



Agronomická
fakulta



Bezpečnost bioplynových stanic

Mendelova
univerzita
v Brně



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

Mendelova
univerzita
v Brně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Cíle kapitoly

- Seznámení s problematikou havárií bioplynových stanic
- Popis rizik na bioplynových stanicích
- Seznámení s metodami analýzy rizik

Klíčová slova

- Bezpečnost, bioplyn, riziko, analýza, havárie

V Evropě i ve světě se v současné době nachází mnoho instalací bioplynových stanic a jejich počet neustále roste. Lídrem ve výrobě bioplynu pomocí bioplynových stanic je v Evropě Německo. Co se týká počtů instalací bioplynových stanic o celkovém výkonu 100 kW a vyšším, patří Německo ke světové špičce. Pro rok 2014 se předpokládá, že na území Německa bude v provozu až 7 900 instalací s celkovým výkonem 3750 MW. Na území České republiky bylo do roku 2013 vybudováno celkem 436 bioplynových stanic s celkovým instalovaným výkonem 363 MW. Podobně je na tom Rakousko, kde bylo do roku 2012 instalováno 436 bioplynových stanic. Počet bioplynových stanic ve vybraných zemích Evropy je obsažen v následující tabulce.

Země	Počet bioplynových stanic	Počet obyvatel na jednu bioplynovou stanici	Plocha území připadající na jednu bioplynovou stanici [km ²]
Německo (2013)	7 900	10 345	45
Itálie	1 264	48 077	238
Švýcarsko	606	13 047	68
Francie	557	117 480	982
Česká republika (2013)	481	21 925	164
Rakousko	436	19 309	192
Velká Británie	312	202 660	785
Nizozemí	252	66 548	165
Švédsko	242	39 061	1 859
Polsko	186	205 462	1 681
Norsko	185	25 361	1 747
Dánsko	176	31 670	245
Belgie	119	92 504	273
Slovensko	92	59 130	533
Finsko	78	69 064	4 335
Maďarsko	50	199 240	1 861
Lotyšsko	37	54 729	1 743
Slovinsko	33	62 181	614
Lucembursko	33	15 667	87
Irsko	27	166 185	3 127
Portugalsko	26	409 115	3 553
Španělsko	22	2 101 590	22 944
Recko	22	513 818	5 997
Litva	21	142 190	3 105
Kypr	15	74 437	616
Chorvatsko	12	367 250	4 712
Rumunsko	7	3 055 714	33 928
Estonsko	3	446 667	15 075
Bulhar sko	3	2 492 000	36 970

*Počet
bioplynových
stanic v
jednotlivých
evropských
státech za rok
2012*

Z tabulky je patrné, že některé státy mají velmi hustou síť bioplynových stanic. Nej hustší síť má zmíněné Německo, ve kterém na každých 45 km² celkového území připadá jedna bioplynová stanice. Druhou nej hustší síť bioplynových stanic má Švýcarsko. Vzhledem k charakteru území Švýcarska, kde až 60 % tvoří horský či vysokohorský terén, bude hustota bioplynových stanic vztažená na území obývanými lidmi nejvyšší v Evropě.

Z bezpečnostního hlediska nemá obvykle nehoda na bioplynové stanici takový rozsah následků jako havárie v chemických zařízeních, skladech chemických látek apod. Nicméně vzhledem k tomu, že se jedná o zařízení v České republice i v sousedních zemích, která jsou značně rozšířená, pozornost si bezesporu zaslouží.

1. Popis jednotlivých zdrojů rizik

Za zdroje rizik v prostorách bioplynových stanic považujeme jednak samotný **bioplyn**, jednak **reaktory**, ve kterých probíhá anaerobní fermentace a také **nádrže** na skladování zbytku po anaerobní fermentaci.

1.1 Bioplyn

Bioplyn je plyn, který je produkován bakteriemi konvergujícími za anaerobních podmínek organickou hmotu. Je tvořen směsí dvou základních plynů, metanu a oxidu uhličitého. U zemědělských bioplynových stanic se koncentrace metanu pohybuje přibližně kolem 60 % a koncentrace oxidu uhličitého kolem 40 %. Bioplyn obsahuje ale i další plyny jako je například vodík, oxid uhelnatý, dusík, vodní pára, sirovodík, amoniak atd. Pro příklad koncentrace vodíku je obvykle do 5 % a koncentrace dusíku v rozsahu 1 – 2 %. Konkrétní složení bioplynu závisí na technologii bioplynové stanice a také především na materiálu, který je zde zpracováván. Vlastnosti jednotlivých plynů obsažených v bioplynu, které mohou být z bezpečnostního hlediska rizikové jsou uvedeny dále.

1.1 Bioplyn

Metan:

Metan je základní plyn obsažený v bioplynu. Jedná se o nejjednodušší alkan, je netoxický a bez zápachu. V případě anaerobní fermentace metan vzniká při štěpení uhlíkatých látek, jako je metanol, kyselina mravenčí, methylamin, oxid uhličitý a kyselina octová. Nebezpečnou vlastností metanu je jeho hořlavost. Klasifikace metanu je F+, R-věta pro tuto látku je R-12 a S-věty jsou S9, S16 a S33. V souladu se Směrnicí Evropského parlamentu a Rady č. 2008/112/ES je metan klasifikován jako GHS02 a GHS04 s H-větou H200. Z bezpečnostního hlediska je podstatné, že bioplyn (jehož podstatnou část metan tvoří) vzniká při anaerobním procesu, tedy bez přístupu vzduchu a možnosti vzniku explozivní směsi.

Základní data o metanu jsou uvedena v následující tabulce.

Parametr	Hodnota
Teplota vznícení	<u>537 °C</u>
Teplotní třída	T 1
Mez výbušnosti	4,4 až 17 % _{obj}
Skupina výbušnosti	II A
Mezní experimentální bezpečná spára	<u>1,14 mm</u>
Relativní hustota (ve vztahu ke vzduchu)	0,55
Objemová výhřevnost	34,016 MJ·m ⁻³
CAS	74-82-8

Základní charakteristika metanu

1.1 Bioplyn

- Sirovodík:

Sirovodík je bezbarvý plyn s vysoce toxickým účinkem zvláště pro terestrické organismy. Jeho případný únik může být nebezpečný ale také pro lidi v bezprostředním okolí úniku. Tento fakt dokazují i některé tragické incidenty, jež se na bioplynových stanicích odehrály. Následky působení sirovodíku na organismus vždy závisí na mnoha faktorech a hodnota koncentrace, při níž dojde k jednotlivým symptomům, se může na různých místech lišit. Účinky sirovodíku mohou být následující:

1.1 Bioplyn

- Při expozici vysokým koncentracím (1 000 – 2 000 ppm nebo vyšším, některé zdroje uvádí již 500 – 1 000 ppm) může dojít ke kolapsu organismu v řádech sekund. Při těchto koncentracích dochází k selhání dýchacích center a k zástavě dýchání. Může následovat smrt v několika minutách. Avšak byly zaznamenány případy, kdy již při expozici sirovodíku v koncentraci 700 ppm byly následky fatální.
- Při koncentraci 250–600 ppm může dojít k plicnímu edému.
- Při koncentraci 50–150 ppm může dojít ke ztrátě čichu (některé zdroje uvádí 100–200 ppm).
- Dlouhodobá expozice sirovodíku v koncentraci 50 ppm může také vyvolat plicní edém.
- Expozice sirovodíku v koncentraci 50 – 100 ppm po dobu jedné hodiny může vyvolat silné podráždění očí a dýchacích cest.
- Expozice sirovodíku v koncentraci 14 – 25 ppm může způsobit pálení očí, bolest hlavy, ztrátu chuti k jídlu, úbytek na váze a závratě.
- Při koncentraci 10 – 14 ppm byly zaznamenány případy zánětů spojivek.

	Prvé příznaky otravy	Těžká otrava	Rychlá smrt	Limit pro pobyt	Čichový práh	Zápach
	[mg·m⁻³]	[mg·m⁻³]	[mg·m⁻³]	[mg·m⁻³]	[mg·m⁻³]	
H₂S	100	280	1 400	10	0,4	shnilé vejce
HCN	55	110	330	3	5,5	hořké mandle

Srovnání toxicity sirovodíku a kyanovodíku

1.1 Bioplyn

Obsah sirovodíku v bioplynu je relativně nízký a jeho množství do velké míry závisí na materiálu, který je v bioplynové stanici zpracováván. V tabulce uvedené níže je prezentována koncentrace sirovodíku v bioplynu z různých bioplynových stanic a z různého zpracovávaného materiálu. Obecně lze říci, že vyšší koncentrace sirovodíku je obsažena v bioplynu, který vzniká při zpracování materiálu živočišného původu, nicméně síra se přirozeně vyskytuje i v tělech rostlin (například v energetické kukuřici).

Materiál	Koncentrace
Čistírenský kal	25–75 ppm
Vepřová kejda	1 200 – 2 400 ppm
Potravinářské odpady	500 – 6 000 ppm

1.1 Bioplyn

Existují dva způsoby, jak zajistit snížení koncentrace sirovodíku v bioplynu. První metoda je přímá, kdy se do reaktoru dávkuje látky jako chlorid železitý, jehož vlivem se obsah sirovodíku v bioplynu sníží. Nepřímý způsob využívá následného čištění bioplynu, a to pomocí různých fyzikálních procesů jako například adsorpce, absorpce, membránové separace, biologické separace atd. Každá z těchto metod má své výhody a nevýhody, ale je zřejmé, že žádná z nich nedokáže zcela eliminovat riziko úniku bioplynu s obsahem sirovodíku do okolní atmosféry.

1.1 Bioplyn

Fyzikální vlastnosti sirovodíku shrnuje následující tabulka. Z hlediska bezpečnosti jsou signifikantní zejména jeho extrémní hořlavost, vysoká toxicita a nebezpečnost pro životní prostředí. Klasifikace této látky je F+, T+ a N. R-věty příslušné pro tuto látku jsou poté R12, R26 a R50, S-věty zahrnují S9, S16, S36, S38, S45 a S61. V souladu se Směrnicí Evropského parlamentu a Rady č. 2008/112/ES je sirovodík klasifikován jako GHS02, GHS06 a GHS09 s H-větami H220, H280, H330 a H400.

Charakteristika/vlastnosti	Informace
Chemický název	Sirovodík
Chemický vzorec	H ₂ S
CAS	7783-06-4
Molární hmotnost	34,08
Barva	Bezbarvý
Chuť	Nasládlá
Skupenství	Plyn (za běžného stavu)
Bod tání	-85,49 °C
Bod varu	-60,33 °C
Hustota (vzduch)	1,19 (vzduch = 1,00)
Hustota při 0 °C a tlaku 760 mmHg	1,5392 g·dm ⁻³
Rozpustnost ve vodě	5,3 g·dm ⁻³ při 10 °C; 4,1 g·dm ⁻³ při 20 °C; 3,2 g·dm ⁻³ při 30 °C
Rozpustnost v jiných rozpouštědlech	Rozpustný v glycerolu, benzínu, petroleji, sirouhlíku, ropě
Teplota samovznícení	260 °C
Meze výbušnosti	Horní – 45,5 % _{obj} ; dolní – 4,3 % _{obj}

Základní fyzikální a chemické vlastnosti sirovodíku

1.1 Bioplyn

Další plyny obsažené v bioplynu:

Konkrétní složení bioplynu vždy striktně závisí na vstupních materiálech. Přirozenou součástí bioplynu bývají tedy i další plyny, které se v něm však vyskytují pouze ve stopovém množství. Může se jednat o následující:

- alifatické uhlovodíky – alkany, alkeny a alkyny,
- alicyklické uhlovodíky, aromatické uhlovodíky, alkoholy a thioly,
- aldehydy a ketony, karboxylové kyseliny, estery, ethery a disulfidy, aminy, furany a jejich deriváty.

1.1.1 Příklady havárií spojené s únikem bioplynu

Na základě chemicko-fyzikálních vlastností bioplynu lze definovat celkem tři hlavní nebezpečí, která mohou vzniknout při úniku bioplynu. Jedná se o:

- nebezpečí toxického působení,
- požáru
- exploze.

Informace o nehodách, ke kterým došlo na bioplynových stanicích, jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Rok	Místo	Zranění	Smrt	Popis události
2005	Německo	0	4	Nehoda nastala při vykládce vedlejších živočišných produktů určených pro anaerobní fermentaci. Materiál byl umístěn v příjmové hale v jámách. Vlivem vlastní váhy došlo ke stlačení materiálu a k vytvoření anaerobních podmínek a následné tvorbě sirovodíku. Zároveň vznikla porucha na odvětrávacím zařízení.
2011	Česká republika	3	0	Havárie byla způsobena nedisciplinovaností jednoho člena obsluhy během servisního úkonu. Tento pracovník se nadýchal emisí a upadl do bezvědomí, další dva lidé byli zraněni při jeho záchraně.
2013	Česká republika	0	1	Z dostupných zpráv vyplynulo, že pracovník bioplynové stanice zemřel při servisním úkonu v kondenzační šachtě, když do ní vstoupil bez dýchacího přístroje a bez asistence dalších spolupracovníků

Příklady havárií s toxickými účinky

Rok	Místo	Zranění	Smrt	Popis události
1997	Itálie	1	2	K události došlo při opravě železobetonového reaktoru v bioplynové stanici na čistírně odpadních vod. Při opravě se vznítily zbytkový plyn. Výbuchem byli dva pracovníci odhozeni a zemřeli. Třetí spadl do reaktoru a byl vážně zraněn. Střecha reaktoru byla vážně poškozena.
1999	Francie	0	0	K incidentu došlo na bioplynové stanici pro zpracování papírenských odpadů, kde explodoval nashromážděný bioplyn. Výbuch měl stejný účinek jako 5 kg TNT. Došlo pouze k materiálním škodám, nebyla hlášena žádná smrtelná zranění.
2007	Německo	0	0	V obci Daugendorf (viz obrázek 51) došlo k explozi reaktoru. Příčiny nehody nejsou známy. Materiál se z reaktoru rozlil do okruhu 200 m. Byly poškozeny některé stavební stroje a došlo k úniku několika set litrů topného oleje z převrácené cisterny. Žádné smrtelné úrazy nebyly zaznamenány.
2009	Německo	0	0	Uvnitř reaktoru bioplynové stanice došlo k explozi, která poškodila horní část fermentoru. Událost se stala v obci Erbach.
2009	Česká republika	1	0	K explozivnímu požáru došlo během servisních úkonů. Událost byla způsobena nedbalostí zaměstnanců.

Příklady
havárií s
následkem
exploze

1.2 Reaktory

Pro účely anaerobní fermentace se obecně využívá široké škály materiálů, jako je například kejda hospodářských zvířat, čistírenské kaly, živočišné tuky, vedlejší živočišné produkty, hybridy kukuřice, čiroku a další. Tyto materiály se často kombinují – v tomto případě se hovoří o tak zvané kofermentaci. Z toho plyne, že chemické složení v reaktorech různých bioplynových stanic je značně variabilní. V České republice jsou nejvíce rozšířeny zemědělské bioplynové stanice, kde dochází nejčastěji ke kofermentaci kejdy hospodářských zvířat a speciálně vyšlechtěných polních plodin (např. hybridy energetické kukuřice). Zpracovávaný materiál není pro lidský organismus toxický, hořlavý ani explozivní, ale v případě masivního úniku do okolí může být nebezpečný, zvláště pro vodní organismy. Je to dáno vysokou koncentrací dusíku (v různých formách) a fosforu v kejdě hospodářských zvířat. V následující tabulce je uveden obsah těchto dvou prvků v různých zpracovávaných materiálech.

Situace u jiných typů vstupních materiálů může být více komplikovaná. Tyto materiály totiž mohou obsahovat také další nebezpečné látky (byť v nízkých koncentracích), jako je PCDD/F, PBDE apod. Z tohoto pohledu je velmi problematické zpracovávání bioodpadu pocházejícího z komunálního odpadu. Je však třeba podotknout, že jeho řízená anaerobní fermentace je v bioplynových stanicích spíše výjimkou.

Materiál	Celkový dusík	Celkový fosfor
	[g·kg⁻¹]	[g·kg⁻¹]
Kravska kejda	2,3–23,8	0,82–4,63
Prasečí kejda	2,16–42,77	1,1–25,24
Drůbeží trus	6,81	1,5

Základní charakteristika surovin pro anaerobní fermentaci

1.2 Reaktory

Havárie spojené s únikem materiálu z reaktoru bývají často bez výrazných škod na majetku a bez ztrát na životech. Mohou se ale stát významným zdrojem znečištění vodního prostředí v okolí bioplynové stanice (potok, řeka, rybník, apod.). Jako příklad může být uvedena nehoda z České republiky z roku 2013, při níž došlo k úniku materiálu z reaktoru do kanalizace a do blízkého potoka. Při havárii nebyla zaznamenána žádná zranění ani úmrtí. Pravděpodobnou příčinou byla neprofesionální instalace potrubí do fermentační nádrže.

1.3 Skladování zbytku po fermentaci

Zbytky po anaerobní fermentaci jsou skladovány v otevřených nádržích, zpravidla železobetonových. Pokud dojde k masivnímu úniku může rovněž poškodit životní prostředí. Příklady naměřených hodnot dusíku a fosforu ve zbytku po fermentaci zachycuje tabulka na další straně. Hodnoty pocházejí z měření na různých bioplynových stanicích, které zpracovávaly materiál jak ze zemědělského provozu, tak ze zařízení na zpracování tříděných bioodpadů nebo potravinářských odpadů.

Parametr	Jednotka	Koncentrace			
		Min.	Max.	Aritmetický průměr	Medián
Sušina	[%]	2,0	9,4	5,3	5,3
P _{tot}	[g·kg ⁻¹]	0,3	5,6	1,3	1,5
P _{sol}	[g·kg ⁻¹]	0,002	0,4	0,1	0,05
N _{tot}	[g·kg ⁻¹]	1,6	7,6	4,2	4,4
N _{sol}	[g·kg ⁻¹]	1,1	5,9	2,8	2,9

Obsah fosforu a dusíku v materiálu v nádrži zbytků po anaerobní fermentaci

Parametr	Jednotka	Koncentrace			
		Min.	Max.	Mean	Median
PCDD/F	[ng·kg ⁻¹]	< 5	22,0	3,88	1,49
PBDE	[μg·kg ⁻¹]	6,40	11,300	1,780	1,040
PAU	[mg·kg ⁻¹]	0,10	20,6	2,11	0,68
Fluorované uhlovodíky	[μg·kg ⁻¹]	0,97	168	42,3	18,5
Di(2-ethylhexyl) ftalát	[mg·kg ⁻¹]	1,00	107	22,9	9,5

Obsah některých organických sloučenin ve zbytku po anaerobní fermentaci

2. Analýza rizik provozu bioplynových stanic

Bezpečnost zaměstnanců, obyvatel žijících v okolí bioplynové stanice a životního prostředí lze zajistit dvěma základními způsoby:

- Může být použit přístup deterministický – podle kterého uvažujeme, že ke každé nehodě jednou dojde, a pomocí vhodných pasivních opatření (např. odstupových vzdáleností od jednotky) se snažíme vyloučit možnost vzniku jejích nežádoucích důsledků (např. možnost zasažení obyvatelstva).
- Nebo může být zvolen přístup stochastický – na základě něhož bereme v úvahu také neurčitost výskytu nehody nebo havárie a preventivní opatření navrhujeme také s ohledem na pravděpodobnost nebo frekvenci výskytu nepříznivé události.

2. Analýza rizik provozu bioplynových stanic

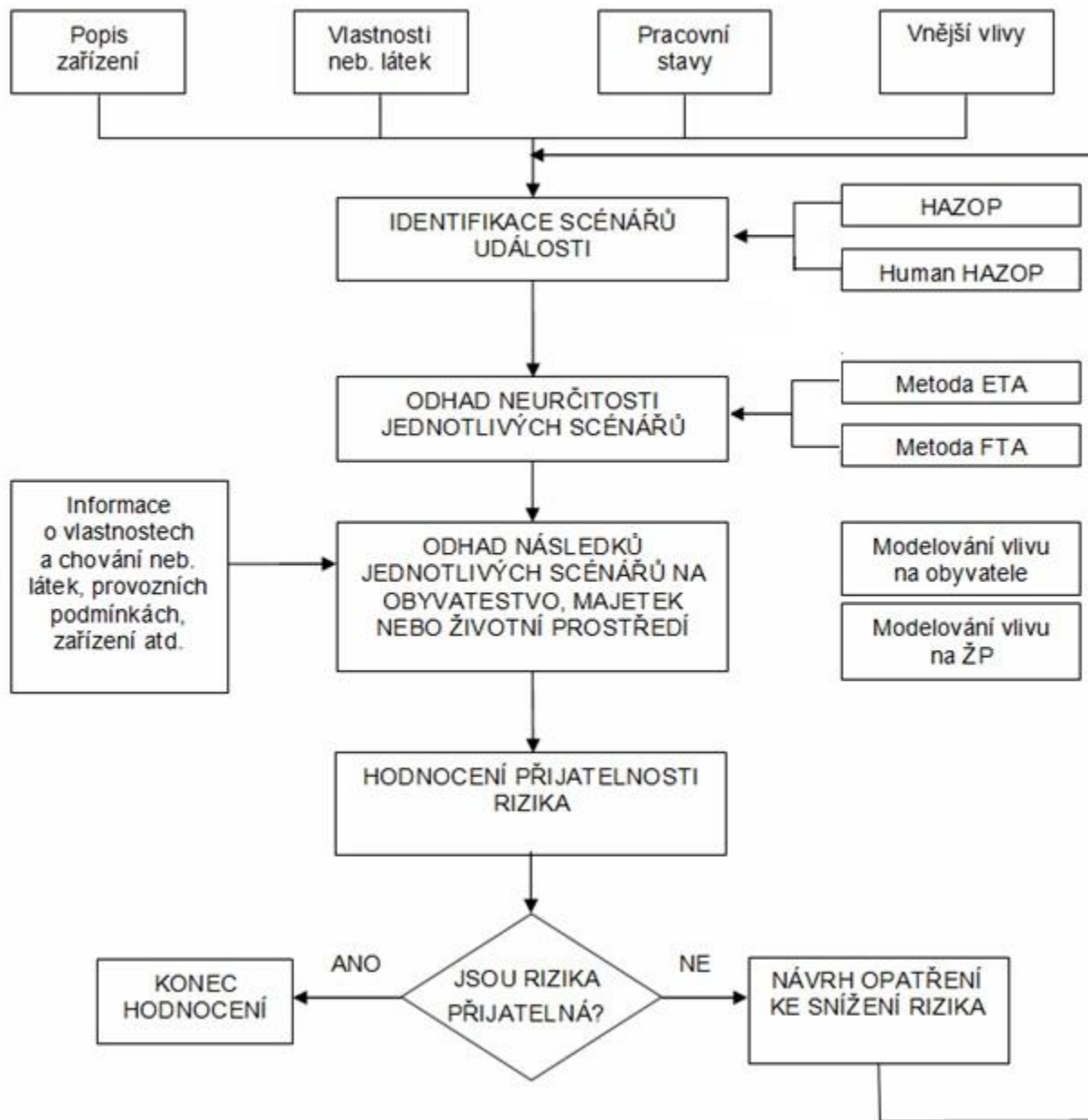
Vzhledem k hustotě osídlení České republiky je vhodné využít deterministického přístupu, který vyžaduje realizaci plnohodnotné analýzy rizik.

Riziko je definováno jako relace mezi očekávanou ztrátou (poškozením zdraví, ztrátou života, ztrátou majetku atd.) a její neurčitostí (zpravidla vyjádřenou pravděpodobností nebo frekvencí výskytu). Je tedy charakterizováno následkem, tedy velikostí škody způsobené uplatněním zdroje rizika a frekvencí, která odráží pravděpodobnost bezchybného působení bezpečnostních opatření.

2. Analýza rizik provozu bioplynových stanic

Postup analýzy rizik bioplynové stanice by měl obsahovat zejména tyto kroky:

- identifikace scénářů události (tj. nehody nebo havárie a jejich příčin – identifikace zdrojů rizik),
- odhad frekvence výskytu nebezpečné události (vytvoření nebezpečné výbušné směsi, únik kapalných nebezpečných látek ze zařízení),
- odhad pravděpodobnosti rozvinutí scénáře, a to včetně posouzení vlivu lidského činitele na vznik události, a výpočet výsledné frekvence výskytu havarijních následků,
- odhad dopadů možných scénářů havárií na zdraví a životy lidí, na životní prostředí nebo majetek,
- stanovení přijatelnosti rizika vzniku havárie,
- návrh preventivních opatření.



Postup jednotlivých navazujících kroků při komplexní bezpečnostní studii lze znázornit pomocí následujícího schématu.

2. Identifikace scénářů havárie

Klíčovou částí analýzy rizik je identifikace možných scénářů událostí a jejich příčin a výběr reprezentativních scénářů nehodových událostí (ve kterých musí být zahrnuty zdroje rizik s nejméně závažnými dopady na zdraví a životy osob a také na majetek), jež mohou vyústit v závažnou havárii.

2. Identifikace scénářů havárie

Metody použitelné pro identifikaci scénářů je možné rozdělit na metody systematické a nesystematické.

- Systematické metody (HAZOP, FMEA) postupně prověřují všechny možnosti, které mohou nastat a určují, zda je důležité takový scénář uvažovat v další analýze.
- Nesystematické metody (např. What-If, bezpečnostní prohlídka, checklisty) tuto vlastnost nemají, postup je u nich spíše nahodilý a nezaručují vytvoření komplexního seznamu havarijních scénářů. Přesto například bezpečnostní checklisty nacházejí časté uplatnění, neboť mohou představovat levné a rychlé řešení u již existujících provozovaných jednotek.

2. Identifikace scénářů havárie

Každá použitá metoda by měla využívat také generická data z jiných obdobných provozů (a informace o nehodách na konkrétních zařízeních, případně na zařízeních obdobných) a zkušenosti operátorů. Ty mohou být užitečné zejména při určování násobných havarijních scénářů.

2. Identifikace scénářů havárie

Výběr metody je úzce spojen se složitostí posuzované technologie a závisí také na požadované detailnosti studie. Nesystematické metody se hodí spíše pro předběžné hodnocení, ani v tomto případě však nejsou použitelné bez výhrad.

V nejlepším případě je tedy možné zároveň vycházet z:

- generických informací – kategorizovaných havárií, ke kterým došlo,
- informací z provozní praxe – informací získaných od operátorů,
- identifikace havarijních scénářů – využití metody HAZOP,
- identifikace selhání obsluhy – využití modifikované metody Human HAZOP.

Jako nejvhodnější se v případě procesních zařízení jeví využití metody HAZOP.

2.1 Metoda HAZOP

Metoda HAZOP je strukturovaná a systematická technika analýzy rizik, která má za cíl zjistit potenciální zdroje rizik v systému. Tato nebezpečí mohou zahrnovat jak nebezpečí, jež se v zásadě vztahují pouze k bezprostřednímu okolí systému, tak nebezpečí s mnohem širší sférou vlivu, například některá nebezpečí pro životní prostředí. Metoda dále umožňuje zjistit potenciální problémy s provozuschopností systému, jež mohou vést ke vzniku havárie.

2.1 Metoda HAZOP

Studie HAZOP je zvlášt' užitečná při identifikaci nedostatků v systémech, nebo řady událostí nebo činností v plánované posloupnosti či při zjišťování postupů řídicích takovou posloupnost.

Nejdůležitější částí studie HAZOP je „porada HAZOP“, v průběhu které tým složený z odborníků z různých profesí pod vedením vedoucího studie systematicky vyšetřuje všechny příslušné části návrhu nebo systému. Na tomto zasedání se zjišťují odchylky od záměru návrhu systému s použitím základní sady vodících slov. Základní vodící slova a jejich významy pro metodu HAZOP jsou uvedeny v následující tabulce.

Vodící slovo	Význam
NENÍ	úplná negace původní funkce
VĚTŠÍ	kvantitativní nárůst
MENŠÍ	kvantitativní pokles
A TAKÉ JAKOŽ I	kvalitativní nárůst (výskyt ještě jiného případu)
ČÁSTEČNĚ	kvalitativní pokles
REVERZE	opačná funkce (činnost)
JINÝ	úplná náhrada
PŘEDČASNÝ	předčasná funkce (činnost)
ZPOŽDĚNÝ	opožděná funkce (činnost)

Základní vodící slova metody HAZOP a jejich význam

2.1 Metoda HAZOP

- Analýza metodou HAZOP probíhá v těchto krocích:
 - odhalení příčin odchylky,
 - odhad následků odchylky,
 - návrhy preventivních opatření.
- Součástí analýzy HAZOP by mělo být také posouzení tzv. vnějších scénářů, při kterých k odchylce dochází v důsledku vnějších příčin. Příkladem takovýchto scénářů jsou například:
 - požár v jednotce, případně v okolních jednotkách,
 - výpadek procesních médií a energií,
 - záplavy, vichřice apod.

2.2 Metoda Human HAZOP

Identifikace možných selhání obsluhy je důležitou částí identifikace scénářů možných havárií. Identifikační proces lidských chyb musí v principu splnit dvě základní kritéria:

- musí zajistit komplexní hodnocení identifikovaných (nebo vybraných) scénářů,
- musí poskytnout odpovídající popis scénářů pro případ, že se budeme pokoušet riziko snižovat.

2.2 Metoda Human HAZOP

Pro identifikaci možných selhání obsluhy je vhodné použít metodu Human HAZOP, která je modifikací metody HAZOP a je s ní také kompatibilní. Ze zkušenosti lze souhlasit s tvrzením, že analýza Human HAZOP je dobře využitelná přímo v rámci řádného jednání HAZOP týmu, může být ale použita i nezávisle. Samotný postup metody Human HAZOP je obdobný jako v případě metody HAZOP. Principiální odlišnost spočívá v použití vodících slov, která jsou interpretována z hlediska lidského činitele (viz následující tabulka).

Vodící slovo	Význam
NEPROVEDENO	Akce neprovedena
OPAKOVÁNO	Akce provedena vícekrát
MÉNĚ	Akce byla provedena s menším účinkem
VÍCE	Akce byla provedena s vyšším účinkem
DŘÍVE	Akce byla provedena dříve
POZDĚJI	Akce byla provedena později
A TAKÉ	Byla provedena ještě jiná akce
OBRÁCENĚ	Posloupnost akcí byla porušena
JINÝ NEŽ	Byla provedena jiná akce
ČÁST	Byla provedena jen část akce

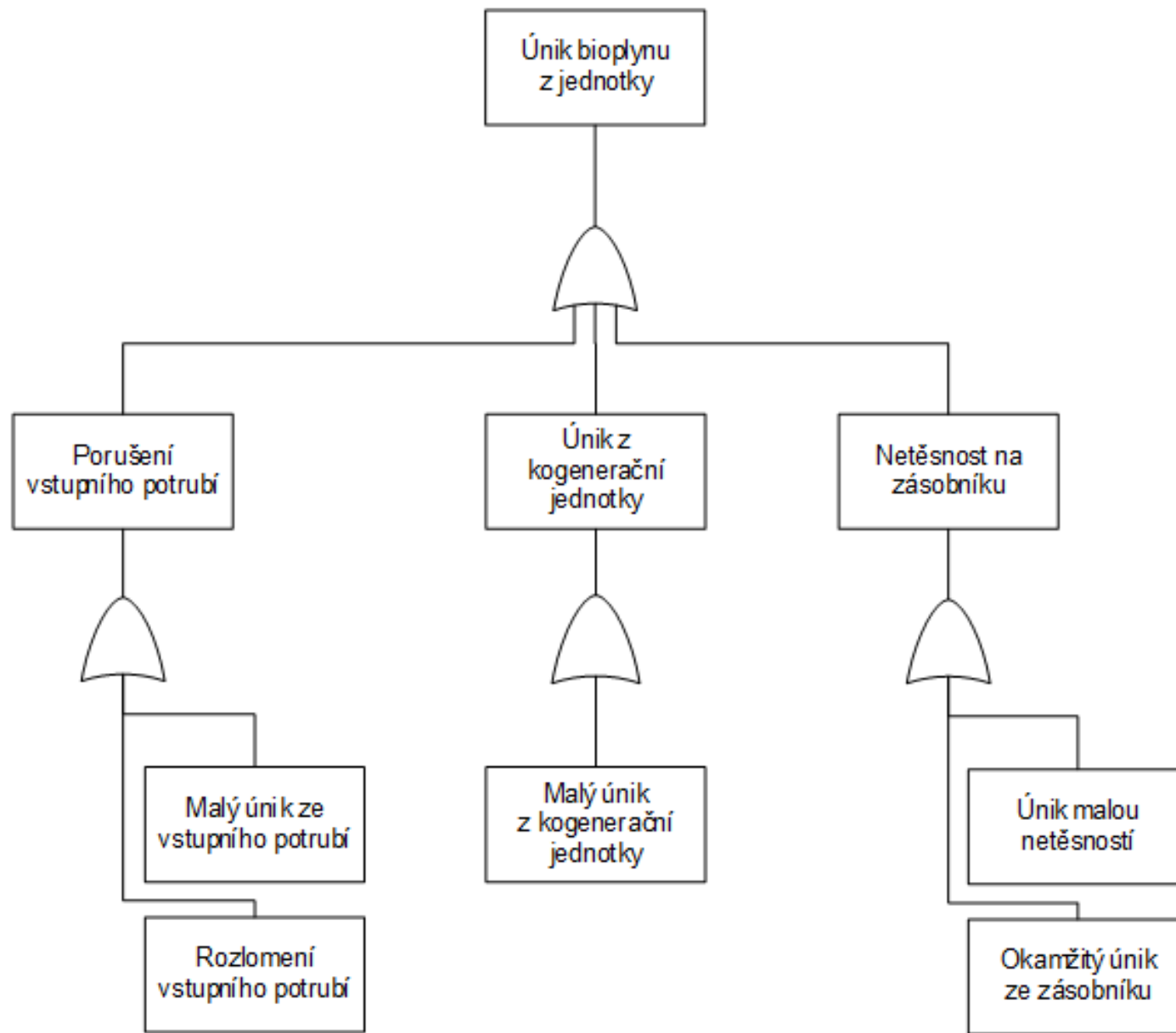
*Základní vodící slova metody Human HAZOP
a jejich všeobecný význam*

2.2 Odhad frekvence výskytu nebezpečné události

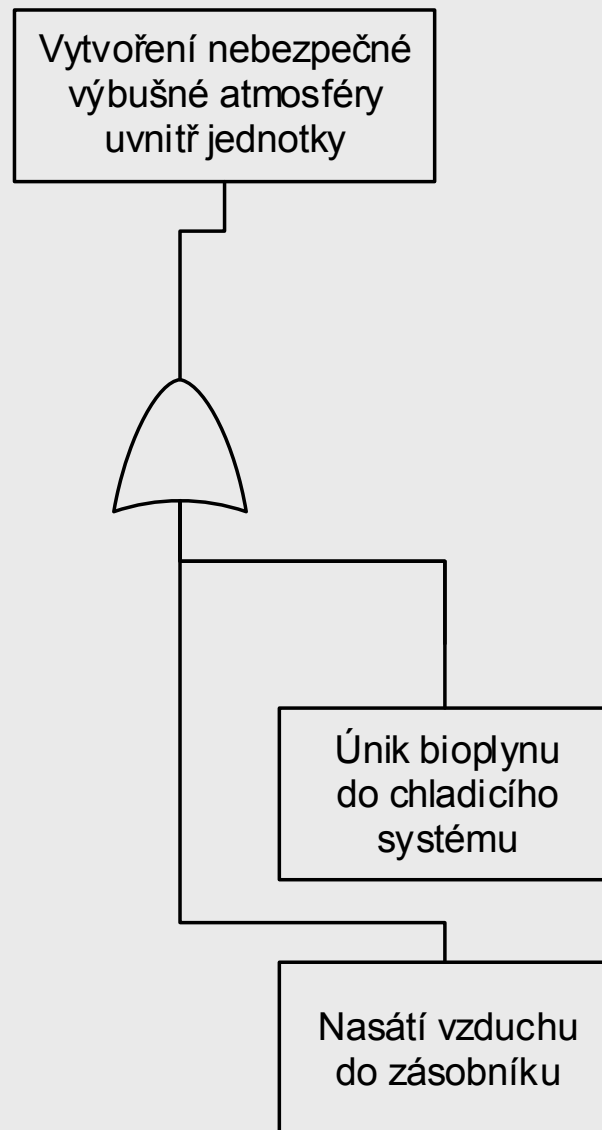
Pro určení frekvence výskytu jednotlivých havarijních scénářů se nejčastěji používá metoda **FTA (Fault Tree Analysis – analýza stromu poruchových stavů)**. Tato metoda je založena na modelu různých kombinací selhání, které mohou vyústit ve vážnou systémovou poruchu, tzv. vrcholovou událost. Za selhání považujeme události způsobené poruchami prvků systému, chybami obsluhy nebo jinými událostmi (např. externí události). Strom poruch lze tedy považovat za kvalitativní model, který lze kvantitativně vyhodnotit.

2.2 Odhad frekvence výskytu nebezpečné události

Výhodou analýzy na základě stromu poruch je přehledné znázornění rozvoje poruchy v systému a odhalení všech kauzálních vazeb mezi prvky a poruchou, a to až do zvolené úrovně složitosti systému, k čemuž se využívá Booleových logických operátorů (AND, OR, NOT). Další důležitou výhodou použití metody FTA je její systémová kompatibilita s metodami hodnocení selhání obsluhy. Správně sestavený strom poruch reprezentuje všechny rozumné kombinace poruch prvků a poruchových jevů, které mohou vést ke vzniku specifikovaného vrcholového jevu.



Strom poruchových stavů pro únik bioplynu



Strom poruchových stavů pro vytvoření nebezpečné výbušné atmosféry

2.2 Odhad frekvence výskytu nebezpečné události

Při kvantitativním hodnocení se určují frekvence elementárních událostí. K tomu se využívá hodnot získaných od výrobců zařízení, výsledků použití metod a dat z dalších zdrojů. Hodnoty, které mají charakter pravděpodobnosti selhání obsluhy, se získávají např. metodami THERP nebo TESEO.

2.3 Odhad pravděpodobnosti rozvinutí scénáře

Frekvence vzniku jednotlivých vrcholových havarijních scénářů (únik plyných nebo kapalných látek ze zařízení) ovšem neodpovídá frekvenci skutečného zasažení obyvatel, životního prostředí nebo majetku havarijními následky. Výbušná směs nemusí být iniciována, únik může být zachycen v havarijní jímce nebo zaregistrován obsluhou a zdroj úniku odpojen apod. Proto by mělo po odhadu frekvence výskytu nebezpečné události následovat stanovení pravděpodobnosti rozvinutí nehodového scénáře. K tomu se často využívá metoda **ETA (Event Tree Analysis – analýza stromu událostí)**.

2.3 Odhad pravděpodobnosti rozvinutí scénáře

Strom událostí je grafické zobrazení informací o možných průbězích havarijních sekvencí od vrcholové události, s využitím posloupnosti kombinací úspěchu a neúspěchu bezpečnostních prvků (porucha zařízení nebo lidská chyba). Výsledkem analýzy ETA jsou scénáře nehody – tj. soubor poruch nebo chyb, které vedou k nehodě.

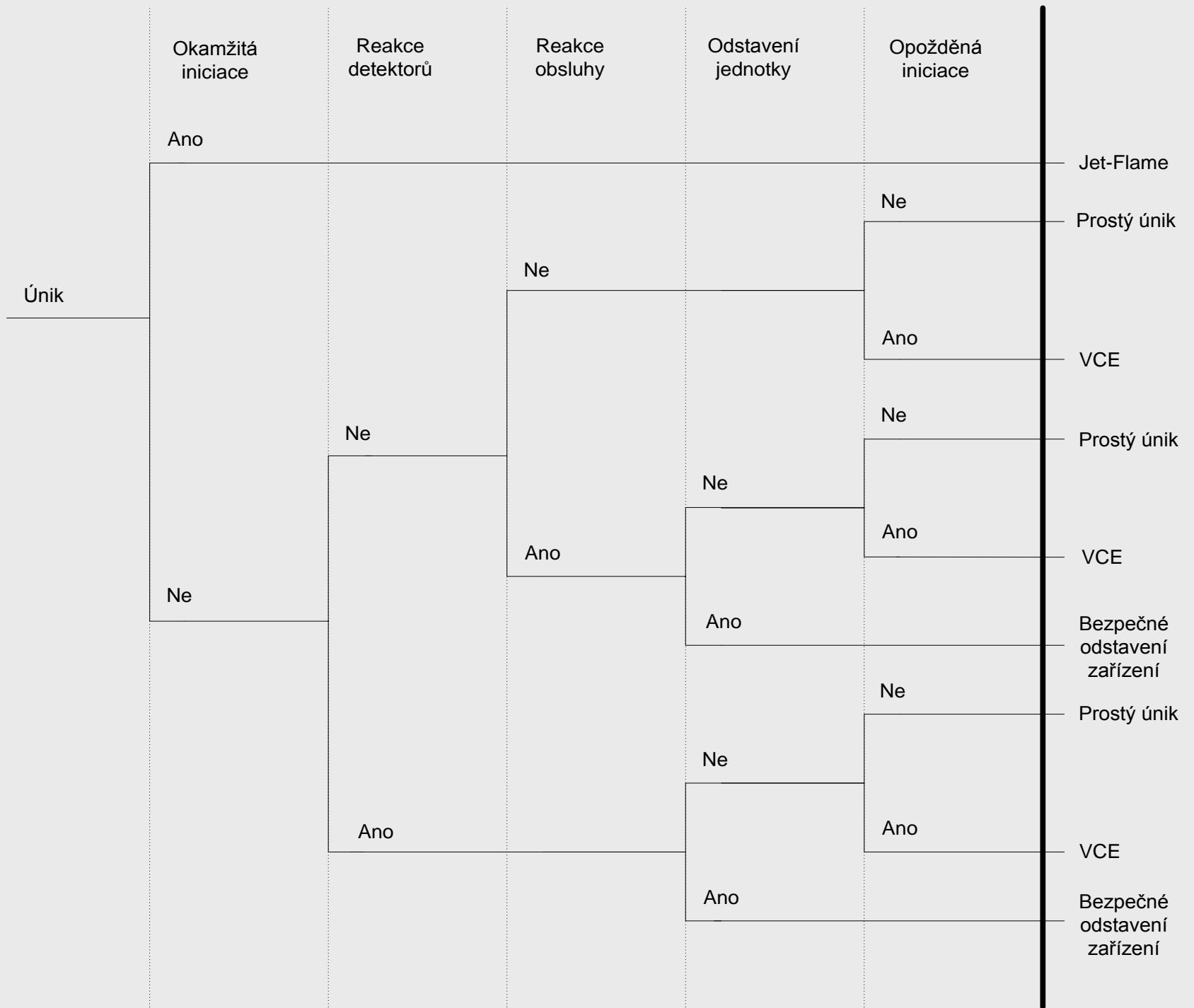
Při tvorbě stromu událostí je klíčové určit iniciační událost, jež představuje poruchu některého systému, nebo i chybu člověka. Dále musí být identifikovány bezpečnostní funkce bránící šíření iniciační události. V dalším kroku už může být sestaven strom událostí. Přitom je důležité řadit bezpečnostní funkce ve správném chronologickém pořadí, ve kterém se podílejí na zmírňování následků případné události.

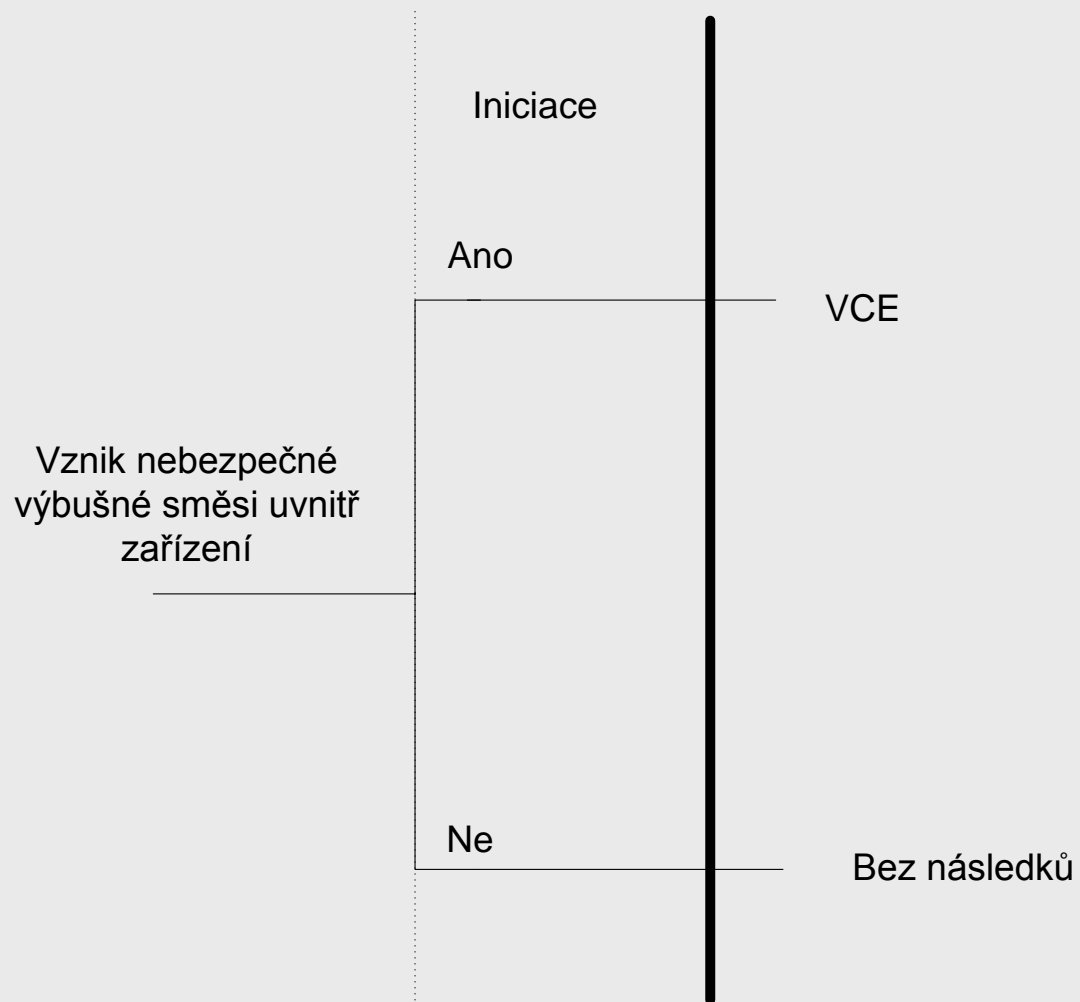
2.3 Odhad pravděpodobnosti rozvinutí scénáře

Strom událostí je založen na binární logice, podle které zařízení zajišťující bezpečností funkci buď pracuje, nebo selže, případně obsluha zasáhne, nebo nezasáhne. Podle počtu bezpečnostních funkcí se tak teoreticky počet havarijních sekvencí stále zdvojnásobuje. Ve skutečnosti je ovšem část havarijních sekvencí nereálná, čímž vzniká redukovaný strom událostí.

Vyhodnocením stromu událostí se získají výsledné frekvence výskytu jednotlivých havarijních následků

Příklad stromu událostí pro únik bioplynu ze zásobníku bioplynové stanice a strom událostí pro rozvinutí nebezpečné události uvnitř zařízení jsou znázorněny na následujících obrázcích.





Strom událostí – rozvinutí nehody uvnitř zařízení

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

- K odhadu následků havárie se využívá nejčastěji fyzikálních modelů, které umožňují předpovědět chování uniklých kapalných a plyných látek ze zařízení a případně také odhadnout následky požáru, výbuchu nebo úniku toxických látek. Vzhledem k chování bioplynu uniklého z bioplynové stanice rozlišujeme tři typické následky havárií: prostý únik bioplynu a jeho rozptýl, únik s okamžitou iniciací (Jet Flame) a únik s opožděnou iniciací (VCE). Dalším typem havárií bioplynové stanice je únik kapalných materiálů.

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

2.3.1 *Prostý únik bioplynu ze zařízení a rozptyl*

Únik z bioplynové jednotky nastane při porušení celistvosti zařízení. Obecně platí, že únik látky ze zařízení je závislý na fyzikálních vlastnostech unikající látky, na fyzikálních podmínkách v procesu (tlak, teplota), na typu úniku látky a na možných reakcích unikajícího materiálu s okolním prostředím. Typicky je únik modelován z důvodu zjištění hmotnostního průtoku a rychlosti unikající látky.

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

Velikost úniku nebezpečné látky se v zásadě může pohybovat od malého úniku provozní netěsností až po úplnou ztrátu integrity zařízení provázenou masivním únikem. Při modelování tohoto typu úniku je důležité si uvědomit, že vlastně řešíme dva modely: první pro změnu vlastností materiálu uvnitř jednotky (modeluje se pomocí stavové rovnice plynu) a druhý pro výtokovou funkci závislou na vnitřních a vnějších podmínkách. Energie obsažená ve formě tlaku se při úniku a expanzi přeměňuje na kinetickou energii a hustota, tlak a teplota se při úniku otvorem mění.

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

Významné je v tomto případě zabránit vzniku nebezpečné výbušné směsi (bioplyn-vzduch) v okolí zařízení, tedy zajistit nepřekročení dolní meze hořlavosti. Z tohoto důvodu se v blízkosti zařízení umísťují detekční systémy metanu. Rozptyl bioplynu do okolí pak obecně závisí zejména na lokálních atmosférických podmínkách.

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

2.3.2 Únik bioplynu ze zařízení s okamžitou iniciací (Jet Flame)

V případě, že po úniku bioplynu dojde k okamžité iniciaci, obvykle dochází k hoření v trysce, tzv. Jet Flame. V takovém případě vzniká dlouhý štíhlý směrově orientovaný plamen s velmi výraznou tepelnou radiací do okolí. Tlakové účinky tohoto typu nehody nejsou významné, tepelný tok však může způsobit poranění nebo škody na okolních objektech.

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

2.3.3 Únik bioplynu ze zařízení s opožděnou iniciací (VCE)

Exploze mraku par nebo plynů (VCE) je velmi závažná nehoda doprovázená výraznými tlakovými účinky vzdušné rázové vlny. Primární podmínkou vzniku VCE u bioplynu je vytvoření oblaku nebezpečné látky schopné výbuchu ve směsi se vzduchem. K tomu dochází především při úniku bioplynu v plynném skupenství v uzavřených prostorech. Po následné inicializaci a za splnění specifických fyzikálních podmínek dojde k přechodu hoření oblaku do detonace. Vzniklá tlaková vlna se šíří do okolí. Cílem modelování nehody typu VCE je určit vzdálenost kolem zařízení, ve které se může při daném úniku vytvořit nebezpečná výbušná směs, a výbuchový přetlak v určitém místě pro případ iniciace.

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

Pro vyhodnocení účinků tlakové vlny se v odborné literatuře velmi často používá **model TNT**, který vypočítává hmotnost TNT ekvivalentní uniklé hořlavé látce a odhaduje přetlak v závislosti na vzdálenosti z příslušné TNT křivky. Tento model je dobře otestován a je v současnosti nejpoužívanější.

Pro vyhodnocení účinků bývá přijato kritérium, které v prostoru havárie vytváří zónu (s výbuchovým tlakem vyšším než 0,03 MPa), v níž předpokládáme stoprocentní mortalitu, a další prostor uvažujeme bez fatálně zraněných. Podobně jsou stanovena kritéria také pro stavby a zařízení.

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

2.3.4 Únik kapalných materiálů ze zařízení

Z hlediska úniku kapalných materiálů uvažujeme zejména únik z reaktorů a nádrží pro zbytky po anaerobní fermentaci. Úplné rozlomení nádrže nebo reaktoru je velmi málo pravděpodobné. Více pravděpodobný je vznik lokální trhliny nebo porucha armatury a tím pádem pomalý únik materiálu.

V takovém případě je především ohroženo vodní prostředí v blízkosti bioplynové stanice. Závažnost nebezpečí je potom dána složením materiálu, jenž je umístěn v reaktoru či v nádrži.

2.3 Odhad následků jednotlivých scénářů na obyvatelstvo, majetek nebo životní prostředí

Cílem analýzy je výpočet množství materiálu, který vyteče z nádrže v daném čase, stanovení vzdálenosti od zdroje úniku, do níž se tekutý materiál rozlije, a rovněž i výpočet množství materiálu, který se dostane do vodních toků (rybníky, potoky, řeky atd.), případně do podzemních vod. Fatální následky na zdraví lidí v okolí ani při masivním úniku kapalného materiálu se nepředpokládá.

2.4 Hodnocení přijatelnosti rizika

Hodnocení přijatelnosti rizika představuje proces, kdy je výsledné riziko (vzešlé z analýzy rizik) porovnáno s hodnotou přijatelného rizika a mělo by být rozhodnuto o nápravných opatřeních. Problematický aspekt představuje absence všeobecného konsenzu na kritériích pro toto hodnocení: Kritéria přijatelného rizika s ohledem na okolní obyvatelstvo nebo pracovníky jsou totiž stanovena jen v některých státech Evropské unie, kritéria přijatelnosti rizik pro životní prostředí jsou pouze doporučena a kritéria přijatelnosti rizik pro materiální ztráty si stanovuje pouze sám provozovatel zařízení.

2.4 Hodnocení přijatelnosti rizika

2.4.1 Kritéria přijatelného rizika s ohledem na okolní obyvatelstvo nebo pracovníky:

Nejčastěji se používá koncept tzv. individuálního nebo společenského rizika. Individuální riziko je riziko pro osobu v určitém místě v blízkosti zdroje rizika (individuální fatalita, individuální riziko zranění, individuální riziko obdržení nebezpečné toxické dávky). Mělo by být doplněno časovým úsekem, ke kterému se míra vztahuje. Tzv. geografické rozdělení rizika je potom míra rizika pro jednotlivce v různých bodech v okolí jeho zdroje (isokřivka rizika).

2.4 Hodnocení přijatelnosti rizika

Společenské riziko je riziko, kterému je vystavena skupina lidí ovlivněných událostí (postižených následky havárie). Je vyjádřeno jako vztah mezi frekvencí a počtem lidí, kteří budou při realizaci určitého rizika určitým způsobem poškozeni. Zachycujeme jej křivkou F-N, která představuje grafický vztah frekvence události (F) a nežádoucích následků (N), jež s touto frekvencí mohou nastat. Jestliže je tedy tímto následkem například úmrtí, pak křivka F-N ukazuje počet nehod za rok, při nichž dojde k N nebo více úmrtím na jednu nehodu (kumulativní rozdělení). Takový graf poskytuje ukazatel toho, kolik lidí je vystaveno rozličným úrovním rizika. Společenské riziko závisí na rozdělení populace v okolí zdroje rizika.

V Evropské unii se obvykle stanovují dvě hodnoty individuálního rizika – pro zaměstnance a okolní obyvatelstvo.

2.4 Hodnocení přijatelnosti rizika

2.4.2 Kritéria přijatelnosti rizik s ohledem na životní prostředí

Existuje několik přístupů (metod), které mohou být pro zhodnocení přijatelnosti rizika pro životní prostředí použity. Jednou z nejpoužívanějších metod je například Environmental Harm Index (EHI), jež dává do vzájemného poměru velikost možné havárie (a to z hlediska rozsahu, závažnosti a trvání) a velikost referenční havárie. Jednoduchým a vysoce konzervativním přístupem je předpoklad, že maximální možná koncentrace v místě havárie bude naměřena v celém posuzovaném ekosystému.

2.4 Hodnocení přijatelnosti rizika

2.4.3 Kritéria přijatelnosti rizik s ohledem na majetek

Pro vyhodnocení maximální očekávané finanční a materiální ztráty, se kterou je třeba skutečně počítat za nejnepříznivějších provozních podmínek, je možné využít metodu **Dow's Fire and Explosion Index (F&EI)**, která u procesní jednotky vyhodnocuje reálné možnosti požáru a exploze. První verze této metody byla vytvořena v roce 1964 společností Dow a od té doby metoda prošla několika aktualizacemi (poslední je 7. vydání – 1994). V současné době patří mezi nejpoužívanější indexové metody v chemickém průmyslu. Umožňuje předpovědět rozsah poškození zařízení i ztráty přerušením provozu. Cílem studie metodou F&EI je kvantifikovat reálně očekávané škody následkem požáru a exploze, identifikovat zařízení, která by mohla přispívat ke vzniku a eskalaci nehody, a prezentovat zjištěné riziko managementu.

2.4 Hodnocení přijatelnosti rizika

Klasifikace procesních jednotek do jednotlivých stupňů nebezpečnosti podle velikosti hodnoty FE Indexu je uvedena v následující tabulce.

Pásma F&E Indexu	Stupeň nebezpečnosti
1–60	nepatrný, malý
61–96	mírný
97–127	střední
128–158	závažný
<u>159 a vyšší</u>	vysoce závažný

Stupně nebezpečnosti podle F&E INDEXU

2.4 Hodnocení přijatelnosti rizika

- Při analýze metodou F&EI se využívá tento postup:
 - volba procesní jednotky pro studii,
 - stanovení materiálového faktoru pro uvažovanou procesní jednotku,
 - výpočet přírážek za obecná a speciální procesní nebezpečí,
 - stanovení faktoru nebezpečnosti procesní jednotky,
 - stanovení indexu požáru a výbuchu (F&E Indexu),
 - stanovení velikosti plochy zasažené účinky požáru/výbuchu,
 - určení nákladů na obnovu objektů v rámci zasažené plochy,
 - stanovení faktoru poškození reprezentujícího stupeň poškození,
 - výpočet hodnoty očekávané ztráty a aktuální hodnoty ztrát,
 - stanovení ztrát z důvodu přerušení výroby a obchodních ztrát.

2.4 Hodnocení přijatelnosti rizika

Výsledkem F&EI analýzy je stanovení zasažené plochy, finanční škody na zařízení a finančních ztrát z přerušení výroby. Podle zkušeností s použitím metody bývají obvykle ztráty z přerušení výroby vyšší než přímé ztráty na zařízení.

2.5 Návrh opatření pro snížení rizika

Cílem této části managementu rizik je omezit identifikovaná rizika přijetím opatření pro eliminaci jejich zdrojů (např. nahrazením nebezpečné látky jinou, která nepředstavuje významné riziko), snížením frekvence výskytu nebezpečných událostí (např. zálohováním kritických prvků zařízení), nebo minimalizací rozvoje nebezpečné událostí (např. zřízením havarijní jímky). Cílem provozovatele je přijmout opatření, která by měla maximální účinek a zároveň představovala co nejefektivněji vynaložené finanční prostředky.

2.5 Návrh opatření pro snížení rizika

Pro stanovení nejvýznamnějších opatření se využívá přístup **ALARA** nebo **ALARP**. Podle těchto přístupů je riziko nutné snižovat až na úroveň, kdy se výdaje potřebné na jeho snížení stanou neúměrnými ve srovnání s mírou rizika, jíž je za ně dosaženo. K tomuto snižování lze přistoupit:

- z hlediska principu ALARA (As Low As Reasonably Achievable), tj. principu snižování rizika na tak nízké, jak je to rozumně (racionálně) dosažitelné, nebo
- z hlediska principu ALARP (As Low As Reasonable Practicable), tj. principu snižování rizika na tak nízké, jak je to rozumně (racionálně) proveditelné (náklady na další snížení rizika jsou neúměrné k přínosu získanému realizací těchto opatření).



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Tato publikace je spolufinancována z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

Byla vydána za podpory projektu OP VK CZ.1.07/2.2.00/28.0302 Inovace studijních programů AF a ZF MENDELU směřující k vytvoření mezioborové integrace.