vzdálenost nových závodů od okolních závodů, obytnými oblastmi, ploch sloužících pro veřejnost, dopravních cest a hodnotných oblastí životního prostředí. Osoby, které mohou být zasaženy případnou havárií musí mít přístup k jasným a srozumitelným informacím o tom, jak se adekvátně chovat v případě havárie. K tomu musí být dispozici informace o případných následcích na zdraví a životní prostředí v případě havárie. V případě, že se závod nachází v pohraniční oblasti a případné následky závažné havárie by mohly zasáhnout na území cizího státu, je stát, ve kterém je umístěn dotyčný závod, povinen informovat sousední stát o případných následcích, aby mohl sousední stát vypracovat odpovídající opatření. Veřejnost musí mít možnost se vyjádřit ke stavbě nových závodů, významné změně stávajících závodů nebo rozvoji dalších aktivit, které mohou případně zhoršit následky havárie.[9]

Pokud dojde k podniku k závažné havárii, je provozovatel povinný uvědomit příslušný státní orgán ohledně okolností havárie, přítomnosti nebezpečných látek, následcích na životy a životní prostředí, o přijatých havarijních opatřeních, o plánech k omezení střednědobých a dlouhodobých následků a opatření k zamezení opakování havárie. Příslušný orgán musí zajistit aktivaci všech nezbytných opatření, zajistí pomocí kontrol a vyšetřování informace k porozumění příčin havárie. Zajistit kontrolu, zda provozovatel provedl všechna nezbytná opatření, vypracovat opatření na budoucí prevenci a informovat příslušné osoby o vzniku havárie. Po závažné havárii musí každý členský stát informovat Komisi o závažných haváriích s informacemi o tom, co se stalo, kde se to stalo, stručný popis havárie včetně nebezpečných látek a výsledky analýzy a doporučení. V případě, že některý závod zásadním způsobem nesplňuje požadovaná bezpečnostní opatření, je možné provoz tohoto závodu zakázat. Příslušný orgán také zajistí kontroly dotyčných závodů. Při těchto kontrolách nezávisí na předložených bezpečnostních zprávách, ale je kontrolováno, zda jsou uvedené informace v bezpečnostní zprávě pravdivé, zda byla informována veřejnost, zda jsou zavedena vhodná opatření k zamezení závažným haváriím a zda jsou přijata odpovídající opatření ke zmírnění následků případných havárií. [9]V České republice je direktiva Seveso III aplikována pomocí Zákona č. 224/2015 Sb. o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi a o změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů.[10]

1.4.2 Zákon o prevenci závažných havárií

Zákon o prevenci závažných havárií představuje implementaci direktivy Seveso III do zákonů České republiky. Určuje systém prevence proti závažným haváriím pro objekty obsahující nebezpečné látky s cílem omezit pravděpodobnost a následky případné nehody. Na základě tohoto zákona jsou objekty rozděleny do dvou skupin. Skupina A zahrnuje objekty, ve kterých je uloženo takové množství nebezpečné látky, které je stejné nebo vyšší, než je uvedeno ve druhém sloupci tabulky nebezpečných látek, ale menší než množství uvedené ve třetím sloupci. Dále pak, pokud je vypočtený součet množství látky vyšší než 1. Uvedené tabulky jsou zobrazeny v příloze A. Výpočetní vzorec na určení množství látky:[10]

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{Q_i}$$

N = vypočtený součet množství látky

q_i = množství jednotlivých látek

Q_i = množství nebezpečné látky uvedené ve druhém sloupci tabulky nebezpečných látek pro skupinu A nebo třetím sloupci pro skupinu B

Pokud je uložené množství látky v objektu stejné nebo vyšší, než je množství uvedené ve třetím sloupci tabulky nebezpečných látek, spadá objekt do kategorie B. Stejně tak, pokud je vypočtený součet množství látek roven 1 nebo vyšší.

Na základě množství nebezpečných látek a zadaných hodnot v příslušných tabulkách musí provozovatel určit zařazení objektu do příslušné kategorie a následně zaslat příslušnému krajskému úřadu žádost o jeho zařazení. Tuto žádost musí provozovatel zaslat nejpozději 1 měsíc od doby, kdy množství látky nebo látek překročí množství uvedená v tabulkách. Krajský úřad na základě žádosti zařadí objekt do příslušné skupiny a provozovatel musí poskytnout určený počet kopií návrhu bezpečnostního programu prevence závažných havárií. Počet kopií záleží na množství dotčených orgánů a obcí. Zároveň příslušný krajský úřad určí okolní objekty, ve kterých by v případě havárie mohlo dojít k domino efektu. Pokud dojde k objektu ke změně, která si vyžaduje přesunutí do jiné kategorie, je provozovatel povinen do 1 měsíce od změny množství nebezpečné látky tuto skutečnost nahlásit s návrhem na přeřazení do druhé skupiny. Stejně tak pokud dojde k ukončení provozu nebo poklesu množství látky pod limitní množství pro zařazení do skupin, je provozovatel povinen tuto skutečnost do 1 měsíce ohlásit příslušnému úřadu.[10]

Provozovatel objektu zařazeného ve skupině A nebo B musí v rámci přípravy bezpečnostní zprávy nebo bezpečnostního projektu provést identifikaci zdrojů rizika v objektu, jejich analýzu a hodnocení.[10]

Pokud je objekt zařazen do skupiny A, je provozovatel povinný vypracovat bezpečnostní program. Tento bezpečnostní program musí obsahovat základní informace o dotyčném objektu, posouzení přítomných rizik, které mohou způsobit závažnou havárii, dále popis řízení bezpečnosti včetně konkrétních zásad a cílů v prevenci závažných havárií. Zároveň musí program zahrnovat preventivní opatření proti vzniku domino efektu a závěr. Na vypracování tohoto projektu má provozovatel lhůtu 6 měsíců od rozhodnutí o zařazení objektu do skupiny A. Po schválení programu je provozovatel povinný tento program každých 5 let přezkoumat. Pokud by byla zjištěna potřeba tento program aktualizovat, je nutné tak učinit do 6 měsíců od zaslání oznámení o provedení přezkoumání na příslušný krajský úřad.[10]

V případě zařazení objektu do skupiny B je provozovatel povinný vypracovat bezpečnostní zprávu. Tato vypracovaná zpráva musí obsahovat základní popis objektu a jeho technický popis, informace o okolním životním prostředí, posouzení rizika vzniku závažné havárie, popis řízení bezpečnosti včetně konkrétních bezpečnostních zásad a cílů, zavedená preventivní opatření, závěr a jmenný seznam osob a subjektů, kteří se na vypracování zprávy podíleli. Zpráva zároveň musí obsahovat zásady bezpečnosti a spolehlivosti vzhledem ke zjištěným rizikům, zásady vnitřního havarijního plánování a zajištění adekvátního informování okolních obcí. Návrh bezpečnostní zprávy musí být zaslán krajskému úřadu do 9 měsíců od zařazení objektu do skupiny B. Stejně jako v případě objektů ve skupině A musí být nejpozději po 5 letech provedeno přezkoumání bezpečnostní zprávy. Pokud dojde ke zjištění nových skutečností, je možné provést kdykoliv. V přezkoumání musí být uvedeny všechny změny od posledního přezkoumání, seznam provedených změn v oblasti bezpečnosti a usnesení, zda je nutné provést aktualizaci zprávy nebo ne.[10]

V případě změn v objektu je nutné aktualizovat příslušnou bezpečnostní zprávu nebo bezpečnostní program nejpozději do 6 měsíců od změny. Mezi tyto změny patří změna množství nebezpečných látek o více než 10 % od momentálního množství, změna bezpečnosti nebo technologie a změna řízení.[10]

Provozovatel musí postupovat v souladu s programem nebo zprávou a zároveň musí zajistit proškolení zaměstnanců.[10]

V rámci zmírnění případných následků závažné havárie provozovatel vypracuje vnitřní havarijní plán. Tento plán obsahuje seznam osob pověřených realizací preventivních bezpečnostních opatření, popis možných krizových scénářů včetně reakcí na jednotlivé scénáře a možné následky. Dále seznam činností pro zmenšení následků havárie, ochranné prostředky, způsob informování o mimořádné události, výcvikové plány, opatření ke zmírnění následků a seznam složek IZS, které se budou podílet na případné likvidaci havárie. Jako další musí být vypracován postup pro zabránění domino efektu, zajištění odpovídajícího školení zaměstnanců a seznam dokumentů pro zvládání mimořádné události. Na vypracování vnitřního havarijního plánu má provozovatel 3 měsíce od schválení bezpečnostní dokumentace. Revize vnitřního havarijního plánu musí proběhnout minimálně každé 3 roky. V případě změn musí být revize provedena okamžitě a odeslána krajskému úřadu do 1 měsíce od provedení změn.[10]

V případě objektů kategorie B musí být vedle vnitřního havarijního plánu vypracován také vnější havarijní plán. V rámci toho plánu spolupracuje provozovatel s krajským úřadem, okolními institucemi a HZS na zajištění prevence, výchovy a přísunu informací. Provozovatel také musí vypracovat podklady pro stanovení zón havarijního plánování. Tyto podklady musí obsahovat informace o provozovateli, o osobě vypracovávající podklady, popis možných závažných havárií v objektu a jejich možných následků, seznam a popis prostředků k odstranění následků, přehled bezpečnostních opatření, postup k podpoře odstranění následků mimo objekt a další údaje vyžadované krajským úřadem a HZS. Na základě této zprávy vypracuje krajský úřad havarijní zóny a do 2 let od stanovení zón vypracuje HZS vnější havarijní plán, který následně každé minimálně 3 roky reviduje.[10]

V případě vzniku závažné havárie je provozovatel povinný okamžitě tuto skutečnost ohlásit příslušným úřadům. Mezi tyto úřady se řadí krajský úřad, báňský úřad, ČIŽP, IZS a dotčené obce. Do 24 hodin od vzniku závažné havárie musí provozovatel zpracovat zprávu o vzniku závažné havárie, na kterou později navazuje konečná zpráva o vzniku a dopadech závažné havárie, včetně postupů a opatření k zabránění opakování. Konečná zpráva musí být zpracována do 3 měsíců od havárie. Pokud dojde následně ke zjištění nových skutečností, je nutné tuto konečnou zprávu aktualizovat. Konečnou zprávu musí schválit příslušný krajský úřad, který následně ve spolupráci s HZS navrhne provozovateli doporučení pro budoucí preventivní opatření. [10]

1.4.3 Vyhláška č.225/2015 Sb.

Vyhláška č. 225/2015 Sb. představuje rozšíření zákona č. 224/2015 Sb. o prevenci závažných havárií. Konkrétně upravuje náležitosti, které se týkají obsahu posouzení rizik vzniku závažné havárie, obsah bezpečnostních programů, záznamy o přezkoušení a obsah podkladů pro zóny havarijního plánování. Dále také upravuje návrh bezpečnostních dokumentů a okruh informací obsažených v těchto dokumentech.[11]

Povinnost posuzování rizik havárie je povinné provádět po celou dobu životnosti objektu a pro běžné i mimořádné pracovní podmínky. Je nutné identifikovat možné zdroje rizika, která mohou vyústit ve vznik závažné havárie, včetně určení scénářů, následků, četnosti výskytu, míry rizik a určení přijatelnosti rizik.[11]

Bezpečnostní program musí obsahovat identifikaci výrobního objektu a provozovatele, osobu zodpovědnou za vypracování programu, popis činností a zaměstnanců, přezkoumání předchozích nežádoucích událostí a popis konkrétních nápravných opatření. Zásady a cíle prevence vychází z posouzení rizik a musí obsahovat konkrétní úkoly k naplnění zásad prevence havárií.[11]

Soubor plánování, rozhodování, organizace, řízení, koordinace, motivace, informování, kontrol a vyhodnocování se celkově označuje jako systém řízení bezpečnosti. Systém řízení bezpečnosti musí obsahovat vedle charakteristiky systému také údaje k zaměstnancům a jejich řízení, dále řízení provozu a změn, havarijní plánování, hodnocení plnění cílů a auditů.[11]

Osoba, která má za úkol vypracovat bezpečnostní posudek může požadovat informace použité k vypracování bezpečnostní dokumentace, zdroj použitých meteorologických dat, zdroje a data o počtu obyvatel v okolí, informace o vnitřním havarijním plánu, dokumenty potvrzující proškolení zaměstnanců o možných rizicích a jak rizika omezit, informace o projednávání předchozích nežádoucích událostí a dokumenty sloužící jako základ pro analýzy.[11]

Vnitřní havarijní plán musí obsahovat popis přípravy na nežádoucí události, jejich zvládnutí, postup sledování následků a likvidace zamoření a způsob dokumentace změn a aktualizací.[11]

1.4.4 Metoda HAZOP

Metoda HAZOP spočívá v systematické analýze výrobního zařízení. Cílem je odhalit možná rizika zkoumaného provozu a určit možný rozvoj těchto odhalených rizik vedoucích až ke vzniku nežádoucích událostí. Po získání výsledků je možné připravit vhodná nápravná opatření. Jedná se o týmovou metodu, které se účastní lidé různých profesí pro co nejširší pokrytí znalostí

a zkušeností. Pro lepší systematicčnost a pro pomoc při vytváření možných scénářů jsou používána návodná slova. V případě vzniku nežádoucí události je povinné před opětovným spuštěním zařízení vykonat analýzu metodou HAZOP.[12]

1.4.5 Metoda FMEA

Metoda FMEA představuje systematickou metodu analýzy s cílem identifikovat v procesu možné selhání nebo poruchy a zároveň stanovit možné následky. Metodu FMEA je možné použít pro posouzení technické stránky, systému řízení nebo lidských zásahů.[13]

1.4.6 Metoda FTA

Poslední jmenovanou metodou je metoda FTA neboli analýzy pomocí stromu poruch. Metoda spočívá v analýze možných menších příčin, které mohou následně ve vzájemné kombinaci vyústit ve vznik větší události.

Metoda FTA má dvě oblasti využití. První je kvalitativní analýza, při které není cílem stanovit pravděpodobnost vzniku větší události, avšak slouží k nalezení možných vzájemných interakcí a vzájemné provázanosti menších příčin, které mohou vyústit ve větší událost. Častější je druhý, kvantitativní přístup. V tomto postupu je opět cílem stanovit vzájemnou provázanost menších událostí vedoucích ve výsledku ke vzniku větší události, avšak při tomto postupu již ke každé události přiřazujeme konkrétní číselnou hodnotu pravděpodobnosti vzniku. Výsledkem je tedy mimo stromu vzájemné provázanosti také konkrétní pravděpodobnost vzniku událostí.[14]

1.4.7 Metoda Multi Energy

Multi Energy je používaná metoda v oblasti výpočtů následků výbuchu plynné směsi paliva a vzduchu. Na rozdíl od ostatních metod se tato metoda zaměřuje primárně na vliv prostředí, ve kterém dochází k výbuchu, konkrétně na vliv přítomných překážek v hořlavém oblaku a přítomnost uzavřených míst ohraničených například pomocí zdí. Zároveň je dnes známý fakt, že v naprosté většině výbuchů plynných směsí paliva a vzduchu dochází ke vzniku deflagrace. Detonace plynné směsi paliva se vzduchem je velice vzácná. I výbuch v podobě deflagrace však může způsobit závažné následky pro okolí. Obecně používaná hodnota uvolněné energie je $3,5 \text{ MJ/m}^3$, jelikož tuto energii má většina stechiometrických směsí uhlovodíků a vzduchu. Výpočty se využívají k určení dopadajícího přetlaku, dopadajícího dynamického přetlaku a k výpočtu doby trvání přetlakové fáze, z čehož je následně možné vypočítat přetlakový impulz. Základní informací pro výpočet pomocí Multi Energy je objem hořlavé plynné směsi se vzduchem a umístění tohoto oblaku v prostoru, včetně množství a umístění překážek. K přechodu hoření oblaku plynu do výbuchu v podobě deflagrace, případně velmi vzácně

detonace, je nutný vznik turbulencí uvnitř hořícího oblaku nebo jeho alespoň částečné zablokování vlivem například zdí nebo budov. V případě Multi Energy se uvažuje celkový výbuch oblaku jako soubor dílčích výbuchů, které vznikly v místech s potřebným utěsněním nebo potřebnými turbulencemi.[15]

1.4.8 Metoda IOI

Metoda IOI byla vytvořena jako jednoduchý postup pro hodnocení následků nežádoucích událostí v prostředí s výskytem hořlavých látek, typicky pro oblast petrochemie. Je široce využíván pojišťovny k ocenění nejvyšších možných škod. Lze použít pro scénáře výbuchu oblaku plynu, Pool fire a vnitřní výbuch. Jedná se o empirickou metodu, která je založena na reálných zkušenostech z velkého množství reálných nežádoucích událostí. K provedení analýzy není zapotřebí velkého množství vstupních údajů.[16]

Nejnebezpečnější scénář představuje výbuch oblaku plynu. Důvodem je velké množství hořlavé látky tvořící oblak, které vede k uvolnění velkého množství energie. Dále nedochází k utlumení výbuchu stavbou jako v případě vnitřního výbuchu. Zároveň výbuch oblaku plynu může způsobit vznik sekundárních škod vlivem vzniku druhotných požárů z poškozených nebo zničených provozů a zásobníků. Toto druhotné poškození může být ve výsledku zodpovědné za většinu celkových škod vzniklých při havárii. Na vzniku výbuchu oblaku plynu se podílí několik faktorů, primárně se jedná o vliv turbulencí způsobených přítomností různých překážek, které vedou k míchání a urychlování plamene.[16]

Ke vzniku výbuchu oblaku plynu je potřebný určitý čas a velikost oblaku, aby mohlo dojít k dostatečnému urychlení plamene. Nejlepší předpoklady pro výbuch mají stechiometrické směsi paliva se vzduchem. Vliv má také forma úniku hořlavé látky do okolí. Například v případě úniku přehřáté kapaliny dochází k okamžitému adiabatickému varu. Páry vzniklé varem strhávají kapičky zbývající kapaliny za vzniku aerosolu. Vlivem vzniku aerosolu dochází k nárůstu množství látky unikající do vzduchu na přibližně dvojnásobek množství, které přešlo do plynného stavu adiabatickým varem. Zároveň přítomnost kapiček vede ke zvýšení hustoty oblaku a držení oblaku u země.[16]

Z hlediska ocenění možných škod metoda používá vytvoření bloků. Každý blok by měl být homogenní z hlediska hustoty ceny (cena na plochu). Pokud by tato koncentrace nebyla dostatečně homogenní, je možné jednotlivé větší bloky dělit do menších celků.[16]

Na začátku analýzy je potřeba definovat takzvané diskrétní okruhy. V praxi se jako diskrétní okruh často bere konkrétní výrobní jednotka. Pro případné rozdělení na více okruhů záleží na

přítomnosti a způsobu řízení provozních ventilů, přičemž jeden diskrétní okruh může procházet skrz více vytvořených bloků. Po definování diskrétních okruhů je dalším krokem najít zdrojové členy případné nežádoucí události.[16]

Vedle samotného množství hořlavých látek je důležitým faktorem také umístění a z toho plynoucí vzdálenost od bloků, hlavně od bloků s vysokou cenovou hustotou. Pro posouzení vzniklých škod jsou vytvořeny tři pásma škod. Vnitřní zóna je označena jako zóna 100 %. V této oblasti je předpokládána naprostá destrukce všech budov. Následuje zóna 80 %, kde se předpokládají 80% škody na budovách a poté zóna 40% škod. V případě zásobníků se i v případě umístění v zóně 80% škod počítá s jejich kompletním zničením vlivem sekundárního požáru. Pro obytné domy platí předpoklad totální destrukce i v případě zóny 40% škod z důvodu předpokládané nižší odolnosti v porovnání s průmyslovými stavbami.[16]

K vytvoření okruhů slouží předpoklad korekce škod s obsahem hořlavých látek v rozmezí 1 – 100 tun. Únik v množství nad 100 tun v průmyslovém objektu je velice vzácná událost a je mimo rozsah této metody. Metoda používá definovanou tabulku porovnávající množství uniklé látky s okruhy pro konkrétní škody. Vedle běžných hořlavých látek metoda používá také dvě skupiny vysoce hořlavých látek, přičemž každá skupina obsahuje tabulku látek, které do každé kategorie spadají. Konkrétně se jedná o skupinu ethylenu a ethylenoxidu. U těchto skupin látek se předpokládají vyšší škody a proto má každá skupina svou vlastní tabulku porovnávající uniklé množství a okruhy škod. V případě, že se v zařízení nachází směs látek, ve které jsou alespoň 3 molární procenta některé z látek, jenž jsou uvedeny v tabulkách zvýšeného rizika pro skupiny ethylenu nebo ethylenoxidu, pak se na celé množství nahlíží jako na látku zvýšeného rizika a zóny se tvoří pomocí příslušné tabulky pro skupinu ethylenu nebo ethylenoxidu.[16]

Dále je nutné počítat s možným pohybem středu vzniklého oblaku před jeho iniciací. Jako horní limit tohoto posunu oblaku před jeho iniciací se považuje buď hranice 180 m od místa úniku a nebo hranice 40% poškození, přičemž se použije menší hodnota.[16]

Na základě informací, které jsou dostupné v Green Book[17] jsou při analýze následků použity následující předpoklady. Počet obětí závisí na stupni poškození oblasti. V oblasti, kde škoda dosahuje 100 % se předpokládá, že dochází k úmrtí všech přítomných osob bez ohledu na skutečnost, zda se osoby nachází uvnitř budov nebo mimo budovy. U druhé oblasti, kde škody dosahují 80 %, je uvažováno úmrtí 25 % osob, které se nachází v budovách. U osob mimo budovy se úmrtí nepředpokládá. V poslední oblasti, kde škody dosahují hodnoty 40 % se uvažuje přežití všech osob mimo budovy a úmrtí 5 % osob v budovách. Tyto předpoklady jsou

použity i v případě určení počtu obětí osob v dopravních prostředcích mimo areál podniku, tedy že v 80% zóně škod dojde k úmrtí 25 % osob v automobilech a MHD. Ve 40% zóně škod dojde k úmrtí 5 % osob v automobilech a MHD.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část práce vychází ze skutečné průmyslové nehody, která se odehrála 19.7.1974 v Záluží u Litvínova ve výrobě syntetického lihu. Část praktické části je zaměřena na popis havarované technologie, původní vyšetřování a určení příčiny havárie. Zbytek je zaměřen na doplnění původních postupů a metod o moderní pohled na vyšetřování nehody a moderní pohled na analýzu rizika, což dohromady tvoří základ pro systém řízení bezpečnosti havarované jednotky.

Všechny informace týkající se havárie, popisu havarovaného zařízení a znaleckých posudků byly nalezeny v Archivním fondu odboru vyšetřování VB Krajské správy SNB Ústí n. L. pod sign. L 1-10, i.č. 110 v depozitáři v Kanicích v rozsahu balíků č. 36-61.

2.1 Výrobní technologie

Dělení pyrolyzních plynů sloužilo k dělení pyrolyzních plynů na jednotlivé složky, přičemž největší důraz byl kladen na produkování kvalitního ethylenu. Pyrolyzní plyn byl získáván ze tří pyrolyzních pecí na benzín, dvou pyrolyzních pecí na plyn a dvou pyrolyzních pecí ethanu. Oba proudy pyrolyzních plynů byly vedeny přes pračku plynů obsahující roztok NaOH za účelem odstranění H₂S a částečně také organických sloučenin síry. Složení pyrolyzních plynů znázorňuje Tabulka 1[1]. Část výroby před nehodou zobrazuje Obrázek 2.

Tabulka 1 Složení pyrolyzních plynů

Obsažené složky	Složení plynu z pyrolýzy benzínu [m/m]	Složení plynu z pyrolýzy plynů [m/m]
vodík	0,5 %	2,9 %
methan	17,1 %	14,7 %
ethan	10,6 %	26,9 %
ethylen	22,8 %	33,8 %
acetylen	0,1 %	/
propan	2,4 %	0,4 %
propylen	21,3 %	9,8 %
butan	1,9 %	0,2 %
butyleny	7,0 %	2,8 %
butadieny	2,2 %	/
vyšší uhlovodíky	14,1 %	8,5 %



Obrázek 2 Výroba syntetického lihu před nehodou, v popředí budova kompresorovny, následují rektifikační kolony a vlevo v pozadí budova ethylbenzenu[18]

Odsířený plyn putoval skrz jižní stěnu kompresorovny potrubím o Js 800 do centrálního odlučovače, ze kterého pokračoval do kolektoru sání 1. V kolektoru 1 docházelo k jeho kompresi, ochlazení a odloučení kapalně fáze v odlučovači 1. Plynná fáze dále pokračovala do kolektoru sání 2 a stejným postupem jako v případě okruhu 1 byl plyn dále zpracováván až do okruhu 4. Odloučené kapalně fáze byly vedeny protiproudě zpět do centrálního odlučovače. Pyroplyn se smísil s vratným tlakovým plynem z přímé hydratace a putoval jako nástřík do kolony těžké frakce. Zde docházelo k oddělení části frakce propan-propylen a těžších frakcí, které odcházely spodem do depropanisační kolony. Lehčí frakce a část frakce propan-propylen odcházela vrchem kolony na sušení plynů a následně sloužila jako nástřík do kolony propanového refluxu, který zajišťoval zpětný tok do kolony těžké frakce. Hlavový produkt z kolony propylenového refluxu se vedl přes kondenzátory, kde docházelo k částečně kondenzaci propan-propylenové fáze. Plynná fáze pokračovala na rektifikaci. Těžší frakce odcházela jako nástřík do depronisační kolony, kde se oddělila fáze propan-propylen od těžších uhlovodíků. Propan-propylenová fáze se kondenzovala a následně sloužila částečně jako zpětný tok do depronisační kolony a dále jako výrobní surovina. Zbytek z depronisační kolony putoval jako nástřík do butylenové kolony, odkud oddělená butylenová fáze putovala po kondenzaci do

zásobní nádrže, odkud se odebírala jako výrobní surovina a jako zpětný tok do butylenové kolony. Destilační zbytek sloužil jako výrobní surovina. Pro zajištění dostatečné čistoty propan-propylenové fáze byla jedna z kolon propanového refluxu použita jako deethanisátor, kde docházelo k čistění propan-propylenové fáze od ethanu.[1]

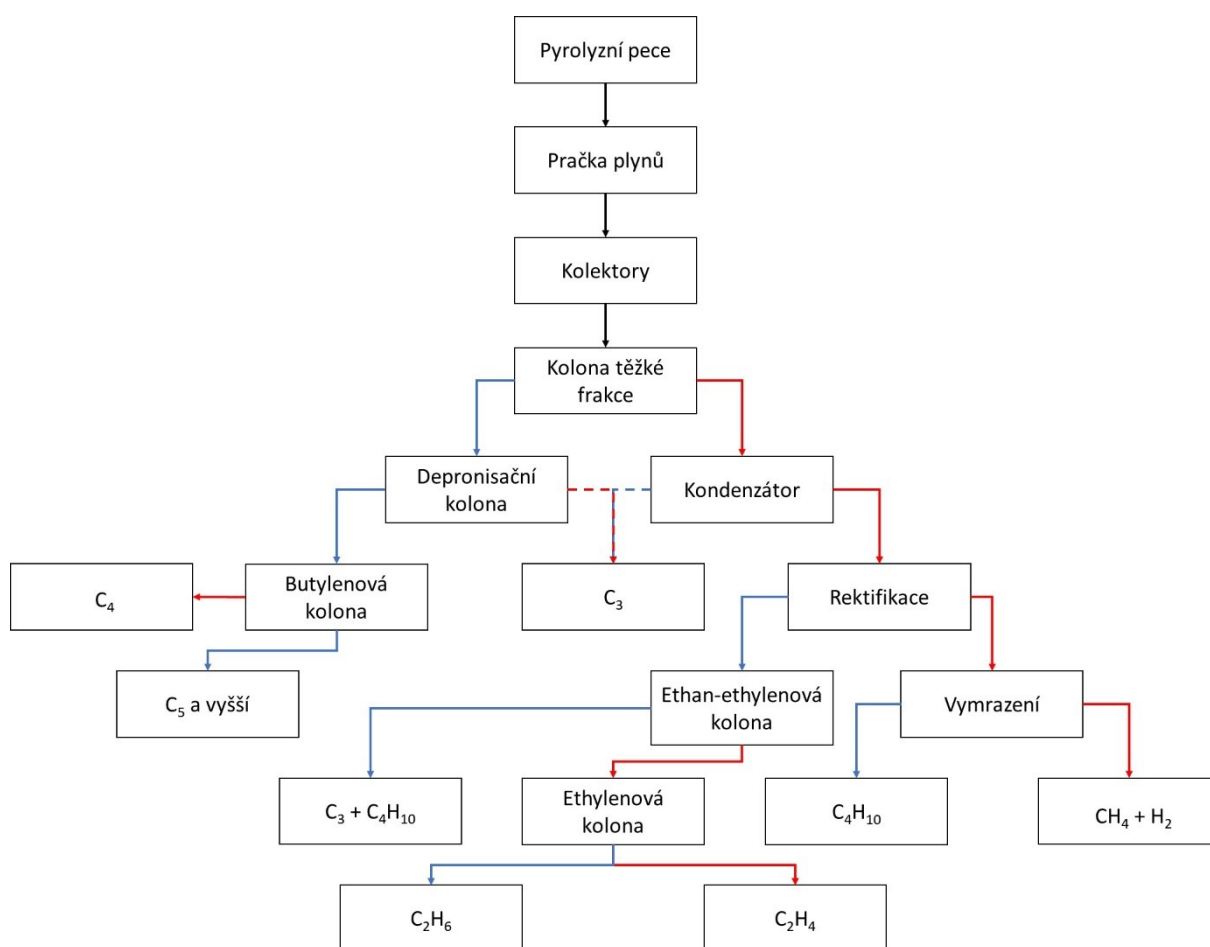
Upravený vysušený plyn se rozdělil na dva proudy a putoval do dvou rektifikačních linek. V první lince „a“ byl udržován konstantní průtok. V lince „b“ byl průtok řízen pomocí úpravy tlaku na výstupu z úpravny plynů. Plyn vstupoval do středu absorpční kolony, kde byl zkrápěn kapalným butanem. Nastavením teploty v horní a dolní části kolony bylo možné upravovat množství propan-propyleny a ethan-ethyleny zachyceného v butanu. Horní část kolony vystupovala methanovodíková fáze kontaminovaná butanem, který se následně ze směsi vymrazil a vracel se k dalšímu použití. Absorbent nasycený propan-propylenovou a ethan-ethylenovou fází putoval jako nástřik do ethan-ethylenové kolony, kde se oddestilovala směs ethanu a ethyleny, která se ochladila, částečně zkondenzovala a následně putovala jako zpětný tok do ethan-ethylenové kolony a jako nástřik do ethylenové kolony. V ethylenové koloně se jako destilát získával ethylen v požadované čistotě. Získaný ethylen se částečně kondenzoval a vedl do nádrže. Z nádrže část proudila jako zpětný tok do ethylenové kolony a zbytek putoval na čištění do budovy přímé hydratace, odkud sloužil částečně jako surovina pro přípravu ethylbenzenu a zbytek jako surovina pro výrobu syntetického ethanolu.[1]

Rozdělení řídil dispečer a bylo prováděno manuálně v budově kompresorovny. Plynný ethan z linky „a“ byl veden přímo na pyrolýzu. Z linky „b“ se vedl nejprve do kompresorů a až poté na pyrolýzu. Destilační zbytek z ethan-ethylenové kolony tvořil butan nasycený směsí propan-propyleny a částečně ethanem. Ten byl nástřikován zpět do propan-propylenové kolony, kde docházelo k regeneraci absorbentu. Oddestilovaná směs ethanu a propan-propyleny se kondenzovala, ukládala v nádrži a sloužila částečně jako zpětný tok do propan-propylenové kolony a jako nástřik do deethanisátoru v úpravně plynů. Regenerovaný absorbent je veden zpět do nádrže.[1]

Chlazení v provozu bylo zajištěno pomocí soustavy turbokompresorů, kondenzátorů, výparníků a odlučovačů. Chladicím médiem byla propan-propylenová směs. Celkem byly k dispozici tři chladicí okruhy. První okruh zajišťoval chlazení na teplotu okolo -30 °C, druhý okruh teplotu okolo -15 °C a pro teplotu okolo 8 °C také druhý chladicí okruh, přičemž výsledná teplota byla řízena pomocí řízení napojování turbokompresorů a výslednými odpařovacími tlaky. Plynné chladivo z prvního okruhu proudilo do odlučovače, kde byly odstraněny stržené

kapky, které následně odtékaly do sběrače. Suchý plyn pokračoval skrz sací kolektor do sání turbokompresoru. V případě druhého okruhu u obou teplot následuje po odloučení kapek v odlučovači cesta přes kolektor sání do turbokompresoru. Chladivo z výparnickového prostoru dochlazovače proudilo přímo do turbokompresoru. Z prostoru turbokompresoru vstupuje chladivo do kondenzátoru, kde se ochladí a kondenzuje. Další kondenzace je zajištěna pomocí vařáků ethylenových kolon a ethanových kondenzátorů. Takto zkondenzované chladivo putuje do nádrže, kde se skladuje a dochlazuje.[1]

Zjednodušené výrobní schéma znázorňuje Obrázek 3.



Obrázek 3 Zjednodušené schéma výroby, červená šipka = plynná frakce, modrá šipka = kapalná nebo pevná frakce

V popsaném výrobním cyklu bylo získáváno celkem sedm výrobků, přičemž všechny produkty byly hořlavé. Fyzikální vlastnosti a chemické složení popisuje Tabulka 2.

Tabulka 2 Popis produktů výroby[1]

výrobek	hustota oproti vzduchu	zápach	složení [m/m]
methanovodíková frakce (g)	nižší	slabý uhlovodíkový	3-7 % vodík, 80-90 % methan
propan-propylen (g)	vyšší	slabý uhlovodíkový	1,2-14 % propan, 85-88 % propylen
propan-propylen (l)	/	slabý	
ethylen (g)	mírně nižší	slabý uhlovodíkový	99,4-99,9 % ethylen
butenová frakce (g)	vyšší	slabý uhlovodíkový	3,5-7 % propan a propylen, i, n 12-15 % butan, 50-60 % buteny, 20-22 % butadien
butenová frakce (l)	/	slabý	
aromatická frakce (l)	/	silně pronikavý	i, n 2,5-8 % butan, 8-15 % buteny, 2-4 % butadien, 8-10 % n-pentan, 30-45 % benzen, 5-20 % toluen, 2-5 % styren, 2-5 % vyšší uhlovodíky

2.2 Událost

19. 7. 1974 pár minut po 20. hodině došlo v provozu výroby syntetického lihu v prostoru dělení pyrolyzních plynů k masivnímu úniku plynných uhlovodíků. Ihned po vzniku výronu byl spuštěn požární poplach a byla vyrozuměna jednotka podnikových hasičů. Zároveň svědci popisovali rozhoření havarijní pochodně. Dvě minuty od vzniku úniku došlo ke vznícení uhlovodíkového oblaku, následovanému výbuchem a masivním požárem. Hasičská jednotka dorazila na místo události až po výbuchu.[1] Vzhledem k rozsahu poškození lze usuzovat, že hoření přešlo následně do detonace směsi hořlavého plynu se vzduchem.[19] Postupně byl vyhlášen zvláštní stupeň požárního poplachu, zasahovalo celkem 21 jednotek hasičů. Likvidace požáru byla ohlášena až 20. 7. 1974 v 7:00 ráno. Havárie si vyžádala v prostorách závodu celkem 16 obětí a 64 zraněných. Mimo prostory závodu si nehoda vyžádala jednoho mrtvého a 65 zraněných. [1][18] Následky výbuchu znázorňuje Obrázek 4.



Obrázek 4 Výroba syntetického lihu po výbuchu, vlevo poničená budova ethylbenzenu[18]

2.3 Původní analýza nehody

2.3.1 Odhad minimální celkové velikosti úniku

Délka úniku byla na základě výpovědi svědků odhadnuta na 2 – 2,5 minuty. Přesnější určení nebylo na základě očitých výpovědí možné.[1] Z tohoto důvodu byl proveden kontrolní výpočet. Na základě známé velikosti oblaku a rychlosti větru naměřené nedalekou meteorologickou stanicí, která byla snížena kvůli vlivu okolní zástavby, byla vypočtena délka úniku na necelé 2 minuty.[1][18] Výron plynu byl velmi silný, jelikož se oblak převalil přes celou budovu rektifikace a vlivem okolních staveb se začal šířit převážně jižním směrem, přičemž pomaleji se šířil také severně, východně a jihovýchodně. Čelo oblaku dosahovalo výšky přibližně 1,5 – 2 m a směrem od čela k místu úniku se výška oblaku postupně zvyšovala až do takové výšky, že přesahoval i budovu rektifikace a dosáhl výšky kompresorovny. Přibližně dvě minuty od začátku výronu dosáhla jižní část oblaku k pyrolyzním pecím, kde došlo k jeho iniciaci. Viditelné plamenné hoření postupovalo severním směrem, přičemž následkem rozvíření následně došlo k výbuchu a mohutnému požáru. Následovala destrukce budovy kompresorovny a okolních objektů, vznícení dalších hořlavých látek a druhý

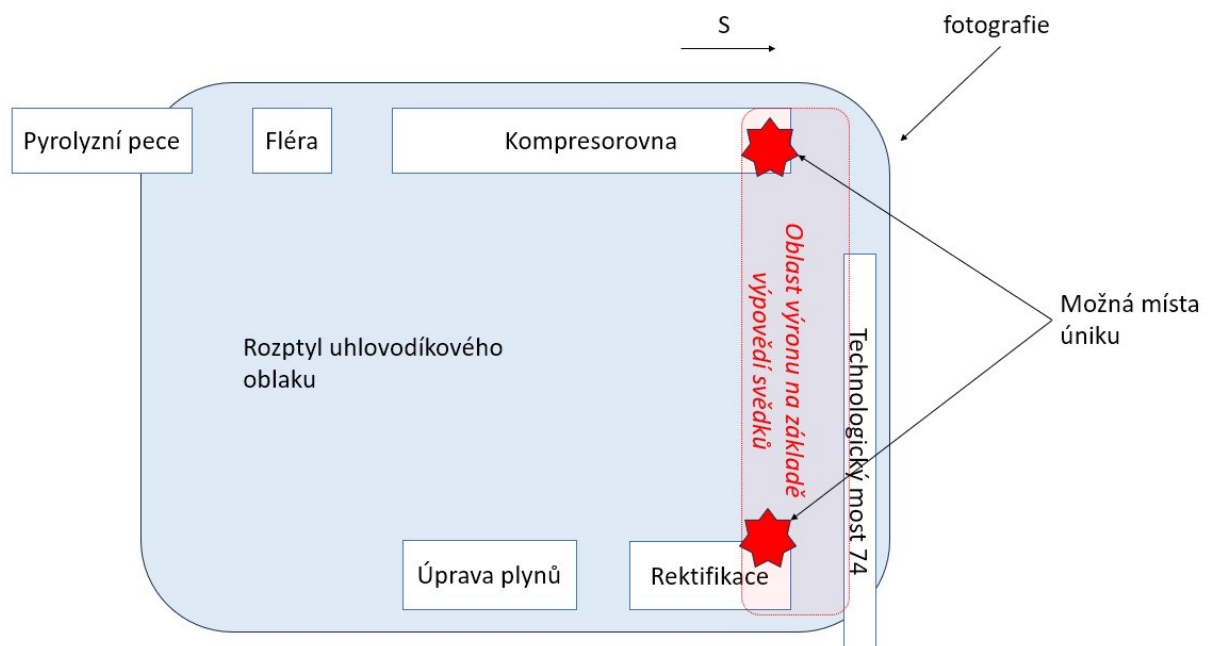
výbuch.[1][18] Vlivem působení vibrací a malým výbuchem po nasátí vzduchu došlo k destrukci kolena do podoby, ve kterém bylo následně nalezeno.[18][20] Růžička et al. stanovili sílu výbuchu na ekvivalent 10 t TNT.[21]

2.3.2 Druh uniklé látky

Prvotním zdrojem informací o průběhu nehody byly výpovědi svědků. Všichni očití svědci popisovali výron oblaku páry, který se držel při zemi, přičemž nebyl zaznamenán charakteristický zápach butanové fáze. Tyto informace tedy ukazují na výron ethanu, ethylenu, propanu nebo propylenu. Oblak valící se u země více odpovídal úniku směsi propan-propylen z chladicího okruhu, jelikož tato směs má vyšší hustotu než vzduch. Avšak nebylo možné vyloučit ani únik ethanu nebo ethylenu. Tyto uhlovodíky mají sice mírně nižší hustotu než vzduch, avšak vzhledem k tlaku v systému docházelo při případném úniku k rychlé expanzi, adiabatickému varu a silnému podchlazení okolí za vzniku vodní mlhy. Kombinace silného podchlazení a přítomnosti vodní mlhy mohla způsobit pohyb oblaku při zemi.[1][18][20] Naopak vzhledem k hustotě bylo možné vyloučit únik methanovodíkové směsi.[1]

2.3.3 Vymezení oblasti úniku

Samotné místo úniku také nebylo možné na základě svědeckých výpovědí přesně určit. Důvodem byla skutečnost, že část svědků neměla na oblast výronu přímý výhled a místo výronu bylo zakryté vzniklou mlhou. Ze získaných výpovědí bylo místo výronu zúženo na oblast mezi budovou kompresorovny a budovou rektifikace, technologický most 74 a čtvrtinu délky kompresorovny měřené od severu.[1] Nákres zasažené oblasti zobrazuje Obrázek 5, včetně označení směru fotografie použité jako Obrázek 2. Velikost oblaku v době iniciace byla přibližně 240 m na délku a 90 m na šířku.[1]



Obrázek 5 Náčrt zasažené oblasti

2.3.4 Přesnější určování místa úniku

Na základě výpovědí svědků a na základě předpokladu, že oblak byl tvořen ethanem, ethylenem nebo směsí propanu a propylenu bylo provedeno ohledání míst, kde se tyto látky v provozu vyskytovaly. V systému ethylenových kolon byl objeven poškozený dílec potrubí, konkrétně mezi ethylenovou kolonou č. 68a a vařákem č. 69b. Jednalo se o potrubní dílec Js 200, ke kterému bylo přivařené další potrubí Js 50. Provozní tlak uvnitř potrubí byl asi 25 atp a teplota se pohybovala okolo 0 °C. Uvnitř potrubí proudil kapalný ethan.[1]

Druhým možným místem úniku byl chladicí okruh systému. Zde bylo nalezeno poškození v oblasti odlučovače umístěného ve sklepě kompresorovny. Došlo k utržení vstupního potrubí o Js 700. Potrubí procházelo severní zdí budovy. Po havárii bylo nalezeno potrubí roztržené ve vzdálenosti 3 m od sebe. Dále byly nalezeny praskliny v plášti odlučovače, vytržení přepážek a utržení svarů. Pojistný ventil v blízkosti odlučovače byl nastavený na tlak 18 kp/cm². Dále došlo k poškození kolektoru sání 1. stupně v podobě potrubí o průměru 700 mm. Další poškozené místo chladicího okruhu bylo nalezeno na potrubí jdoucí po potrubním mostě 74. Zde procházelo potrubí o Js 700 vedoucí od rektifikace do kompresorovny. K tomuto potrubí bylo přivařeno hrdlo o Js 200 se zaslepeným ventilem. Po havárii bylo toto hrdlo nalezeno ulomené. Bližším prozkoumáním byl odhalen nekvalitní svár obsahující strusku a bublinky.[1]

Prvotní rána na začátku úniku byla dostatečně intenzivní, aby upozornila i zaměstnance mimo výrobu syntetického lihu. Následoval znatelný sykot. Intenzitu hluku však nebylo možné přesně určit, pouze se svědci shodovali na skutečnosti, že nedocházelo k poklesu intenzity hluku. Intenzita hluku však nebyla taková, aby bránila srozumitelné telefonické komunikaci. Na základě testovacích pokusů se svědci shodli, že intenzita hluku byla stejná nebo vyšší než při pokusu s testovací párou o přetlaku 2,8 atp, ale menší než v případě páry o přetlaku 18 atp.[1] Avšak za předpokladu, že došlo nejprve k částečnému prasknutí kolena a vzniku omezeného otvoru, tak by byl i při provozním tlaku 25 atp vzniklý hluk nižší než v případě prasknutí celého kolena.[18][20]

2.3.5 Srovnání možných míst úniku s odhadem minimální velikosti úniku

Po stanovení možných míst úniku byly provedeny technické výpočty za účelem zjištění možného množství uniklé látky. V případě úniku z místa u ethylenové kolony byl předpokládán průměr otvoru 200 mm, přičemž tlak uvnitř aparatury byl přibližně 25 atp a teplota -10 °C. Únik byl tvořen směsí ethan-ethylen, přičemž zpočátku došlo k výronu kapalně fáze, následované směsí kapaliny a plynu, přičemž docházelo postupně k poklesu tlaku uvnitř aparatury. Tímto zjednodušením bylo možné vypočítat minimální uniklé množství za dobu dvou minut. Výpočet přesného množství by byl velmi obtížný. Pomocí zjednodušeného výpočtu bylo určeno množství 7400 kg během prvních dvou minut, přičemž objem výbušné směsi mohl dosahovat hodnot přibližně od 20 000 m³ při horní mezi výbušnosti do 204 000 m³ při dolní mezi výbušnosti.[1][18] Toto množství je přibližně 11 – 17 x větší, než potřebné množství vypočtené pomocí TNT ekvivalentu.[1] Další možné místo úniku, které by mohlo způsobit odpovídající výbuch, je chladicí systém v podobě kolektoru sání 1. stupně. Tímto otvorem při uvažovaném tlaku 1,7 ata a teplotě -30 °C mohlo podle opět zjednodušeného výpočtu vytéct přibližně 7100 kg směsi propan-propylen. Objem výbušné směsi mohl dosáhnout přibližně 8 500 – 46 500 m³ mezi dolní a horní mezi výbušnosti.[1][18] Toto množství je přibližně 10 – 16 x větší, než je zapotřebí pro výbuch o odpovídajícím TNT ekvivalentu. Zbylé možnosti vypočteným množstvím neodpovídají následkům nehody.[1]

2.3.6 Údaje o úpravách a údržbě zařízení v možných místech úniku

Dále byla pečlivě zkoumána údržba poškozených úseků. Potrubí mezi ethylenovou kolonou a vařáky se opravovalo pravidelně každý rok, střídavě běžná a střední oprava. Přesný rozsah každé opravy určoval mechanik. U kolen pod vařáky byly v minulosti znovu navařovány nové odbočky Js 50 z důvodu koroze. V březnu 1974 byla provedena nutná oprava dílce č. 69d

z důvodu odhalené porozity ve svaru odbočky. Po zavaření však došlo ke vzniku prasklin základního potrubí Js 200. Důvodem bylo zřejmě nerovnoměrné tepelné pnutí během svařování. Bylo rozhodnuto o výměně celého dílu a následně měly být postupně vyměněny i vedlejší tři potrubí. Z důvodu omylů a nepřesností se pracovníci údržby domnívali, že kolena Js 200 uložená ve skladu nejsou vhodná pro použití v tomto provozu. Proto byl vystaven požadavek na nákup odpovídajících kolen, která měla dorazit v lednu 1975. Písemný dotaz o možnosti použití skladových kolen zůstal bez odpovědi. I přesto však bylo použito skladové koleno pro výměnu poškozeného dílce č. 69d. Následně byla tato kolena použita i pro výměnu kolen č. 69a a č. 69c. Místo č. 69a měl být původně vyměněn dílec č. 69b, avšak byl odstaven vařák č. 69a, který měl také horší funkci. Proto byl místo dílu č. 69b vyměněn díl č. 69a. Potrubní systém chladicího okruhu byl opravován po prohlídkách, přičemž v posledních letech zde nebyly provedeny žádné opravy a celý úsek byl původní.[1]

2.3.7 Pravděpodobná odezva na zjištění úniku

V případě, že by byl zdrojem úniku chladicí systém v prostoru kompresorovny, nebyly k dispozici žádné doklady o reakci zdejších pracovníků. Silné zahoření havarijní pochodně před výbuchem by mohlo být způsobeno zásahem pracovníků.[20] Byla nalezena částečně otevřená regulační klapka tlaku, což odpovídá spíše akci pracovníků, kteří tuto funkci pravidelně zkoušeli, a tak byli s touto akcí obeznámeni. Svědci nehody pozorovali před explozí značný nárůst plamene havarijní pochodně (fléry) a pokles dodávky ethylenu do budovy přímé hydratace.[1]

Pracovníci pracující v uvedených provozech byli v porovnání s ostatními zaměstnanci závodu průměrní až lehce nadprůměrní. Provoz byl v rámci dostupné technologie stabilní, bez závažnějších poruch nebo havárií. Proškolení bylo také odpovídající a předchozí kontroly nenalezly žádné závady. Na základě těchto zkušeností bylo možné usuzovat, že obsluha se při havárii zachovala správně a pokusila se katastrofě zabránit, což však nebylo v jejich silách.[1] Zároveň případná snaha o odstavení pyrolyzních pecí by nemohla nehodě zabránit, protože teplota pecí byla znatelně vyšší než teplota vznícení uniklých uhlovodíků a ochlazení pecí pod teplotu vznícení není během krátké doby možné.[18]

2.3.8 Závěry znaleckých posudků

Růžička et al. stanovili sílu výbuchu asi na ekvivalent 10 t TNT.[21] Možnost poškození kompresorů před výbuchem vyloučil odborný posudek Zeman et al. ze Státního výzkumného ústavu pro stavbu strojů Běchovice. Tento posudek uvádí, že k poškození kompresorů došlo až

následkem výbuchu.[22] Znalecký posudek od Nejedlého v oblasti požární ochrany uvádí, že odborné požární hodnocení bylo vypracováno v rámci platných předpisů. Ohledně možnosti úniku dochází k názoru, že prvotním místem úniku bylo prasklé koleno ethylenové jednotky.[19] Mostecký et al. působili jako soudní znalci v oblasti chemického zkoumání. Odebrané úsady obsahovaly síru ve formě sulfidů, a to v koncentracích 0,40 – 34,13 %. Pyrolyzní plyn byl veden přes pračku plynů obsahující roztok NaOH. Jelikož kontrola pomocí roztoku octanu olovnatého neodhalila žádný průnik H₂S skrz pračku plynu, bylo usouzeno, že síra prošla do systému v organické formě, která nebyla v pračce zachycována. Tato síra způsobovala vnitřní korozi zařízení. Zároveň bylo zjištěno, že vyšší obsah síry byl nalezen v té části zařízení, kde proudil ethan, hlavně kapalný ethan. Způsob odsíření se tedy projevil jako nedostatečný a oblast ethylenových a ethan-ethylenových kolon byla zvláště zasažena vnitřní korozi. Tento posudek zároveň obsahuje kritické hodnocení výpovědí svědků a závěru interního vyšetřování. Výsledné hodnocení jednoznačně označuje jako prvotní zdroj úniku prasknutí kolena ethylenové jednotky.[20] Všechny znalecké posudky byla následně využity k vypracování komplexního znaleckého posudku k této havárii se závěrem, že místem prvotního úniku hořlavého plynu bylo prasklé koleno č. 69b.[18] Prasklé koleno č. 69b znázorňuje Obrázek 6.



Obrázek 6 Fotografie prasklého kolena č. 69b[1]

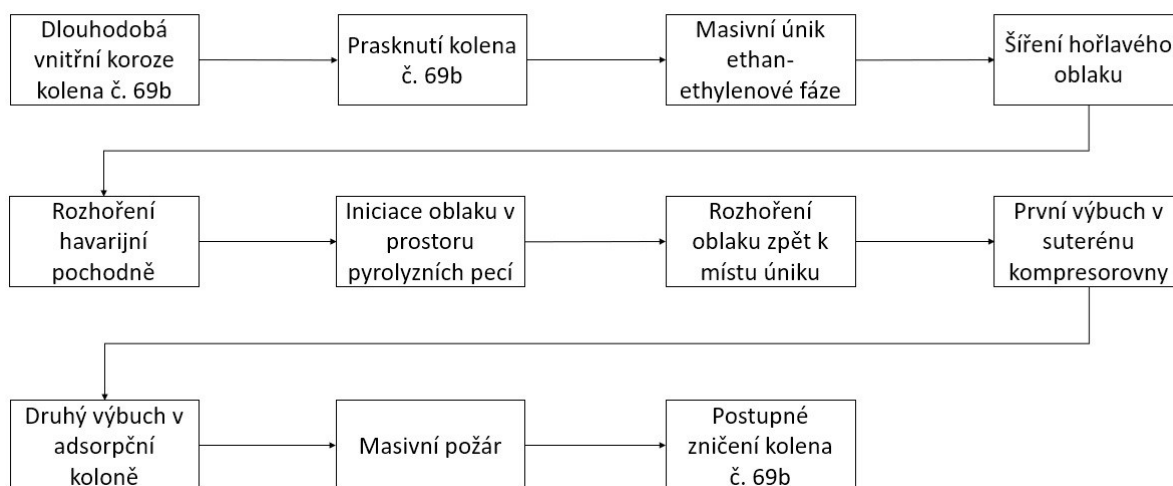
2.3.9 Souhrnný závěr původního vyšetřování

Vyšetřovací komise došla k závěru, že havárie byla způsobena silným výronem uhlovodíků v oblasti mezi rektifikací a severní částí kompresorovny. Vznícení oblaku pocházelo od pyrolyzních pecí. Po iniciaci následovalo hoření oblaku směrem od pyrolyzních pecí k místu úniku, během čehož došlo k výbuchu v prostoru kompresorovny, po kterém následoval výbuch absorpční kolony. Před výbuchem byl pozorován nárůst plamene havarijní pochodně a pokles průtoku ethylenu do prostoru přímé hydratace. Podle poškození a následků byla určena dvě možná místa úniku.[1][18][20]

Prvním možným místem úniku je roztržené koleno u vařáku č. 69b. Pro tuto možnost hovoří intenzita výtoku a pokles toku ethylenu k přímé hydrataci.[1] Nižší hluk lze vysvětlit částečným roztržením kolena. Ochlazení způsobené adiabatickým varem mohlo způsobit, že se vzniklý oblak držel u země.[20] Výpověď většiny očitých svědků, chování plynů popsané očitým svědkem a závěry odborných posudků podporují tuto možnost.[18][19][20][22]

Druhé možné místo úniku se nachází na kolektoru sání kompresoru v prostoru kompresorovny. Tuto hypotézu podporuje intenzita výtoků a případný charakter hluku. Hustota plynu odpovídá šíření u země.[1] Pokud by však k úniku došlo v suterénu, bylo by nepravděpodobné vytvoření popisovaného oblaku.[20] Omezení dodávky ethylenu do prostoru hydratace tuto možnost připouští.[1] Charakter poškození částečně odpovídá, avšak části potrubí vykazují až poškození výbuchem.[18] Výpověď většiny svědků, včetně jedné konkrétní výpovědi o chování unikajícího plynu však tuto teorii nepodporuje.[20] Dále se většina odborných posudků shoduje na závěru, že prvotním místem úniku bylo roztržené koleno č. 69b a nastal únik směsi ethan-ethylen.[18][19][20][22]

Z tohoto důvodu se možnost prvotního úniku z kolektoru sání jeví jako nepravděpodobná a jako konečnou příčinu nehody lze označit dlouhodobou vnitřní korozi vedoucí k prasknutí kolena č.69b a masivní únik ethan-ethylenové směsi.[18][19][20][22] Průběh nehody zobrazuje Obrázek 7.



Obrázek 7 Časový vývoj nehody

2.3.10 Určení příčin podle původního vyšetřování

Jako příčina nehody byla určena dlouhodobá vnitřní koroze kolena č. 69b.[18][19][20][22] Korozi způsobilo dlouhotrvající pronikání organických sloučenin síry skrz nedostatečně fungující pračku plynů vedoucí ke vzniku sulfidů a zeslabení stěny na kritickou mez, kdy již koleno nevydrželo vnitřní tlak.[18][20] Ke vzniku nehody přispěla skutečnost, že údržba nedokázala během preventivní údržby včas zjistit špatný stav poškozeného dílu a následně vlivem špatné komunikace včas zajistit výměnu.[1][18]

2.4 Doplnění analýzy nehody moderním pohledem

Získané informace z originálního vyšetřování slouží jako základ pro rozšíření původních závěrů vyšetřování o nové poznatky a nové přístupy. K rozšíření o moderní postupy poslouží matice faktů a hypotéz, analýza kořenových příčin a analýza metodou IPICA.

2.4.1 Použití matice faktů a hypotéz

Prvním krokem je sestavení matice faktů a hypotéz. Matice je sestavená na základě návodu.[23] Cílem matice je porovnat dvě původně předpokládaná místa prvotního úniku uhlovodíků a na základě dostupných informací určit konkrétní místo úniku. Prvním je koleno č. 69b, druhým je kolektor sání chladicího okruhu v prostoru kompresorovny. Hotovou matici faktů a hypotéz znázorňuje Tabulka 3. V prvním sloupci matice jsou uvedeny události, které bylo možné dohledat a které mohou pomoci s následným určením místa úniku. Druhý sloupec se věnuje hypotéze o úniku z kolena č. 69b. Třetí sloupec obsahuje možnost úniku z chladicího okruhu. Symbol + značí, že událost z prvního sloupce podporuje možnost úniku z dotyčného místa. Symbol × naopak značí, že událost z prvního sloupce nepodporuje možnost úniku z tohoto místa.

Tabulka 3 Matice faktů a hypotéz

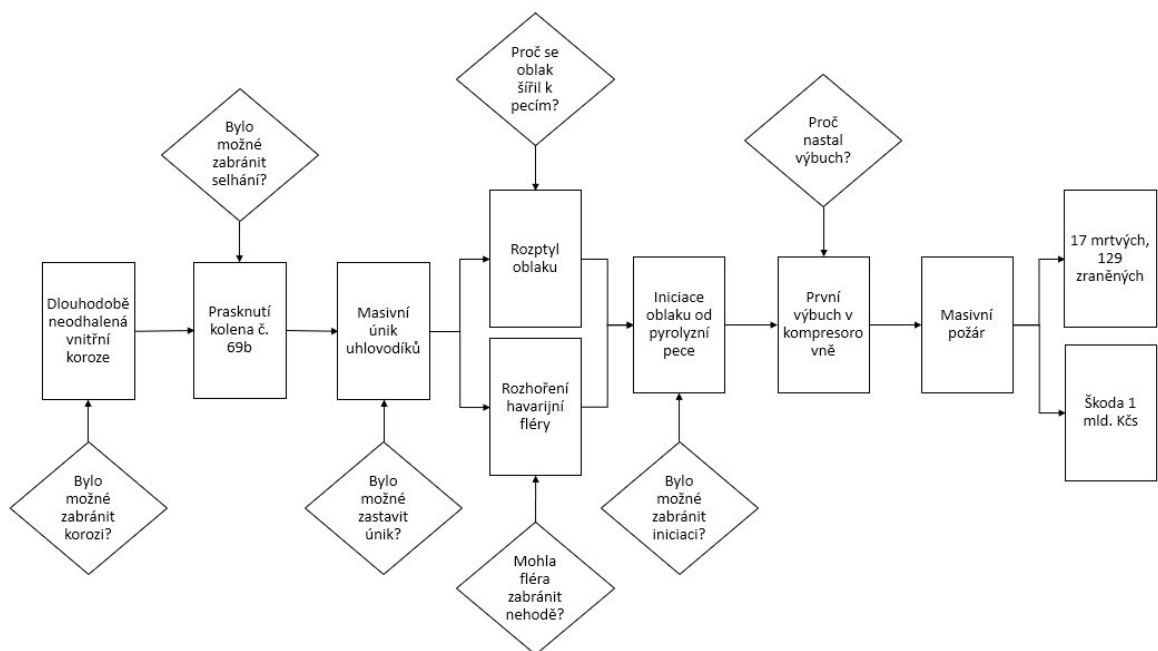
Fakta/hypotézy	únik z prasklého kolena ethylenové jednotky č. 69b	únik z chladicího okruhu v prostoru kompresorovny
Přítomnost hořlavého uhlovodíku	+ _{[1][18]}	+ _{[1][18]}
Uhlovodík se může po úniku ze systému držet při zemi	+ _{[1][18][20]}	+ _{[1][18][20]}
Místo úniku by bylo v označené oblasti	+ _[1]	+ _[1]
Většina svědků se shoduje na tomto místě úniku	+ _[1]	× _[1]
Očitě svědectví chování plynu podporuje hypotézu	+ _{[1][18][20]}	× _{[1][18][20]}
Uniklé množství mohlo způsobit odpovídající výbuch	+ _{[1][18]}	+ _{[1][18]}
Hluk při výronu mohl být blízký hluku unikající páry o tlaku 2,8 ata	+ _{[1][18][20]}	+ _[1]
Odborný posudek z VŠCHT podporuje hypotézu	+ _[20]	× _[20]
Odborný posudek Nejedlého podporuje hypotézu	+ _[19]	× _[19]
Komplexní znalecký posudek ministerstva vnitra ČSSR podporuje hypotézu	+ _[18]	× _[18]
Závěr	prokázané	nepravděpodobné

Hotová matice faktů a hypotéz ukazuje shodu zjištěných faktů s teorií o úniku z kolena č. 69b. Naopak v případě úniku z chladicího systému několik faktů hovoří proti této teorii. Na základě těchto skutečností lze konstatovat, že prvotním místem úniku plynných uhlovodíků bylo koleno č. 69b.

2.4.2 Grafické znázornění nehody

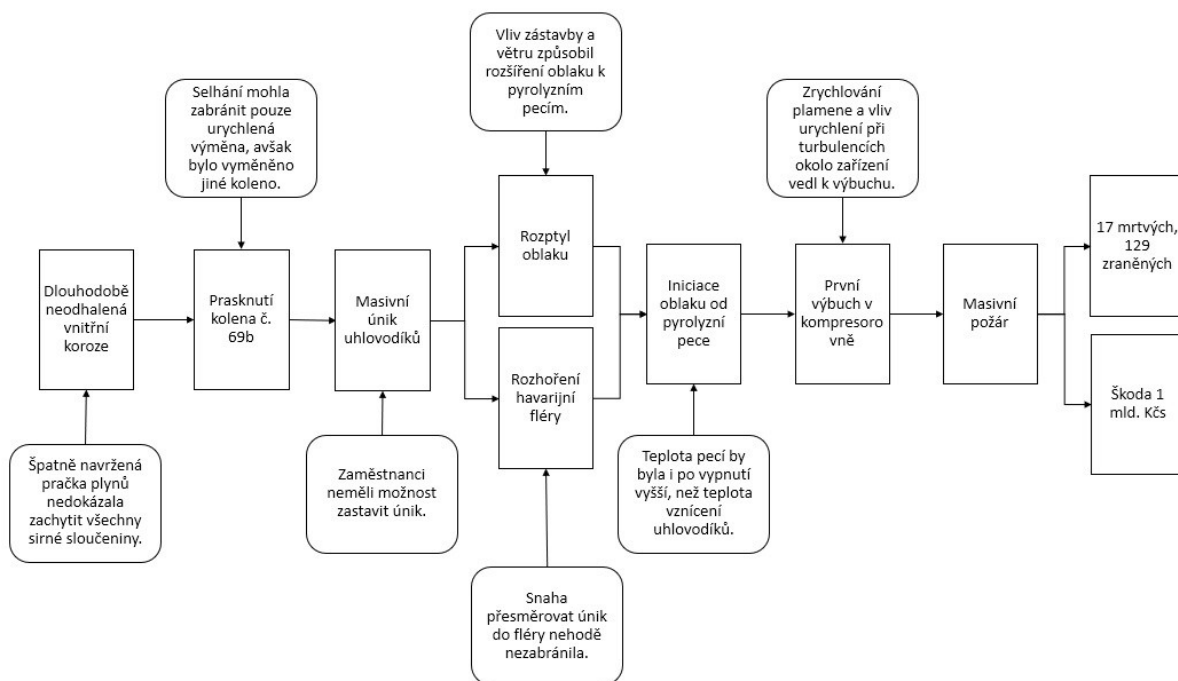
Druhý krok představuje grafické znázornění nehody, které následně slouží jako základ k odhalení dalšího rozvoje událostí. Pro lepší přehlednost zde došlo k zjednodušení a úpravě průběhu nehody. Z tohoto důvodu je zdejší Obrázek 8 odlišný od průběhu, který znázorňuje Obrázek 7 v kapitole 2.3.9. Zároveň Obrázek 8 představuje základní schéma, ze kterého následně vychází obrázky dále.

Obrázek 8 zobrazuje zmíněný upravený průběh nehody rozšířený o otázky. Tyto otázky se týkají možností přerušování souběhu událostí vedoucích k nehodě.



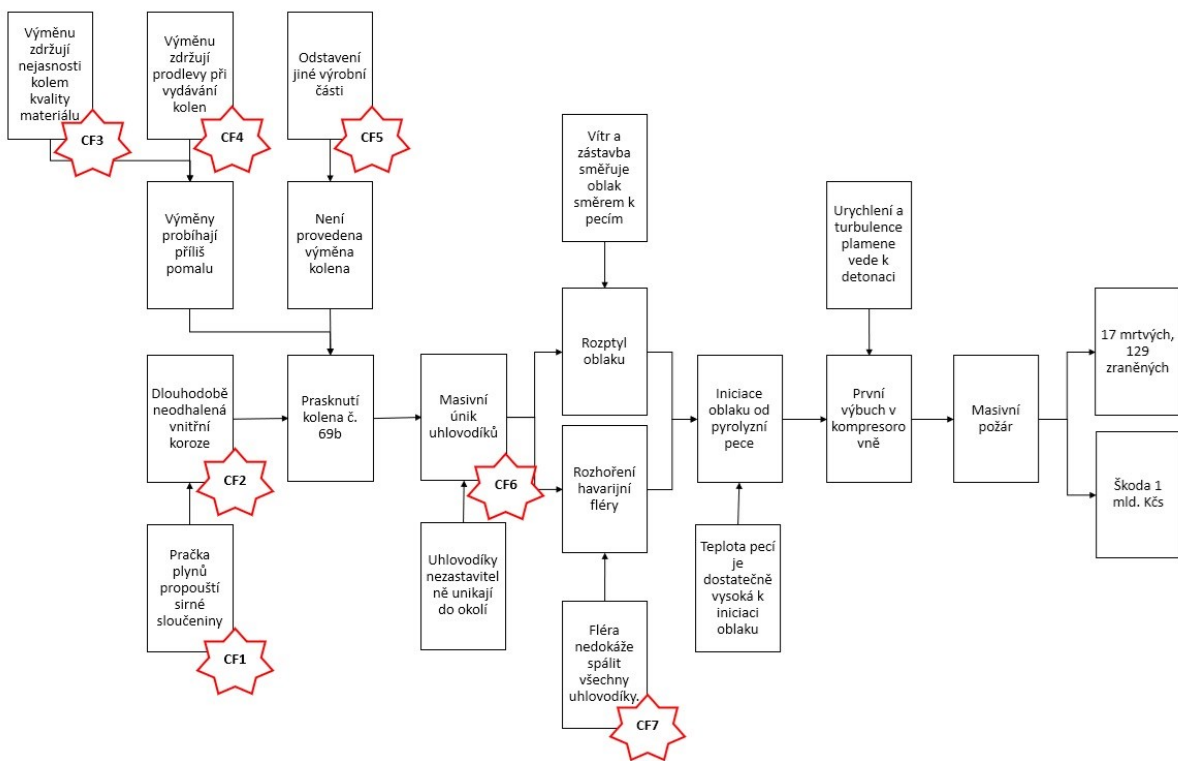
Obrázek 8 Základní analýza příčin

K průběhu nehody bylo položeno celkem 7 otázek. Následovalo hledání odpovědí na tyto otázky na základě dostupných informací. Výsledkem je Obrázek 9, kde předchozí otázky nahrazují zjištěné odpovědi.



Obrázek 9 Rozvinutá analýza příčin

Další krok zahrnuje převod zjištěných odpovědí do podoby událostí. Zároveň po převodu celého obrázku do souboru vzájemně provázaných událostí je možné označit příčinné události, které zapříčinily vznik nehody. Výsledek znázorňuje Obrázek 10.



Obrázek 10 Určení příčinných faktorů

Celkem je nalezeno 7 příčinných faktorů. Zároveň je možné pozorovat značné rozšíření analýzy v oblasti příčin prasknutí kolena č. 69b.

2.4.3 Doplnění analýzy příčin

Na základě dosavadního zjištěného průběhu nehody, který znázorňuje Obrázek 10 je možné přistoupit k analýze kořenových příčin. Analýzu znázorňuje Tabulka 4. Cílem je pomocí mapy kořenových příčin stanovit hlubší příčiny vzniku zjištěných kořenových událostí. První sloupec tabulky obsahuje zjištěné příčinné faktory. Druhý sloupec obsahuje postup mapou kořenových příčin. Poslední třetí sloupec obsahuje doporučení k nápravě zjištěných nedostatků.

Tabulka 4 Analýza kořenových příčin

Příčinné faktory	Cesta skrz mapu kořenových příčin	Doporučení
CF1 – Pračka plynů propouští sirné sloučeniny.	Obtíže se zařízením / Problém projektu zařízení / Vstup/výstup projektu / Výstup projektu	Zajistit kompletní kvalitativní analýzu proudícího produktu. / Použit lepší systém čištění produktů od sirných sloučenin. / Použit lepší systém analýzy průniku sirných sloučenin do systému.
CF2 – Dlouhodobě neodhalená vnitřní koroze.	Obtíže se zařízením / Problém programu spolehlivosti zařízení / Uskutečnění programu spolehlivosti / Prediktivní údržba / Uskutečňování	Zajistit rozsáhlejší prediktivní údržbu, v rámci údržby kontrolovat přítomnost koroze a případně zajistit rychlou nápravu. / Zvážit použití nerezového materiálu.
CF3 – Výměnu zdržují nejasnosti kolem kvality materiálu.	Obtíže s personálem / Firemní zaměstnanec / Systémy administrativy/řízení / Řízení produktů/materiálů / Kritéria pro přijetí produktu	Zlepšit informace o využitelnosti náhradních dílů a případných povolených náhradách.
CF4 – Výměnu zdržují prodlevy při vydávání kolen.	Obtíže s personálem / Firemní zaměstnanec / Komunikace / Žádná nebo opožděná komunikace / Komunikace mezi pracovními skupinami	Zlepšit systém komunikace mezi úseky. / Zlepšit evidenci pohledávek a při naskladnění materiálu zajistit distribuci na potřebná místa.
CF5 – Odstavení jiné výrobní části.	Obtíže se zařízením / Problém programu spolehlivosti zařízení / Projekt programu spolehlivosti / Program / Kritéria přijatelnosti	Dodržovat původní plán údržby.
CF6 – Masivní únik uhlovodíků.	Obtíže se zařízením / Problém programu spolehlivosti zařízení / Uskutečnění programu spolehlivosti / Korektivní údržba / Uskutečňování oprav	Dodržovat původní plán údržby.
CF7 – Fléra nedokáže spálit všechny uhlovodíky.	Obtíže se zařízením / Problém projektu zařízení / Vstup/výstup projektu / Vstup projektu	Aplikovat do systému možnost rychlého nouzového uzavření toku produktů, umožnit kompletní nouzové odklonění toku uhlovodíků do havarijní pochodně a zajistit jejich bezpečné spálení.

Ve výsledku se pět příčinných faktorů týká problémů v oblasti zařízení. Od návrhu samotného zařízení po provádění a program údržby. Zbývající dva příčinné faktory se týkají problémů v oblasti personálu, konkrétně v oblasti komunikace a v oblasti přijímání produktů.

2.4.4 Rozšíření analýzy metodou IPICA

V rámci analýzy metodou IPICA je na zjištěné příčinné faktory nahlíženo jako na selhání celého systému za využití pilířů RBPS. Došlo k přidání informací, které označují nepříznivý vliv, zranitelný cíl a bariéru/regulaci. Metoda IPICA vyžaduje pro postup na příčiny vyšší úrovně kladnou odpověď na konkrétní otázky. Otázky jsou vypsány níže. Cílem je odhalit nejhlubší odhalitelné příčiny selhání. Vedle stávajících příčinných faktorů je možné odhalení nových, které vzniknou hloubkovou analýzou stávajících příčinných faktorů. Příčiny jsou rozděleny do čtyř úrovní. První sloupec tabulky obsahuje označení příčinného faktoru a popis procesu. Následuje popis nežádoucího vlivu, zranitelného cíle a bariéry/regulace. Dále příčiny první úrovně, první otázka, příčiny druhé úrovně, druhá otázka, příčiny třetí úrovně, třetí otázka a následně příčiny čtvrté úrovně. Poslední sloupec slouží k návrhu doporučení.

Otázka č. 1 (O₁): Může být k identifikaci příčin použita mapa kořenových příčin?

Otázka č. 2 (O₂): Nachází se zde nedostatky v řídicí kultuře bezpečnosti?

Otázka č. 3 (O₃): Je nemožné nedostatky v kultuře bezpečnosti definovat jako nedostatky v nadřazeném procesu?

V případě, že je u otázky číslo 3 záporná odpověď, dochází ke vzniku nového příčinného faktoru.

CF	Proces	Nepříznivý vliv (AI) Zranitelný cíl (VT) Bariéra/ regulace (B/R)	Příčiny 1. úrovně (přímé)	O ₁	Příčiny 2. úrovně (organizační, kořenové)	O ₂	Příčiny 3. úrovně (vedení)	O ₃	Příčiny 4. úrovně (sociální)	Doporučení
1	Odstraňování sírných sloučenin z pyrolyzního plynu.	AI: Průnik sírných sloučenin do výstupního proudu. VT: Výstupní proud plynu obsahující nadlimitní množství síry. B/R: Konstrukce a provozování pračky zajišťující snížení obsahu síry.	Pračka plynů nedokázala zachytit organické sloučeniny síry, které pronikaly do systému a způsobily vnitřní korozi.	Ano	U000 Porozumění zdrojům rizika a riziku U200 Identifikace zdrojů rizika a analýzy rizika (HIRA) U220 Udržujte spolehlivou praxi U22d Provádějte činnost HIRA na vhodné úrovni technické dostupnosti, která odpovídá fázi životního cyklu a dostupným informacím v procesu.	Ano	L000 Poučení ze zkušeností L100 Vyšetřování nehod L130 Používejte pro vyšetřování nehod vhodné techniky L13e Vyšetřujte příčiny do vhodné hloubky L200 Měření a metriky L220 Provádějte získávání metrik L22a Zavádějte vhodné metriky prvku	Ne, CF8	×	Provést důkladnou kvalitativní analýzu produktu před plánováním změny. Vedle H ₂ S se zaměřit také na problém organických sloučenin síry. Po provedení změny provádět pravidelnou analýzu a v případě nálezu průniku sírných sloučenin určit další nutnou změnu systému čištění.

2	Provozování zařízení.	AI: Vznik vnitřní koroze působením sirných sloučenin. VT: Materiál kolena. B/R: Pračka plynů a pravidelná údržba.	Sledování včas neodhalilo přítomnost vnitřní koroze, která zeslabila stěnu a došlo k selhání.	Ano	M000 Řízení rizika M100 Provozní postupy M120 Identifikujte, jaké provozní postupy jsou potřebné M12b Určujte, jaké postupy jsou vhodné a jejich vhodnou úroveň podrobnosti M130 Vyvíjejte postupy M13d Určete limitní podmínky pro provoz M300 Celistvost a spolehlivost majetku M340 Zajistěte trvalou vhodnost pro daný účel M34d Plánujte, řiďte a provádějte činnost údržby	Ano	L000 Poučení ze zkušeností L100 Vyšetřování nehod L130 Používejte pro vyšetřování nehod vhodné techniky L13e Vyšetřujte příčiny do vhodné hloubky L200 Měření a metriky L220 Provádějte získávání metrik L22a Zavádějte vhodné metriky prvku	Ano	V době nehody bylo primárním cílem plnění zadaných plánů výroby. Spokojenost zákazníka s kvalitou produktu byla druhotná.	Chybějící konkurence nemotivovala výrobce k rychlé úpravě výroby.
3	Dodávání servisních dílů.	AI: Neznalost použitelnosti dílů. VT: Spolehlivost provozní zařízení. B/R: Popis použitelnosti dílů.	Nejasné určení vhodnosti dílů zpomaluje údržbu.	Ano	M000 Řízení rizika M300 Celistvost a spolehlivost majetku M340 Zajistěte trvalou vhodnost pro daný účel M34e Zajistěte jakost náhradních dílů a materiálů pro údržbu	Ano	C000 Závazek za kulturu bezpečnosti C100 Kultura bezpečnosti procesu C120 Rozvíjejte a realizujte zdravou kulturu C12d Zajistěte otevřenou a efektivní komunikaci C12g reagujte včas na problémy bezpečnosti procesu a na obavy	Ne, CF9	×	Zajistit jasné informace o použitelnosti náhradních dílů.

4	Vydávání náhradních dílů pro údržbu.	AI: Komunikační problémy. VT: Spolehlivost provozního zařízení. B/R: Evidence dílů a spolehlivá komunikace.	Špatná komunikace mezi pracovními skupinami zpomaluje vydávání náhradních dílů k nutné údržbě.	Ano	M000 Řízení rizika M300 Celistvost a spolehlivost majetku M34f Zajistěte, aby generální opravy, opravy a zkoušky nenarušovaly bezpečnost	Ano	C000 Závazek za kulturu bezpečnosti C100 Kultura bezpečnosti procesu C120 Rozvíjejte a realizujte zdravou kulturu C12d Zajistěte otevřenou a efektivní komunikaci C12g reagujte včas na problémy bezpečnosti procesu a na obavy	Ne, CF9	×	Zlepšit systém vzájemné komunikace mezi pracovníky a tím urychlit provádění potřebných pracovních úkonů.
5	Plánování a dodržování plánů údržby.	AI: Nedodržení původního plánu údržby VT: Provozní zařízení. B/R: Systém řízení a plánování údržby.	Změna v plánu údržby neumožnila výměnu kolena č. 69b	Ano	M000 Řízení rizika M300 Celistvost a spolehlivost majetku M32c Aktualizujte plán ITPM když se podmínky vybavení změni	Ano	C000 Závazek za bezpečnost procesu C100 Kultura bezpečnosti procesu C110 Udržujte spolehlivou praxi C11c Ustanovte a prosazujte vysoké standardy provádění	Ne, CF10	×	Zlepšit plánování a provádění údržby. Dodržovat připravený plán údržby.

6	Udržování spolehlivého funkčního zařízení.	AI: Přítomnost vysoce hořlavých uhlovodíků. VT: Výrobní zařízení. B/R: Systém údržby.	Špatný stav kolen byl odhalen příliš pozdě a následně opravy neproběhly dostatečně rychle.	Ano	M000 Řízení rizika M300 Celistvost a spolehlivost majetku M310 Udržujte spolehlivou praxi M31a Vytvořte písemnou strategii/ popis programu M320 Identifikujte vybavení/ systémy v rámci rozsahu programu celistvosti majetku a přiřaďte úkoly ITPM M32a Identifikujte vybavení/ systémy pro zahrnutí do programu celistvosti majetku	Ano	C000 Závazek za bezpečnost procesu C100 Kultura bezpečnosti procesu C110 Udržujte spolehlivou praxi C11a Ustanovte bezpečnost procesu jako základní hodnotu C120 Rozvíjejte a realizujte zdravou kulturu C12a Udržujte vědomí zranitelnosti	Ne, CF11	×	Věnovat zvýšenou pozornost stavu zařízení, které obsahují nebezpečné látky. Rozšířit plán údržby o hlubší kontrolu stavu zařízení, aby byly případné problémy včas odhaleny a napraveny.
7	Řízené spalování látek na havarijní pochodni.	AI: Velký objem proudících uhlovodíků. VT: Zaměstnanci a zařízení v okolí. B/R: Ruční ovládání ventilů.	Systém neumožňuje kompletní zastavení toku produktů a jejich odklon na řízené spálení.	Ano	M000 Řízení rizika M900 Nouzové řízení M920 Připravenost na nouzové situace M92g Poskytujte fyzická zařízení a vybavení	Ano	C000 Závazek za bezpečnost procesu C100 Kultura bezpečnosti procesu C110 Udržujte spolehlivou praxi C11a Ustanovte bezpečnost procesu jako základní hodnotu C11c Ustanovte a prosazujte vysoké standardy provádění C120 Rozvíjejte a realizujte zdravou kulturu C12a Udržujte vědomí zranitelnosti	Ne, CF12	×	Navrhnout havarijní systém, který bude obsahovat možnost okamžitého nouzového zastavení toku materiálu a kompletní odklonění na havarijní pochodeň.

8	Návrh odsíření	AI: NaOH v pračce plynů nedokáže odstranit organické sloučeniny síry VT: Vnitřní koroze potrubí s hrozbou prasknutí a masivním únikem uhlovodíků. B/R: Pochopení chemie procesu.	Osoby zodpovědné za návrh odsíření nezvládají včas zdokonalit proces.	Ano	Nelze analyzovat – nedostatek informací.	Ne	×	×	×	×
9	Správa náhradních dílů pro údržbu.	AI: Selhání komunikace, která nedovolila provést včas správnou údržbu. VT: Osoby a zařízení v okolí. B/R: Vnitřní systém komunikace.	Žádost o výměnu kolena nebyla včas a správně provedena z důvodu selhání komunikace mezi zaměstnanci.	Ano	M000 Řízení rizika M800 Průběh provozování M820 Řiďte činnosti provozování M82d Přidělte přiměřené zdroje M82g Formalizujte komunikaci mezi pracovními skupinami	Ne	×	×	×	Zlepšit systém komunikace mezi pracovníky. Zlepšit systém zásobování a dodávání potřebného materiálu.

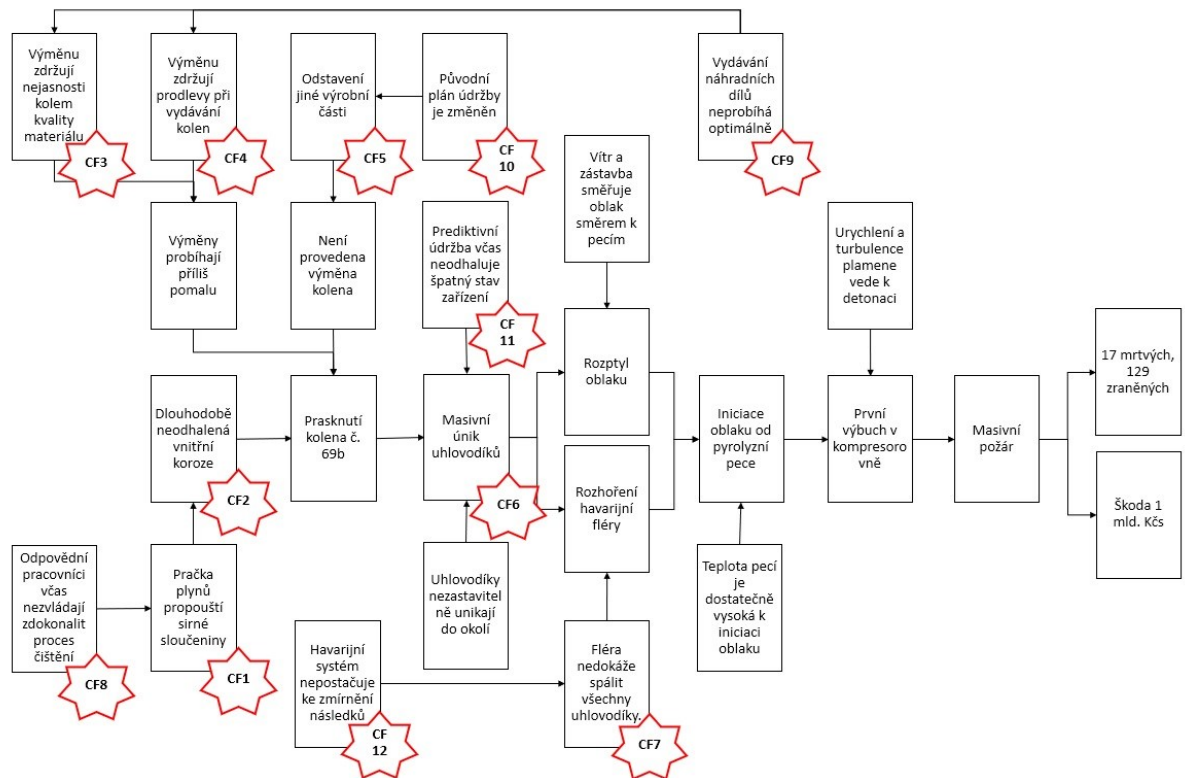
10	Naplánovaná údržba výrobního zařízení.	AI: Problém na více místech. VT: Výrobní jednotka. B/R: Plánování údržby.	Změna původního pracovního plánu.	Ano	M000 Řízení rizika M300 Celistvost a spolehlivost majetku M360 Analyzujte údaje M36d Plánujte nahrazování nebo jiné nápravné činnosti	Ne	×	×	×	Zajistit odpovídající plánování servisu a toto plánování následně dodržovat.
11	Prediktivní kontrola zařízení.	AI: Skrytá vnitřní koroze. VT: Výrobní jednotka. B/R: Plán údržby a pracovní postupy při údržbě.	Koroze nebyla včas v rámci prediktivní údržby odhalena.	Ano	M000 Řízení rizika M800 Průběh provozování M830 Řízení stavu systémů a vybavení M83b Udržujte stav vybavení	Ne	×	×	×	Udržovat výrobní zařízení ve stavu umožňující bezpečný provoz.
12	Havarijní systém	AI: Velký objem hořlavých uhlovodíků. VT: Osoby a zařízení v okolí. B/R: Manuální zásah operátora.	Systém pro zvládnutí havárií nedokázal zmírnit následky havárie.	Ano	U000 Porozumění zdrojům rizika a riziku U200 Identifikace zdrojů rizika a analýza rizika (HIRA) U230 Zhodnoťte rizika a učinite rozhodnutí založená na riziku U23b Vyberte vhodná opatření pro zvládnutí rizika	Ne	×	×	×	Navrhnout odpovídající havarijní systém, který umožní bezpečný odklon a spálení uhlovodíků v krizové situaci.

Z původních 7 příčinných faktorů odhalených pomocí analýzy kořenových příčin dochází pomocí metody IPICA k nárůstu na celkem 12 příčinných faktorů. V jednom případě, konkrétně u CF2, jsou odhaleny společenské příčiny vzniku. Při analýze všech příčinných faktorů je možné nalézt

nedostatky ve všech čtyřech pilířích RBPS. Tedy v oblasti závazku za bezpečnost procesu, v porozumění zdrojům rizika, řízení rizika a také v oblasti poučení ze zkušeností. Nejčastěji byly nedostatky nalezeny v oblasti řízení rizika a v závazcích za bezpečnost procesu. Nové zjištění je následně možné přidat do schématu průběhu nehody.

2.4.5 Doplnění grafického znázornění nehody

Výsledky IPICA analýzy jsou použity ke konečnému rozšíření grafického znázornění průběhu nehody. Obrázek 11 názorně ukazuje, že za vznikem nehody stála kombinace 12 vzájemně provázaných příčinných faktorů v různých úrovních.



Obrázek 11 Konečné grafické znázornění nehody

2.4.6 Doplnění příčin původního vyšetřování

Pomocí moderního pohledu na vyšetřování průmyslových havárií bylo možné rozšířit původní vyšetřování příčin nehody o nově zjištěné skutečnosti. Matice faktů a hypotéz sestavena pomocí dostupných zdrojů podporuje závěry původního vyšetřování, které označují jako prvotní místo úniku uhlovodíků prasklé koleno č. 69b. Naopak v případě určení příčinných faktorů byly odhaleny hlubší příčiny, které umožnily vznik nehody.

V původním závěru popisujícím příčinu v průniku organických sloučenin síry byly nalezeny hlubší příčiny ve formě používání nevhodně navržené pračky plynů. Dále analytické sledování průniku síry do systému bylo schopné zachytit pouze průnik H_2S , avšak nedokázalo detekovat organickou síru.[1][18][20] Jedná se tedy o nepochopení chemie procesu. Poté n.p. Kaučuk Kralupy nad Vltavou v surovinách dodávaných z havarované výroby detekoval koncentraci síry, která nevyhovovala požadovaným provozním podmínkám.[18] Na základě této informace

byla přijata určitá opatření[18], avšak docházíme k závěru, že nedošlo k vhodnému poučení v oblasti detekce průniku síry a vyšetření příčin průniku.

Mezi další důvody vzniku havárie patří problém v oblasti údržby zařízení. Docházelo zde k nedostatkům v oblasti komunikace a zajišťování vhodných dílů pro včasné provedení oprav, dále pak došlo ke změně původního plánu údržby a výměně sousedního kolena.[1] Tato opomenutí lze shrnout jako selhání v oblasti řízení rizika. Hlubší příčiny je možné hledat v oblasti selhání kultury bezpečnosti, konkrétně v oblasti efektivní komunikace a včasné reakce na problémy. Dále byl objeven problém v péči o zařízení jako celek. Vnitřní koroze byla dlouhodobá, avšak její zjištění proběhlo až několik měsíců před nehodou na základě jiné události.[1] Problém byl tedy v oblasti péče, údržby a celistvosti zařízení.

Poslední důvody je možné najít v samotném návrhu provozního zařízení, konkrétně v oblasti řízení rizika a havarijního plánování. Havarijní systém byl založen na havarijní pochodni určené ke spalování uhlovodíků. Avšak systém neumožňuje okamžité zastavení průtoku materiálu a jeho kompletní odklon na havarijní pochodeň. Problém lze najít v oblasti havarijního plánování a kultury bezpečnosti v oblasti vysokých standardů spojených s vědomím zranitelnosti. Tyto důvody vedou k tomu, že havarijní systém nedokázal zmírnit následky nehody, protože riziku nebylo dostatečně porozuměno a nebyla přijata vhodná opatření pro jeho zvládnutí.

2.5 Původní řízení bezpečnosti

Vyhláška 227/2015 Sb. vymezuje 7 oblastí, které se týkají systému řízení bezpečnosti. Konkrétně se jedná o posouzení rizik vzniku závažné havárie, popis obsluhy zařízení a systému řízení zaměstnanců, dále systém řízení provozu a změn, havarijní plánování pro vznik nežádoucích událostí, analýzu a sledování bezpečnostních cílů a na závěr audity systému řízení bezpečnosti.[11] Cílem je přiřadit dostupné informace k těmto bodům.

Systém řízení provozu a změn v objektu obstarávala závodní norma N 11 985 pro technické dokumentace všech výrobních zařízení. Pro výměny, kontrolu a přejímání potrubních částí zařízení byla v rámci podniku zavedena norma N 11 986. V případě ethylenových kolon systém pravidelné údržby probíhal v jednoletých cyklech, přičemž vždy jeden rok proběhla běžná údržba a druhý rok probíhala střední oprava. V rámci oprav proběhla vždy odstávka zařízení. Mimo tyto pravidelné opravy probíhaly podle potřeby menší opravné práce zahrnuté do inspekční údržby. Rozsah oprav nebyl vždy stejný, ale byl určen mechanikem výroby. Potrubí prvního stupně chladicího okruhu se udržoval metodou prohlídek.[1] Ke sledování stavu provozu sloužily registrační přístroje a záznamové pásky.[1][18] Celkový obsah síry v systému

nebyl analyzován, sledován byl pouze obsah H₂S výstupního proudu z pračky plynu pomocí roztoku octanu olovnatého.[1]

Před zvýšením objemu výroby byly provedeny úspěšné kapacitní zkoušky zařízení.[1]

Pro případ nežádoucí události spojené s nárůstem tlaku v zařízení byly na zařízeních nainstalovány automatické přetlakové ventily napojené na havarijní pochodeň.[18]

Obsluha zařízení byla řádně proškolená a její úroveň odpovídala průměru až lehkému nadprůměru vzhledem ke standardům závodu. V oblasti školení nebyly nalezeny nedostatky.[1]

Souhrnný výsledek znázorňuje Tabulka 5. Symbol + značí, že se podařilo dohledat nějaké informace o dotyčné oblasti. Symbol × značí, že se o oblasti nepodařilo dohledat žádné informace.

Tabulka 5 Porovnání původního řízení bezpečnosti s vyhláškou č. 227/2015Sb.

Vyhláška č. 227/2015 Sb.[11]	Původní stav systému zařízení
Posouzení rizik vzniku závažné havárie	×
Lidé a systém řízení lidí	+
Řízení provozu objektu	+
Řízení změn	+
Havarijní plánování	+
Sledování a hodnocení cílů bezpečnosti	×
Audity	×

2.6 Doplnění řízení bezpečnosti moderním pohledem za využití metodiky přístupu k identifikaci, analýze a hodnocení rizik

Doplnění původních informací je provedeno na základě vyhlášky č.227/2015 Sb.[11] K identifikaci, analýze a hodnocení rizik je použita certifikovaná metodika.[8] V rámci této práce je zpracována analýza pouze pro oblasti, které byly v původní analýze předpokládány jako zdroj prvotního výronu uhlovodíku, tedy oblast kolena č. 69b a kolektor sání chladícího okruhu. Zároveň vzhledem k omezeným zdrojům informací a omezenému času není zpracována kompletní analýza, ale cílem práce je ukázat princip používání této metodiky.

2.6.1 Základní doplnění

Předchozí kapitola 2.5 popisuje zjištěné informace týkající se původního systému řízení bezpečnosti. V porovnání s tím současná vyhláška č. 227/2015 Sb. popisuje 7 oblastí řízení bezpečnosti, které je nutné splnit.[11] Je vidět, že původní systém řízení neobsahoval všechny dnes požadované oblasti. Podařilo se zjistit určité informace ohledně systému řízení provozu, řízení změn, popisu zařízení a obsluhy. Avšak nepodařilo se získat informace týkající se analýzy rizik, auditů a bezpečnostních cílů. Původní havarijní plánování bylo zjištěno pouze částečně v podobě havarijní pochodně a přetlakových ventilů, ale bez dalších podrobností.[1][18]

2.6.2 Analýza rizik pro oblast kolena č. 69b a ethylenových kolon

Analýza rizik je provedena pomocí certifikované metodiky.[8] V oblasti kolena č. 69b a ethylenových kolon nacházíme kombinaci dvou nebezpečných látek, konkrétně směs ethanu a ethylenu.[1]

Popis nebezpečných látek

Tabulka 6 Základní charakteristiky ethanu a ethylenu

Charakteristika	Ethan[24]	Ethylen[25]
CAS	74-84-0	74-85-1
Molekulová hmotnost [g/mol]	30,1	28,1
Teplota tání [°C]	-182,79	-169,15
Teplota varu [°C]	-88,60	-103,77
Relativní hustota (vzduch = 1)	1,04	0,98
Hořlavost	Extrémně hořlavý	Extrémně hořlavý
Dolní mez výbušnosti [% obj.]	2,4	2,7
Horní mez výbušnosti [% obj.]	12,5	36
Toxicita	Nesplňuje požadavky	Nesplňuje požadavky
H – věty	H220	H220, H336

Obě látky se v systému nachází ve směsi s kontinuálním průtokem skrz popisované zařízení 28 t/hod. Ethylen v plynném stavu, ethan v kapalném.[1]

Po vytvoření seznamu nebezpečných látek následuje popis zařízení, kde se tyto nebezpečné látky nachází.[8]

Označení zařízení: Ethylenové kolony a připojené armatury. Popis zařízení: Rektifikační kolony sloužící k dělení směsi ethanu a ethylenu. Průměr 2,0 m, výška 42,65 m, tlak 24-25 atp., teplota od -25 °C do +3 °C.[1] Obsažené nebezpečné látky: ethan, ethylen v hmotnostním

poměru cca 35 % ethan a 65 % ethylen. Druh a množství nebezpečné látky: Hořlavá látka, průtoky: nástřik 6-8 t/hod., destilát 4-5 t/hod., zbytek 2-3 t/hod, zpětný tok 18-20 t/hod.[1]

Jelikož nebezpečné látky patří do skupiny hořlavín, je možné podle metodiky přejít k výběru zdrojů rizik pro hořlaviny, výbušniny a toxické látky. Cílem je vytvořit seznam obsahující popis zařízení a nebezpečných látek.[8]

Popis zařízení

Označení zdroje rizika: Únik vysoce hořlavých uhlovodíků ze systému. Popis zařízení: Ethylenové kolony sloužící k dělení směsi ethanu a ethyleny. Způsob nakládání s nebezpečnými látkami: Meziprodukty v rámci výroby. Umístění zařízení: Uvnitř oploceného objektu. Záchytná jímka: Ne. Název nebezpečné látky: ethan, ethylen. Druh nebezpečné látky: Obě látky jsou vysoce hořlavé. Skupenství při 25 °C: Obě látky jsou plynné. Množství nebezpečné látky v zařízení: Kontinuální průtok až 28 t/hod. Maximální provozní, resp. skladovací teplota: +3 °C.[1] Bod varu nebezpečné látky: ethan -88.6 °C, ethylen -103,8 °C. Tlak par nebezpečné látky při provozní, resp. skladovací teplotě: ethan 2520,7 kPa, ethylen 4027,3 kPa za využití Antoineovy rovnice[26] při teplotě 3 °C. Koncentrace nebezpečné látky ve vzduchu (LC₅₀): Obě látky nesplňují kritéria pro klasifikaci. Struktura popisu byla čerpána ze zdroje[8]. Informace o látkách byly čerpány ze zdroje[24] pro ethan a ze zdroje[25] pro ethylen.

Na základě dostupných informací je možné označit jako hlavní zdroj rizika ethanu a ethyleny jejich vysokou hořlavost.

Dalším krokem je popis technologie, ve které dochází ke skladování a zpracování.[8] Směs ethanu a ethyleny se vyskytují při teplotě od -25 °C do +3 °C a tlaku 24 – 25 atp, průtoky až 28 t/hod. Výška ethylenové kolony 42,65 m, průměr 2,0 m. Vnitřní objem kolony 124,22 m³, pracovní tlak 24 – 25 atp, projektový a zkušební tlak nezjištěn. Výška hladiny cca 1/2 stavoznaku, objem kapalné fáze 18,97 m³, objem plynné fáze 105,25 m³. Způsob plnění: kontinuální zařízení. Zabezpečení úniku: Žádná havarijní jímka, jedná se při pokojové teplotě o plynné látky. Materiál ethylenové kolony nezjištěn. Zájmové přípojné potrubí: koleno č. 69b o průměru 200 mm[1], vyrobené z oceli douklidněné hliníkem 11 368 dle ČSN.[18] Osazení ručně i dálkově ovládanými armaturami: nebyl nalezen konkrétní popis. Vybavení systémem měření a regulace a havarijním odstavením: registrační přístroje a záznamové pásky, měření průniku H₂S pomocí roztoku octanu olovnatého. Nebyla nalezena žádná informace

o přítomnosti havarijního odstavení. Frekvence manipulací(stáčení/plnění) a jejich doba trvání: kontinuální provoz.[1]

Kvantitativní analýza rizik

K posouzení rizik v oblasti ethylenové kolony a kolena č. 69b slouží kvantitativní analýza rizik. Cílem je odhalit možné rizikové situace, které by mohly mít za následek vznik rizikové události vedoucí k úmrtí, zranění, kontaminaci životního prostředí nebo poškození majetku.[8] V tomto případě je možné jako zdroj rizika považovat potrubí o průměru 200 mm propojující ethylenovou kolonu s vařákem s obsahem směsi ethanu a ethylenu při teplotě okolo 0 °C a tlaku okolo 25 atp.[1] Za iniciační událost se uvažuje únik z obou stran roztrženého potrubí, tj. dva otvory o průměru 200 mm a nebo únik z otvoru o velikosti 10 % průměru potrubí a maximálně 50 mm.[8] V tomto případě připadá v úvahu otvor o průměru 20 mm. Uvnitř objektu může nastat nežádoucí událost v podobě selhání celistvosti zařízení vedoucí k masivnímu úniku směsi ethanu a ethylenu ze systému. Tento únik může být způsoben lidskou chybou při obsluze nebo při provozní údržbě zařízení. Vyloučit nelze ani úmyslný čin. Dalším důvodem selhání systému může být událost v okolí výrobní jednotky. Může se jednat o nežádoucí událost v okolních provozech, nežádoucí událost v oblasti potrubních nebo například dopravní nehodu. Nežádoucí chemické reakce mohou probíhat mezi materiálem zařízení a případnými nečistotami v proudící směsi ethanu a ethylenu. Přetlak v zařízení neumožňuje v případě netěsnosti nasátí vzduchu z okolí, avšak umožňuje rychlý únik hořlavých látek do okolí, kde může následně dojít k požáru nebo výbuchu. V případě výpadku chlazení by mohlo dojít k zahřátí kapalného ethanu a jeho varu. V případě náhlého poklesu tlaku v systému by mohlo dojít k adiabatickému varu a velmi rychlému vzniku velkého objemu hořlavého plynu.

Pro možné kritické scénáře nežádoucích událostí, včetně jejich systematické komplexní analýzy metodika uvádí tři možné formy řešení. Jako první je zde uvedena metoda HAZOP, dále jsou to metody FMEA a FTA.[8] Z důvodu nedostatku informací a absence komplexní znalosti zařízení není možné spolehlivě provést analýzy metodami HAZOP, FMEA nebo FTA.

Další krok představuje výpočet rizika zjištěného zdroje. V tomto případě za zdroj rizika považujeme ethylenovou kolonu a spojovací potrubí k hořáku. První bod představuje výpočet skutečné nebezpečnosti vybraného zařízení pod označením A podle vzorce (1).[8]

Použitá certifikovaná metodika nedefinuje dobu úniku. Z tohoto důvodu bude použit čas úniku 30 min na základě doporučení z Purple Book jako nejhorší předpokládaný scénář.[27] Při kontinuálním průtoku 28 000 kg/h je tedy uvažována hodnota 14 000 kg.

Hodnota O_1 je závislá na určení zařízení, zda se jedná o výrobní nebo skladovací zařízení. Jelikož se zde jedná o výrobní zařízení, je zadáno $O_1 = 1$.

Hodnotu O_2 ovlivňuje umístění zařízení a ochrana proti nežádoucímu úniku nebezpečné látky, jedná - li se o otevřené nebo uzavřené zařízení a také záleží na teplotě varu nebezpečné látky v porovnání s teplotou varu za standardních podmínek. Zařízení je v otevřeném prostoru a teplota varu látek je mnohem nižší, než je normální teplota. Také v tomto případě je zadáno $O_2 = 1$.

Hodnota O_3 se týká možnosti úniku nebezpečné látky v plynné fázi. Zde se v systému nachází kombinace plynu a kapaliny, která má za provozní teploty tenzi par vyšší, než 3 bary. Z těchto důvodů je použita hodnota $O_3 = 10$.

Mezní hodnota G je ovlivněna mírou nebezpečnosti látky. V případě hořlaviny je stanovena hodnota 10 000 kg. Dosazením hodnot do vzorce (1) vychází výsledek $A = 14$.

Po stanovení čísla A je možné stanovit číslo S , které stanovuje míru rizika pro jiná zařízení v okolí. K výpočtu čísla S slouží vzorec (2). Jelikož se výrobní zařízení nachází v blízkosti jiných výrobních zařízení, zároveň v blízkosti hranice objektu a za hranicí objektu vede tramvajová trať a veřejná komunikace, je použita nejnižší povolená hodnota $L = 100$. Výsledkem je $S = 14$ a proto je nutné se tímto rizikem zabývat.

Počet lidí v okolí

V podniku v současné době pracuje každý den okolo 6500 lidí a jeho rozloha je 3,78 km². [28] Letecké snímky podniku však ukazují, že značnou část tvoří skladovací prostory, odstavné koleje a volné otevřené prostory. V těchto oblastech lze předpokládat velmi malou koncentraci osob. Je možné uvažovat, že největší koncentrace osob se bude nacházet přibližně na 1/3 rozlohy, tedy na rozloze 1,26 km². Jelikož není známé přesné rozdělení směn a tím množství zaměstnanců v určitý čas, bude pro výpočet použit konzervativní přístup, kdy bude uvažován počet zaměstnanců přes den na maximální hodnotě 6500. Průměrná hustota osob je tedy $5,2 \cdot 10^{-3}$ osob/m². V okolí původního umístění výrobní jednotky se nachází hlavní administrativní budova, závodní jídelna, výzkumný ústav a univerzitní centrum. Zároveň v těsné blízkosti vede silnice I/27 a tramvajová trať. Na základě hrubého odhadu počtu

kanceláři v administrativní budově a předpokladu jednoho zaměstnance na každou kancelář je uvažována obsazenost 720 lidí. Obsazenost zbylých zmíněných budov není možné určit. Aktuální jízdná řády měst Most a Litvínov uvádějí, že okolo podniku každý den projede 89 tramvají a 39 autobusů.[29] Průměrná obsazenost autobusů a tramvají není známa. V rámci výpočtů je uvažována průměrná obsazenost 20 osob v každé tramvaji a autobusu. Hustota dopravy na silnici I/27 v úseku okolo podniku není přesně známa, avšak při použití aritmetického průměru hustoty provozu na silnici I/27 v Ústeckém kraji z roku 2020[30] dostáváme hodnotu 4800 vozidel za den. Pro výpočty je předpokládáno, že se v každém vozidle nachází průměrně 2 osoby.

Možné scénáře nežádoucí události

Na základě stromu událostí byly určeny čtyři možné scénáře průběhu nežádoucí události spojené s masivním únikem směsi ethanu a ethylenu z prasklého kolena. Jedná se o únik směsi plynu a kapaliny typu Jet vedoucí k rozptýlu oblaku plynu bez jeho iniciace z důvodu úniku přehřáté kapaliny, adiabatickém varu kapaliny, vzniku louže, odparu z louže, úniku plynu typu Jet z potrubí a následně rozptýl těžkého plynu s přechodem do rozptýlu neutrálně vznášivého plynu bez iniciace oblaku. Mezi další scénáře patří Flash fire, UVCE, a únik směsi kapaliny a plynu spojený s okamžitou iniciací, který vede k požáru typu Jet. Každý scénář je následně podroben analýze následků. V případě uvažování úniku z otvoru o průměru 20 mm lze vzhledem k parametrům předpokládat, že bude docházet pouze k úniku přehřáté kapaliny ze systému bez úniku plynu. Jsou tedy tři možné scénáře. První počítá s únikem přehřáté kapaliny vedoucí k adiabatickému varu, vzniku louže, odparu z louže a šíření těžkého oblaku plynu s následným přechodem na neutrálně vznášivý plyn bez iniciace oblaku. Další scénáře jsou opět Flash fire a v případě okamžité iniciace vznik Pool fire. UVCE zde není v rámci této práce zvažován, jelikož nejsou k dispozici přesné informace o možném zahrazení v blízkosti a samotný únik a odpar z kaluže nebude sám o sobě tvořit potřebné turbulence.

Výpočet úniku při plném prasknutí kolena

K výpočtu úniku jsou použity vzorce z Yellow Book.[31] Vzhledem ke konstrukci zařízení se uvažuje kombinace dvou úniku zároveň. Z jedné strany prasklého potrubí bude docházet k úniku plynného ethylenu typu Jet. Druhá strana prasklého potrubí bude produkovat dvoufázový únik přehřátého ethanu. V důsledku poklesu tlaku v systému bude průběžně docházet k úniku plynného ethanu společně s proudem ethylenu a k poklesu rychlosti úniku. Avšak tento proces, konkrétně průběh tlaku v čase, je velmi obtížné přesně určit. Z tohoto

důvodu je uvažován stav, kdy dochází k úniku čistého plynného ethylenu z jedné strany a adiabaticky se vařícího ethanu z druhé strany potrubí při počátečním tlaku v systému. Při těchto předpokladech dochází k úniku 152,8 kg/s plynného ethylenu a 440 kg/s ethanu, přičemž v případě ethanu dochází k úniku 259,9 kg/s do ovzduší v podobě aerosolu a 180,1 kg/s kapalného ethanu padá na zem a tvoří kaluž. Délka Jet proudu plynného ethylenu je určena na 440 m. Hodnota spodní meze výbušnosti je dosažena ve vzdálenosti 65 m od zdroje úniku. Horní meze výbušnosti je dosaženo 5 m od místa úniku. Tyto hodnoty budou následně podpořeny vlivem unikajícího ethanu z druhé strany potrubí. Na druhou stranu tyto dva proudy budou v místě úniku působit proti sobě a tím se budou vzájemně částečně omezovat. Vzniklá kaluž kapalného ethanu bude limitována množstvím látky v zařízení a dosáhne maximálního průměru cca 35 m s maximální rychlostí odpařování okolo 47 kg/s.

Scénář Pool fire pro úplné prasknutí kolena

V případě vzniku Pool fire lze opět za využití vzorců z Yellow book[31] předpokládat výšku plamene 54,4 m v případě maximální velikosti kaluže o průměru 35,3 m. V tomto případě je velikost kaluže řízena rychlostí odhořívání, proto je menší než kaluž bez iniciace. Na základě zdroje Eisenberg et al.[32] je předpokládáno úmrtí 50 % osob při tepelném toku 18,5 kW/m² po dobu 45 s. Doba vystavení záření u zasažených osob je tedy v rámci výpočtů zmíněných 45 s. Tepelný tok 18,5 kW/m² je dosažen ve vzdálenosti 60,5 m od kaluže. Při uvažovaných 50 % úmrtnosti všech přítomných osob, průměrné hustoty zalidnění a zasažené oblasti v dosahu vypočteného tepelného toku je po zaokrouhlení stanoven počet mrtvých osob na hodnotu 38.

Scénář Jet fire pro úplné prasknutí kolena

K výpočtu velikosti vzniklého Jet fire slouží vzorce z Yellow Book.[31] K výpočtu velikosti je možné použít zjednodušené vzorce, protože hodnota výtoku ethylenu 152,8 kg/s splňuje limit platnosti. Délka plamene je vypočtena na 112,5 m a šířka plamene na 28,1 m. V případě ethanu je délka plamene 146,7 m a šířka 36,7 m a rychlost výtoku 440 kg/s. V případě 50% úmrtnosti při vystavení tepelnému toku 18,5 kW/m² po dobu 45 s a průměrné obsazenosti osob na ploše zasažené potřebným tepelným tokem je počet mrtvých po zaokrouhlení 227.

Scénáře Flash fire a UVCE pro úplné prasknutí kolena

Nejhorší scénáře z hlediska možných následků představují Flash fire a UVCE. Jelikož se jedná o únik typu Jet, který přirozeně tvoří turbulence a tyto turbulence jsou zde ještě zvětšeny působením dvou Jet úniků proti sobě a současně se v oblasti zařízení nachází několik

rektifikačních kolon, potrubní mosty a například budova kompresorovny, lze předpokládat spíše vznik UVCE než Flash fire. Proto je blíže analyzován pouze scénář vzniku UVCE. K určení následků UVCE je použita metoda IOI, která je blíže popsána v bodě 1.4.8. Je uvažován únik celého obsahu výrobního zařízení + 10 min přítok. Celkově se tedy jedná o únik 16364 kg směsi ethanu a ethylenu. Ethylen se řadí do skupiny látek se zvýšeným rizikem a z popisu zařízení je jisté, že se ve směsi nachází více než 3 molární procenta ethylenu. Proto k určení dosahu jednotlivých zón poškození slouží tabulka pro skupinu ethylenu a interpolace dat za předpokladu lineární závislosti mezi hodnotami pro 10 a 20 t. Pro únik 16,364 t směsi je určen poloměr pro 100% destrukci 52 m. Pro 80% destrukci poloměr 94 m a pro 40% škody 189 m. Pro maximální posun středu oblaku před iniciací je proto horní limit 180 m dle metodiky IOI. Ve vzdálenosti 100 m od místa úniku se nachází začátek administrativní budovy. Délka této budovy je opět přibližně 100 m. K dosažení největšího poškození dle metodiky proto bude střed oblaku posunut od místa úniku do vzdálenosti 150 m, na úroveň středu administrativní budovy.

Všechny vzdálenosti a plochy jsou stanoveny pomocí leteckých snímků podniku. Výsledné plochy tedy nejsou zcela přesné, avšak vzhledem ke koncentraci lidí v řádu $10^{-3}/\text{m}^2$ tato odchylka nemá zásadní vliv na výsledný počet případných obětí.

Na základě pravidel z bodu 1.4.8 dojde ke kompletní destrukci administrativní budovy a úmrtí všech lidí uvnitř. Jedná se odhadem o 720 lidí.

Dále v zóně 80% škod se nachází polovina závodní jídelny, třetina blíže nespecifikované velké budovy, malé propojovací budovy a kus přilehlé silnice společně s tramvajovou tratí. O bližší obsazenosti zmíněných budov nejsou žádné informace, proto bude k výpočtu použita průměrná hustota osob. Součet zasažených ploch budov je přibližně 2775 m^2 . Při průměrné hustotě zalidnění a předpokladu 25% úmrtnosti získáváme celkem 4 mrtvé.

V zóně 40% škod se nachází několik dalších budov, silnice, tramvajová trať a druhá polovina závodní jídelny. Zasažená plocha budov je okolo 6830 m^2 . Při této ploše, průměrné hustotě lidí a předpokladu 5% úmrtnosti uvnitř budov získáváme po zaokrouhlení 2 mrtvé. V dopravních prostředcích mimo areál podniku bude počet obětí 0. Na těchto základech je odhadovaný počet obětí tohoto scénáře 726.

Naopak v případě uvažování posunu oblaku opačným směrem od administrativní budovy do volného prostoru s menší koncentrací budov, který vyplňují primárně potrubní mosty, odstavné koleje s nákladními vagóny atd. by byl počet obětí znatelně menší. Za dodržení podmínek IOI

při využití plochy zasažené 100% škodami a průměrné hustoty lidí v podniku dostáváme hodnotu 44 mrtvých. K tomu je nutné připočíst 80% poškození pravděpodobně skladu. Na základě leteckých map je určena plocha této budovy na necelých 2000 m². Při použití průměrné hustoty vychází přítomnost 10 osob v této budově. Při předpokladu úmrtí 25 % osob v budově vychází po zaokrouhlení úmrtí 3 lidí z této budovy. Zóna 40% škod zahrnuje navíc další blíže nepopsanou budovu, pravděpodobně opět sklad. Plocha je opět pomocí letecké mapy určena na přibližně 2550 m². Z toho vychází obsazenost 13 lidí. Při předpokladu 5% úmrtnosti vychází po zaokrouhlení úmrtí jednoho člověka. V tramvaji je odhadnutý počet obětí 0. Celkový předpokládaný počet úmrtí v tomto scénáři je tedy 48.

Tabulka 7 Počty úmrtí v případě celkového prasknutí kolena při scénáři UVCE

Zóna poškození	Úmrtí při směru na administrativní budovu	Úmrtí při směru od administrativní budovy
100 %	720	44
80 %	4	3
40 %	2	1
Celkem	726	48

Výpočet úniku pro částečné prasknutí kolena

K výpočtu slouží vzorce z Yellow Book.[31] V případě částečného prasknutí je uvažován pouze únik přehřátého kapalného ethanu. Kapalina se adiabaticky vaří a dochází ke kombinaci rozptylu těžkého plynu a vzniku kaluže. Celková rychlost úniku se systému je 10,1 kg/s kapaliny, přičemž 6 kg bude přecházet v podobě aerosolu do vzduchu a 4,1 kg bude dopadat na zem. Maximální velikost kaluže je 20,3 m v průměru a maximální rychlost odparu je 4,1 kg/s. Při předpokládané době úniku 10 min dojde celkově k úniku 6060 kg ethanu.

Scénář Pool fire pro částečné prasknutí kolena

Pomocí vzorců[31] je stanovena výška plamene 8,35 m při předpokládaném požáru maximální velikosti kaluže, tedy kaluže o průměru 2,38 m. Velikost kaluže je limitována rychlostí odhořívání. Za využití stejných předpokladů jako v případě výpočtu Pool fire u celkového prasknutí kolena je vypočtený počet obětí tohoto scénáře 0.

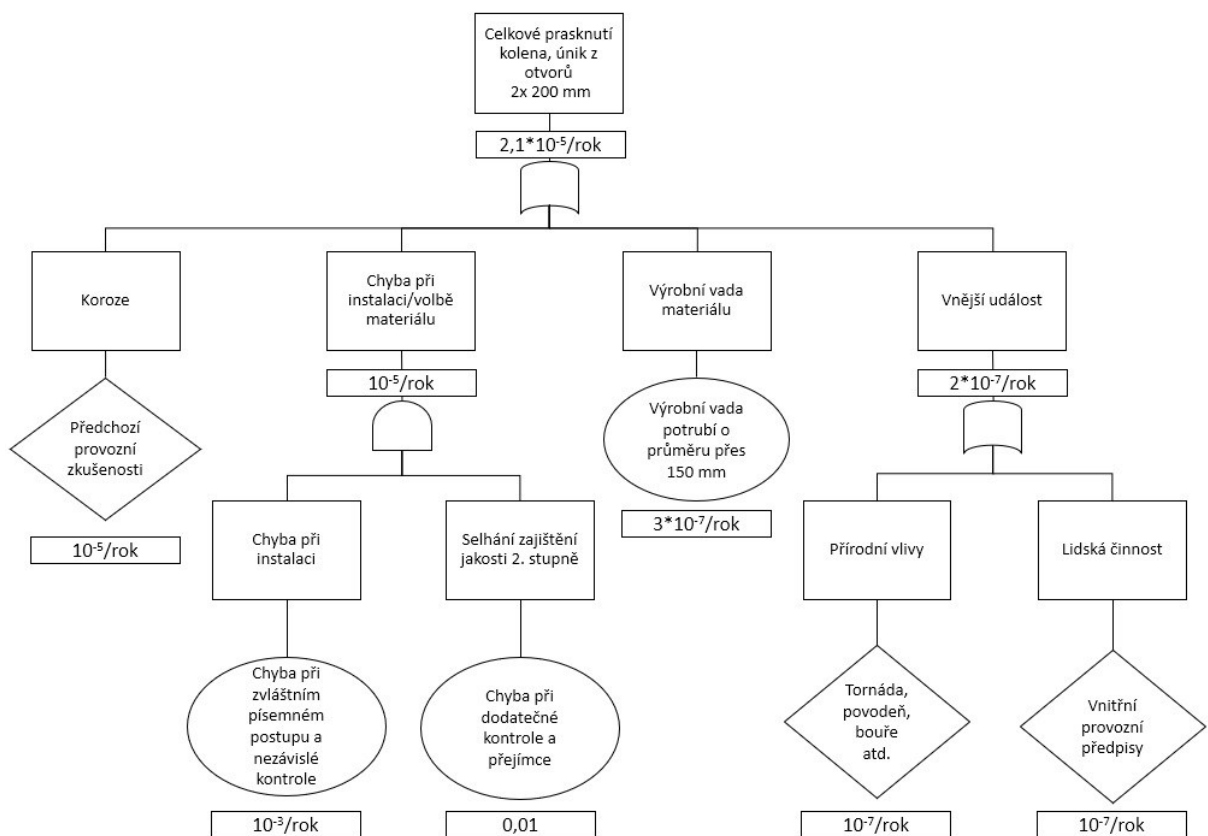
Scénář Flash fire pro částečné prasknutí kolena

Pro výpočet scénáře vzniku Flash fire byly využity vzorce z nového vydání Yellow Book.[15] Je počítáno s únikem plynu typu vlečka veškerého unikajícího množství, tedy 10,1 kg/s ethanu. Takto vzniklý oblak dosáhne dolní meze výbušnosti ve vzdálenosti 86 m od místa úniku. Horní

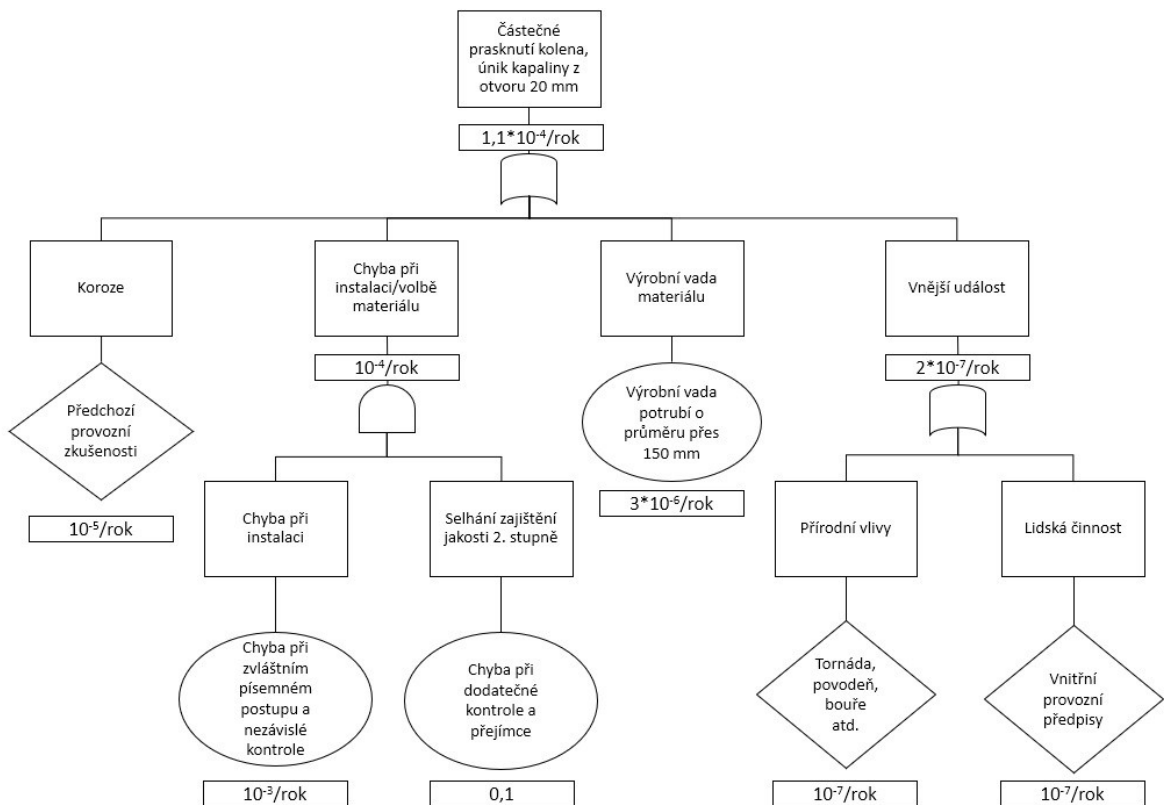
mez výbušnosti je dosažena 32 m od zdroje. Průměr oblaku o výbušné koncentraci je tedy 54 m. Pro výpočet zasažené plochy je předpokládán kruhový oblak o průměru 54 m. Plocha oblaku má tedy 2290 m². Při scénáři Flash fire by došlo k úmrtí všech osob uvnitř oblaku a přežití všech osob mimo oblak. Při průměrné hustotě zalidnění je počet obětí 12.

Stanovení frekvencí iniciačních událostí

Frekvence obou iniciačních událostí je možné určit pomocí stromu poruch. Obrázek 12 znázorňuje strom poruch pro celkové prasknutí kolena a únik nebezpečné látky ze dvou otvorů o průměru 200 mm. Obrázek 13 představuje strom poruch pro částečné prasknutí kolena a únik nebezpečné látky z jednoho otvoru o průměru 20 mm.



Obrázek 12 Strom poruch pro celkové prasknutí kolena

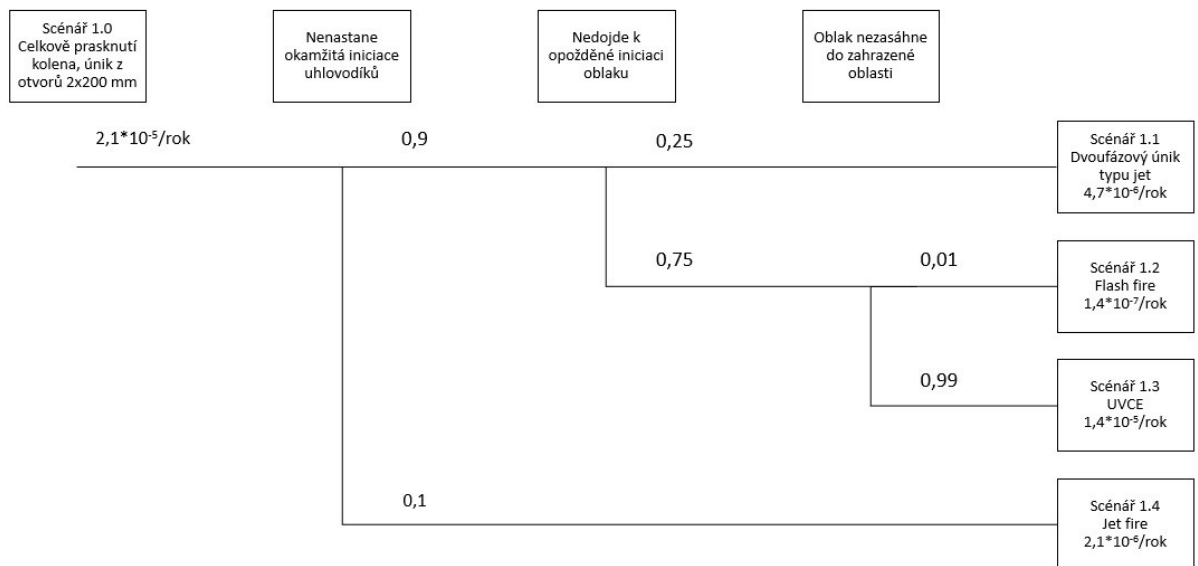


Obrázek 13 Strom poruch pro částečné prasknutí kolena

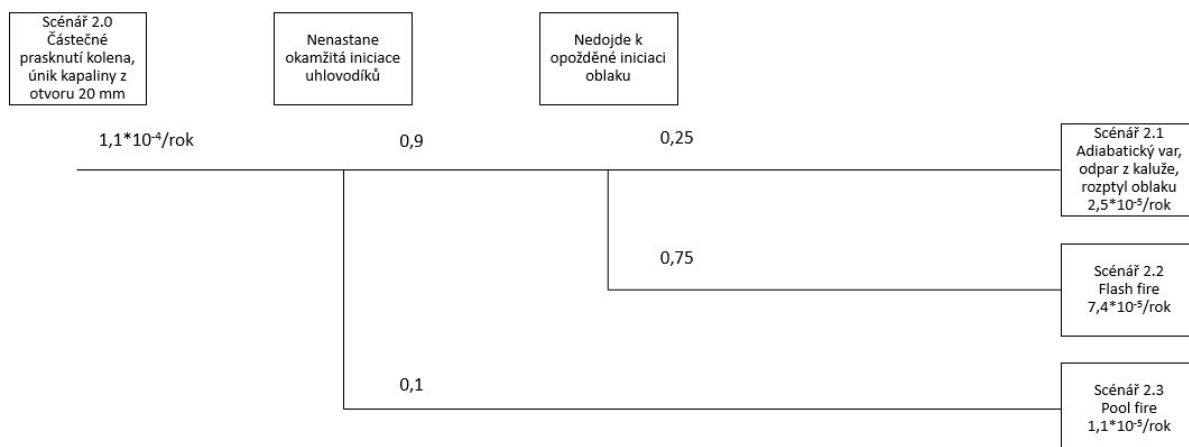
Vzhledem k povaze výrobního zařízení lze předpokládat, že budou vypracovány a přísně kontrolovány vnitřní provozní předpisy, které se týkají eliminace rizik spojených s lidskou činností v okolí zařízení. Proto je zvolena zanedbatelná frekvence na úrovni 10^{-7} /rok. Stejně tak v případě mimořádných přírodních vlivů byla zvolena zanedbatelná frekvence 10^{-7} /rok. Výrobní vada potrubí byla ohodnocena na frekvenci $5 \cdot 10^{-6}$ /rok, resp. $5 \cdot 10^{-7}$ /rok. Délku potrubí se podařilo určit na asi 3 m a použitý zdroj uvádí frekvenci selhání $1 \cdot 10^{-6}$ /rok na každý 1 m potrubí o průměru přes 150 mm v případě částečného prasknutí a frekvenci $1 \cdot 10^{-7}$ /rok na každý 1 m potrubí o průměru přes 150 mm pro celkové prasknutí.[33] Při stavbě zařízení lze předpokládat, že byl použit zvláštní písemný postup práce a zároveň byla pravidelně prováděna kontrola. Vedle toho lze předpokládat druhou vrstvu kontroly prováděných prací. Schmidt pro tyto skutečnosti uvádí frekvenci selhání $1 \cdot 10^{-3}$ /rok v případě zvláštního písemného postupu. Protože druhotnou kontrolu lze považovat za běžnou rutinní činnost při nízkém stresu, pravděpodobnost selhání je podle Schmidta určena jako 0,1.[34] Lze však předpokládat, že v případě vzniku tak velké chyby, která by vedla k celkovému prasknutí, by bylo její odhalení pravděpodobnější. Proto bude v případě celkového prasknutí uvažována hodnota 0,01. Problém případné koroze systému je na základě předchozích zkušeností s průnikem siriých sloučenin řešena pomocí pračky plynů. Jelikož však žádné zařízení není dokonalé, tak není vhodné použít

zanedbatelnou frekvenci jako v případě například přírodních vlivů. Mnohem realističtější odhad je spíše na použité frekvenci $1 \cdot 10^{-5}$ /rok. Výsledná frekvence vzniku nežádoucí události je tedy na úrovni $2,1 \cdot 10^{-5}$ /rok pro celkové prasknutí a na úrovni $1,1 \cdot 10^{-4}$ /rok pro částečné prasknutí.

Vypočítaná frekvence vzniku iniciačních událostí je následně použita jako vstupní hodnota pro analýzu frekvence jednotlivých následků pomocí stromů událostí, ve kterých jsou dále použity zadané pravděpodobnosti u každého větvení stromu.[35] V případě posouzení pravděpodobnosti vzniku výbuchu neohraničeného oblaku plynu nebo Flash fire je u celkového prasknutí kolena brána v potaz skutečnost, že se jedná o únik typu Jet, který provází vznik značných turbulencí a zároveň samotná výrobní jednotka zahrnuje množství armatur, budov a zařízení. Tyto dvě skutečnosti mohou velmi pravděpodobně způsobit vznik potřebných turbulencí a zahrazení, které je potřebné pro výbuch. V případě částečného prasknutí kolena a uvažování rozptylu typu vlečka sice nelze zcela vyloučit vznik UVCE, pokud by se oblak dostal do zahrazené oblasti, avšak jelikož nejsou k dispozici bližší plány okolí a rozptyl typu vlečka samostatně netvoří turbulence, je pro účely této práce brán v potaz pouze vznik Flash fire. Kompletní stromy událostí zobrazuje Obrázek 14 a Obrázek 15.



Obrázek 14 Strom událostí pro celkové prasknutí kolena



Obrázek 15 Strom událostí pro částečné prasknutí kolena

Pro lepší přehlednost je použita Tabulka 8 a Tabulka 9 k zapsání vypočtených pravděpodobností.

Tabulka 8 Výsledky pravděpodobností jednotlivých scénářů pro celkové prasknutí kolena

Scénář	Vypočtená pravděpodobnost
1.0 Iniciační událost	$2,1 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$
1.1 Rozptyl oblaku bez iniciace	$4,7 \cdot 10^{-6}/\text{rok}$
1.2 Flash fire	$1,4 \cdot 10^{-7}/\text{rok}$
1.3 UVCE	$1,4 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$
1.4 Jet fire	$2,1 \cdot 10^{-6}/\text{rok}$

Tabulka 9 Výsledky pravděpodobností jednotlivých scénářů pro částečné prasknutí kolena

Scénář	Vypočtená pravděpodobnost
2.0 Iniciační událost	$1,1 \cdot 10^{-4}/\text{rok}$
2.1 Rozptyl oblaku bez iniciace	$2,5 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$
2.2 Flash fire	$7,4 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$
2.3 Pool fire	$1,1 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$

Pomocí vzorce (3) je spočítána frekvence vzniku nejzávažnější havárie F_h , kterou představuje vznik UVCE v oblasti administrativní budovy. Hodnota F_S je $1,4 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$, P_{VNL} je 1, jelikož se jedná o kontinuální provoz, P_{VO} je 1 a P_{am} je také 1, jelikož incidentu předchází únik typu Jet. Výsledkem je F_h $1,4 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$.

Na výpočet F_h následně pomocí vzorce (4) navazuje výpočet celkové míry rizika MR . F_h je $1,4 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$ z předchozího výpočtu a počet obětí N je 726. Hodnota MR je 7,4.

Na závěr je možné pomocí vzorce (5) vypočítat přijatelnost zjištěného rizika F_p . V případě vzniku UVCE s počtem obětí 726 je přijatelná frekvence $1,9 \cdot 10^{-9}$ /rok. Tato frekvence je o 4 řády nižší, než vypočtená frekvence vzniku události a proto je riziko nepřijatelné.

2.6.3 Analýza rizik pro oblast kolektoru sání 1. stupně chladicího okruhu

Analýza se opět řídí certifikovanou metodikou.[8] V oblasti chladicího okruhu se opět nachází kombinace dvou nebezpečných látek. V tomto případě se jedná o směs propanu a propylenu.[1]

Popis nebezpečných látek

Tabulka 10 Základní charakteristiky propanu a propylenu

Charakteristika	Propan[36]	Propylen[37]
CAS	270-85-7	115-07-1
Molekulová hmotnost [g/mol]	44,1	42,1
Teplota tání [°C]	-187,6	-185
Teplota varu [°C]	-40	-48
Relativní hustota (vzduch = 1)	1,5	1,4
Hořlavost	Extrémně hořlavý	Extrémně hořlavý
Dolní mez výbušnosti [% obj.]	1,7	2
Horní mez výbušnosti [% obj.]	10,9	11
Toxicita	Nesplňuje požadavky	Nesplňuje požadavky
H – věty	H220	H220

Obě látky se v systému nachází v plynné fázi ve společné směsi při kontinuálním průtoku 60 t/hod.[1] Jelikož není známý poměr obou látek, pro výpočty bude uvažována směs v hmotnostním poměru 1:1.

Po vytvoření seznamu nebezpečných látek následuje popis zařízení, kde se tyto nebezpečné látky nachází.[8]

Popis zařízení

Označení zařízení: Chladicí okruh. Popis zařízení: Potrubí o průměru 700 mm, ze kterého jsou napojeny vstupy do turbokompresorů chladicího okruhu. Pracovní teploty -30 °C. Pracovní tlak 1,7 ata. Obsažené nebezpečné látky: propan, propylen. Průtok: 60 t/hod.[1]

Chladicí systém opět obsahuje dva hořlavé plyny, stejně jako předchozí část týkající se oblasti ethylenových kolon. Proto je možné znovu použít metodiky pro hořlaviny, výbušniny a toxické látky. Cílem je vytvořit seznam obsahující popis zařízení a nebezpečných látek[8]

Označení zdroje rizika: Únik vysoce hořlavých uhlovodíků z chladicího systému. Popis zařízení: Chladicí systém používající jako chladicí médium směs propanu a propylenu, který slouží k chlazení úpravy plynů a rektifikace. Způsob nakládání s nebezpečnými látkami: Chladicí médium. Umístění zařízení: Uvnitř oploceného objektu. Záchytná jímka: Ne. Název nebezpečné látky: propan, propylen. Druh nebezpečné látky: Obě látky jsou vysoce hořlavé. Skupenství při 25 °C: Obě látky jsou plynné. Množství nebezpečné látky v zařízení: Kontinuální průtok až 60 t/hod. Maximální provozní, resp. skladovací teplota: -30 °C.[1] Bod varu nebezpečné látky: propan -42,1 °C, propylen -48,0 °C. Tlak par nebezpečné látky při provozní, resp. skladovací teplotě: 167,7 kPa pro propan a 212,3 kPa pro propylen za využití Antoineovy rovnice[26] při -30 °C. Koncentrace nebezpečné látky ve vzduchu (LC₅₀): Obě látky nesplňují kritéria pro klasifikaci. Struktura popisu byla čerpána ze zdroje[8]. Informace o vlastnostech látek byly čerpány ze zdroje[36] pro propan a ze zdroje[37] pro propylen.

Na základě zjištěných informací je možné označit jako hlavní zdroj rizika propanu a propylenu jejich vysokou hořlavost.

Následuje popis technologie, ve kterých dochází ke skladování a zpracování.[8] Směs propanu a propylenu se v kolektoru sání vyskytuje při teplotě -30 °C a tlaku 1,7 ata, průtok až 60 t/hod. Celkové množství látky v chladicím okruhu je 55 000 kg, pracovní tlak v chladicím okruhu až 40 atp, projektový a zkušební tlak nezjištěn. Koeficient plnění nádob kapalnou fází 0,5 mimo kompresory a dochlazovače. Objem kapalně fáze v celém chladicím okruhu cca 65,1 m³ v závislosti na koeficientu naplnění kompresorů a dochlazovačů, objem plynné fáze cca 125,9 m³ v závislosti na množství kapaliny v kompresoru a dochlazovači. Způsob plnění: kontinuální zařízení. Zabezpečení úniku: Žádná havarijní jímka, jedná se při pokojové teplotě o plynné látky.[1] Materiál kolektoru sání je ocel 11 364 nebo 11 373 podle ČSN.[18] Osazení ručně i dálkově ovládanými armaturami: dálkové nebo ruční ovládání klapky bez bližšího popisu. Vybavení systémem měření a regulace a havarijním odstavením: registrační přístroje a záznamové pásky. Nebyla nalezena žádná informace o přítomnosti havarijního odstavení. Frekvence manipulací(stáčení/plnění) a jejich doba trvání: kontinuální provoz.[1]

Za iniciační událost se uvažuje únik z obou stran roztrženého potrubí, tj. dva otvory o průměru 700 mm nebo únik z otvoru o velikosti 10 % průměru potrubí a maximálně 50 mm.[8] V tomto případě tedy předpokládáme otvor o průměru 50 mm. Uvnitř objektu může nastat nežádoucí událost v podobě selhání celistvosti zařízení vedoucí k masivnímu úniku směsi propanu a propylenu ze systému. Tento únik může být způsoben lidskou chybou při obsluze nebo při

provozní údržbě zařízení. Vyloučit nelze ani úmyslný čin. Dalším důvodem selhání systému může být událost v okolí výrobní jednotky. Může se jednat o nežádoucí událost v okolních provozech, nežádoucí událost v oblasti potrubních mostů nebo například dopravní nehodu. Nežádoucí chemické reakce mohou probíhat mezi materiálem zařízení a případnými nečistotami v proudící směsi propanu a propylenu. Přetlak v zařízení neumožňuje v případě netěsnosti nasátí vzduchu z okolí, avšak umožňuje rychlý únik hořlavých látek do okolí, kde může následně dojít k požáru nebo výbuchu. V případě poruchy chlazení by mohlo dojít k zahřátí kapalné směsi propanu a propylenu a varu. V případě náhlého poklesu tlaku v systému by mohlo dojít k adiabatickému varu.

Kvalitativní analýza rizik

Stejně jako v případě analýzy ethylenové jednotky a výstupního potrubí je další krok představuje výpočet rizika zjištěného zdroje. Zde je zdrojem rizika potrubí kolektoru sání chladicího systému obsahující směs propanu a propylenu. První bod představuje výpočet skutečné nebezpečnosti vybraného zařízení pod označením A pomocí vzorce (1).[8]

Pro výpočet množství látky bude opět použita hodnota průtoku za 30 min jako v případě analýzy úniku z prasklého kolena. Při hodinovém průtoku 60 000 kg/h je tedy uvažováno 30 000 kg.

Hodnota O_1 je závislá na určení zařízení, zda se jedná o výrobní nebo skladovací zařízení. Jelikož se zde jedná o výrobní zařízení, je zadáno $O_1 = 1$.

Hodnotu O_2 ovlivňuje umístění zařízení a ochrana proti nežádoucímu úniku nebezpečné látky. V tomto případě je potrubí umístěno v suterénu budovy. Jelikož však z budovy je stále možný únik skrz okna a dveře a dále je zde použita látka zahřátá nad teplotu varu, tak i zde je zadáno $O_2 = 1$.

Hodnota O_3 se týká možnosti úniku nebezpečné látky v plynné fázi. V kolektoru sání se obě látky nachází v plynné fázi. Z těchto důvodů je použita hodnota $O_3 = 10$.

Mezní hodnota G je ovlivněna mírou nebezpečnosti látky. V případě hořlaviny je stanovena hodnota 10 000 kg.

Výsledek pomocí vzorce (1) je $A = 30$.

Po stanovení čísla A je možné stanovit číslo S , které stanovuje míru rizika pro jiná zařízení v okolí pomocí vzorce (2). Kompresorovna se opět nachází v blízkosti hranice objektu,

administrativní budovy a ostatních zařízení. Proto je i v tomto případě použita nejnižší možná hodnota $L = 100$.

Výsledkem je $S = 30$ a opět je nutné se tímto rizikem zabývat.

Možné scénáře nežádoucích událostí

V případě úniku z kolektoru sání strom událostí opět popisuje čtyři možné iniciační události. Stejně jako v případě úniku z kolena u ethylenové jednotky se jedná o rozptýl oblaku plynu bez jeho iniciace v podobě úniku plynu typu Jet bez iniciace oblaku. Dále Flash fire, UVCE a únik plynu spojený s okamžitou iniciací vedoucí ke vzniku Jet fire pro únik v případě celkového prasknutí. Pro únik z otvoru o průměru 50 mm není na základě výpočtů úniku uvažován výbuch neohraničeného oblaku par.

Výpočet úniku při plném prasknutí kolektoru

Stejně jako v předchozích případech jsou k výpočtu úniku použity vzorce z Yellow Book.[31] Jelikož se kolektor sání nachází těsně před turbokompresory, tak k úniku chladícího média bude docházet pouze z jedné strany otvoru. Povahu úniku lze velmi těsně považovat za Jet. Při uvažování počátečních podmínek bude docházet k úniku směsi propanu a propylenu rychlostí 194,8 kg/s. Délka Jet proudu plynné směsi je určena na 519 m, přičemž hodnota spodní meze výbušnosti je dosažena ve vzdálenosti 180 m od zdroje úniku. Horní meze výbušnosti je dosaženo 30 m od místa úniku.

Výpočet Jet fire při plném prasknutí kolektoru

Stejně jako v případě výpočtu Jet fire u úniku z kolena je v tomto případě možné použít zjednodušený vzorec pro rozměry plamene z Yellow book.[31] Délka plamene je stanovena na 127 m a šířka na 32 m. Za využití smrtelného tepelného toku 18,5 kW/m² po dobu 45 s[32], průměrné hustoty zalidnění a zasažené plochy, dosahuje počet obětí hodnoty 54.

Výpočet Flash fire a UVCE při plném prasknutí kolektoru

Jelikož je opět předpokládán únik typu Jet, bude v proudu plynu docházet k intenzivním turbulencím. Zároveň lze opět předpokládat vznik dodatečných turbulencí a částečný efekt zahrazení přítomností rektifikačních kolon, potrubních mostů, budovy kompresorovny atd. Z těchto důvodů je předpokládán primárně vznik UVCE. Ke stanovení následků bude použit únik směsi, která odpovídá 10 min průtoku skrz kolektor, tj. 10 000 kg směsi propanu a propylenu. Propan ani propylen nejsou zařazeny v seznamech látek s vyšší reaktivitou, proto

bude pro určení okruhů 100%, 80% a 40% poškození použita v metodě IOI základní tabulka. Pro 100% škody je uvedena vzdálenost 39 m od středu oblaku, pro 80% škody 72 m a pro 40% škody 144 m. V tomto případě je možný posun středu oblaku před iniciací limitován vzdáleností 144 m od místa úniku.

Všechny vzdálenosti a plochy jsou znovu stanoveny pomocí leteckých snímků podniku. Výsledné plochy tedy nejsou zcela přesné, avšak vzhledem ke koncentraci lidí v řádu $10^{-3}/\text{m}^2$ tato odchylka nemá zásadní vliv na výsledný počet případných obětí.

V rámci konzervativního přístupu a uvažování nejhoršího scénáře je střed oblaku posunut směrem na administrativní budovu během denní pracovní doby, kdy se očekává maximální výskyt zaměstnanců. Je použitý maximální povolený posun a střed oblaku se tedy nachází 44 m od začátku administrativní budovy ve směru od místa úniku. Zóna 100% destrukce tedy zahrnuje 39 m administrativní budovy na obě strany, což je celkem 78 m. Při délce budovy 100 m a předpokládané výskytu 720 lidí přes den lze tedy předpokládat úmrtí 78 % osob v budově vlivem zóny 100% poškození. V zóně 100% poškození zahyne 562 osob.

V oblasti 80% poškození se bude nacházet zbytek administrativní budovy, malá část jídelny a části dalších budov v blízkém okolí administrativní budovy. Plocha budov v 80% zóně škod je přibližně 803 m^2 bez započtení zbývající plochy administrativní budovy. Při použití průměrné koncentrace lidí a předpokladu 25% úmrtnosti 1 člověka. V administrativní budově zůstává mimo zónu 100% destrukce celkem 158 lidí. Z tohoto množství opět zahyne 25 %, tedy 40. Celkově v zóně 80% škod zahyne 41 lidí.

Zóna 40% škod zahrnuje například většinu jídelny a další budovy uvnitř podniku. Celkem se jedná přibližně o 6877 m^2 plochy budov a dále o silnici a tramvajovou trať vedle podniku. S průměrnou hustotou zalidnění a úmrtností 5 % dojde k úmrtí 2 osob v podniku. Mimo podnik v automobilech a MHD je odhadovaný počet obětí 0.

K porovnání je znovu proveden i výpočet možných následků v případě, že by oblak před iniciací putoval 144 m opačným směrem od administrativní budovy do míst k odstavným kolejím atd. Zóna 100% škod nezahrnuje žádné budovy. K výpočtu tedy bude použita plocha o poloměru 39 m. S použitím průměrné hustoty zalidnění je možný počet obětí 25.

V zóně 80% škod se opět nenachází žádné budovy, tedy v této zóně bude počet obětí 0. Nachází se zde pouze blíže nespecifikované cisterny, jejichž obsah však není znám, proto není možné určit případné sekundární škody.

Zóna 40% škod zahrnuje přibližně 3360 m² budov a část tramvajové trati vedle podniku. Při průměrné hustotě zalidnění a předpokládané 5% úmrtnosti uvnitř budov bude počet obětí 1. Mimo podnik je počet obětí 0.

Tabulka 11 Počty úmrtí v případě celkového prasknutí kolektoru při scénáři UVCE

Zóna poškození	Úmrtí ve směru na administrativní budovu	Úmrtí ve směru od administrativní budovy
100 %	562	25
80 %	41	0
40 %	2	1
Celkem	605	26

Výpočet úniku pro částečné prasknutí kolektoru

K výpočtu slouží vzorce z Yellow Book.[31] V případě částečného prasknutí bude docházet k úniku plynné směsi otvorem o průměru 50 mm. Rychlost úniku je vypočtena na 0,61 kg/s. Při předpokladu úniku po dobu 10 min tedy dojde k úniku 366 kg směsi propanu a propylenu.

Scénář Jet fire pro částečné prasknutí kolektoru

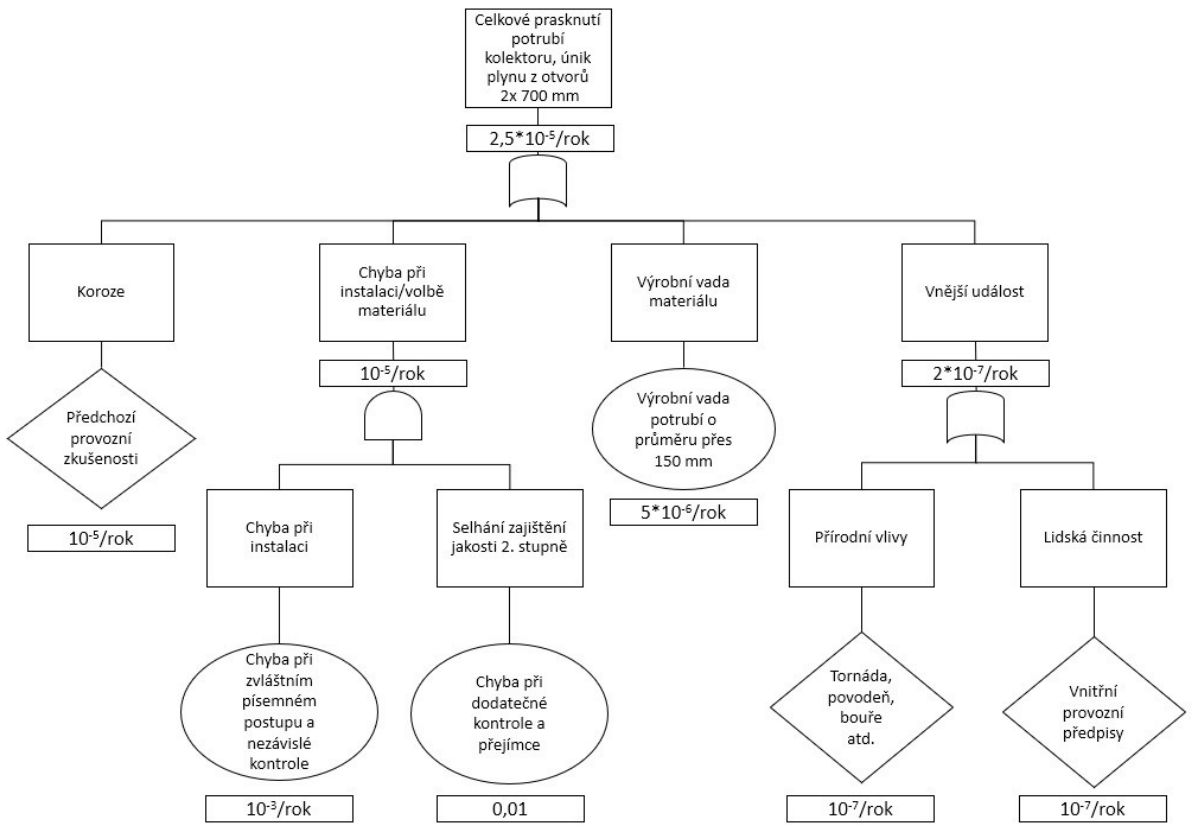
Pomocí vzorců[31] byla určena délka plamene na 7,1 m a šířka plamene na 1,8 m. Počet obětí za využití stále stejných předpokladů ohledně hustoty zalidnění, smrtící intenzity tepelného toku a úmrtnosti je celkový počet obětí 0.

Scénář Flash fire pro částečné prasknutí kolektoru

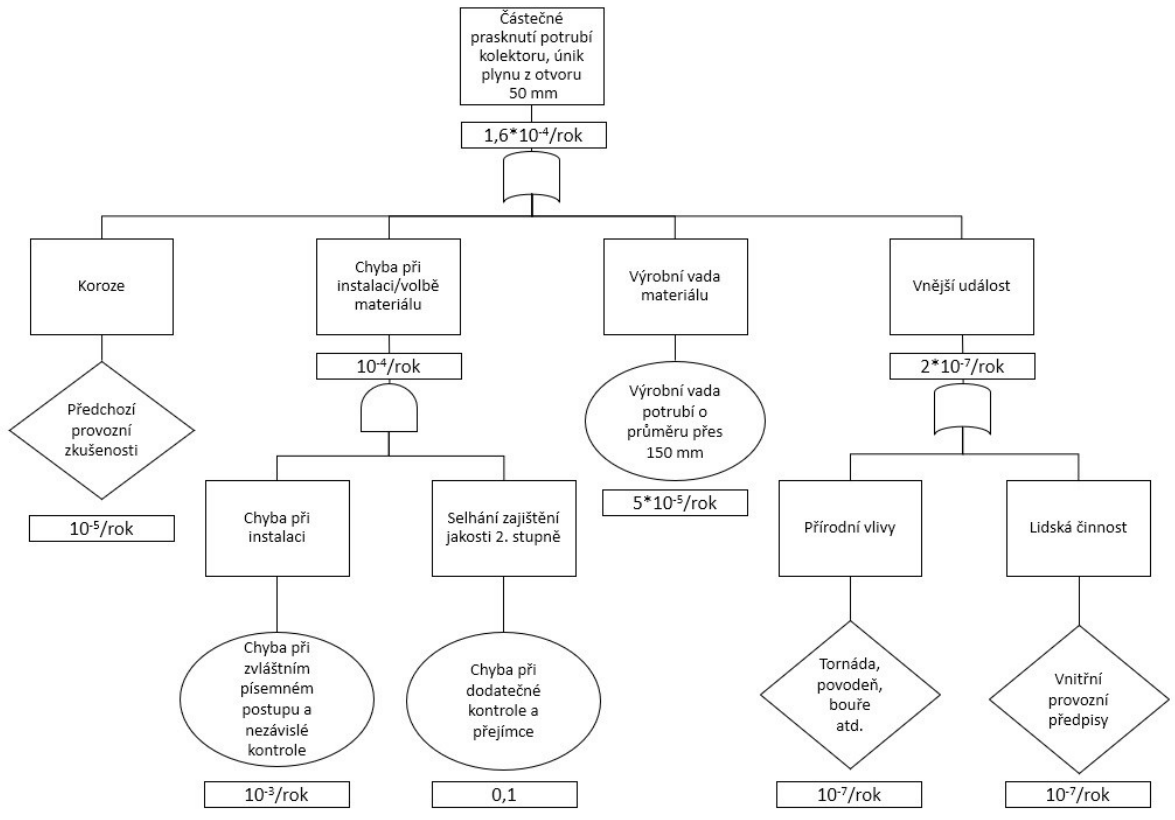
Scénář Flash fire je v případě částečného prasknutí kolektoru teoreticky možný, avšak pravděpodobně nezpůsobí žádné vážné škody. Pomocí výpočetních vzorců[31] je vypočtena vzdálenost spodní meze výbušnosti 12,8 m od zdroje úniku. Horní mez výbušnosti je dosažena 2,1 m od zdroje. Celkový objem stechiometrické směsi paliva se vzduchem je však pouze 3,8 m³. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že případný Flash fire způsobí pouze minimální škody a žádná úmrtí na životech.

Stanovení frekvence iniciačních událostí

Frekvence iniciačních událostí je znovu řešena pomocí stromu poruch. Obrázek 16 zobrazuje strom poruch pro celkové prasknutí kolektoru sání a únik nebezpečné látky ze dvou otvorů o průměru 700 mm. Obrázek 17 znázorňuje strom poruch pro částečné prasknutí kolektoru sání spojeném s únikem nebezpečné látky z jednoho otvoru o průměru 50 mm.

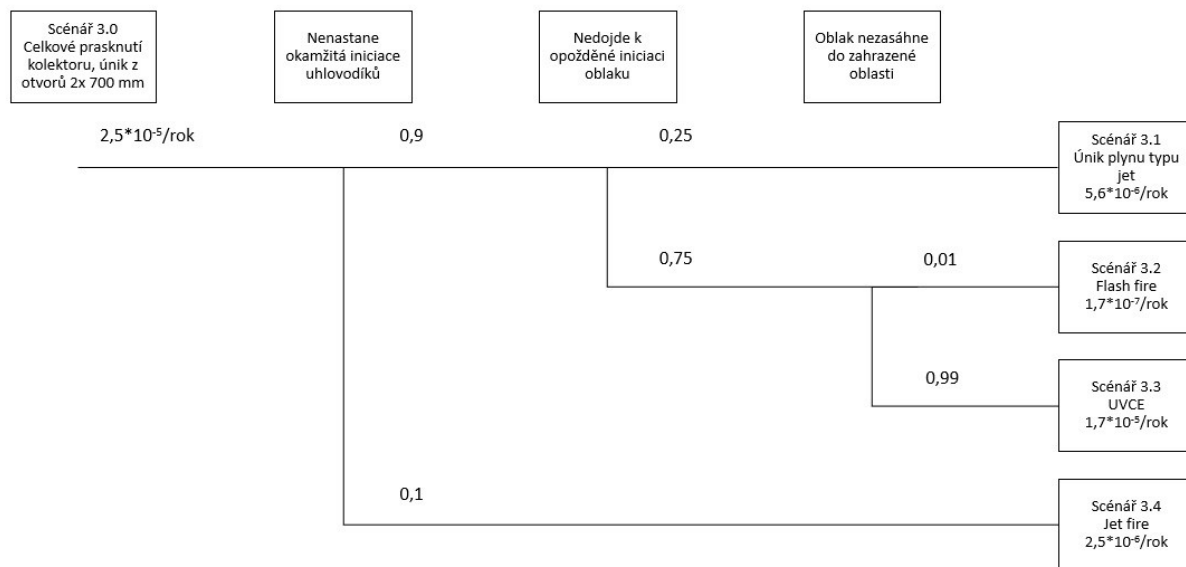


Obrázek 16 Strom poruch pro celkové prasknutí kolektoru

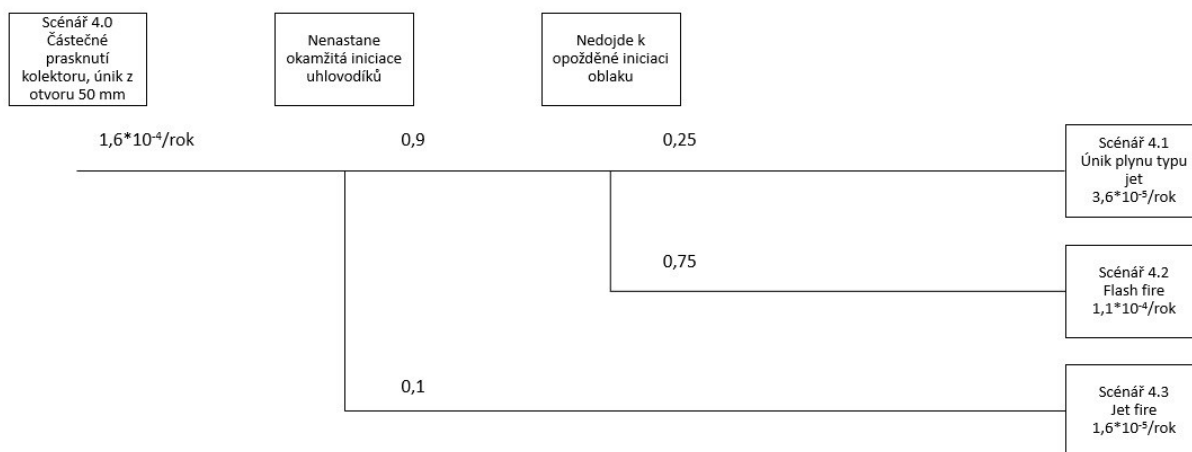


Obrázek 17 Strom poruch pro částečné prasknutí kolektoru

K vyhodnocení výsledné frekvence vzniku byly použity stejné předpoklady jako v případě prasknutí ethylenového kolena. Rozdíl spočívá pouze v délce potrubí pro výpočet pravděpodobnosti selhání z důvodu výrobní vady. V případě kolektoru sání je uvažována délka potrubí 50 m. Výsledná frekvence je $2,5 \cdot 10^{-5}$ /rok v případě celkového prasknutí kolektoru sání a $1,6 \cdot 10^{-4}$ /rok v případě částečného prasknutí. Vypočtené hodnoty jsou využity pro stanovení frekvence analýzy scénářů pomocí stromu událostí. Konkrétní stromy událostí zobrazuje Obrázek 18 a Obrázek 19.



Obrázek 18 Strom událostí pro celkové prasknutí kolektoru



Obrázek 19 Strom událostí pro částečné prasknutí kolektoru

Pro lepší přehlednost je použita Tabulka 12 a Tabulka 13 k zapsání vypočtených frekvencí.

Tabulka 12 Výsledky pravděpodobností jednotlivých scénářů pro celkové prasknutí kolektoru

Scénář	Vypočtená pravděpodobnost
3.0 Iniciační událost	$2,5 \cdot 10^{-5}$ /rok
3.1 Rozptyl oblaku bez iniciace	$5,6 \cdot 10^{-6}$ /rok
3.2 Flash fire	$1,7 \cdot 10^{-7}$ /rok
3.3 UVCE	$1,7 \cdot 10^{-5}$ /rok
3.4 Jet fire	$2,5 \cdot 10^{-6}$ /rok

Tabulka 13 Výsledky pravděpodobností jednotlivých scénářů pro částečné prasknutí kolektoru

Scénář	Vypočtená pravděpodobnost
4.0 Iniciační událost	$1,6 \cdot 10^{-4}$ /rok
4.1 Rozptyl oblaku bez iniciace	$3,6 \cdot 10^{-5}$ /rok
4.2 Flash fire	$1,1 \cdot 10^{-4}$ /rok
4.3 Jet fire	$1,6 \cdot 10^{-5}$ /rok

Pomocí vzorce (3) je spočítána frekvence vzniku nejzávažnější havárie F_h , kterou představuje vznik UVCE v blízkosti administrativní budovy. Hodnota F_S je $1,4 \cdot 10^{-5}$ /rok, P_{VNL} je 1, jelikož se jedná o kontinuální provoz, P_{VO} je 1 a P_{atm} je 1, jelikož incidentu předchází únik typu Jet. Výsledkem je F_h $1,7 \cdot 10^{-5}$ /rok.

Na výpočet F_h následně pomocí vzorce (4) navazuje výpočet celkové míry rizika MR . F_h je $1,7 \cdot 10^{-5}$ /rok z předchozího výpočtu a počet obětí N je 605. Hodnota MR je 6,2.

Na závěr je možné pomocí vzorce (5) vypočítat přijatelnost zjištěného rizika F_p . V případě vzniku UVCE s počtem obětí 605 je přijatelná frekvence $2,7 \cdot 10^{-9}$ /rok. Tato frekvence je o 4 řády nižší, než vypočtená frekvence vzniku události a proto je riziko nepřijatelné.

2.6.4 Návaznost dalších oblastí řízení bezpečnosti na výsledky analýzy rizika

Zbylé oblasti popsané vyhláškou č. 227/2015 Sb. představují audity, bezpečnostní cíle a havarijní plánování.[11] Audity je možné provádět vnitřně pomocí vzájemné kontroly jednotlivých nezávislých oddělení. Druhou možností jsou nezávislé externí kontroly a doporučení. Bezpečnostní cíle v obou analyzovaných systémech představují primárně postupy k zabránění úniku vysoce hořlavých uhlovodíků z potrubí. Z toho následně vycházejí postupy havarijního plánování pro případ vzniku nežádoucích událostí. K původnímu systému složenému na přetlakových ventilech napojených na havarijní pochodeň by dnes bylo nutné přidat další bezpečnostní opatření. Mezi takové zařízení by dnes měla patřit možnost okamžitého nouzového zastavení toku materiálů skrz zařízení. Vzhledem k množství proudící

vysoce hořlavé látky v obou studovaných systémech je nutné, aby byl případný havarijný zásah řízen automaticky při detekci neočekávaného poklesu tlaku v systému, a to v řádu sekund od prvotního zjištění problému. V případě lidské obsluhy není možné spoléhat na dostatečně rychlou a správnou reakci na případný únik. Zároveň je potřeba zajistit havarijní pochodeň a k tomu odpovídající potrubí s dostatečnou kapacitou pro bezpečné spalování veškerého odkloněného obsahu zařízení.

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

3.1 Doplnění analýzy nehody

První část výsledků práce představuje moderní pohled na vyšetření příčin nehody. Tato část je rozdělena do tří kapitol.

3.1.1 Výsledky matice faktů a hypotéz

Analýza pomocí matice faktů a hypotéz je použita k přehlednému roztřídění zjištěných informací o původním vyšetřování. Původně byla předpokládána dvě možná místa úniku plynných uhlovodíků ze systému. Cílem matice je tyto informace roztřídit a následně se pokusit určit konkrétní místo úniku. Na základě dostupných informací se maticí faktů a hypotéz podařilo určit, že prvotním místem úniku uhlovodíků bylo pravděpodobně prasklé koleno č. 69b a únik směsi ethanu a ethylenu. Tento závěr odpovídá závěru většiny tehdejších odborných a znaleckých posudků.

3.1.2 Výsledky analýzy kořenových příčin

Výsledky matice faktů a hypotéz jsou použity k analýze příčin vzniku nehody metodou analýzy kořenových příčin, přičemž jako místo úniku je považováno koleno č. 69b. Z původních zdrojů bylo určeno celkem 7 příčinných faktorů, které se podílely na vzniku nehody. Jejich analýzou bylo zjištěno, že se nedostatky nacházely jak v technické oblasti samotného zařízení, tak v lidském faktoru při obsluze a údržbě zařízení.

3.1.3 Výsledky analýzy metodou IPICA

Metoda IPICA je použita jako další rozšíření předchozí analýzy kořenových příčin. Původních 7 příčinných faktorů, které byly získány v analýze kořenových příčin, tato metoda rozšiřuje na celkem 12. Metoda IPICA odhaluje nedostatky ve všech 4 pilířích bezpečnosti, které jsou k analýze používány. Jsou tedy objeveny nedostatky v oblasti závazků ke kultuře bezpečnosti, v oblasti řízení rizik, v oblasti porozumění rizikům a zdrojům rizika, a také v oblasti poučení se z předchozích zkušeností.

3.2 Výsledky doplnění řízení bezpečnosti moderním pohledem

V moderním pohledu řízení bezpečnosti je použita Certifikovaná metodika. Je provedeno posouzení pro obě oblasti, které byly v původním vyšetřování uvažovány jako možné místo prvotního úniku, koleno č. 69b spojené s ethylenovou kolonou a kolektor sání chladícího okruhu.

3.2.1 Výsledky analýzy kolena č. 69b

Prvním výsledkem reprezentuje výpočet zjištěného zdroje rizika A , resp. míru rizika zdroje pro okolí S . Jelikož se ve vzdálenosti 100 m od zařízení nachází hlavní administrativní budova podniku, vychází výsledek $S = 14$ a je nutné se touto hroznou zabývat.

Celkové prasknutí kolena

Pro případ celkového prasknutí kolena se uvažují scénáře rozptylu plynu bez iniciace, Jet fire spojený s Pool fire, Flash fire a UVCE. Scénář Flash fire není blíže analyzován, jelikož nejhorší následky má scénář spojený s UVCE, který je vzhledem k podmínkám mnohem pravděpodobnější. Pomocí metody IOI a uvažovaném úniku 16364 kg směsi ethanu a ethylenu je určena 100% destrukce v okruhu 52 m od středu oblaku. 80% destrukci v okruhu 94 m od středu a 40% destrukci v okruhu 189 m. V nejhorším scénáři při dodržení pokynů metody IOI je střed oblaku plynu posunut před iniciací doprostřed nedaleké administrativní budovy. V tomto případě bude 726 obětí na životech. Pro porovnání je stanoven také scénář, kdy by střed oblaku putoval na opačnou stranu od administrativní budovy. Zde je předpokládaný počet obětí nižší, konkrétně 48.

Mezi další scénáře patří rozptyl oblaku bez iniciace, kdy je možné očekávat úniky typu Jet u ethylenu a únik přehřátého ethanu spojený s adiabatickým varem a vznik kaluže ethanu. Délka Jet proudu u ethylenu je 440 m. Spodní mez výbušnosti je dosažena 65 m od místa úniku. Horní mez výbušnosti se nachází 5 m od zdroje. Maximální velikost kaluže ethanu je 134,3 m v průměru s rychlostí odparu 106 kg/s.

Případný Pool fire bude při maximálním průměru kaluže 35,3 m produkovat plamen do výšky 54,4 m. Při průměrné hustotě zalidnění a předpokladu 50% úmrtí při tepelném toku 18,5 kW/m² je uvažovaný počet obětí 38.

Jet fire vzniklý výtokem ethylenu má rozměry 112,5 m na délku a 28,1 m na šířku. K tomu se přidává Jet fire z úniku aerosolu ethanu o velikosti 146,7 m na délku a 36,7 m na šířku. Při průměrné hustotě zalidnění a předpokladu 50% úmrtí při tepelném toku 18,5 kW/m² je uvažovaný počet obětí 227.

Částečné prasknutí kolena

Pro částečné prasknutí kolena předpokládáme pouze únik kapalného ethanu. Možné scénáře jsou rozptyl oblaku plynu bez iniciace, Pool fire a Flash fire. Bude docházet k úniku kapalného ethanu o množství 10,1 kg/s, přičemž 4,1 kg/s budou dopadat na zem v podobě kapaliny a

6,0 kg bude odcházet do vzduchu v podobě aerosolu. Celkově se během předpokládané doby úniku 10 min dostane do okolí 6060 kg ethanu. Maximální velikost kaluže je 20,3 m v průměru s maximální rychlostí odparu 4,1 kg/s.

Scénář Pool fire předpokládá vznik hořící kaluže o maximálním průměru 2,4 m s výškou plamene 8,4 m. Při průměrné hustotě zalidnění a předpokladu 50% úmrtí při tepelném toku 18,5 kW/m² je uvažovaný počet obětí 0.

Scénář Flash fire uvažuje únik veškerého unikajícího ethanu do ovzduší a rozptyl oblaku typu vlečka. Při vzdálenosti 54 m mezi horní a dolní mezí výbušnosti je pro výpočet uvažován kruhový oblak o stejném průměru. Při průměrné hustotě zalidnění a předpokladu, že uvnitř oblaku plynu je 100% úmrtnost osob, přičemž mimo oblak je úmrtnost 0 %, je předpokládaný počet obětí 12.

Přijatelnost zařízení

Pro nejhorší předpokládaný scénář, tedy UVCE při celkovém prasknutí kolena, je vypočtena frekvence vzniku 1,4*10⁻⁵/rok. Při počtu obětí 726 je maximální přípustná frekvence 1,9*10⁻⁹/rok. Frekvence vzniku této události je tedy o několik řádů vyšší, než je maximální přípustná frekvence. Z dnešního pohledu toto zařízení představuje nepřijatelné riziko pro své okolí a jeho stavba v původní podobě je dnes nepřijatelná. Aby bylo možné dnes zařízení postavit, bylo by nutné upravit původní návrh zařízení tak, aby byla omezena frekvence vzniku UVCE, například instalovat automaticky ovládané rychlouzávěry, které by omezily možný únik nebezpečných látek. Zároveň je nutné posunout zařízení dále od míst s vysokou koncentrací osob, například v podobě administrativní budovy. Přijatelnost scénářů znázorňuje Tabulka 14 a Tabulka 15.

Tabulka 14 Přijatelnost jednotlivých scénářů pro celkové prasknutí kolena

Scénář	Vypočtená pravděpodobnost	Počet obětí	Přijatelnost
1.0 Iniciační událost	2,1*10 ⁻⁵ /rok	×	×
1.1 Rozptyl oblaku bez iniciace	4,7*10 ⁻⁶ /rok	×	Přijatelné
1.2 Flash fire	1,4*10 ⁻⁷ /rok	×	×
1.3 UVCE	1,4*10 ⁻⁵ /rok	726	Nepřijatelné
1.4 Jet fire	2,1*10 ⁻⁶ /rok	227	Nepřijatelné

Tabulka 15 Přijatelnost jednotlivých scénářů pro částečné prasknutí kolena

Scénář	Vypočtená pravděpodobnost	Počet obětí	Přijatelnost
2.0 Iniciační událost	$1,1 \cdot 10^{-4}$ /rok	×	×
2.1 Rozptyl oblaku bez iniciace	$2,5 \cdot 10^{-5}$ /rok	×	Přijatelné
2.2 Flash fire	$7,4 \cdot 10^{-5}$ /rok	12	Nepřijatelné
2.3 Pool fire	$1,1 \cdot 10^{-5}$ /rok	0	Přijatelné

3.2.2 Výsledky analýzy kolektoru sání

Prvním krokem je výpočet zjištěného zdroje rizika a míry rizika pro okolí. Hodnoty A , resp. S jsou 30. Proto je opět nutné se tímto zdrojem rizika zabývat.

Celkové prasknutí kolektoru

V případě celkového prasknutí kolektoru sání jsou zvažovány scénáře úniku plynné směsi propanu a propylenu typu Jet bez iniciace, dále Jet fire, Flash fire a UVCE. Flash fire není blíže analyzován, jelikož nejhorsí předpokládaný scénář znovu představuje UVCE, který vznikne vzhledem k podmínkám mnohem pravděpodobněji. S využitím metody IOI a uvažovaném úniku 10000 kg plynné směsi, který odpovídá 10 min průtoku skrz kolektor, je určen okruh 100% zničení 39 m od středu oblaku. Pro 80% škody je to 72 m a pro 40% škody 144 m. Celkově je odhadován počet obětí 605. V případě předpokladu putování středu oblaku ve směru od administrativní budovy lze předpokládat 26 obětí.

Délka proudu Jet při celkovém prasknutí kolektoru je vypočtena na 519 m od místa úniku. Spodní meze výbušnosti je dosaženo 180 m od místa úniku. Horní mez výbušnosti je 30 m od místa úniku. Rychlost úniku ze systému je 194,8 kg/s. Zajímavou skutečností je, že tento proud, včetně vzdáleností horní a dolní meze výbušnosti, je i přes řádově nižší tlak v systému celkově delší, než únik z prasklého kolena. Průměr otvoru je sice 3,5 krát větší, než v případě kolena, avšak je překvapivé, že i řádově nižší tlak spojený s takto velkým otvorem generuje delší proud plynu, než menší otvor při řádově vyšším tlaku. Pravděpodobně tento proud generuje nižší turbulence, které by proud brzdily.

Případný Jet fire vzniklý celkovým prasknutím kolektoru bude dosahovat délky 127 m a šířku 32 m. Při průměrné hustotě zalidnění a limitu 18,5 kW/m² po dobu 45 s pro 50% úmrtnost je předpokládaný počet obětí 54.

Částečné prasknutí kolektoru

Pro částečné prasknutí kolektoru jsou uvažovány scénáře rozptylu plynu bez iniciace, Jet fire a Flash fire. Rychlost úniku z otvoru o průměru 50 mm bude 0,61 kg/s. Celkově za 10 min dojde k úniku 366 kg plynné směsi propanu a propylenu. Spodní mez výbušnosti je ve vzdálenosti 12,8 m od zdroje. Horní mez výbušnosti je 2,1 m od zdroje.

Flash fire

Scénář Flash fire je teoreticky možný, ale jelikož stechiometrický objem vznikajícího oblaku v mezích výbušnosti je pouze 3,8 m³. Proto nelze očekávat žádné závažné škody nebo úmrtí na životech.

Jet fire

Případný Jet fire z částečně prasknutého kolektoru bude dosahovat délky 7,1 m a šířky 1,8 m. Při použití stejných předpokladů jako v předchozích výpočtech je výsledkem 0 mrtvých.

Přijatelnost zařízení

Frekvence vzniku nejhoršího scénáře v podobě UVCE je $1,4 \cdot 10^{-5}$ /rok. Při počtu obětí 605 je maximální přípustná frekvence $2,7 \cdot 10^{-9}$ /rok. Frekvence vzniku této události je tedy o několik řádů vyšší, než je maximální přípustná frekvence. Z dnešního pohledu je tedy míra rizika opět nepřijatelná. Přijatelnost scénářů ukazuje Tabulka 16 a Tabulka 17.

Tabulka 16 Přijatelnost jednotlivých scénářů pro celkové prasknutí kolektoru

Scénář	Vypočtená pravděpodobnost	Počet obětí	Přijatelnost
3.0 Iniciační událost	$2,5 \cdot 10^{-5}$ /rok	×	×
3.1 Rozptyl oblaku bez iniciace	$5,6 \cdot 10^{-6}$ /rok	×	Přijatelné
3.2 Flash fire	$1,7 \cdot 10^{-7}$ /rok	×	×
3.3 Výbuch neohraničeného oblaku plynu	$1,7 \cdot 10^{-5}$ /rok	605	Nepřijatelné
3.4 Jet fire	$2,5 \cdot 10^{-6}$ /rok	54	Nepřijatelné

Tabulka 17 Přijatelnost jednotlivých scénářů pro částečné prasknutí kolektoru

Scénář	Vypočtená pravděpodobnost	Počet obětí	Přijatelnost
4.0 Iniciační událost	$1,6 \cdot 10^{-4}/\text{rok}$	×	×
4.1 Rozptyl oblaku bez iniciace	$3,6 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$	×	Přijatelné
4.2 Flash fire	$1,1 \cdot 10^{-4}/\text{rok}$	0	Přijatelné
4.3 Jet fire	$1,6 \cdot 10^{-5}/\text{rok}$	0	Přijatelné

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit moderní pohled na řízení bezpečnosti v Záluží, kde roku 1974 došlo k havárii. Nejprve byly shromážděny informace o havárii společně se závěry původního vyšetřování. Na základě těchto informací byla vytvořena moderní analýza nehody za využití matice faktů a hypotéz, analýzy kořenových příčin a metody IPICA. Metodou IPICA se podařilo získat celek 12 příčinných faktorů vzniku nehody oproti původním 3 faktorům.

Dalším krokem bylo seznámení se s moderní legislativou, kterou se řídí prevence závažných havárií. V ČR se tato prevence řídí zákonem č. 224/2015 Sb., který vychází ze směrnice EU Seveso III, společně s vyhláškou č. 225/2015 Sb. Za účelem ukázky současných požadavků a postupů při analýze rizik byla původní technologie analyzována pomocí Certifikované metodiky k identifikaci zdrojů rizik, analýze rizik a hodnocení rizik vzniku průmyslových havárií. Jelikož nebyly k dispozici přesné informace o původním zařízení, byla tato analýza zjednodušena, například nejsou zvažovány vnější vlivy, a bylo použito několik předpokladů.

Výsledkem moderní analýzy rizik je konstatování, že zařízení by představovalo ze současného pohledu nepřijatelně vysoké riziko pro okolí a stavba zařízení by dnes nebyla povolena, jelikož při nejhorších scénářích hrozí úmrtí až stovek osob. Přijatelné frekvence výskytu nejhorších scénářů v podobě UVCE jsou řádově 10^{-9} /rok, avšak vypočtené frekvence jsou v řádu 10^{-5} /rok.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Urban J., Domalíp V., Maxa J., Flek P., Fišer F., Kandr F., Zpráva o prošetření příčin havárie a hromadného úrazu v provozu syntetického lihu dne 19.července 1974, Chemické závody ČSSP, n.p., Záluží v Krušných horách, 1974
- [2] Před 40 lety došlo k nejtragičtější průmyslové nehodě. Online. Deník.cz. 2014. Dostupné z: <https://www.denik.cz/ustecky-kraj/obrazem-pred-40-lety-doslo-k-nejtragictejsi-prumyslove-nehode-20140719-hv9h.html>. [cit. 2024-04-16].
- [3] Ferjenčík, M. Practical safety management for small or medium enterprises. Online. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020, roč. 68. ISSN 09504230. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104281>. [cit. 2024-03-10].
- [4] Ferjenčík M., Bílý T., Frybortová L., A combined approach to incident cause analysis: Squeeze every drop of info from undesirable events. Online. Safety Science. 2023, roč. 158. ISSN 09257535. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105997>. [cit. 2023-12-09].
- [5] Rooney J. J., Heuvel L. N.V., Root Cause Analysis For Beginners, Quality Basics, 2004
- [6] Ferjenčík M., IPICA_Lite—Improvements to root cause analysis. Online. Reliability Engineering & System Safety. 2014, roč. 131, s. 1-13. ISSN 09518320. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.06.004>. [cit. 2023-12-09].
- [7] Leveson N., A new accident model for engineering safer systems. Online. Safety Science. 2004, roč. 42, č. 4, s. 237-270. ISSN 09257535. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X). [cit. 2023-12-09].
- [8] Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i, TLP, spol. s.r.o. Certifikovaná metodika, Metodika přístupu k identifikaci zdrojů rizik, analýze rizik a hodnocení rizik průmyslových havárií pro posouzení rizik v rámci prevence závažných havárií. Praha, 2015.
- [9] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/18/EU ze dne 4. července 2012 o kontrole nebezpečí závažných havárií s přítomností nebezpečných látek a o změně a následném zrušení směrnice Rady 96/82/ES Text s významem pro EHP
- [10] Zákon č. 224/2015 Sb. Zákon o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi a o změně zákona č. 634/2004 Sb.,o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů,(zákon o prevenci závažných havárií)

- [11] Vyhláška č. 227/2015 Sb. Vyhláška o náležitostech bezpečnostní dokumentace a rozsahu informací poskytovaných zpracovatel posudku
- [12] Úřad pro technickou normalizaci, meteorologii a státní zkušebnictví. ČSN EN 61882 (010693), Studie nebezpečí a provozuschopnosti (studie HAZOP) - Pokyn k použití. 2016.
- [13] Česká agentura pro standardizaci. ČSN EN IEC 60812, Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA a FMECA). Ed.2. 2019.
- [14] Český normalizační institut. ČSN EN 61025, Analýza stromu poruchových stavů (FTA). 2007.
- [15] Methods for the calculation of physical effects CPR 14E „Yellow book“, part 2. Third edition. Hague: Sdu Uitgevers, 1997. ISBN 9012084970.
- [16] Estimated maximum loss from explosion and/or fire. Fourth edition. London: International Oil Insurers, 1992.
- [17] Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials (Green Book), 1st edition 1992
- [18] Autor neuveden, Komplexní znalecký posudek k případu havárie v n.p. CHEZA Záluží u Mostu ze dne 19.7.1974, Ministerstvo vnitra ČSSR, Federální správa VB, Kriminalistický ústav, 1974
- [19] Nejedlý J., Znalecký posudek ve věci mimořádné události v n.p. Chemické závody ČSSP v Záluží v Krušných horách dne 19.7.1974, editor a místo neuvedeno, 1974
- [20] Mostecký J., Koritta J., Holub R., Hlaváček V., Znalecký posudek k mimořádné události v n.p. Chemické závody ČSSP Záluží, okr. Most ze dne 19.7.1974, Vysoká škola chemicko technologická Praha, 1974
- [21] Růžička, Chuchla, Stich, Chaloupka, Vrtal, Král, Odborná expertíza k vyhodnocení tlakových účinků a stanovení síly výbuchu v Chemických závodech ČSSP v Záluží, okres Most, editor neuveden, 1974
- [22] Zeman K., Novák K., Svoboda F., Odborný posudek ve věci související s vyšetřováním mimořádné události ze dne 19.7.1974 v n.p. Chemické závody ČSSP Záluží, okr. Most, Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů v Běchovicích, 1974
- [23] Center for chemical process safety (CCPS). Guidelines for Investigating Process Safety Incidents. Third edition. Hoboken (USA): Wiley-AIChE, 2019, s. 237. ISBN 9781119529071.

- [24] Ethan, CAS: 74-84-0, verze 2.1, LINDE GAS a.s, Praha, 8.4.2021, https://www.linde-gas.cz/cs/images/Ethan_tcm79-632312.pdf, [cit. 2024-02-14].
- [25] Etylen, CAS: 74-85-1, verze 10, ORLEN Unipetrol RPA s.r.o., Litvínov, 30.11.2021, https://www.unipetrolrpa.cz/CS/NabidkaProduktu/petrochemicke-produkty/monomery-aromaty-ostatni/Documents/Etylen_CZ_10_FIN.pdf, [cit. 2024-02-14].
- [26] VŠCHT Praha. Konstanty Antoineovy rovnice. Online. Konstanty Antoineovy rovnice. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/tab/dot-antoine.html>. [cit. 2024-02-14].
- [27] Guideline for quantitative risk assessment "Purple book" CPR 18E. 3.edition. RVIM, 2005. ISBN 90 12 08796 1.
- [28] Chempark Záluží. Online. ORLEN UNIPETROL RPA. Služby a areál. Dostupné z: <https://www.unipetrolrpa.cz/CS/sluzby-areal/chempark-zaluzi/Stranky/default.aspx>. [cit. 2024-03-19].
- [29] Městská hromadná doprava. Online. Dopravní podnik měst Mostu a Litvínova a.s. Jízdní řády MHD. 2012, 10.12.2023. Dostupné z: <https://www.dpmost.cz/jizdnirady>. [cit. 2024-03-19].
- [30] Celostátní sčítání dopravy 2020. Online. Ředitelství silnic a dálnic ČR. Intenzity dopravy - Ústecký kraj. C2022. Dostupné z: https://scitani.rsd.cz/CSD_2020/pages/results/section/default.aspx?l=Ústecký%20kraj. [cit. 2024-03-19].
- [31] Methods for the calculation of physics effects Resulting from releases of hazardous materials (liquids and gases); vols 1-2, Prins Mauruts Lab., Rijswijk, The Netherlands, 1979
- [32] Eisenberg, N.A., Lynch, C.J. and Breeding, R.J. (1975). Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills. Rep. CG-D-136± 75. Enviro Control Inc., Rockville, MD (in Lees, Frank P.; Loss Prevention in the Process Industries; Butterworth-Heinemann, second edition, 1996).
- [33] Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis. United States of America: Wiley, 2015. ISBN 978-0-470-34385-2.
- [34] Schmidt, M. S.: Villains, victims, and heroes: Accounting for the roles human activity plays in LOPA scenarios. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 30 (2014) 256-262.

- [35] Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 2. New York: Wiley-AIChE, 1999. ISBN 0-8169-0720-x.
- [36] Propan, CAS: 74-98-6, verze 2.0, FLAGA s.r.o., Hustopeče, červen 2022, https://www.flaga.cz/images/flaga-downloads/BL_PROPAN_UN_1965_2023_.pdf, [cit. 2024-04-9].
- [37] Propylen, CAS: 115-07-1, verze 9, ORLEN Unipetrol RPA s.r.o, Litvínov, 29.4.2022, https://www.orlenunipetrolrpa.cz/CS/NabidkaProduktu/petrochemicke-produkty/monomery-aromaty-ostatni/Documents/Propylen_CZ_9_FIN.pdf, [cit. 2024-02-14].