

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

Bc. Patricie Chmelařová

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Analýza rizika bioplynové stanice s využitím metody LOPA
Diplomová práce

2022

Bc. Patricie Chmelařová

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Patricie Chmelařová**
Osobní číslo: **C20518**
Studijní program: **N0531A130027 Inženýrství energetických materiálů**
Téma práce: **Analýza rizika bioplynové stanice s využitím metody LOPA**
Zadávající katedra: **Ústav energetických materiálů**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s podobou soudobých bioplynových stanic.
2. Seznamte se s dostupnými údaji o nehodách v bioplynových stanicích.
3. Seznamte se s legislativou, která by mohla být využita při analýze rizika bioplynových stanic.
4. Seznamte se s metodou LOPA.
5. Popište různé cíle, které může analýza rizika bioplynové stanice mít a odpovídající přístupy k analýze využívající metodu LOPA.
6. Ilustrujte různé přístupy k analýze rizika na příkladech z bioplynových stanic.
7. 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: **28. února 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **6. května 2022**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

doc. Ing. Miloš Ferjenčík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Pardubicích dne 28. února 2022

Prohlašuji:

Práci s názvem Analýza rizika bioplynové stanice s využitím metody LOPA jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena 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 6.5.2022

Bc. Patricie Chmelařová v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu této práce doc. Ing. Miloši Ferjenčíkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a věnovaný čas při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat vedení BPS Brloh a BPS Rybitví za umožnění exkurze a poskytnutí informací ohledně technologie a provozu.

ANOTACE

Teoretická část práce se zabývá obecným popisem a technologií bioplynových stanic a výčtem uveřejněných nehod, které se na nich v minulosti odehrály. Práce popisuje legislativu prevence závažných havárií v České republice i v Evropské unii. Dále práce zabývá analýzou rizika, jejími jednotlivými kroky a vybranými nejčastějšími metodami analýzy rizika. Část práce je věnována popisu zveřejněného návrhu na metodu analýzy rizika bioplynových stanic z italské univerzity. K metodě je přiložen komentář autorky a navrhnutí postupu analýzy rizika do praktické části s využitím metody LOPA. Praktická část se zabývá odpovědí na vybrané tři výzkumné otázky, které se týkají přijatelnosti rizika bioplynové stanice z hlediska okolních obyvatel, majitele provozu a pracovníků na provozu. V praktické části jsou využity představené metody analýzy rizika společně s metodou LOPA, která se prokáže jako vhodná pro analýzu rizika bioplynových stanic. Postup a výsledky jsou diskutovány.

KLÍČOVÁ SLOVA

LOPA, analýza rizika, bioplyn, bioplynová stanice, přijatelnost rizika

TITLE

Risk analysis of a biogas plant using the LOPA method

ANNOTATION

The theoretical part of the thesis deals with a general description and technology of biogas plants and presents selected published accidents that have occurred at biogas plants in the past. The thesis describes the legislation for the prevention of major accidents in the Czech Republic and in the European Union. Furthermore, the thesis deals with risk analysis, its steps and selected the most common methods of risk analysis. Part of the thesis is devoted to the description of the published proposal for the method of risk analysis of biogas plants from Italy. The method is accompanied by the author's comment and proposing a risk analysis method for the practical part using the LOPA method. The practical part searches for answer to three research questions concerning the acceptability of the biogas plant risk from the point of view of the surrounding population, the owner of the plant and the workers on the plant. In the practical part, the presented methods of risk analysis are used together with the LOPA method, which proves to be suitable for the risk analysis of biogas plants. The approach and results are discussed.

KEYWORDS

LOPA, risk analysis, biogas, biogas plant, risk acceptability

OBSAH

ÚVOD.....	13
1 TEORETICKÁ ČÁST	14
1.1 Bioplyn jako alternativní zdroj elektrické energie.....	14
1.1.1 Popis výroby bioplynu a jeho využití	15
1.1.2 Bioplynové stanice v České republice	19
1.2 Nehody na bioplynových stanicích.....	20
1.2.1 Vybrané nehody v zahraničí	22
1.2.2 Vybrané nehody v České republice	24
1.3 Analýza rizika, jeho řízení a hodnocení.....	25
1.4 Vybrané metody analýzy rizika	27
1.4.1 Metody identifikace zdrojů rizik HAZOP a PreHA	27
1.4.2 Strom poruch (Fault Tree)	30
1.4.3 Strom událostí (Event Tree).....	31
1.4.4 Metody pro odhad následků.....	32
1.4.5 Kvantitativní analýza rizika (QRA).....	33
1.4.6 Zjednodušená analýza rizika LOPA	33
1.4.7 Hodnocení rizika.....	37
1.5 Legislativa prevence závažných havárií v průmyslu	38
1.5.1 Analýza rizika v legislativě Evropské unie.....	38
1.5.2 Analýza rizika v legislativě České republiky	39
1.5.3 Prevence závažných havárií u bioplynových stanic	40
1.6 Příklady analýzy rizika z literatury	41
1.6.1 Metoda rozsáhlé kvantitativní analýzy rizika z Itálie	41
1.6.2 Komentář k příkladu analýzy rizika z literatury	46
1.7 Shrnutí poznatků a stanovení cílů.....	48
1.7.1 Výzkumné otázky a cíl diplomové práce.....	48
2 PRAKTICKÁ ČÁST	50
2.1 Metodika použitá v praktické části	50
2.2 Posuzovaná bioplynová stanice	50
2.2.1 Popis příkladové bioplynové stanice	51
2.3 Obyvatelstvo v okolí bioplynové stanice jako příjemci rizika	52
2.3.1 Zdroje rizika významné pro obyvatelstvo v okolí	52
2.3.2 Vybrané scénáře nehod s projevy ohrožující okolní obyvatele	53
2.3.3 Iniciační události způsobující vybrané scénáře	54

2.3.4	Ocenění následků vybraných scénářů.....	56
2.3.5	Stanovení přijatelnosti rizika pomocí formuláře LOPA.....	60
2.3.6	Rozhodnutí o přijatelnosti rizika pro obyvatele v okolí bioplynové stanice	65
2.4	Riziko bioplynové stanice z hlediska provozovatele.....	66
2.4.1	Zdroje rizika významné pro provozovatele	66
2.4.2	Vybrané scénáře nehod působící závažné finanční škody.....	67
2.4.3	Iniciační události způsobující vybrané scénáře	67
2.4.4	Ocenění následků vybraných scénářů.....	70
2.4.5	Stanovení přijatelnosti rizika pomocí formuláře LOPA.....	71
2.4.6	Rozhodnutí o přijatelnosti rizika pro majitele bioplynové stanice	75
2.5	Pracovníci bioplynové stanice jako příjemci rizika.....	77
2.5.1	Zdroje rizika významné pro obsluhu bioplynové stanice	77
2.5.2	Vybrané scénáře nehod ohrožující pracovníky na bioplynové stanici	77
2.5.3	Iniciační události způsobující vybrané scénáře	78
2.5.4	Ocenění následků vybraných scénářů.....	79
2.5.5	Stanovení přijatelnosti rizika pomocí formuláře LOPA.....	79
2.5.6	Rozhodnutí o přijatelnosti rizika pro pracovníky na bioplynové stanici.....	81
2.6	Diskuze	82
	ZÁVĚR.....	84
	POUŽITÁ LITERATURA	86
	PŘÍLOHY	89

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Tabulka 1: Vybrané nehody s jejich následky na bioplynových stanicích ve světě.....	22
Tabulka 2: Vybrané nehody a jejich následky na bioplynových stanicích v ČR.	24
Tabulka 3: Výčet návodných slov metody HAZOP a jejich význam, upraveno podle [22]. ...	28
Tabulka 4: Příkladná tabulka pro vyplnění jednotlivého kroku metody HAZOP, upraveno podle [21]......	28
Tabulka 5: Ukázka tabulky pro metodu PreHa.[21].....	29
Tabulka 6: Možná podoba výsledné tabulky, která kombinuje metody HAZOP a PreHA.[21]	29
Tabulka 7: Popis jednotlivých kategorií následků dle závažnosti a dle příjemce rizika.[21]...36	
Tabulka 8: ROA tabulka se sloupci s proměnnými odchylkami, příčinami a následky a souvisejícími ochrannými prvky [2]......	42
Tabulka 9: ROA tabulka názorného příkladu z článku [2], kdy odchylkou je nízká hladina vody v lapači kondenzátu.	44
Tabulka 10: Výběr základních událostí, které mohou vést k hromadnému úniku bioplynu ze zásobníku, převzato z [31]......	55
Tabulka 11: Dosah dolní meze hořlavosti oblaku bioplynu pro scénář S1.	58
Tabulka 12 Rozptyl oblaku bioplynu pro scénář S2, kdy nedojde k dosahu dolní meze hořlavosti v obydlené oblasti.	59
Tabulka 13: Dosah limitní koncentrace ERPG 3 sulfanu pro scénář S3.	59
Tabulka 14: Dosah limitní koncentrace sulfanu ERPG 3 pro scénář S4.	60
Tabulka 15: Výběr základních událostí, které mohou vést k vytvoření výbušné směsi ve fermentoru. Upraveno podle [2].	69
Tabulka 16: Výběr základních událostí, které mohou vést k vyšší koncentraci sulfanu v plynojemu. Vytvořeno podle [2]......	70
Tabulka 17: Výběr hodnot četností základních událostí, které mohou vést k vyžadování manuálního zásahu pracovníka v šachtě na kondenzát. Vytvořeno na základě [2]......	79

Obrázek 1: Základní schéma bioplynové stanice skládající se z fermentoru, plynojemu a kogenerační jednotky, upraveno podle [7].	17
Obrázek 2: Koncepční schéma bioplynové stanice zpracující různé druhy odpadu ve dvou fermentorech.	18
Obrázek 3: Trend nárůstu počtu nehod na bioplynových stanicích mezi lety 1995 a 2014, převzato z [2].	20
Obrázek 4: Evropský trend nehod při produkci bioplynu shromážděný z uvedené studie ve srovnání s nárůstem produkce bioplynu na výrobu elektrické energie, převzato z [11].	21
Obrázek 6: Příklad stromu poruch se značením logických funkcí a dílčích událostí.	30
Obrázek 7: Příkladné rozvržení stromu událostí a jeho větvení.	31
Obrázek 8: Ochranné vrstvy, které ovlivňují rozvinutí scénáře nehody.[21]	34
Obrázek 9: Příklad matice rizika znázorňující oblasti přijatelnosti rizika v závislosti na frekvenci dané nehody za rok a závažnosti následků [21].	36
Obrázek 10: Hlavní kroky použité metody pro analýzu rizika popisované ve zmiňovaném článku [12].	41
Obrázek 11: Způsob převodu tabulky ROA na CCD.	43
Obrázek 11: CCD diagram z ROA Tabulka 9 k události nízké hladiny vody v lapači kondenzátu.	44
Obrázek 12: Strom poruch s vrcholovou událostí vytvoření výbušné směsi v lapači kondenzátu [2].	45
Obrázek 14: Strom událostí pro scénář nízké hladiny vody v lapači kondenzátu R-301.	46
Obrázek 15: Strom poruch s vrcholovou událostí hromadného úniku bioplynu z plynojemu. Upraveno podle [31].	56
Obrázek 15: Trojúhelníkový diagram zobrazující horní a dolní mez hořlavosti, převzato z [35].	57
Obrázek 16: Vyplněný formulář LOPA pro scénář S1.	61
Obrázek 17: Vyplněný formulář LOPA pro scénář S3.	62
Obrázek 18: Vyplněný formulář LOPA pro scénář S4.	64
Obrázek 19: Strom poruch s vrcholovou událostí vytvoření výbušné směsi ve fermentoru. Upraveno podle [2].	69
Obrázek 20: Strom poruch pro událost vysoké koncentrace sulfanu v plynojemu. Vytvořeno na základě [2].	70
Obrázek 21: Vyplněný LOPA formulář pro scénář S5.	73
Obrázek 22: Vyplněný LOPA formulář pro scénář S6.	74
Obrázek 23: Vyplněný LOPA formulář pro scénář S7.	75
Obrázek 24: Strom poruch s vrcholovou událostí, při které je vyžadován vstup pracovníka do šachty na kondenzát. Vytvořeno na základě [2].	78
Obrázek 25: Vyplněný LOPA formulář pro scénář S8.	80

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

BPS: Bioplynová stanice

CZBA: Česká bioplynová asociace

GWh: Giga Watt hours

QRA: Quantitative Risk Analysis

LOPA: Layer Of Protection Analysis

IPL: Independent Protection Layer

PFD: Probability of Failure on Demand

HAZOP: Hazard And Operability Analysis

PreHA: Preliminary Hazard Analysis

CCD: Cause Consequence Diagram

TE: Top Event

FT: Fault Tree

ET: Event Tree

CCPS: Center for Chemical Process Safety

ROA: Recursive Operability Analysis

NDV: Node Deviation Variable

FMECA: Failure Mode Effects and Criticality Analysis

IE: Initiating Event

S: Scénář

P&ID: Piping and Instrumentation Diagram

DCS: Data Communication System

ERPG: Emergency Response Planning Guidelines

ppm: parts per million

EPDM: Etylen Propylen Dien kaučuk

MTTR: Mean Time To Repair

MTTF: Mean Time To Failure

ÚVOD

Produkce bioplynu zažívá za poslední desítky let velký rozvoj. Každoročně se počet vybudovaných bioplynových stanic na světě zvyšuje. Produkce bioplynu je přínosná jako alternativní zdroj pro výrobu elektrické energie ale i tepla, zároveň s sebou přináší udržitelný způsob druhotného využití organického odpadu. Kromě produkce zmíněných energií se v posledních letech rozvíjí i využití bioplynu k produkci biometanu.

S nárůstem počtu bioplynových stanic ale souvisí i nárůst počtu nehod na nich. Již delší dobu je pozornost odborné veřejnosti zaměřena na snahu zabývat se bezpečností bioplynových stanic.

Na základě průzkumu dosud zveřejněné literatury lze konstatovat, že počet nehod na bioplynových stanicích přibližně od roku 2000 roste. V odborné literatuře se také objevují vzorové analýzy rizika bioplynových stanic, ale tyto analýzy neusilují o důsledné posouzení zajištění bezpečnosti stanic vůči nehodám. Úvahou lze dojít k závěru, že existují vlastně tři skupiny příjemců rizika bioplynových stanic, kteří si kladou tři podobné otázky. „Je z mého hlediska riziko bioplynové stanice přijatelné?“ Na tuto otázku by měla odpovědět analýza rizika. Z důvodu praktického využití by analýza rizika bioplynové stanice měla být co nejjednodušší. Na základě toho se metoda LOPA jeví jako vhodné řešení. V rámci této práce není možné provést kompletní a vyčerpávající analýzu rizika bioplynové stanice, proto není ani žádná konkrétní stanice pro analýzu vybraná. Ale na základě obecného popisu provozu lze předvést, jak přistoupit k výše uvedeným třem otázkám.

Lze předpokládat, že sektor produkce bioplynu a jeho zpracování se bude v dalších letech rozvíjet a rozšiřovat. Je proto na místě se zabývat otázkou bezpečnosti bioplynových stanic i do budoucna. Tato práce ukazuje, že posun od hledání vhodné metody analýzy rizika k hledání takové analýzy rizika, která co nejjednodušeji odpoví, za jakých podmínek je riziko bioplynových stanic přijatelné, zároveň posouvá pozornost k dalším důležitým praktickým otázkám. Především ke kultuře bezpečnosti na bioplynových stanicích a k legislativním normám a požadavkům, které se k produkci bioplynu vážou.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Bioplyn jako alternativní zdroj elektrické energie

Bioplynová stanice je zařízení sloužící k výrobě elektrické energie získané spalováním bioplynu v jednotce, která může zároveň kromě elektrické energie produkovat také teplo (pomocí tzv. kogenerační jednotky). Bioplyn se získává fermentací neboli anaerobní digescí substrátů ze zemědělství, čistírenských kalů či biologicky rozložitelných odpadů. Obecně se vstupnímu materiálu do procesu přeměny na bioplyn říká biomasa. Do této kategorie kromě zmíněných čistírenských kalů a rozložitelných odpadů či gastroodpadů spadá také veškerá hmota organického původu, která může být ve formě dřevní biomasy, fytomasy (zemědělské plodiny, rostliny) a biomasy živočišného původu. Vhodnou kombinací těchto substrátů lze dosáhnout složení, které bude mít příznivý vliv na průběh anaerobní digesce a tím i na výsledné množství a kvalitu bioplynu.[1]

Vzhledem k rostoucí poptávce po elektrické energii spojené s lidskými činnostmi je rozvoj a zavádění obnovitelné energie z biomasy jednou z atraktivních strategií. V tomto rámci patří produkce bioplynu mezi slibné technologie. Bioplynové technologie zahrnují více než 350 GWh vyrobených za rok a po celém světě se vyskytuje přibližně 132 000 jednotlivých stanic. Bioplynové stanice představují mnoho přínosů, jako je možnost zpracovávat různé organické odpady od kalů odpadních vod až po biomasu. [2]

Zařízení pro fermentaci organických odpadů může mít mnoho podob. Na začátku každé výrobní linky bioplynu je zpravidla přípravná nádrž či jímka, kde se skladuje biomasa. Ta je podle potřeby dávkována do fermentoru nebo také reaktoru, kde dochází k procesu anaerobní digesce a tvorby bioplynu. Bioplyn vznikající ve fermentoru je odebírán do zásobníku většinou v podobě plynojemu a upravován pro další využití. [1]

Pod pojmem bioplyn se obecně míní plynná směs metanu (obsah 50 až 75 %) a oxidu uhličitého. K výkonné produkci bioplynu s převažujícím obsahem metanu se využívají při fermentaci metanogenní bakterie. V praxi se také ale v bioplynu kromě zmíněných plynů vyskytují v menší míře i další plynné složky např. N_2 a O_2 z ovzduší a další příměsi jakými jsou N_2O a především sulfan H_2S . [3]

Kromě záměrné výroby bioplynu, tento plyn vzniká i samovolně na skládkách komunálních odpadů. Je nazýván skládkovým plynem a bývá kvalitou přirovnatelný k bioplynu z technické výroby. Anaerobní rozklad probíhá v přírodě i v zažívacím traktu přežvýkavců. Dále se může vyskytovat při aktivitě anaerobních bakterií i v močálech, slatinách či na rýžovištích. [3]

Po fermentaci je kromě bioplynu také produkován pevný zbytek ze substrátu, tzv. digestát. Vlastnosti digestátu jsou velmi příznivé pro jeho další využití jako hnojiva v zemědělství.[4]

1.1.1 Popis výroby bioplynu a jeho využití

Základem pro technologii výroby bioplynu byl v minulosti proces čištění splaškových odpadních vod. Po prvních úspěších bioplynu se začala metoda produkce bioplynu šířit i na jiné organické masy než ty z městských čistíren odpadních vod. Jak bylo již zmíněno výše, substráty pro fermentaci mohou být zemědělského a živočišného původu, ale zároveň jsou některé bioplynové stanice schopné zpracovávat při správné přípravě i náročnější odpady například z potravinářského průmyslu.[3]

Biomasa vhodná k fermentaci a výrobu bioplynu se nejdříve naveze k stanici a skladuje se ve vhodné nádrži či šachtě. Pokud se jedná o potravinářských odpad, je nejdříve biomasa připravena k digesci drcením a odstraněním plastových, kovových či skleněných obalů jednotlivých produktů. Substrát se poté nejčastěji čerpadlem dávkuje do fermentoru. K tomuto postupu může také stanice využívat například posuvný dávkovač s automatickým systémem, který rozdělí jednotlivé dávky do fermentoru po určitých časových odstupech. [5]

V samotném fermentoru probíhá anaerobní digesce (tj. rozklad za nepřítomnosti vzduchu) dodané biomasy. Fermentor (může se nazývat také vyhnívač nebo reaktor) a je opatřen míchadly k promíchávání fermentovaného substrátu. Zabraňuje se tak vzniku strusek a zároveň se dosahuje homogenizace digestátu. Nejčastěji se využívá ponorných pádlových či vrtulových míchadel. Teplota fermentoru se udržuje kolem 45 °C, teplo je přiváděno od kogenerační jednotky, která produkuje jak elektrický proud, tak teplo. [5]

Pro produkci bioplynu je ve fermentoru nezbytná přítomnost metanogenních bakterií, které z biomasy vytváří plynou směs s významným podílem metanu. Jedná se anaerobní mikroorganismy, které se řadí k nejstarším živým organismům na Zemi. Od určité koncentrace je pro ně kyslík prudkým jedem. Proces přípravy bioplynu probíhá ve čtyřech základních fázích:

1. **hydrolýza** – hydrolytické organismy štěpí makromolekulární organické látky na menší molekuly, které se transportují do buňky, kde probíhají další fáze
2. **acidogeneze** – acidofilní bakterie štěpí produkty na jednodušší látky (organické kyseliny, oxid uhličitý, sirovodík)
3. **acetogeneze** – octotvorné bakterie tvoří acetáty (i kyselinu octovou), oxid uhličitý a vodík

4. **metanogeneze** – metanogenní bakterie nakonec v alkalickém prostředí vytváří metan, oxid uhličitý (jako vedlejší produkt) a vodu. [4]

Nežádoucí menšinovou složkou bioplynu je sirovodík H_2S , který vzniká rozkladem sloučenin síry vyskytující se ve fermentované biomase. Jako problémový se jeví hned z několika důvodů. Tím prvním je, že pokud je přítomen v bioplynu během konečného spalování, vzniká z něj oxid siřičitý, následně oxid sírový, který reaguje s vodní parou za vzniku kyseliny sírové. Tato kyselina poté narušuje svými žíravými a korozivními účinky materiály kogenerační jednotky a prostředí spalinového traktu. Druhým důvodem, proč je sulfan v bioplynu nežádoucí složkou, je ten, že s jeho narůstajícím množstvím při spalování roste také množství sirných spalin, které se vypouští do ovzduší. Třetím významným důvodem je toxicita sulfanu, kdy už v menších dávkách může způsobit smrtící otravu lidského organismu (udává se, že od koncentrace 1 g/m^3 je schopen způsobit smrt v desítkách sekund až jednotek minut). Je typicky zápachající, ale tato varovná funkce se ztrácí při vyšších koncentracích, kdy sulfan paralyzuje čichové buňky. Z těchto důvodů je nutno před samotným spalováním bioplynu zbavit tuto plynnou směs sulfanu. [4]

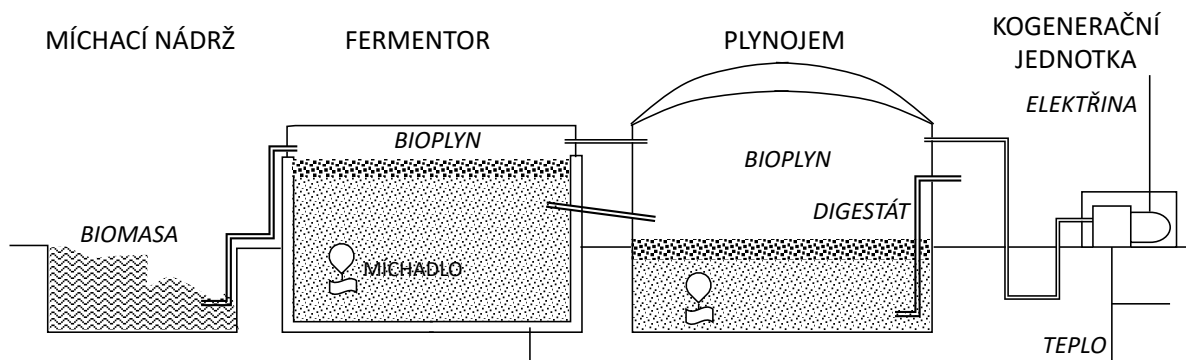
Samotné odsiřování bioplynu může být prováděno několika způsoby. Jedním z nejjednodušších způsobů je tzv. mikroaerace tedy řízené dávkování vzduchu do reaktoru (fermentoru), kdy dochází k oxidaci na elementární síru. Problémem ovšem je, že se síra poté ukládá na součástech fermentoru např. na míchadlech, které obaluje svými žlutými krystalky, a tím snižuje jejich životnost. Limitní množství vzduchu (cca do 0,8 %) anaerobním bakteriím neškodí. Další metodou odstranění sulfanu je fyzikálně-chemická metoda záchytu sulfanu na adsorbentu. Principem je adsorpce sulfanu H_2S pomocí hydratovaného oxidu železitého. Vzniklá síra ale postupně obaluje částice odsiřovací hmoty. Tím dochází k postupnému zhoršování podmínek a snižování účinnosti odsiřování. Po poklesu pod určitou hodnotu je proto nutno odsiřovací filtr nahradit.[6] V neposlední řadě také existuje tzv. mokré praní (neboli absorpce) pomocí přenosu hmoty mezi rozpustným plynem a rozpouštědlem (často vodou) při jejich vzájemném kontaktu. Nejpoužívanějšími mokkými způsoby odsiřování je praní alkalickými roztoky (např. roztok Na_2CO_3), praní suspenzemi sloučenin těžkých kovů v alkalickém roztoku (suspenze Fe_3O_3 v roztoku Na_2CO_3), praní organickými rozpouštědly nebo praní oxidovanou formou redoxního systému, který vylučuje ze sulfanu přímo síru a regeneruje se vzduchem. [4]

Bioplyn se z reaktoru odvádí do dofermentoru neboli plynojemu, který je typický kupolovitou střechou. Tvar kupole je udržován čerpáním vzduchu do mezivrstvy mezi pláští.

Obsah bioplynu v plynojemu se udržuje kolem 40 %. Je většinou zahříván na vyšší teplotu teplem z kogenerační jednotky. Samotný plynojem je možné mít spojený přímo s reaktorem. Kупolovitá střecha se potom nachází přímo nad fermentorem.[6]

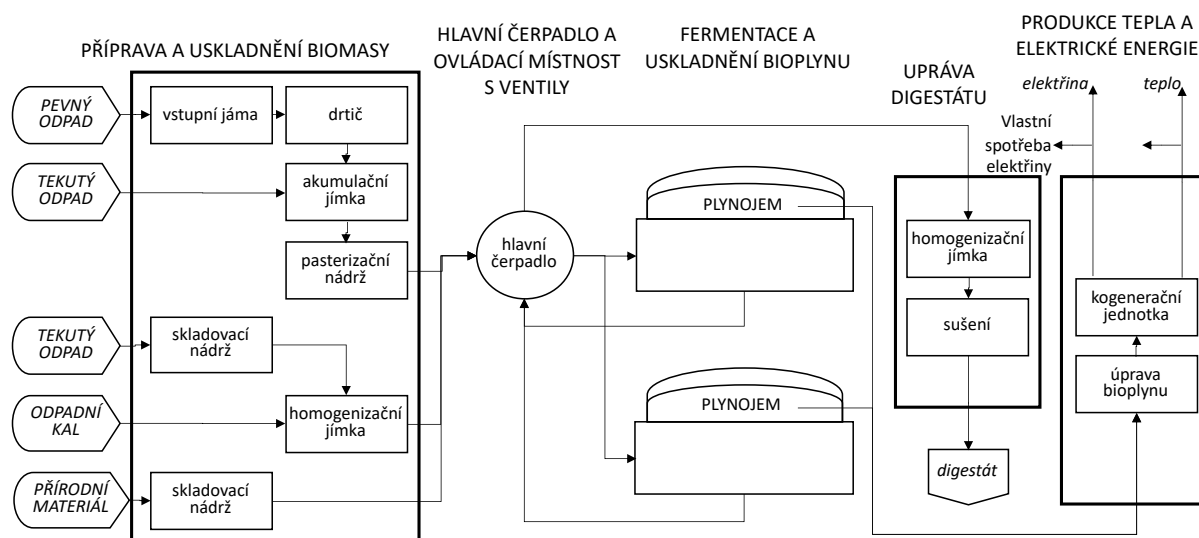
Vodní páru obsaženou v bioplynu lze odstranit např. kondenzací této vlhkosti pomocí směsi ve vyspádovaném potrubí před plynojemem, kdy ochlazená pára jako kapičky vody zůstává v dolní části potrubí a bioplyn se vede potrubím dál do plynojemu.[6] Na podobném způsobu funguje také starší způsob kondenzace vodní páry z bioplynu přes ochlazení a vedení plyné směsi tzv. lapačem kondenzátu.[2] Výsledný bioplyn, který byl odsířený a zbavený přebytečné vlhkosti, se odvádí ke kogenerační jednotce nebo k hořáku (tzv. fléra). Fléra slouží k rychlému spalování nahromaděného bioplynu, který aktuálně nelze využívat v kogenerační jednotce na výrobu elektřiny a tepla.

Nejefektivnější využití bioplynu je pro pohon spalovacích motorů spojených s agregátem na výrobu elektrické energie, tzv. kogenerace.[4] Kromě vlastní spotřeby produkované elektrické energie přímo ve výrobě se také vyrobené teplo může využívat k vyhřívání fermentoru a plynojemu, popř. velína. Jednoduché schéma bioplynové stanice znázorňuje *Obrázek 1* níže.



Obrázek 1: Základní schéma bioplynové stanice skládající se z fermentoru, plynojemu a kogenerační jednotky, upraveno podle [7].

Obrázek 2 popisuje schéma složitější bioplynové stanice se znázorněnou úpravou organického substrátu různého původu.



Obrázek 2: Koncepční schéma bioplynové stanice zpracující různé druhy odpadu ve dvou fermentorech.

V České republice se bioplyn využívá ve většině případů k výrobě elektrické energie a tepla pomocí kogenerace.

Řada zemí v Evropě ale bioplyn ve velkém množství také čistí na takzvaný biometan, který lze vtlačet do plynárenské soustavy nebo ho využít jako palivo pro dopravu. Rozvoj produkce biometanu podporuje i Evropská unie, která v něm vidí lokální udržitelný zdroj energie. Aktuálně se nejvíce biometanových stanic nachází v Německu. Velkou tradici ve využívání biometanu mají například ve Švédsku nebo Švýcarsku, druhé největší množství výroben najdeme ve Francii. Ve Švédsku uvedli do provozu na takto upravený bioplyn dokonce i vlak. U nás se jeden z prvních projektů na biometanovou stanici v ČR připravuje v Litomyšli u tamější bioplynové stanice. Biometan zde bude vtlačován do vysokotlakého plynovodu a bude k dispozici i pro automobilovou dopravu v rámci CNG stanice.[8]

1.1.2 Bioplynové stanice v České republice

Podle České bioplynové asociace CZBA se k datu 31.12.2019 v České republice nacházelo 574 bioplynových stanic s instalovaným výkonem 367 MW. Podíl bioplynových stanic na obnovitelných energiích byl k tomuto datu udáván 22,9 %. [9]

Společně s Francií, Itálií, Velkou Británií a Německem patří ČR k vedoucím zemím Evropské unie v produkci bioplynu. Vzhledem ke zkušenostem zahraničních firem se stavbou bioplynových stanic jsou stanice v České republice založené na technice zejména z německy mluvících sousedních zemí.[1]

Od roku 2020 se změnila pravidla pro finanční podporu bioplynových stanic. Do té doby Energetický regulační úřad rozlišoval dvě kategorie bioplynových stanic: zemědělské a odpadové. Oba druhy bioplynových stanic měly nárok na provozní podporu vztaženou k vyrobené elektrické energii nebo teple. Vyšší finanční podpora byla dříve udělována zemědělským bioplynovým stanicím, které byly označeny jako kategorie AF1, jež zpracovávají cíleně pěstované energetické suroviny. Kategorie AF2 se vztahovala na tzv. odpadové bioplynové stanice, kterým byla přiřazena nižší finanční podpora. Obě kategorie jsou dnes sjednoceny do jedné, AF, která je na úrovni předchozí AF1.[1]

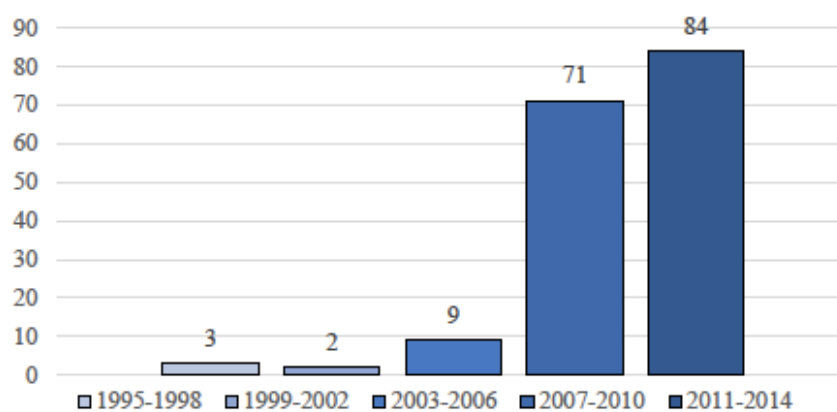
Na začátku roku 2008 bylo na našem území v provozu 23 bioplynových stanic, z nichž převážná většina zpracovávala bioodpady ze zemědělství. Za pouhých 11 let došlo k nárůstu počtu bioplynových stanic u nás na zmiňovaných 574. Tento nárůst potvrzuje celoevropský trend v rozvoji a výstavbě zařízení na produkci bioplynu. Nejdéle fungujícím zařízením na zpracování zemědělských odpadů v ČR je bioplynová stanice v Třeboni. V provozu je nepřetržitě od roku 1974 a zpracovává kejdu z velkovýkrmny prasat spolu s čistírenskými kaly.[1]

1.2 Nehody na bioplynových stanicích

S nárůstem počtu bioplynových stanic souvisí také i nárůst počtu zaznamenaných nehod na nich. Z analýz uvedených v [11] vyplývá, že v letech 1994 až 2014 byl počet zveřejněných nehod v sektoru produkce bioplynu celkem 169, z toho 12 % lze klasifikovat jako vážné nehody. Z celkového počtu se 163 nehod stalo v Evropě – většinou v Německu, které je lídrem na evropském trhu s bioplynem a má nejvyšší počet bioplynových stanic. Méně nehod bylo zaznamenáno ve Francii, Itálii a Spojeném království. Z uvedených nehod jich 39 % bylo způsobeno nechtěným únikem bioplynu. Nejčastějšími projevy nehod na bioplynových stanicích jsou požáry a výbuchy. Tyto nehody v oblasti produkce bioplynu jsou většinou způsobeny poruchami na zařízeních nebo jejich součástích, konstrukčními chybami a nesprávným provozem nebo údržbou. Z analýz minulých nehod vyplývá, že nejčastějšími důsledky těchto nehod jsou zranění případně smrt obsluhy a lidí v okolí bioplynové stanice. Škody byly způsobeny i na budovách. Analýza nehod v celém bioenergetickém sektoru (biopalivo, bioplyn a přeměna biomasy, procesy zpracování a skladování), zjistila, že při 7 % z nehod došlo k úniku toxických látek a 40 % z nich skončilo výbuchem a 53 % požárem. [11]

Mezi nejčastější nehody na bioplynových stanicích se řadí: tvorba výbušných směsí metanu se vzduchem, únik sirovodíku (H_2S) a amoniaku (NH_3) a uplatnění mechanického nebezpečí souvisejícího s příslušným zařízením a biologického nebezpečí způsobeného metanogenními bakteriemi. [2]

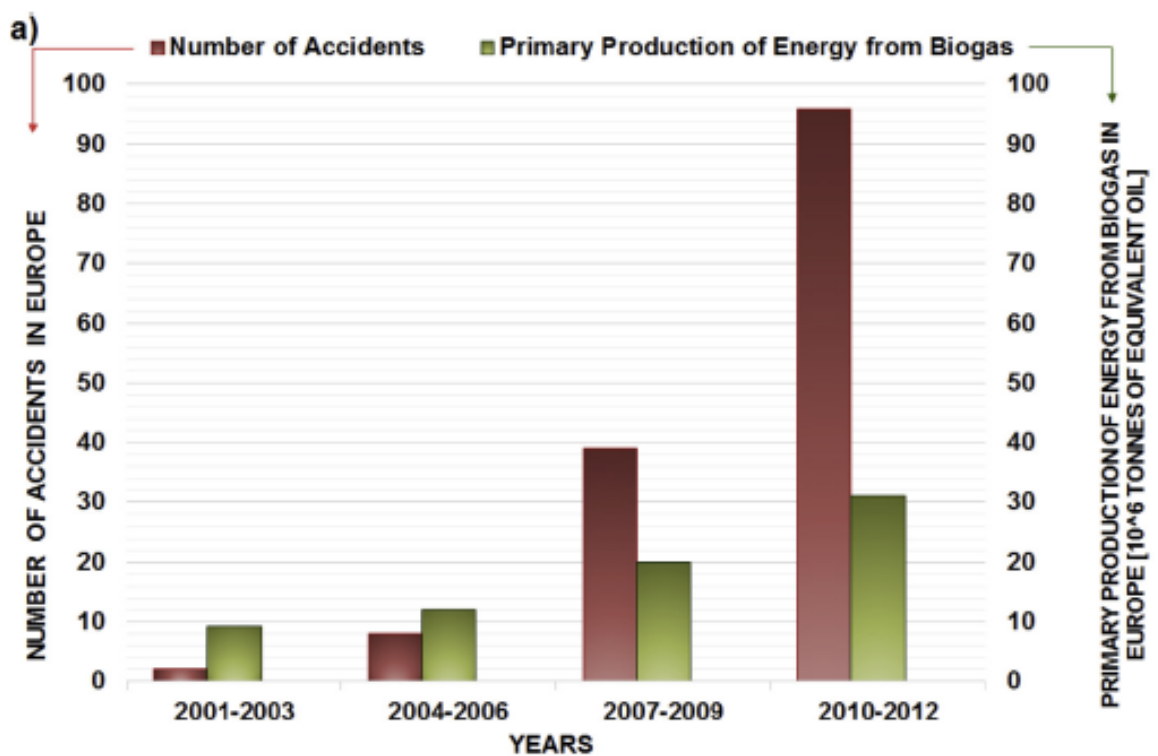
Rostoucí trend nárůstu počtu nehod během let 1995 a 2014 dokládá *Obrázek 3*. Jednotlivé sloupce s počty nehod jsou brány vždy ve čtyřletém období.



Obrázek 3: Trend nárůstu počtu nehod na bioplynových stanicích mezi lety 1995 a 2014, převzato z [2].

Z výsledků analýzy uveřejněné v článku [11] z roku 2016 se jako důležité jeví i časové rozložení shromážděných událostí. Zaměříme-li se na pětileté období 2007–2011, počet nehod v odvětví bioplynu vzrostl více než pětkrát, což je nárůst, který je vyšší než nárůst počtu nově vybudovaných zařízení na výrobu bioplynu.

Obrázek 4 uvádí počet nehod s ohledem na čas ve srovnání s rostoucí produkcí bioplynu v Evropě. Trendy ukazují, že jak počet zdokumentovaných havárií, tak výroba energie z bioplynu v zaznamenaných letech 2007 až 2012 narůstají. Z obrázku 4 je však evidentní, že počet havárií roste rychleji než výroba bioplynu, což je dokázáno na získaných datech o nehodách na bioplynových stanicích v Evropě.[11]



Obrázek 4: Evropský trend nehod při produkci bioplynu shromážděný z uvedené studie ve srovnání s nárůstem produkce bioplynu na výrobu elektrické energie, převzato z [11].

1.2.1 Vybrané nehody v zahraničí

Tabulka 1 uvádí příklady některých zaznamenaných nehod, pro které byl k dispozici podrobnější popis. Jednotlivé popisy vybraných nehod tak potvrzují nejčastější důsledky nehod, mezi které se řadí výše zmíněné požáry bioplynové směsi se vzduchem a následně výbuchy metanovzdušné směsi. Také se mezi časté nehody řadí otravy a intoxikace bioplynem a především sulfanem, který je v něm obsažen jako minoritní složka.

Tabulka 1: Vybrané nehody s jejich následky na bioplynových stanicích ve světě.

Rok	Místo	Zranění	Mrtví	Popis události
1997	Itálie	1	2	V městské čistírně odpadních vod došlo při opravách betonového sila bioplynové stanice k výbuchu. Příčinou nehody byl zbytkový plyn a svařování. Dva pracovníci byli vymrštěni a zabití a třetí spadl na dno budovy a byl vážně zraněn. [10]
2004	USA	0	0	Při výrobě bioplynu u čističky odpadních vod došlo ve velínu čističky k výbuchu metanu. Exploze byla vidět do vzdálenosti více než 1,5 km daleko. Velín byl zničen a závod byl dočasně pozastaven, oběti nebyly žádné. Příčinou výbuchu bylo nahromadění metanu ze surové odpadní vody v objektu, zdroj vznícení není znám.[10]
2005	Německo	0	4	Při výrobě bioplynu došlo k uvolnění sirovodíku (H ₂ S) a k úmrtí 4 zaměstnanců a řidiče kamionu, který přijel vyložit jateční odpad. Krypt zásobní jámy nebylo možné zavřít, protože elektromotor byl mimo provoz. Odpad byl naložen do kamionu o den dříve. Reakcí mezi těmito látkami a materiálem již přítomným v jámě došlo k uvolnění H ₂ S.[12]
2009	Indie	3	4	Bioplynový reaktor explodoval během uvádění do provozu a zabil čtyři osoby a tři zranil. K výbuchu došlo během sváření výstupního potrubí. Během týdne před havárií byl reaktor částečně naplněn ze zkušebního provozu. V horní části reaktoru se přirozeně hromadila výbušná směs o objemu stovek m ³ . Tři dělníci spadli do husté břečky z bortící se střechy, dva zemřeli. Opozdál stojící dělníky, včetně svářeče, výbuch odhodil a dva z nich okamžitě zemřeli. Bylo jasné, že pravidla byla porušena v několika bodech. Závod byl postaven načerno společností Arabic College Trust.[10]
2010	Německo	3	0	V bioplynové stanici došlo k požáru a následně výbuchu, tři lidé byli zraněni.[12]

2014	Lotyšsko	0	2	Otrava plynem dvou pracovníků, kteří nepoužívali při údržbě kogenerační jednotky s obsahem zbytkového bioplynu respirátory.[12]
2015	Dánsko	5	0	V bioplynové stanici byl řidič kamionu zasažen toxickými výpary při vykládání kejdy z gastroodpadu u drtiče. Při vykládce se uvolnil sirovodík. Ventilační systém byl přehlcen. Řidič jen o vlasek unikl smrti. Několik zasahujících záchranářů zkolabovalo. Za nepatrně odlišných podmínek mohla tato nehoda vést k pěti obětem na životech.[14]
2017	Francie	1	0	Ve vodní nádrži napojené na kogenerační jednotku v zařízení na zpracování nebezpečných odpadů se zapálila směs bioplynu. Jeden pracovník utrpěl těžké popáleniny. Je pravděpodobné, že během údržby bioplyn uvolněný při vysypávání filtru putoval kanalizačním systémem až ke kompresoru bioplynu, a nakonec do nádrže kotlové vody. Množství uvolněného bioplynu bylo dostatečné k vytvoření výbušné atmosféry uvnitř 30 m ³ nádrže. Jiskra pravděpodobně zapálila směs plynů uvnitř nádrže, což mělo za následek flash fire.[12]

1.2.2 Vybrané nehody v České republice

Tabulka 2 popisuje příklad zveřejněných nehod, které se odehrály na bioplynových stanicích u nás v České republice, a ke kterým byl zveřejněn i podrobnější popis události. Vybrané nehody v této tabulce tak opět dokládají, že mezi nejčastější následky nehod se řadí požáry a výbuchy směsi bioplynu se vzduchem, ale také jsou zaznamenány často otravy bioplynem (sulfanem H₂S). Dále je zaznamenána nehoda udušením oxidem uhličitým CO₂ (nehoda z roku 2011 ve Žďáru nad Sázavou).

Tabulka 2: Vybrané nehody a jejich následky na bioplynových stanicích v ČR.

Rok	Místo	Zranění	Mrtví	Popis události
2009	Poběžovice Domažlicko	1	0	Exploze jímací nádrže na bioplyn. V nádrži zřejmě explodoval zbytek metanu. Na plachtě, která zakrývá nádrž, právě dělal úpravy jeden ze zaměstnanců ostravské firmy. Oheň, který okamžitě zapálil plachtu, muže zranil.[15]
2011	Žďár nad Sázavou	3	0	Tři pracovníci byli přidušeni oxidem uhličitým. Příčinou nehody byl nesprávný postup při servisním provozu. Jeden z nich musel být převezen do nemocnice, zbylé dva ošetřili záchranáři na místě.[15]
2011	Malšice	0	0	V červnu roku 2011 došlo po k úderu blesku k požáru a následně k výbuchu horního dílu fermentoru bioplynové stanice. Čtyři zaměstnanci montážní firmy měli velké štěstí, protože asi 10 minut před úderem blesku opustili pracoviště fermentoru kvůli začínajícímu dešti.[16]
2013	Chříč Plzeňsko	0	1	K nehodě došlo při servisním úkonu v lapači kondenzátu. Podle zpráv vstoupil pracovník do prostoru kondenzátní šachty bez dýchacího přístroje, a především bez jištění druhou osobou. V nedýchatelné atmosféře pak došlo k jeho udušení.[12]
2021	Dětřichov Moravská Třebová	3	0	Příčinou byla s největší pravděpodobností iniciace výbušné směsi výbojem statické elektřiny. Při explozi byly zraněny 3 osoby, které se buď nadýchaly zplodin hoření nebo se popálily. Následným požárem po zmiňované explozi byla zasažena jedna doskladňovací nádrž.[17]

1.3 Analýza rizika, jeho řízení a hodnocení

Základním pojmem v analýze a řízení rizika je tzv. zdroj rizika. Je to podmínka či situace, která má potenciál ublížit lidem, způsobit škodu na majetku či negativně zasáhnout do životního prostředí. V angličtině se zdroj rizika označuje pojmem „hazard“. Pojem riziko zahrnuje pravděpodobnost přeměny tohoto zdroje ve skutečné uplatnění ztráty, zranění nebo nějaké formy škody. V angličtině se označuje jako „risk“.[18][19]

Dalším důležitým pojmem v tématu analýzy rizika je ochrana nebo ochranné opatření, v angličtině se používá například slovo „safeguard“. Ochranné opatření používáme za účelem snížení samotného rizika. Riziko ale nikdy nelze snížit úplně na nulu, lze ho pouze ochrannými opatřeními omezit. Důležitou roli v tomto případě hraje i pouhé povědomí. To znamená, že povědomí o riziku snižuje samotné riziko. Pokud tedy víme, že za rohem je na silnici díra, představuje pro nás menší riziko, než kdybychom projížděli kolem, aniž bychom o ní věděli. Tento fakt klade důraz na prvotní identifikaci zdrojů rizika (tzv. hazard identification).[18]

Riziko je v každé lidské činnosti přítomné. Bohužel se stává, že riziko je objeveno teprve až zapříčiní nějakou nehodu. Proto je nutné se snažit objevit všechny možné zdroje rizika a snížit tak nebezpečí včas, než dojde k nechtěné události. Je vhodné si pro každou jednotlivou činnost, kterou vykonáváme v určitém výrobním procesu, položit následující otázky:

1. Jaké jsou zde zdroje rizik?
2. Co a jak se může pokazit?
3. Jaká je šance, že se to stane?
4. Jaké by byly následky?

První otázka odpovídá identifikaci možných zdrojů rizik. Další tři otázky jsou spojené se samotnou analýzou rizika. Odpověď na druhou otázku většinou nazýváme souhrnně jako scénáře událostí, které popisují, jakým způsobem může dojít k nehodě na zařízení. Scénáře představují uplatnění zdrojů rizik. Uplatněním zdroje rizika se rozumí událost nebo události, v důsledku nichž se potenciál zdroje rizika stane skutečným. Iniciační událost nebo posloupnost událostí zahajují uplatnění zdroje rizika.[21]

Šance, že scénáře nastanou, jsou popsány pravděpodobnostmi/frekvencemi. Analýza následků popisuje očekávané škody, to zahrnuje ztrátu na životech, zásah do životního prostředí nebo škoda na majetku a počet dnů výpadku výroby/procesu. [19]

Lze tedy říct, že riziko je možné definovat pomocí množiny následujících trojic:

$$R = \{(s_i, p_i, x_i)\}, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Kde s_i je popis scénáře nehody;

p_i je pravděpodobnost/frekvence uskutečnění tohoto scénáře;

x_i je závažnost následků.

Z toho vyplývá, že klíčem k analýze rizika je analýza scénářů nehod.[18]

Sestavením scénáře nehody je završena první část analýzy rizika, která se označuje jako kvalitativní. Pokud se dále jednotlivým scénářům nehod přiřadí třídy frekvence a následků, jedná se o tzv. semikvantitativní (nebo také polokvantitativní) analýzu rizika. O kvantitativní analýze rizika hovoříme, pokud k jednotlivým scénářům přiřadíme frekvenci a také závažnost následků.[20]

Souhrnně lze tedy říct, že při analýze rizika jde o vývoj kvantitativního odhadu rizika založeného na technickém vyhodnocení a matematických metodách pro kombinování odhadů frekvencí a následků nehod.[19]

Na to navazující řízení rizik je soubor činností a opatření umožňující zmírnit frekvenci scénáře nebo zmírnit či omezit následky, pokud dojde k uplatnění zdroje rizika. Základní podmínkou řízení rizik je ale samotná identifikace zdrojů rizik, tedy nalezení všech možných nebezpečí, které mají možnost způsobit škody či ohrozit lidské zdraví a životy. Nelze analyzovat a řídit rizika, která nejsou odhalena.[21]

Součástí řízení rizika je hodnocení přijatelnosti pomocí různých kritérií.

1.4 Vybrané metody analýzy rizika

Všechny společnosti si určují, obvykle v souladu s legislativou, míru přijatelného rizika a toho nepřijatelného, proti kterému je třeba zavést další ochranná opatření. Konečné riziko určitého procesu nebo výroby se většinou stanovuje pomocí metod kvantitativní analýzy rizika QRA (Quantitative Risk Analysis) nebo pomocí metody LOPA (Layer of Protection Analysis). Samozřejmě se v průmyslu používají i další metody a postupy pro stanovení a analýzu rizika, ovšem tyto patří mezi nejčastěji používané a bude o nich pojednáno i v další kapitole této práce. U těchto obou metod se k výslednému (semi)kvantitativnímu ohodnocení rizika používá stromů poruch a stromů událostí a jejich vhodných adaptací (např. CCD diagram, který popisuje *Obrázek 11*).[19]

1.4.1 Metody identifikace zdrojů rizik HAZOP a PreHA

Na první otázku uvedenou v kapitole 1.3 (Jaká jsou zdroje rizika?) lze odpovědět pomocí metod identifikace zdrojů rizik. Jak již bylo zmíněno výše, prvotní identifikace všech zdrojů rizik je zásadním krokem v celé analýze rizika. Riziko, které není odhaleno, není možné analyzovat a aplikovat na něj následně metody řízení rizika.

Metod pro nalezení zdrojů rizik je mnoho. Pro jakoukoli konkrétní aplikaci neexistuje jeden nejvhodnější přístup. Výběr nejlepší metody vyžaduje zkušenosti analytika. Jedna z nejčastěji používaných metod je HAZOP studie (Hazards and Operability). Tento přístup využívá vlastního úsudku v rámci brainstormingu, kdy je navrženo několik možných událostí pro každou jednotlivou část zařízení. Účastníci studie poté rozhodují, jestli a jakým způsobem se navržené události mohou objevit a zda představují nějakou formu rizika.[19]

Na začátku se celé výrobní zařízení rozdělí do menších funkčních částí. Každá část je podrobena řadě otázek formulovaných na základě návodných slov (guide words). Návodná slova mají zajistit, že otázky, které jsou položeny za účelem testování zranitelnosti každé části výrobního procesu, prozkoumají všechny myslitelné způsoby, kterými by se tento návrh mohl odchýlit od původní zamýšlené funkce. To obvykle vytváří řadu teoretických odchylek a každá odchylka je poté zvážena, aby se rozhodlo, jak by mohla být způsobena a jaké by byly důsledky.[22]

Návodná slova jsou jednoduchá slova, která se používají tak, aby vedla a stimulovala proces kreativního myšlení, a tak objevila odchylky. Návodná slova zobrazuje *Tabulka 3*. [22]

Tabulka 3: Výčet návodných slov metody HAZOP a jejich význam, upraveno podle [22].

Návodné slovo	ŽÁDNÝ, NE, NENÍ	VÍCE	MÉNĚ	SOUČASNĚ, STEJNĚ	ZČÁSTI, ČÁSTEČNĚ	NAOPAK	JINAK, JINÝ
Význam	Úplné popření původních záměrů.	Kvantitativní navýšení.	Kvantitativní snížení.	Kvalitativní navýšení.	Kvalitativní snížení.	Logický opak původního záměru.	Úplné nahrazení.

Celý funkční systém se rozdělí do kroků či částí s jednoznačným záměrem či funkcí. Pro každý krok nebo část se vyplňuje nová tabulka a popsanou charakteristikou správné funkce. Vše se zapisuje do vzorové tabulky viz *Tabulka 4*. Takto se popíše celý systém. Do posledního sloupce nadepsaného jako Další údaje, se může vpisovat několik dalších analytických informací například četnosti příčin a závažnosti následků, identifikace zdrojů rizika spolu s iniciačními událostmi, scénáře apod. [21]

Tabulka 4: Příkladná tabulka pro vyplnění jednotlivého kroku metody HAZOP, upraveno podle [21].

Celek: Trasa vedení bioplynu z fermentoru do plynojemu.				
Funkce: Převedení vyrobeného bioplynu z fermentoru do skladovacího plynojemu.				
Charakteristika: Průchodná, těsná vůči okolí a ve spojích s oběma nádržemi.				
Návodné slovo	Odchylka	Příčina	Následek	Další údaje

Výše popsaná metoda HAZOP je vhodná jak pro aplikaci při zavádění nového procesu či metody výroby v rámci navrhování, tak ji lze využít v jakémkoliv životním období zařízení a výroby. Samotná metoda záleží mimo jiné i na odbornosti a přístupu jednotlivých účastníků studie, stejně tak jako na jejich schopnosti použít návodná slova pro rozvíjení vlastní představivosti ohledně možných odchylek od původního návrhu systému.[22]

Další častou využívanou metodou pro identifikaci zdrojů rizik je takzvaná Preliminary Hazard Analysis (PreHA). Tato metoda je původně převzata ze standardu MILSTD-882D ministerstva obrany USA. Směrnice CCPS (Center for Chemical Process Safety) uvádí, že PreHa se nejčastěji provádí v rané fázi vývoje projektu, kdy je málo informací o detailech návrhu nebo provozních postupech a často může být předstupněm pro další studii. PreHa může být také užitečná při analýze stávajících systémů a procesů.

Účelem metody je tedy identifikovat ty zdroje rizika, které by měly být předmětem další a podrobnější analýzy rizik.[23]

Stejně jako u metody HAZOP i tato metoda je založena na brainstormingu týmu vybraných specialistů. Výsledky této metody jsou typicky prezentovány ve formě tabulky. Podoba tabulek a jednotlivých sloupců se může lišit v závislosti na analyzovaném prostředí. Obecnou PreHA tabulku znázorňuje *Tabulka 5*. [21][23]

Tabulka 5: Ukázka tabulky pro metodu PreHa. [21]

Zdroj rizika	Příčina	Následky	Ochranné prvky	Pravděpodobnost	Závažnost následků	Návrh na zlepšení bezpečnosti

Úplná identifikace zdrojů rizik je nezbytná pro nalezení všech scénářů nehod a pro kompletní analýzu rizik. Přestože se dostupné metody obecně snaží odhalit významné zdroje rizik, nemohou to zaručit. Za účelem nalézt a identifikovat všechny možné zdroje rizik, lze metodu PreHA kombinovat s prvky metody HAZOP. Ve výsledné tabulce vycházející ze spojení těchto dvou metod je začleněn vývoj scénáře události, ochranná opatření jsou pojmenovány jako podmínky a zdroje rizika jsou spojeny s iniciačními událostmi. Příčina je zde popsána jako událost/selhání/chyba. [21]

Pro nalezení všech příčin se kompletně využije metody HAZOP. Zařízení se rozdělí na funkční části sloužící jednotnému účelu a identifikují se všechny provozní režimy pro tyto části. Pro analýzu se využijí návodná slova k určení příčiny. *Tabulka 6* popisuje možnou podobu výsledné tabulky, která kombinuje metodu HAZOP a PreHa. [21][23]

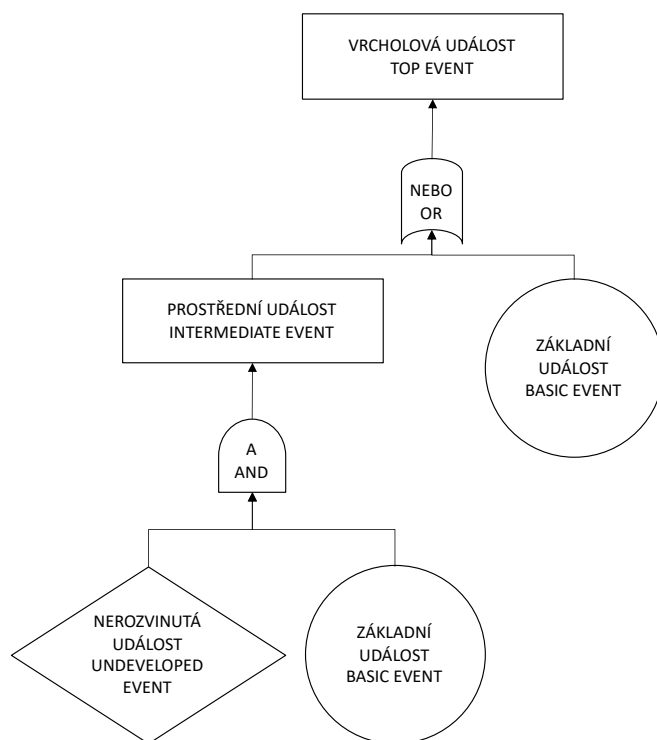
Tabulka 6: Možná podoba výsledné tabulky, která kombinuje metody HAZOP a PreHA. [21]

Funkční část	Provozní režim	Funkce	Návodné slovo	Událost, selhání, chyba	Iniciační událost rozvíjející zdroj rizika	Vývoj a konečný stav scénáře nehody	Podmínky
			Žádný				
			Více, atd.				

Dalšími základními technikami pro nalezení zdrojů rizik jsou např.: kontrolní seznam (checklist), matice interakcí, metoda Co kdyby (What-If) a metoda FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) a její varianta FMECA (Failure Mode and Criticality Analysis). [21]

1.4.2 Strom poruch (Fault Tree)

Druhou důležitou otázkou, kterou je nutno si položit při zvažování bezpečnosti určité činnosti v procesu, je otázka: Co a jak se může pokazit? Odpověď lze nalézt a popsat pomocí scénářů události či nehody, která by mohla nastat. Scénáře jsou obvykle chápány jako sledy událostí, které začínají iniciační událostí, pokračují rozvíjejícími událostmi a končí určitými následky. Jednou z oblíbených a zároveň základních metod pro popis jednotlivých událostí scénářů nehod je analýza stromem poruch (Fault Tree = FT). Tato metoda původně vznikla v leteckém průmyslu a začala být široce využívána v jaderné energetice pro kvalitativní i kvantifikovaný popis událostí. Strom poruch je deduktivní metoda pro nalezení příčin, z jakých se zdroj rizika může rozvinout do nehody. Tento přístup začíná dobře popsanou vrcholovou událostí nehody (Top Event) a postupuje zpět přes různé mezilehlé události, které mohou tuto nehodu zapříčinit. Cílem je nalézt základní události (Basic Event), které nelze rozepsat dále nebo je nelze více definovat. Tyto události se vepisují do kruhové bubliny. Pokud je událost potřeba dále definovat, ale nelze tak uskutečnit z důvodu nedostatku informací, zapisuje se do kosočtverce. [19]



Obrázek 5: Příklad stromu poruch se značením logických funkcí a dílčích událostí.

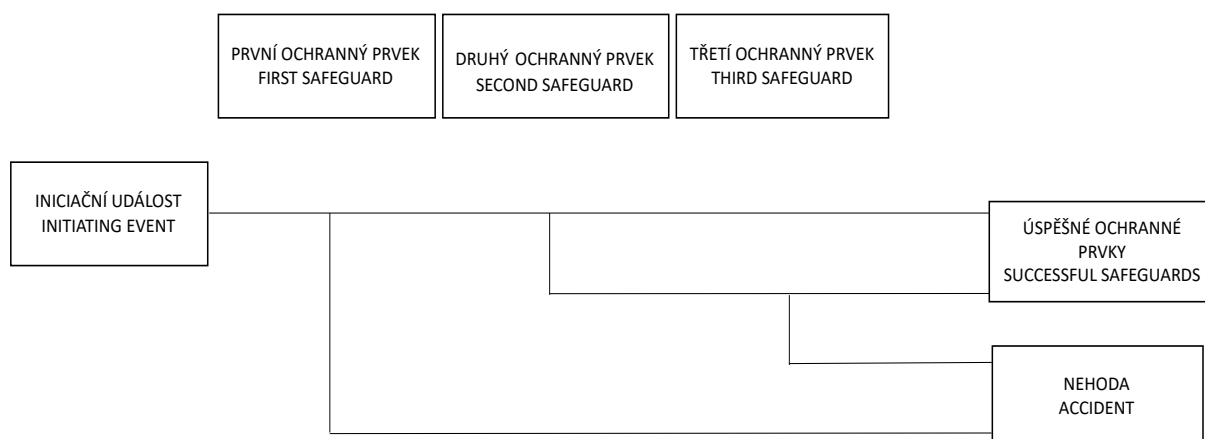
Pro tvorbu stromu poruch je zapotřebí několika logických funkcí neboli hradel. Hradlo „AND“ (spojka „a“) popisuje události, které spolu interagují paralelně. Je tedy zapotřebí, aby pro uskutečnění výstupu této funkce byly aktivovány obě vstupní události. V diagramu se označuje jako polovina oválu (viz. Obrázek 5).

Vykrojená polovina oválu naproti tomu značí logickou funkci „OR“ (spojka „nebo“). Pro výstupní událost nebo stav této funkce je nutné, aby se uskutečnila pouze jedna vstupní podmínka či událost. Mezilehlé či prostřední události se popisují v obdélníku. Příklad stromu poruch zobrazuje *Obrázek 5*. [19]

Bez matematického řešení je strom událostí tak jak ho popisuje např. *Obrázek 5* pouze součástí kvalitativní analýzy rizika. V případě znalosti parametrů frekvence nebo pravděpodobnosti základních událostí můžeme vytvořit kvantitativní analýzu stromu poruchových stavů. Na kvantitativní ohodnocení se využívají pravidla pro určení pravděpodobnosti logického výroku složeného ze základních logických výroků pomocí operací konjunkce (\wedge resp. hradlo „AND“) a disjunkce (\vee resp. hradlo „OR“). [19]

1.4.3 Strom událostí (Event Tree)

Stromy událostí jsou dalším často používaným postupem pro vytvoření přehledných informací o scénáři nehody a pravděpodobnosti výskytu této nehody. Na rozdíl od stromu poruch, který je vertikální, se strom událostí rozvíjí horizontálně. Začíná vždy iniciační událostí a popisuje vliv jednotlivých ochranných prvků či systémů na základě jejich úspěchu či selhání a pokračuje tak až ke konečným výsledkům. Při použití této metody je tedy důležité správně identifikovat iniciační událost a vybrat ty ochranné prvky, které mají vliv na vybranou iniciační událost. Výsledkem je popis jednotlivých nehod, které vyplynuly z rozvoje iniciační události a z akcí ochranných opatření. [19][21]



Obrázek 6: Příkladné rozvržení stromu událostí a jeho větvení.

Pokud jsou k dispozici hodnoty pravděpodobnosti selhání ochranných bariér a hodnota frekvence výskytu iniciační události, lze i strom událostí řešit kvantitativně. Tyto hodnoty se vždy zapisují do diagramu pod čáru náležící dané akci/události. V záhlaví diagramu je zapsána iniciační událost a výčet akcí ochranných prvků. Čára vede od iniciační události a větví se u prvního ochranného prvku v závislosti na funkčnosti nebo selhání dané ochrany. Selhání ochranného prvku se značí čárou odbočující směrem dolů a naopak, očekávaná ochranná reakce vede čáru dále nebo směrem nahoru. Názorný diagram stromu událostí zobrazuje *Obrázek 6*. Úspěšná akce první ochranné bariéry se stanoví z odečtení pravděpodobnosti selhání ochranného prvku od jedné a poté vynásobením frekvencí iniciační události. Selhání ochrany se vypočítá násobením pravděpodobnosti selhání daného prvku a frekvence iniciační události. Tímto způsobem se postupuje až k výsledné frekvenci scénáře. [19][21]

1.4.4 Metody pro odhad následků

Metody analýzy rizika stromem poruch a stromem událostí jsou schopné poskytnout odpověď na otázky: 2.Co a jak se může pokazit? a 3. Jaká je šance, že se to stane? Stromy poruch lze kombinovat se stromy událostí do takzvaných CCD (Cause Consequence Diagram = diagram příčin a následků), příklad je uveden v kapitole 1.6 Příklady analýzy rizika z literatury.

V rámci analýzy rizika zbývá ještě odpovědět na poslední otázku: 4. Jaké by byly následky? Pro tento účel lze používat nejrůznější metody odhadů od těch velmi jednoduchých až po ty složitější, známých například z fyzikální chemie. Pro účely odhadování následků v rámci analýzy rizika byla vyvinuta celá řada metod. Pomocí nich lze odhadovat následky v takových situacích jako je například vyšetřování havárií, tvorba havarijních plánů, odhadů škod pro pojišťovny a v neposlední řadě i pro územní plánování.

Každá metoda modelování následků se volí na základě několika faktorů. Prvním faktorem je nebezpečná vlastnost dané látky, nejčastěji tím bývá hořlavost, výbušnost nebo toxicita. Dalším faktorem je zdrojový člen, který popisuje způsob a stav při jakém daná látka uniká ze systému. Může se jednat o výtok kapaliny, plynu či dvoufázového systému (kapalina-pára) z obalu. Dalšími zdrojovými členy může být odpar těkavých kapalin, odpar podchlazených kapalin anebo mžikový odpar u přehřáté kapaliny nebo zkapalněného plynu. V neposlední řadě se také metoda modelování následků vybírá na základě fyzikálního projevu uniklé látky. Existují modely na popis rozptylu toxického oblaku, na popis požáru a přenosu tepelné radiace a na popis výbuchů a šíření tlakových vln.

Souhrnně záleží při výběru modelu pro analýzu následků na druhu látky a její nebezpečné vlastnosti, jakým způsobem uniká látka z uzavřeného systému a na jejích fyzikálních projevech.[24]

Příklady jednoduchých modelů pro analýzu následků byly publikovány například v knize Guidelines for CPQRA včetně přiložených souborů programů Excel pro rychlé a jednoduché použití pro uživatele. [24]

1.4.5 Kvantitativní analýza rizika (QRA)

Kvantifikace událostí ve scénáři, který vede k nehodě, se používá, pokud výsledky kvalitativní analýzy nejsou dostačující pro rozhodnutí o přijatelnosti rizika a následných ochranných opatření. Jednou ze základních možností, jak lze matematicky popsat scénáře a události vedoucí k nehodě je Kvantitativní analýza rizika takzvaná QRA, která pomáhá k celkovému stanovení a ohodnocení rizika podniku.

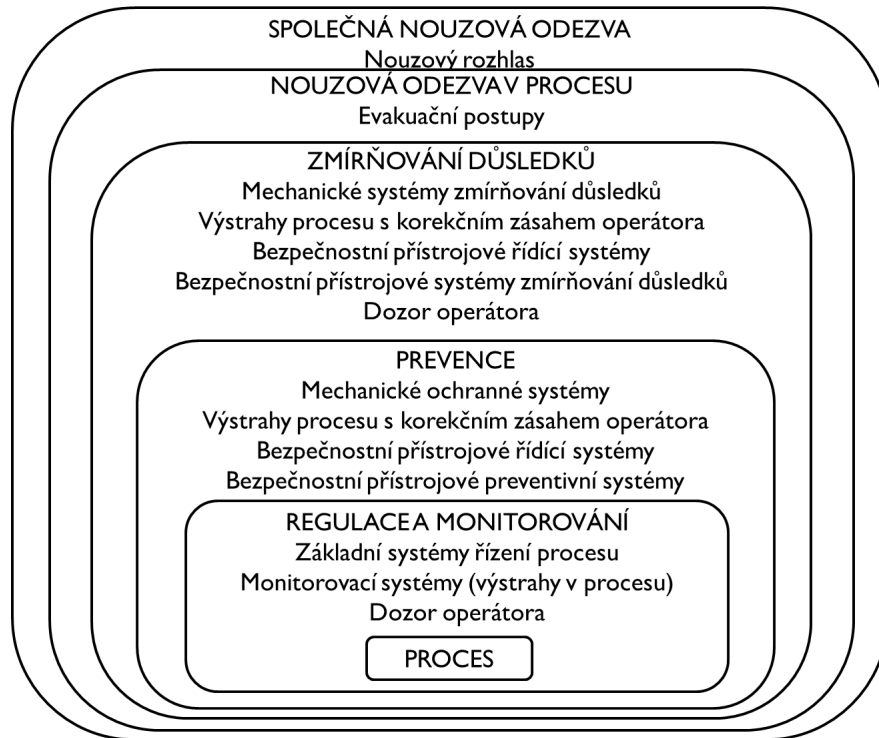
Klasická QRA analýza začíná identifikací zdrojů rizik, které by mohly vést k nežádoucím událostem, pomocí například metody HAZOP. Následně se stanoví odhady frekvencí a pravděpodobností scénářů nehod pomocí stromů poruch a stromů událostí, které popisují scénáře studovaných nehody. Poté se zhodnotí následky těchto nehod, které by mohly nastat (většinou se zde využívají modely rozptylu dané látky, modelování požáru případně výbuchu). Následuje ohodnocení dopadu a následků na lidské zdraví a životy, životní prostředí a majetek. Posledním krokem je scelení frekvence jednotlivých scénářů a závažnosti následků do jednotného výsledku tzv. ocenění rizika. Ocenění rizika je kombinace závažnosti následků a frekvence události.[19] [20]

1.4.6 Zjednodušená analýza rizika LOPA

Layers Of Protection Analysis neboli LOPA je semikvantitativní metoda sloužící jako zjednodušený nástroj pro analýzu a hodnocení rizik. Tato metoda obvykle používá řádové kategorie pro iniciační frekvence událostí, závažnost následků a pravděpodobnost selhání nezávislých ochranných vrstev (Independent Protection Layer = IPL), aby stanovila přijatelnost rizika daného scénáře. LOPA je analytický nástroj, který obvykle staví na informacích získaných během kvalitativního hodnocení rizik.[24]

Primárním účelem LOPA je určit, zda existují dostatečné vrstvy ochrany proti scénáři nehody (je riziko tolerovatelné?). Jak znázorňuje *Obrázek 7*, je mnoho možných typů ochranných vrstev.

Scénář může vyžadovat jednu nebo více ochranných vrstev v závislosti na složitosti procesu a závažnosti následků. V některých případech by se dalo říct, že stačí pouze jedna ochranná vrstva na vyvážení rizika, ale jelikož žádná vrstva není dokonale účinná, musí být poskytnuto více dodatečných ochranných vrstev, aby bylo riziko nehody tolerovatelné.[24]



Obrázek 7: Ochranné vrstvy, které ovlivňují rozvinutí scénáře nehody.[21]

LOPA je omezena na vyhodnocení dvojic příčina-následek jako scénářů. Jakmile je pro analýzu vybrána tato dvojice, může analytik použít metodu k určení, které technické a administrativní kontroly (často nazývané zabezpečení) splňují definici IPL, a poté odhadnout riziko scénáře. Výsledky pak mohou být rozšířeny o posouzení rizik a pomoci analytikovi rozhodnout, jaké další snížení rizika může být zapotřebí k dosažení přijatelné úrovně rizika. Při provádění LOPA na scénáři mohou být odhaleny další scénáře nebo jiné problémy.[24]

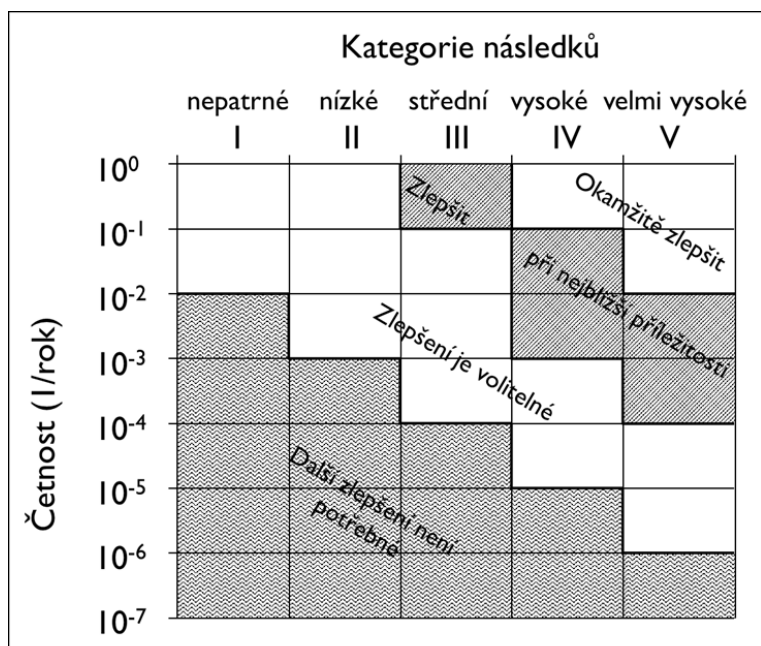
Stejně jako ostatní metody lze metodu LOPA rozdělit do několika kroků.

1. Identifikace následků pro výběr scénáře. Následky jsou obvykle identifikovány během kvalitativního stanovení zdrojů rizik (jako je HAZOP).
2. Výběr scénáře nehody.
3. Identifikace iniciační události scénáře a určení frekvence iniciační události (počet událostí za rok). Iniciační událost musí vést k následkům (vzhledem k selhání všech ochranných opatření). Frekvence musí zohledňovat aspekty kontextu scénáře, jako je frekvence provozního režimu, pro který je scénář platný.
4. Nalezení IPL a odhad pravděpodobnosti selhání (PFD = Probability of Failure on Demand) při aktivaci každého IPL. Rozpoznání již existujících ochranných vrstev, které splňují požadavky IPL pro daný scénář, je klíčovým krokem celé metody.
5. Odhad rizika scénáře matematickým zkombinováním údajů o následcích, iniciační události a IPL. Přístup zahrnuje výpočetní vzorce a grafické znázornění.
6. Vyhodnocení rizika pro dosažení rozhodnutí o přijatelnosti rizika scénáře.[24]

Pro posouzení přijatelnosti rizika scénáře se používá takzvaná matice rizika, kterou znázorňuje *Obrázek 8* na následující straně.

LOPA vyžaduje obecně méně času než samotná kvantitativní analýza rizik. Tato výhoda se týká zejména scénářů, které jsou příliš složité pro kvalitativní posouzení rizik. Metoda ale není použitelná pro identifikaci zdrojů rizik a závisí na použitých metodách (včetně metod kvalitativního ocenění zdrojů rizik).[24]

Příloha 1 zobrazuje příklad formuláře LOPA, který se vyplňuje v rámci této metody pro shrnutí hodnocení vybraného scénáře.



Obrázek 8: Příklad matice rizika znázorňující oblasti přijatelnosti rizika v závislosti na frekvenci dané nehody za rok a závažnosti následků [21].

Tabulka 7: Popis jednotlivých kategorií následků dle závažnosti a dle příjemce rizika.[21]

	I nepatrné	II nízké	III střední	IV vysoké	V velmi vysoké
Osoby v podniku	Žádné zranění, bez pracovní neschopnosti.	Malé zranění, bez pracovní neschopnosti.	Jednotlivé zranění, ne vážné, s pracovní neschopností.	Jedno nebo více vážných zranění.	Úmrtí nebo zranění vedoucí k trvalému poškození.
Osoby v okolí	Žádné zranění ani znepokojení.	Žádné zranění ani znepokojení.	Zápach, hluk, důvod k znepokojení.	Jedno nebo více malých zranění.	Jedno nebo více vážných zranění.
Majetek	Škody nebo ztráty na produkci do 10 000 Kč.	Škody nebo ztráty na produkci do 100 000 Kč.	Škody nebo ztráty na produkci nad 100 000 Kč.	Škody nebo ztráty na produkci nad 1 000 000 Kč.	Škody nebo ztráty na produkci nad 10 000 000 Kč.

1.4.7 Hodnocení rizika

Hodnocení rizika je činnost, která může nastoupit až po kompletní analýze rizika a jeho ocenění. Do toho bodu jsou již identifikovány všechny zdroje rizika a scénáře a je provedena analýza jejich pravděpodobnosti a následků. Z toho je možné stanovit míru rizika a porovnat ji s kritérii hodnocení rizik. [20]

Přijatelnost rizika se může hodnotit podle společenské přijatelnosti způsobem ALARP (As Low As Reasonably Practicable). Mimo tento způsob se také prosazuje kvantitativní posuzování přijatelnosti rizika, kdy po ocenění rizika následuje hodnocení rizika. Pro tento způsob je nutné si ustanovit názor na meze přijatelnosti. Nejčastěji se používají dvě varianty pro hodnocení rizika. Při porovnávání většího počtu variant s rizikem mezi sebou se vybírá ta nejlepší a nejvíce bezpečná možnost (nový zavedený proces nemůže být horší než ten starý). Druhá možnost je porovnání výsledku analýzy rizika s vybraným kritériem či limitem (legislativní limit, z doporučené odborné literatury atd.).[21]

Při porovnávání míry rizika se stanoveným limitem se využívá například matice rizika, kterou znázorňuje *Obrázek 8*. Matice může být rozdělena do oblastí s různou závažností a přijatelností rizika.

Rozhodování o přijatelnosti rizika má vždy povahu politického rozhodování. Riziko je tolerováno proto, že je spojeno s činnostmi přinášející všeobecný společenský užitek. [20]

Co se týče přijatelnosti rizika v legislativě, ve vyhlášce České republiky 227/2015 Sb. se vyskytuje pravidlo pro hodnocení skupinového rizika, které zní:

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

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

F_p – přijatelná roční frekvence závažné havárie

N – odhad počtu usmrcených osob [10].

Při porovnání s maticí rizika, kterou zobrazuje *Obrázek 8*, je patrné, že tento vztah pro kritérium přijatelnosti skupinového rizika koresponduje s volbou hranice v matici mezi oblastmi „Zlepšení je volitelné“ a „Zlepšit při nejbližší příležitosti“. Pokud předpokládáme úmrtí jedné osoby, dle vztahu uvedeného výše je zapotřebí snížit frekvenci havárie pod $1 \cdot 10^{-3}$ za rok. Tomu odpovídá i hranice oblastí matice rizika, kde hranice přijatelnosti rizika začíná frekvencí $1 \cdot 10^{-4}$.

1.5 Legislativa prevence závažných havárií v průmyslu

Právní rámec prevence závažných havárií je v Evropské unii v současné době korigován směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2012/18/EU z roku 2012, tzv. směrnicí SEVESO III. Členským státům EU bylo uloženo uvést do souladu s touto směrnicí příslušné právní a správní předpisy. Česká republika přijala nový zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií. Hlavní změnou je jeho přizpůsobení novému systému klasifikace chemických látek a směsí stanovenému nařízením č. 1272/2008, tzv. nařízením CLP. Významné změny nastaly i v procesu posuzování bezpečnostní dokumentace. [27]

V České republice je systém, napomáhající předcházení vzniku nežádoucích událostí v souvislosti s únikem nebezpečných chemických látek, nastaven zákonem o prevenci závažných havárií naplňujícím požadavky Evropské unie již bezmála šestnáct let.[27]

Tento systém ukládá provozovatelům objektů, v nichž jsou umístěny vybrané nebezpečné chemické látky nebo směsi, povinnost zavést veškerá opatření, jež mají zabránit vzniku závažné havárie, stejně jako povinnost stanovit postupy k jejímu zvládnutí pro případ, že havárie nastane i přes přijatá preventivní opatření.[27]

1.5.1 Analýza rizika v legislativě Evropské unie

Česká legislativa a zákon, který se zabývá prevencí závažných havárií (dále jen PZH), vychází ze směrnice Evropské unie (dále jen EU). Aktuálně platná směrnice 2012/18/EU tzv. Seveso III platí ode dne 13. srpna 2012 a jednotlivé země EU ji museli implementovat do svého zákona s platností od 1. června 2015. Tato směrnice nahrazuje původní směrnici Seveso II (96/82/ES) vydanou na základě poučení z katastrofických nehod, které se odehrály v Bhópálu nebo Toulouse. Tato směrnice nahradila původní směrnici Seveso (82/501/EHS) vydanou po havárii v italském městě Seveso v roce 1976. [28]

Směrnice Seveso III stanovuje pravidla pro prevenci závažných havárií při průmyslových činnostech a omezování jejich následků pro lidské zdraví a životní prostředí. Oproti předchozí směrnici zajišťují veřejnosti silnější práva pro poskytování informací o rizicích plynoucích z činností blízkého průmyslového zařízení. Společnosti nakládající s nebezpečnými látkami v množství přesahující limitní hodnoty jsou povinny vést bezpečnostní dokumentaci, vytvořit systém řízení bezpečnosti, jehož součástí je identifikace zdrojů rizika a posuzování rizika a zavést havarijní plánování.[28]

1.5.2 Analýza rizika v legislativě České republiky

Na tento předpis navazuje zákon České republiky č. 224/2015 ze dne 12. srpna 2015 o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi. Tento zákon stanoví povinnosti pro právnické či podnikající osoby, které užívají objekt, ve kterém je umístěna nebezpečná látka. Dále vymezuje působnost orgánů veřejné správy na úseku prevence závažných havárií způsobených nebezpečnými látkami.[29]

Na základě limitů minimálního množství nebezpečných látek (uvedených v příloze) umístěných v daném objektu provozovatel zpracuje buď protokol o nezařazení nebo navrhne zařazení průmyslového objektu do skupiny A či B. Zařazení objektu do jedné ze skupin může nastat i v případě možného domino efektu během havárie. Dále zákon ukládá povinnost zpracovat bezpečnostní dokumentaci obsahující identifikaci zdrojů rizika, analýzu rizik a hodnocení rizik. Provozovatel objekty ve skupině A je povinen zpracovat bezpečnostní program obsahující informace o objektu, posouzení rizik závažné havárie, politiku prevence závažných havárií a popis systému řízení bezpečnosti. Provozovatel objektu zařazeného ve skupině B musí vypracovat bezpečnostní zprávu, která je na rozdíl od bezpečnostního programu navíc opatřena technickým popisem objektu, informacemi o složkách životního prostředí v okolí objektu a popisem preventivních bezpečnostních opatření vedoucích k omezení vzniku a následků závažné havárie.[29]

Provozovatel objektu zařazeného do skupiny A nebo do skupiny B zpracuje pro tento objekt plán fyzické ochrany. Objekty ve skupině A musí mít disponovat vnitřním havarijním plánem, objekty umístěné ve skupině B musí mít ještě navíc zpracovaný a schválený vnější havarijní plán, který se zaměřuje na následky havárie mimo objekt.[29]

V zákonu je dále stanoveno, že každý se může na krajský úřad obrátit s žádostí o poskytnutí informace o objektu zařazeném do skupiny A či B. Krajský úřad ve spolupráci s hasičským záchranným sborem kraje a provozovatelem zpracuje pro objekty zařazené do skupiny A nebo B srozumitelně formulovanou informaci o nebezpečí závažné havárie, včetně možného domino efektu, o preventivních bezpečnostních opatřeních a o žádoucím chování obyvatel v případě vzniku závažné havárie.[29]

Na výše uvedený zákon č. 224/2015 navazuje prováděcí vyhláška z č. 227/2015 o náležitostech bezpečnostní dokumentace a rozsahu informací poskytovaných zpracovateli posudku. Vyhláška slouží jako návod pro vytvoření bezpečnostní dokumentace, která obsahuje identifikaci a analýzu zdrojů rizika a jejich hodnocení. V příloze 1 této vyhlášky je uveden způsob provedení posouzení rizik závažné havárie a jeho rozsah.

V příloze jsou také uvedeny jednotlivé kroky analýzy rizika, kterou vyhláška vyžaduje. Jednotlivé kroky analýzy rizika jsou v souladu s předchozími výklady analýzy rizika popisovaných v kapitole 1.3 Analýza rizika, jeho řízení a hodnocení.[10]

1.5.3 Prevence závažných havárií u bioplynových stanic

Většina zařízení na výrobu bioplynu je malého nebo středního rozsahu, a proto nedosahuje prahových hodnot pro uplatňování právních předpisů zaměřených na kontrolu nebezpečí závažných havárií, jak uvádí směrnice Seveso III a zmíněný navazující zákon České republiky s provádějící vyhláškou. [11]

Nicméně z analýzy nehod na bioplynových stanicích, která byla uveřejněna ve zmiňovaném článku z roku 2016 (rozebíraném v kapitole 1.2 Nehody na bioplynových stanicích) vyplývá, že v rámci dokumentovaných událostí některé havárie spadají pod definici závažných havárií podle přílohy VI směrnice Seveso III. Jedná se o 20 událostí z celkových 169 zdokumentovaných nehod, což představuje téměř 12 %. [11]

Nutno tedy říct, že získané zkušenosti z nehod popisovaných v kapitole 1.2 se týkají především absence konkrétních mezinárodních norem a předpisů pro bioplynové stanice. Absence bezpečnostních postupů a požadovaných standardů pro školení pracovníků, stejně jako nízká informovanost a nízké vnímání rizik ze strany manažerů bioplynových stanic jsou základní příčinou vysokého počtu nehod zaznamenaných při výrobě a úpravě bioplynu. Bioprocessy, jako je výroba bioplynu, jsou často mylně vnímány jako bezpečnější než konvenční chemické procesy. Výsledky současného průzkumu nehod mohou být varováním před nebezpečím závažných havárií v bioplynovém průmyslu. Zároveň a mohou zvýšit potřebu zlepšit kulturu bezpečnosti a povědomí o rizicích v tomto odvětví, a to rovněž rozvojem a přijetím vhodných a specifických bezpečnostních opatření.[11]

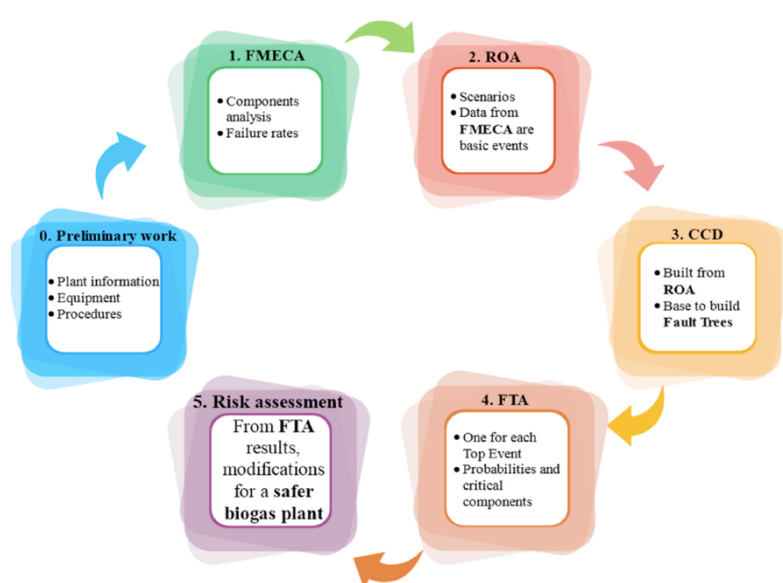
1.6 Příklady analýzy rizika z literatury

S bioplynovými stanicemi lze zacházet jako s běžnými chemickými provozy, a proto jsou všechny metody posuzování rizik pro chemická zařízení v zásadě vhodné pro zařízení na produkci bioplynu. V tomto smyslu je v této oblasti jedním z nejpoužívanějších přístupů kvantitativní analýza rizik (QRA), která poskytuje objektivní analýzu studovaného závodu. V současné době se pro hodnocení rizik bioplynových stanic nepoužívají žádné metody či techniky šité na míru výhradně bioplynovým stanicím.[2]

V dřívější práci od českých autorů z roku 2019 bylo klasifikováno a kvantifikováno riziko nehody při produkci bioplynu pomocí analýzy stromu poruch (FTA) a analýzy stromu událostí (ETA). V této práci byl identifikován scénář, kde se předpokládá největší škoda (na životě nebo majetku). Tímto scénářem je únik celkového objemu nebezpečné plynné látky z plynojemu a následná iniciace. Na základě těchto informací byla zpracována analýza stromem poruch a pro každou událost byly odhadnuty frekvence. Poté byla provedena analýza stromem událostí.[31]

1.6.1 Metoda rozsáhlé kvantitativní analýzy rizika z Itálie

V rozsáhlé práci z roku 2021 byla pro kvantitativní analýzu rizika bioplynové stanice použita inovativní metodika analýzy rizika. Kombinuje se v ní poměrně komplikovaná posloupnost metod: specifická místní metoda ROA (Recursive Operability Analysis = rekurzivní analýza provozuschopnosti) spolu s metodou FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis) a metodou FTA (Fault Tree Analysis). [2]



Obrázek 9: Hlavní kroky použité metody pro analýzu rizika popisované ve zmiňovaném článku [2].

Technika ROA-CCD je metoda podobná výše zmíněné kombinaci PreHa a HAZOP. Umožňuje automatické vytváření stromu poruch, které lze použít pro QRA. Nejprve musí být získány obecné informace o zařízení, jako jsou jednotlivé součásti, řídicí smyčky, ventily, pracovní postupy (pro lidskou i automatizovanou činnost) a bezpečnostní a ochranná opatření (krok 0). Nejlepším postupem v tomto případě je mít k dispozici technické schéma celého závodu (neboli piping and instrumentation diagram P&ID). Poté se provede FMECA (krok 1) nalezením všech poruchových režimů a poruch, které se mohou v závodě vyskytnout. Metodu ROA-CCD lze poté použít (krok 2) sloučením typické tabulky ROA a následně generováním diagramů příčin a následků (krok 3). Z CCD se automaticky generují stromy poruch a lze je numericky vyřešit (krok 4) za účelem poskytnutí kvantitativního odhadu rizika, který lze porovnat s přijatelnými hodnotami samotného rizika. [2] *Obrázek 9* znázorňuje tento postup.

Pro metodu ROA-CCD je nezbytná identifikace tzv. základní události (basic event), která může způsobit danou odchylku od standardních provozních podmínek. Takovými událostmi mohou být buď chyby jednotlivých zařízení v závodě, nebo lidské chyby. FMECA proto může představovat databázi, ze které lze vybírat a následně použít základní události do analýzy ROA-CCD.[2]

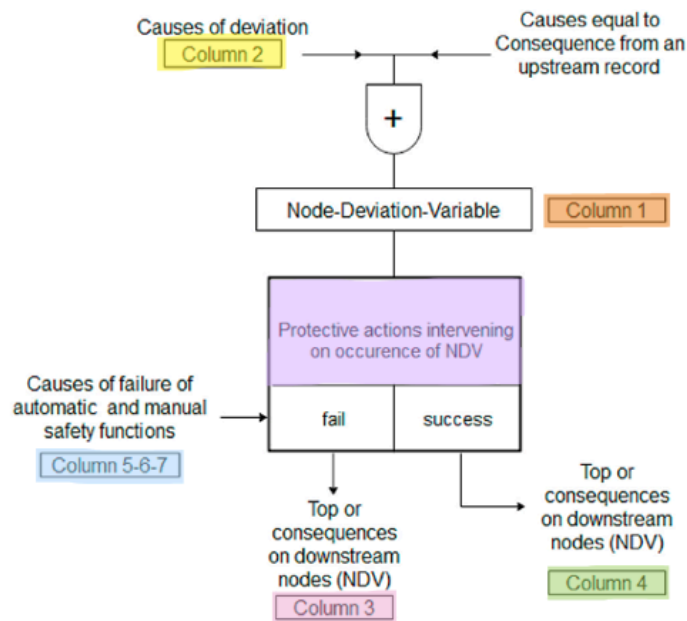
Zavedení metody ROA-CCD začíná vyplněním tabulky ROA, zde uvedená níže jako *Tabulka 8*. Struktura je velmi podobná tabulce HAZOP, přičemž sloupce s proměnnou „Node Deviation Variable“ (NDV) jsou umístěny v jednom sloupci. Celý systém byl v tomto případě rozdělen na 6 hlavních uzlů (tzv. nodes), uvedených jako: předmíchací nádrž, anaerobní digester (reaktor), vzduchová komora v plynoměru, zásobník vyhnílého digestátu, lapač kondenzátu, fléra a kogenerační jednotka.[2]

Tabulka 8: ROA tabulka se sloupci s proměnnými odchylkami, příčinami a následky a souvisejícími ochrannými prvky [2].

Record	Node Deviation Variable (NDV)	Causes	Consequences due to protections failure	Plant state with protections working correctly	Protections			Notes	Top Event
					Manual	Operator actions on components	Automatic safety systems actions		
					Alarm (optical/ acoustic)				
1		2	3	4	5	6	7		

Jednou z nejdůležitějších funkcí diagramů příčin a následků (CCD) je identifikace stavů systému v důsledku správného zásahu ochranných opatření, které lze vzít v úvahu při definici možných vrcholových událostí. [2]

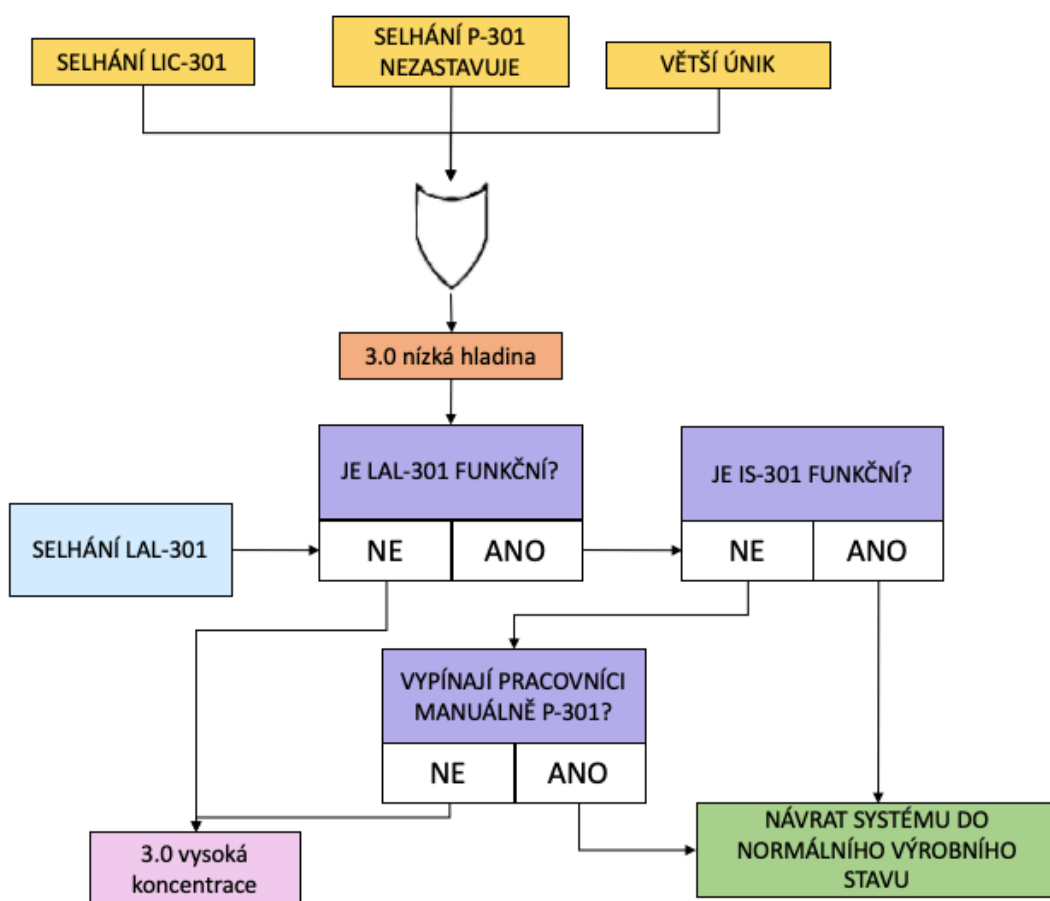
Ze všech CCD generovaných v ROA (jeden pro každý řádek tabulky ROA) je možné generovat více stromů poruch odkazujících na všechny identifikované Top Events (vrcholové události). Za Top Event je zde považována událost, která se objeví buď ve sloupci Consequence (důsledky) nebo ve sloupci Plant state (aktuální stav výroby např. vypnutí celého systému). *Obrázek 10* znázorňuje převod záznamu tabulky ROA na CCD diagram. Jednotlivé barvy schématu odpovídají barvám ve sloupcích *Tabulka 9* a CCD diagramu (*Obrázek 11*), kde je popsán příklad z uvedeného článku [2]. *Tabulka 9 a Obrázek 11* znázorňují ukázkový příklad, kterým je nízká hladina vody v lapači kondenzátu.



Obrázek 10: Způsob převodu tabulky ROA na CCD.

Tabulka 9: ROA tabulka názorného příkladu z článku [2], kdy odchylkou je nízká hladina vody v lapači kondenzátu.

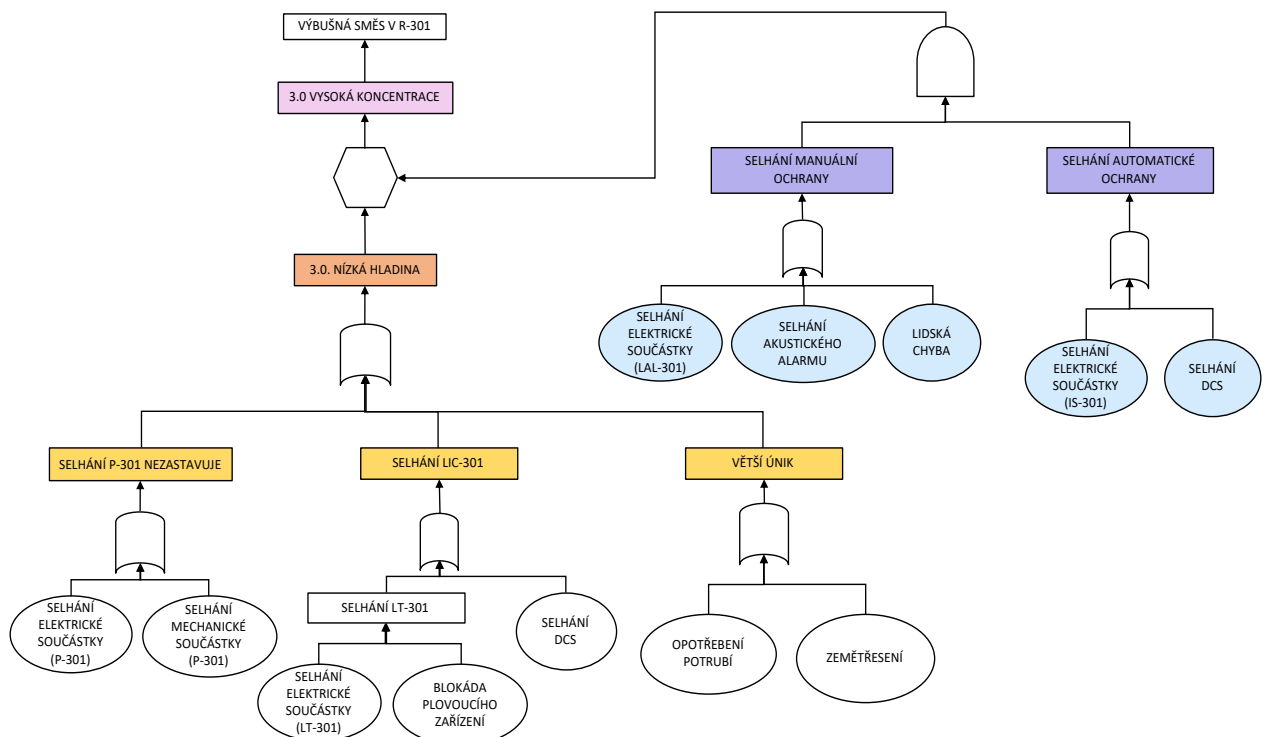
Č. události uzlu	Odchylka uzlu	Příčina	Následky	Stav systému při funkčních ochranných opatřeních	Ochranná opatření		
					Alarm	Pracovník	Automatické
3.1	3.0 nízká hladina	Selhání LIC-301	3.0 vysoká koncentrace	Systém přejde do normálního výrobního stavu	LAL-301	Manuální vypnutí P-301	IS-301
		Selhání P-301 nezastavuje			LAL-301	Manuální vypnutí P-301	IS-301
		Větší únik					



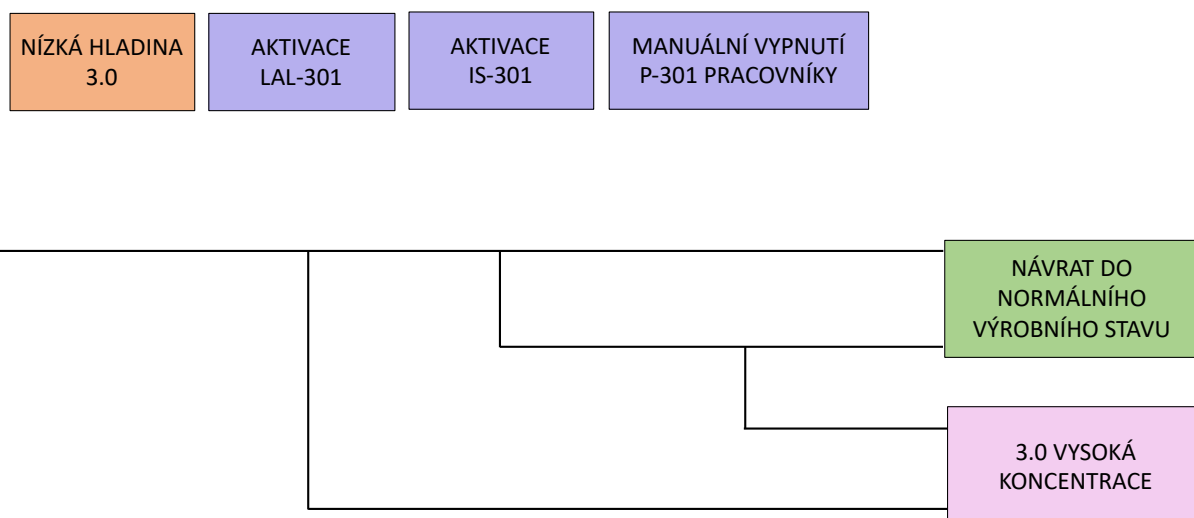
Obrázek 11: CCD diagram z ROA Tabulka 9 k události nízké hladiny vody v lapači kondenzátu.

CCD diagram a ROA tabulky výše vykreslují scénář vysoké koncentrace bioplynu vedoucí k tvorbě potenciální výbušné atmosféry, která je důsledkem nízké hladiny vody uvnitř R-301. Mezi 3.0 IL (nízkou hladinou) a 3.0 hC (vysokou koncentrací) je zahrnut ochranný alarm nízké hladiny (LAL-301) a je nainstalován s akustickým alarmem, který informuje pracovníky o nízké hladině vody v lapači. Dále je LAL-301 opatřen automatickým spínačem (IS-301), který vynutí vypnutí vodního čerpadla P-301. Pokud dojde k poruše IS-301, čerpadlo mohou manuálně odstavit pracovníci. Nízká hladina vody uvnitř R-301 může být způsobena několika problémy, kterými jsou porucha čerpadla P-301, porucha regulátoru hladiny LIC-301 nebo větší únik z R-301.[2]

Z uvedeného diagramu na obrázku 3 lze snadno vytvořit stromy poruch (nejčastěji přes software tvořící FT např. OPENFTA), které lze následně numericky vyřešit a získat tak kvantitativní odhad rizika pro srovnání s přijatelnými hodnotami rizika. [2] *Obrázek 12* je příkladem stromu poruch pro řešený scénář nízké hladiny vody uvnitř R-301 vedoucímu až k tvorbě výbušné atmosféry, a je převzat a přeložen z uvedeného článku. *Obrázek 13* znázorňuje klasický vzhled stromu událostí k tomuto scénáři a odkazuje na *Obrázek 11* s uvedeným CCD diagramem.



Obrázek 12: Strom poruch s vrcholovou událostí vytvoření výbušné směsi v lapači kondenzátu [2].



Obrázek 13: Strom událostí pro scénář nízké hladiny vody v lapači kondenzátu R-301.

1.6.2 Komentář k příkladu analýzy rizika z literatury

Autoři článku představili a popsali postup metody analýzy, která ve volném překladu nese název „Rekurzivní provozní analýza“ nebo „Rekurzivní analýza provozuschopnosti“. Už ze samotného názvu lze odvodit, stejně jako z komplexního popisu metody, že se jedná o metodu, která byla původně sestavena spíše pro analyzování spolehlivosti provozu (v angličtině tzv. reliability). Pojmy bezpečnost a spolehlivost provozu se v mnoha ohledech prolínají, stejně tak platí, že spousta metod analýzy rizika se používá i při analyzování spolehlivosti procesu (např. FMECA, PHA, stromy poruch i událostí). Jedním z rozdílů a zároveň třecích ploch mezi těmito pojmy je například fakt, že z hlediska bezpečnosti je jedno, pokud systém nesplní svůj účel, pokud nejsou porušeny bezpečnostní požadavky. Na druhou stranu je možné, že systém je extrémně spolehlivý, ale nebezpečný. [32] Z hlediska této práce a probíraného článku se tento problém neprojevil, je ale dobré pro širší kontext tento fakt zmínit.

Tato popisovaná metodika analýzy rizika byla aplikována na vybranou bioplynovou stanici, ke které je v práci uveřejněno i její schéma (P&I diagram) spolu s vysvětlivkou jednotlivých důležitých součástí a zároveň s tabulkou vypisující zavedené ochranné bariéry. Cílem celého příkladu představující tuto metodiku jsou výsledné nalezené vrcholové události (tzv. Top Events) zahrnuté jako iniciační událost ve scénářích nehod. U konkrétního scénáře nehody, jejíž vrcholovou/iniciační událostí je vytvoření výbušné atmosféry uvnitř fermentoru, byla vyčíslena pravděpodobnost této nehody, která je porovnána s jinou hodnotou uveřejněnou v podobném článku českého autora zabývajícím se taktéž analýzou rizika bioplynových stanic. [31]

Tento článek byl rovněž krátce popsán v kapitole 1.6. Každopádně se článek [2] opravdu soustředí pouze na představení a popsání vybrané metodiky analýzy rizika. Není provedeno jakékoliv hodnocení rizika pro reálnu představu a posouzení přijatelnosti rizika.

Probíraná metoda analýzy rizika z tohoto článku se skládá z klasických kroků analýzy, nejdříve se začíná identifikací zdrojů rizik pomocí metody FMECA. Následně se pro nalezení a popsání scénářů nehod používají takzvané ROA tabulky (viz. kapitola 1.6), ze kterých se následně konstruuje diagramy příčiny a následků (CCD), které jsou základem pro stromy poruch. Ty jsou následně i kvantifikovány. Celkově metodika cílí na detailní a konkrétní popis scénářů nehody společně s odchylkami či selháními jednotlivých komponentů, které vedou k vrcholové události. I přesto, že se tato představená metoda skládá z několika kroků, kromě těch všeobecně známých jako je identifikace zdrojů rizik pomocí FMECA metody a ocenění scénářů přes stromy poruch, jedná se při větším porozumění stále jen o kvantitativní analýzu rizika. Z akademického a teoretického hlediska se tato metoda jeví jako nový a zajímavý koncept pro komplexní analýzu rizika, otázkou ale je, jak moc se hodí pro praktickou analýzu rizika bioplynové stanice.

Obecně se tato metoda zdá být pro tento účel až příliš složitá. Pokud se provozovatel bioplynové stanice bude zajímat o bezpečnost svého zařízení a bude mít zájem provést ocenění rizika a zjistit, jaká je úroveň bezpečnosti procesu, lze logicky odhadnout, že bude hledat spíše jednodušší metodu analýzy rizika. Jeho cílem nebude kompletní analýza rizika do nejmenšího detailu, už jenom z toho důvodu, že legislativa to po provozovatelích bioplynových stanic z valné většiny případů nevyžaduje. Bude se snažit pomocí postupu analýzy rizika najít nejrizikovější a nejkritičtější místa na svém zařízení, a na těchto slabých místech pak aplikovat určitá ochranná opatření, které budou nalezené riziko budou snižovat. V podstatě se jeho úvahy budou soustředit pouze na otázku, zda je konkrétní bioplynová stanice dostatečně bezpečná a jak případně její bezpečnost zlepšit. Na základě této úvahy lze odhadnout, že popisovaná metoda v uvedeném článku nejspíše nebude jeho první volbou, právě kvůli své složitosti a časové náročnosti.

1.7 Shrnutí poznatků a stanovení cílů

Vzhledem k růstu odvětví produkce bioplynu jako zdroje alternativní energie (a zároveň jako způsobu ekologického využití některých organických odpadů) se bude tematika bezpečnosti provozu a analýzy rizika na bioplynových stanicích dostávat stále více do popředí pozornosti. Jak bylo popsáno v kapitole 1.2 Nehody na bioplynových stanicích, s narůstající výstavbou zařízení na výrobu bioplynu a jeho následného zpracování, souvisí i narůst zaznamenaných počtů nehod na bioplynových stanicích. V kapitole 1.5.3 Prevence závažných havárií u bioplynových stanic byly zmíněny dva hlavní důvody, proč dochází k tolika nehodám souvisejících s produkcí bioplynu. Jedním důvodem je absence konkrétních mezinárodních norem a předpisů, které by se riziky a bezpečností bioplynových stanic zabývaly. Druhým důvodem je nedostatečnost bezpečnostních postupů a požadovaných standardů na školení pracovníků na zařízeních pro produkci bioplynu. Zároveň všeobecná domněnka, že biologické procesy, jakým je i výroba bioplynu, jsou bezpečnější než konvenční chemická výroba je dalším možnou příčinou tak vysokých počtů nehod. [11]

Za hlavní cíl si tato diplomová práce klade především rozebrat problematiku analýzy rizika na bioplynových stanicích v širším kontextu a navrhnout metodu, která by byla vhodná pro praktické využití při analyzování a řízení rizika na bioplynových stanicích.

1.7.1 Výzkumné otázky a cíl diplomové práce

V předchozí kapitole byla představena metoda, která byla použita na analýzu rizika bioplynové stanice v odborném článku z roku 2021. Jak bylo již popsáno v minulé kapitole, metoda byla celkově zhodnocena jako teoreticky zajímavá a pro některé chemické provozy přínosná, je ale nevhodná pro praktické využití na analýzu rizika bioplynových stanic především kvůli její složitosti.

V rámci teoretické části této práce byla v kapitole o analýze rizika v podkapitole 1.4.6 představena metoda LOPA. Hlavní výhodou této metody je, že nachází uplatnění jako zjednodušený nástroj pro hodnocení rizik a jejím primárním účelem je zjistit, zda existuje dostatečný počet ochranných vrstev pro přijatelnost rizika. LOPA se omezuje pouze na vyhodnocení dvojice příčina a následek jako celkového scénáře a poté se k tomuto scénáři přidávají nezávislé ochranné vrstvy (takzvané IPL) a z nich se odhaduje celkové riziko scénáře. Po posouzení rizika může analytik dále navrhnout přidání dalších ochranných vrstev, aby se dosáhlo přijatelné úrovně rizika. V minulé kapitole bylo popsáno, co provozovatel bioplynové stanice nejspíše očekává od metody analýzy rizika, kterou by si vybral pro zhodnocení

bezpečnosti konkrétního zařízení na produkci bioplynu. Popis metody LOPA s tím koresponduje.

Při zvažování úrovně bezpečnosti provozu bioplynové stanice lze brát v potaz jakési tři vrstvy nebo pohledy. První vrstva zvažuje, čím se nejvíce zabývá legislativa probraná v kapitole 1.5 o prevenci závažných havárií, a to je především obyvatelstvo v okolí provozu, které může být ohroženo při nehodě na bioplynové stanici. Druhou vrstvou se míní propojení s ekonomikou samotného provozu, což řeší především manažer daného zařízení, který zvažuje podmínky, za jakých bude proces výdělečný s co nejmenšími možnými vstupními náklady. Nutno zmínit, že na ekonomice provozu se závažně podepisují nehody a nechtěné události, při kterých dojde ke škodám na majetku a zařízení. Poslední třetí vrstva se dotýká samotných pracovníků na daném provozu, kteří chtějí samozřejmě pracovat v bezpečném prostředí, ve kterém nepřijdou k újmě na zdraví nebo dokonce na životě a chtějí po pracovní době odjet domů živí a zdraví.

Z výše uvedeného shrnutí vyplývají tři základní výzkumné otázky, které jsou základem pro praktickou část této diplomové práce, a které zní následovně:

1. „Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z hlediska obyvatel v jejím okolí?“
2. „Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z pohledu provozovatele či majitele stanice?“
3. „Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z hlediska pracovníků a obsluhy stanice?“

Tyto pomyslné tři vrstvy, které se týkají i jiných konvenčních chemických provozů, jsou brány v potaz v rámci této diplomové práce a bude se na ně soustředit i praktická část práce. Cílem diplomové práce je zodpovědět na tři výzkumné otázky popsané výše, a zároveň prokázat, že při odpovídání na tyto tři otázky v rámci analýzy rizika na bioplynové stanici lze využít metodu LOPA.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Metodika použitá v praktické části

Náplní praktické části je aplikace metody LOPA na tři vrstvy bezpečnosti, které lze brát v potaz v rámci bioplynové stanice. Jak již bylo popsáno v předešlé kapitole 1.7.1 Výzkumné otázky a cíl diplomové práce, praktická část je rozdělena na tři části, na které se soustředí analýza rizika:

1. bezpečnost z hlediska obyvatel v okolí zařízení;
2. ekonomická stránka provozu bioplynové stanice z pohledu majitele či provozovatele stanice;
3. bezpečnost samotných pracovníků na zařízení.

V každé jednotlivé vrstvě bezpečnosti budou vybrány příklady nejhorších možných scénářů nehody, které by mohly na bioplynové stanici nastat a které by svými následky zasáhly vybrané příjemce (obyvatelé v okolí, samotné zařízení, či pracovníci stanice).

V každé části bude provedena postupně analýza po jednotlivých krocích, které byly popsány v kapitole 1.3 Analýza rizika, jeho řízení a hodnocení. Nejdříve bude provedena identifikace zdrojů rizik, na které budou navazovat scénáře možné nehody. Následně bude provedena analýza a hodnocení vybraných scénářů, použití metody LOPA a hodnocení výsledků doplněné případně o komentáře k daným scénářům nehod.

Cílem praktické části je nalezení odpovědi na výše popsané tři výzkumné otázky za použití metody LOPA (a dalších nástrojů analýzy rizika) a kromě zodpovězení výzkumných otázek tak prokázat, že metoda LOPA je vhodná pro použití při analýze nejkritičtějších scénářů nehod na bioplynových stanic a zároveň že tato metoda pokryje všechny tři vrstvy bezpečnosti, které byly popsány v minulé kapitole.

2.2 Posuzovaná bioplynová stanice

V analýzách praktické části bude posuzována bioplynová stanice, jejíž schéma zobrazuje *Obrázek 1*, která se v našich podmínkách vyskytuje nejčastěji.

V částech, kde bude potřeba podložit analýzu schématem bioplynové stanice, bude využito schéma z italského článku z roku 2021 [2], které odpovídá obecné sestavě běžné bioplynové stanice. *Příloha 2* zobrazuje obecné schéma v takzvané P&ID podobě.

2.2.1 Popis příkladové bioplynové stanice

Základními částmi bioplynové stanice jsou míchací nádrž, kde probíhá příprava a uskladnění navezené biomasy k fermentaci, poté samotný fermentor, kde probíhá anaerobní digesce a výroba bioplynu. Dále je důležitou komponentou skladovací nádrž na bioplyn, kterou nejčastěji nazýváme plynojem.

Nejběžnějším technickým řešením bioplynových stanic je integrovaný plynojem, kdy plynojem je součástí fermentoru. Plynojem je připevněn k betonové nebo ocelové konstrukci fermentoru. Plynojem může být jednovrstvý nebo dvouvrstvý, pro účely této práce se vyhodnocuje integrovaný plynojem na fermentoru tvořený dvěma vrstvami.[31]

Zásobník bioplynu s dvěma vrstvami je tvořen vnější ochrannou membránou a vnitřní membránou, která slouží jako kryt fermentoru. Nejběžnějším materiálem pro membrány plynojemu je tzv. EPDM syntetický kaučuk. [31] Tlak bioplynu v zásobníku je regulován pomocí vzduchu, který je mezi obě membrány vháněn ventilátorem. Tento vzduch plní dvě funkce, udržení přtlaku bioplynu a zajištění neměnného tvar vnější membrány. Stabilní tvar zásobníku totiž významně přispívá ke snížení komplikací v případě nepříznivých povětrnostních podmínek (sníh a vítr). Dále jsou fermentory vybaveny tlakovým regulačním ventilem.[33]

Další kritickou částí bioplynové stanice je kondenzační šachta. Bioplyn před spalováním v kogenerační jednotce nutné vysušit, protože obsahuje nasycené vodní páry. Z tohoto důvodu je potrubí s bioplynem u některých technologických řešení zavedeno pod povrch terénu až do hloubky několika metrů. Zde je zajištěna stabilní teplota po celý rok. Teplota potrubí je pod teplotou rosného bodu, takže v potrubí začne kondenzovat vodní pára. Kondenzát je následně odváděn do kondenzační šachty. Kondenzační šachta má tvar válce vyhloubeného do země, který je osazen betonovými skružemi s přibližným průměrem 90 cm, a který má vybetonované dno. Hloubka kondenzačních šachet se pohybuje přibližně od 2,5 do 5 m. Pokud kondenzát v kondenzační šachtě dosáhne určité úrovně, spustí se čerpadlo a poté je kondenzát čerpán zpět do reaktoru.[34]

Dalšími běžnými součástmi bioplynové stanice viz *Příloha 2* jsou kogenerační jednotka na výrobu elektrické energie a tepla, fléra, která slouží ke spalování nadbytečného bioplynu, který nelze momentálně použít v kogeneraci, a doskladňovací nádrž na vyhnílý digestát.

2.3 Obyvatelstvo v okolí bioplynové stanice jako příjemci rizika

Následující části popisují ty nejhorší možné scénáře v rámci vybraných dvou režimů provozu zařízení, které svými projevy způsobí následky na obyvatelstvu v okolí. Výstupem této části práce je odpověď na první výzkumnou otázku:

„Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z hlediska obyvatel v okolí?“

V kapitole 2.3.6 Rozhodnutí o přijatelnosti rizika pro obyvatele v okolí bioplynové stanice jsou uvedeny výsledky analýzy a stanovení odpovědi na tuto výzkumnou otázku.

2.3.1 Zdroje rizika významné pro obyvatelstvo v okolí

Zdrojem rizika, který má potenciál rozvinout se do projevů nehody s následky, které ohrozí obyvatelstvo v okolí bioplynové stanice, je samotný bioplyn. Bioplyn byl vybrán jako zdroj rizika z důvodů svých dvou vlastností: jeho složky ho činí hořlavým a zároveň toxickým.

Většinovými složkami bioplynu je oxid uhličitý CO_2 a metan CH_4 . Bioplyn však obsahuje i jiné plyny, mezi které se řadí i jedovatý sirovodík H_2S . Obsah jednotlivých složek v bioplynu se liší a závisí na vstupním materiálu, ze kterého je bioplyn vyroben. Například obsah metanu se v případě farmářských bioplynových stanic pohybuje od 50 % do 75 % a obsah oxidu uhličitého od 25 % do 50 %. Z hlediska bezpečnosti jsou nejdůležitějšími plyny v bioplynu metan a sirovodík. Metan je hlavní součástí bioplynu, je to nejjednodušší alkan, netoxický, bezbarvý plyn bez zápachu. Jeho nebezpečnou vlastností je hořlavost. Obsah sirovodíku v bioplynu je nízký. Jeho toxicita je však velmi vysoká. Obsah sirovodíku je rovněž proměnlivý a závislý na typu vstupního materiálu. Obecně vyšší obsah sirovodíku v bioplynu vzniká ze vstupních materiálů obsahujících látky živočišného původu.[15]

Vysoké koncentrace H_2S v bioplynu jsou z hlediska spolehlivého provozu technologií bioplynových stanic nežádoucí. Z tohoto důvodu se provozovatelé snaží udržovat hodnoty H_2S na co nejnižší úrovni. Podobně jako u metanu a oxidu uhličitého se mohou koncentrace sirovodíku u jednotlivých druhů bioplynových stanic lišit. Bioplyn vyrobený z rostlinné biomasy a čistírenských kalů obsahuje H_2S v rozsahu 0,01-0,08 % (100-800 ppm) objemu. Naproti tomu bioplyn vyrobený z odpadu z potravinářského průmyslu může dosahovat výrazně vyšších koncentrací H_2S , 0,6-1,5 % (6 000-15 000 ppm). [31]

Z důvodu konzervativního přístupu při analýze rizika se předpokládá ta nejhorší možnost, že bioplyn má takový obsah složek jednotlivých plynů, které při nehodě způsobí ty nejzávažnější následky. Na základě faktů uvedených výše předpokládáme v bioplynu nanejvýš 70 % metanu pro scénáře s projevy požáru a nanejvýš 2 % sirovodíku pro scénáře s toxickým působením.

2.3.2 Vybrané scénáře nehod s projevy ohrožující okolní obyvatele

Rozlišujeme scénáře ve dvou režimech provozu stanice: jedním je ustálený normální provoz a druhým je údržba, čištění a opravy. Každý scénář začíná únikem celého skladovaného množství bioplynu z plynojemu. Jako jeden z běžných objemů plynojemu lze předpokládat nízkotlaký plynojem o objemu 2500 m³ a při přetlaku do 5 kPa (50 mbar). Lze předpokládat několik nehodových událostí. Pro účely této práce je vybrán případ ztráty celistvosti zásobníku plynu. Jedná se o událost, která má největší potenciál způsobit škodu.

Analýza je zaměřena na zabudovaný plynojem na fermentoru, protože se jedná o nejběžnější typ zásobníku bioplynu. Při běžném výrobním provozu je více než polovina integrovaného plynojemu na fermentoru zaplněna biomasou. Při údržbě, čištění a opravách je snaha objem bioplynu ještě snížit na přibližně na necelou jednu třetinu objemu, to odpovídá zaokrouhleně 1000 m³ bioplynu.

Dalším předpokladem důležitým pro modelování následků projevů scénářů je umístění bioplynové stanice přibližně 600 metrů od venkovské zástavby. Nejbližší obydlí je v méně než jedné pětině směru od bioplynové stanice.

Pro analýzu byly vybrány čtyři scénáře s dvěma projevy s nejzávažnějšími následky na okolní obyvatelstvo. Vybrané projevy scénářů jsou popsány následovně.

1. Flash fire: nebo také mžikový požár způsobený zapálením směsi mraku hořlavého plynu a kyslíku. K tomuto typu požáru dochází, když se hořlavý plyn zcela nesmísí s oxidantem a zároveň nejsou přítomny podmínky pro vytvoření významného přetlaku. Požár může být způsoben rozptylem oblaku bioplynu do vzduchu a s opožděnou iniciací a následným vzplanutím.[13]
2. Rozptyl toxického oblaku bioplynu do okolí: scénář, který nastane, pokud uniklý oblak bioplynu nebude iniciován a dojde k jeho šíření do okolí, kde může způsobit následky svou toxicitou kvůli obsahu sirovodíku. V případě bioplynu, kdy se jedná o směs metanu, který je lehčí než vzduch a oxidu uhličitého, který je těžší než vzduch, předpokládáme, že se výsledný oblak bude neutrálně vznášet nad okolím. Pro modelování rozptylu v tomto případě mluvíme o tzv. puff (odfouknutí).

Čtyři vybrané scénáře nehody, při kterých se uplatní výše popsané projevy flash fire a rozptyl toxického oblaku, jsou vypsány níže. Scénáře respektují dva režimy provozu bioplynové stanice, při kterých může nastat nehoda s popsányými projevy.

1. S1 scénář, při kterém se uplatní iniciační událost IE1, kdy dojde k úniku 2500 m³ bioplynu z plynojemu při ustáleném provozu a následně dojde k opožděné iniciaci, která způsobí rychlé vyhoření tzv. flashfire oblaku bioplynu v zabydlené oblasti.
2. S2 scénář předpokládá uskutečnění iniciační události IE2, při které se uvolní přibližně 1000 m³ bioplynu při údržbě, čištění nebo opravě, který je iniciován a následným projevem bude stejně jako u S1 flash fire oblaku bioplynu v zabydlené oblasti.
3. S3 scénář se uskuteční při ustáleném provozu, kdy se uplatní iniciační událost IE1 s uvolněním 2500 m³ oblaku bioplynu, který se následně rozptýlí a bude toxicky působit v zabydlené oblasti.
4. S4 scénář předpokládá uskutečnění iniciační události IE2, při které dojde během údržby, čištění či oprav k úniku 1000 m³ bioplynu a následnému rozptýlu oblaku s toxickým působením v obydlí v zabydlené oblasti.

2.3.3 Iniciační události způsobující vybrané scénáře

Projevům scénářů, které byly popsány výše, vždy předchází iniciační událost, kterou je okamžitý únik bioplynu z plynojemu. Pro vybrané scénáře rozlišujeme dvě základní iniciační události v závislosti na režimu provozu, při kterém k nehodě dojde.

IE1: iniciační událost č. 1 odpovídá úniku maximálního množství bioplynu při běžném výrobním provozu, tedy únik 2500 m³ bioplynu.

IE2: iniciační událost č. 2 nastane při údržbě, čištění nebo opravách na fermentoru, kdy je množství bioplynu sníženo na cca 1000 m³.

Odhady frekvencí těchto událostí se zabývá i odborná literatura, ze které lze čerpat pro potřeby této práce.

Převzatá *Tabulka 10* ze [31] uvádí vybrané jednotlivé typy událostí, které mohou vést k hromadnému úniku bioplynu z integrovaného plynojemu na fermentoru. Těmto událostem je přiřazena frekvence nebo pravděpodobnost.

Tabulka 10: Výběr základních událostí, které mohou vést k hromadnému úniku bioplynu ze zásobníku, převzato z [31].

Základní událost	Četnost	Pravděpodobnost
Vada materiálu	0,1	
Lidská chyba při uchycení plachty	$1 \cdot 10^{-3}$	
Silný vítr		0,15
Porucha čerpadla	$5 \cdot 10^{-4}$	
Porucha tlakového okruhu	$1,6 \cdot 10^{-6}$	
Porucha snímače tlaku		0,04
Úder blesku	$1,6 \cdot 10^{-2}$	

Výslednou hodnotu vrcholové události lze vypočítat kvantifikací stromu poruch, který zobrazuje *Obrázek 14*. Četnost vrcholové události, při které dojde k hromadnému úniku bioplynu z plynojemu, je stanovena přibližně na $3,1 \cdot 10^{-2}$. Z této hodnoty vychází odhad frekvencí iniciačních událostí IE1 a IE2, které korespondují s dvěma režimy provozu na bioplynové stanici. Při běžném provozu stanice je četnost iniciační události IE1 nižší ($1 \cdot 10^{-2}$). Tento předpoklad vychází z analýzy nehod, které se v minulosti na bioplynových stanicích již odehrály. Iniciační událost IE2 má vyšší odhadnutou četnost ($1 \cdot 10^{-1}$), protože na základě uskutečněných nehod lze stanovit, že při režimu údržby a oprav fermentoru či plynojemu je riziko nehody vyšší.

Pro stanovení pohotovosti měřících přístrojů, ze kterých je odvozena hodnota pravděpodobnosti selhání pro základní události stromů poruch (*Tabulka 10, Tabulka 15 a Tabulka 16*) byl použit vztah:

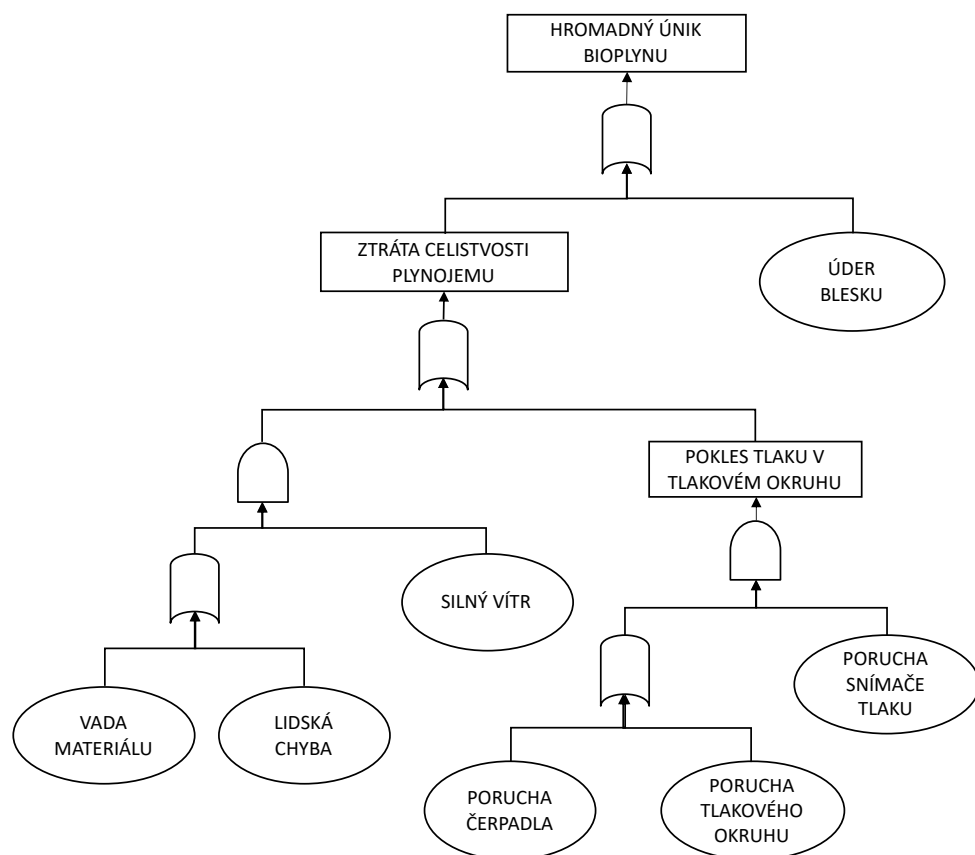
$$P = 1 - \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

P – pravděpodobnost selhání měřícího přístroje

MTTF – Mean Time To Failure, střední doba do poruchy

MTTR – Mean Time To Repair, střední doba do opravy

V rámci této práce je předpokládáno pro stanovení pravděpodobnosti selhání přístrojů jako základní události stromů poruch, že pravidelná kontrola všech elektronických zařízení na bioplynové stanici probíhá jednou ročně.



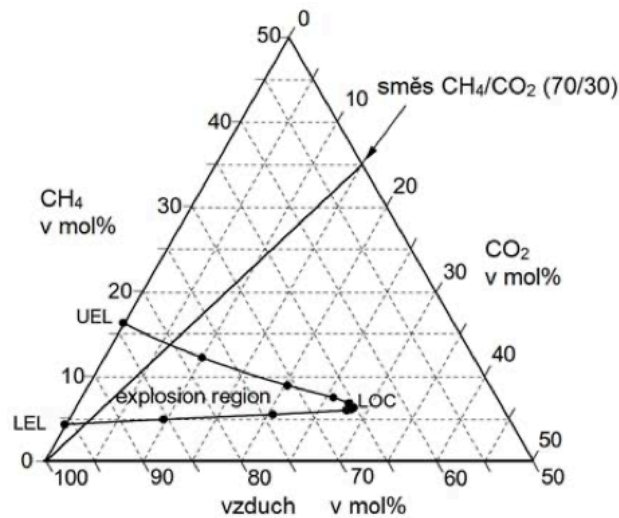
Obrázek 14: Strom poruch s vrcholovou událostí hromadného úniku bioplynu z plynojemu. Upraveno podle [31].

2.3.4 Ocenění následků vybraných scénářů

V případě úniku celého množství bioplynu a rozptýlu s opožděnou iniciací lze předpokládat, že může dojít k vytvoření flashfire nebo mžikového požáru. Při předpokladu, že uniklý bioplyn se skládá ze 70 % metanu a 30 % oxidu uhličitého, lze brát v potaz hlavně dolní mez hořlavosti metanu, která odpovídá přibližně 7 %. Horní mez hořlavosti bioplynu je stanovena přibližně na 16 %. Tyto hodnoty lze získat z trojúhelníkového diagramu, který znázorňuje *Obrázek 15*.

Dalším předpokladem je, že bioplyn unikne z plynojemu přibližně ve výšce 7,5 metrů. Jak bylo již řečeno, bioplyn se svým složením bude neutrálně vznášet ve vzduchu, nebude nijak významně klesat k zemi.

V rámci této práce předpokládáme takzvaný nízkotlaký zásobník bioplynu, kdy přetlak nepřekračuje 0,05 bar. Z toho vyplývá, že bioplyn nebude za zásobníku unikat pod velkým tlakem.



Obrázek 15: Trojúhelníkový diagram zobrazující horní a dolní mez hořlavosti [35].

Pro modelování rozptylu oblaku bioplynu byl použit takzvaný puff model převzatý z odborné literatury [24], pomocí kterého se modelovaly dosahy limitních koncentrací rozptýleného oblaku bioplynu. Limitními koncentracemi pro scénáře S1 a S2, kdy dojde k opožděné iniciaci rozptýleného oblaku bioplynu, je zmíněných 7 % bioplynu tedy přibližně 70 000 ppm bioplynu. Pro scénář S3 a S4, u kterých se předpokládají následky na základě projevu rozptylu toxického oblaku, se limitní koncentrace vztahují k sirovodíku H₂S. Pro hodnocení následků byla zvolena hodnota ERPG 3 sulfanu, která odpovídá 100 ppm rozptýleného sulfanu. ERPG 3 je maximální koncentrace sulfanu ve vzduchu, které mohou být jedinci vystaveni po dobu až 1 hodiny, aniž by u nich došlo k život ohrožujícím zdravotním následkům. [24]

Jak bylo již vysvětleno v kapitole 1.1.1 Popis výroby bioplynu a jeho využití, bioplyn je zahříván na vyšší teplotu teplem přiváděným z kogenerační jednotky. Pro modelování dosahu limitních koncentrací bioplynu je důležitá také teplota uniklého oblaku, která je pro účely této práce rovna 42 °C (315 K). Konzervativní hodnota hustoty bioplynu byla stanovena na 1,3 kg/m³.

Při stanovení vzdálenosti, ve které oblak dosáhne stanovení limitní koncentrace, záleží také na stabilitě počasí především na rychlosti větru. Rozlišuje se šest stabilitních tříd počasí od A až po F, které kombinují vliv rychlosti větru dopadajícího slunečního záření a oblačnosti. Stabilitní třída, při které dochází k nejpomalejšímu rozptylu oblaku je ve dne D a v noci F, jsou to tedy ty nejhorší možné podmínky počasí pro modelování následků při rozptylu oblaku plynu.[24]

Výše vypsané parametry a podmínky rozptylu oblaku bioplynu je zapotřebí brát v potaz při oceňování následků. Pro modelování puff oblaku byl zvolen postup pomocí návodů CCPS z [24]. Výsledné ocenění následků jednotlivých scénářů je následující:

1. S1 scénář rozvíjející iniciační událost IE1, při které dojde při běžném provozu bioplynové stanice k uvolnění 2500 m³ bioplynu který je po rozptýlení oblaku do zabydlené oblasti iniciován a tím vytvořen flash fire. Na základě modelování rozptylu oblaku bioplynu a určení vzdálenosti, do které dosáhne dolní mez hořlavosti (70 000 ppm), může tento scénář nastat pouze v případě, že stabilita počasí odpovídá třídě E. Výsledné hodnoty výpočtu dosahu dolní meze hořlavosti zobrazuje *Tabulka 11*.

Tabulka 11: Dosah dolní meze hořlavosti oblaku bioplynu pro scénář S1.

Výsledky:							
	***** Stabilitní třídy počasí *****						
	A	B	C	D	E	F	
Přibližná rychlost větru:	0,1	0,1	2	3	2	2	2 m/s
Koeficienty rozptylu:							
Sigma y:	64,74	50,35	35,97	21,58	14,39	7,19	m
Sigma z:	72,74	56,54	31,91	13,21	6,39	2,48	m
Koncentrace po větru:	0,00134656	0,002853918	0,009724908	0,05711049	0,156745835	0,0327154	kg/m ³
	1346,56	2853,92	9724,91	57110,49	156745,84	32715,45	mg/m ³
PPM:	1413,63	2996,07	10209,29	59955,05	164553,05	34344,94	PPM
Čas dosažení koncentrace:	6000	6000	300	200	300	300	s

2. S2 scénář předpokládá uskutečnění iniciační události IE2, při které se uvolní přibližně 1000 m³ bioplynu během režimu údržby na bioplynové stanici. Následně je oblak iniciován a projevem bude stejně jako u S1 flash fire oblaku bioplynu v zabydlené oblasti. *Tabulka 12* dokládá, že scénář nemůže nastat, protože při žádné stabilitní třídě počasí nedosáhne ani na okamžik dolní meze hořlavosti (70 000 ppm) k obydlené oblasti.

Tabulka 12 Rozptyl oblaku bioplynu pro scénář S2, kdy nedojde k dosahu dolní meze hořlavosti v obydlené oblasti.

	***** Stabilitní třídy počasí *****					
	A	B	C	D	E	F
Přibližná rychlost větru:	0,1	0,1	2	3	2	2 m/s
Koeficienty rozptylu:						
Sigma y:	64,74	50,35	35,97	21,58	14,39	7,19 m
Sigma z:	72,74	56,54	31,91	13,21	6,39	2,48 m
Koncentrace po větru:	0,00053863	0,001141567	0,003889963	0,0228442	0,062698334	0,0130862 kg/m ³
	538,63	1141,57	3889,96	22844,20	62698,33	13086,18 mg/m ³
PPM:	565,45	1198,43	4083,71	23982,02	65821,22	13737,98 PPM
Čas dosažení koncentrace:	6000	6000	300	200	300	300 s

3. Při scénáři S3 dojde k uskutečnění iniciační události IE1, při které unikne během běžného provozu bioplynové stanice 2500 m³ bioplynu z plynojemu. Nedojde k následné iniciaci oblaku bioplynu a plyn se rozptýlí do zabydlené oblasti, kde působí svou toxicitou. Jak dokládá *Tabulka 13*, limitní koncentrace sulfanu ERPG 3 (100 ppm) dosáhne obydlené oblasti při každé stabilitní třídě počasí kromě tříd A, B.

Tabulka 13: Dosah limitní koncentrace ERPG 3 sulfanu pro scénář S3.

	***** Stabilitní třídy počasí *****					
	A	B	C	D	E	F
Přibližná rychlost větru:	0,1	0,1	2	3	2	2 m/s
Koeficienty rozptylu:						
Sigma y:	64,74	50,35	35,97	21,58	14,39	7,19 m
Sigma z:	72,74	56,54	31,91	13,21	6,39	2,48 m
Koncentrace po větru:	0,0013466	0,0028539	0,009724908	0,0571105	0,156745835	0,032715 kg/m ³
	1346,56	2853,92	9724,91	57110,49	156745,84	32715,45 mg/m ³
PPM:	1413,63	2996,07	10209,29	59955,05	164553,05	34344,94 PPM
Čas dosažení koncentrace:	6000	6000	300	200	300	300 s
PPM sulfanu:	28,272673	59,921324	204,1857415	1199,1011	3291,060955	686,8988

4. Scénář S4 předpokládá uskutečnění iniciační události IE2, při které dojde během údržby či provozu k úniku 1000 m³ bioplynu a k následnému rozptylu oblaku s toxickým působením v obydlené oblasti. Tento scénář může nastat pouze při stabilitních třídách počasí D, E, F, během kterých dosáhne limitní koncentrace sulfanu ERPG 3 (100 ppm) k vesnické zástavbě.

Tabulka 14: Dosah limitní koncentrace sulfanu ERPG 3 pro scénář S4.

Výsledky:	***** Stabilitní třídy počasí *****					
	A	B	C	D	E	F
Přibližná rychlost větru:	0,1	0,1	2	3	2	2 m/s
Koeficienty rozptylu:						
Sigma y:	64,74	50,35	35,97	21,58	14,39	7,19 m
Sigma z:	72,74	56,54	31,91	13,21	6,39	2,48 m
Koncentrace po větru:	0,0005386	0,0011416	0,003889963	0,0228442	0,062698334	0,013086 kg/m ³
PPM:	538,63	1141,57	3889,96	22844,20	62698,33	13086,18 mg/m ³
Čas dosažení koncentrace:	6000	6000	300	200	300	300 s
PPM sulfanu:	11,309069	23,96853	81,67429662	479,64042	1316,424382	274,7595

2.3.5 Stanovení přijatelnosti rizika pomocí formuláře LOPA

Pro každý ze čtyř výše popsaných scénářů je vyplněn formulář LOPA, kde se zapisuje četnost iniciační události, hodnota umožňující podmínky nebo události (takzvaná enabling condition), a podmiňující modifikátory jakými jsou například pravděpodobnost vznícení a pravděpodobnost výskytu osob v dané oblasti. Dále se do formuláře LOPA zapisují pravděpodobnosti nezávislých ochranných vrstev (IPL) a další bezpečnostní opatření. Výstupem formuláře je vypočtení frekvence zmírněných následků a z toho stanovení přijatelnosti rizika daného scénáře, případně pokud riziko nesplňuje kritérium přípustnosti, tak se do formuláře zapisují doporučení a úkony pro dosažení přijatelnosti rizika.

1. Vyplnění formuláře LOPA pro scénář S1: frekvence iniciační události IE1 je stanovena přibližně na $1 \cdot 10^{-2}$ na základě výsledné četnosti vrcholové události ve stromu poruch viz *Obrázek 14*. Hodnota je upravena s přihlédnutím k běžnému režimu provozu bioplynové stanice. Vzhledem k uplatnění scénáře pouze v případě stabilitní třídy počasí E, je doplněna umožňující podmínka s hodnotou 0,1. Doplnující úvaha nad touto hodnotou je uvedena v kapitole 2.6 Diskuze. Pravděpodobnost opožděné iniciace v momentě, kdy oblak bioplynu splňuje podmínky meze hořlavosti, je opět odhadnuta na hodnotu 0,1. Odhad se opírá o návody z [36]. Výsledná hodnota frekvence zmírněných následků splňuje hranici přijatelnosti na základě hodnocení rizika podle matice rizika *Obrázek 8*. Formulář LOPA pro scénář S1 zobrazuje níže *Obrázek 16*.

Číslo scénáře: 1	Číslo zařízení:	Název scénáře: S1	
Datum:	Popis: Flashfire 2500 m ³ bioplynu v 600 m vzdáleném vesnickém osídlení.	Pravděpodobnost	Frekvence (za rok)
Popis následků / Kategorie	Dle uvedené matice rizika odpovídají následky kategorií V. Jedno nebo více vážných zranění obyvatel v okolí.		
Kritéria přípustnosti rizika (kategorie nebo frekvence)	Kategorie V v uvedené matici rizika (velmi vysoké).		1 * 10 ⁻⁴
Iniciační událost (obvykle frekvence)	IE1: únik 2500 m ³ bioplynu (odpovídá cca 3250 kg bioplynu).		1 * 10 ⁻²
Umožňující událost nebo podmínka	Uplatnění scénáře pouze při stabilní třídě počasí E.	0,1	
Podmínující modifikátory (pokud se uplatňují)			
	Pravděpodobnost vznícení	0,1	
	Pravděpodobnost osob v postižené oblasti		
	Pravděpodobnost smrtelných zranění		
Jiné			
Frekvence nezmírněných následků			1 * 10 ⁻⁴
Nezávislé vrstvy ochrany (IPLs)			
Bezpečnostní opatření (jiná než IPLs)			
Celková PFD pro všechny IPLs			
Frekvence zmírněných následků			1 * 10 ⁻⁴
Kritéria přípustnosti rizika splněna? (Ano / Ne): ANO			

Obrázek 16: Vyplněný formulář LOPA pro scénář S1.

- Pro scénář S2 není formulář LOPA vyplněn. Na základě ocenění následků z kapitoly 2.3.4 je při splnění předpokladů (IE2 iniciační událost, při které dojde k úniku 1000 m³ bioplynu při údržbě) scénář vyloučen.
- Vyplnění LOPA formuláře pro scénář S3: frekvence iniciační události IE1 stejně jako u scénáře S1 je stanovena přibližně na $1 \cdot 10^{-2}$. Tato hodnota vychází z kvantifikace stromu poruch viz *Obrázek 14* s přihlédnutím k běžnému režimu provozu bioplynové stanice. Při tomto scénáři dojde k šíření oblaku do obydlené oblasti, kde dojde k následkům z důvodu výskytu toxického sulfanu H₂S v bioplynu. Jeho množství bylo pro ocenění následků stanoveno konzervativně na 2 %.

Výskyt 2 % sulfanu v bioplynu je možné při dlouhodobém selhání měření a kontrolování množství sulfanu v produkovaném bioplynu. Každá bioplynová stanice má vlastní zavedený způsob odsíření (viz kapitola 1.1.1 Popis výroby bioplynu a jeho využití) jeho selhání a následné nezjištění této poruchy a dovolení nárůstu obsahu H₂S v bioplynu vede k ustanovení umožňující podmínky pro uskutečnění scénáře S3 na hodnotu 0,01. Výsledná hodnota frekvence zmírněných následků splňuje hranici přijatelnosti na základě hodnocení rizika podle matice rizika *Obrázek 8*. Níže uvedený *Obrázek 17* zobrazuje formulář LOPA pro scénář S3.

Číslo scénáře: 3	Číslo zařízení:	Název scénáře: S3	
Datum:	Popis: Toxické působení sulfanu (2 %) v uvolněných 2500 m ³ bioplynu v 600 m vzdáleném vesnickém osídlení.	Pravděpodobnost	Frekvence (za rok)
Popis následků / Kategorie	Dle uvedené matice rizika odpovídají následky kategorii V. Jedno nebo více vážných zranění obyvatel v okolí.		
Kritéria přípustnosti rizika (kategorie nebo frekvence)	Kategorie V v uvedené matici rizika (velmi vysoké).		1 * 10 ⁻⁴
Iničiační událost (obvykle frekvence)	IE1: únik 2500 m ³ bioplynu (odpovídá cca 3250 kg bioplynu).		1 * 10 ⁻²
Umožňující událost nebo podmínka	Dlouhodobé selhání péče o obsah sulfanu v bioplynu (2 % sulfanu).	0,01	
Podmiňující modifikátory (pokud se uplatňují)			
	Pravděpodobnost vznícení		
	Pravděpodobnost osob v postižené oblasti		
	Pravděpodobnost smrtelných zranění		
Jiné			
Frekvence nezmírněných následků			1 * 10 ⁻⁴
Nezávislé vrstvy ochrany (IPLs)			
Bezpečnostní opatření (jiná než IPLs)			
Celková PFD pro všechny IPLs			
Frekvence zmírněných následků			1 * 10 ⁻⁴
Kritéria přípustnosti rizika splněna? (Ano / Ne): ANO			

Obrázek 17: Vyplněný formulář LOPA pro scénář S3.

4. Vyplnění LOPA formuláře k scénáři S4: frekvence iniciační události IE2, při které dojde k úniku přibližně 1000 m³ bioplynu (místo původních 2500 m³) během údržby nebo čištění je odhadnuta na $1 \cdot 10^{-1}$. Oproti frekvenci iniciační události IE1 je tato hodnota IE2 zvýšená. Je pravděpodobnější, že během režimu, kdy dochází k údržbě a opravám na fermentoru a manipuluje se s plynojemem, dojde k nehodě a uvolnění oblaku bioplynu. Tato hodnota byla odhadnuta na základě přechozích zkušeností z uskutečněných nehod (kapitola 1.2 Nehody na bioplynových stanicích). Umožňující podmínka je stejná jako u předchozího scénáře S3, pro obsah 2 % sulfanu H₂S v bioplynu je nutné dlouhodobé zanedbání odsíření a kontroly množství sulfanu ve vyrobeném bioplynu, hodnota umožňující podmínky je opět stanovena přibližně na 0,01. Další umožňující podmínka vychází z faktu, že na rozdíl od předchozího S3 scénáře dojde k uvolnění menšího objemu bioplynu (pouze 1000 m³), z toho vyplývá, že výsledný rozptýlený oblak bude mít menší rozměry než v případě scénáře S3. Dalším faktorem je, že u menšího rozptýleného oblaku bioplynu je menší pravděpodobnost, že při směru větru směrem k vesnické výstavbě toto obydlené území skutečně zasáhne, než dojde k jeho naředění na bezpečné koncentrace. Druhá umožňující podmínka je na základě těchto skutečností odhadnuta na 0,1. Výsledná hodnota frekvence zmírněných následků splňuje hranici přijatelnosti na základě hodnocení rizika podle matice rizika
- Obrázek 8. Obrázek 18 níže zobrazuje vyplněný formulář LOPA pro scénář S4.*

Číslo scénáře: 4	Číslo zařízení:	Název scénáře: S4	
Datum:	Popis: Toxické působení sulfanu (2 %) v uvolněných 1000 m ³ bioplynu v 600 m vzdáleném vesnickém osídlení.	Pravděpodobnost	Frekvence (za rok)
Popis následků / Kategorie	Dle uvedené matice rizika odpovídají následky kategorií V. Jedno nebo více vážných zranění obyvatel v okolí.		
Kritéria přípustnosti rizika (kategorie nebo frekvence)	Kategorie V v uvedené matici rizika (velmi vysoké).		1 * 10 ⁻⁴
Iniciační událost (obvykle frekvence)	IE2: únik 1000 m ³ bioplynu (odpovídá cca 1300 kg bioplynu).		1 * 10 ⁻¹
Umožňující událost nebo podmínka	Dlouhodobé selhání péče o obsah sulfanu v bioplynu (2 % sulfanu).	0,01	
Podmiňující modifikátory (pokud se uplatňují)	Pravděpodobnost vznícení		
	Pravděpodobnost osob v postižené oblasti		
	Pravděpodobnost smrtelných zranění		
	Jiné: Pravděpodobnost zásahu osob rozptýleným toxickým oblakem.	0,1	
Frekvence nezmírněných následků			1 * 10 ⁻⁴
Nezávislé vrstvy ochrany (IPLs)			
Bezpečnostní opatření (jiná než IPLs)			
Celková PFD pro všechny IPLs			
Frekvence zmírněných následků			1 * 10 ⁻⁴
Kritéria přípustnosti rizika splněna? (Ano / Ne): ANO			

Obrázek 18: Vyplněný formulář LOPA pro scénář S4.

2.3.6 Rozhodnutí o přijatelnosti rizika pro obyvatele v okolí bioplynové stanice

Z ocenění následků těchto čtyřech scénářů (kapitola 2.3.4) lze scénář S2 kompletně vyloučit z úvahy, protože při rozptylu 2500 m³ bioplynu nebude ve vzdálenosti 600 metrů, kde se nachází nejbližší výstavba, dosaženo dolní meze hořlavosti. Nemůže v tomto případě dojít k zahorení.

Na základě vyplnění formulářů LOPA pro zbylé tři scénáře, lze ohodnotit riziko pomocí matice rizika (kterou zobrazuje *Obrázek 8*), na hranici přijatelnosti pro kategorii následků V (velmi vysoké). Riziko, které představuje bioplynová stanice pro obyvatele v okolí je přijatelné za podmínek, že bioplynová stanice je od nejbližší vesnické zástavby vzdálená 600 metrů. Dalším doporučením pro přijatelnost rizika stanice pro okolní obyvatele je zavedení spolehlivého procesu odsíření a pravidelně měření a kontrolování obsahu sulfanu ve vyprodukovaném bioplynu (hodnota sulfanu nedosahuje 2 %). Další podmínkou je, že během procesu údržby nebo čištění nebo opravy fermentoru, dochází k podstatnému snížení obsahu bioplynu v plynojemu. Vhodné je také eliminovat možné zdroje iniciace, fléra se umísťuje 15 metrů od objektů bioplynové stanice [33] a zároveň je nutná ochrana před úderem blesku pomocí např. aktivního bleskosvodu.

2.4 Riziko bioplynové stanice z hlediska provozovatele

Druhá část praktické části této práce se zabývá bezpečností z pohledu majitele či provozovatele bioplynové stanice. Tento pohled souvisí s ekonomikou samotného provozu, jak co nejvíce navýšit výdělek, a přitom omezit výdaje. Výdělky provozu se klasická analýza rizika nezabývá a nezabývá se jím ani tato práce (zabývala by se jím přidružená analýza spolehlivosti). Ovšem druhý důležitý aspekt pro fungující ekonomiku provozu je omezení výdajů a finančních ztrát. S čím analýza rizika může pomoci je snaha eliminovat výdaje při náhradě škod, při kterých došlo během nehody na bioplynové stanici. Druhou výzkumnou otázkou, kterou se zabývá tato část práce je:

„Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z pohledu provozovatele či majitele stanice?“

V kapitole 2.4.6 Rozhodnutí o přijatelnosti rizika pro majitele bioplynové stanice jsou uvedeny výsledky analýzy a stanovení odpovědi na tuto výzkumnou otázku.

2.4.1 Zdroje rizika významné pro provozovatele

Zdrojem rizika významným pro provozovatele či majitele bioplynové stanice stejně jako pro okolní obyvatelstvo je samotný bioplyn. Bioplyn je zdrojem rizika i pro provozovatele ze stejných dvou důvodů: kvůli obsahu metanu a sulfanu. I když metan i v tomto případě sehraje stejnou roli ve zdroji rizika kvůli své hořlavosti, v případě sulfanu tomu tak není. Kromě jeho toxických vlastností, kterého ohrožují zejména okolní obyvatelé nebo samotné pracovníky v provozu, má ještě jednu nežádoucí vlastnost – s vodní parou tvoří kyselinu sírovou, která má korozivní a žíravé účinky na zařízení bioplynové stanice. Pokud je sirovodík přítomen v bioplynu během konečného spalování, vzniká z něj oxid siřičitý, následně oxid sírový, který reaguje s vodní parou za vzniku kyseliny sírové. Kyselina poté narušuje svými žíravými a korozivními účinky materiály kogenerační jednotky a prostředí spalínového traktu.

Metan přítomný v bioplynu tvoří při smíchání se vzduchem (kyslíkem) výbušnou směs. Pokud dojde k vytvoření výbušné směsi v uzavřeném prostoru a pokud tato směs bude následně iniciována, může dojít k vysokým finančním škodám na zařízení, které bude výbuchem zničeno nebo poškozeno.

Tyto dvě nežádoucí vlastnosti bioplynu dále rozvíjí vybrané scénáře nehod v následující kapitole.

2.4.2 Vybrané scénáře nehod působící závažné finanční škody

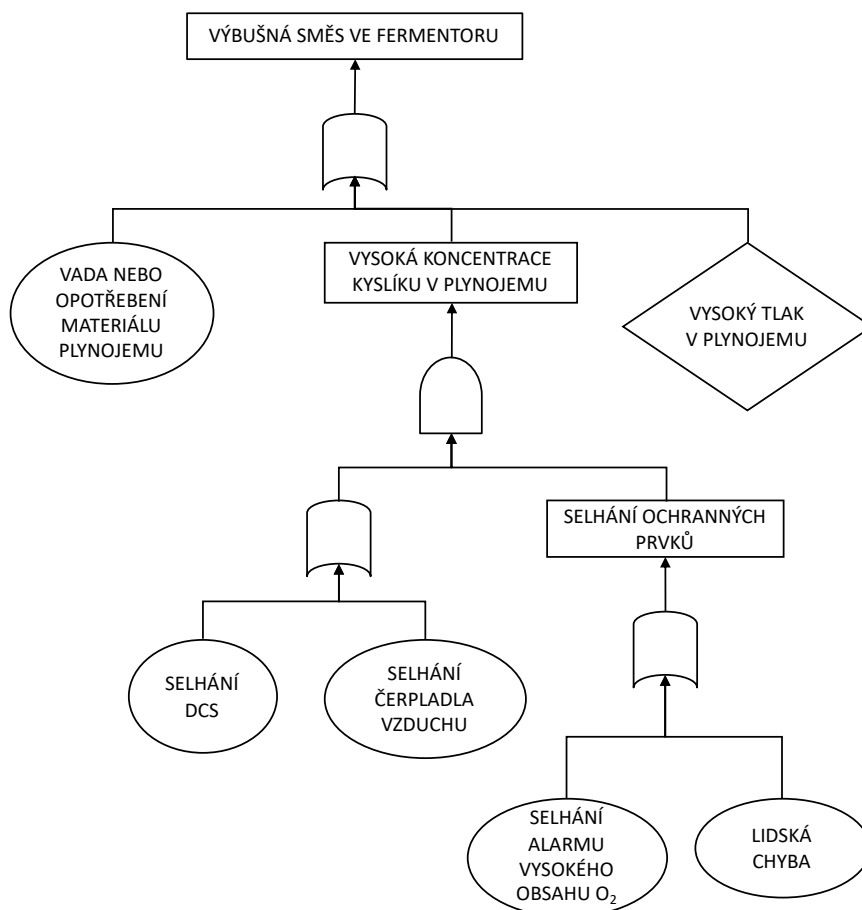
Pro rozhodnutí o přijatelnosti rizika bioplynové stanice pro provozovatele stanice byly vybrány tři scénáře, které způsobí nejvyšší škody na zařízení. Vybrané nejhorší scénáře z ekonomického hlediska jsou vypsány níže.

1. Scénář S5, při kterém dojde k vytvoření výbušné směsi uvnitř fermentoru. Scénář rozvíjí iniciační událost IE3. Do prostoru fermentoru spojeného s plynojemem se dostane vyšší koncentrace kyslíku, která s metanem tvoří výbušnou směs. Následně dojde k iniciaci směsi a výbuchu plynu uvnitř reaktoru. Vzhledem k betonové konstrukci fermentoru se předpokládá roztržení membrán tvořící zásobník plynu a vedení výbuchu směrem vzhůru. Výbuch tak poškodí přilehlé zařízení, jakým je čerpadlo vzduchu do prostoru mezi membránami plynojemu s přilehlými měřidly tlaku, odhození třicestného ventilu na měření tlaku bioplynu v plynojemu a zničení čerpadla kyslíku do prostředí plynojemu společně s měřidly koncentrace kyslíku uvnitř a alarmem. Limitní nízké množství kyslíku je účelně čerpáno do plynojemu v rámci metody odsíření (kapitola 1.1.1 Popis výroby bioplynu a jeho využití).
2. Scénář S6 rozvíjí iniciační událost IE4, při které dojde k nárůstu obsahu sulfanu H_2S uvnitř plynojemu. Sulfan poté reaguje s vodní parou v bioplynu a vzniká z něj kyselina sírová, která má korozivní účinky na kovy, ze kterých se skládá zařízení a potrubí vedoucí bioplyn dále k úpravě a zpracování. Scénář předpokládá znehodnocení potrubí vedoucí bioplyn do kondenzační šachty a poškozená zařízení na něm, především měřič průtoku a ruční uzávěr bioplynu na potrubí.
3. Scénář S7 rozvíjí iniciační událost IE5, během které dojde k vytvoření výbušné směsi uvnitř lapače kondenzátu. Zbytkový bioplyn se smíchá s kyslíkem obsaženým ve vzduchu, a výbušná směs je následně iniciována. Podobně jako u S5 scénáře dojde k výbuchu plynu, který poškodí uvnitř čerpadlo vody, měřiče hladiny vody a potrubí vedoucí bioplyn z fermentoru do šachty a z kondenzační šachty do chladiče.

2.4.3 Iniciační události způsobující vybrané scénáře

Každý ze tří výše popsaných scénářů vybraných pro analýzu rizika bioplynové stanice z pohledu majitele stanice rozvíjí iniciační událost popsanou dále. V rámci této části analýzy rizika byly vybrány tři iniciační události, na které dále navazují scénáře nehody. Iniciační události jsou popsány následovně:

1. IE3 iniciační událost, při které dojde k vytvoření výbušné atmosféry ve fermentoru, na kterém je integrovaný zásobník bioplynu. Výbušná směs uvnitř reaktoru vznikne na základě událostí, které vedou k navýšení obsahu vzduchu (kyslíku) uvnitř plynojemu. Strom poruch, který vede k vrcholové události vytvoření výbušné směsi ve fermentoru, popisuje *Obrázek 19*. Kvantifikací stromu poruch byla stanovena hodnota vrcholové události na $9 \cdot 10^{-3}$. Hodnoty pravděpodobností a četností základních událostí vedoucí k získání četnosti vrcholové události, byla převzaty z [2] a tyto hodnoty zobrazuje *Tabulka 15*.
2. IE4 je iniciační událost, během které dojde k nárůstu obsahu sulfanu H_2S ve fermentoru spojeným s plynojmem z důvodu poruch metod odsíření na základě tzv. mikroaerace. *Obrázek 20* popisuje strom poruch vedoucí k vrcholové události nárůstu obsahu sulfanu v plynojmu. Kvantifikací tohoto stromu poruch byla získána četnost vrcholové události, které je odhadnuta na $5 \cdot 10^{-2}$. *Tabulka 16* popisuje výčet základních událostí a jejich četností, které vedou k odhadu frekvence vrcholové události (vysoká koncentrace sulfanu v plynojmu). Tyto hodnoty základních události byly převzaty z [2].
3. IE5 iniciační událost vede k vytvoření výbušné atmosféry uvnitř šachty na kondenzát. Metan obsažený v bioplynu se zde na základě několika událostí a poruch smíchá se vzduchem a vytvoří tak výbušnou směs. Strom poruch vedoucí k této vrcholové události byl již v této práci uveden v kapitole 1.6 Příklady analýzy rizika z literatury *Obrázek 12*. Kvantifikací souvisejícího stromu poruch lze stanovit odhad vrcholové události na $7 \cdot 10^{-2}$. Hodnota četnosti vrcholové události byla převzatá z [2].

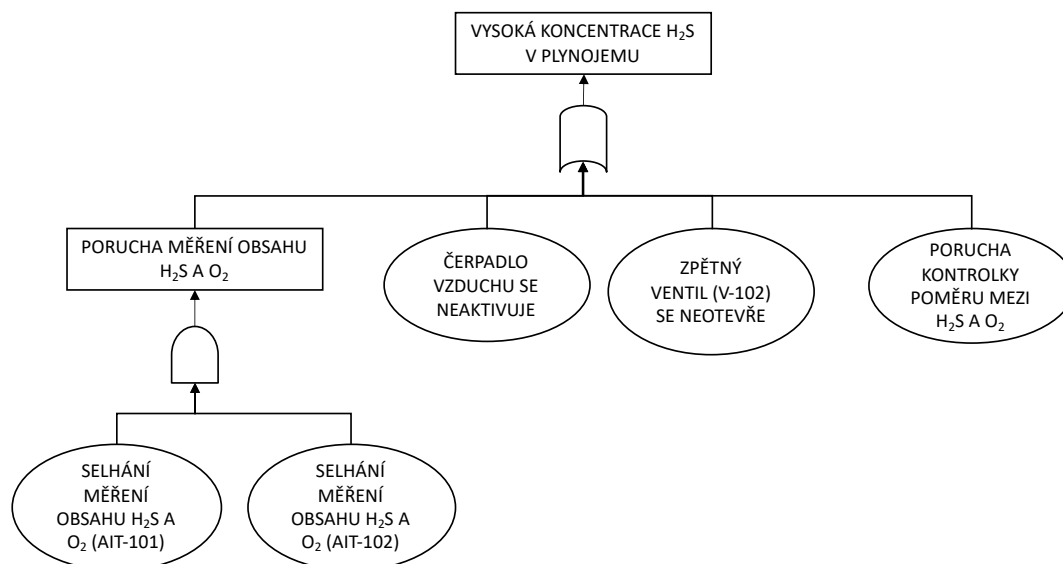


Obrázek 19: Strom poruch s vrcholovou událostí vytvoření výbušné směsi ve fermentoru. Upraveno podle [2].

Tabulka 15: Výběr základních událostí, které mohou vést k vytvoření výbušné směsi ve fermentoru. Upraveno podle [2].

Základní událost	Četnost	Pravděpodobnost
Vada nebo opotřebení materiálu	$8 \cdot 10^{-6}$	
Lidská chyba		$1 \cdot 10^{-3}$
Selhání alarmu vysokého obsahu O_2		0,02
Selhání čerpadla vzduchu	0,37	
Selhání DCS	$4 \cdot 10^{-3}$	
Vysoký tlak v plynojemu	$9 \cdot 10^{-3}$	

Frekvence vrcholové události, při které dojde k vytvoření výbušné atmosféry ve fermentoru potažmo plynojemu, je stanovena přibližně na $2 \cdot 10^{-2}$.



Obrázek 20: Strom poruch pro událost vysoké koncentrace sulfanu v plynojemu. Vytvořeno na základě [2].

Tabulka 16: Výběr základních událostí, které mohou vést k vyšší koncentraci sulfanu v plynojemu. Vytvořeno podle [2]

Základní událost	Četnost	Pravděpodobnost
Selhání měření obsahu H ₂ S a O ₂ (AIT-101, AIT-102)	0,04	0,02
Čerpadlo vzduchu se neaktivuje	0,37	
Zpětný ventil (V-102) se neotevře	$1 \cdot 10^{-2}$	
Porucha kontrolky poměru obsahu mezi H ₂ S a O ₂	$8 \cdot 10^{-2}$	

Frekvence vrcholové události, při které dojde k navýšení obsahu sulfanu H₂S nad optimální normu, je odhadnuta přibližně na $5 \cdot 10^{-2}$.

2.4.4 Ocenění následků vybraných scénářů

Následky výše popsanych třech scénářů jsou v tomto případě oceněny odhadem a zaříděny do kategorií závažnosti následků. Výčet jednotlivých kategorií závažnosti následků v této matici zobrazuje *Tabulka 7*. Pro všechny tři scénáře lze odhadnout výši finančních škod přesahující 1 000 000 Kč, což odpovídá kategorii IV (vysoké). Pro splnění přijatelnosti rizika je za potřebí dosáhnout frekvence zmírněných následků menší nebo rovnající se $1 \cdot 10^{-3}$.

2.4.5 Stanovení přijatelnosti rizika pomocí formuláře LOPA

Přijatelnosti rizika bioplynové stanice z hlediska majitele nebo provozovatele se i v tomto případě dá stanovit pomocí LOPA formulářů. Pro každý scénář se vyplní četnost iniciační události, umožňující podmínky nebo události a podmiňující modifikátory (v tomto případě například pravděpodobnost vznícení). Dále se do formuláře LOPA zapisují pravděpodobnosti a frekvence nezávislých ochranných vrstev (IPL). Výstupem formuláře je stanovení frekvence zmírněných následků a z toho stanovení přijatelnosti rizika daného scénáře.

1. Vyplnění LOPA formuláře pro scénář S5: hodnota iniciační události IE3 vytvoření výbušné atmosféry byla vyplněna na základě vrcholové události ve stromu poruch (který zobrazuje *Obrázek 19*) na $2 \cdot 10^{-2}$. Podmiňujícím modifikátorem je v tomto případě pravděpodobnost iniciace výbušné směsi, jejíž hodnota byla odhadnuta na 0,3. Odhad se opírá o návody z [36]. Nezávislou ochrannou vrstvou je v tomto scénáři zásah pracovníka, která zareaguje na alarm, který hlásí zvýšenou koncentraci kyslíku v plynojemu. Pravděpodobnost manuálního zásahu pracovníka je stanovena na 0,1. Odhad pravděpodobnosti se opírá o hodnoty uvedené v [37]. Výsledná frekvence zmírněných následků je na základě výše popsaných podmínek odhadnuta na $6 \cdot 10^{-4}$. Tato četnost splňuje hranici přijatelnosti rizika na základě hodnocení rizika podle matice, kterou zobrazuje *Obrázek 8*. *Obrázek 21* níže zobrazuje vyplněný formulář LOPA pro scénář S5.
2. Vyplnění formuláře LOPA pro scénář S6: frekvence iniciační události IE4, při které dojde ke zvýšení obsahu sulfanu H_2S v bioplynu, byla stanovena na základě stromu poruch (*Obrázek 20*) na $5 \cdot 10^{-2}$. Umožňující podmínkou pro uskutečnění scénáře S5, při kterém dojde ke korozi potrubí vedoucí bioplyn a měřiče průtoku a ručního uzávěru na něm, je dlouhodobé působení zvýšeného obsahu sulfanu v bioplynu. Hodnota této podmínky je odhadnuta na 0,1. Pro dlouhodobě zvýšený obsah sulfanu je nutná zanedbaná péče o odsíření. Nezávislou ochrannou vrstvou v tomto scénáři je druhotné měření koncentrace sulfanu (a dalších složek bioplynu) před samotným spalováním v kogenerační jednotce. Pravděpodobnost této vrstvy byla stanovena na základě četností selhání měřiče sulfanu v plynojemu (hodnota převzatá z [2]) a přepočtu na základě vztahu pro stanovení pohotovosti měřících přístrojů uvedeného v kapitole 2.3.3. Výsledná frekvence zmírněných následků scénáře S6 byla stanovena na $5 \cdot 10^{-4}$.

Tato frekvence splňuje přijatelnost rizika na základě hodnocení podle matice, kterou zobrazuje *Obrázek 8*. Vyplněný LOPA formulář pro scénář S6 zobrazuje *Obrázek 22*.

3. LOPA formulář pro scénář S7: scénář rozvíjí iniciační událost IE5 (vytvoření výbušné atmosféry uvnitř kondenzační šachty), jejíž četnost byla stanovena na hodnotu $7 \cdot 10^{-2}$. Tato hodnota byla převzata na základě kvantifikace stromu poruch (ten uvádí *Obrázek 12*) s převzatými četnostmi a pravděpodobnostmi základních událostí z [2]. Pravděpodobnost iniciace výbušné směsi v lapači kondenzátu v případě scénáře S7 je podmiňujícím modifikátorem s hodnotou 0,3 [36]. V tomto scénáři se může uplatnit nezávislá ochranná vrstva, kdy při nízké hladině vody v šachtě (na kterou navazuje zvýšená koncentrace bioplynu) se aktivuje alarm (LAL-301). Na tento alarm reaguje automatický vypínač čerpadla vody (IS-301) nebo na alarm reagují pracovníci manuálním vypnutím čerpadla vody. Hodnota pravděpodobnosti této vrstvy ochrany byla stanovena na základě [2] na 0,01. Výsledná frekvence zmírněných následků scénáře S7 byla stanovena na $2 \cdot 10^{-4}$. Frekvence splňuje přijatelnost rizika na základě hodnocení podle matice rizika, kterou zobrazuje *Obrázek 8*. LOPA formulář pro scénář S7 znázorňuje *Obrázek 23*.

Číslo scénáře: 5	Číslo zařízení:	Název scénáře: S5	
Datum:	Popis: Výbuch směsi bioplynu (metanu) se vzduchem ve fermentoru spojeného s plynojemem.	Pravděpodobnost	Frekvence (za rok)
Popis následků / Kategorie	Dle uvedené matice rizika odpovídají následky kategorii IV. Škody nebo ztráty na produkci nad 1 000 000 Kč.		
Kritéria přípustnosti rizika (kategorie nebo frekvence)	Kategorie IV v uvedené matici rizika (vysoké).		$1 * 10^{-3}$
Iničiační událost (obvykle frekvence)	IE3: vytvoření výbušné atmosféry ve fermentoru.		$2 * 10^{-2}$
Umožňující událost nebo podmínka			
Podmínující modifikátory (pokud se uplatňují)	Pravděpodobnost iniciace	0,3	
	Pravděpodobnost osob v postižené oblasti		
	Pravděpodobnost smrtelných zranění		
	Jiné		
Frekvence nezmírněných následků			$6 * 10^{-3}$
Nezávislé vrstvy ochrany (IPLs)			
	Manuální zásah pracovníků při spuštění alarmu hlásící vysokou koncentraci kyslíku v plynojemem.	0,1	
Bezpečnostní opatření (jiná než IPLs)			
Celková PFD pro všechny IPLs		0,1	
Frekvence zmírněných následků			$6 * 10^{-4}$
Kritéria přípustnosti rizika splněna? (Ano / Ne): ANO			

Obrázek 21: Vyplněný LOPA formulář pro scénář S5.

Číslo scénáře: 6	Číslo zařízení:	Název scénáře: S6	
Datum:	Popis: Vysoký obsah sulfanu v plynojemu způsobí následnou reakci korozi potrubí a měřicích zařízení.	Pravděpodobnost	Frekvence (za rok)
Popis následků / Kategorie	Dle uvedené matice rizika odpovídají následky kategorii IV. Škody nebo ztráty na produkci nad 1 000 000 Kč.		
Kritéria přípustnosti rizika (kategorie nebo frekvence)	Kategorie IV v uvedené matici rizika (vysoké).		$1 * 10^{-3}$
Iničiační událost (obvykle frekvence)	IE4: vysoký obsah sulfanu v bioplynu.		$5 * 10^{-2}$
Umožňující událost nebo podmínka	Dlouhodobé působení zvýšeného obsahu sulfanu.	0,1	
Podmiňující modifikátory (pokud se uplatňují)			
	Pravděpodobnost iniciace		
	Pravděpodobnost osob v postižené oblasti		
	Pravděpodobnost smrtelných zranění		
Jiné			
Frekvence nezmírněných následků			$5 * 10^{-3}$
Nezávislé vrstvy ochrany (IPLs)			
	Přídavný měřič koncentrace sulfanu v bioplynu před spalováním v kogenerační jednotce.	0,1	
Bezpečnostní opatření (jiná než IPLs)			
Celková PFD pro všechny IPLs			
Frekvence zmírněných následků			$5 * 10^{-4}$
Kritéria přípustnosti rizika splněna? (Ano / Ne): ANO			

Obrázek 22: Vyplněný LOPA formulář pro scénář S6.

Číslo scénáře: 7	Číslo zařízení:	Název scénáře: S7	
Datum:	Popis: Výbuch směsi bioplynu se vzduchem v lapači kondenzátu.	Pravděpodobnost	Frekvence (za rok)
Popis následků / Kategorie	Dle uvedené matice rizika odpovídají následky kategorii IV. Škody nebo ztráty na produkci nad 1 000 000 Kč.		
Kritéria přípustnosti rizika (kategorie nebo frekvence)	Kategorie IV v uvedené matici rizika (vysoké).		$1 * 10^{-3}$
Iniciační událost (obvykle frekvence)	IE5: vytvoření výbušné atmosféry uvnitř šachty na kondenzát.		$7 * 10^{-2}$
Umožňující událost nebo podmínka			
Podmínující modifikátory (pokud se uplatňují)			
	Pravděpodobnost iniciace	0,3	
	Pravděpodobnost osob v postižené oblasti		
	Pravděpodobnost smrtelných zranění		
Jiné			
Frekvence nezmírněných následků			$2 * 10^{-2}$
Nezávislé vrstvy ochrany (IPLs)			
	Alarm nízké hladiny vody, který spustí automatický vypínač čerpadla vody, nebo je čerpadlo manuálně vypnuto pracovníky v reakci na alarm.	0,01	
Bezpečnostní opatření (jiná než IPLs)			
Celková PFD pro všechny IPLs		0,01	
Frekvence zmírněných následků			$2 * 10^{-4}$
Kritéria přípustnosti rizika splněna? (Ano / Ne): ANO			

Obrázek 23: Vyplněný LOPA formulář pro scénář S7.

2.4.6 Rozhodnutí o přijatelnosti rizika pro majitele bioplynové stanice

Předchozí část praktické části se zabývala odpovědí na druhou výzkumnou otázku:

„Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z pohledu provozovatele či majitele stanice?“

Z pohledu nejhorších možných nehod, které mohou způsobit největší finanční škody na zařízení bioplynové stanice byly vybrány tři iniciační události, které rozvíjejí tři vybrané scénáře. První scénář rozvíjí iniciační událost IE3, během které dojde k tvorbě výbušné směsi v plynojem integrovaném na fermentoru. Během scénáře S5 dojde k iniciaci a výbuchu uvnitř plynojem, který způsobí škody na membránách tvořící plynojem a přilehlém zařízení.

Během další vybrané iniciační události IE4 dojde z důvodu poruch na odsiřovacím zařízení ke zvýšení obsahu sulfanu H_2S , během scénáře S6 následně dojde při dlouhodobém působení zvýšené koncentrace sulfanu ke korozi potrubí vedoucí bioplyn s přilehlým ventilem a měřičem. Poslední iniciační událost v této části praktické práce IE7 souvisí s vytvořením výbušné atmosféry v lapači kondenzátu a během navazujícího scénáře S7 dojde k iniciaci a výbuchu této směsi s následným poškozením zařízení uvnitř šachty.

Pro všechny tři scénáře byly vyplněny formuláře LOPA, na základě kterých lze získané hodnoty frekvence zmírněných následků scénáře považovat za přijatelné při ohodnocení pomocí matice rizika, kterou znázorňuje *Obrázek 8*. Všechny tři vybrané scénáře svými následky spadají do kategorie V (závažné), protože při konzervativním odhadu způsobí scénáře následky škod přesahující 1 000 000 Kč.

Riziko, které představuje bioplynová stanice pro majitele provozu, je přijatelné za následujících několika podmínek. První podmínkou společnou pro všechny tři scénáře je pravidelná kontrola všech elektronických měřicích a kontrolních zařízení minimálně jednou ročně. Pro neuskutečnění scénáře S5 je podmínkou měření koncentrace kyslíku v plynojemu a alarm, který hlásí vyšší obsah kyslíku, než je žádoucí. Další podmínkou je řešení nárůstu tlaku v plynojemu tak, aby nedošlo k roztržení membrány zásobníku. V případě schématu, který zobrazuje *Příloha 2*, vyšší tlak v plynojemu chrání třicestný ventil s měřením tlaku uvnitř. Při vyšším přetlaku se bioplyn přes nouzovou trasu pře pošle rovnou na spalování do fléry. Ideálním doplňkem této ochrany by byl alarm hlásící pracovníkům vyšší tlak v plynojemu.

Aby nedošlo ke scénáři S6, kdy při dlouhodobé vyšší koncentraci sulfanu koroduje potrubí bioplynu a zařízení na něm, je nutná pečlivá kontrola a měření obsahu sirovodíku v bioplynu. Koncentraci je nutné měřit nejen v samotném plynojemu, ale bioplynová stanice musí disponovat druhým měřením koncentrace sulfanu (a dalších složek bioplynu) před samotným spalováním v kogenerační jednotce.

Podmínkou pro neuskutečnění scénáře S7 je měření hladiny vody v kondenzační šachtě (aby nedošlo k zvýšení obsahu bioplynu) společně s alarmem, který hlásí nízký stav vody. Pracovníci jsou upozorněni na nutné manuální vypnutí čerpadla vody, pokud by nefungovala automatický vypínač čerpadla reagující na alarm, zároveň jsou také varováni před otevřením šachty a namíchání směsi se vzduchem pro vytvoření výbušné směsi.

2.5 Pracovníci bioplynové stanice jako příjemci rizika

Třetí a zároveň poslední částí praktické části je bezpečnost z pohledu pracovníka na bioplynové stanici. Výzkumná otázka, která se váže k této části práce zní:

„Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z hlediska pracovníků a obsluhy stanice?“

Pro nalezení odpovědi na tuto otázku, byl vybrán jediný scénář nehody, který je popsán v následující kapitole. Tento scénář má podporu v záznamech o již uskutečněných nehodách na bioplynových stanicích (např. nehoda v Chříči na Plzeňsku, popsána v kapitole 1.2.2 Vybrané nehody v České republice).

2.5.1 Zdroje rizika významné pro obsluhu bioplynové stanice

V předchozích kapitolách této práce byla hlavní pozornost soustředěna především na dvě složky bioplynu – na metan, kvůli jeho hořlavosti a na sulfan, pro jeho toxicitu. Paradoxně se poslední scénář týká další složky bioplynu, kterou se dosud analýza rizika v této práci nezabývala – jedná se o oxid uhličitý. V bioplynu se oxid uhličitý CO₂ vyskytuje v obsahu až 45 %, jeho nežádoucí vlastností je v tomto případě nedýchateľnost. Oxid uhličitý je těžší než vzduch a v nevětraných prostorách má tendenci se oddělovat od dalších složek směsi a držet se u země či dna. Od koncentrace 5 % způsobuje oxid uhličitý při vdechování bolesti hlavy, zvýšenou dechovou frekvenci a srdeční tep. Při vyšších koncentracích může způsobit bezvědomí i smrt.[34]

2.5.2 Vybrané scénáře nehod ohrožující pracovníky na bioplynové stanici

Z hlediska bezpečnosti pracovníků na bioplynové stanici byl vybrán scénář, který rozvíjí iniciační událost s vysokou četností za rok. Pracovníci s touto iniciační událostí přichází do kontaktu několikrát za rok, proto byl scénář vybrán pro zhodnocení přijatelnosti rizika v rámci této části práce. Zároveň tento scénář je z předchozích nehod již znám. Vybraný scénář je popsán následovně:

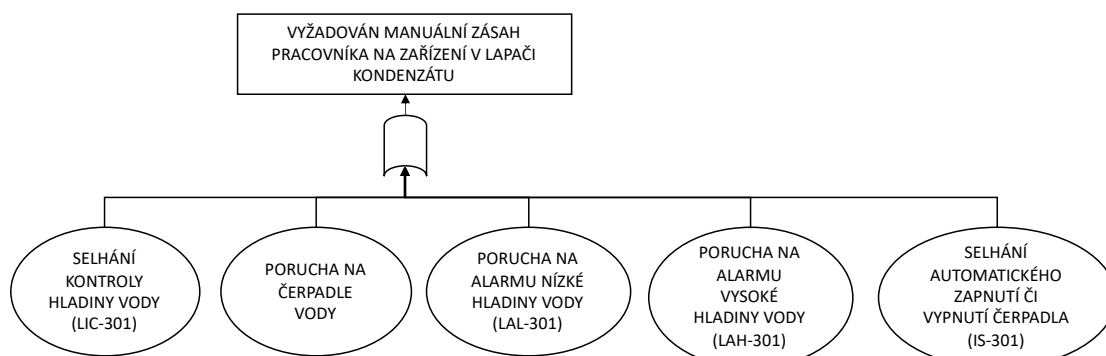
1. Scénář S8 popisuje událost, během které musí pracovník v rámci údržby nebo opravy zařízení vstoupit do kondenzační šachty. V šachtě se nachází kromě jiných plynných složek i zmiňovaný oxid uhličitý. Pracovník sestoupí do šachty bez jištění jiného pracovníka, a není opatřen dýchacím přístrojem ani maskou. Následně se nadýchá oxidu uhličitého, který se drží a koncentruje u dna šachty. Pracovník upadne do bezvědomí a hrozí mu následná smrt.

Podobná událost se odehrála v Chříči na Plzeňsku nebo ve Žďáru nad Sázavou v roce 2011 (více v kapitole 1.2.2 Vybrané nehody v České republice).

2.5.3 Iniciační události způsobující vybrané scénáře

Výše popsany scénář S8 rozvíjí iniciační událost pojmenovanou IE6, během které dojde k poruše na zařízení uvnitř lapače kondenzátu. Iniciační události je popsána následovně:

1. IE6: během iniciační události dojde poruchovému stavu nebo selhání zařízení v šachtě na kondenzát. Na tuto událost reaguje pracovník, který je nucen sestoupit do šachty provést údržbu či opravu. Možností poruch na zařízení je hned několik. Kromě samotného plovoucího čerpadla, které se může porouchat, přichází do úvahy i čidla vysokého či nízkého stavu hladiny uvnitř šachty, dále může dojít k poruše automatického spínače čerpadla při vysokém stavu vody. V závislosti na tolika základních událostech tvořící níže popsany strom poruch (zobrazuje *Obrázek 24*), je frekvence vrcholové události, ze které je odvozena frekvence iniciační události IE6 vysoká. Hodnota na základě četností základních událostí, které popisuje *Tabulka 17*, odpovídá četnosti iniciační události 1 za rok. Hodnoty základních událostí pro výpočet četnosti vrcholové události byly převzaty z [2]. Pro každé zařízení zvlášť byly jednotlivé četnosti poruchových stavů sečteny dohromady.



Obrázek 24: Strom poruch s vrcholovou událostí, při které je vyžadován vstup pracovníka do šachty na kondenzát. Vytvořeno na základě [2].

Tabulka 17: Výběr hodnot četností základních událostí, které mohou vést k vyžadování manuálního zásahu pracovníka v šachtě na kondenzát. Vytvořeno na základě [2].

Základní událost	Četnost
Selhání kontroly hladiny vody (LIC-301)	0,02
Porucha na čerpadle vody	0,4
Porucha na alarmu nízké hladiny vody (LAL-301)	0,8
Porucha na alarmu vysoké hladiny vody (LAH-301)	0,4
Selhání automatického zapnutí či vypnutí čerpadla vody (IS-301)	0,1

2.5.4 Ocenění následků vybraných scénářů

Pro hodnocení přijatelnosti rizika daného scénáře je opět použita matice rizika, kterou zobrazuje *Obrázek 8*. Na základě této matice odpovídá kategorie následků vybraného a výše popsaného scénáře kategorii V – velmi vysoké. *Tabulka 7* popisuje jednotlivé kategorie následků dle závažnosti, kategorii V odpovídají následky, při kterých dojde k úmrtí osoby v podniku nebo dojde k vážnému zranění vedoucímu k trvalému poškození. Výsledná četnost zmírněných následků musí být rovna nebo menší než $1 \cdot 10^{-4}$ za rok.

2.5.5 Stanovení přijatelnosti rizika pomocí formuláře LOPA

Pro scénář S8 je vyplněn LOPA formulář, který zobrazuje *Obrázek 25*. Frekvence iniciační události IE6 byla stanovena na základě četnosti vrcholové události stromu poruch (*Obrázek 24*) na 1 za rok. Jednou za rok lze tedy předpokládat, že pracovník bioplynové stanice bude nucen sestoupit do kondenzační šachty. Jako umožňující podmínka je do formuláře uvedena koncentrace oxidu uhličitého CO₂ dosahující 5 % na způsobení závažných následků odpovídající kategorii V v matici rizika. V souladu s článkem [34] předpokládáme, že tak vysoká koncentrace se vyskytuje velmi zřídka, proto se uplatňuje umožňující podmínka s hodnotou 0,01. Jako součást nezávislé ochranné vrstvy se předpokládá instalace měřicího čidla na stanovení obsahu oxidu uhličitého u dna šachty. Při vyšší koncentraci se spustí alarm na varování pracovníka, že do lapače kondenzátu nelze vstoupit bez předchozího vyvětrání šachty. V reakci na alarm má pracovník uskutečnit vyvětrání vzduchu a oxidu uhličitého ze šachty pomocí ventilátoru nebo kompresoru (společně s otevřením poklopu a přirozeným vyvětráním). Pravděpodobnost selhání této ochranné vrstvy byla odhadnuta přibližně na 0,01. Výsledná frekvence zmírněných následků byla ve formuláři vyhodnocena na $1 \cdot 10^{-4}$ za rok.

Tato frekvence je na hranici přijatelnosti rizika scénáře v rámci hodnocení podle matice rizika, kterou uvádí *Obrázek 8*. Následující kapitola 2.5.6 shrnuje podmínky přijatelnosti rizika scénáře S8.

Číslo scénáře: 8	Číslo zařízení:	Název scénáře: S8	
Datum:	Popis: Udušení pracovníka oxidem uhličitým v lapači kondenzátu.	Pravděpodobnost	Frekvence (za rok)
Popis následků / Kategorie	Dle uvedené matice rizika odpovídají následky kategorii V. Úmrtí nebo zranění pracovníka vedoucí k trvalému poškození.		
Kritéria přípustnosti rizika (kategorie nebo frekvence)	Kategorie V v uvedené matici rizika (velmi vysoké).		$1 \cdot 10^{-4}$
Iniciační událost (obvykle frekvence)	IE6: na základě poruchy zařízení v lapači kondenzátu je vyžadován zásah pracovníka v šachtě.		1
Umožňující událost nebo podmínka	Výskyt vysoké koncentrace oxidu uhličitého v lapači kondenzátu.	0,01	
Podmiňující modifikátory (pokud se uplatňují)	Pravděpodobnost iniciace		
	Pravděpodobnost osob v postižené oblasti		
	Pravděpodobnost smrtelných zranění		
	Jiné		
Frekvence nezmírněných následků			$1 \cdot 10^{-2}$
Nezávislé vrstvy ochrany (IPLs)			
	Vyvětrání plynu ze šachty pomocí ventilátoru nebo čerpadla vzduchu.	0,01	
Bezpečnostní opatření (jiná než IPLs)			
Celková PFD pro všechny IPLs		0,01	
Frekvence zmírněných následků			$1 \cdot 10^{-4}$
Kritéria přípustnosti rizika splněna? (Ano / Ne): ANO			

Obrázek 25: Vyplněný LOPA formulář pro scénář S8.

2.5.6 Rozhodnutí o přijatelnosti rizika pro pracovníky na bioplynové stanici

Předchozí podkapitoly se zabývaly nalezením odpovědi na třetí výzkumnou otázku, položenou v rámci praktické části této práce, která zní následovně:

„Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z hlediska pracovníků a obsluhy stanice?“

Na základě výstupu LOPA formuláře (*Obrázek 25*) je důležitou podmínkou pro přijatelnost rizika měření koncentrace oxidu uhličitého v lapači kondenzátu. Pokud je koncentrace oxidu uhličitého vysoká, měřící čidlo alarmem varuje pracovníka před sestoupením do šachty. Dalším postupem pracovníka před sestoupením do lapače je vyvětrání prostoru v šachtě pomocí větráku nebo kompresoru. Na tyto podmínky navazuje nutnost mít zavedenou provozní dokumentaci nařizující tento postup při opravách nebo údržbě v lapači kondenzátu.

Za přísného dodržování těchto uvedených podmínek je riziko pro pracovníka bioplynové přijatelné. Vhodným doporučením je také pravidelná kontrola měřícího zařízení na stanovení obsahu CO₂ nejlépe jednou ročně, stejně jako bylo doporučeno u stanovení přijatelnosti rizika v předchozích dvou výzkumných otázkách.

2.6 Diskuze

Teoretická část této diplomové práce slouží jako základ znalostí a faktů ohledně technologie bioplynových stanic a analýzy nehod, které se na nich odehrály. Také se teoretická část zabývá samotnou teorií analýzy rizika jejími nástroji a jednotlivými kroky, výsledným zhodnocení přijatelnosti nebo závažnosti rizika. Na základech popsaných a vysvětlených v rešeršní či teoretické části byla vypracována praktická část této diplomové práce.

Praktická nebo také experimentální část se zabývá hlavní otázkou: Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné? Tato otázka byla rozdělena na základě třech vrstev bezpečnosti, které lze vnímat na bioplynové stanici, na tři výzkumné otázky, na které byla v praktické části hledána odpověď.

Důležitým nástrojem celé praktické části byla analýza metodou LOPA. Tato práce těžila především z takzvaných LOPA formulářů na základě, kterých společně s pomocí matice rizika lze stanovit přijatelnost rizika vybraných scénářů. Pro vyplnění scénářů bylo zapotřebí využití dalších nástrojů analýzy rizika, především stromů poruch, které byly kvantifikovány a četnosti jejich vrcholových událostí byly využity pro stanovení četností iniciačních událostí.

V části, která se zabývá přijatelností rizika bioplynové stanice z hlediska obyvatel v okolí, bylo důležitou součástí hodnocení také modelování projevů čtyř vybraných scénářů. V tomto případě šlo o modelování rozptylu neutrálně vznášivého okmažitého oblaku. Výpočty a samotné modelování bylo provedeno na základě postupů uvedených v CCPS Guidelines [24]. Při respektování rozsahu daného diplomovou prací, bylo provedeno v této části několik konzervativních zjednodušení, na základě kterých je možné říci, že výsledky této části práce vyšly pouze na hranici přijatelnosti rizika pro obyvatele v okolí. Prvním nadhodnocením byl předpoklad, že rozptýlený oblak bioplynu bude neutrálně vznášivý. Reálně by se ale dalo namítnout, že kvůli obsahu metanu, který je lehčí než vzduch, a který je většinou složkou v bioplynu, se bude oblak spíše pohybovat směrem nahoru. Tím pádem by ohrožení obyvatel v okolí v případě úniku bioplynu nebylo takové, jak se v této práci předpokládá. Dalším nadhodnocením byla doba expozice obyvatel při rozptylu toxického oblaku bioplynu s 2% obsahem sulfanu. Pro hodnocení následků byly použity hodnoty ERPG3 pro sulfan, tato hodnota ale předpokládá hodinovou expozici dané osoby. Rozptýlený oblak bioplynu ale nebude hodinu stagnovat na jednom místě, ale přes jedno určité místo přejde v rámci stovek sekund.

Tato dvě zmíněná konzervativní zjednodušení vyvažuje jiná námitka týkající se vybrané matice rizika. Pokud by byla použita širší matice rizika, která namísto pěti kategorií následků jich používá šest, nemuselo by riziko pro okolní obyvatele splnit hranici přijatelnosti. To potvrzuje, že shoda na kritériích přijatelnosti je velmi důležitým východiskem analýzy rizika.

V diplomové práci šlo především o zjednodušení celé analýzy rizika. Cílem nebyla podrobná a vyčerpávající analýza rizika, ale uvedení názorného příkladu, jak se lze jednoduše analýzou rizika bioplynové stanice zabývat. Ukázalo se, že pro nejrychlejší ohodnocení rizika je vhodná zmiňovaná metoda LOPA. Jak bylo popsáno v kapitole 1.6.2 Komentář k příkladu analýzy rizika z literatury, cílem provozovatele či majitele bioplynové stanice nebude při zajišťování bezpečnosti bioplynové stanice využít složitou a zdlouhavou metodu analýzy rizika. Bude chtít jednoduchou a rychlou metodu pro ohodnocení rizika, které představuje daná bioplynová stanice. Metoda LOPA je pro tento případ vhodná, jak lze doložit na praktické části této práce. Námětem na další zkoumání a odborné práce by mohla být otázka vlivu zmíněné vznášivosti oblaku bioplynu na následky pro okolní obyvatele. Zároveň je podnětnou otázkou také vliv obsahu sulfanu v tomto oblaku. Jaké budou v tomto případě následky, dá se u rozptylu oblaku bioplynu s tímto složením předpokládat stejná vznášivost jako pro jednosložkové homogenní oblaky plynů? Tyto otázky mohou být základem pro další práce.

Při modelování rozptylu oblaku bioplynu ve scénáři S1 až S4 byly využity rozdílné stabilitní třídy počasí od A až po F. Při vyplňování formuláře LOPA pro scénář S1 byla jako umožňující podmínka použita možnost uplatnění scénáře s popsány následky pouze při stabilitní třídě počasí E. Této podmínce byla přidělena hodnota 0,1. Na stránkách Českého hydrometeorologického ústavu lze dohledat větrné růžice imisních stanic pro vybrané kraje či okresy. Na základě těchto naměřených průměrných hodnot byla pro stabilitní počasí třídy E v rámci České republiky vybraná hodnota 0,1 umožňující podmínky do formuláře LOPA. Průměrný výskyt stability počasí E v ČR je do 10 %, na místech, kde je výskyt tohoto počasí vyšší je tento fakt vyvažován řídkou obydleností území v okolí bioplynových stanic.

S přihlédnutím k výše diskutovaným faktům a hodnotám je možno říci, že všechny odhady, které byly využity pro praktickou část, jsou konzervativní. Pro zachování konzervativnosti celé praktické části byly vybrány scénáře s těmi nejhoršími následky.

ZÁVĚR

Diplomová práce s názvem Analýza rizika bioplynové stanice s využitím metody LOPA se zabývá bezpečností bioplynových stanic. Na základě poučení z předchozích nehod na bioplynových stanicích se snaží navrhnout přístup, dle kterého lze provést analýzu rizika na bioplynových provozech.

Teoretická část této práce se zabývá popisem a technologií soudobých bioplynových stanic. Na základě dostupných údajů byly v této části předvedeny příklady nehod, které se za poslední dobu na bioplynových stanicích odehrály. Dále se práce zabývá legislativou prevence závažných havárií a odpovídá na otázku, zda do této legislativy spadají i provozy bioplynových stanicích. Teoretická část této práce se věnuje i popisu analýzy rizika a základních pojmů, jakými jsou iniciační události a scénáře nehod, hodnocení a přijatelnost rizika. V této části byly popsány i základní metody analýzy rizika, mezi které se řadí HAZOP, PreHA, stromy poruch, stromy událostí, kvantitativní analýza a metoda LOPA. Dále byla popsána metoda analýzy rizika, která byla navržena v odborném článku jako metoda vhodná k analýze bioplynových stanic. Tato navržená metoda je okomentována a je navrhnout vhodnější přístup k analýze rizika bioplynových stanic pomocí metody LOPA. Teoretická část je zakončena položením třech výzkumných otázek, na které navazuje praktická část této práce:

1. Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z hlediska obyvatel v jejím okolí?“
2. „Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z pohledu provozovatele či majitele stanice?“
3. „Za jakých podmínek je riziko bioplynové stanice přijatelné z hlediska pracovníků a obsluhy stanice?“

Praktická část má za cíl nalézt odpovědi na tyto tři otázky. Pro každou otázku byly vybrány jeden až čtyři scénáře nehod, které se na bioplynových stanicích mohou odehrát a které způsobí ty nejzávažnější následky. Ke každému scénáři byla přidělena iniciační událost, jejíž vznik byl popsán stromem poruch. V případě první otázky byl pro ocenění následků scénářů využit model rozptylu oblaku. Pro scénáře, které nevyžadovaly modelování následků, byl pro určení kategorie následků využit kvalitativní odhad. Pro konečné hodnocení přijatelnosti rizika na základě vyplněných formulářů LOPA byla využita matice rizika. Výsledkem praktické části jsou podmínky, za jakých je riziko bioplynové stanice přijatelné pro jednotlivé příjemce rizika.

Nejdůležitějšími podmínkami jsou:

1. Z hlediska okolních obyvatel je to dodržení vzdálenosti zástavby 600 metrů od bioplynové stanice.
2. Z ekonomického hlediska provozu jsou důležité pravidelné kontroly všech přístrojů na bioplynové stanici minimálně jednou ročně.
3. Z pohledu pracovníka na bioplynové stanici je důležité mít k dispozici vhodné postupy a pomůcky pro provádění operací oprav a údržby, jako jsou například servisní úkony v lapači kondenzátu.

Mimo výše popsané podmínky je důležité dbát na odsíření bioplynu a pravidelnou kontrolu obsahu sulfanu v bioplynu.

V rámci praktické části bylo prokázáno, že metoda LOPA je společně s dalšími metodami (například stromem poruch a událostí) vhodná pro praktické použití při analýze rizika bioplynové stanice.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Enviwiki, Bioplynová stanice. [Cit. 15.3. 2022]
https://www.enviwiki.cz/wiki/Bioplynová_stanice
- [2] Barozzi M., Contini S., Raboni M., Torretta V., Casson Moreno V., Copelli S.: Integration of Recursive Operability Analysis, FMECA and FTA for the Quantitative Risk Assessment in biogas plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **2021**, 71.
- [3] CZBA Česká bioplynová asociace, Co je bioplyn? [Cit. 16.3. 2022]
<https://www.czba.cz/co-je-bioplyn.html>
- [4] Čekanová A.: Chemické složení bioplynu. *Bakalářská práce*, VUT Brno, **2008**.
- [5] Exkurze bioplynová stanice Rybitví, osobní sdělení, **2022**.
- [6] Exkurze bioplynová stanice Brloh, osobní sdělení, **2021**.
- [7] Information and Advisory Service on Appropriate Technology: Biogas - Application and Product Development. *Biogas Digest Volume II*, **2010**.
https://energypedia.info/wiki/Types_of_Biogas_Digesters_and_Plants [Cit. 21. 3. 2022]
- [8] CZBA Česká bioplynová asociace, Projekty čištění bioplynu na biometan jsou stále zajímavější i pro český trh. [Cit. 22.3. 2022]
<https://www.czba.cz/aktuality/projekty-cistení-bioplynu-na-biometan-jsou-stale-zajimavejsi-i-pro-cesky-trh.html>
- [9] CZBA Česká bioplynová asociace. Bioplyn v ČR k 31. 12. 2019 [Cit. 16.3.2022]
<https://www.czba.cz>
- [10] Sbírka zákonů Česká republika. *Vyhláška č. 227/2015 o náležitostech bezpečnostní dokumentace a rozsahu informací poskytovaných zpracovateli posudku ze dne 24. srpna 2015*. ISSN 1211-1244.
- [11] Moreno, V. C., Papasidero, S., Scarponi, G. E., Guglielmi, D., & Cozzani, V.: Analysis of accidents in biogas production and upgrading. *Renewable Energy*, **2016**, 96, 1127-1134.
- [12] S.D. and E. French Ministry of Ecology, ARIA Database. [Cit. 21.11.2021]
<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/archives-2/find-accident/?lang=en>
- [13] Stolecka, K., Rusin, A.: Potential hazards posed by biogas plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2021**, 135, 110225.
- [14] Hedlund, F. H., Madsen, M.: Incomplete understanding of biogas chemical hazards— Serious gas poisoning accident while unloading food waste at biogas plant. *Journal of Chemical Health & Safety*, **2018**, 25(6), 13-21.
- [15] Trávníček, P., Kotek, L.: Risks associated with the production of biogas in Europe. *Process Safety Progress*, **2015**, 34(2), 172-178.

- [16] POŽÁRY.cz, 22.06.2011: Úder blesku byl příčinou požáru a výbuchu horního dílu fermentoru bioplynové stanice v Malšicích. [Cit. 21.11.2021]
<https://www.pozary.cz/clanek/138743-22-06-2011-uder-blesku-byl-pricinou-pozaru-a-vybuchu-horniho-dilu-fermentoru-bioplynovy-stanice-v-malsicich/>
- [17] Hasičský záchranný sbor Pardubického kraje, Vyšetřovatelé už vědí, co způsobilo explozi s následným požárem v bioplynové stanici. [Cit.21.11.2021]
<https://www.hzscr.cz/clanek/vysetrovatele-uz-vedi-co-zpusobilo-explozi-s-naslednym-pozarem-v-bioplynovy-stanici.aspx>
- [18] Kaplan, S., Garrick, B. J.: On The Quantitive Definition of Risk. *Risk Analysis*, **1981**, vol.1, No.1, 11-27.
- [19] Crawl, Daniel A., Joseph F. Louvar.: *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. Third edition. Pearson Education International, **2011**.
- [20] Ferjenčík, M.: Analýza a hodnocení rizika závažných nehod v průmyslových podnicích. *CHEMagazín*, **1999**, č. 6, ročník IX, 14-16.
- [21] Ferjenčík, M.: Přednášky předmětu Bezpečnostní inženýrství 1, *UNIVERZITA PARDUBICE, Fakulta chemicko-technologická, Ústav energetických materiálů*, letní semestr **2021**.
- [22] Imperial Chemical Industries, Ltd.: *A Guide to Hazard and Operability Studies*. Chemical Industry Safety and Health Council of the Chemical Industries Association, **1977**.
- [23] Leedeo engineering, What is a PHA (Preliminary Hazard Analysis), what is it for and how is it constructed? [Cit.13.4.2022]
a. <https://www.leedeo.es/l/preliminary-hazard-analysis-how-constructed/>
- [24] Janovský, B.: Přednášky předmětu Bezpečnostní inženýrství 1, *UNIVERZITA PARDUBICE, Fakulta chemicko-technologická, Ústav energetických materiálů*, letní semestr **2021**.
- [25] CCPS (Center for Chemical Process Safety): *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. CCPS guidelines series. Second Edition. Wiley **2000**.
- [26] CCPS (Center for Chemical Process Safety): *Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment*. A CCPS Concept Book. Wiley **2011**.
- [27] Pražáková M.: Právní úprava prevence závažných havárií. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti*, **2016**, roč. 9, speciální č. Prevence závažných havárií.
<http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-zavazne-havarie/pravni-uprava-pzh.html>. ISSN 1803-3687.
- [28] European Union, 2018. Závažné havárie s přítomností nebezpečných chemických látek. *EUR-Lex*. Acces to European Union law. [Cit. 8.11.2021].<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=LEGISSUM%3A121215>

- [29] Sbírka zákonů Česká republika. *Zákon č. 224/2015 o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi ze dne 12. srpna 2015*. ISSN 1211-1244.
- [30] Trávníček, P., Kotek, L., Junga, P., Vítěz, T., Drápela, K., Chovanec, J.: Quantitative analyses of biogas plant accidents in Europe. *Renew. Energy*, **2018**, *122*, 89–97.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.077>
- [31] Trávníček, P., Kotek, L., Koutný, T., Vítěz, T.: Quantitative Risk Assessment of Biogas Plant – Determination of Assumptions and Estimation of Selected Top Event. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, **2019**, *63(3)*, 397–405.
<https://doi.org/10.3311/PPch.13048>
- [32] Mulazzani, M.: Reliability versus safety. *IFAC Proceedings Volumes*, **1985**, *Vol. 18* (12), 141-146.
- [33] Trávníček, P., Kotek, L., Junga, P., Vítěz, T.: Bezpečnost zásobníků na bioplyn. *SPEKTRUM*, **2015**, *2*, 18-21. Dostupné na:
https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/cs/.content/galerie-souboru/Spektrum/Spektrum_2015_2.pdf
- [34] Trávníček, P., Kotek, L., Koutný, T., Vítěz, T., Chovanec, J.: Condensing Shafts on Biogas Stations and Operational Safety. *Process Safety Progress*, **2017**, *Vol. 37*, No.2.
<https://doi.org/10.1002/prs.11933>
- [35] Trávníček, P.; Kotek, L.; Junga, P.: Bezpečnost bioplynových stanic. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online], **2015**, roč. 8, č. 4.
<https://www.bozpinfo.cz/josra/bezpecnost-bioplynovych-stanic> ISSN 1803-3687.
- [36] CCPS (Center for Chemical Process Safety): *Guidelines for Enabling Conditions and Conditional Modifiers in Layer of Protection Analysis*, Wiley, Hoboken, **2014**.
- [37] 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*, **2014**, *30*, 256-262.

PŘÍLOHY

Příloha 1: Formulář k metodě LOPA.

Číslo scénáře:	Číslo zařízení:	Název scénáře:	
Datum:	Popis:	Pravděpodobnost	Frekvence (za rok)
Popis následků / Kategorie			
Kritéria přípustnosti rizika (kategorie nebo frekvence)			
Iniciační událost (obvykle frekvence)			
Umožňující událost nebo podmínka			
Podmiňující modifikátory (pokud se uplatňují)			
	Pravděpodobnost vznícení		
	Pravděpodobnost osob v postižené oblasti		
	Pravděpodobnost smrtelných zranění		
Jiné			
Frekvence nezmírněných následků			
Nezávislé vrstvy ochrany (IPLs)			
Bezpečnostní opatření (jiná než IPLs)			
Celková PFD pro všechny IPLs			
Frekvence zmírněných následků			
Kritéria přípustnosti rizika splněna? (Ano / Ne):			
Úkony potřebné k dosažení přípustnosti rizika:			
Poznámky:			
Odkazy (na podklady atp.):			
Analytik LOPA (a popřípadě členové týmu):			

Příloha 2: P&ID schéma obecné bioplynové stanice, upraveno podle [2].

