

4 HAVÁRIE A NEHODY

*Petr Skřehot, Vilém Sluka,
Jan Bumba, Pavel Kučina*

4.1 Mimořádné události

Každé škodlivé působení sil a jevů vyvolaných činností člověka, přírodními vlivy, a také havárie, které ohrožují život, zdraví, majetek nebo životní prostředí, které vyžadují provedení záchranných a likvidačních prací nazýváme mimořádnou událostí. Obecně lze za mimořádnou událost považovat náhlou závažnou událost, která způsobila narušení stability systému s možným ohrožením jeho bezpečnosti nebo existence. Mimořádné události se klasifikují podle mnoha různých kritérií a oborů, ve kterých se tento pojem používá. Obecně lze ale mimořádná události dělit podle působící příčiny na (Wikipedie, on line):

- Mimořádné události vyvolané přírodními jevy:
 - lokální (např. povodeň, zemětřesení),
 - globální (např. supervulkanická katastrofa, pandemie),
 - abiotické (např. vichřice, požáry způsobené přírodními ději),
 - biotické (např. epizootie, přemnožení škůdců).
- Mimořádné události vyvolané lidským činitelem:
 - neúmyslné (např. technická závada, havárie, nedbalost),
 - úmyslné (např. sabotáž, terorismus, útok),
 - vojenské (vojenské napadení státu),
 - nevojenské (nepokoje, sociální či ekonomické příčiny).
- Mimořádné události vyvolané působením společných příčin (např. změna klimatu vlivem produkce skleníkových plynů apod.).

Základní složky integrovaného záchranného systému (IZS) zajišťují nepřetržitou pohotovost pro příjem ohlášení vzniku mimořádné události, její vyhodnocení a neodkladný zásah v místě mimořádné události. Stupeň poplachu vyhláší po příjezdu na místo události velitel zásahu podle poplachového plánu IZS (či HZS kraje). Podle závažnosti mimořádné události se rozlišují tyto poplachové stupně:

- 1. stupeň poplachu IZS,
- 2. stupeň poplachu IZS,

- 3. stupeň poplachu IZS,
- zvláštní stupeň poplachu IZS.

Pokud velitel zásahu vyhlásí nejvyšší, zvláštní stupeň poplachu, či pokud je o to velitelem zásahu požádán, přebírá koordinaci záchranných a likvidačních prací na území kraje hejtman kraje. Pokud mimořádná událost přesáhne území České republiky nebo území kraje, přebírá koordinaci záchranných a likvidačních prací ministerstvo vnitra.

Závažnost mimořádné události lze posuzovat také podle stupně aktivace traumatologického plánu zdravotnické záchranné služby (ZZS). Stupeň mimořádné události, resp. stupeň aktivace plánu se řídí podle počtu postižených na (Wikipedie, on line):

- 1. stupeň – 0 až 10 postižených (jednotlivci),
- 2. stupeň – 11 až 100 postižených,
- 3. stupeň – 101 až 1000 postižených,
- zvláštní stupeň – nad 1000 postižených.

4.2 Nehody v průmyslu

V pracovním životě jsme často svědky vzniku **nehody**. Ačkoli se jedná o nepředvídanou, nežádoucí událost, nemusí vést vždy ke zranění člověka nebo poškození zařízení (majetku). Vždy však vede k narušení/přerušení vykonávané činnosti nebo vzniku nebezpečné situace, která by mohla vést k vážnějším následkům.

Dojde-li při nehodové události k újmě na tělesném nebo duševním stavu člověka, hovoříme o **úraze**. Za úraz se považuje i úpal, úžeh, omrzliny, ve výjimečných případech i infarkt nebo mozková mrtvice, pokud je zjevné (resp. prokáže se), že k tomuto úrazu došlo v důsledku nadměrného fyzického nebo psychického zatížení během výkonu práce, na které organismus postiženého člověka není zvyklý¹. Úrazy bývají způsobeny zpravidla náhlou vnější příčinou, která může být vyvolána působením rizikových faktorů prostředí, anebo nebezpečným jednáním člověka.

Naproti tomu vzniku mimořádných událostí v průmyslu téměř vždy předchází **nebezpečné jednání člověka**, zatímco **nebezpečné podmínky** nehrají z hlediska kauzality tak významnou roli (Encyklopedie BOZP, online).

¹ Za pracovní úraz se pak považuje taková událost, při které došlo u zaměstnance při plnění pracovních úkolů nebo v přímé souvislosti s ním k poškození na zdraví nebo k jeho smrti.

4.2.1 Heinrichův model

Když se v roce 1929 vyšetřovatel americké pojišťovny Travelers Insurance Company H. W. Heinrich zabýval analýzou 50 tisíc různých nehod, havárií a úrazů v průmyslu, všiml si zvláštní skutečnosti, a to, že nehody s různou závažností se v rámci podobných statistických podskupin (např. firem, odvětví apod.) vyskytují v určitém nepřilíh se lišícím poměru. Svou průkopnickou prací² z roku 1930, ve které konstatoval, že na každý těžký pracovní úraz připadá přibližně 29 menších zranění a 300 poruch bez ohlášených zranění, vyvolal velký ohlas. Heinrich tak jako první vyslovil, že „těžkému zranění předchází tisíce skoronehod“ (tzv. první Heinrichův postulát). Grafické vyjádření tohoto poměru se nazývá **Heinrichova pyramida** (viz obrázek 1). O rok později Heinrich ve své další knize³ svou teorii rozšířil o další empiricky zjištěný postulát: „Havárie jsou výsledkem nebezpečných činností a nebezpečných podmínek, přičemž lidé způsobují mnohem více havárií, než nebezpečné podmínky“. K těmto závěrům Heinrich došel díky pečlivému analyzování průběhů nehod a jejich příčin. Vypočetl, že až 95 % z veškerých nehod na pracovištích je způsobeno nebezpečným jednáním, přičemž selhání lidského činitele je přímou příčinou 88 % nehod. Lidské chování spolu s výcvikem a bezpečnostními předpisy proto označil za klíčové faktory ovlivňující vznik nehod. V souvislosti s tím jako první také vypracoval koncepční model pro teoretický rámec průmyslové bezpečnosti a předložil „teorii domino efektu“ vedoucího k havárii, která je ovšem v porovnání s dnešními teoriemi značně zjednodušená.

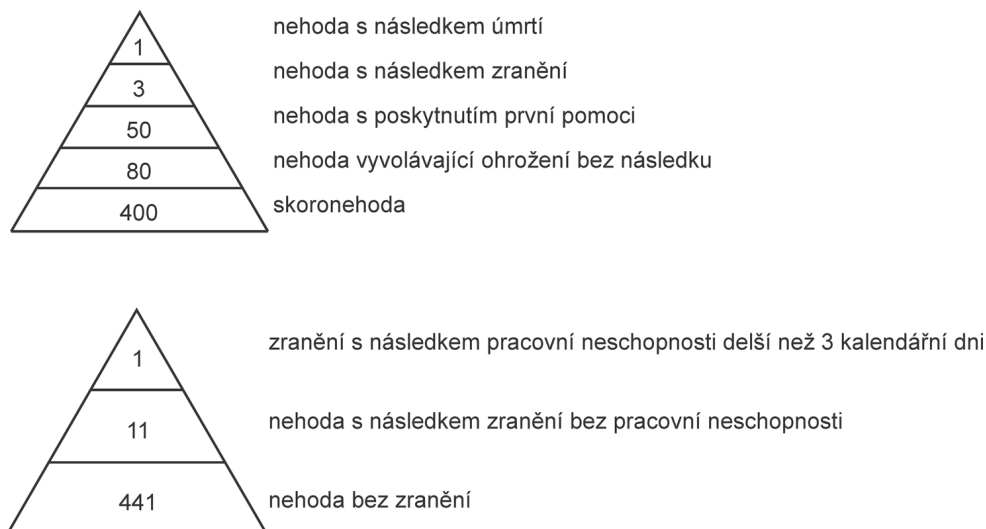


Obrázek 1: Heinrichova pyramida.

Ačkoli byla na základě pozdějších statistických zjištění Heinrichova pyramida postupně upravována (např. Bird, 1969; Tye a Pearson, 1976; HSE, 1993), samotný tzv. první Heinrichův postulát byl zmíněnými pracemi jen neustále potvrzován. Z dnešního pohledu se za hlavní přínos Heinrichova modelu považuje především, že se stal

² Heinrich, H. W. et al. (1930). *Casualty Insurance Principles*, New York: McGraw Hill Book Company.

³ Heinrich, H. W. (1931). *Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach*, 1st Edition. New York: McGraw Hill Book Company – kniha se stala fenoménem a postupně vydána ještě třikrát (v r. 1941, 1950 a 1959).



Obrázek 2: Nehodové trojúhelníky podle Tye (nahore), resp. HSE (dole) (Shadra a Rampal, 1999).

základem pro statistický přístup v identifikaci (a podchycení) nebezpečí ještě před tím, než dojde k závažným následkům. Jeho myšlenka, že žádné bezpečnostní opatření není dokonalé a nemůže zajistit úplnou eliminaci rizik, je základním principem v managementu rizik.

4.2.2 Skoronehody a havárie

Nebezpečným situacím, které mohou vést k nehodám s nežádoucími důsledky, říkáme **skoronehody**. V běžném životě se s nimi setkáváme několikrát denně a v podstatě je vnímáme jako jeho přirozenou součást. Jejich nebezpečnost už ani nevnímáme, protože z hlediska nežádoucích následků mají skoronehody pouze „potenciální“ významnost. Skoronehody nastávají následkem sekvence určitých jevů a skutečností, avšak díky podmínkám, které v dané době převážily, skutečná nehoda nenastala. Zjednodušeně lze říci, že reálný nežádoucí následek nevznikl pouze „náhodnou shodou okolností“; nejčastěji díky podmíněné reakci člověka. V daném okamžiku dotyčný člověk správně uplatnil dostatek své „duchapřítomnosti“ (tedy i reflexy, zkušenosti nebo dovednosti) k tomu, aby se s rizikovou situací úspěšně vyrovnal – jako například při zakopnutí udělal potřebný pohyb k vyrovnání narušené rovnováhy, nebo při ohrožení padajícím břemenem včas uhnul.

Impulzem ke vzniku mimořádné události mohou být **nebezpečné podmínky**, které se vyskytnou v inkriminovaném prostoru pracoviště. Jedná se o působení fyzikálních, chemických nebo biologických činitelů, které mohou ovlivnit jak technickou složku pracovního systému, tak i jednání člověka. Technická složka může být těmito činiteli

postižena v podobě **poruchy** (tj. ztrátou projektovaných vlastností), probíhající procesy pak vybočením z rovnovážného stavu (např. **ujetí reakce**⁴ – tj. nežádoucí ale nikoli kritická změna teploty či tlaku uvnitř procesních zařízení) a aktivní funkční prvky narušením nebo ztrátou svých funkcí (např. vyřazení aktivních ochranných prvků systému). Jedná se tedy o mimořádné události, při kterých některé prvky systému pracují mimo jejich dovolené provozní či konstrukční meze. Vznikne-li vlivem poruchy nebezpečná situace s náhlým vznikem určitého důsledku, který již má potenciál bezprostředně způsobit škodu, jedná se o skoronehodu. Příkladem může být prasknutí těsnění, ke kterému došlo vlivem kolísání tlaku uvnitř vodovodního potrubí. Následkem toho došlo k úniku vody (tj. vznik poruchy), která s ohledem na blízkost vedení elektroinstalace může způsobit zkrat, který by vedl k výpadku napájení čerpadla chladicího média a v konečném důsledku i k explozi chemického reaktoru. Pakliže by se v tomto případě poblíž vodovodního potrubí elektroinstalace nenacházela, neměl by únik vody potenciál způsobit žádnou škodu, takže vzniklá porucha by nepředstavovala žádné významnější riziko. Fungování technického systému by v takovém případě nebylo jejím výskytem nikterak dotčeno, takže závažnost následku této poruchy v podobě vzniklé kaluže by byl zanedbatelný.

Nebezpečné podmínky nebo nebezpečné jednání člověka uvnitř pracovního systému však mohou vést i k závažným následkům v podobě **průmyslové havárie**. Průmyslová havárie je mimořádná událost, při níž dochází k současnému působení určitých objektivních podmínek, které mohou být nebezpečné, jako například stav technologického zařízení, typ, množství a vlastnosti médií, materiálů a akutní jednání zaměstnanců (Encyklopedie BOZP, on line). **Závažná** (průmyslová) **havárie** je pak definována, jako „*mimořádná, částečně nebo zcela neovladatelná, časově a prostorově ohraničená událost, například závažný únik, požár nebo výbuch, která vznikla nebo jejíž vznik bezprostředně hrozí v souvislosti s užíváním objektu nebo zařízení, v němž je nebezpečná látka vyráběna, zpracovávána, používána, přepravována nebo skladována, a vedoucí k vážnému ohrožení nebo k vážnému dopadu na životy a zdraví lidí, hospodářských zvířat a životní prostředí nebo k újmě na majetku*“ (Zákon č. 59/2006 Sb.). Jedná se tedy o událost vyplývající z nekontrolovaného vývoje v průběhu provozu jakéhokoli objektu nebo zařízení, v němž se vyskytuje nebezpečná chemická látka, a jež vede k vážnému bezprostřednímu nebo pozdějšímu ohrožení lidského zdraví, hospodářských zvířat nebo životního prostředí nebo k újmě na majetku uvnitř anebo mimo objekt nebo zařízení.

Příčiny havárií jsou nejčastěji spojeny se selháním lidského činitele, v menší míře pak s poruchou technické složky a zcela výjimečně s působením vnějších faktorů (např. přírodních sil). Blíže o nich bude pojednáno v dalších kapitolách.

4 Tepelně nestabilní reakční systém, který vykazuje zrychlující se zvyšování teploty a reakční rychlosti a v konečném důsledku může vést až ke ztrátě integrity zařízení.

4.2.3 Hodnocení závažnosti průmyslových havárií

Při srovnání odhadovaných škod z přírodních pohrom a škod z některých průmyslových havárií je patrné, že lidské konání může za určitých okolností „dohnat“ dopady přírodních živlů (v řadě případů jim může napomoci). Například, celkové škody z přírodních pohrom v roce 2002 činily 55 miliard USD, z toho povodně v srpnu 2002 v Evropě činily 14,7 miliard USD, škody způsobené závažnou havárií v Baia Mare v Rumunsku činily 250 milionů USD a v Enschede v Holandsku 530 milionů USD. Škody v New Yorku po útoku na Světové obchodní centrum se odhadují na 30 až 70 miliard USD. K tomu přistupují morální škody a ztráty lidských životů. Z výběru havárií v letech 1900 – 1992 (cca 6000 havárií) z databáze MHIDAS vyplynulo, že pokud posuzujeme havárie podle poznání materiálu, který se účastnil havárie, pak pouze v cca 11 % šlo o neznámý materiál. Pokud měřítkem posouzení havárií je nebezpečná vlastnost materiálu, pak pouze v cca 3 % šlo o neznámá rizika. Podle typu havárie pouze v cca 4 % šlo o nezjištěný typ havárie. Pokud byl určován původ havárie, pak v cca 3 % šlo o neznámý původ z hlediska nakládání s nebezpečnými látkami. Poučení těmito zkušenostmi bychom se měli vyvarovat těch skutečností, které mohou vést k závažným haváriím. Pro příklad je zde uvedeno několik celosvětově velmi známých havárií, z nichž řada měla i zásadní dopady do problematiky řízení rizik v celosvětovém měřítku. Stručně je zmiňme níže.

- **Flixborough, Anglie (1. 6. 1974)**
Exploze a požár ve výrobě kaprolaktamu měly za následek 28 mrtvých v závodě, přes 400 zraněných a škodu 412 milionů USD. Příčinou havárie byla nesprávná instalace potrubí.
- **Seveso, Itálie (10. 7. 1976)**
Exploze ve výrobě herbicidů a pesticidů měla za následek vznik toxického oblaku, který obsahoval mimo jiné cca 2 kilogramy dioxinu. Byla kontaminována plocha po větru o rozloze 6 × 1 km. Působení toxického oblaku bylo vystaveno 37 000 lidí, z nichž bylo 736 evakuováno na 6 měsíců; 2000 lidí bylo léčeno na otravu dioxinem a došlo k řadě potratů; 4 % místních zvířat zemřelo, následně 80 000 zvířat bylo preventivně usmrceno, aby se nedostaly do potravinového řetězce. Příčinou havárie bylo nedodržení technologického postupu.
- **Mexico City, Mexiko (19. 11. 1984)**
Při požáru a po následných explozích v LPG terminálu bylo 650 mrtvých, více než 6400 zraněných, asi 200 000 evakuovaných a škoda na majetku byla vyčíslena na 31 milionů USD. Primární příčinou havárie byl únik LPG z nezjištěného zdroje a vznícení a exploze vzniklého výbušného oblaku.
- **Bhópal, Indie (2./3. 12. 1984)**
V továrně na výrobu insekticidů došlo k úniku toxického oblaku, který obsahoval metylisokyanát a menší množství kyanovodíku. Toxický oblak měl délku 8 kilometrů a přešel přes město s 900 000 obyvateli. Bezprostředně po

havárii došlo k 1754 úmrtím a následně k 2 000 úmrtím (některé údaje uvádí až 20 000 úmrtí). Dále bylo 20 000 lidí hospitalizováno, 50 000 lidí utrpělo lehká zranění, po havárii zůstalo cca 11 000 invalidů. Výroba byla zastavena, kompenzační nároky činily 470 milionů USD. V souvislosti s uvedenými škodami je tato mimořádná událost považována za nejhorší havárii v chemickém průmyslu v lidských dějinách a často se s ohledem na pozorované chronické následky u exponovaných osob hovoří o chemicky indukovaném AIDS.

- **Baia Mare, Rumunsko (30. 1. 2000)**
Po protržení hráze odkaliště zařízení na přepracovávání odpadů kyanidovým loužením uniklo cca 100 000 m³ vody s příměsí odpadní horniny, volného kyanidu a kyanidových komplexů těžkých kovů (obsah cca 50 až 100 tun kyanidů). Bezprostřední ohrožení lidí bylo jen dočasné, došlo ale ke kontaminaci místních rumunských toků, a to s dopadem i přes hranice státu. Škody rybářů v prvním odhadu činily cca 250 milionů USD. Příčinou havárie byly konstrukční problémy hráze a přeplnění.
- **Enschede, Holandsko (13. 5. 2000)**
Malý požár na začátku a následné exploze cca 100 tun pyrotechnických výrobků způsobily tlakovou vlnu, která měla destruktivní účinky až do vzdálenosti 30 kilometrů od epicentra. Celkem byla postižena oblast 40 hektarů. Bylo 22 mrtvých, 947 zraněných a bylo evakuováno cca 10 000 obyvatel. Bylo zničeno 293 domů, cca 50 obchodních a průmyslových budov a dále cca 15 000 domů bylo poškozeno. Celkové materiálové škody dosáhly výše 500 milionů USD. Příčinou havárie byla činnost mimo povolení.
- **Toulouse, Francie (21. 9. 2001)**
Síla exploze 200 až 300 tun dusičnanu amonného ve výrobně umělých hnojiv byla ekvivalentní zemětřesení o síle 3,4 Richterovy stupnice. Následkem byl 29 mrtvých a 2442 zraněných. Exploze vyhloubila kráter o hloubce 10 metrů a šířce 50 metrů. Destrukci podlehl 500 domů, očekávané škody jsou miliardy franků. Příčina havárie zatím není zcela přesně známa (Paleček a kol., 2006).

Kritéria vymežující závažnou havárii

Výše uvedené havárie pochopitelně představují jen pomyslný vrchol ledovce (viz Heinrichova pyramida) a jejich následky i příčiny jsou obecně dobře známé. Ovšem mnohem větší počet událostí našťastí nedosahuje tak katastrofických rozměrů, ale i přes to je jim potřeba věnovat na celostátní (nyní celoevropské) úrovni náležitou pozornost. Aby však nebyla evidována a analyzována každá událost, při které dojde k nějakým ztrátám nebo vzniku ohrožení lidí (což by vedlo k zahlcení informacemi), bylo nutné definovat určitá pravidla založená na minimálních rozsazích vzniklých následků. Pro tento účel byla proto definována kritéria vymežující závažnou havárii podle jejích následků. Pro účely zpracování informace o vzniku a následcích závažné

havárie stanovuje na území Evropské unie direktiva Seveso II, která byla do českého právního řádu transponována v podobě zákona č. 59/2006 Sb. o prevenci závažných havárií. Na základě ustanovení uvedených v Příloze 3 tohoto zákona je každé právnické nebo podnikající fyzické osobě uložena povinnost oznámit krajskému úřadu každou závažnou havárii, která je způsobena nebezpečnou látkou nebo jejím únikem v množství stejném nebo převyšujícím 5 % z limitního množství (pro provozovatele zařazeného do skupiny A, resp. B), nebo která má jeden nebo více následků. Mezi tyto následky řadíme:

- Úmrtí člověka.
- Zranění minimálně 6 zaměstnanců nebo ostatních fyzických osob zdržujících se v objektu nebo u zařízení, pokud jejich hospitalizace přesáhla dobu 24 hodin.
- Zranění minimálně jedné osoby mimo objekt nebo zařízení, pokud její hospitalizace přesáhla dobu 24 hodin.
- Poškození jednoho nebo více obydlí mimo objekt nebo zařízení, které se v důsledku havárie stalo neobyvatelné.
- Nutnost provedení evakuace nebo ukrytí osob v budovách po dobu delší než 2 hodiny, pokud celková přepočtená doba evakuace nebo ukrytí osob (počet osob násobený dobou) přesáhla 500 hodin.
- Přerušování dodávky pitné vody, elektrické a tepelné energie, plynu nebo telefonního spojení po dobu delší než 2 hodiny, pokud celková přepočtená doba přerušování dodávky (počet osob násobený dobou) přesáhla 1000 hodin.
- Ekologickou újmu na:
 - Území chráněném podle zvláštních předpisů, tj. zvláště chráněných území a územích soustavy NATURA 2000, vyhlášených pásmech ochrany vodních zdrojů a pásmech ochrany zdrojů minerálních vod o rozloze stejné nebo větší než 0,5 hektar.
 - Ostatním územím o rozloze stejné nebo větší než 10 hektar.
 - Vodním toku o délce stejné nebo větší než 10 kilometrů.
 - Umělém nebo přirozeném útvaru povrchové vody, které nemají statut vodárenské nádrže podle zvláštního právního předpisu, o rozloze dosahující nebo přesahující 1 hektar.
 - Kolektoru, tj. horninového prostředí v pásmu nasycení i mimo ně v místě jímání nebo akumulace podzemních vod nebo znečištění podzemních vod o rozloze stejné nebo větší než 1 hektar.
- Poškození objektu nebo zařízení původce závažné havárie ve výši stejné nebo převyšující 70 milionů Kč.

- Poškození majetku mimo objekt nebo zařízení původce havárie ve výši stejné nebo převyšující 7 milionů Kč.

Tato kritéria vymezují závažnou (průmyslovou) havárii vzniklou u provozovatelů zařazených do skupiny A, resp. B dle zákona č. 59/2006 Sb., ale lze je použít také pro události vzniklé u „nezařazených“ zdrojů rizik, tj. těch, které sice obsahují nebezpečnou chemickou látku, nicméně v množství menším než limitním.

Ohlášení podléhá taktéž každá závažná havárie způsobená nebezpečnou látkou vedoucí k následkům mimo území České republiky. Krajský úřad následně předává informaci o vzniklé závažné havárii (ať už s dopady na území České republiky, nebo i mimo něj) Ministerstvu životního prostředí ČR, které zastupuje Českou republiku vůči Evropské unii a z tohoto titulu má za povinnost informovat okolní státy v případě přeshraničního dopadu havárie a také podávat autorizované hlášení do celoevropského informačního systému MARS.

Major Accident Reporting System – MARS

Tento informační systém soustřeďuje systematizované informace o proběhlých závažných haváriích na území členských zemí EU. Sestává z 15 lokálních databází provozovaných v některých státech Evropské unie a jednoho centrálního systému, který provozuje výzkumné středisko Major Accident Hazard Bureau v italské Ispře. MARS byl zaveden v roce 1993 a od roku 2001 je provozován on line prostřednictvím webového rozhraní.

Každé hlášení v něm uložené obsahuje více než 200 položek, k nimž jsou přiřazeny příslušné identifikační kódy, což dovoluje provádět třídění, statistiku i komplexní analýzy. Pro jednoznačnost a nezaměnitelnost jsou informace vkládané do systému MARS v anglickém jazyce.

Systém je určen nejen ke sběru a zpracování informací, ale také k jejich dalšímu využití v podobě zveřejňování zpráv. MARS umožňuje dvouúrovňové vyhledávání – veřejnost má k dispozici základní informace o událostech (short report), příslušné státní orgány (kompetentní authority) pak rozšířené (full report). „Krátká zpráva“ je určena pro rychlé podání informace o vzniku nehody a „podrobná zpráva“ slouží pro transfer informací jednotlivým státním orgánům, protože obsahuje detailní informace o dané události, její průběh a následky a dále také výsledky vyšetřování včetně zjištěných příčin. Účelem je zajistit dostatek informací pro případné soudní spory, nebo pro přijetí legislativních opatření.

„Krátká zpráva“ obsahuje následující informace (viz obrázek 3):

- Typ nehody.
- Název uniklé látky.

Short Report profile of the selected Accident record

A. Short Report Profile	
Accident code	14
Date of accident	17 December 1994
Type of industry	wholesale and retail storage and distribution (incl. LPG bottling & bulk distrib.,...)
B. Accident Type(s)	
Release	✓
Water contamination	✓
Fire	
Explosion	
Transport	
Other	
Description	During phenol unloading from a ship to a tank in the ground storage area a leakage on board of the ship occurred. The piping were blocked for crystallization of the phenol. The pipe was pressurized with air at 8 bar and heated with warm water. After a pressure decrease down to 5 bar the pipe was unblocked and contemporaneously was released a certain quantity of phenol. The probable cause was the opening of a relief valve or of the vessel deckel (over the ship) which was still under air pressure. Two seamen received phenol on their body (which is very dangerous in contact with the skin) notwithstanding they had gloves, special dresses and protective cask. This was due to the fact that the various protections were not perfectly linked between them. A seaman died one hour later, the other was hospitalised with serious chemical burns. The phenol that escaped over the ship bridge was diluted with water and removed. The quantity of escaped phenol was not so large to create serious pollution.
C. Substance(s) Directly Involved	
Toxic	✓
Exotoxic	
Flammable	
Explosive	
Other	
Description	Phenol C.A.S. code 108-95-2 (stored quantity 9025 tonnes) O-Toluidine C.A.S. code 95-53-4 (stored quantity 1520 tonnes)
D. Immediate Source(s) of Accident	
Storage	✓
Process	
Transfer	✓
Transport	
Other	
Description	not given
E. Suspected Cause(s)	
Plant of equipment	✓
Human	✓
Environmental	
Other	
Description	Pipe blockage inappropriate design of plant/equipment/system Inappropriate action The pipes on board of the ship were not heated, so that the phenol could crystallize.
F. Immediate Effects	
Human deaths	✓
Human injuries	✓
Ecological harm	✓
National heritage loss	
Material loss	
Community disruption	
Other	
Description	1 immediate fatality 1 person hospitalized for chemical injuries Insignificant river water pollution no material damage apart the small loss of phenol. The phenol is very venenous on contact with the skin, this is the reason for the serious consequences on the seamen. No danger for the nearby environment.
G. Emergency Measures Taken	
On-site systems	✓
External services	✓
Sheltering	
Evacuation	
Decontamination	
Restoration	
Other	
Description	Intervention of external fire-fighting services Intervention of external victim-recovery services Police intervention
H. Immediate Lessons Learned	
Prevention	✓
Mitigation	
Other	
Description	The companies working with phenol and similar installations were alerted about the possible dangers in working with phenol. In the future more serious control in the special protective dresses and in the linkage and sealing between the various elements.

Obrázek 3: „Krátká zpráva“ dostupná v systému MARS.

- Bezprostřední příčiny.
- Přímé následky.
- Přijatá havarijní a záchranná opatření.
- Odhalení slabých míst – poučení se (lesson learnt).

„Krátká zpráva“ je zveřejňována jen v případě nejzávažnějších havárií, kterých je jen necelých 10 % ze všech událostí hlášených do systému MARS. V současnosti je v systému dostupných více než 600 „krátkých zpráv“. „Podrobná zpráva“ se však zpracovává o každé události, která splňuje kritéria závažné havárie. Ta zahrnuje značný rozsah informací, včetně potřebných analýz a úvah (MAHB, online).

Analysis, Research and Information on Accidents database – ARIA

ARIA je databáze průmyslových (nejen závažných) havárií provozovaná od roku 1992 francouzským ministerstvem ekologie a trvale udržitelného rozvoje prostřednictvím jím řízené agentury BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles) se sídlem v Lyonu. Databáze byla původně založena pro potřeby francouzských úřadů, ale pro svou dostupnost byla po svém uvedení na internet brzy využívána i uživateli mimo Francii⁵. Databáze soustřeďuje hlášení o událostech, které měly, nebo mohly mít dopady na životy a zdraví lidí, na veřejnou bezpečnost, zemědělství či životní prostředí. Společným jmenovatelem těchto událostí je, že vznikly v souvislosti s průmyslovou nebo zemědělskou činností, kde bylo manipulováno s nebezpečnou chemickou látkou (popř. kdy určitá činnost mohla vést k úniku nebezpečné látky), anebo při přepravě nebezpečných věcí. V současnosti (červen 2009) je v databázi ARIA uvedeno 32 301 nehod a incidentů, přičemž „domácích“ hlášení je zde 25 361. Události, které se staly mimo Francii a jsou v ARIA uvedeny, byly do databáze vloženy kvůli svým mimořádným následkům a také pro specifická poučení, která z nich bylo možné vyvodit (nejstarší událost zde uvedená je z roku 1900) (ARIA, online).

Každé hlášení o události v ARIA má přiděleno identifikační číslo (jedno až pětimístné)⁶ a obsahuje datum a místo, kde k nehodě došlo, informaci o vzniklé nebezpečné situaci (např. únik látky, požár, výbuch, domino efekt apod.), informaci o následcích (např. zamoření atmosféry, znečištění vodního toku, evakuace obyvatelstva apod.) a v neposlední řadě vyhodnocení závažnosti dané události dle kritérií ESIA (tj. množství uniklé látky, následky na lidech, následky na životním prostředí a následky na majetku – viz dále). V databázi lze vyhledávat také podle charakteru průmyslového provozu nebo činnosti, při které k události došlo. Je zde definováno celkem 14 skupin:

⁵ Dostupná na: <<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>>

⁶ Přidělování identifikačních čísel nerespektuje časovou souslednost vzniku události; nejstarší událost zde uvedená nenesé číselné označení 1.



Obrázek 4: Úvodní stránka databáze ARIA (otevře se po zaregistrování uživatele).



Obrázek 5: Možnosti vyhledávání hlášení o událostech v ARIA podle specifických kritérií.

- Zemědělství a potravinářský průmysl.
- Zpracování chemických látek.
- Výroba chemikálií.
- Ostatní chemická výroba.
- Pyrotechnika a výbušniny.
- Výroba a zpracování plastů a pryže.
- Petrochemický průmysl.
- Skladování ropy a ropných produktů.
- Metalurgie a výroba slitin.
- Zpracování dřeva a papírenství.
- Manipulace a skladování.
- Zpracování odpadů.
- Přehrady a hráze.
- Ostatní průmysl a činnosti.


Ne všechna hlášení jsou však svým rozsahem stejná, nicméně v každém hlášení se lze dočíst o průběhu události, o jejích (možných) příčinách a především o rozsahu jejich následků. Také jsou zde popsána přijatá havarijní i následná preventivní opatření a zdůrazněna poučení, která byla z dané události vyvozena. ARIA tedy primárně slouží k informování odborné i laické veřejnosti a provozovatelů se záměrem prezentovat závěry a poučení, aby k podobným událostem již nedocházelo (lesson learnt).

Pokud bychom chtěli vyhledávat události podle závažnosti následků (viz obrázek 5 část „Tri selon les critères de l'échelle européenne des accidents“), umožňuje databáze zkombinovat celkem 7^4 kombinací, tj. celkem 2401 různých kombinací. Výčet některých z nich je uveden v kapitole 4.2.4.


Evropská škála pro hodnocení průmyslových havárií


S ohledem na široké spektrum možných následků průmyslových havárií (na lidi, hospodářská zvířata, majetek a složky životního prostředí) a jejich závažností není jejich hodnocení jednoduché. Podobně jako zavedla Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) Mezinárodní stupnici hodnocení závažnosti jaderných událostí (INES), byla komisí kompetentních autorit států Evropského společenství v roce 1994 navržena Evropská škála pro hodnocení průmyslových havárií (European Scale of Industrial Accidents – ESIA) (viz tabulka 1). Tuto klasifikaci akceptovala a dnes používá řada západoevropských států, jako například Francie, Nizozemí, či Belgie aj.

Tabulka 1: Evropská škála pro hodnocení průmyslových havárií (ESIA) v českém překladu podle (Skřehot a kol., 2006).

		1	2	3	4	5	6
	Množství nebezpečné chemické látky						
Q1	Množství uniklé látky (Q) ve vztahu k limitním hodnotám ^a	$Q < 0,1 \%$	$0,1 \% \leq Q < 1 \%$	$1 \% \leq Q < 10 \%$	$10 \% \leq Q < 100 \%$	1 až 10krát více než limitní hodnota ^a	Více než 10krát více než limitní hodnota ^a
Q2	Množství výbušných látek (Q), které se účastnily na výbuchu (ekvivalent TNT)	$Q < 0,1t$	$0,1t \leq Q < 1t$	$1t \leq Q < 5t$	$5t \leq Q < 50t$	$50t \leq Q < 500t$	$Q \geq 500t$

^a limitní hodnota množství nebezpečné chemické látky uváděná ve směrnici 96/82/ES (SEVESO II)

	Následky na lidech	1	2	3	4	5	6
H3	Celkový počet úmrtí: zaměstnanci: pracovníci externích zásahových složek: veřejnost:	- - - -	1 1 - -	2-5 2-5 1 -	6-19 6-19 2-5 1	20-49 20-49 6-19 2-5	≥ 50 ≥ 50 ≥ 20 ≥ 6
H4	Celkový počet zraněných osob, které byly hospitalizovány déle než 24 hod: zaměstnanci: pracovníci externích zásahových složek: veřejnost:	1 1 1 -	2-5 2-5 2-5 -	6-19 6-19 6-19 1-5	20-49 20-49 20-49 6-19	50-199 50-199 50-199 20-49	≥ 200 ≥ 200 ≥ 200 ≥ 50
H5	Celkový počet lehce zraněných osob ošetřených na místě nebo hospitalizovaných po dobu kratší jak 24 hod: zaměstnanci: pracovníci externích zásahových složek: veřejnost:	1-5 1-5 1-5 -	6-19 6-19 6-19 1-5	20-49 20-49 20-49 6-19	50-199 50-199 50-199 20-49	200-999 200-999 200-999 50-199	≥ 1000 ≥ 1 000 ≥ 1000 ≥ 200
H6	Celkový počet osob bez přísřeší nebo bez práce (zmičené domy, pracoviště):	-	1-5	6-19	20-99	100-499	≥ 500
H7	Počet (N) evakuovaných osob nebo osob uvězněných ve svých domovech po dobu více jak 2 hod násobený časem, během kterého byli uvězněni (osoby x hodiny):	-	N < 500	500 ≤ N < 5 000	5 000 ≤ N < 50 000	50 000 ≤ N < 500 000	N ≥ 500 000
H8	Počet (N) osob bez pitné vody, elektřiny, plynu, telefonu a veřejné dopravy po dobu více jak 2 hod násobený časem, během kterého byli takto postiženi: (osoby x hodiny)	-	N < 1 000	1 000 ≤ N < 10 000	10 000 ≤ N < 100 000	100 000 ≤ N < 1 milion	N ≥ 1 milion
H9	Počet (N) osob, které musely podstoupit rozsáhlé léčení trvající déle než 3 měsíce (po havárii):	-	N < 10	10 ≤ N < 50	50 ≤ N < 200	200 ≤ N < 1 000	N ≥ 1 000

	Následky na životním prostředí	1	2	3	4	5	6
 Env10	Počet volně žijících zvířat, která byla usmrcena, zraněna nebo intoxikována ^b následkem havárie:	$Q < 0,1$	$0,1 \leq Q < 1$	$1 \leq Q < 10$	$10 \leq Q < 50$	$50 \leq Q < 200$	$Q \geq 200$
Env11	Podíl (P) usmrcených chráněných živočichů a rostlin anebo živočichů usmrcených následně v důsledku zničení biomasy v zóně účinku havárie:	$P < 0,1 \%$	$0,1 \% \leq P < 0,5 \%$	$0,5 \% \leq P < 2 \%$	$2 \% \leq P < 10 \%$	$10 \% \leq P < 50 \%$	$P \geq 50 \%$
Env12	Objem (V) znečištěné vody (v m ³):	$V < 1\ 000$	$1\ 000 \leq V < 10\ 000$	$10\ 000 \leq V < 100\ 000$	$100\ 000 \leq V < 1\ \text{million}$	$1\ \text{million} \leq V < 10\ \text{millionů}$	$V \geq 10\ \text{millionů}$
Env13	Plocha (S) povrchové nebo podzemní vody, již je nutno vyčistit nebo speciálně dekontaminovat (v ha):	$0,1 \leq S < 0,5$	$0,5 \leq S < 2$	$2 \leq S < 10$	$10 \leq S < 50$	$50 \leq S < 200$	$S \geq 200$
Env14	Délka (L) vodního toku nebo kanálu, jež je nutno vyčistit nebo speciálně dekontaminovat (v km)	$0,1 \leq L < 0,5$	$0,5 \leq L < 2$	$2 \leq L < 10$	$10 \leq L < 50$	$50 \leq L < 200$	$L \geq 200$

^b intoxikovaným zvířetem se v tomto směru rozumí zvíře, jehož maso již dále není vhodné ke konzumaci

€	Ekonomické ztráty	1	2	3	4	5	6
€15	Škody na majetku podniku (C) v miliónech € ^c	$0,1 \leq C < 0,5$	$0,5 \leq C < 2$	$2 \leq C < 10$	$10 \leq C < 50$	$50 \leq C < 200$	$C \geq 200$
€16	Ztráty na produkci podniku (C) v miliónech € ^c	$0,1 \leq C < 0,5$	$0,5 \leq C < 2$	$2 \leq C < 10$	$10 \leq C < 50$	$50 \leq C < 200$	$C \geq 200$
€17	Škody na majetku a ztráty na produkci mimo podnik (C) v miliónech € ^c	-	$0,05 \leq C < 0,1$	$0,1 \leq C < 0,5$	$0,5 \leq C < 2$	$2 \leq C < 10$	$C \geq 10$
€18	Náklady na vyčištění, dekontaminaci a rekultivaci životního prostředí (C) (v miliónech €)	$0,01 \leq C < 0,05$	$0,05 \leq C < 0,2$	$0,2 \leq C < 1$	$1 \leq C < 5$	$5 \leq C < 20$	$C \geq 20$

^c podle ekonomických ukazatelů platných pro rok 1993









K celoevropskému rozšíření ESIA doposud nedošlo, protože její používání není závazné. Některé státy, zejména nové členské země EU, ji proto dodnes oficiálně neakceptovaly.

Škála obsahuje celkem 18 parametrů rozdělených do čtyř kategorií navržených pro objektivní zhodnocení následků havárie s ohledem na:

- množství (uniklé) nebezpečné chemické látky,
- následky na životech a zdraví osob,
- následky na životním prostředí a
- zhodnocení ekonomických ztrát.

Každý z parametrů zahrnuje šest partikulárních úrovní, prostřednictvím kterých je vyjádřena významnost příslušného následku (ztráty), a to od 1 do 6, přičemž hodnocení 6 představuje největší ztrátu. Výsledkem hodnocení je stanovení indexu závažnosti havárie (Accident's Severity Index), resp. výstup v podobě jednoduchého grafického zhodnocení, který má za cíl podat laické veřejnosti stručnou informaci o závažnosti proběhlé havárie a o jejích dopadech. Jako příklad uvádíme hodnocení havárie v Toulouse, která proběhla v roce 2001 (viz tabulka 2).

Tabulka 2: Ukázka reálného výstupu hodnocení havárie v podniku AZF v Toulouse (2001) pomocí ESIA.

	Množství nebezpečné chemické látky	
	Následky na lidech	
	Následky na životním prostředí	
	Ekonomické ztráty	

4.2.4 Vybrané skupiny nejčastějších havárií

Statistika průmyslových havárií se závažnými následky

Nejčastějšími událostmi v chemickém průmyslu bývají úniky nebezpečných chemických látek nebo přípravků, které mohou vést ke vzniku požáru, výbuchu či k toxickému rozptylu a následkem toho pak k újmě na lidském zdraví, poškození životního prostředí nebo škodám na zařízení či majetku. Nehody v průmyslu vznikají obvykle během určitého pracovního procesu, resp. během jeho jednotlivých fází – při

najíždění nebo odstavování, za běžného provozu, v případě vzniku poruchy, odchylky či jiné nestandardní situace a v neposlední řadě při údržbě. S ohledem na rozmanitost průmyslových procesů a operací i také samotného charakteru jednotlivých provozů nelze podat jednoznačnou statistiku. Udělat si však jistou představu nám umožňuje databáze ARIA, ve které lze vyhledávat nejen počty událostí v jednotlivých typech průmyslových provozů, ale vyhledávat zprávy o jejich vyšetřování. Pro ilustraci níže uvedená tabulka 3 shrnuje zastoupení jednotlivých typů událostí ve struktuře dle ARIA.

Tabulka 3: Statistika událostí zahrnutých v databázi ARIA.

Typ události	Počet událostí v ARIA	Zastoupení v %
Únik nebezpečné látky	14648	45,3
Požár	14578	45,1
Exploze	1891	5,9
Pád materiálu nebo rozlet fragmentů	828	2,6
Znečištění ovzduší	264	0,8
Emise záření nebo únik radioaktivní látky	92	0,3
Celkem	32301	100,0

Níže je pro ilustraci uvedena tabulka 4, ve které jsou shrnuty počty událostí, které se staly ve Francii mezi lety 1970 a 2009, a které prezentují počty událostí podle množství uniklé látky a závažnosti následků na lidech, resp. na životním prostředí, resp. ekonomické ztráty. Jelikož vyhodnocení podle databáze ARIA nabízí celkem 2401 kombinací, je zřejmé, že níže uvedená čísla představují jen nejjednodušší varianty vyhodnocení⁷.

Reprezentativní události

Budeme-li nahlížet na průmyslové havárie všeobecně, je nutné uvažovat určité **reprezentativní události**, se kterými se lze v daném konkrétním průmyslovém odvětví setkávat nejčastěji. Jelikož je tato problematika značně rozsáhlá, byly pro účely této knihy vybrány události z odvětví zpracování chemických látek a pro zajímavost i ze zemědělství a potravinářského průmyslu, kde se často možné následky mimořádných událostí značně podceňují.

⁷ Jako proměnná podle stupnice ESIA byla vždy volena jen hodnota úrovně množství uniklé látky a úroveň příslušného následku v jedné ze tří uvažovaných kategorií. Nebyly tedy uvažovány jejich různé kombinace, například následky na lidech – 2, následky na životním prostředí – 5 a ekonomické ztráty – 1, ale pouze následky v jedné z uvažovaných kategorií (na úrovni 0 až 6) při současném předpokladu následků v ostatních kategoriích na úrovni 0.

Tabulka 4: Počty událostí zahrnutých v databázi ARIA podle jejich následků.

Hodnocení následků		Množství uniklé látky						
		0	1	2	3	4	5	6
Následky na lidech	0	12756	4382	94	50	17	3	0
	1	14113	19557	20	10	1	0	0
	2	14715	717	9	5	0	0	0
	3	14877	270	4	5	1	0	0
	4	14960	99	4	2	0	0	0
	5	14999	28	1	1	1	0	0
	6	15011	7	0	0	0	0	0
Následky na životním prostředí	0	12756	4382	94	50	17	3	0
	1	3302	1384	22	9	1	0	0
	2	340	111	0	0	0	0	0
	3	404	139	1	0	0	0	0
	4	64	31	0	0	0	0	0
	5	5	0	1	0	0	0	0
	6	2	0	0	0	0	0	0
Ekonomické ztráty	0	12756	4382	94	50	17	3	0
	1	286	58	2	1	0	0	1
	2	319	58	2	3	0	0	0
	3	211	63	0	3	0	0	0
	4	44	9	0	0	0	0	0
	5	4	1	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0

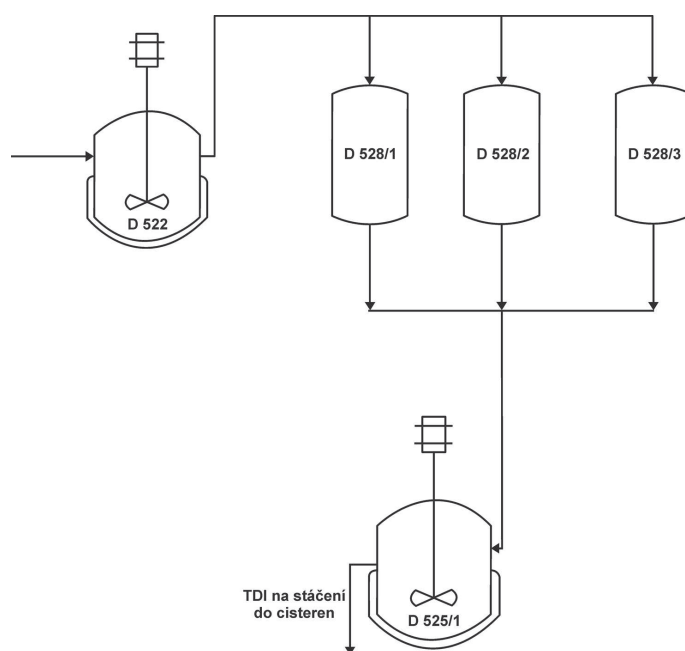
Jako první úvahu při výběru reprezentativní události vezmeme v úvahu konstrukční prvky jednotlivých zařízení, možnost reakce s chemickými látkami nebo materiály, které se v zařízení nacházejí, jejich iniciace od předem neuvažovaných zdrojů (např. statická elektřina), případně vznik koroze (zejména v okolí svarů). Významnou roli při vzniku možných nestandardních situací hraje také změna provozních stavů, kdy jedna technologie využívající určitý druh chemikálie je nahrazena technologií jinou (změna chemikálie v technologii, atd.). Tímto způsobem může docházet kupříkladu k nežádoucím reakcím usazenin uvnitř zařízení nebo potrubí⁸. Zvláštní a poměrně rozšířenou skupinou událostí jsou pak ty, na jejichž počátku stojí „ujetí reakce“,

⁸ Z toho důvodu je nutné na každou novou technologii, i nepatrnou změnu ve výrobě, vypracovat odbornou expertizu, ve které se posoudí například chování dané látky v daném procesu, vznik možných vedlejších produktů, korozivita, fyzikální změny (ohřívání, ochlazování, nárůst tlaku apod.). Tyto posudky je vhodné zpracovat i na změny různých součástí a konstrukčních prvků výroby, aby bylo patrné do jaké míry jimi bude ovlivněna bezpečnost.

kteře není dobře zvládnuto provozním personálem. Tyto události jsou velmi často způsobeny kombinací organizačních pochybení na straně managementu, technickými nedostatky a selháním lidského činitele v důsledku nedostatečného výcviku.

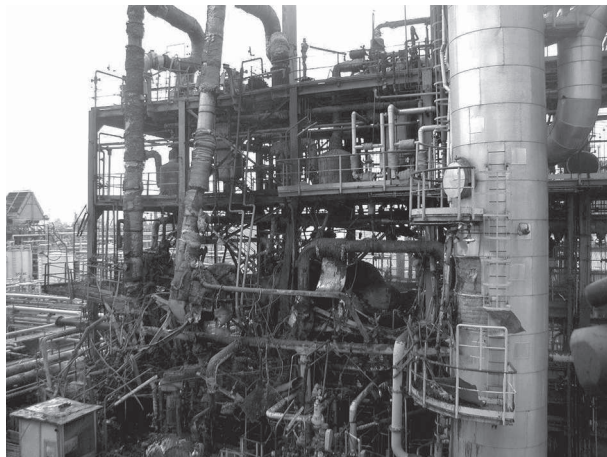
Úniky látek následkem nezvládnutí „ujetí reakce“

Nezvládnutí situací, kdy se systém dostává do metastabilního stavu, tj. kdy nastává postupné vybočení hodnot provozních veličin, jakými jsou teplota, tlak či koncentrace vedlejších produktů mimo povolený rozsah (tzv. ujetí reakce), se zvláště u méně zkušených operátorů nebo v závodech, kde se příliš nedbá na provozní bezpečnost, stává poměrně často. Příkladem této skupiny událostí může být exploze zásobníku s toluendiisokyanátem (TDI), která se stala v chemičce v Mestre v Itálii dne 28. listopadu 2002. Zmíněná výroba se skládala z několika částí, přičemž nehoda vznikla v sekci TD5, kde se finální produkt (TDI) potrubím přečerpával z provozních zásobníků D528 do zásobníků produktů, odkud se plnil do železničních nebo automobilových cisteren a sudů. TDI se zde vyráběl třístupňovou reakcí 2,4-toluendiaminu a fosgenu. Teplota reakční směsi se za normálních okolností postupně zvyšuje z přibližně 80 °C až na 170 °C. Po ukončení reakce je pak reakční směs destilována, což se provádí za sníženého tlaku. Finálním produktem je 18 až 20 % roztok TDI v toluenu. Jelikož je produkt stále značně horký, je z technologických důvodů nutné jej míchat (v reaktoru D522), kde postupně dobíhají chemické reakce, a směs chladne. Po ukončení procesu výroby pak je roztok TDI přečerpán do tří ekvivalentních zásobníků (viz D528) (viz obrázek 6).

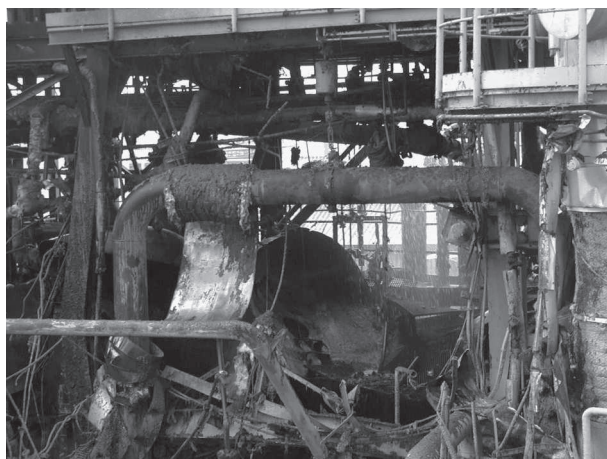


Obrázek 6: Schéma sekce TD5, kde došlo k nehodě.

26. listopadu, tedy dva dny před samotnou nehodou, v 17:40 vypnula obsluha míchadlo reaktoru D522 kvůli nadměrnému hluku převodovky motoru, způsobeného jejím nedostatečným mazáním. Po vypnutí míchadla se teplota v reaktoru D522, kde byla uskladněna směs s TDI, začala postupně zvyšovat, až se ustálila na hodnotě 125 °C. Zjištěné hodnoty nebyly považovány za spolehlivé, protože se vědělo, že měřicí systém byl kalibrován pouze pro měření teplot do 120 °C (za normálních provozních podmínek je zde maximální teplota přibližně do 95 °C). Druhý den v 7:30 byl při plnění zásobníku D522 snížen průtok z 4000 kg.h⁻¹ na 1900 kg.h⁻¹, což vedlo ke snížení teploty směsi na 65 °C. Přibližně ve 12:00 teplota zásobníku D522 opět stoupla, protože technologickým zásahem byl zvýšen výkon odpařovačku, kde vzniká směs, která je přiváděna do zásobníku D522. Následkem toho se průtok zvýšil až na 7000 kg.h⁻¹. Když bylo v 17:30 míchadlo opět spuštěno, měřicí systém už registroval teplotu až za hranicí stupnice měření (tj. nad 120 °C). 28. listopadu ve 4:00 personál zaregistroval zvýšení teploty směsi ve všech třech zásobnících D528, a to až na 142 °C (běžná provozní teplota je při tomto množství směsi jen 105 °C). Ačkoli byly z velínu provoznímu personálu ohlášeny abnormální hodnoty teplot, operátor provozu velín uklidnil konstatováním, že tento stav již přetrvává po dva dny, takže se patrně jedná o chybu měření. Kromě zvýšené teploty řídicí systém nesignalizoval žádné další nebezpečí vyplývající z těchto odchylek, což personál v tomto závěru ještě utvrdilo. V 16:30 se však zásobník 528/2 naplnil ze 60 % a teplota směsi zde rázem stoupla na hodnotu 170 °C. V 18:50 proto bylo přistoupeno k otevření ventilu ve snaze přečerpat část obsahu zásobníku D528/2, v němž se nyní nacházelo 6 m³ směsi (nyní již o teplotě 221 °C!), do vedlejšího zásobníku D525/1. Pokus o přečerpání se však nezdařil, protože směs byla díky špatnému míchání nehomogenní a ucpala tak přečerpávací potrubí. Uvnitř zásobníku D528/2 tak dalších několik hodin, kdy obsluha nebyla schopná situaci řešit, probíhaly nežádoucí chemické reakce, při kterých se vyvíjelo velké množství plynů. Kritickou situaci se provozní personál rozhodl řešit tak, že povolal skupinu techniků externí dodavatelské firmy. Ti se snažili ověřit podmínky uvnitř zásobníku skrz vizuální kontrolní okénko nainstalované na jeho horní části. V té chvíli byl uvnitř zásobníku již hustý bílý kouř. V 19:25 byl za asistence externích techniků proveden druhý pokus o vyčerpání zásobníku, ale i ten byl neúspěšný. Jelikož měřicí systém nebyl vybaven čidlem pro měření tlaku uvnitř zařízení, neměl personál žádnou informaci o nebezpečí výbuchu zásobníků vlivem přetlaku uvnitř zařízení. V 19:30 tak došlo vlivem vysoké teploty a tlaku ke vzniku trhliny v přírubě potrubí vedoucího od zásobníku D528/2, což bylo signalizováno pískavým zvukem a únikem bílého kouře. Po 12 minutách pak došlo k mohutné explozi zásobníku D528/2 a tlaková vlna odmrštila jednoho ze čtyř techniků; ostatní tři pak byli zasaženi hustou, horkou substancí – směsí TDI a toluenu. Jelikož výbuch poškodil okolní potrubí, došlo k úniku 20 tun diatermického oleje, kterým byl zásobník vyhříván, a 1 tuny toluenu. Po několika sekundách se rozpoutal požár, který způsobil zahřátí zásobníku D528/1 (naplněného z 85 %). Jeho konstrukce vysokým teplotám a nárůstu tlaku uvnitř neodolala a ve 20:25 i tento zásobník explodoval (došlo k jevu BLEVE). Vlivem exploze a rozmetání obsahu zásobníku, v němž bylo obsaženo i velké množství oxidu uhličitého, došlo k uhašení hlavního jádra požáru, což zamezilo vzniku dalších domino efektů.



Obrázek 7: Pohled na zničenou výrobní sekci TD5 (zdroj: IMPEL/ARIA).



Obrázek 8: Trosky zásobníku D528/1 (zdroj: IMPEL/ARIA).

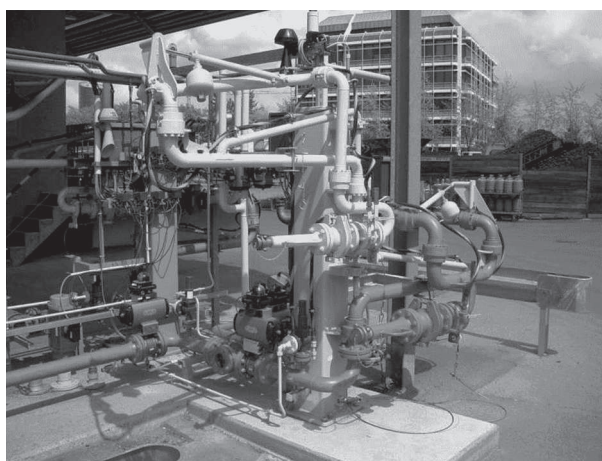
Ačkoli se v nejbližším okolí výrobní sekce TD5 v době nehody vyskytovalo celkem 36 lidí, byli výbuchem zraněni jen čtyři lidé. Výbuch měl devastující účinky, takže vzniklé škody na výrobním zařízení byly značně rozsáhlé – jak ukazují obrázky 7 a 8, byla sekce TD5 zcela zničena.

Analýzou příčin bylo konstatováno, že „ujetí reakce“ bylo způsobeno přerušením míchání směsi v reaktoru D522. Dále bylo konstatováno, že nebyla provedena analýza rizik vztahující se k možným nestandardním stavům výrobního procesu. Díky tomu a díky špatnému přístupu k bezpečnosti ze strany managementu podniku nebyl provozní personál na vzniklé situace vycvičen a neměl k dispozici pracovní instrukce pro řešení možných nestandardních stavů (zvláště se neuvažovala možnost zvýšení teplot v reaktoru D522 a zásobnících D528 nad hodnotou „obvyklou“). V neposlední

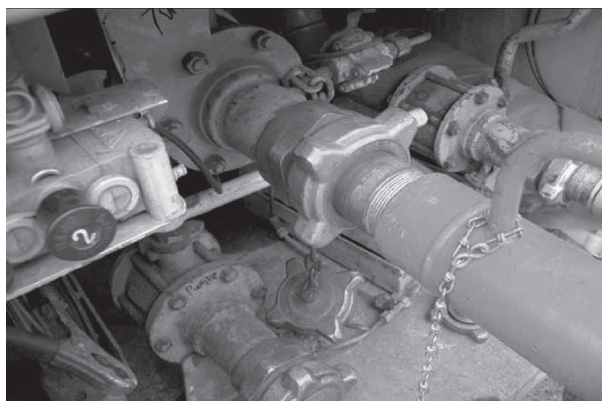
řadě bylo šetřením potvrzeno, že výrobní technologie nebyla dostatečně vybavena všemi potřebnými měřicími přístroji, zejména pak pro měření tlaku uvnitř zásobníků D528, což se výraznou měrou odrazilo na špatně zvoleném způsobu a pomalém řešení vzniklé situace.

Úniky plynů při plnění cisteren a jejich iniciace

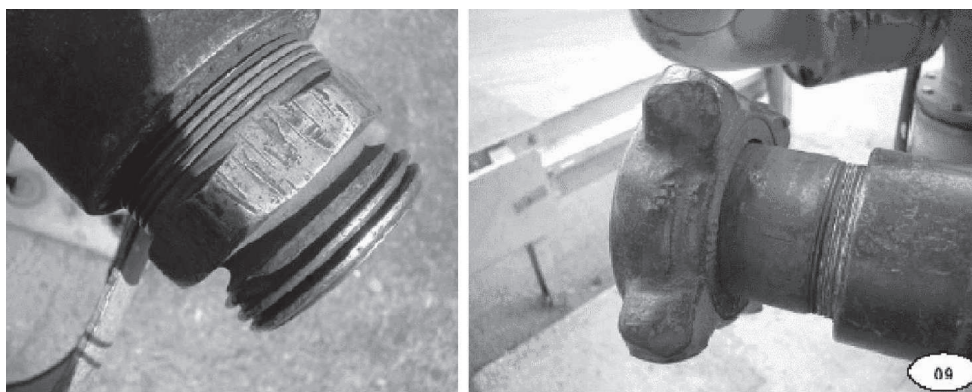
K úniku nebezpečné chemické látky může dojít i při přečerpávání látky z/do cisteren, do barelů a tanků, atd. S ohledem na dosavadní zkušenosti lze prohlásit, že se jedná o činnost, která s sebou nese zvýšenou pravděpodobnost úniku nebezpečných látek, stejně tak i vysoké riziko vzniku úrazu. Příkladem může být událost, která se stala v nejmenované rafinerii v Německu 23. dubna 2004. K nově zrekonstruovanému přečerpávacímu zařízení (viz obrázek 9) byla přistavena automobilová cisterna, aby načerpala LPG. Její řidič byl zkušený a již mnohokrát zde LPG přečerpával. Je obvyklé, že si autocisternu k plnicímu rameni napojuje řidič sám, neboť má pro tuto činnost dostatečnou kvalifikaci. Tak se stalo i v tomto případě. Po napojení plnicího ramene a kontrole napojení bylo zahájeno přečerpávání LPG. V okamžiku, kdy bylo do autocisterny přečerpáno plných 15 tun LPG, došlo ke spontánnímu odtržení přečerpávacího ramene od příruby na autocisterně a k úniku LPG. Bezpečnostní systém plnicího zařízení zafungoval bezvadně a bezprostředně po odtržení ramene automaticky zastavil přívod LPG do plnicího zařízení. I přes to uniklo cca 20 litrů (tj. 10 kg) LPG, který se však okamžitě vznítil (nastal jev Flash fire). Řidič vozidla byl ohněm zasažen a utrpěl závažné popáleniny, na jejichž následky po několika dnech v nemocnici zemřel. Vyšetřování uskutečněné po nehodě ukázalo, že příčinou úniku LPG byla materiálová porucha na spojovacím šroubení. Jak se později ukázalo, ta vznikla dlouhodobou špatnou manipulací s převlečnou maticí spojovacího šroubení a její nedostatečnou údržbou a čištěním. Namísto používání speciálního ručního klíče si řidič



Obrázek 9: Pohled na přečerpávací zařízení po LPG, kde došlo k nehodě (zdroj: ARIA/IMPEL).



Obrázek 10: Pohled na připojení autocisterny a plnicího ramene přečerpávacího zařízení (zdroj: ARIA/IMPEL).



Obrázek 11: Detailní pohled na obě části přírubového spojení, které nese viditelné známky násilného připojování (zdroj: ARIA/IMPEL).

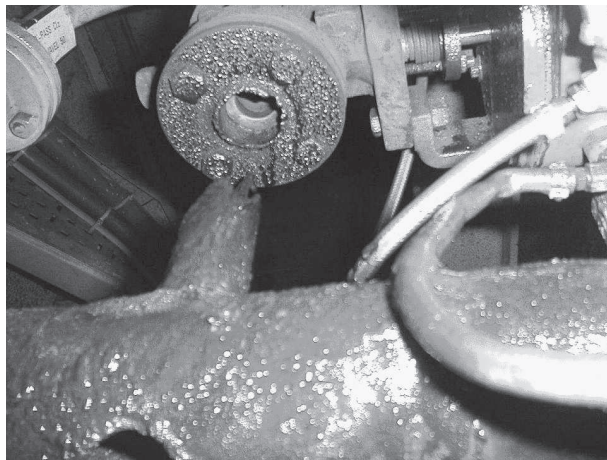
pro dotahování převlečné matice zvykl používat kladivo, čímž si usnadňoval práci. Díky tomuto násilnému způsobu manipulace s převlečnou maticí došlo k odírání závitu (viz obrázek 11) a postupně změně jeho profilu z původně lichoběžníkového na trojúhelníkový. Vzniklá nekompatibilita profilů závitového spojení vedla k tomu, že spojení mezi autocisternou a přečerpávacím ramenem (viz obrázek 10) bylo extrémně slabé a drželo de facto jen na velmi malé ploše závitu. Seběmenší zachvění při přečerpávání LPG pak stačilo k tomu, aby se závit utřhl a došlo k úniku LPG.

Úniky látek z potrubí následkem korozivních účinků přepravovaných látek

Ačkoli není mnoho závodů, které vyrábějí halogenové plyny, tj. chlór a fluor, přesto se zvláště s plyným nebo zkapalněným chlórem můžeme často setkávat. Nedávně

údlosti, které se již několikrát opakovaly, poukázaly na nebezpečnost tohoto plynu. Je dobře známo, že chlór je silně reaktivní plyn, obzvláště pak, je-li přítomna vodní pára. Ačkoli řada ocelí dobře odolává korozivním účinkům plynného chlóru či chlorovodíku, každá netěsnost nebo odchylka ve výrobním procesu vedoucí k jejich kontaminaci je mimořádně nebezpečná. Důkazem toho je i událost z Virus-Thann (Francie), kde v závodě vyrábějícím chlór elektrolyticky z roztoku solanky došlo 13. ledna 2004 k porušení potrubí s následným únikem chlóru do pracovního ovzduší. Ráno 13. ledna 2004 byla kvůli nedostatku chladicí vody elektrolýza vypnuta. Za několik desítek minut byla elektrolytická jednotka opět spuštěna a během fáze najíždění byl vyprodukovaný chlór v souladu s provozními předpisy přepouštěn do neutralizační věže, kde byl spolu s ostatními zbytkovými plyny likvidován. Kvalita chlóru se zde zjišťovala prostřednictvím kontinuálního měření koncentrace vodíku ve vyprodukované plynné směsi. V 9:15 dosáhla koncentrace vodíku v odcházejících plynech hodnoty 1,3 % a chlóru 80 %, takže bylo možné začít se zkapalňováním chlóru v souladu s výrobním postupem. Produkce chlóru v té době činila $1600 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a výstup zbytkových plynů pak $600 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ (v nich je vodík běžně obsažen v koncentraci 3,3 %). Po zvýšení výroby na $2900 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ bylo provedeno manuální měření a bylo zjištěno, že ve zbytkových plynech dosahuje koncentrace vodíku již 4,6 %. Měření bylo zopakováno za dalších 10 minut a v tuto chvíli se vodík nacházel již v koncentraci 6,7 %, což byla hodnota kritická. Jelikož výrobní parametry dovolovaly maximální koncentraci vodíku 4,7 %, bylo provedeno opakované měření, hodnota 6,7 % však byla potvrzena. Operátor se na základě těchto skutečností rozhodl snížit výkon jednotky na $1000 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ve snaze snížit koncentraci vodíku ve zbytkových plynech pod 4,7 %. V 10:10 však byl alarmem ohlášen náhlý pokles tlaku a celá výrobní jednotka byla nouzově odstavena. Automatický systém pak začal převádět veškeré plyny na neutralizaci věž, kde byla většina uvolněného chlóru zlikvidována. V tuto chvíli se však stále nevěděla příčina poklesu tlaku, a proto bylo přistoupeno ke kontrole potrubních tras odvádějícím zbytkové plyny do čisticí jednotky. Obsluha až během 20 minut lokalizovala netěsnost a uzavřela příslušnou potrubní větví. Zjištěny byly celkem tři ruptury, z nichž největší měla 8 centimetrů v průměru (viz obrázek 12). Množství uniklého chlóru bylo odhadnuto na 600 kg. Díky bezvadné funkci automatického havarijního systému se mimo uzavřený objekt výroby dostalo jen několik kilogramů chlóru, takže nedošlo k vážným škodám ani k úrazu nikoho ze zaměstnanců nebo lidí z okolního obyvatelstva.

Analýza události prokázala, že netěsnost a následná ruptura v plném profilu potrubí vznikla následkem korozivních procesů uvnitř ocelových trubek odvádějících zbytkové plyny. Příčinou byla změna ve výkonu elektrolytické jednotky, což mělo za následek zvýšení teploty potrubí, která iniciovala reakci FeCl_3 (což je korozivní produkt, který se usazuje na vnitřní stěně ocelové trubky, v níž proudí plynný chlór – viz obrázek 13) s vodní párou za vzniku chlóru a vodíku. Tato skutečnost byla příčinou zvýšené koncentrace vodíku. Vodík dále reagoval s plynným chlórem za vzniku chlorovodíku, přičemž při této reakci se uvolňuje teplo a zvyšuje se tlak uvnitř



Obrázek 12: Ruptura vzniklá prokorodováním ocelového potrubí vlivem reakce FeCl_3 a vodní páry (zdroj: ARIA/IMPEL).



Obrázek 13: Nánosy korozivních produktů (FeCl_3) v potrubí na dopravu plynného chlóru zjištěného při podobné události ve francouzském Champagner v roce 2005 (zdroj: ARIA/IMPEL).

systemu⁹. Všechny tyto okolnosti pak vedly k protržení prokorodovaného potrubí a úniku plynné směsi. Vyšetřováním se dále prokázalo, že automatický analyzátor koncentrace vodíku nebyl funkční a operátoři tak museli spoléhat pouze na manuální odečty. To vedlo také k jejich pomalé reakci. Je až tristní, že ačkoli bylo na tento nedostatek poukázáno již při posledním přezkoumání analýzy rizik v roce 2003, ne-

⁹ Laboratorní expertízou pak bylo zjištěno, že koroze potrubí, tj. reakce železa a chlóru, nastává již od teploty 130 °C – je tedy nezbytné v těchto provozech zavést měření teploty zbytkových plynů.

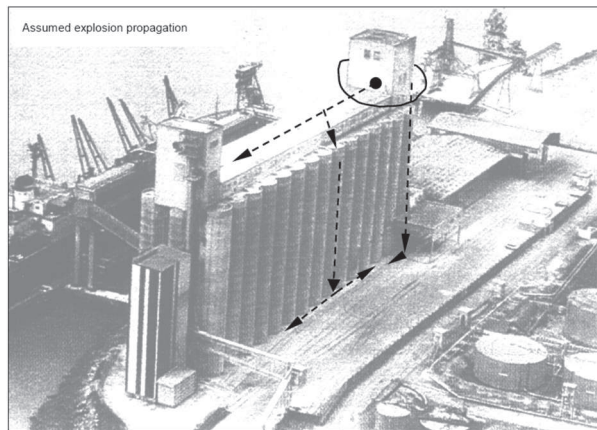
byla provedena žádná nápravná opatření. Z hlediska havarijní připravenosti operátoři nebyli vycvičeni na řešení podobných mimořádných stavů, což se projevilo jejich pomalou reakcí na vzniklou situaci. Díky tomu došlo k prodlevě 20 minut, než byly uzavřeny potřebné ventily.

Exploze prachů při skladování sypkých materiálů

Ačkoli zemědělství a potravinářský průmysl pozornosti bezpečnostním inženýrům uniká, skutečnost je taková, že i zde se můžeme setkávat s mimořádnými událostmi, jejichž následky mohou být fatální. Vyjma skladů průmyslových hnojiv na bázi dusičnanů se toto odvětví ale nebere v průmyslové bezpečnosti v potaz, protože se nebezpečné chemické látky zde apriori nepředpokládají. To však nic nemění na skutečnosti, že se zde můžeme díky souhře náhodných okolností, jakými jsou například počasí, teplota, tlak, vlhkost, biologické procesy (hnití, kvašení, tlení) aj., setkávat s mimořádnými událostmi, jejichž scénáře až příliš připomínají ty, na které jsme zvyklí z procesního průmyslu.

I v zemědělství platí, že nacházejí-li se zde nebezpečné látky, jejichž únik by mohl vést k závažným následkům, je nutné tyto reakce přesně stanovit. Současně je nutné vzít v úvahu i to, že celá řada vedlejších produktů zde může vznikat i v závislosti na změně vnějších klimatických podmínek, takže jejich množství může být z hlediska bezpečnosti významné. Častým důsledkem zejména biologických rozkladných procesů je vznik hořlavých plynů a jejich postupné hromadění v různých uzavřených meziprostorech či skrytých kapsách například uvnitř sil. Plyny vytěsňující kyslík vznikající zejména při procesech kvašení a tlení mohou při intoxikaci člověka způsobovat ztrátu vědomí až jeho smrt. Jedná-li se o skladovací zařízení, skladovací prostory, ať už na produkty alkoholového kvašení, tak zásobníky s alkoholem, je nutné aby byla zajištěna bezpečnost, hlavně z konstrukčního hlediska zásobníku (vyrobeny z materiálu nereagujícího s danou látkou, odolávajícího tlakům, vznikajícím uvnitř zásobníku, byla provedena ochrana proti povětrnostním vlivům, atd.), z hlediska požárně bezpečnostních zařízení (pojistné ventily, zpětné klapky, detekce tlaku uvnitř zásobníku, detekce poklesu tlaku uvnitř potrubí, kontrola plnění zásobníku, detekce koncentrace par – odvětrávací zařízení, popř. inertizace, detekce požáru – stabilní hasicí zařízení, ochrana proti zásahu bleskem a řádné uzemnění, atd.).

Událost, o které zde budeme hovořit, se stala ve středu 20. srpna 1997 kolem 10:15 ráno v Blaye ve Francii, kdy došlo k mohutné explozi zemědělského sila. Podle následků v okolí sila výbuch odpovídal ekvivalentu až 1 tuny TNT (rozbitá okna byla až ve vzdálenostech kolem 500 metrů). Událost nastala při plnění sila obilím z kamionů, kdy došlo k složení pšenice do skladovacích prostor, kde se dopravníkovými pásy přesouval i ječmen, který přivezl předchozí kamion. Patrně tak došlo ke zvýšení koncentrace prachů od různých obilovin a díky jiskře, mechanickému vývinu tepla třením (případně od horkých povrchů), nebo vlivem statického náboje, došlo k zahorení prachu v horní části sila. Požár, resp. menší exploze, se šířily podél horních partií sila, stále více při nich docházelo k víření prachu a postupně se tak



Obrázek 14: Směr šíření výbuchu podél horní části sila a jeho proniknutí do spodních pater (zdroj: ARIA/IMPEL).



Obrázek 15: Pohled na silo po explozi (zdroj: ARIA/IMPEL).

exploze rozšířily i do spodních částí stavby. Celý scénář pak vyústil k mohutné explozi, která nastala v prostředních sektorech vertikálních zásobníků na obiloviny (viz obrázek 14). Jak dokazují i pořizené záběry, výbuch tuto mohutnou stavbu prakticky zcela zničil; došlo k odvržení horní poloviny betonové konstrukce a ke zhroucení celé střední části stavby (viz obrázek 15). V době výbuchu bylo silo téměř zcela naplněné. Následkem výbuchu zemřelo 11 lidí (sedm zaměstnanců sila, tři zaměstnanci subdodavatelů a jeden rybář) a jeden člověk byl těžce zraněn. Objekt byl tak zničen, že deset osob ze zmíněných obětí bylo v jeho troskách nalezeno až po třech dnech po havárii. Nacházeli se v administrativních a technických prostorách, které byly zavaleny velkým množstvím sutin. Oběti uvnitř budov byly nalezeny na svých pracovištích, což vede k závěrům, že neměli absolutně šanci na záchranu evakuací. Také zmíněného rybáře zabily padající sutiny, přičemž tento muž se nacházel již

mimo areál síla. Až do 100 metrů od místa výbuchu byly nalezeny i velké kusy kovů, betonu nebo skla, přičemž až metrové betonové fragmenty se nacházely rozmetány v radiálním směru až do vzdálenosti 50 metrů. Kameny o velikostech 1 kilogram pak byly rozmetány až do vzdálenosti 140 metrů.

Havárie při přepravě nebezpečných chemických látek

Ačkoli je přeprava nebezpečných chemických látek vyjmuta z dílce direktivy Seveso II (tj. zákona č. 59/2006 Sb.), přesto z praxe víme, že nejen svými projevy, ale i specifickými následky si havárie vzniklé při přepravě nebezpečných látek s těmi průmyslovými mnoho nezdají. Jelikož ale doprava probíhá po veřejných komunikacích, protíná obce a města a prochází přes oblasti hustě obydlené stejně jako přes oblasti významné z hlediska ochrany životního prostředí, mohou být následky takového nehody dokonce i mnohem závažnější, než v případě průmyslové havárie. Důvod je zřejmý – na události v průmyslu jsou lidé obvykle připraveni a jsou pro ně přijata příslušná preventivní opatření, kdežto na nehody v dopravě stále ještě připraveni nejsme. Vyjma vybraných nebezpečných věcí uvedených v mezinárodních dohodách RID a ADR mohou být po železničních a silničních dopravních cestách přepravovány jakékoli nebezpečné látky a v jakémkoli množství. Bezpečnost přepravy je tak dána pouze technickým stavem přepravní cesty, technickým stavem vozidla, povětrnostními podmínkami a především pak jednáním řidiče (nebo strojvedoucího), tedy spolehlivostí lidského činitele.

Historie nás již mnohokrát poučila, že přeprava nebezpečných látek je z hlediska bezpečnosti kritickou činností. Často ani následky možné události nejsme schopni domyslet, protože variabilita výše uvedených faktorů je v praxi tak velká, že popsat byt jen jednu přepravní trasu a vyjádřit podél ní jednoznačně veškerá rizika, v podstatě nelze. Jako výstražný příklad lze uvést událost z 11. července 1978, kdy v San Carlos da la Rapita ve Španělsku havarovala v blízkosti kempu autocisterna převážející propylen. Následkem exploze, která vznikla iniciací oblaku propylenových par od vařiče (nastal jev VCE), který táborníci používali, byly až do vzdálenosti 75 metrů zdemolovány všechny budovy a z celkem pěti set osob přítomných v kempu následky havárie nepřežilo 211 lidí (Říman, Skřehot a Bortl, 2007).

Jiným příkladem může být událost z nedávné doby. U severoitalského města Viareggio kolem půlnoci 29. června 2009 vykolejil nákladní vlak převážející zkapalněné hořlavé plyny (viz obrázek 16). Došlo k jejich úniku a následné explozi. Tragédie se stala asi 200 metrů od nádraží, které je v centru padesátitisícového města. Podle vyšetřování příčin události se jednomu z vagonů nejspíš zlomila poloosa, ten pak vykolejil a strhl s sebou další čtyři vozy. Exploze byla tak silná, že se v ulici u nádraží zřítily dva obytné domy a tlaková vlna a letící fragmenty poškodily ještě desítky dalších menších obydlí. Při události došlo zřejmě k jevu BLEVE, protože očití svědkové pozorovali ohňovou kouli vzniklou při jednom z výbuchů. Havárie si vyžádala nejméně třináct lidí a dalších 50 zranila (idnes.cz, online).



Obrázek 16: Jedna z vykolejených zničených železničních cisteren při události ve Viareggio (foto: ČTK, zdroj: portál idnes.cz).

Ve výčtu podobných událostí by bylo možné samozřejmě pokračovat, nicméně fakt, že je bezpečnost při přepravě nebezpečných látek často podceňována, je zřejmá. Přitom na základě statistik je už dlouho známo, že například pravděpodobnost vzniku havárie autocisterny je o několik řádů vyšší, než například havárie zásobníku v chemickém závodě (Říman, Skřehot a Bortl, 2007).

4.3 Radiační nehody

Při každé lidské činnosti – v oblasti průmyslu, zemědělství, zdravotnictví, vědy a techniky, při laboratorní práci jakož i v běžném životě, se občas něco nepovede, rozbije či pokazí a dojde k nehodě. To se samozřejmě může stát i na pracovištích s ionizujícím zářením, kde hrozí vznik radiační nehody. **Radiační nehoda** je každá neplánovaná událost, která zvýší ohrožení osob ionizujícím zářením. Na pracovištích s uzavřenými zářiči se jedná především o nežádoucí ozáření osob, na pracovištích s otevřenými zářiči se jedná především o nekontrolovaný únik radioaktivní látky do pracovního prostředí (např. rozlitím, rozstříknutím, rozbitím lahvičky s radioaktivním roztokem apod.) s následnou kontaminací pracovního prostředí nebo pracovníků. K takovým událostem může dojít při manipulaci s otevřenými zářiči v procesu jejich přípravy, transportu, skladování, aplikaci a likvidaci a nemusí se pochopitelně jednat jen o práci v laboratoři, nýbrž i při manipulaci s jaderným palivem, štěpným materiálem či radioaktivními odpady.

4.3.1 Hodnocení závažnosti radiačních nehod

Jak již bylo uvedeno výše, radiační nehody mohou vznikat v uzavřeném prostředí pracoviště s ionizujícím zářením (kde je radioaktivita zachycena), nebo mohou mít takový rozsah, že radioaktivita pronikne do životního prostředí. Rozsah radiačních nehod na pracovištích se rozlišuje prostřednictvím tří stupňů závažnosti (Ullmann, on line):

- 1. stupeň – drobná radiační nehoda či mimořádná událost, která má omezený a lokální dosah, k jejímu řešení stačí běžné prostředky obsluhujících pracovníků, nedochází k deterministickým účinkům ozáření.
- 2. stupeň – jedná se o závažnější ozáření nebo kontaminaci pracoviště, které však ještě nevyžaduje opatření k ochraně obyvatel a životního prostředí a k jejímu zvládnutí postačí prostředky pracoviště, příp. ve spolupráci s dalšími odbornými pracovníky.
- 3. stupeň – jedná se o závažnou radiační nehodu spojenou s nebezpečným uvolněním radioaktivních látek do životního prostředí, vyžadující zavedení opatření k ochraně obyvatel a životního prostředí. Nejzávažnější radiační nehoda (3. stupně) se označuje též jako radiační havárie. Při těžkých radiačních haváriích může dojít i k letálnímu ozáření osob nacházejících se v místě nehody.

Obecně se pro hodnocení radiačních nehod používá Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí (International Nuclear Event Scale – INES), kterou v roce 1990 zavedly Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) a Agentura pro jadernou energii Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj (OECD/NEA). Jejím primárním účelem je usnadnit komunikaci a dorozumění mezi odborným jaderným společenstvím, sdělovacími prostředky a veřejností v případech výskytu událostí na jaderných zařízeních. Ve světle získaných zkušeností byla v roce 1992 stupnice upřesněna a rozšířena tak, aby byla použitelná při jakékoliv události spojené s radioaktivním materiálem a/nebo s radiací, včetně přepravy radioaktivních materiálů. Nejdříve byla stupnice INES určitou dobu zkušebně používána ke klasifikaci událostí v jaderných elektrárnách. Po té byla rozšířena a upůsobena tak, aby umožňovala použití ve všech zařízeních spojených s civilním jaderným průmyslem. V současné době je úspěšně používána v 60 zemích.

Stupnice zařazuje události do sedmi stupňů: vyšší stupně (4 až 7) se označují jako „havárie“, nižší (1 až 3) „nehody“. Události, které nemají žádný bezpečnostní význam a jsou klasifikovány stupněm 0 (pod stupnicí), se nazývají „odchylky“. Události, které vůbec nesouvisejí s bezpečností, se označují jako události „mimo stupnici“. Struktura stupnice je znázorněna v tabulce 5 i s uvedením klíčových slov. Použité výrazy nejsou považovány ani za přesné, ani za definitivní. Události se posuzují podle tří rozdílných dopadů reprezentovaných jednotlivými sloupci: dopad do okolí, vliv na jaderné zařízení a dopad na hloubkovou ochranu. První sloupec se vztahuje k událostem, jejichž důsledkem je únik radioaktivity do okolí. Protože představují jediný možný přímý dopad na obyvatelstvo, jsou pochopitelně v popředí zvláštní pozornosti. V nejnižším bodě tohoto sloupce je vyznačen únik, který vystaví kritickou skupinu obyvatelstva odhadnuté radiační dávce číselně přibližně rovné jedné desetíně ročního dávkového limitu pro obyvatelstvo. Taková událost je klasifikována stupněm 3. Tato dávka obvykle představuje jednu desetinu průměrné roční dávky od přírodního pozadí. Nevyšší stupeň představuje velkou jadernou havárii s rozsáhlými následky na zdraví a životní prostředí. Druhý sloupec pojednává o dopadu události

Tabulka 5: Mezinárodní stupnice pro hodnocení závažnosti událostí v jaderných zařízeních (pro pohotovou komunikaci o bezpečnostním významu událostí).

Stupeň	Klasifikace	Oblast dopadu		Povaha události		Příklady
		Dopad vně zařízení	Dopad uvnitř zařízení	Dopad na ochranu do hloubky		
7	Velmi těžká havárie	Rozsáhlý únik: široce rozšířené dopady na zdraví a životní prostředí			Únik značné části radioaktivních materiálů z velkého zařízení (například z aktivní zóny energetického reaktoru) do okolí. Typicky obsahující směs radioaktivních štěpných produktů s dlouhými i krátkými poločasy rozpadu (s aktivitou přesahující desítky tisíc TBq 131I). Takový únik by vyústil do možnosti akutních zdravotních účinků; zpožděné zdravotní účinky v rozsáhlé oblasti s možností zasažení více než jedné země; dlouhodobé důsledky pro životní prostředí.	Jaderná elektrárna, Černobyl, SSSR, 1986
6	Těžká havárie	Závažný únik: Praviděpodobné nasazení veškerých plánovaných protipatření			Únik radioaktivních materiálů do okolí (s aktivitou tisíce až desítky tisíc TBq 131I). Takový únik by pravděpodobně vyústil do plného uplatnění protipatření zahrnutých v místních havarijních plánech ke zmenšení pravděpodobnosti zdravotních následků.	Přepřeracovatelský závod, Kys'tym, SSSR, 1957
5	Havárie s rizikem vně zařízení	Omezený únik: Praviděpodobné částečné nasazení plánovaných protipatření	Vážné poškození aktivní zóny reaktoru/radiačních bariér		Únik radioaktivních materiálů do okolí (s aktivitou stovek až tisíců TBq 131I). Takový únik by pravděpodobně vyústil do částečného uplatnění protipatření zahrnutých v místních havarijních plánech ke zmenšení pravděpodobnosti zdravotních následků. Těžké poškození jaderného zařízení. Může to zahrnovat těžké poškození velké části aktivní zóny energetického reaktoru, velká havárie s kritičností, nebo velký požár či exploze uvolňující velké množství radioaktivity uvnitř zařízení.	Přepřeracovatelský závod, Windscale Pile, Velká Británie, 1957 Jaderná elektrárna, Three Mile Island, USA, 1979
4	Havárie bez vážnějšího rizika vně zařízení	Ménšší únik: Ozáření obyvatelstva řádově v povolených mezích	Významné poškození aktivní zóny reaktoru/radiačních bariér/smrtelné ozáření zaměstnanců		Únik radioaktivních materiálů do okolí s následkem dávky pro kritickou skupinu v řádu několika mSv. S takovým rozsahem úniku by pravděpodobně obecně nebyly spojovány žádné vnější ochranné zásahy s výjimkou místní kontroly potravin. Významné poškození zařízení. Taková havárie může zahrnovat poškození vedoucí k velkým potížím uvnitř zařízení, jako je částečné tavení aktivní zóny v energetickém jaderném reaktoru a srovnatelné události v zařízeních bez reaktoru. Takové ozáření jednoho nebo více zaměstnanců, že je vysoká pravděpodobnost rychlého úmrtí.	Přepřeracovatelský závod, Windscale Pile, Velká Británie, 1973 Jaderná elektrárna, Saint Laurent, Francie, 1980 Práce s kritickým souborem, Buenos Aires, Argentina, 1983

3	Vážná nehoda	Velmi malý únik: Ozáření obyvatelstva zlomkem povolených limitů	Velké rozšíření kontaminace/akutní účinky na zdraví zaměstnanců	Téměř havarijní stav; neuzšaty žádné bezpečnostní bariéry	Únik radioaktivních materiálů do okolí s následkem takového ozáření zaměstnanců, že by skupinu v řádu desetin mSv. Při takovém úniku nemusí být vnější ochranná opatření zapotřebí. Událost uvnitř zařízení s důsledkem takového ozáření zaměstnanců, že by způsobilo akutní zdravotní následky a/nebo událost s výsledkem těžkého rozšíření kontaminace, například několika tisíc TBq aktivity uvolněné v sekundárním kontejnmentu, kde lze materiál vrátit do vyhovujících skladovacích prostor. Nehoda, při níž by další porucha bezpečnostních systémů mohla vést k havarijním podmínkám, nebo situace, ve které by nebyly bezpečnostní systémy schopné zabránit havárii, pokud by nastaly určité iniciační události.	Jaderná elektrárna, Vandellós, Španělsko, 1989
2	Nehoda	Významné rozšíření kontaminace/nadměrné ozáření zaměstnanců	Nehoda s významným poškozením bezpečnostních opatření	Nehoda s významným selháním bezpečnostních opatření, ale se zbývající dostatečnou hloubkovou ochranou k vypořádání se s dodatečnými poruchami. To zahrnuje události, kde by skutečné události byly klasifikovány stupněm 1, ale odhalují významné dodatečné organizační nedostatky nebo nedostatky v kultuře bezpečnosti. Událost, která vyústila v dávku pracovníkovi, pokračující povolený roční limit a/nebo událost, která vede k přítomnosti významných množství radioaktivity uvnitř zařízení v prostorách, kde to projekt nepředpokládal, a které vyžadují nápravná opatření.		
1	Anomálie		Anomálie od schváleného provozního režimu	Anomálie od schváleného režimu, ale se zbývající významnou hloubkovou ochranou. K tomu může dojít v důsledku poruchy zařízení, lidské chyby nebo nedostatků postupů a mohou nastat v jakékoliv oblasti, kterou stupnice pokrývá, například provoz jaderné elektrárny, transport radioaktivního materiálu, manipulace s jaderným palivem a skladování odpadů. Mezi příklady patří: porušení technických podmínek nebo přepravních předpisů, nehody bez přímých důsledků, které odhalí nedostatky v organizačním systému nebo kultuře bezpečnosti, defekty v potrubí, menší než předpokládá kontrolní program.		
0	Odhylka	Žádný bezpečnostní význam			Odhylky, kde nejsou porušeny limity a podmínky provozu, a na které se, v souladu s adekvátními postupy, přiměřeně reaguje. Mezi příklady patří: jednoduchá náhodná porucha v redundantním systému, odhalená v průběhu periodických kontrol nebo zkoušek, plánované rychlé odstavení reaktoru, které probíhá normálně, neúmyslná aktivace bezpečnostních systémů, bez významných následků, úniky v rámci LaP, menší rozšíření kontaminace uvnitř kontrolovaného pásma bez širších důsledků pro kulturu bezpečnosti.	

uvnitř jaderného zařízení. Tato kategorie pokrývá interval od stupně 2 (kontaminace a/nebo nadměrné ozáření zaměstnance) do stupně 5 (vážné poškození aktivní zóny reaktoru nebo radiačních bariér). Všechna jaderná zařízení jsou projektována a provozována tak, že postupné zapojování bezpečnostních systémů zabraňuje většímu dopadu na okolí i na vlastní jaderné zařízení. Obecně bude rozsah dostupných bezpečnostních systémů odpovídat možnému potenciálu dopadu události v zařízení. Až porušení všech bezpečnostních systémů může vést k podstatným důsledkům pro okolí a vlastní jaderné zařízení. Zajištění těmito bezpečnostními systémy se označuje jako „hloubková ochrana“. Třetí sloupec se vztahuje k nehodám, při nichž byla narušena opatření hloubkové ochrany. Do rozsahu tohoto sloupce spadají stupně 1 až 3. Událost, která má dopad popisovaný ve více sloupcích, je vždy hodnocena nejvyšším nalezeným stupněm. Události, které nedosáhnou prahové hodnoty v žádné ze tří oblastí, jsou hodnoceny pod stupnicí stupněm 0. Tabulka 5 udává také typické popisy událostí pro každý stupeň a doplňuje je příklady hodnocení událostí, ke kterým na jaderných zařízeních došlo v minulosti (SÚJB, 2001).

Jaderné havárie a nehody s otevřenými zářiči

Jednou z typických situací, kdy může dojít k vážné radiační nehodě s otevřenými zářiči, je neopatrná práce se štěpným materiálem (především s uranem ^{235}U nebo plutoniem ^{239}Pu), zvláště pokud je ve vyšších koncentracích – je tzv. obohacený. Pokud je k dispozici větší množství takového materiálu, může dojít k překročení kritického množství a spuštění řetězové štěpné reakce, při níž vznikne velmi silný záblesk s emisí neutronového záření a záření gama. Osoby nacházející se v místě nehody obdrží velmi vysoké dávky záření, nezřídka letální. V laboratořích a jaderných provozech se stalo několik nehod tohoto druhu.

V novější době se jednalo například o havárii v závodě na obohacování jaderných materiálů Tokai-Mura v Japonsku, která se stala 30. září 1999. Tři pracovníci zde připravovali jaderný materiál v roztoku oxidu uranu (obohaceného na více než 18 % ^{235}U) a kyseliny dusičné. Nedopatřením přilili do reakční kádě více roztoku uranu, čímž vzniklo nadkritické množství. Modravý záblesk signalizoval spuštění řetězové reakce. Dva pracovníci stojící nejbližše zemřeli, třetí přežil, ale vznikla u něj akutní nemoc z ozáření. Řada radiačních nehod vznikla u jaderných reaktorů.

Středně těžká havárie (stupeň 5 podle INES) vznikla 28. března 1979 v jaderné elektrárně Three Mile Island na říčním ostrově poblíž Harrisburgu v Pensylvánii v USA. Vlivem poruchy čerpadla sekundárního chladicího okruhu došlo ke vzrůstu teploty a tlaku v primárním okruhu, otevřel se přetlakový ventil a reaktor byl nouzově zastaven. Pojistný ventil se však zablokoval v otevřené poloze, tlak v primárním okruhu klesl, některá náhradní čerpadla vodního chlazení selhala, zbylým teplem začala voda vřít, prasklo několik palivových článků. Do okolí unikla radioaktivní voda, pára a plyny – bylo zamořeno široké okolí elektrárny a evakuováno muselo být několik tisíc lidí. Podobně jako později v Černobyli, viníci nehodu několik dní zcela tajili; na rozdíl od Černobyli se však zainteresovaným kruhům i později

skutečný rozsah havárie podařilo utajit, takže spolehlivé údaje o množství uniklých radioaktivních látek dodnes chybí.

Havárie v Černobylu

Dosud nejtěžší radiační havárie (7. stupeň podle INES) se stala 26. dubna 1986 v jaderné elektrárně v Černobylu. Při destrukci jaderného reaktoru došlo k rozsáhlé kontaminaci životního prostředí radioaktivními štěpnými produkty a k ozáření 232 osob vysokými dávkami záření (jednotky až desítky Sv), spojenými s deterministickými účinky a akutním poškozením zdraví; v 31 případech se jednalo dokonce o účinky letální (z toho 2 pracovníci byli usmrceni přímo při výbuchu reaktoru, avšak i kdyby se tak nestalo, obdrželi by dávku záření neslučitelnou se životem. Dalších mnoho tisíc osob obdrželo dávku záření desítky až stovky mSv, u níž se dá očekávat zvýšený výskyt stochastických účinků. Přes veškerou závažnost a lokální tragičnost černobylské havárie se však její důsledky naštěstí ukázaly být podstatně menší, než se zpočátku zdálo. Černobylská havárie se však každopádně stala určitým mezníkem v jaderné energetice a radiační ochraně. Vedla k podstatnému zpřísnění bezpečnostních předpisů a norem radiační ochrany nejen v jaderné energetice, ale v celé oblasti aplikací ionizujícího záření. Tato událost vedla také k široké celosvětové diskusi o úrovni způsobu řízení jaderných zařízení, chování lidí a odpovědnostech všech zainteresovaných osob (od zaměstnanců, manažerů provozovatelů až po národní regulátory a vlády) a zrodil se do té doby neznámý pojem – **kultura bezpečnosti** (blíže viz kapitola 5.6).

4.3.2 Radiační nehody s uzavřenými zářiči

I s uzavřenými zářiči může dojít k vážným radiačním nehodám, pokud je jejich intenzita záření (dávkový příkon) patřičně vysoká. Potenciálně nebezpečnými zářiči z tohoto hlediska jsou zvláště silné radioterapeutické ozařovače či průmyslové zářiče užívané například pro defektoskopii či sterilizaci. Při neopatrné manipulaci s takovými nechráněnými zářiči může dojít k vnějšímu ozáření organismu vysokými radiačními dávkami buď celotělově (s následkem v podobě akutní nemoci z ozáření a zvýšeným výskytem stochastických účinků), nebo lokálně (s následkem v podobě popálenin).

Tragická radiační nehoda tohoto druhu se stala v září 1987 v městě Goiania oblasti Goias v Brazílii, kde z radioterapeutického ozařovače určeného k vyřazení byl neodborně a nekontrolovaně vyjmut cesiový zářič ^{137}Cs o aktivitě cca 50 TBq. Neznalí pracovníci jej vzali domů, rozebrali a pak prodali do šrotu. Pracovníci skladu odpadových surovin zářič dále rozmontovali a jeho jednotlivé části vzali domů (líbilo se jim modravé světélkování!), kde si s ním dokonce hrály i děti. Výsledkem bylo pět úmrtí na akutní nemoc z ozáření a 20 osob mělo lokální radiační popáleniny (většinou na ruku).

Další radiační nehody, některé s letálními následky, vznikly při krádežích zářičů. Je dokonce známo i několik případů kriminálního zneužití zářičů proti osobám (vraždy či pokusy o vraždu). Pachatelé a oběti těchto radiačních incidentů jsou většinou osoby podílející se na špionážní činnosti a organizovaném zločinu. Řada radiačních nehod se stala přexponováním pacientů při radioterapeutickém ozařování v důsledku chybné kalibrace ozařovače či špatného ozařovacího plánu. Vážná nehoda tohoto druhu se stala v prosinci 1990 ve fakultní nemocnici v Zaragoze ve Španělsku, kde vinou špatné kalibrace lineárního urychlovače došlo k sedminásobnému přexponování ozařovaných pacientů, následkem čehož na akutní nemoc z ozáření zemřelo 18 pacientů a dalších 9 utrpělo vážná radiační poškození.

Je třeba s uspokojením ale konstatovat, že v současné době k radiačním nehodám dochází poměrně zřídka. Oblast aplikací ionizujícího záření je bedlivě sledována, koordinována a zabezpečena jako snad žádný jiný obor lidské činnosti. Pracují zde většinou odborně fundovaní lidé, dobře obeznámení se zásadami práce s radioaktivitou a ionizujícím zářením i s principy radiační ochrany (Ullmann, online).

4.4 Havarijní scénáře při úniku nebezpečných chemických látek

4.4.1 Scénář události

Každá mimořádná událost spojená s unikem nebezpečné chemické látky předpokládá realizaci existujícího nebezpečí, tedy uplatnění zdroje rizika. Sled událostí, které po iniciaci tohoto „škodlivého“ potenciálu nebezpečí nastanou, a které ve svém důsledku vedou k nežádoucím následkům, nazýváme **scénář události**.

Scénář je nutno vnímat jako posloupnost všech událostí, které vedou k určitému typu havárie s příslušnými charakteristickými projevy. Jedná se tedy o variantní popis rozvoje havárie, zahrnující popis rozvoje příčinných a následných na sebe navazujících a vedle sebe i posloupně probíhajících událostí, a to jednak spontánně probíhajících, a jednak událostí probíhajících jako činnosti lidí, které mají za účel zvládnout průběh havárie. Iniciační událost je rozvíjena dalšími mezilehlými událostmi až do koncového bodu scénáře. Zdroj rizika ve stavu odpovídajícímu koncovému bodu scénáře působí na své okolí určitými fyzikálními účinky (projevy), kterým odpovídají určité následky (dopady). Rozvíjející události scénáře, které ve scénáři předcházejí vzniku nehody, jsou selháním nebo úspěchy preventivních ochranných bariér. Věrohodnost scénářů je založena na inženýrském úsudku opírajícím se o znalosti fyzikálních a chemických zákonů a na zkušenostech získaných vyhodnocením nehod proběhlých v minulosti (Encyklopedie BOZP, online).

4.4.2 Průběh nehodového děje

Každá činnost, jejímž předmětem jsou chemické látky a přípravky s definovanou nebezpečnou vlastností, zejména jejich výroba, dovoz, vývoz, používání, skladování, balení, označování, vnitropodniková přeprava a zneškodňování, je potenciálně nebezpečnou činností, která může vést k nehodovému ději. Všeobecně tyto činnosti nazýváme **nakládání s nebezpečnými chemickými látkami** (zákon č. 59/2006 Sb.).

Nebezpečné manipulace s chemickými látkami

Vílches a kol., kteří analyzovali celkem 5325 průmyslových havárií proběhlých mezi lety 1900 až 1992, zjistili, že drtivá většina havárií spojených s významným únikem nebezpečných látek vzniká při sedmi činnostech s vysokým potenciálem nebezpečí, jejichž výčet a zastoupení na celkovém podílu havárií je následující (Vílches a kol., 1995):

- Přeprava látek (39,1 %).
- Zpracování látek v průmyslových technologiích (24,5 %).
- Skladování látek ve velkokapacitních zásobnících (17,4 %).
- Vykládání/nakládání látek (8,2 %).
- Používání látek a výrobků v domácnosti nebo pro komerční účely (5,8 %).
- Manipulace s látkami ve velkokapacitních skladištích (3,8 %).
- Ukládání odpadu (1,2 %).

Z výše uvedeného plyne, že nejvíce havárií vzniká při přepravě nebezpečných látek. Z celkového počtu těchto havárií došlo podle Vílchese k úniku nebezpečné látky ze železniční cisterny ve 27 % případů (viz obrázek 17), z automobilové cisterny ve 22 % případů (viz obrázek 18), z přenosného přepravního kontejneru v 16 % případů, z potrubí v 15 % případů, z lodi nebo vlečného člunu v 17 % případů a zbylých 3 % z jiných typů přepravních zařízení.

Příčinou vzniku havárií při přepravě nebezpečných látek může být člověk, dopravní prostředek, dopravní cesta, dopravní technologie, dopravní informace nebo povětrnostní vlivy. Dlouhodobé statistické údaje od různých autorů se shodují v tom, že hlavní příčinou je selhání lidského činitele – a to zhruba v 85 %. Dopravní cesta a prostředí je primární příčinou v 10 % dopravních nehod a vozidlo, resp. jeho technický stav, je primárním zdrojem 5 % dopravních nehod. Často se na vzniku dopravních nehod podílí více faktorů současně (Ledvinová, 2002).

Všeobecně může jakákoli havarijní událost bez ohledu na původ, typ zařízení nebo vykonávanou činnost, vést k jednomu z pěti hlavních následků podle toho, do jakého prostředí látka uniká, a jakých procesů se zde účastní.



Obrázek 17: Srážka vlaků poblíž Minotu v Severní Dakotě v USA, při níž uniklo několik desítek tun amoniaku (18. ledna 2002) (zdroj: Pitt, 2004).



Obrázek 18: Nehoda automobilové cisterny převážející 23,6 tun kapalného amoniaku v Nanchongu v provincii Sichuan v jihozápadní Číně (18. prosince 2006) (zdroj: People's Daily Online, 2006).

Jedná se o:

- Toxický rozptyl (vzniká přibližně ve 21 % případů).
- Požár (vzniká přibližně ve 21 % případů).
- Výbuch (vzniká přibližně ve 12 % případů).
- Znečištění ovzduší (vzniká přibližně v 17 % případů).
- Znečištění vody (vzniká přibližně v 45 % případů) (Bernatík, 2006).

Pokud jde o detailní pohled na havárie s následkem úniku plynné látky do atmosféry, pak podle zjištění Vílcheze lze odvodit, že v přibližně 97 % případů vzniká oblak těžkého plynu, a pouze ve 2 % případů oblak lehkého plynu, resp. v 1 % případů oblak neutrálního plynu (Vílches a kol., 1995). To má zásadní vliv nejen na charakter

a průběh rozptylu, ale především na dosah „zraňujících“ koncentrací (a tedy i izolinií individuálního rizika).

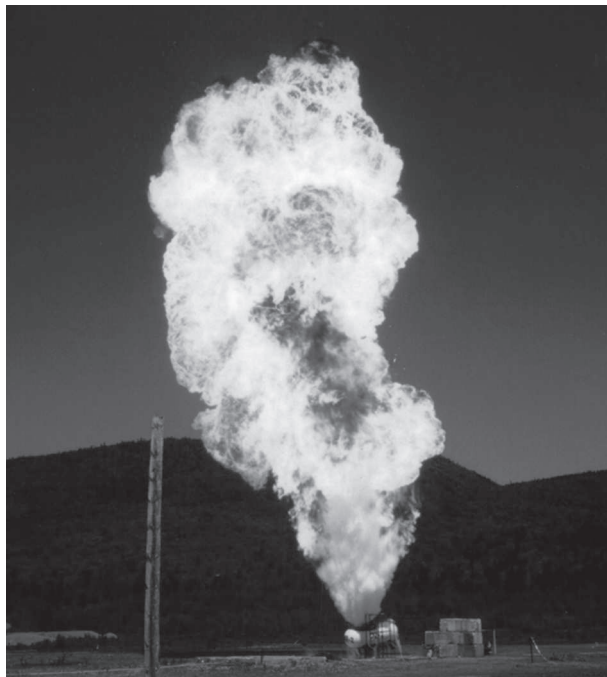
Vrcholové události

Na počátku mimořádné události (průmyslové havárie, resp. závažné havárie) musí dojít k úniku nebezpečné látky ze zařízení do okolního prostředí. K úniku může dojít následkem:

- Vzniku totální ruptury pláště zařízení nebo totální lom potrubí.
- Vzniku drobné ruptury v plášti zařízení nebo potrubí.
- Poškození přečerpávacích částí (ventily, hadice apod.).
- Poškození přetlakových ventilů a odplyňovacích zařízení.
- Drobných úniků při manipulaci s látkou anebo úkapy netěsnostmi.

Může se jednat o únik plynu, únik kapaliny, popř. plynu a kapaliny současně (**dvou-fázový únik**), nebo únik pevné látky. Únik kapaliny z menšího otvoru v plášti zařízení nebo z potrubí je obvykle doprovázen **sprejovým efektem**, při kterém dochází k rozstříku drobných kapének látky podél hrany lemující únikový otvor, což má za následek zvýšení přestupu kapalné fáze do ovzduší. Kromě malých úniků je samozřejmě možné také celkové „rozvalení“ zásobníku a únik veškerého množství látky ve velmi krátkém čase (obvykle do několika minut). Tento scénář je sice velmi málo pravděpodobný, nicméně v hodnocení rizik je ho nutné také uvažovat, jakožto (obvykle) nejhorší možný. V případě zkapalněných plynů dochází při tomto úniku k tzv. **mžikovému odparu**¹⁰, který se vyznačuje rychlým snížením tenze par nad hladinou kapalné fáze látky, jejím okamžitým varem při současném vzniku hustého mlžného oblaku kapalného aerosolu (např. při úniku zkapalněného amoniaku dochází mžikovým odparem ke zplynění asi 20 % z uniklého množství látky) (Mika a kol., 2004). Nedojde-li k odpaření veškerého množství unikající kapaliny ještě před jejím dopadem/stečením na povrch, vytváří se na zemi kaluž, ze které se látka postupně odpařuje do atmosféry. V okamžiku, kdy vlivem účinku všech vnějších, vnitřních a jiných podmínek dojde k uvolnění energie nebo k projevům nebezpečných vlastností dané látky, nastává **vrcholová událost**. Ta stojí v analýze stromu poruchových stavů na vrcholu jakožto výstupní událost, od které se dále odvíjejí jednotlivé větve scénáře události až k výsledným nežádoucím následkům, kterými průběh nehodového děje (havárie) končí.

¹⁰ Předpokladem je, že kapalina má za podmínek úniku přebytek tepla (entalpie) oproti výparnému teplu (v případě tlakem zkapalněných plynů), nebo k tomuto jevu dochází u „přehřátých“ kapalin (tj. kapaliny při teplotě vyšší než je jejich bod varu za normálních podmínek).



Obrázek 19: Jet Fire jako následek zahřívání zásobníku s LPG a vzniku BLEVE (zdroj: www.ambirk.com).



Obrázek 20: Ohňová koule (Fire Ball) při výbuchu skladiště benzínu (zdroj: internet).

Pokud je látka hořlavá, existuje možnost její **okamžité**¹¹ nebo **opožděné iniciace**¹². Podmínkou je výskyt dostatečně silného iniciačního zdroje. Požáry mohou být důsledkem úniku, ale také mohou být vzaty v úvahu jako zdroj úniku nebezpečných a toxických zplodin hoření. Hlavní typy požárů vzniklé okamžitou iniciací jsou:

- Požár tuhé látky (Fire in Solid).
- Tryskový plamen¹³ (Jet Fire) (viz obrázek 19).
- Mžikový požár (Flash Fire).
- Ohňová koule¹⁴ (Fire Ball) (viz obrázek 20).
- Požár kaluže (Pool Fire).

Největší riziko však s ohledem na potenciální zraňující následky představují plynné toxické látky, které se po úniku rozptylují v atmosféře (Toxic Release – toxický rozptyl). Velmi často se totiž jedná o látky bezbarvé nebo čichem nedetekovatelné, což snižuje možnost včasné reakce lidí. Pokud taková látka zamoří obydlenou oblast, každý člověk v závislosti na koncentraci látky a délce expozice obdrží příslušnou toxickou dávku, která vyvolá specifické následky na zdraví a v extrémním případě i smrt.

Požár a výbuch jako následek okamžité nebo opožděné iniciace plynů a par

Pravděpodobnost okamžité iniciace pro stacionární a transportní zařízení tak, jak ji uvádějí holandské metodiky (např. Purple book), je uvedena v tabulce 6. Pro stacionární zařízení je provedeno rozdělení na kapaliny typu K1, na plyny o nízké reaktivitě a na plyny průměrně / vysoce reaktivní.

V případě, že k okamžité iniciaci nedojde, vytvoří se na pevném neprosákavém povrchu kaluž. Jakmile ale koncentrace par vznikajících odpařováním kapaliny z povrchu kaluže dosáhne dolní meze zapálení, může nastat opožděná iniciace. Je-li tenze nasycených par nad kapalinou malá, hoří pouze kaluž (Pool Fire); je-li vysoká (tj. kapalina se za daných podmínek odpařuje rychle), může dojít k mžikovému po-

11 Iniciace, která nastává během úniku látky ze zařízení anebo několik sekund po jeho skončení.

12 Iniciace, která nastává po skončení úniku látky ze zařízení; standardně se ve výpočtech uvažuje 1 minuta a déle po skončení úniku.

13 Nastává tehdy, pokud dojde k okamžitému zážehu výtoku stlačeného hořlavého plynu, kapaliny nebo dvoufázového výtoku plyn-kapalina.

14 Ohňová koule se vyskytne tehdy, jestliže při úplném roztržení tlakových nádob, které obsahují hořlavé plyny zkapalněné tlakem, dojde k okamžitému zapálení, například v případě selhání zásobníku propan-butanu při proděravění plamenem. Tento jev je též znám u výbuchu rychle se rozpínajícího oblaku par vroucí kapaliny (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, BLEVE) anebo také při explozích velkého množství konvenčních trhavin nebo při jaderném výbuchu. Bouřlivé míšení rozpínající se kapaliny a par se vzduchem způsobuje prudké hoření a ohňová koule stoupá vzhůru ovzduším.

Tabulka 6: Pravděpodobnost okamžitého vznícení látek unikajících ze stacionárních resp. mobilních zařízení (Guidelines for Quantitative Risk Assessment: Purple Book, 1999).

Únik látky ze stacionárního zařízení		Pravděpodobnost okamžité iniciace		
Kontinuální únik	Jednorázový únik	Kapalina K1 ^a	Plyn nízko-reaktivní	Plyn průměrně / vysoce reaktivní
< 10 kg.s ⁻¹	< 1000 kg	0,065	0,02	0,2
10–100 kg.s ⁻¹	1000–10000 kg	0,065	0,04	0,5
> 100 kg.s ⁻¹	> 10000 kg	0,065	0,09	0,7
Únik látky z mobilního zařízení		Pravděpodobnost okamžité iniciace		
Silniční cisterna – kontinuální únik		0,1		
Silniční cisterna – jednorázový únik		0,4		
Železniční cisterna – kontinuální únik		0,1		
Železniční cisterna – jednorázový únik		0,8		

^a Vysoce hořlavé kapaliny (mají bod vzplanutí pod 294 K, tj. 21 °C)

žáru vzniklého oblaku par¹⁵ (tj. jeho postupného vyhoření směrem dovnitř) (Flash Fire) anebo i k jeho explozi (VCE – Vapour Cloud Explosion)¹⁶.

Pravděpodobnost opožděné iniciace hořlavé látky popisuje rovnice 4-1:

$$P(t) = P_z \cdot (1 - e^{-\omega t}) \quad (4-1)$$

kde $P(t)$ je pravděpodobnost vznícení v časovém intervalu 0 až t , P_z je pravděpodobnost, že je zdroj v době průchodu oblaku par přítomen, ω je účinnost vznícení (s^{-1}) a t je čas (s).

Pravděpodobnost vznícení pro vybrané zdroje, které mohou způsobit iniciaci vzniklého oblaku par v časovém intervalu jedné minuty, uvádí tabulka 7.

Nebezpečí spojená s únikem toxických plynů

Pro své široké využití se v praxi můžeme poměrně často setkávat s nebezpečnými toxickými plyny, jakými je amoniak či chlór. Kromě velkých průmyslových provozů, kde se tyto látky využívají v množstvích až desetitisíců tun v jedné technologii (viz

¹⁵ Neexplozivní hoření hořlavé směsi plynů nebo par se vzduchem, při kterém se plamen šíří podzvukovou rychlostí, takže nedochází k tvorbě významného přetlaku, který by způsobil tlaková poškození. Hlavním nebezpečím je tepelná radiace a přímý kontakt s plamenem. Vlastní hoření obvykle trvá několik desetin sekundy.

¹⁶ Rychlost hoření je dostatečně vysoká pro vznik významného přetlaku v podobě rázové vlny.

Tabulka 7: Pravděpodobnost okamžitého vznícení látek unikajících ze stacionárních resp. mobilních zařízení (Guidelines for Quantitative Risk Assessment: Purple Book, 1999).

Iniciace vzniklého oblaku par jednotlivými iniciačními zdroji	Pravděpodobnost opožděné iniciace
elektrický vlak	0,8
venkovní vařák	0,45
motorové vozidlo	0,4
motorový vlak	0,4
vařák v budově	0,23
přepravní potrubí	0,2 na 100 m
chemický závod	0,9 na stanoviště
rafinérie	0,9 na stanoviště
těžký průmysl	0,7 na stanoviště
bydlící populace	0,01 na člověka
pracovní síly	0,01 na člověka

kapitola 5.2.2), se tyto látky hojně využívají také v řadě nejrůznějších komunálních odvětví. Jejich jednotlivá množství sice nebývají velká, nicméně dislokace těchto potenciálních zdrojů úniků je poměrně hustá.

Pro své specifické vlastnosti se amoniak využívá ve strojvných chlazení, a proto nachází velké využití v potravinářském průmyslu. Množství amoniaku ve strojvných chlazení se liší především podle velikosti provozu. Například masokombináty mívají 1,8 tuny, 7 tun nebo i 48 tun amoniaku; pivovary 7 tun nebo 25 tun; mlékárny 6,6 tuny nebo 10 tun. Dále se amoniak nachází na zimních stadiónech pro účely chlazení ledu. Množství látky se zde pohybuje mezi 6 a 12 tunami v případě, že na celý systém chlazení je využíván amoniak. V případě, že na sekundární okruh je využívána například solanka, klesá množství amoniaku na cca 0,4 tuny (Bernatík, 2006).

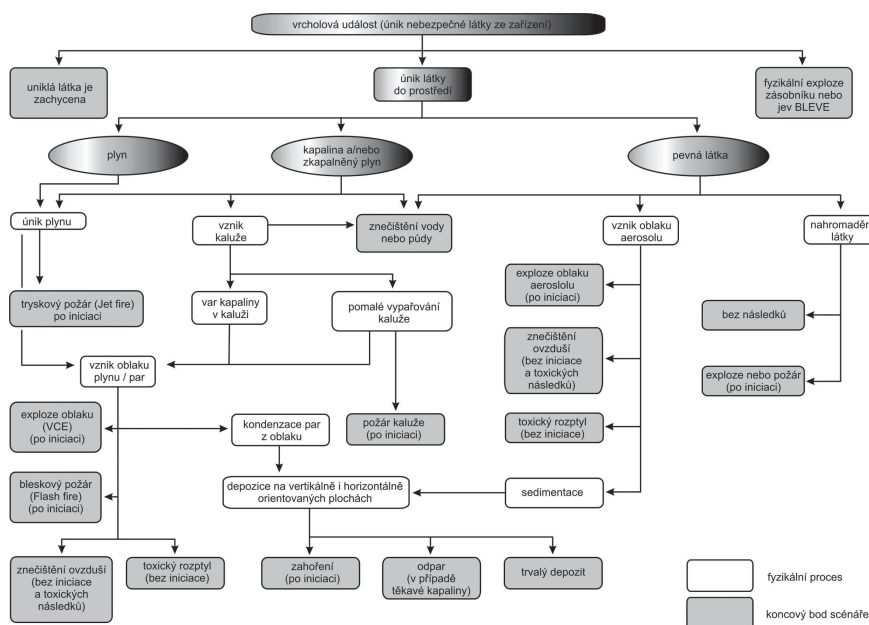
V malých množstvích v jednotlivých provozech se vyskytuje i chlór, který se využívá především v procesu úpravy vod. Do velkých úpraven vod se chlór dodává v 500 kilogramových nebo 600 kilogramových sudech, jejichž počet zde může dosahovat až 20 kusů. Menší dochlorovací stanice mají chlór v tlakových láhvích po 45 kilogramových (nejčastěji 10 láhví současně). Rovněž na koupalištích a krytých bazénech se pohybuje zásoba chlóru mezi 400 a 500 kilogramy (Bernatík, 2006). Ilustrativní dosahy nebezpečných koncentrací v případě úniku amoniaku, resp. chlóru ze zmíněných provozů shrnuje tabulka 8.

Tabulka 8: Nebezpečné vzdálenosti pro jednotlivé druhy provozů.

Provoz	Množství látky	Nebezpečná vzdálenost do:
zimní stadión	7 t amoniaku	160 m
pivovar	25 t amoniaku	290 m
masokombinát	48 t amoniaku	410 m
úpravna vod (1 sud)	0,5 t chlóru	130 m
úpravna vod (celý sklad)	9 t chlóru	180 m

Kromě skladovacích zásobníků, menších manipulačních nádob, potrubních systémů i samotných provozních zařízení v průmyslu, se můžeme s toxickými plyny běžně setkávat také v dopravě. Pro přepravu amoniaku a chlóru se používají převážně automobilové a železniční cisterny. Jedná se o velké, obvykle jednokomorové zásobníky válcovitého tvaru s jednoduchým pláštěm umístěné na příslušném podvozku (nákladní vůz, automobilový přívěs nebo návěs, dvou nebo čtyř nápravový železniční podvozek (blíže viz 1. díl knihy). Tyto mobilní zásobníky mohou být významnými zdroji nebezpečí, což ostatně potvrzují i zkušenosti z událostí proběhlých po celém světě.

Celkový přehled možných vrcholových událostí spojených s únikem nebezpečné látky a fyzikálních procesů k nim vedoucích shrnuje obrázek 21.



Obrázek 21: Variantní rozvoj možných dějů od okamžiku úniku látky ze zařízení (vrcholové události) až po typické následky.

4.4.3 Modely úniku látek ze zařízení

Dojde-li k porušení kompatibility zařízení, dojde ve většině případů k úniku části anebo i veškerého množství látky v něm obsažené. Modely pro únik (výtok) kapaliny nebo plynu jsou z inženýrské praxe dobře známy. Výběr vhodného modelu závisí na fázi (tj. zda únik je ve formě kapalné, plynné nebo dvoufázové) a podmínkách unikající látky. Typickým jednoduchým příkladem modelu úniku kapaliny je Bernoulliho rovnice. Pro únik plynu by měly být však použity složitější modely a měl by být učiněn rozdíl mezi případem úniku plynu rychlostí supersonickou (tj. za vysokého tlaku) a subsonickou (tj. za nízkého tlaku). Jiným případem úniku látky v plynné fázi je únik z pojišťovacích ventilů, tj. ventilů specificky určených k tomu, aby odlehčily zvýšenému tlaku v nádobě a tak zabránily jejímu roztržení vlivem kritického přetlaku. Pro dvoufázové úniky byly navrženy příslušné empirické modely (Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2005).

Modely úniku obvykle berou jako vstupy podmínky (např. tlak, teplotu) vně a uvnitř zařízení společně s charakteristikami látky. Požadovány jsou také velikost, tvar a umístění únikového otvoru. Tato data se odvodí přímo z provozních podmínek zařízení a z úvah spojených se scénářem dané nehody. Výstupem výtokových modelů jsou charakteristiky, které zahrnují:

- Vyteklé množství nebo hmotnostní rychlost úniku:
 - Podkritickou rychlostí – výtoková rychlost (plynu) závisí na okolním tlaku a tlaku v zařízení; výstupní tlak je srovnatelný s tlakem okolí.
 - Nadkritickou rychlostí – výtoková rychlost (plynu) odpovídá rychlosti zvuku; nezávisí na okolním tlaku a výtokový tlak je výrazně vyšší než tlak okolí (100 kPa)¹⁷.
- Trvání úniku:
 - Jednorázový (okamžitý) únik – únik určitého množství látky ve velmi krátké době, obvykle v několika vteřinách maximálně jednotek minut v případě kapaliny (v závislosti na velikosti zařízení); jedná se v podstatě o okamžité uvolnění obsahu nebezpečné látky.
 - Kontinuální únik – únik určitého konstantního množství látky, který trvá určitou delší dobu, která musí být minimálně po dobu tvorby maximální velikosti oblaku.
 - Časově omezený únik – únik určitého množství látky, který trvá omezenou dobu; intenzita úniku se mění v čase.

¹⁷ V praxi jde většinou o únik typu „Jet“ – směrový výtok plynu, který postupně přechází na typ PLUME (oblak vznikající z kontinuálního zdroje úniku).

- Podmínky unikající látky, tj. zda se jedná o:
 - kapalinu,
 - plyn,
 - mžikově se odpařující látku (dvoufázový výtok).

Únik kapaliny

Únik kapaliny ze zařízení je děj, který lze dobře popsat Bernoulliho rovnicí (viz rovnice 4-2). Tento vztah v podstatě vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny, přičemž energie je v rovnici přepočtena na objemovou jednotku kapaliny. Rovnice má pro homogenní gravitační pole tvar:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho gh = konst. \quad (4-2)$$

kde ρ je hustota kapaliny ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), v je rychlost proudění ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), p je tlak v kapalině (Pa), g je gravitační zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) a h je výška hladiny nad zemským povrchem.

První člen v Bernoulliho rovnici představuje kinetickou energii, druhý člen představuje tlakovou potenciální energii objemové jednotky kapaliny a třetí člen (gravitační) potenciál, ve kterém se kapalina nachází. Součet kinetické energie a potenciální energie (tlakové + gravitační) je ve všech místech nádoby stejný.

Zjednodušeně lze vztahy popisované Bernoulliho rovnicí charakterizovat tak, že v místě s větším průřezem má proudící kapalina větší tlak, ale menší rychlost, zatímco v místě s menším obsahem průřezu má menší tlak, ale větší rychlost. Tato skutečnost je zásadní i v inženýrské praxi, kdy potřebujeme znát výtakovou rychlost a dobu výtoku kapaliny z nádoby (např. zásobníku, potrubí apod.), když známe velikost otvoru (ruptury) a výšku hladiny nad zemí. To lze odvodit právě ze zákona zachování energie kapaliny, neboť u kapalin platí, že výtaková rychlost kapaliny v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) je stejná jako rychlost, kterou by tato kapalina získala při volném pádu z výšky h (m). Tuto závislost popisuje známý Torricelliho výraz (viz rovnice 4-3):

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4-3)$$

Z Bernoulliho rovnice také vyplývá, že tlak proudící kapaliny klesá s rostoucí rychlostí. Pokud plyn proudí laminárně a dostatečnou rychlostí, pak v místě, kde dojde k rozšíření proudnic (např. rozšířením trubice), dojde k náhlému poklesu tlaku (tento jev se nazývá hydrodynamický paradox). Toho lze využít například pro odsávání, čehož se využívá například u rozprašovačů, natěračských pistolí nebo v karburátoru. V přírodě se tento jev uplatňuje například na závětrných stranách hor, kde dochází

k tzv. aerodynamickému úplavu, což může mít velký vliv na rozptyl škodlivin nacházejících se v údolí na závětrné straně hory, které jsou tímto způsobem „vynášeny“ směrem vzhůru.

Pro stanovení rychlosti výtoku unikající kapaliny byla odvozena řada rovnic. Jednou z nich je i rovnice podle metody CEI (viz rovnice 4-4). V této rovnici figuruje základní předpoklad, že minimální doba trvání úniku do jeho zastavení je pro všechny uvažované scénáře alespoň pět minut. Tento časový úsek je velmi důležitý, protože jestliže během pěti minut dojde k úniku celého objemu kapalné látky ze zařízení, pak lze rychlost výtoku unikající kapaliny stanovit dělením celého objemu pěti minutami.

$$v = 9,44 \times 10^{-7} d^2 \rho \sqrt{\frac{1000 p_g}{\rho} + 9,8 \Delta h}, \quad (4-4)$$

kde p_g je provozní přetlak uvnitř zařízení (kPa) (pro zásobník otevřený do atmosféry $p_g = 0$), ρ je hustota kapaliny při provozní teplotě ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), Δh je výška hladiny nad místem úniku (m) a d je průměr otvoru (mm) ze kterého látka vytéká.

Předpokládáme-li, že průřez výtokového otvoru S_0 (m^2) je ve srovnání s průřezem nádrže S_n (m^2) velmi malý (viz obrázek 22), potom rychlost poklesu hladiny v limitu je k nule. Pro ztrátovou výšku h_z platí rovnice 4-5.

$$h_z = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (4-5)$$

kde ζ je ztrátový součinitel.

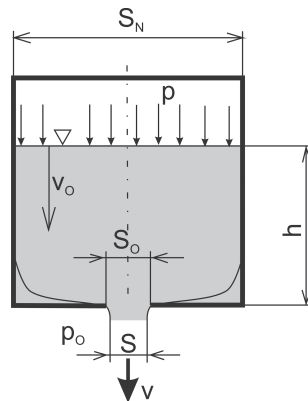
Pro výtokovou rychlost pak lze odvodit vztah:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \sqrt{2 \left(gh + \frac{P - P_0}{\rho} \right)} = \phi \sqrt{2 \left(gh + \frac{P - P_0}{\rho} \right)}, \quad (4-6)$$

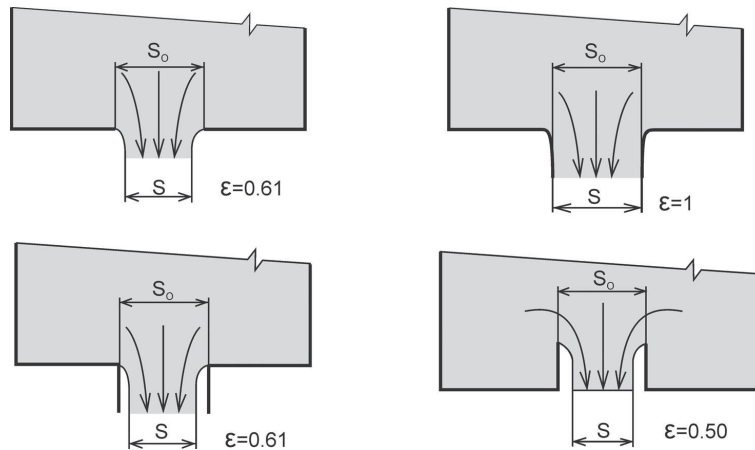
kde ϕ je rychlostní součinitel.

Při výtoku kapaliny z nádoby nevyplňuje proud kapaliny zpravidla celý výtokový otvor, neboť proudnice se nemohou náhle zakřivit podle hran otvorů (viz obrázek 22) a setrvačností částic kapaliny je způsobeno zúžení nebo kontrakce paprsku (viz obrázek 23). Ta se vyjadřuje součinitelem zúžení (kontrakce) ε (viz rovnice 4-7), který závisí obecně na tvaru výtokového otvoru, jeho umístění vůči bočním stěnám a na Reynoldsově čísle (Re).

$$\varepsilon = \frac{S}{S_0} < 1 \quad (4-7)$$



Obrázek 22: Výtok z nádoby otvorem ve dně (Drábková a kol., 2007).



Obrázek 23: Závislost součinitele zúžení na tvaru výtokového otvoru (Drábková a kol., 2007).

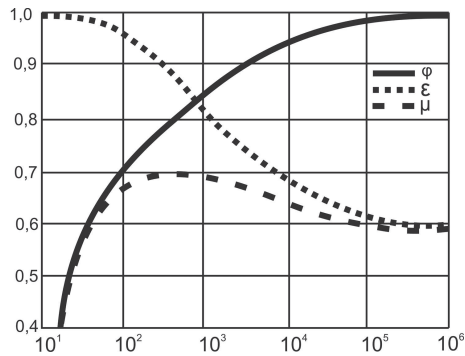
Skutečný výtok kapaliny otvorem po dosažení vztahů 4-3 a 4-7 do rovnice kontinuity popisuje rovnice 4-8:

$$Q_v = vS = \epsilon\varphi S_o \sqrt{2gh} = \mu S_o \sqrt{2gh}, \quad (4-8)$$

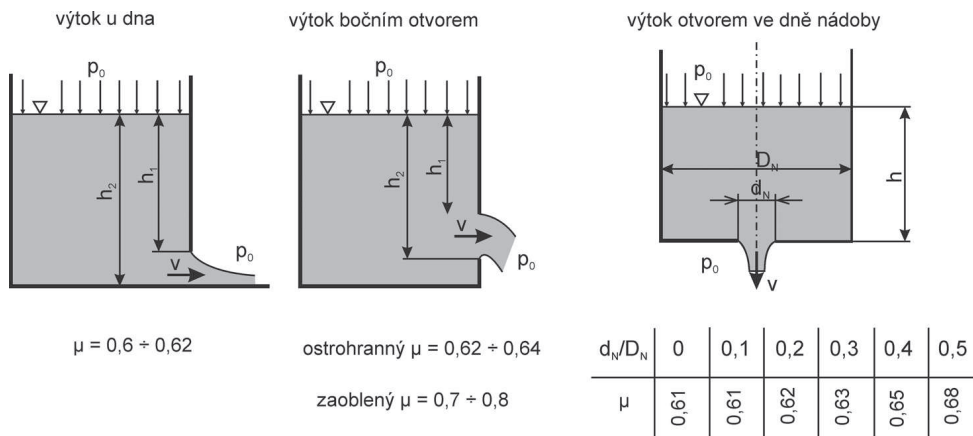
kde μ je výtokový součinitel, který rovněž závisí na tvaru otvoru či nátrubku a Reynoldsově čísle (Re), a který je definován jako:

$$\mu = \epsilon\varphi < 1 \quad (4-9)$$

Závislosti $\phi, \epsilon, \mu = f(Re)$ pro ostrohranný otvor jsou uvedeny na obrázku 24.



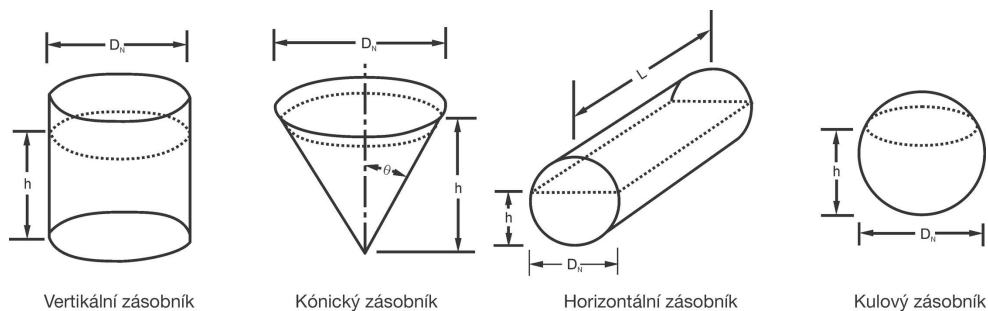
Obrázek 24: Rychlostní (ϕ), kontrakční (ϵ) a výtokový součinitel (μ) malého otvoru (Drábková a kol., 2007).



Obrázek 25: Závislost výtokového součinitele na poloze výtoku (Drábková a kol., 2007).

Hodnota výtokového součinitele μ závisí také na poloze místa výtoku (ruptury pláště zařízení). Na obrázku 25 jsou uvedeny hodnoty tohoto součinitele pro tři případy úniku – výtok u dna, výtok otvorem v plášti a výtok otvorem ve dně nádoby.

Z obecné rovnice pro výtokovou rychlost, byly pro jednotlivé tvary zásobníků odvozeny také výtokové časy (viz rovnice 4-10 až 4-13 a obrázek 26), které jsou pro modelování úniků velmi důležité (Foster, 1981).



Obrázek 26: Vztahy pro dobu výtoku odvozené pro jednotlivé tvary zásobníků (Foster, 1981).

$$\text{vertikální zásobník} \quad t = \frac{\pi D_N \sqrt{h}}{\sqrt{6} C_d S_N \sqrt{g}} \quad (4-10)$$

$$\text{kónický zásobník} \quad t = \frac{\sqrt{2} \pi \tan^2 \theta h^{\frac{5}{2}}}{5 C_d S_N \sqrt{g}} \quad (4-11)$$

$$\text{horizontální zásobník} \quad t = \frac{\sqrt{8} L \left((D_N)^{\frac{3}{2}} - (D_N h)^{\frac{3}{2}} \right)}{3 C_d S_N \sqrt{g}} \quad (4-12)$$

$$\text{kulový zásobník} \quad t = \frac{\sqrt{2} \pi h^{\frac{3}{2}} (D_N)^{\frac{3}{2}}}{5 C_d S_N \sqrt{g}} \quad (4-13)$$

kde S_N je plocha hladiny (m^2), g je gravitační zrychlení, t je čas (s), h je výška hladiny (m), L délka zásobníku (m) a C_d je únikový koeficient charakterizující tvar výtokového otvoru. Tento koeficient nabývá hodnoty 0,61 v případě výtokového otvoru s ostrou hranou, 0,80 pro krátkou trubku, 0,98 v případě výtokového otvoru se zaoblenou hranou.

Kontinuální laminární únik plynu

Laminarita nebo turbulentnost úniku plynu ze zařízení je určena hodnotou Reynoldsova čísla¹⁸. Pro laminární únik platí podmínka $Re < 2300$. Splnění této podmínky

¹⁸ Reynoldsovo číslo je číslo, které dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu (tedy odpor prostředí v důsledku vnitřního tření). Pomocí tohoto čísla je možné určit, zda je proudění tekutiny (kapaliny nebo plynu) laminární a nebo turbulentní. Čím je Reynoldsovo číslo vyšší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor. Hranice mezi těmito dvěma případy se označuje jako kritická hodnota Reynoldsova čísla. Tato hodnota je pro různé tekutiny různá a zjišťuje se experimentálně. Kritická hodnota se obvykle pohybuje kolem hodnoty 2000. Při $Re \rightarrow \infty$ hovoříme o proudění potenciálovém.

je prakticky charakterizováno velikostí přetlaku plynu v zařízení, který může být maximálně 100 kPa. Tato podmínka je charakterizována vztahem:

$$\frac{p_z}{p_a} \leq r_{krit} \quad (4-14)$$

kde r_{krit} je kritický poměr tlaků, p_z (Pa) je tlak v zařízení a p_a je atmosférický tlak (101,325 kPa).

Zároveň platí:

$$r_{krit} = \left(\frac{p_z}{p_a} \right)_{krit} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{a} \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (4-15)$$

kde γ je poměr molárních tepelných kapacit, C_p je molární tepelná kapacita za konstantního tlaku (kJ.kg^{-1}) a C_v je molární tepelná kapacita za konstantního objemu (kJ.kg^{-1}).

Pokud je splněna tato základní podmínka pro laminární charakter úniku plynu, pak model uvažuje dva případy:

- Hmotnost uniklého plynu je známá (je například dána výkonem technologie), potom je do dalšího vyhodnocení použita přímo hodnota hmotnostního úniku plynu.
- Hmotnost uniklého plynu je neznámá, ale jsou k dispozici parametry pro jeho výpočet. Výpočet množství unikajícího plynu pro další vyhodnocení vychází ze vztahu:

$$m = C_d S_0 \frac{p_z}{a_o} \mu \quad (4-16)$$

kde m je hmotnost uniklé plynné látky (kg), C_d je únikový koeficient, S_0 je plocha otvoru (m^2), kterým plyn uniká, p_z je tlak v zařízení (Pa), a_o je rychlost zvuku v plynu při teplotě plynu (m.s^{-1}) a μ je výtokový součinitel.

Pro laminární únik plynu je hodnota výtokového faktoru μ dána vztahem 4-17:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{p_a}{p_z} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_z} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (4-17)$$

Kontinuální turbulentní únik plynu

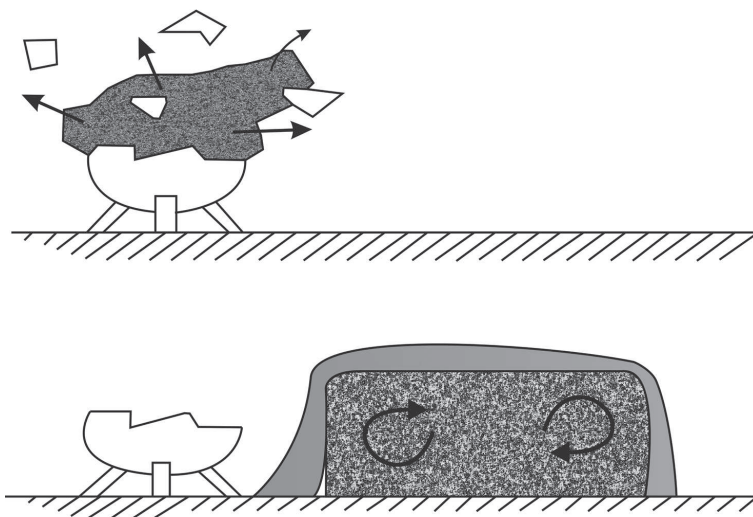
Turbulentní únik plynu ze zařízení je určen hodnotou Reynoldsova kritéria. Pro turbulentní únik musí platit, že $Re > 104$. Splnění této podmínky je prakticky charakterizováno velikostí přetlaku plynu v zařízení, který musí být minimálně 100 kPa. Pokud je splněna podmínka turbulentního úniku plynu, model umožňuje výpočet pouze pro případ, kdy hmotnostní únik plynu je neznámý, ale jsou k dispozici parametry pro jeho výpočet. Pro turbulentní únik plynu je pak hodnota výtokového součinitele μ dána vztahem:

$$\mu = \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (4-18)$$

Zvláštním typem modelu kontinuálního turbulentního úniku jsou pak modely pro tryskový únik (Integral Jet Models) (Markiewicz, 2006b), ale o těch zde nebude blíže pojednáno.

Jednorázový únik plynu

Jednorázový únik plynu je přímo definován hodnotou „rychle“ uniklého plynu ze zařízení nebo unikajícího množství v čase do jedné minuty od vzniku ruptury pláště. Do dalšího vyhodnocení je použita přímo hodnota množství uniklého plynu. Při vyhodnocení jednorázového úniku není rozlišováno, zda došlo k úniku plynu laminárním nebo turbulentním tokem, neboť tento děj je tak náhlý a rychlý, že nemá smysl toto vůbec uvažovat.



Obrázek 27: Jednorázový únik plynu s následným vznikem kompaktního oblaku těžkého plynu (INERIS-DRA 006, 2002).

Jednorázový únik plynu, resp. disperze, je určen podle rovnice 4-19.

$$\frac{u_r t_0}{x} = K_u \quad \text{resp.} \quad \frac{u_* t_0}{x} = K_{u_*}, \quad (4-19)$$

kde u_r je rychlost větru v referenční výšce ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), resp. u_* je frikční rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (blíže viz rovnice 4-36), t_0 je doba úniku (s), x je vzdálenost od zdroje úniku (m) a K_u resp. K_{u_*} jsou kritéria úniku. Pro jednorázový únik platí $K_u \leq 0,6$, resp. $K_{u_*} \leq 0,04$; pro kontinuální pak $K_u \geq 2,5$, resp. $K_{u_*} \geq 0,15$.

Únik kapaliny následovaný mžikovým odparem

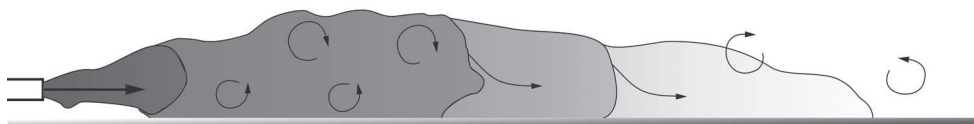
Mnoho látek, které se za standardního tlaku a teploty nacházejí v plynném skupenství, jsou často z nejrůznějších důvodů skladovány pod vysokým tlakem v kapalném stavu. V takovém případě ale protržení pláště zásobníku nebo poškození ventilu způsobí náhlý pokles tlaku uvnitř zařízení, následkem čehož kapalina začne okamžitě vřít, pění a stoupat směrem vzhůru (Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2005). Únik látky tak nastává bezprostředně po vzniku ruptury. V jeho průběhu dochází k úniku kapalně fáze pod tlakem a vznikající kaluž podléhá **mžikovému odparu**. Během tohoto procesu se rychlost vzniku plynné fáze ustavuje až do konstantní hodnoty, která například při jednorázovém úniku chlóru ze železniční cisterny trvá 30 až 60 minut (Učená, 2004). Stanovení hmotnosti látky odpařené mžikovým odparem vychází z aplikace zákona zachování energie při výměně tepla mezi částí látky podléhající odparu a částí vytvářející kapalnou fázi. To vede k logickému závěru, že vztah mezi hmotností mžikově odpařené látky M_m (kg) a hmotností m veškeré uvolněné látky (kg) má tvar, který popisuje rovnice 4-20):

$$M_m = \frac{m(T - T_V)}{\left(T - T_V + \frac{L_V}{C_{pL}}\right)} \quad (4-20)$$

kde T je teplota ($^{\circ}\text{C}$), T_V je teplota varu látky ($^{\circ}\text{C}$), L_V je měrné výparné teplo látky ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) a C_{pL} je měrná tepelná kapacita látky v kapalně fázi ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Dvoufázový výtok

Když současně uniká z poškozeného zásobníku kapalina a plyn, nazýváme tento jev dvoufázovým tokem. Dvoufázová směs, která uniká do atmosféry, se často chová jako těžký plyn. Oblak plynů a par je těžší než vzduch proto, že je zpočátku jeho teplota velmi nízká a jeho hustota je vyšší než hustota okolního vzduchu. Malé kapičky aerosolu, které kromě plynu tento oblak tvoří, se postupně odpařují, což vede k dalšímu ochlazení oblaku (viz obrázek 28), takže oblak sice rozšiřuje do prostoru, ale stále setrvává při zemi, dokud se dostatečně nenařadí turbulentním prouděním vstupujícího vzduchu.

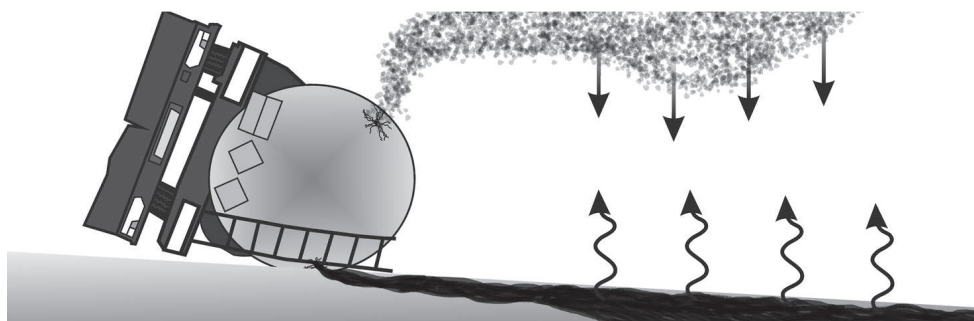


Obrázek 28: Dvoufázový únik (INERIS-DRA 006, 2002).

4.4.4 Modely vypařování kapalin

Pro vypařování byla navržena řada modelů. Důležitým aspektem je zde mechanismus přenosu tepla z okolí do kaluže, konkrétněji, zda je dominantní přenos ze zemského povrchu nebo ze vzduchu. Výrazněji se může uplatnit také přenos nebo odvod tepla díky větru, a také latentní teplo fázové přeměny v případě úniku přehřáté kapaliny (tzv. mžikový odpar). Všechny modely vypařování jsou tedy založeny na základních principech termodynamiky. V případě, kdy je dominantním mechanismem přenos tepla z půdy nebo vzduchu, je hmotnostní rychlost vypařování dána energetickou rovnováhou, tj. úvahou, kdy je celkový tepelný tok ze vzduchu a podkladu využit pro zahřívání a vypařování uniklé látky. Pokročilejší modely se berou v úvahu v případech, kdy se poloměr kaluže zvětšuje (tj. tehdy, když neexistuje např. záchytná jímka). Modely vypařování obvykle vyžadují proměnné počítané výtokovými modely a proměnné meteorologických podmínek.

Po odpaření mžikového (primárního) odparu a ustavení rovnováhy do konstantního odparu zůstává v místě havárie kapalná louže, ze které probíhá **sekundární odpar** (viz obrázek 29). Lze odvodit, že mžikový odpar má rozhodující význam pro výpočet koncentrací látky v okolí zdroje, neboť v důsledku sekundárního odparu se šíří látka do okolí v mnohem nižších koncentracích než při mžikovém odparu. Proto se za základ výpočtu šíření zkapalněných plynů do okolí místa havárie zadává



Obrázek 29: Zjednodušený model úniku kapaliny, resp. plynu a přestup látky mezi jednotlivými fázemi.

do rozptylových modelů hmotnost odpařené látky (tj. té, která vstupuje do ovzduší), a nikoli celková hmotnost látky uniklé z porušeného zařízení.

Pro orientaci o možných rychlostech výronu a odparu při havárii uvádíme v tabulce 9 předpokládané orientační hodnoty pro železniční cisternu se zkapalněným chlórem. Z tabulky 9 je názorně vidět, že čím vážnější je havárie, tím významnější je mžikový odpar oproti odparu sekundárnímu (Urban, 1995).

Tabulka 9: Charakteristické rychlosti výronu kapalného chlóru q , mžikového odparu látky Q_m a odparu látky z kapalné louže Q_k při havárii železniční cisterny obsahující 45 tun chloru.

Charakter nehody	Q (kg.s ⁻¹)	Q_m (kg.s ⁻¹)	Q_k (kg.s ⁻¹)
Netěsná hlava ventilu	0,3	0,3	0,3
Prasklá hlava ventilu	3	1,8–3	0,8–3
Střední praskliny	30	7–25	1,7–5
Velké trhliny	300	16–33	0,3–5

4.4.5 Modely pro rozptyl plynu v atmosféře

Plynná látka po úniku do atmosféry vytváří oblak, který je následně rozptylován ve směru vanutí větru. Existují tři hlavní mechanismy rozptylu:

- Vznášivý rozptyl (těž pozitivně vzlínavý) – pro plyny lehčí než vzduch. Tyto oblaky jsou pasivně transportovány větrem.
- Rozptyl neutrálního plynu – pro plyny o přibližně stejné hustotě jako vzduch, resp. plynů naředěných na hustotu vzduchu.
- Rozptyl těžkého plynu nebo směsí těžších než vzduch.

Pro fyzikální popis rozptylu plynů v atmosféře existuje mnoho modelů, které se dají rozdělit podle:

- Chování vytvořeného oblaku:
 - modely pro vznášivý rozptyl (pasivní modely nebo gaussovské modely),
 - modely pro rozptyl těžkého plynu,
 - turbulentní modely.

- Trvání úniku:
 - modely pro okamžitý únik plynu (PUFF),
 - modely pro kontinuální únik plynu (PLUME).
- Složitosti modelování:
 - jednoduché „box modely“,
 - složité 3D modely (CFD).

Gaussovské modely rozptylu

Za gaussovský model rozptylu je nazýván původní model Taylorův dopracovaný Suttonem ve 30. letech 20. století (Bednář a Zikmunda, 1985). Jedná se o jeden z nejjednodušších a patrně nejčastěji využívaných modelů, který je navržen pro plyny lehčí než vzduch nebo obecně pro popis pasivní rozptylové fáze (Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2005). Je založen na předpokladu, že koncentrace látky je normálně distribuována podél horizontální a vertikální osy (osy x a y).

Pro **kontinuální únik z vyvýšeného bodového zdroje** o výšce H lze koncentraci v bodě o souřadnicích x, y, z vypočítat podle základní rovnice 4-21.

$$c(x, y, z) = \frac{M}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right] \left[\exp \frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp \frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (4-21)$$

kde x, y, z jsou vzdálenosti od zdroje (x – po směru větru, y – kolmo na směr větru, z – vertikálně) (m) $c(x, y, z)$ je koncentrace látky v bodě o souřadnicích x, y, z ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), M je hmotnostní rychlost úniku látky ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), u je rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), H je výška zdroje nad terénem (m), σ_y, σ_z jsou směrodatné odchylky (m) někdy označované jako horizontální, resp. vertikální rozptylové koeficienty.

Tento vztah, který je v anglicky psané literatuře označován jako „Gaussian PLUME Model“, je však platný pouze pro malé výšky nad zemí a za podmínek, že se nevyskytuje inverze ani konvekce (třída D podle Pasquillovy typizace). V případě, že tyto podmínky splněny nejsou, rovnice 4-21 nabývá složitějšího tvaru – viz rovnice 4-22 (Carruthers a kol., 2003).

Pro **okamžitý únik látky** je pak koncentrace c v bodě (x, y, z) od zdroje dána vztahem:

$$c(x, y, z) = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \left\{ -\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right\} \frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right] \left[\exp \frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp \frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (4-22)$$

kde x, y, z jsou vzdálenosti od zdroje (x – po směru větru, y – kolmo na směr větru, z – vertikálně) (m), $c(x, y, z)$ je koncentrace látky v bodě o souřadnicích x, y, z ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), m je množství uvolněné látky (kg), u je rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), H je výška zdroje nad terénem (m), $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ jsou směrodatné odchylky a t je doba, která uplynula od okamžiku úniku (s).

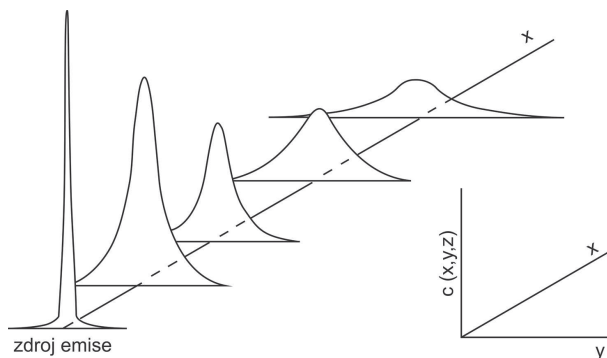
Výše uvedený vztah bývá v anglicky psané literatuře označován jako „Gaussian PUFF Model“ nebo „Instantaneous PUFF Model“.

Gaussovské modely jsou určeny pro modelování šíření plynů, které se ve vzduchu dobře rozptylují. Podle těchto modelů představuje rychlost větru a turbulence hlavní faktory, které mají vliv na pohyb molekul uvolněného plynu, takže plyn se šíří ve směru větru a postupně se promíchává se vzduchem, popř. pozvolna stoupá vzhůru. Podle gaussovských modelů má koncentrační profil každé látky podobu Gaussovy křivky (odtud zobecněný název pro tento model), jehož šířka je závislá na rozptylu dané látky a je popsána směrodatnými odchylkami (tzv. rozptylovými koeficienty). Platí, že čím širší tato křivka je, tím výrazněji se rozptyl uplatnil (viz obrázky 30 a 31).

Obecný Suttonův model byl postupně upraven do řady variant. Nejčastěji se můžeme setkat s Pasquillovou či Pasquillovou-Giffordovou variantou (Učená, 2004) anebo variantou pro vzdálená pole (Far-field Model) (Carruthers a kol, 2003). Většina modelů je určena pro modelování v blízkosti zdrojů úniků, „Far-field Model“ je naproti tomu používán jako určitá aproximace pro výpočet koncentrací ve velkých vzdálenostech od zdroje. Jelikož jde o zjednodušení, je koncentrace počítána pouze pro plochu nalézající se pod centrální linií šíření oblaku dané látky, která je reprezentována osou shodnou s převažujícím směrem větru. Tento model tedy předpokládá neměnný směr a rychlost větru v čase, čehož samozřejmě nebývá v reálných podmínkách dosaženo. Proto lze tento přístup použít pouze pro hrubé odhady.

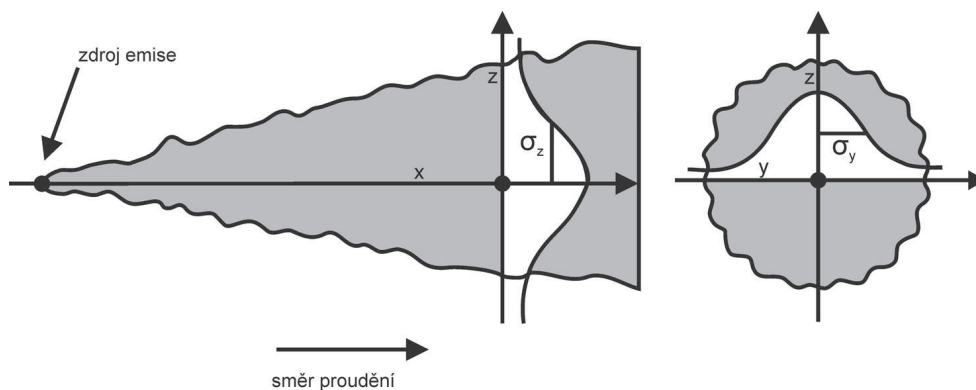
Jak již bylo uvedeno výše, v gaussovských modelech vystupují směrodatné odchylky σ_x, σ_y a σ_z , které popisují rozšiřování vzniklého oblaku podél základních os v prostoru a v čase. Z matematického hlediska se jedná o směrodatné odchylky v dvojrozměrném normálním rozložení; z fyzikálního hlediska jde o funkce popisující de facto rychlost a charakter rozptylu za daných podmínek. Proměnná, která do příslušných funkčních vztahů vstupuje, je vzdálenost od zdroje úniku (tj. na souřadnici x). Rovnice ale zahrnují i parametry, jakým je rychlost větru v horizontálním směru a intenzita turbulentní difúze (Bednář a Zikmunda, 1985). Ty však do výpočtu nevstupují přímo (prostřednictvím určité proměnné), nýbrž zprostředkovaně prostřednictvím příslušných tříd stability atmosféry.

Teoretické práce i experimenty prováděné v reálných podmínkách ukázaly, že zmíněné rozptylové parametry úzce závisejí nejen na rychlosti větru a vzdálenosti od zdroje, ale také na stříhu větru, výšce zdroje a výšce oblaku rozptylující se látky (Carruthers a kol, 2003). Promítnout vzájemné závislosti těchto veličin do fyzikálních



Poznámka: V okamžiku úniku je koncentrace látky ve vzduchu ($c(x,y,z)$) velmi vysoká a pík je úzký, ale jak se uplatňuje rozptyl, postupně se rozšiřuje a zploštuje (maximum klesá). Plocha píku, která je úměrná množství uniklé látky, však zůstává konstantní.

Obrázek 30: Profil píku koncentrace látky při rozptylu probíhajícího ve směru vanutí větru.



Obrázek 31: Profil rozptylujícího se oblaku a vyznačení směrodatných odchylek (rozptylových koeficientů) v jeho řezu.

vztahů však není jednoduché. Proto existuje řada různých jednodušších i složitějších přístupů používaných pro určení těchto rozptylových koeficientů. Za základní vztahy pro určení σ_y a σ_z jsou považovány vztahy postavené na rychlosti větru a koeficientech turbulentní difúze (viz rovnice 4-23).

$$\sigma_y = \sqrt{2K_y \frac{x}{u}} \quad \text{resp.} \quad \sigma_z = \sqrt{2K_z \frac{x}{u}} \quad (4-23)$$

kde K_y a K_z jsou koeficienty turbulentní difúze v osách y a z ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) a u rychlost větru podél osy x ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Jelikož ale určení koeficientů turbulentní difúze K_y a K_z vyžaduje složitější výpočty, navrhl již Sutton výpočet rozptylových koeficientů (směrodatných odchylek) pomocí empiricky odvozených zobecněných difúzních koeficientů C_y , a C_z (Bednář a Zikmunda, 1985), a to podle vzorců popsanych rovnicemi (4-24 a 4-25).

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{2}C_y^2x^{2-n}} \quad (4-24)$$

resp.

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{2}C_z^2x^{2-n}} \quad (4-25)$$

kde hodnoty C_y , C_z a n lze určit pro různé výšky zdroje a pro různé třídy stability atmosféry podle níže uvedené tabulky 10.

Tabulka 10: Závislost zobecněných koeficientů difúze C_y a C_z na výšce zdroje H a na vertikálním zvrstvení atmosféry (Bednář a Zikmunda, 1985).

H (m)	Instabilní zvrstvení $n = 0,20$		Indiferentní zvrstvení $n = 0,25$		Slabá inverze $n = 0,33$		Silná inverze $n = 0,50$	
	C_z	C_y	C_z	C_y	C_z	C_y	C_z	C_y
0	0,36	0,64	0,12	0,21	0,048	0,084	0,030	0,053
10	0,36	0,64	0,12	0,21	0,048	0,084	0,030	0,053
25	0,36	0,36	0,12	0,12	0,048	0,048	0,030	0,030
50	0,30	0,30	0,10	0,10	0,040	0,040	0,025	0,025
75	0,27	0,27	0,09	0,09	0,036	0,036	0,022	0,022
100	0,21	0,21	0,07	0,07	0,028	0,028	0,018	0,018

V roce 1961 Pasquill a Gifford navrhli vztahy pro výpočet rozptylových koeficientů pro rozptyl látek emitovaných přízemními zdroji, které se budou šířit nad relativně hladkým povrchem do vzdáleností několika kilometrů od zdroje (Macdonald, 2003). Hodnoty rozptylových koeficientů σ_y a σ_z jsou úzce závislé na podmínkách panujících v atmosféře, zejména pak na turbulencích vyvolaných konvektivními proudy vznikajícími na základě nerovnoměrného ohřevu různých míst zemského povrchu. Za účelem určení rozptylových koeficientů σ_y a σ_z pomocí převodu pozorovatelných parametrů stavu atmosféry definoval Pasquill jednoduché kvantitativní hodnocení, které je postaveno na šesti třídách stability atmosféry. Tento přístup je nejčastěji používán u nejjednodušších modelů (screeningové a jednoduché modely). Jestliže jsou ale k dispozici detailnější informace, jako například informace o kolísání rychlosti větru v čase, pak je možné určit koeficienty σ_y a σ_z pomocí statistické teorie

turbulentní difúze. Například Draxler v roce 1976 navrhnul následující vztahy (Macdonald, 2003):

$$\sigma_y = \frac{\sigma_v}{u} x f_y \quad (4-26)$$

a

$$\sigma_z = \frac{\sigma_w}{u} x f_z \quad (4-27)$$

kde σ_v a σ_w jsou efektivní kolísání rychlosti větru v příčných a vertikálních směrech (v a w), x je vzdálenost od zdroje úniku a f_y a f_z jsou funkce, které v blízkosti zdroje mají hodnotu 1 a se vzrůstající vzdáleností x od zdroje pak tato hodnota klesá.

V roce 1975 formuloval Briggs modelový přístup, ve kterém zohlednil vliv charakteru krajiny a stability atmosféry na proudění v přízemní vrstvě (Skřehot a kol., 2007; TNO, 2003). Definoval zde jednoduché vztahy o jedné proměnné (v tomto případě se jedná o vzdálenost ve směru souřadné osy x), s jejichž pomocí lze snadno počítat koeficienty σ_y a σ_z pro jednotlivé třídy stability atmosféry (tabulka 11). Na základě provedených experimentů je však tento model, včetně příslušných vztahů, validní pouze pro oblast od 0,1 do 10 km od zdroje, což ale pro modelování havarijních úniků průmyslových látek obvykle postačuje.

Existují samozřejmě i další přístupy pro výpočet rozptylových koeficientů, které jsou složitějšími funkcemi rychlosti větru, vzdáleností od zdroje a koncentrací (Carruthers a kol., 2003), avšak tyto algoritmy jsou určeny pro speciální varianty gaussovských modelů. Příkladem může být i modifikace, kterou vyvinula holandská TNO, která upravila funkční vztahy podle Briggse (viz tabulka 11) tak, aby lépe odpovídaly charakteru rozptylu i těžších disperzí a v podmínkách reálného terénu. Jejich použití je však omezeno na povětrnostní podmínky panující v západní Evropě, pro které byly tyto funkce taky navrženy. Jejich mechanické použití pro modelování rozptylu

Tabulka 11: Určení rozptylových koeficientů σ_y a σ_z podle Briggse.

Charakter krajiny	Třída stability atmosféry	σ_y	σ_z
Otevřená krajina	A	$0,22x(1 + 0,1x)^{-1/2}$	0,20x
	B	$0,16x(1 + 0,1x)^{-1/2}$	0,12x
	C	$0,11x(1 + 0,1x)^{-1/2}$	$0,08x(1 + 0,2x)^{-1/2}$
	D	$0,08x(1 + 0,1x)^{-1/2}$	$0,06x(1 + 1,5x)^{-1/2}$
	E	$0,06x(1 + 0,1x)^{-1/2}$	$0,03x(1 + 0,3x)^{-1}$
	F	$0,04x(1 + 0,1x)^{-1/2}$	$0,016x(1 + 0,3x)^{-1}$
Urbanizovaná krajina	A-B	$0,32x(1 + 0,4x)^{-1/2}$	$0,24x(1 + 0,1x)^{1/2}$
	C	$0,22x(1 + 0,4x)^{-1/2}$	0,20x
	D	$0,16x(1 + 0,4x)^{-1/2}$	$0,14x(1 + 0,3x)^{-1/2}$
	E-F	$0,11x(1 + 0,4x)^{-1/2}$	$0,08x(1 + 0,15x)^{-1/2}$

například v oblastech, kde panuje kontinentální podnebí (střední a východní Evropa), však vede ke zkresleným výsledkům. Proto se používají obecné rovnice (viz rovnice 4-28 resp. 4-29) pro výpočet směrodatných odchylek pro šířku σ_y a výšku σ_z oblaku, které jsou funkcí délky oblaku x a typu počasí.

$$\sigma_y = a_y x_L^b, \quad (4-28)$$

resp.

$$\sigma_z = a_z x_L^c \quad (4-29)$$

kde a_y , a_z , b , c jsou empirické konstanty, které byly pro povětrnostní podmínky panujících ve střední Evropě stanoveny Bubníkem a kol. následovně (viz tabulka 12).

Tabulka 12: Hodnoty konstant pro výpočet rozptylových parametrů (Bubník a kol., 1998).

Třída stability	a_y	b	a_z	c
I	0,1042	0,8844	0,5461	0,5076
II	0,1195	0,8930	0,4980	0,5797
III	0,1400	0,8986	0,4221	0,6564
IV	0,1684	0,9018	0,3158	0,7549
V	0,2898	0,8831	0,1740	0,9729

Lagrangeovské a eulerovské modely rozptylu

Lagrangeovské modely simulují rozptyl plynu lehčího než vzduch. Tyto modely předpokládají únik částic v lineárním směru a studují jejich vzdušný přenos v předem stanoveném větrném poli. Často využívanou praktickou aplikací lagrangeovských modelů jsou konstrukce tzv. zpětných trajektorií v poli fiktivního proudění, jehož rychlost má stejnou velikost jako rychlost skutečného proudění, ale opačný směr. Tímto způsobem lze při rozboru přenosu znečištění na velké vzdálenosti provádět přibližnou identifikaci oblastí zdrojů znečištění ovzduší (Bednář a Zikmunda, 1985).

Lagrangeovské modely nedisponují numerickými rozptyly hodnot a jsou více konzervativní. Tyto modely byly často užívány pro modelování rozptylu znečišťujících látek emitovaných z pozemní dopravy či letadel – vždy však byl uvažován bodový zdroj a tzv. homogenní terén, tj. ideální terén bez překážek. V praxi již ale byly lagrangeovské modely aplikovány také nad tzv. nehomogenním terénem, tj. reálným, zvlněným terénem s menšími překážkami. V takových případech se pro modelování používají tzv. pseudočástice, které imitují pohyb skutečných molekul či velmi malých částic

v poli proudění. Trajektorie těchto částic jsou pak vypočítány pomocí středních hodnot rychlosti větru, uplatnění turbulence i náhodného pohybu. Tyto klasické modely jsou však používány pro výpočty koncentrací látek pouze pro dva rozměry, tj. nad uvažovanou plochou. Yamada a Bunker navrhli již i tří dimenzionální lagrangeovský model typu PUFF, který nese označení HOTMAC–RAPTAD (Higher-Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation–Random Puff Transport and Diffusion) (Yamada, 2000). Tento integrovaný model, který zahrnuje původně dva samostatné modely, je založen na metodě náhodného posunutí sledovaných veličin. I v tomto případě platí, že úspěšné výpočty distribuce koncentrací sledované látky jsou vždy determinovány přesností měření směru a rychlosti větru a turbulencí.

Eulerovské modely jsou postaveny na tzv. rovnicích konečného rozdílu hmotností látek. Tato metoda je reprezentována velkými numerickými rozptyly hodnot, které často bývají větší než odpovídající reálné koncentrace. Rozptyl hodnot je úměrný vzdálenosti jednotlivých bodů sítě, pro které jsou koncentrace látek počítány. Obvykle se používá síť s body vzájemně vzdálenými 1 až 10 km. Ovšem taková síť je pro výpočet koncentrací z bodového zdroje nevyhovující, protože je velmi řídká, což také často negativně ovlivňuje výpočty. Nejčastěji se lagrangeovské i eulerovské modely využívají pro modelování přenosu znečišťujících příměsí na velké vzdálenosti (řádově stovek až tisíců kilometrů) (Bednář a Zikmunda, 1985), což neodpovídá potřebám modelování havarijních dosahů látek uniklých při průmyslových haváriích. I když se tedy těchto modelů pro tento typ modelování nevyužívá, lze konstatovat, že v případě emisí z bodových zdrojů poskytují lagrangeovské modely věrohodnější výsledky než modely eulerovské a pro velké vzdálenosti lepší než gausovské modely.

Model rozptylu těžkého plynu

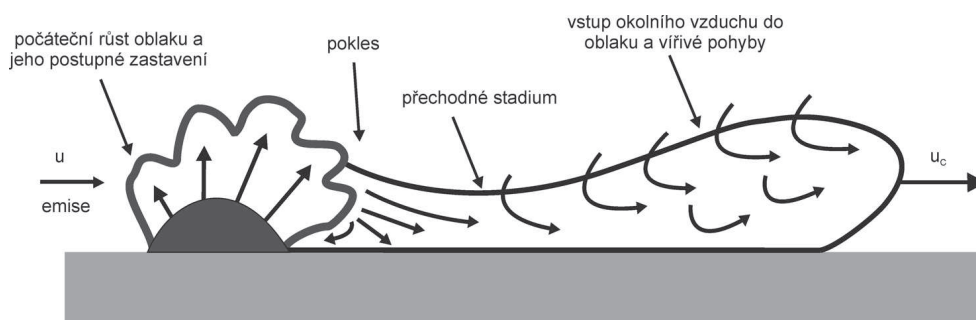
V případě, že je plyn těžší než vzduch, hovoříme o těžkém plynu. Plyn, který má molekulovou hmotnost větší než vzduch (cca $29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$), vytvoří po úniku ze zdroje plynný oblak, jehož velikost je závislá na celkovém množství uvolněného plynu. Plyny, které jsou lehčí než vzduch (při teplotě okolního vzduchu), ale které jsou uskladněny v kryogenním (podchlazeném) stavu, mohou také po svém úniku vytvářet oblaky těžší než vzduch. Tento stav u nich trvá do okamžiku, kdy jejich teplota stoupne natolik, že se hustota sníží pod $1,29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je hustota vzduchu za standardních fyzikálních podmínek (The CAMEO Software System, 2006).

V krátkém časovém intervalu od okamžiku uvolnění do atmosféry se takový plyn proto chová jinak, než jak je tomu v případě plynu lehčího než vzduch. Rozptyl těžkého plynu probíhá v několika, po sobě následujících fázích (Markiewicz, 2006b):

- Klesavá fáze (negativní vzlínání), během níž je dominantní silou gravitace; během této fáze vstupuje do oblaku vzduch, který ho zahřívá a zředuje, a tím ho činí lehčím.

- Přechodná fáze následovaná pasivní rozptylovou fází, kdy je již hustota oblaku významně nižší, a oblak se stává lehčím než vzduch.
- Fáze vznášivého rozptylu, která je poslední fází rozptylu a která nastává po dostatečném naředění oblaku.

Výše uvedené fáze rozptylu jsou ukázány na obrázku 32, reálný vzhled oblaku při přechodné fázi pak zachycuje obrázek 33.



Obrázek 32: Ukázka postupných fází rozptylu oblaku těžkého plynu (Markiewicz, 2006b), kde u je rychlost větru, tj. vzduchu vstupujícího do oblaku a u_c je rychlost postupu čela oblaku.



Obrázek 33: Vzhled oblaku aerosolu rozptylujícího se jako těžký plyn (snímek pořízený při terénních testech projektu SPREAD zachycuje tvar oblaku 120 sekund po úniku ze zdroje); (foto: Petr Skřehot).

V okamžiku, kdy hustota oblaku dosáhne hustoty vzduchu, začne se plyn rozptylovat pasivním rozptylem, který lze popsat podle gaussovského modelu, což v praxi představuje rozšiřování oblaku podél kužele s vrcholem ve zdroji a osou ležící ve směru vanutí větru. Empirické zkušenosti hovoří, že vyrovnání hustoty oblaku s hustotou vzduchu nastává při objemové koncentraci plynu okolo 10 000 ppm, což odpovídá objemové koncentraci látky ve vzduchu cca 1 % objemové (The CAMEO Software System, 2006). V případě malých úniků nastává vyrovnání hustot již ve vzdálenosti několika metrů od zdroje, u velkých úniků pak mnohdy až ve vzdálenostech stovek metrů od zdroje ve směru větru. V takových případech se již výrazněji uplatňuje charakter okolního terénu, a proto je nutné jej předem do programu zadat. Například údolí, kaňony, uliční zástavba měst a jiné uzavřené lokality ředění a rozptyl oblaku značně zpomalují.

Určit v praxi, zda se plyn bude rozptylovat podle modelu těžkého plynu či gaussovského modelu, však není tak snadné. Pouhá znalost hodnoty molární hmotnosti dané látky totiž nepostačuje, protože oblaky různých látek podléhají vnějším vlivům různě. Proto navrhl Reynolds v roce 1992 vztah pro výpočet bezrozměrného „Richardsonova čísla ze zdroje“ (Ri_o), jehož hodnota determinuje charakter rozptylu uniklého plynu z přímého zdroje (Reynolds, 1992). Je-li $Ri_o \leq 1$, pak se plyn bude rozptylovat podle gaussovského modelu; je-li $Ri_o > 1$, pak se plyn bude chovat jako těžký plyn. Pro jednorázový únik se Ri_o vypočte podle následující rovnice 4-30.

$$Ri_o = \frac{g(\rho_0 - \rho_a)V_i}{\rho_a A_0 u_*^2} \quad (4-30)$$

kde g je gravitační zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), ρ_a je hustota vzduchu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ρ_0 je hustota uvolněné látky ve zdroji ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), V_i je objem uvolněné látky (m^3), A_0 je půdorysná plocha zdroje (m^2) u_* je frikční rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Pro kontinuální únik se Ri_o vypočte podle rovnice 4-31.

$$Ri_o = \frac{g(\rho_0 - \rho_a)Q}{\rho_a d_0 u_{10} u_*^2} \quad (4-31)$$

kde mimo výše uvedených veličin je Q objem látky uvolněné za jednotku času (objemová rychlost úniku látky) ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) d_0 je rozměr zdroje (m), u_{10} je rychlost větru ve výšce 10 metrů nad zemí ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Richardsonovo číslo kvantitativně charakterizuje rozvoj turbulentních a konvektivních pohybů ve vzduchové hmotě (Bednář a Zikmunda, 1985), což v případě rozptylu oblaku dané látky v podstatě vyjadřuje relativní míru potenciální energie vzniklého oblaku plynu s ohledem na mechanickou energii získanou prostřednictvím turbulentního proudění (U. S. Department of Energy, 2004). Pravděpodobnost, že se uniklý plyn bude chovat jako těžký plyn, roste s jeho celkovým uvolněným množstvím,

resp. rychlostí úniku, s klesající rychlostí větru a zvyšující se stabilitou teplotního zvrstvení. Hodnota $Ri = 1$ odpovídá stavu, kdy je veškerá turbulentní kinetická energie v mezní vrstvě spotřebována působením stability teplotního zvrstvení (Bednář a Zikmunda, 1985).

Frikční rychlost u_* je za reálných podmínek podle Hanny (U. S. Department of Energy, 2004) rovna 5 % až 10 % hodnoty rychlosti větru ve výšce 10 metrů nad zemí. Řada programů, které využívají Richardsonova čísla coby kritéria pro výběr příslušného modelu (např. i ALOHA), používají do výpočtů střední hodnotu rychlosti tření u_* , která se podle Reynoldse (Reynolds, 1992) rovná hodnotě 0,0625-násobku rychlosti větru ve výšce 10 metrů (u_{10}). Veličina d_0 , která charakterizuje rozměr zdroje, představuje počáteční šířku či průměr oblaku bezprostředně po jeho vzniku, tj. do okamžiku, než se začne ředit vzduchem. V případě, že oblak vzniká odpařováním kapaliny z louže, bere se za d_0 průměr této louže (m) (U. S. Department of Energy, 2004).

Model pro turbulentní rozptyl

Model popisující turbulentní rozptyl je založen na skutečnosti, že látka dotující tvorbu oblaku vnáší do tvorby oblaku kinetickou energii a tato energie způsobuje intenzivní promíchávání unikající plynné látky s okolním vzduchem. Důsledkem je výrazně rychlejší zředování unikajícího plynu, což se projevuje zkrácením dosahu oblaku, oproti difúznímu modelu rozptylu. Turbulentní model rozptylu je vyjádřen vztahem 4-32.

$$c(x, r) = k_1 c_0 \frac{d}{x} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_0}} \cdot \exp\left(-k_2 \frac{r}{x}\right)^2 \quad (4-32)$$

kde $c(x, r)$ je koncentrace plynu v bodu daném souřadnicemi x a r ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), k_1 a k_2 jsou empirické parametry, c_0 je koncentrace plynu při úniku z otvoru ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), d je průměr únikového otvoru (m), x je vzdálenost od únikového otvoru ve směru osy oblaku (m), r je radiální vzdálenost od osy oblaku (m), ρ_a je hustota vzduchu ($1,29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a ρ_0 je hustota plynu ve zdroji (u únikového otvoru) ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Vzhledem k omezené platnosti použitého modelu (platí pouze pro některé limitní stavy) je výpočet automaticky kontrolován difúzním modelem rozptylu pro kontinuální dotaci látky. Proto je v zadání modelů, provádějících vyhodnocení turbulentního modelu rozptylu pro kontinuální dotaci látky, nutno zadávat i parametry terénních a atmosférických podmínek.

Difúzní model pro rozptyl při jednorázové dotaci látky (PUFF)

Difúzní model rozptylu při jednorázové dotaci látky je model popisující tvorbu oblaku, který je vytvářen časově omezenou dodávkou látky do oblaku. Model je založen na skutečnosti, že látka dotující tvorbu oblaku nevznáší do tvorby oblaku

žádnou kinetickou energii a tvorba oblaku a jeho časová stálost je funkcí difúze, množství látky dotující tvorbu oblaku, terénních a atmosférických podmínek. Pro difúzní model rozptylu (při jednorázové dotaci látky) je použit vztah:

$$c(x, y, z, t) = \frac{2m}{\sqrt{(2\pi)^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}} \exp -\frac{1}{2} \left(\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \quad (4-33)$$

kde $c(x, y, z, t)$ je koncentrace látky ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) v bodě daném souřadnicemi x, y, z (m) a časem t (s), m je množství (jednorázově) uniklé látky (kg), x, y, z – souřadnice oblaku (délka, šířka, výška) (m), $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ jsou směrodatné odchylky pro délku, šířku a výšku oblaku (tzv. rozptylové koeficienty) (m), u je rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a t je čas (doba od úniku) (s).

Difúzní model pro rozptyl plynu při kontinuální dotaci látky (PLUME)

Difúzní model rozptylu při kontinuální dotaci látky je model popisující tvorbu oblaku, který je vytvářen nepřetržitou dodávkou látky do oblaku, za vytvoření rovnováhy mezi látkou dotující tvorbu oblaku a látkou unikající z vytvořeného oblaku (ředění látky nad danou hodnotu koncentrace). Model je řešen jako časově stálý a vychází z předpokladu, že látka dotující tvorbu oblaku nevnáší do tvorby oblaku žádnou kinetickou energii. Tvorba oblaku a jeho časová stálost je funkcí difúze, množství látky dotující tvorbu oblaku, terénních a atmosférických podmínek (Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2005). Pro difúzní model rozptylu při kontinuální dotaci látky je použit vztah 4-34.

$$c(x, y, z) = \frac{M}{u\pi\sigma_y\sigma_z} \exp -\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \quad (4-34)$$

kde $c(x, y, z)$ jsou koncentrace látky ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) v bodě daném souřadnicemi x, y, z . M je množství látky uvolněné za jednotku času ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), x, y, z jsou souřadnice oblaku (délka, šířka, výška), σ_y, σ_z jsou směrodatné odchylky pro šířku a výšku oblaku (m), u je rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Box model pro rozptyl těžkého plynu

Jedná se o nejjednodušší model použitelný pro úniky těžkého plynu. Box modely obvykle předpokládají jednoduchý tvar oblaku, v němž je koncentrace látky uvnitř oblaku stejná. Tyto modely lze použít buď pro jednorázové úniky, nebo pro úniky kontinuální. Uvolněný oblak je modelován jako válec se stejným počátečním poloměrem a výškou, který se skládá ze směsi látky v plynné a kapalně fázi (kapičky) a vzduchu. Rychlost unášení oblaku závisí na uplatnění turbulence, na rozdílu hustoty oblaku a hustoty vzduchu a na rychlosti větru. Box modely tudíž řeší relativně jednoduché rovnice s malým počtem proměnných, které jsou pouze funkcí vzdálenosti

od zdroje směrem po větru (Sadhra a Rampal, 1999). Jelikož je válec přemísťován ve směru větru, převažující silou je gravitace, a proto se výška válce snižuje a jeho poloměr zvětšuje. Tato fáze je známa jako „klesavá fáze“. Protože vzduch vniká do oblaku z okrajů a shora, celá směs se ohřívá a zředuje. Existuje určitý bod během této fáze, ve kterém je oblak natolik zředěn, že se stává lehčí než vzduch a je neutrálně rozptylován vzduchem. Od tohoto okamžiku může být pro popis rozptylu uplatňován gaussovský model. Co se týče kontinuálního úniku, zformovaná významná vlečka je modelována jako sled tenkých pravoúhlých vrstev, pro které jsou aplikovány stejné principy (Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2005).

Modely „Computational Fluid Dynamics“

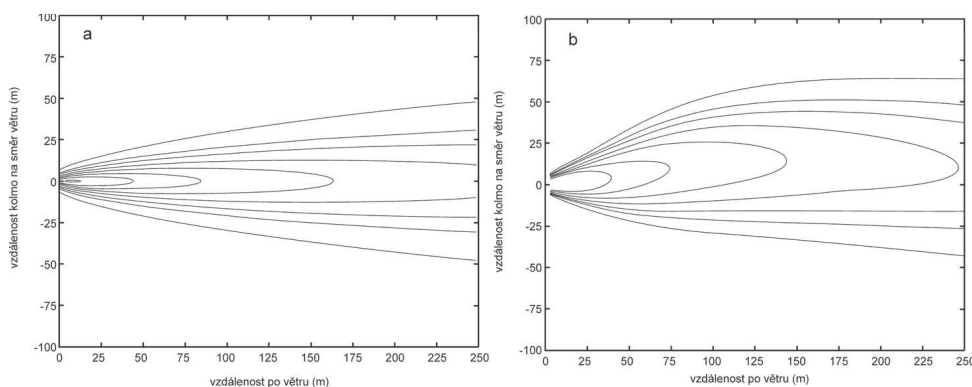
Modely „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) v současnosti představují nejpracovanější, nejvýkonnější, ale také nejsložitější skupinu rozptylových modelů. V podstatě se jedná o modely založené na studiu dynamiky proudění tekutin pomocí numerického řešení bilančních rovnic zaměřených na velké detaily při současném zachování komplexní geometrie a časové kontinuity. Algoritmus CFD modelů tak zahrnuje mimo jiné rovnice popisující látkovou bilanci, rovnice popisující bilanci hybnosti, rovnice popisující energetickou bilanci, a také rovnice pro výpočet Reynoldsova napětí. Účelem těchto složitých výpočtů je umožnit modelovat šíření/rozptyl látek nad složitým terénem (tzv. komplexním terénem) zahrnující překážky různého tvaru a ohraničení při současném vzniku nehomogenit (turbulence) v proudění (Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2005).

Pro havarijní plánování je využití CFD modelů možné, ale pro jednoduché geometrie bez překážek je efektivnější využívat klasické modely. Důvodem je to, že pro CFD modelování je stále ještě problém přesně definovat vertikální teplotní gradient (tzv. stabilitu atmosféry) a okrajové podmínky. V současnosti probíhá usilovné bádání zaměřené na zlepšování CFD modelů, které je podpořené také četnými experimenty prováděnými za reálných podmínek (např. Fladis experimenty prováděné Risø National Laboratory v Dánsku a Švédsku). Na obrázcích 35a a 35b jsou prezentovány výsledky jednoho z testů, kdy byl z umělého zdroje do atmosféry dvojfázovým výtokem emitován po dobu 3 až 40 minut amoniak (viz obrázek 34). Studium rozptylu vzniklého oblaku, který byl ve všech fázích rozptylu detailně sledován, přineslo zjištění, že amoniak vytékající rychlostí 0,25 až 0,6 kg.s⁻¹ se rozptyluje jako těžký plyn až do vzdálenosti 20 metrů od zdroje, a do vzdálenosti 70 metrů od zdroje pak jeho rozptyl velmi dobře odpovídá modelu pro neutrální plyn (Kiša a kol., 2007).

Současné modely umožňují poměrně dobře získávat 2D výpočty, tj. vertikální profily koncentrací, avšak toto platí pouze pro omezené vzdálenosti od zdroje (přesnost CFD modelů se vzdáleností od zdroje klesá). Lze již samozřejmě získávat také 3D modely, avšak jejich provádění si vyžaduje vysoce výkonných počítačů, které musejí zpracovávat náročné výpočty pro několik milionů buněk prostorové sítě (Kiša a kol., 2007).



Obrázek 34: Dvoufázový únik zkapalněného amoniaku simulující únik ze železniční cisterny (armaturou pro stáčení) (Kiša a kol., 2007). (Foto: Risø National Laboratory).

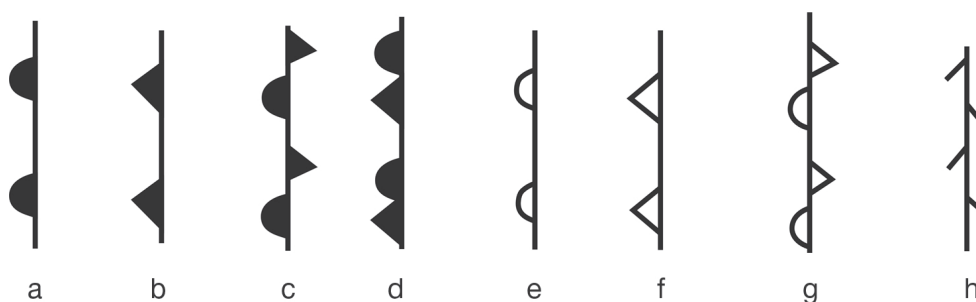


Obrázek 35: Koncentrační izolinie pro rozptyl amoniaku za podmínek testu Fladis09 získané pomocí CFD modelu (a) versus výsledky získané experimentem (b) (Duijm a kol., 2005).

4.5 Transport a rozptyl nebezpečných plynů a aerosolů v atmosféře

4.5.1 Povětrnostní situace nad územím většího měřítka

Každodenně se v televizi, ale také v novinách či na internetu, setkáváme v předpovědích počasí s podivně vyhlížejícími mapami, na nichž se pod změtí čar a symbolů (viz obrázek 36) ztrácejí kontury evropského kontinentu. Těmto mapám říkáme povětrnostní, nebo též **synoptické**, a slouží nám k zobrazení širokého spektra meteorologických prvků a projevů samotného počasí nebo k prognózám vývoje počasí. Základní podmínkou pro konstrukci povětrnostní mapy je záznam těchto prvků v určitém, pevně definovaném, časovém okamžiku.

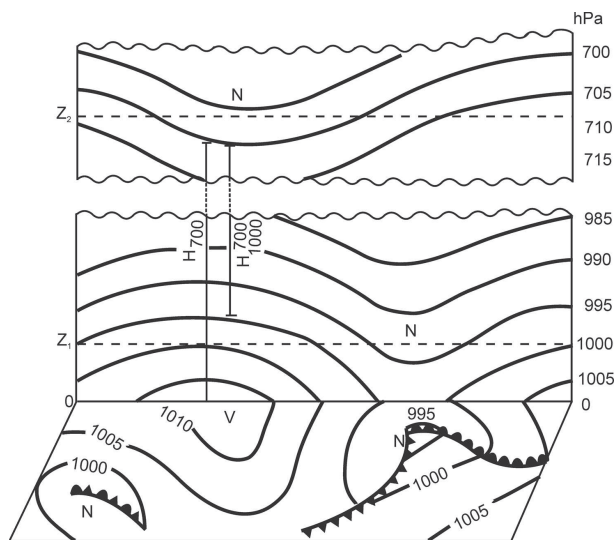


Obrázek 36: Některé symboly používané na synoptických mapách (zleva: (a) teplá fronta, (b) studená fronta, (c) stacionární okluzní fronta, (d) okluzní fronta, (e) výšková teplá fronta, (f) výšková studená fronta, (g) výšková okluzní fronta, (h) čára instability).

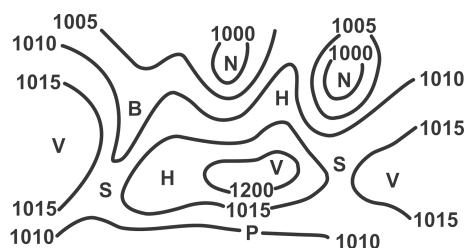
Aby byla mapa co nejpřesnější, je nutné provádět sběr meteorologických dat prostřednictvím široké sítě hustě rozmístěných pozorovacích stanic. Naměřená data jsou pak v meteorologických ústředích jednotlivých států zpracována a vyměňována s ostatními státy. Tímto způsobem pak může vzniknout synoptická mapa širokých rozměrů, která dále slouží k předpovědním analýzám. Kromě map přízemních, se kterými se setkáváme nejčastěji, jsou za pomoci údajů z radiosond konstruovány také mapy výškové, které slouží k popisu poměrů v určitých barických hladinách (hladinách, kde je tlak vzduchu všude stejný). Nejčastěji používané hladiny jsou 850 hPa (cca 1500 m), 700 hPa (cca 3000 m) a 500 hPa (cca 5500 m). Pomocí série výškových map získáváme přibližné informace o vertikálním profilu atmosféry, tj. informace o změně příslušných parametrů a veličin v závislosti na výšce (pro ilustraci vertikální změna tlaku – viz obrázek 37). Tyto údaje jsou pro konstrukci krátkodobých předpovědí počasí velmi důležité.

Vzduchové hmoty

Abychom však byli schopni pochopit procesy, které se v atmosféře neustále dynamicky vyvíjejí, je potřeba poznat řadu důležitých faktorů, které se na vývoji počasí významně podílejí. Jedním z nich je charakter vzduchových hmot. Jelikož naše atmosféra není při pohledu z větších měřítek homogenní, musíme k charakteru jednotlivých vzduchových hmot přihlížet. Vzduchové hmoty můžeme rozdělit z hlediska termodynamického a podle původu. Podle termodynamických kritérií rozlišujeme vzduchové hmoty teplé a studené anebo stabilní (teplota s výškou klesá) a instabilní (teplota s výškou roste). Častěji se však v předpovědích setkáváme s dělením podle původu – rozlišujeme vzduchové hmoty kontinentální a maritimní (mořské), nebo též ekvatoriální (z oblasti rovníku), tropické (z oblasti subtropů), polární (z oblasti mírného pásma), arktické (z oblasti severního pólu). Svým přesouváním pak ovlivňují počasí nad rozsáhlými oblastmi, přičemž počasí u nás ovlivňují všechny z nich, vyjma ekvatoriálního.



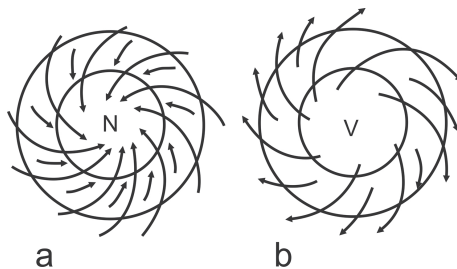
Obrázek 37: Vertikální rozložení izobarických hladin.



Obrázek 38: Vyznačení základních tlakových útvarů na synoptické mapě.

Přesun vzduchových hmot, tak jak jsme o nich hovořili výše, by však bez určitých „hnacích“ mechanismů nebyl možný. Tyto mechanismy jsou velmi komplikované, ale jejich společným jmenovatelem je především působení různě rozložených tlakových útvarů. Mezi tlakové útvary řadíme kromě tlakových níží (N) a tlakových výší (V) také brázdy nízkého tlaku (B), hřebeny (výběžky) vysokého tlaku (H) a sedla (deformační pole) (S) – viz obrázek 38.

Dynamika horizontálního pohybu vzduchu probíhá přesunem vzduchových hmot z oblastí vyššího tlaku do oblastí tlaku nižšího. Jelikož tyto pohyby probíhají všemi směry (tj. nikoliv pouze podél rovnoběžek), je směr pohybu každé vzduchové částice ovlivňován úchytkou zemské rotace, tzv. Coriolisovou silou, která způsobuje změnu trajektorie částice pohybující se na severní polokouli směrem vpravo, tj. směrem k východu, pohybuje-li se na sever, resp. směrem k západu, pohybuje-li se na jih. Charakter přízemního proudění vzduchu v tlakové níži, resp. výši, pak zobrazuje obrázek 39a, resp. 39b. Ve větších výškách, kde se již neuplatňuje tření vzdu-



Obrázek 39: Charakter proudění vzduchu uvnitř a) tlakové níže a b) tlakové výše (platí pro severní polokouli).

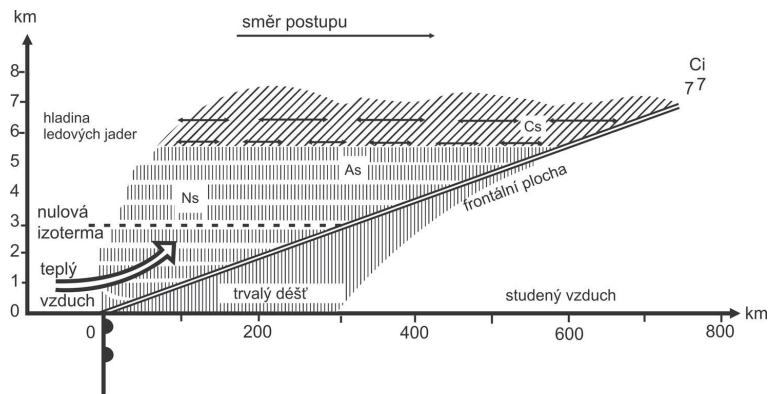
chu o zemský povrch, vane vítr téměř podél izobar a tento vítr nazýváme **větre** **geostrofickým**¹⁹.

Fronty a čáry instability

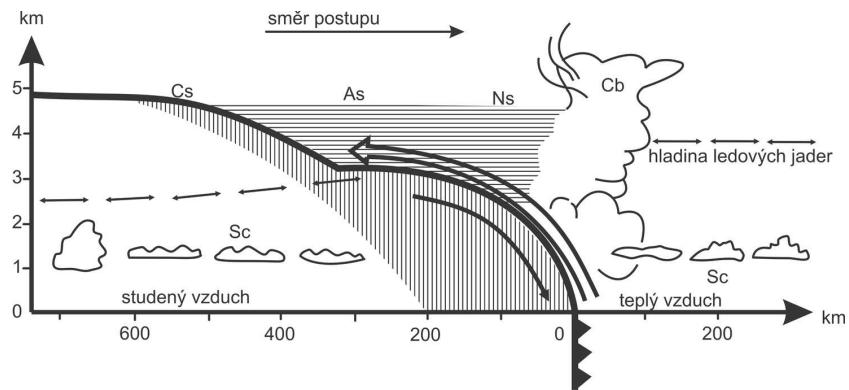
Jestliže budeme považovat tlakové útvary za jakési motory pohánějící atmosférickou dynamiku, a tudíž i vývoj počasí, pak samotný charakter počasí, tak jak jej všeobecně vnímáme (jasno, polojasno, zataženo, déšť), určují atmosférické fronty. **Atmosférická fronta** je rozhraním mezi dvěma vzduchovými hmotami rozličných fyzikálních vlastností (teplota, vlhkost, vertikální profil, rychlost pohybu apod.), na kterém se vlivem procesů, které provázejí jejich vzájemný kontakt, vytváří charakteristická oblačnost a tomu odpovídající projevy počasí. Fronty dělíme podle rychlosti pohybu na pohybující se a stacionární, anebo, a to zejména, podle charakteru na teplou, studenou a okluzní. Známe také fronty výškové, které počasí při zemském povrchu příliš neovlivňují, či frontální rozhraní, které představuje v podstatě stacionární frontu s ne příliš velkými rozdíly hodnot fyzikálních veličin mezi těmito vzduchovými hmotami. Teplou a studenou frontu, spojené s tlakovou níží pak nazýváme **frontálním systémem** (viz dále).

Teplá fronta je úzké rozhraní mezi studeným a teplým vzduchem, kde dominantní roli hraje teplá vzduchová hmota směřující ke studené (viz obrázek 40). Teplý vzduch je lehčí, vykluzuje po těžším studeném vzduchu a nasouvá se nad něj. V souvislosti s výstupnými proudy dochází ke kondenzaci vodní páry, takže se vytváří mohutný systém typické vrstevnaté oblačnosti, která sahá až stovky kilometrů před frontální čárou. Srážky, které zde vznikají kondenzací vodní páry, mají trvalý charakter a jejich intenzita je poměrně stálá. Šířka srážkového pásma bývá 300 až 400 kilometrů a nachází se před frontální čarou. Prvním příznakem blížící se teplé fronty jsou oblaky vysokého patra, které postupně zatahují oblohu (Cirrus a Cirrostratus). Oblačnost postupně houstne a snižuje se jejich základna. Přichází Altostratus a nakonec i mohutný dešťový oblak Nimbostratus. Rychlost postupu teplé fronty činí 20 až 30 km.h⁻¹.

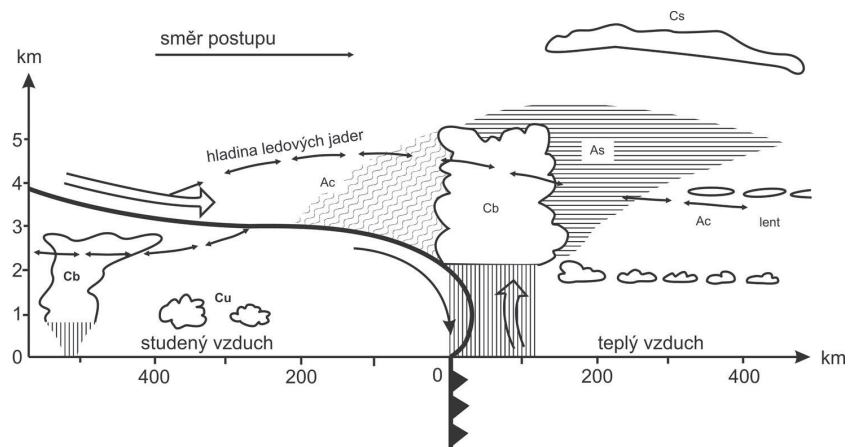
¹⁹ Rovnovážné, nezrychlované proudění vzduchu v horizontální rovině, při němž horizontální složky síly tlakového gradientu a Coriolisovy síly jsou v rovnováze.



Obrázek 40: Teplá fronta v řezu (Munzar, 1989).



Obrázek 41: Studená fronta 1. druhu (Munzar, 1989).

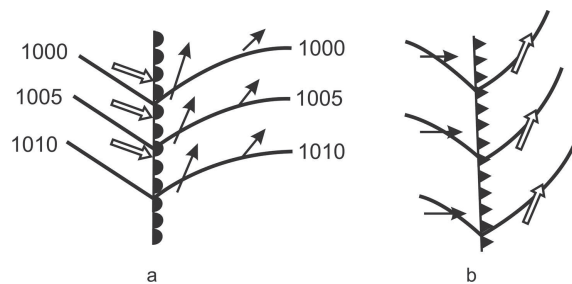


Obrázek 42: Studená fronta 2. druhu (Munzar, 1989).

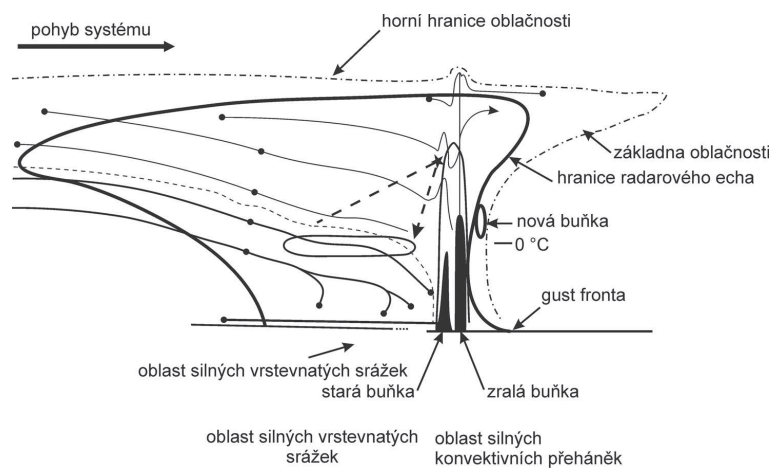
Studená fronta je úzké rozhraní mezi masou teplého a studeného vzduchu. Postupuje za teplou frontou rychlostí až o polovinu vyšší a uzavírá teplý sektor tlakové níže. Na studené frontě proniká těžší studený vzduch při zemi ve tvaru klínu nebo jakéhosi jazyku do teplého vzduchu, a to tak, že se pod něj podsouvá. Teplý vzduch je nucen vystupovat podél frontální plochy vzhůru, což vede k jeho ochlazení a kondenzaci vodní páry v něm obsažené, což má za následek tvorbu oblaků a vznik srážek. Přechod studené fronty se projevuje převážně výskytem kupovité oblačnosti s přeháňkami a v létě s bouřkami. V zimě nastává přechod kapalných srážek v tuhé. Po přechodu studené fronty dochází k citelnému ochlazení. Nejsou výjimkou rozdíly teplot $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a více. Studené fronty rozlišujeme podle rychlosti postupu na prvního a druhého druhu. Studené fronty prvního druhu (viz obrázek 41) postupují pomalu. Výstupné proudění vytlačovaného teplého vzduchu probíhá po celé výšce frontální plochy. Srážkové pásmo, které je široké cca 200 kilometrů, se zde nachází až za čarou fronty a je spjata zejména s vrstevnatou oblačností Nimbostratu či Altostratu. Studené fronty druhého druhu (viz obrázek 42) postupují rychleji (přibližně $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, v extrémních případech až $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) a mají výrazně užší srážkové pásmo (zhruba jen 100 km), které se nachází před frontální čarou. Pro tyto fronty, které jsou četnější než studené fronty prvního druhu, jsou pro ně typické mohutně vyvinuté oblaky druhu Cumulonimbus, silné lijáky, intenzivní bouřky a prudké nárazy větru dosahující až rychlosti $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (přes $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Blížící se fronta se začíná projevovat vytvářením vysoké hradby kupovitých oblaků a obloha někdy začíná nabývat hrozivě šedivého vzhledu.

Pokud budeme uvažovat nejběžnější situace přechodu jednotlivých front (frontálního) systému spojeného s tlakovou níží, pak deformace přízemního tlakového pole probíhá tak, že se izobary za jednotlivými frontálními čarami obvykle zhušťují a lomí se v tupém úhlu směrem vlevo ve směru pohybu fronty. Díky tomu se mění i směr přízemního větru. Před teplou frontou vane studenější vítr, a to ve směru téměř kolmém na izobary, za ní je pak vítr teplejší a vane téměř podél izobar (viz obrázek 43a). V případě studené fronty je tento sled opačný – před frontou vane teplejší vzduch téměř podél izobar, za frontou je pak citelně chladnější a vane v ostrém úhlu k izobarám (viz obrázek 43b). Netřeba asi více připomínat, že po přechodu teplé fronty se vždy mírně oteplí, po přechodu studené fronty naopak ochladí – někdy velmi výrazně.

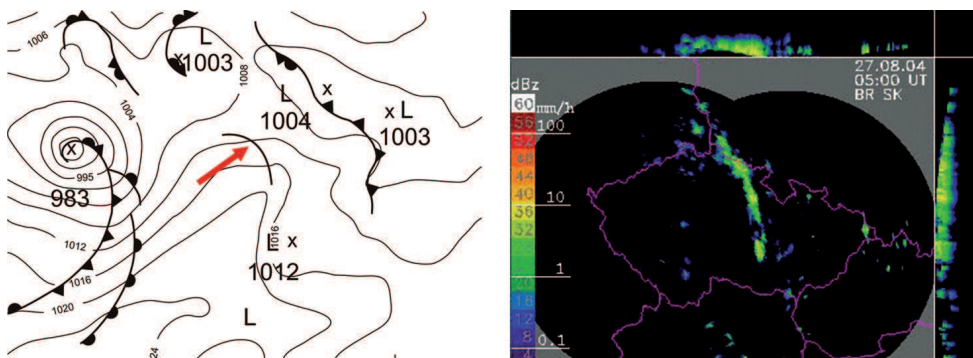
Kromě front známe ještě liniová seskupení konvektivních buněk, které nazýváme čarami instability. Ačkoli svým charakterem zdánlivě připomínají rychle postupující studené fronty 2. druhu, jsou čáry instability samostatnou skupinou atmosférických útvarů, o nichž toho stále ještě mnoho nevíme. Charakteristické pro ně je úzké pásmo instabilního zvrstvení vzduchu (ne širší než 50 km), kde se v řadě vedle sebe (v délce ne větší jak cca 500 km) vytvářejí jednotlivé buňky silně konvektivních bouřek (viz obrázek 44). Čáry instability, které jsou na synoptických mapách označeny černou tučnou nepřerušovanou čarou, nacházíme obvykle několik stovek kilometrů před nebo za studenou frontou; někdy před i za současně (např. obrázek 45).



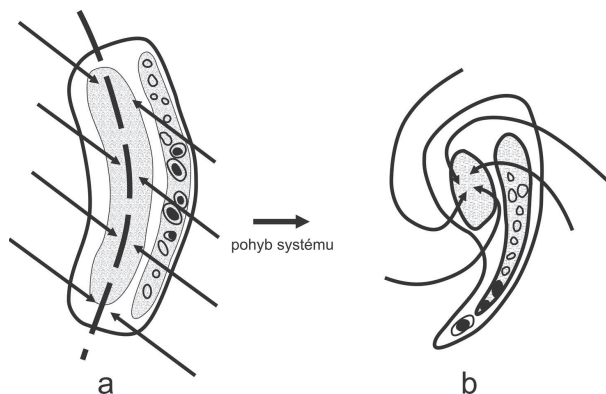
Obrázek 43: Charakter deformace tlakového pole po přechodu teplé (a), resp. studené (b) fronty a stáčení směrů větru.



Obrázek 44: Řez konvektivní buňkou vznikající na čáře instability (Kašpar, 2001).



Obrázek 45: Čára instability na přízemní předpovědní synoptické mapě (vlevo) a její reálná podoba na snímku z meteorologického radaru (vpravo) – situace ze dne 27.8.2004 (zdroj: Metoffice a ČHMÚ).



Obrázek 46: Dva možné typy horizontální struktury oblačnosti čar instability – (a) symetrická squall line, (b) asymetrická squall line (Kašpar, 2001).

Obvyklý liniový charakter čar instability (viz obrázek 46a) však může být někdy narušen vlivem terénních překážek, které často způsobují nehomogenity v proudění. Výraznější vlivy pak mohou vést až ke vzniku asymetrie linie, díky čemuž dojde ke vzniku jedné, popřípadě i několika dominantních buněk, které začnou strhávat proudění ke svému středu. Takovéto buňky pak mohou připomínat miniaturní tlakové níže (viz obrázek 46b).

Povětrnostní situace pro střední Evropu

Střední Evropa patří pro svou polohu mezi oblasti, kde vývoj počasí ovlivňují různé vzduchové hmoty. Maritimní polární či arktický vzduch ze severních oblastí Atlantského oceánu, kontinentální polární či arktický vzduch původem z Ruska, maritimní i kontinentální tropický vzduch původem ze Středomoří, Sahary či subtropických oblastí Atlantského oceánu – tyto všechny hmoty mohou čas od času zavítat do střední Evropy. Výsledkem jejich působení na naše klima je pak široká paleta různých (charakteristických) projevů počasí. Aby byla tvorba předpovědí nějakým způsobem zjednodušena, byly definovány tzv. charakteristické povětrnostní situace, kterých pro střední Evropu rozlišujeme šestnáct (Seifert, 1994). Jedná se o:

- západní cyklonální,
- západní anticyklonální,
- severozápadní cyklonální,
- severozápadní anticyklonální,
- severní cyklonální,
- severovýchodní cyklonální,
- severovýchodní anticyklonální,

- východní cyklonální,
- východní anticyklonální,
- jihovýchodní anticyklonální,
- jižní anticyklonální,
- jihozápadní anticyklonální,
- jihozápadní cyklonální,
- brázda nízkého tlaku ve střední Evropě,
- cyklóna ve střední Evropě a
- anticyklóna ve střední Evropě.

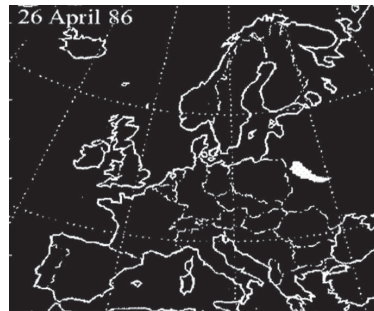
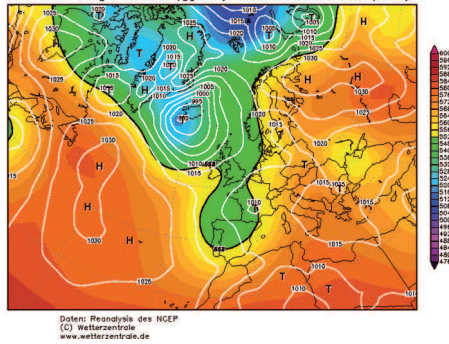
Meteorologové však nepopisují počasí podle jeho projevu, ale podle toho, jaké tlakové útvary jej ovlivňují (řídí) a jaký vzduch a z jakého směru nad dané území proniká. Blíže jsou jednotlivé povětrnostní situace popsány v Příloze P-1.

Analýza povětrnostní situace po havárii v Černobylu

Znalosti povětrnostní situace nad územím velkého měřítka a procesů, které v atmosféře probíhají, nabývají na významu zvláště při mimořádně závažných haváriích spojených s úniky nebezpečných látek do atmosféry a s možnými rozsáhlými následky. Příkladem takové události může být havárie v jaderné elektrárně v Černobylu. Během série výbuchů byly do výšky asi 1500 metrů vyneseny silně radioaktivní látky. V této se již nachází tzv. volná atmosféra, takže proudění vzduchu zde již není ovlivňováno topografií terénu a proudí tak více méně podél izobar. V okamžiku havárie proudil vzduch v této výšce směrem od jihovýchodu a to rychlostí 8 až 10 m.s⁻¹. V oblasti Islandu se 26. dubna nacházela poměrně stabilní tlaková níže a v severní oblasti evropské části Ruska se nacházela tlaková výše, která se postupně přesouvala směrem k jihu a slábla. První čtyři dny havárie tak rozptýl oblaku ovlivňovaly tyto tlakové útvary, avšak 1. května se z výběžku vysokého tlaku vzduchu vybíhajícího z Azorské tlakové výše postupně zformovala nová tlaková výše, která výrazně ovlivnila další postup radioaktivního oblaku nejprve směrem nad západní Evropu a posléze nad černomořskou oblast. První oblak tak postupoval nejprve přes Polsko přibližně směrem na tehdejší Československo a na Rakousko. Postupně se ale začal stáčet k severozápadu a rozptýlil se nad územím Německé demokratické republiky, Německé spolkové republiky, severní Francie a zeměmi Beneluxu. Druhá velká vlna radioaktivního zamoření (druhý oblak) následně zasáhla i Bulharsko, což se stalo následkem působení od západu se nasouvající nově vzniklé tlakové výše, která postupně zamořený vzduch vytlačila směrem k jihozápadu a poté, co postupně zanikala v oblasti Středozemního moře, i k jihu a jihovýchodu (viz sled obrázků 47). Během jednoho týdne se tak poměrně výrazně počasí nad celou Evropou měnilo, ruku v ruce s tím, jak se postupně vyvíjely hlavní tlakové útvary řídící dění v atmosféře nad daným územím. Díky tomu se tak kontaminace radionuklidy (především

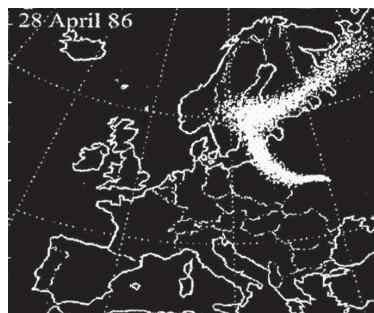
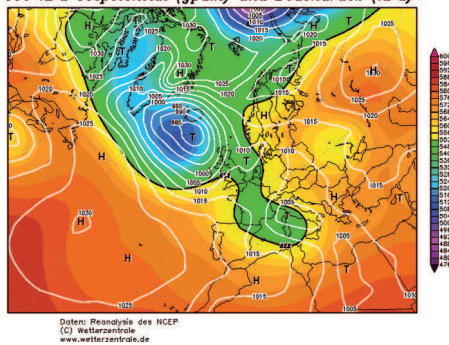
26. dubna

26APR1986 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



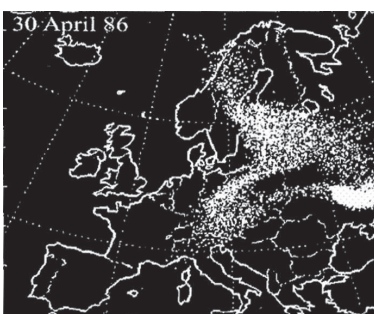
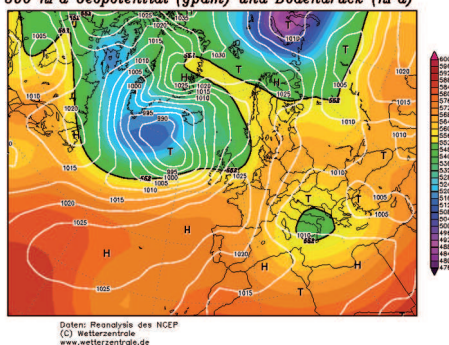
28. dubna

28APR1986 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



23. dubna

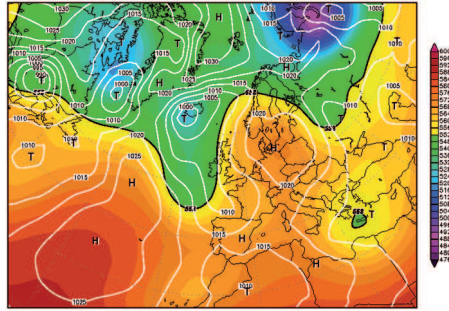
30APR1986 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



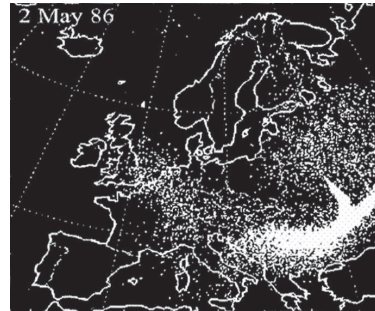
Obrázek 47: Vývoj synoptické situace (Wetterzentrale, online) a postup radioaktivního oblaku mezi dny 26.4. a 6.5.1986 (Drábová, online).

2. května

02MAY1986 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

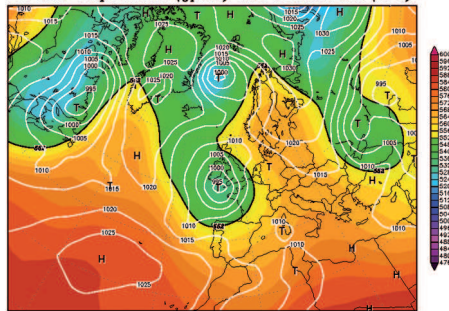


Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de



4. května

04MAY1986 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

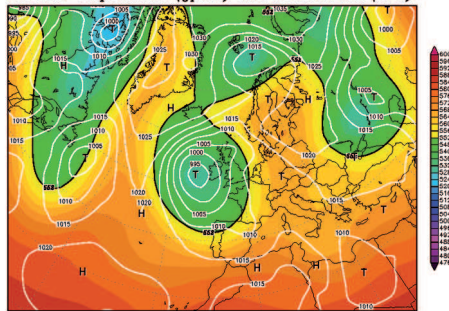


Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

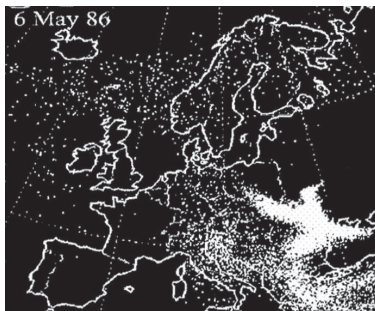


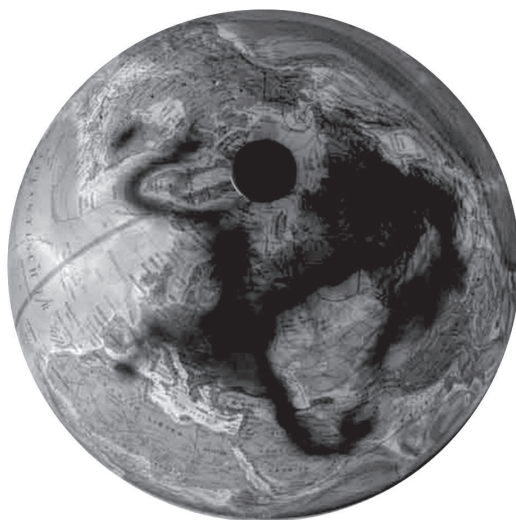
6. května

06MAY1986 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de





Obrázek 48: Vizualizace území zasažené radioaktivním oblakem po havárii v Černobylu (zdroj: <<http://www.worldprocessor.com>>).

pak střednědobého ^{137}Cs) postupně rozšířila na obrovskou plochu o rozloze více než 200 tisíc km^2 (Černobyl, online) (viz obrázek 48).

4.5.2 Místní meteorologické podmínky

Mezi meteorologické podmínky, které výrazným způsobem ovlivňují rozptyl látek v atmosféře, patří zejména rychlost a směr vanutí větru, charakter proudění vzduchu, vertikální teplotní gradient (tzv. stabilita atmosféry), teplota a vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, srážky a výška, ve které se nachází vrstva inverze. Všechny tyto prvky sledujeme v tzv. mezní vrstvě atmosféry.

Proudění vzduchu

Vzhledem k vzájemnému působení mezi atmosférou a zemským povrchem rozeznáváme **mezní vrstvu atmosféry** a **volnou atmosféru**. Mezní vrstva atmosféry je obecně řečeno vrstva, v níž se bezprostředně projevuje vliv zemského povrchu na souhrn meteorologických prvků. Chápeme ji také jako vrstvu, v níž se projevuje tření proudícího vzduchu o zemský povrch, což vede ke vzniku turbulencí, které se projevuje nárazy větru, jeho stáčením apod. V tomto smyslu často mluvíme o vrstvě tření. Mezní vrstva atmosféry sahá od zemského povrchu do výšky několika set metrů až cca dvou kilometrů a její horní hranice se zvyšuje s členitostí zemského povrchu, s rychlostí větru a instabilitou teplotního zvrstvení. Průměrná nadmořská výška mezní vrstvy je asi 1,5 km, což zhruba odpovídá výšce izobarické hladiny 850 hPa (proto je pro předpověď rozptylu znečišťujících příměsí na velké vzdálenosti nejlepší sledovat synoptickou situaci právě v této hladině). Nad mezní vrstvou leží



Obrázek 49: Kouřová stopa vzniklá při požáru rafinerie v rafinerii Oklahoma Oil Refinery ve Wynnewoodu v americké Oklahomě – svrchní část již dosáhla volné atmosféry. (zdroj: <<http://www.faam.ac.uk/public/bulletin.html>>).

volná atmosféra. Proudění vzduchu zde není ovlivňováno třením o zemský povrch, takže se částice vzduchu pohybují podél izobar (tzv. geostrofické proudění). Velmi dobře tuto situaci vystihuje obrázek 49, kde je zachycena kouřová stopa vzniklá při požáru rafinerie v rafinerii Oklahoma Oil Refinery ve Wynnewoodu v americké Oklahomě (27. 4. 2007). Podobně jako při jiných silných požárech má vzniklý oblak tvar kónicky se rozšiřujícího sloupu zakončeného mohutným kupovitým oblakem s vrcholovým chocholem. Dosáhne-li oblak spodní hranice volné atmosféry, rozšíří se do relativně tenké avšak rozsáhlé vrstvy, která je unášena (geostrofickým) větrem v horizontálním směru.

Nejspodnější částí mezní vrstvy atmosféry, přibližně do výšky 10 metrů, je povrchová vrstva, která je třením o povrch nejvíce ovlivňována, a tak proudění v ní je často velmi chaotické. Uvnitř této vrstvy je tzv. dynamická vrstva, jejíž mocnost je 1 až 10 metrů. Mezi dynamickou vrstvou a samotným zemským povrchem se pak nachází mezifázová vrstva, jejíž výška záleží na nerovnostech povrchu (Lees, 1996). V této vrstvě již můžeme pozorovat mikroturbulence vznikající například i za jednotlivými stébly obilí, kamínky apod.

Turbulentní proudění je takové proudění tekutiny, při kterém se proudnice navzájem promíchávají. Částice tekutiny vykonávají při proudění kromě posouvání i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Rychlosti jednotlivých částic se tak nepravidelně mění, tzn., částice již nemají ve všech místech neměnnou rychlost, a proudění tedy není stacionární. Vznik turbulentního proudění vyžaduje nadbytek energie v systému. Je-li totiž energie málo, resp. jeho přísun je relativně nízký a konstantní, je proudění stacionární a příliš se nemění (příkladem může být proudění pozorované v horních vrstvách atmosfér planet Uranu a Neptunu). Energie podílející se na vzniku turbulentního proudění v mezní vrstvě atmosféry má dva hlavní zdroje. Jedním zdro-

jem je mechanické tření proudícího vzduchu o povrch, což vede ke změně rychlosti horizontální složky větru s výškou, a druhým zdrojem je stáčení směru větru s výškou. Za instabilních podmínek (blíže je tento pojem vysvětlen níže) je pak dalším zdrojem turbulentní energie konvekce, tj. vertikální směr proudění vznikající díky nerovnoměrnému zahřívání zemského povrchu.

Hlavní faktory, které určují turbulenci, jsou gradient rychlosti větru, terénní nerovnosti a teplotní rozdíly mezi povrchem a vzduchem. Turbulence má tendenci se zvyšovat s rostoucím gradientem rychlosti větru a s rostoucí teplotou vzduchu těsně u povrchu země ve srovnání s teplotou vzduchu ve výšce 10 metrů.

Kromě turbulencí se můžeme setkávat také se složitými typy proudění, které vznikají zejména v nočních hodinách v údolích nebo přímořských oblastech. Tato proudění jsou součástí lokálních cirkulačních systémů nazývaných bríza (blíže viz níže) (Lees, 1996).

Rychlost větru

Dominantní vliv na rozptyl látek v atmosféře v první fázi rozptylu má jak charakter proudění vzduchu, tak i rychlost větru při povrchu (do 10 metrů výšky). Vliv větru se uplatňuje ve všech fázích rozptylu, ponejvíce pak ve fázi pasivního rozptylu. Rychlost větru je vlivem tření vzduchu o zemský povrch v různých výškách různá. Tento fakt se může výrazně uplatnit při rozptylu vertikálně mohutnějších oblaků, kdy přízemní část oblaku se již po několika sekundách od úniku ve svém postupu značně „opožďuje“ oproti jeho horním partiím. Pro výpočet rychlosti větru v závislosti na výšce se nejčastěji používá následující vztah, viz rovnice 4-35²⁰:

$$u(z) = u_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^{p_i}, \quad (4-35)$$

kde z je výška nad zemí (m), pro kterou rychlost větru počítáme, u_r je rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) v referenční výšce z_r (m) a p_i je index vztažený k místním podmínkám.

Nad stejnorodým terénem a za podmínek neutrální atmosférické stability se vertikální profil rychlosti větru blíží logaritmické závislosti, kde jako proměnné vstupují výška a drsnost povrchu (Macdonald, 2003). Tento vztah lze vyjádřit následující rovnicí 4-36:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (4-36)$$

²⁰ Existují i jiné vztahy, pomocí kterých lze počítat rychlost větru ve výšce. Jedná se o vztahy vycházející ze znalosti odporu, který klade povrch vanoucímu větru, anebo vztahy založené na výpočtu Moninovy-Obuchovovy délky. Nejen rychlost větru, ale také charakter proudění vzduchu je výrazně závislý na stabilitě atmosféry.

příčemž

$$u_* = c_g u_g, \quad (4-37)$$

kde je z_0 koeficient drsnosti povrchu (m) a u_* je frikční rychlost, která vyjadřuje zpomalování větru vlivem tření vzduchu o nehomogenity na zemském povrchu a κ je von Karmánova konstanta. Proměnná c_g je pak koeficient tření a u_g je rychlost geostrofického větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), tj. rychlost, kterou by vítr měl, kdyby se neuplatňoval vliv terénních překážek a topografie.

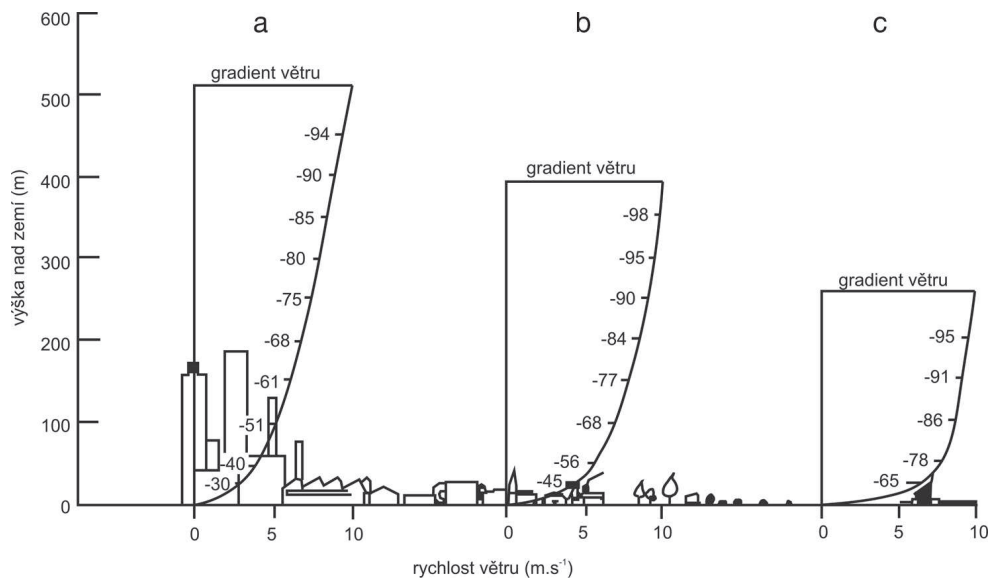
Vztah koeficientu drsnosti a frikční rychlosti v roce 1953 určil Sutton a jeho výsledky shrnuje tabulka 13 (Lees, 1996).

Tabulka 13: Vztah koeficientu drsnosti z_0 a frikční rychlosti u_* :

Typ povrchu	Koeficient tření z_0 (m)	Frikční rychlost u_* ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Velmi hladký povrch (vodní hladina, zamrzlá vodní plocha)	10^{-5}	0,16
Travnatý povrch do 10 cm výšky porostu	$7\cdot 10^{-3}$	0,36
Povrch se vzrostlou trávou a porostem do 50 cm výšky	$9\cdot 10^{-2}$	0,63

Závislost, kterou popisuje rovnice 4-35, je v podobě vertikálních profilů rychlosti větru pro různé typy povrchů demonstrována na obrázku 50. Vertikální profil větru je zde zobrazen až do určité výšky, kde se již rychlost větru s narůstající výškou příliš nemění. Tato výšková hladina leží průměrně v rozsahu 300 až 750 metrů nad zemí (300 metrů nad volnou rovinou a 500 metrů nad urbanizovanou krajinou). Ačkoli by se mohlo zdát, že z uvedených hodnot lze snadno spočítat i obvyklé rozpětí hodnot indexu p_i , skutečnost je však jiná. Index p_i , který se pohybuje obvykle v mezích 0 až 1 (obvykle ale mezi 0,11 a 0,65), je však předmětem řady sporů mezi odbornou veřejností. Sám Lees uvádí celkem čtyři různá rozpětí hodnot tohoto indexu uváděných různými autory a zdůrazňuje skutečnost, že jelikož hodnotu indexu p_i ovlivňuje řada proměnných, nebyl doposud v tomto směru přijat jednoznačný konsensus (Lees, 1996).

Nejnovější údaje, které zveřejnili Hanafusa a kol. v roce 1986, byly již provázány s Pasquillovou-Giffordovu typizací stability atmosféry, takže je lze využít i pro potřeby modelování následků mimořádných událostí (Lees, 1996). Shrnuty jsou v tabulce 14.



Obrázek 50: Změna rychlosti větru v závislosti na výšce nad terény s různou drsností povrchu: a) urbanizovaná krajina, b) venkovská obydlí, c) volná krajina (Lees, 1996).

Tabulka 14: Hodnoty indexu p_i v závislosti na třídě stability atmosféry podle Pasquillovy-Giffordovy typizace (Lees, 1996).

Třída stability atmosféry podle Pasquilla	Index p_i
A	0,33
B	0,26
C	0,20
D, E	0,38
F	0,42

Index p_i může být zapsán také jako:

$$p_i = \frac{n}{2 - n}, \quad (4-38)$$

kde n je tzv. meteorologický exponent. Meteorologický exponent se vztahuje především k drsnosti terénu, jehož přibližné hodnoty přepočtené pro neutrální stabilitu atmosféry (třída D podle Pasquillovy typizace) uvádí tabulka 15. Hodnota koeficientu n roste nejen s rostoucí stabilitou atmosféry, ale také se zvětšující se drsností terénu (Macdonald, 2003).

Tabulka 15: Hodnoty meteorologického exponentu (Urban, 1995).

Rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Vertikální teplotní gradient ($^{\circ}\text{C}$ na 100 metrů výšky), resp. třída stability	Průměrný meteorologický exponent n
2	-0,2 (stabilní)	0,5
5	-0,6 (neutrální)	0,25
7	-1,0 (lehce instabilní)	0,2

Než opustíme charakteristiky větru, je vhodné zde zmínit metodu odhadu rychlosti větru podle specifických projevů – **Beaufortovu stupnici** (viz tabulka 16). Ta byla původně vytvořena admirálem Francisem Beaufortem v roce 1833 a do námořní praxe pak zavedena v roce 1838. Výhodou stupnice je její praktičnost, představitelnost a použitelnost bez jakýchkoliv přístrojů. Poskytuje však jen hrubou informaci, a proto se dnes používá jen okrajově. Dlužno však podotknout, že ne vždy máme v případě mimořádné události k dispozici aktuální měření rychlosti větru, a tak i takto zjednodušený odhad rychlosti větru může být cenný.

Tabulka 16: Beaufortova stupnice síly (rychlosti) větru.

Stupeň	Vítr	Rychlost		Projevy větru na souši
		($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	
0	bezvětrí	< 0,5	< 1	kouř stoupá kolmo vzhůru
1	vánek	~ 1,25	1–5	směr větru poznatelný podle pohybu kouře
2	větrfík	~ 3	6–11	listí stromů šelestí
3	slabý vítr	~ 5	12–19	listy stromů a větvičky v trvalém pohybu
4	mírný vítr	~ 7	20–28	zdvihá prach a útržky papíru
5	čerstvý vítr	~ 9,5	29–39	listnaté keře se začínají hýbat
6	silný vítr	~ 12	40–49	telegrafní dráty sviští, používání deštníků je nesnadné
7	mírný víchř	~ 14,5	50–61	chůze proti větru je nesnadná, celé stromy se pohybují
8	čerstvý víchř	~ 17,5	62–74	ulamují se větve, chůze proti větru je normálně nemožná
9	silný víchř	~ 21	75–88	vítr strhává komíny, tašky a brídlice se střech
10	plný víchř	~ 24,5	89–102	vyvrací stromy, působí škody na obydlích
11	vichřice	~ 29	103–114	působí rozsáhlá pustošení
12	orkán	> 30	> 117	ničivé účinky (odnáší střechy, hýbe těžkými hmotami)

Vertikální gradient teploty

Pro stanovení vertikálního gradientu teploty, a tedy i tzv. stability přízemní vrstvy atmosféry, je klíčový vertikální profil teploty. Vztah popisující změnu teploty vystupující částice podél vertikály, který lze získat kombinací rovnice hydrostatické rovnováhy a první hlavní věty termodynamické, je velmi jednoduchý (viz rovnice 4-39).

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_d = \frac{-g}{C_p}, \quad (4-39)$$

kde g je gravitační zrychlení, C_p je měrná tepelná kapacita nenasyčeného vzduchu při stálém tlaku ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Výraz $\left(\frac{dT}{dz}\right)_d$ představuje suchoadiabatický vertikální teplotní gradient, který se někdy nazývá nenasyčeně-adiabatický²¹. Protože je však rozdíl mezi zcela suchým vzduchem a nenasyčeným vzduchem z hlediska termodynamiky zanedbatelný, používají se pro nenasyčený vzduch stejné rovnice, jako pro vzduch zcela suchý.

Jak je vidět, výstupné a sestupné pohyby vzduchových částic se považují za adiabatický proces, tzn., že se předpokládá, že nedochází k energetické výměně mezi vzduchovou částicí a jejím bezprostředním okolím. Jestliže je teplota vystupující vzduchové částice vyšší, než teplota okolní atmosféry, existuje zrychlení, resp. (při jednotkové hmotnosti částice) síla, směřující vzhůru a uvádějící tuto částici do pohybu. Je tedy zřejmé, že pro trvání výstupného pohybu vzduchové částice je nezbytně nutný kladný přebytek její teploty, tedy musí platit:

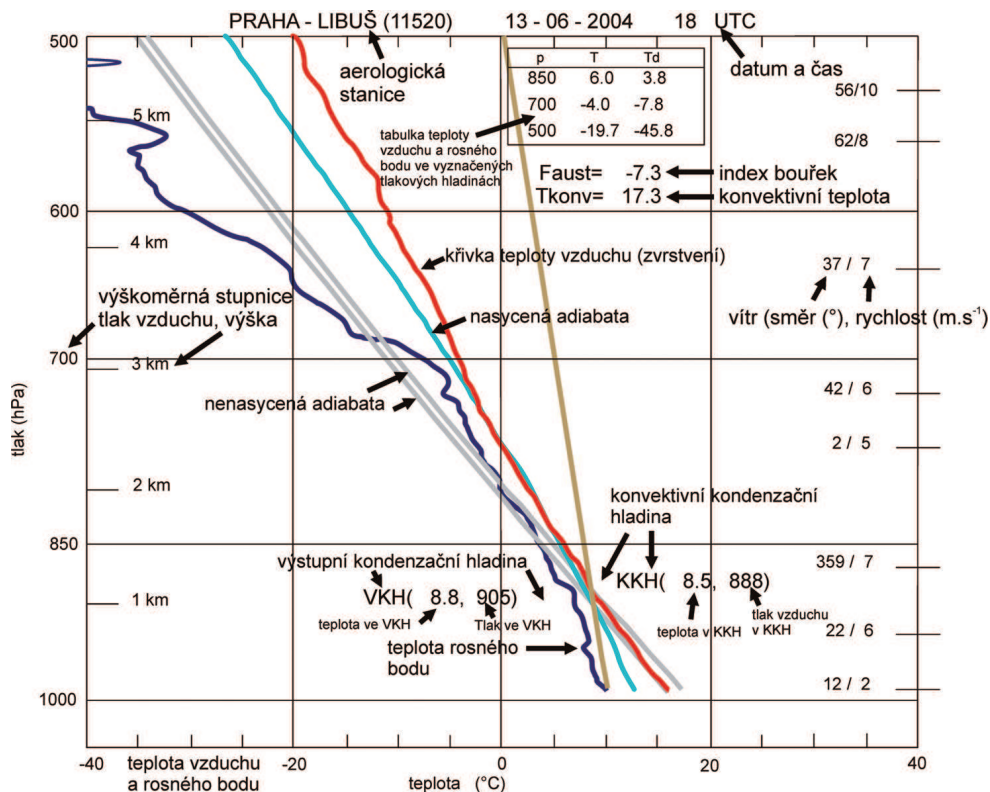
$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{atm.} > \left(\frac{dT}{dz}\right)_d \quad (4-40)$$

příčemž právě průběh $\left(\frac{dT}{dz}\right)_{atm.}$ se nazývá teplotní zvrstvení nebo také stratifikace atmosféry. Pokud je v nenasyčeném vzduchu splněna výše uvedená podmínka (rovnice 4-40), jedná se o již zmíněné instabilní (labilní) zvrstvení, při kterém se může termická konvekce úspěšně rozvíjet a trvat. Naopak, pokud platí

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{atm.} < \left(\frac{dT}{dz}\right)_d,$$

má atmosféra stabilní zvrstvení (pro nenasyčený vzduch) a případný výstupný pohyb vzduchové částice (který jí byl udělen například nějakým vnějším impulzem, jako je

²¹ Pojmem „suchoadiabatický“ se správně rozumí proces pro vzduch, jenž neobsahuje žádnou vodní páru, zatímco „nenasyčeně-adiabatický“ se vztahuje ke vzduchu s nenulovým, avšak současně méně než stoprocentním nasycením vodní párou.



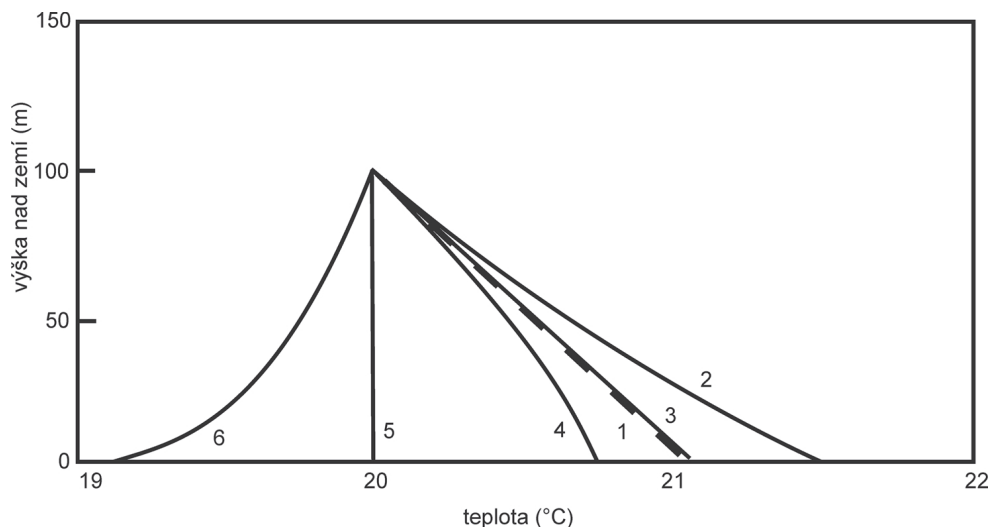
Obrázek 51: Ukázka aerologického diagramu a jeho popis (Dvořák, 2004).

vynucený výstup přes překážku, apod.) brzy zaniká, neboť síla, která na vzduchovou částici působí, směřuje nyní kolmo k zemskému povrchu dolů (Wikipedie, online).

Vertikální profil spodních vrstev atmosféry, který se zjišťuje pomocí radiosond vypouštěných několikrát denně (dvakrát až čtyřikrát ve standardních termínech) na meteorologických balónech, poskytuje informace nejen o změně teploty s výškou (tj. o vertikálním gradientu teploty), ale také o celé řadě dalších veličin, jakými jsou například relativní vlhkost vzduchu, tlak nebo rychlost a směr větru v závislosti na výšce. Grafické vyjádření sledovaných veličin pak nazýváme **aerologický diagram** (viz obrázek 51).

Třídy stability atmosféry

Abychom získali informaci o teplotním zvrstvení atmosféry, vztahujeme naměřený vertikální gradient teploty vůči nasycené a nenasycené adiabatě. Klesá-li totiž teplota s výškou rychleji, než teplota nenasycené (suché) adiabaty, hovoříme o **instabilním zvrstvení**; klesá-li pomaleji než teplota nasycené adiabaty, hovoříme o **stabilním zvrstvení**, a konečně, klesá-li tempem, které je mezi nasycenou a nenasycenou



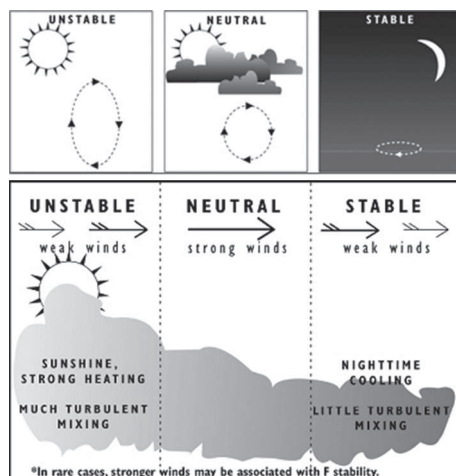
Obrázek 52: Vertikální teplotní profil pro jednotlivé meteorologické podmínky: (1) suché adiabatické podmínky, (2) instabilní zvrstvení, (3) neutrální zvrstvení, (4) stabilní zvrstvení, (5) izotermální stav a (6) inverzní podmínky (Lees, 1996).

adiabatou, hovoříme o **podmínečně instabilním zvrstvení**. To je stav, kdy je vrstva atmosféry instabilní pro nasycené vzduchové částice a současně stabilní pro částice nenasyčené.

Situace, které v reálné atmosféře mohou nastat, jsou znázorněny na obrázku 52. Křivka 1 ukazuje vertikální profil teploty za adiabatických suchých podmínek (suchá adiabata); křivka 2 ukazuje super-adiabatické podmínky, které mohou být následkem silného slunečního záření nebo průchodem chladného vzduchu nad teplým povrchem, a které podporují konvekci a instabilitu; křivka 3 ukazuje neutrální podmínky, které jsou spojeny se zataženou oblohou, se středním až silným větrem, a které jsou neutrální s ohledem na stabilitu; křivka 4 ukazuje subadiabatické podmínky, které podporují stabilní zvrstvení; křivka 5 ukazuje izotermické podmínky, které jsou charakteristické pro výrazně stabilní zvrstvení; křivka 6 ukazuje inverzní podmínky, které potlačují konvekci.

S ohledem na dominantní směry proudění a způsob promíchávání vzduchu v přízemní vrstvě atmosféry se rozlišují tři základní typy teplotního zvrstvení atmosféry (instabilní, neutrální/indiferentní a stabilní), které pro účely zpracovávání rozptylových studií nazýváme třídy stability (The Cameo Software System, 2006).

Během instabilních povětrnostních podmínek se vyskytují největší turbulence. Instabilní povětrnostní podmínky se vyskytují tehdy, když slunce prohřívá půdu a vaky či kapsy teplého vzduchu stoupají vzhůru a mísí se v nižší vrstvě atmosféry – v mezní vrstvě. Za instabilních podmínek se oblaky plynů rychle promíchávají a poměrně



Obrázek 53: Zjednodušená charakteristika tří základních tříd stability atmosféry jak je uvádí manuál k modelovacímu programu ALOHA (The CAMEO Software System, 2006).

rychle se snižuje přízemní koncentrace. Za těchto situací mohou být ale také plyny, jejichž zdroj je ve výšce, strhávány k zemi. Stabilní povětrnostní podmínky turbulence potlačují. Vyskytují se tehdy, když je půda chladnější než vzduch, typicky při klidných chladných nocích a časně z rána. Stabilní povětrnostní podmínky způsobují úzké, tenké oblaky a vlečky s vysokými koncentracemi a nízkým stupněm promíchávání. Vysoko plující oblaky a vlečky mohou cestovat okolo, aniž by pod oblakem či vlečkou vznikaly vysoké koncentrace daných látek. Zmíněné procesy shrnuje obrázek 53.

Tabulka 17: Určení třídy stability atmosféry podle vnějších podmínek (tzv. Pasquillova-Giffordova typizace).

Rychlost přízemního větru (m.s ⁻¹)	Den			Noc	
	Dopadající sluneční záření			Oblačná pokrývka	
	silné	střední	slabé	< 1/2 oblohy	> 1/2 oblohy
< 2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Poznámka: Při zcela zatažené obloze ve dne i v noci se uplatňuje třída stability D bez ohledu na rychlost větru. Za noc se považuje časový úsek začínající hodinu před západem slunce a končící hodinu po východu slunce.

Tabulka 18: Definice tříd rychlosti větru.

Třída rychlosti větru	Rozmezí rychlosti (m.s ⁻¹)	Průměrná rychlost větru dané třídy (m.s ⁻¹)
1 – slabý vítr	0 až 2,5	1,7
2 – mírný vítr	2,5 až 7,5	5,0
3 – silný vítr	nad 7,5	11,0

Tabulka 19: Typizace atmosférické stability podle Bubníka (Bubník a kol., 1997).

Třída stability	Vertikální teplotní gradient (°C na 100 metrů výšky)	Popis rozptylové situace	Výskyt tříd rychlosti větru	Rozmezí vyskytujících se rychlostí větru (m.s ⁻¹)	Přibližné ekvivalentní třídy stability podle Pasquillovy-Giffordovy typizace
I – superstabilní	$\gamma < -1,6$	Silné inverze, velmi špatné rozptylové podmínky	1	0–2,5	F
II – stabilní	$-1,6 \leq \gamma < 0,7$	Běžné inverze, špatné rozptylové podmínky	1, 2	0–5,0	E
III – izotermní	$-0,7 \leq \gamma < 0,6$	Slabé inverze, izotermie nebo malý kladný teplotní gradient, často se vyskytující mírně zhoršené rozptylové podmínky	1, 2, 3	Rychlost není omezena	D
IV – normální	$0,6 \leq \gamma \leq 0,8$	Indiferentní teplotní zvrstvení, běžný případ dobrých rozptylových podmínek	1, 2, 3	Rychlost není omezena	C
V – konvektivní	$\gamma > 0,8$	Labilní teplotní zvrstvení, rychlý rozptyl znečišťujících látek	1, 2	0–5,0	A, B

Pro účely modelování rozptylu znečišťujících příměsí navrhli Pasquill a Gifford detailnější členění sestávající ze šesti stabilitních tříd v rozsahu od A (extrémně instabilní) po F (extrémně stabilní); třída D pak charakterizuje indiferentní teplotní zvrstvení. Obecně platí, že když je teplotní zvrstvení stabilní (třídy E, F) nebo neutrální (třída D), pak se očekává, že uniklé látky budou putovat na delší vzdálenosti,

než se jejich koncentrace významně sníží. Z tohoto důvodu se třídy D, E a F považují z hlediska rozptylu nebezpečných látek za „špatné“ povětrnostní podmínky.

Rychlost rozptylu znečišťujících látek v atmosféře závisí zejména na dvou veličinách: rychlosti větru a intenzitě termické turbulence. Protože intenzita termické turbulence je přímo závislá na teplotní stabilitě atmosféry, je nejdůležitějším klimatickým vstupním údajem větrná růžice rozlišená podle rychlosti větru a teplotní stability atmosféry. Pro specializované analýzy a modelování se pro oblasti střední Evropy doporučuje používat upravené klasifikace tříd stability atmosféry (například Bubník-Koldovský). Je to logické, protože Pasquillova-Giffordova typizace byla odvozena z dat získaných z měření prováděných v západní Evropě, kde převažuje jiný charakter počasí (zvláště pak v přímořských oblastech), což se samozřejmě odráží na mírně odlišných teplotních profilech v mezní vrstvě atmosféry. V tomto směru je českou specifikou typizace Bubník-Koldovský, která byla vyvinuta v Českém hydrometeorologickém ústavu. Ta je založena na rychlosti větru, která se popisuje pomocí tří základních tříd rychlostí (viz tabulka 18), přičemž rychlostí větru se rozumí rychlost zjišťovaná ve standardní meteorologické výšce 10 metrů nad zemí (Bubník a kol., 1997).

Na rozdíl od Pasquillovy-Giffordovy typizace, která využívá šesti tříd stability, je v Bubníkově metodice vertikální teplotní gradient charakterizován pomocí pěti tříd (viz tabulka 19).

4.5.3 Charakter okolního terénu a jeho vliv na rozptyl

Místní topografie a drsnost povrchu

Důležitým parametrem, který se uplatňuje při rozptylu látek v atmosféře, je charakter terénu (místní topografie). **Topografie** každého bodu je reprezentována jeho souřadnicemi vztahenými k určité soustavě. Pro modelování rozptylu je hlavní vertikální souřadnice – výška. **Drsnost povrchu** má rovněž velký význam.

Povrch je aerodynamicky drsný, jestliže proud vzduchu se díky turbulencím stáčí směrem dolů, k povrchu. Terén tak klade odpor proudícímu vzduchu, což se projevuje výrazným snížením rychlosti ve vertikálním profilu (rychlost při zemském povrchu je pak téměř nulová). Tato skutečnost není závislá na viskozitě, nýbrž záleží na délce (jejich vertikálním rozměru) nerovností nacházejících se na povrchu a jejich rozmístěním. Délku nerovností popisujeme pomocí veličiny zvané koeficient drsnosti z_0 (m). Ten lze přibližně určit ze vztahu 4-41.

$$z_0 = \frac{\varepsilon}{30}, \quad (4-41)$$

kde ε je střední výška prvků nerovnosti na daném povrchu (m).

Paeschke (1937) stanovil vztah délky nerovnosti z_0 a střední výšky prvků nerovností ε na větším měřítku a získal pro různé travnaté a polní povrchy vztah:

$$z_0 = \frac{\varepsilon}{7,35} \quad (4-42)$$

Pro výrazně zvlněné povrchy s množstvím překážek může být logaritmický vztah pro výpočet vertikálního profilu rychlosti větru (viz rovnice 4-37) rozšířen pomocí empirické modifikace na níže uvedený vztah, ze kterého lze také vypočítat hodnotu koeficientu drsnosti z_0 .

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z-l}{z_0}\right), \quad (4-43)$$

kde $u(z)$ je rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) v dané výšce z , u_* je frikční rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), κ je von Karmánova konstanta a l je nulové rovinné posunutí (m), tj. výchozí úroveň, nad kterou se již neuplatňuje tření o povrch, a kde již nastává normální turbulentní výměna.

Pro modelování rozptylů oblaků plynů a aerosolů je obvykle uvažováno pět kategorií drsnosti charakterizovaných konstantou z_0 . Jedná se o tyto kategorie:

- rovný volný terén,
- obdělávané pozemky, zemědělská půda, louky, pastviny,
- terén s řídkce rozptýlenými menšími stavbami,
- obydlené oblasti a
- urbanizované, hustě obydlené oblasti s výškovými budovami.

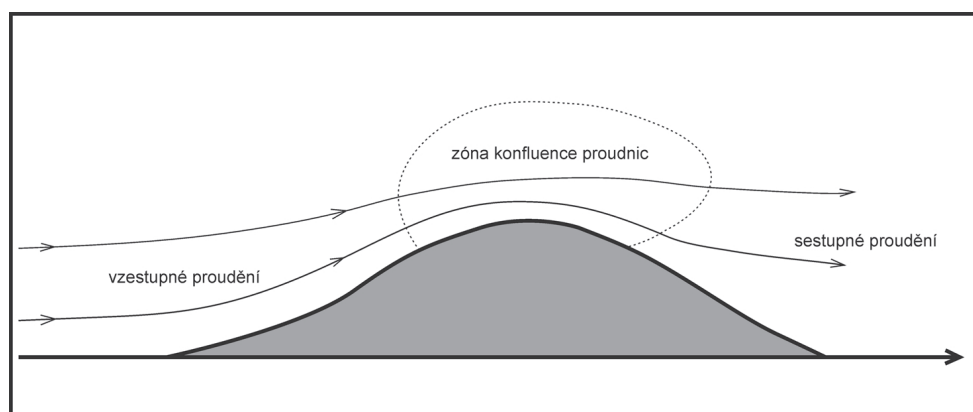
Koeficient drsnosti povrchu z_0 se používá k popisu vlivu terénu na rozptyl oblaku plynu, který se uplatňuje v přízemní vrstvě, kde vznikají vlivem tření proudění o povrch drobné turbulence či indiferentní vrstvy. Použití této veličiny předpokládá, že nejsou přítomny žádné výrazné terénní překážky. Obecně se používá jednoduchá střední hodnota pro nejbližší okolí zdroje úniku látky (plyn, aerosol), která odpovídá přibližně 3 % až 10 % výšky překážek v nejbližším okolí místa úniku (Macdonald, 2003), což se příliš neliší od hodnot uváděných různými autory, včetně Paeschkeho. Standardní hodnoty koeficientu drsnosti z_0 doplněné o hodnoty uváděné Brutsaertem (The CAMEO Software System, 2006) jsou uvedeny v tabulce 20.

Velké terénní překážky mění rozptyl oblaku velmi výrazně. Vyskytují-li se v zájmové oblasti, pro které rozptyl počítáme, ve větším množství, zohlednění koeficientu drsnosti povrchu z_0 pozbývá smyslu. Běžné jednodušší modely přítomnost velkých objektů při výpočtu rozptylu zohledňovat nedokáží. Tento vliv lze řešit pouze s pomocí počítačových programů, které obsahují algoritmy ověřené experimenty provedené

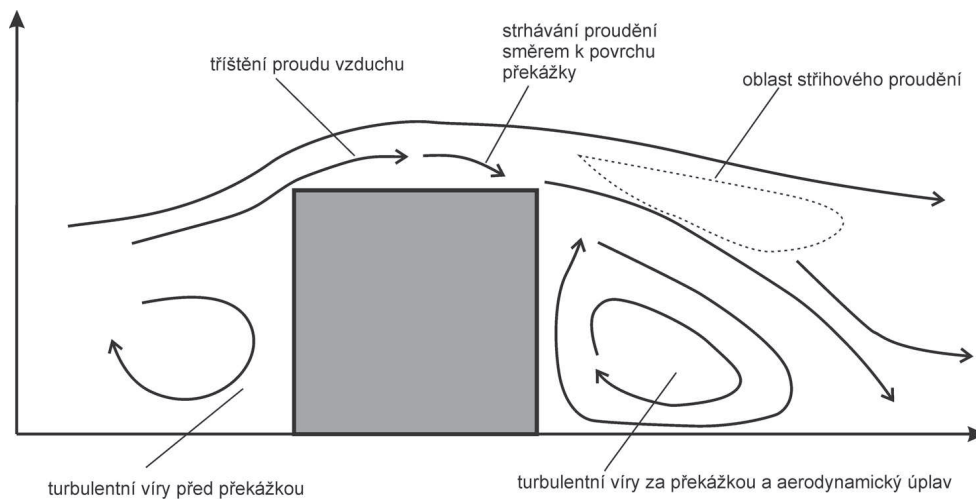
Tabulka 20: Charakteristika jednotlivých druhů povrchů a určení hodnot koeficientu drsnosti povrchu z_0 a meteorologického koeficientu n .

Typ terénu	z_0 (m)	n
Zaledněná plocha	10^{-5}	0,13
Letištní ranvej	$2 \cdot 10^{-5}$	
Rozlehlé vodní hladiny	10^{-4} – $6 \cdot 10^{-4}$	0,18–0,23
Pěstěný trávník (do výšky 1 cm)	10^{-4}	
Travní plocha letištního typu	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,29
Travnatý povrch prémie	$6,4 \cdot 10^{-3}$	
Travnatý povrch 7,5 cm vysoký	10^{-2}	0,33
Travnatý povrch 10 cm vysoký	$2,3 \cdot 10^{-2}$	0,39
Rovinaté strniště	$2,44 \cdot 10^{-2}$	0,40
Buš (travnatý povrch s občasnými keři a stromy)	$4 \cdot 10^{-2}$	
Vzrostlá tráva, obilné pole (50 cm výšky)	$5 \cdot 10^{-2}$	0,46
Terén obrostlý vegetací 1–2 m vysokou	0,2	0,42
Stromy (10–15 m vysoké)	0,4–0,7	
Savana (travnatý povrch s hustější vzrostlou vegetací)	0,4	
Velká města	1,65	

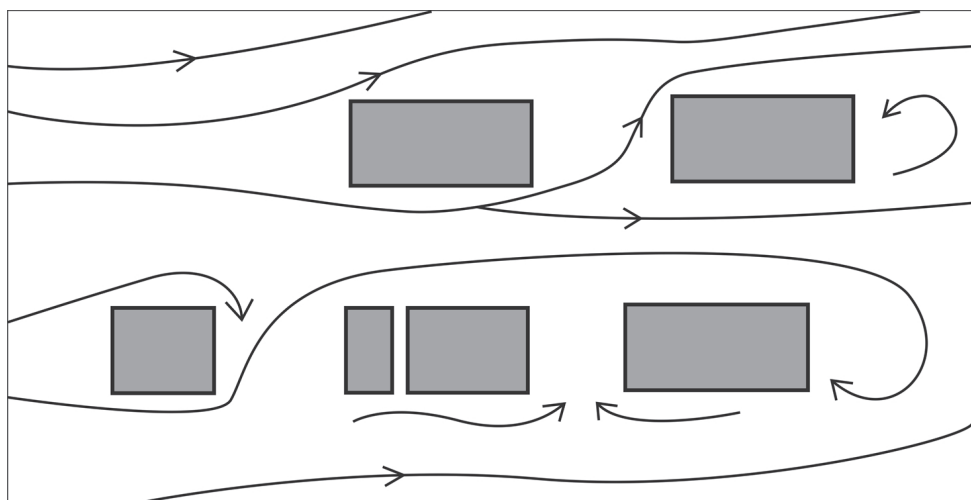
v aerodynamickém tunelu. To potvrdil již v roce 1975 Egan, který na základě svých rozsáhlých experimentů prováděných v aerodynamickém tunelu dokázal, že nejen menší překážky, jako jsou například domy, ale také výraznější terénní nehomogenity, proudnice nikdy plně nekopírují (Macdonald, 2003). Vliv na charakter proudění má nejen rozměr a tvar terénních překážek, ale také rychlost větru. Charakteristické stáčení proudnic za různých podmínek zobrazují obrázky 54, 55 a 56.



Obrázek 54: Obtékání velkých terénních překážek vzduchem při malé rychlosti větru (INERIS-DRA 006, 2002).



Obrázek 55: Turbulence ve vertikálních směrech vznikající následkem rychlého proudění vzduchu podél překážek menších rozměrů (INERIS-DRA 006, 2002).



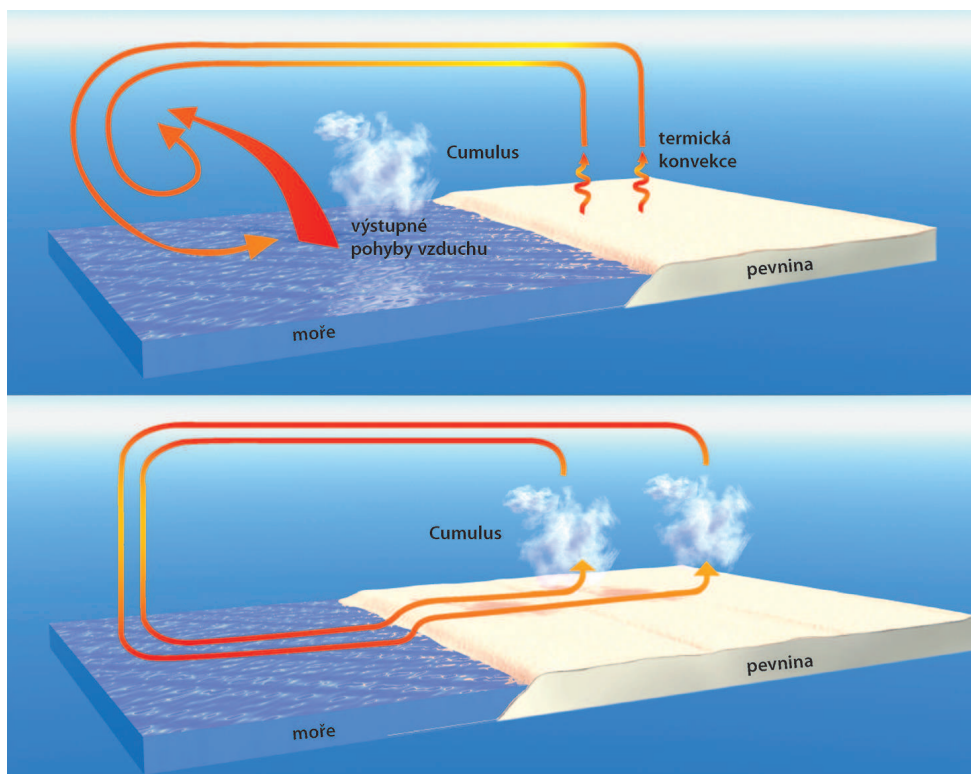
Obrázek 56: Turbulence v horizontálních směrech vznikající následkem rychlého proudění vzduchu podél překážek menších rozměrů (The CAMEO Software System, 2006).

Místní cirkulační systémy

Při nerovnoměrném ohřívání jednotlivých částí zemského povrchu mohou za vhodných topografických podmínek vznikat podmíněné pohyby vzduchu v podobě uzavřených lokálních cirkulací nazývaných bríza. Bríza má výrazný denní chod a vytváří-li se v pobřežních oblastech, hovoříme o mořské bríze; vzniká-li ve svažitém horském terénu, hovoříme o bríze údolní. Za určitých okolností mohou tyto místní cirkulace vznikat i v urbanizovaných oblastech, kde dochází k nehomogennímu zahřívání měst a okolní krajiny.

V průmyslových oblastech nacházejících se na pobřeží moří může bríza v případě vzniku havárie sehrát při rozptylu nebezpečných látek významnou roli. Vzniká především v teplém období, kdy za slunečného počasí dochází k rychlejšímu ohřívání příbřežní části pevniny nežli mořské vody a nad zahřátou pevninou tak začnou stoupat směrem vzhůru konvektivní proudy. Při tomto výstupu se za stoupajícím vzduchem začne vytvářet podtlak, který nasává při zemi vzduch od moře, který je studenější a vlhčí. Důležitou podmínkou pro vznik tohoto komínového efektu je, aby horizontálnímu proudy postupujícího od moře nestály v cestě žádné výraznější terénní překážky, jako jsou strmé útesy apod. Přechod mezi mořem a souší by měl být zpočátku co nejpozvolnější. Brízový efekt může být zesílen, pokud se za mělkým příbřežním pásmem nachází kopcovitý terén, jehož úbočí orientované směrem k moři se v průběhu dne zahřívá, což podporuje dynamiku brízového proudění. Brízu nejlépe prozradí výskyt specifické oblačnosti. Přibližně dvě hodiny po východu Slunce začnou, zprvu ještě nad mořem ve výšce několika set metrů, vznikat kupovité oblaky Cumulus, jejichž poloha se postupně posouvá stále více nad pevninu, jak bríza sílí. Šest hodin po východu Slunce jsou již oblaky pevně „ukotveny“ nad pevninou, a dokud výstupný proud dostatečně nezeslábně, což nastává nejpozději 2 hodiny před západem Slunce, zůstávají takřka nehybně na svém místě, kde se však neustále přetvářejí. V noci je chod opačný. Pevnina chladne mnohem rychleji než moře, takže již v druhé polovině noci je moře relativně teplejší než pevnina, a tak nad mořem vznikají výstupné proudy vzduchu (viz obrázek 57). V takových případech pak plynné látky a aerosoly unikající při průmyslové havárii přes den mají tendenci postupovat od moře hlouběji do vnitrozemí, v noci naopak z pevniny směrem k moři.

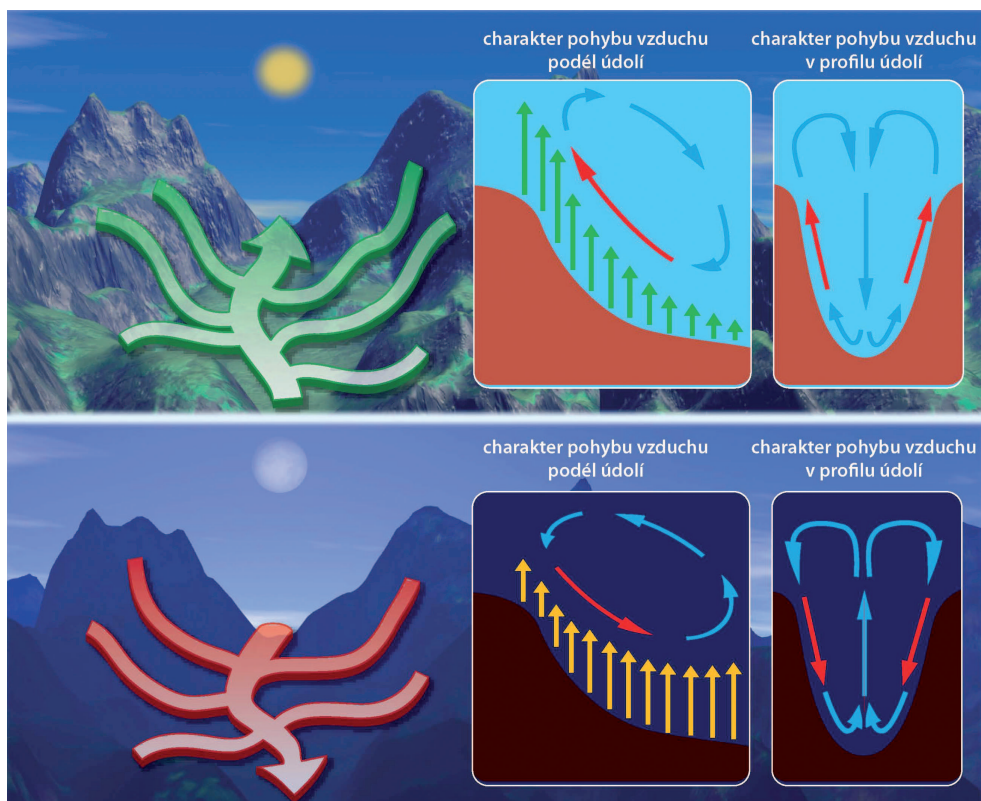
Obdobným způsobem vzniká údolní bríza, avšak místo systému moře-souš zde figuruje systém horské údolní-horské štíty. V nočních hodinách v tomto systému vlivem termické radiace dochází k ochlazení vzduchu a jeho stékání z hor směrem do údolí. Díky tomu, že jsou horská údolí často uzavřená ze všech stran, vytváří se v nich rezervoár studeného vzduchu. Při jeho vyplňování těžším studeným vzduchem dochází k postupnému vytlačování původního teplejšího vzduchu, což může za vhodných teplotně vlhkostních podmínek vést ke vzniku vrstvy inverzní oblačnosti. Nejmohutnější bývá tato oblačnost před východem Slunce. Po východu Slunce se začnou okolní horské svahy poměrně brzy zahřívát, zatímco do údolí sluneční paprsky pronikají až mnohem později. V případě, že se nad studeným vzduchem nachází ještě i inverzní oblačnost, je ohřev vzduchu v údolí značně ztížen, protože



Obrázek 57: Charakter proudění v přímořských oblastech během dne a noci a princip vzniku mořské brízy (Skřehot, 2008a).

oblaka účinně odrážejí sluneční paprsky. Zatímco se vzduch v údolí ohřívá jen velmi pomalu, horské štíty jsou již v dopoledních hodinách dostatečně teplé na to, aby nad nimi vznikly výstupné proudy vzduchu. Zesílí-li tyto proudy dostatečně, vznikne za nimi, podobně jako v případě mořské brízy, podtlak, který začne nasávat vzduch z údolí (viz obrázek 58).

S ohledem na to, že v horských oblastech se průmysl nenachází, mohlo by se zdát, že tento typ místní cirkulace není potřeba při úvahách o charakteru rozptylu nebezpečných látek v ovzduší vůbec zvažovat. Opak je pravdou. Mnoho podniků i v České republice je situováno v podhůří nebo na úpatí výraznějších kopců. Příkladem může být podkrušnohoří, kde orientace Krušných hor vyvolává za anticyklonálních situací (kdy nedochází k výraznějšímu proudění vzduchu podél izobar) místní cirkulace. Zde se můžeme setkat s výrazným denním chodem, kdy v pozdním odpoledni dochází k vanutí větrů kolmo směrem k horám, kdežto po ránu a v časných dopoledních hodinách pak v opačném směru, tedy od hor dolů do údolí.

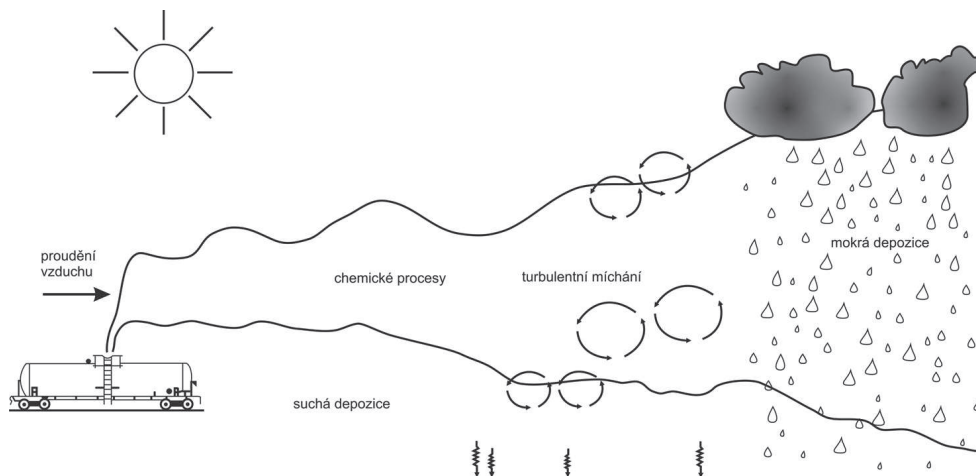


Obrázek 58: Charakter proudění v údolích během dne a noci a princip vzniku údolní brízy (Skřehot, 2008a).

4.5.4 Uplatnění chemických procesů a atmosférické depozice

Chemické procesy probíhající v rozptylujícím se oblaku je třeba uvažovat zejména tehdy, pokud mohou výrazně ovlivnit jeho rozptyl anebo vedou-li ke zhoršení toxických dopadů na zasažené populaci. Příkladem může být únik fluorovodíku. Tento plyn v ovzduší snadno podléhá dimeraci a také ochotně reaguje s vodní parou, což v obou případech vede ke vzniku disperze těžší než vzduch. Podobně se chová i amoniak. Ten sice v ovzduší nepodléhá sekundárním chemickým reakcím, ale velmi ochotně se spojuje s molekulami vodní páry a vytváří tak kondenzovanou molekulu $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, jejíž molární hmotnost ($M_r = 35 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) je vyšší než průměrná molekulová hmotnost vzduchu ($M_{\text{vzduch}} = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Rozptyl disperze také ovlivňují procesy vlhkého nebo suchého usazování (suchá resp. mokrá depozice). Suchá depozice je proces pomalý, avšak kontinuální, mokrá depozice je pak spojena s vymýváním plynné látky z atmosféry, tj. rozpouštění plynů v padajících (kapalných) srážkách. Obecně lze ale říci, že procesy depozice se na změně koncentrace rozptylující se plynné látky příliš nepodílejí (vyjma specifických



Obrázek 59: Procesy ovlivňující rozptyl disperze v atmosféře (Markiewicz, 2006a).

případů – např. vliv intenzivních srážek, či mlhy při rozptylu látek s vysokou afinitou k vodě), a také proto nejsou v převážné většině modelů uvažovány. Pakliže je ale k dispozici dostatek relevantních dat, lze i depozici do modelů zahrnout. Významný vliv pak může depozice mít v případě aerosolu, kdy sedimentace (spad) vede k výraznému snížení četnosti velkých částic a tedy i koncentrace hmotnosti znečišťující látky (viz 1. díl knihy).

Všechny zmíněné procesy, které ovlivňují rozptyl oblaku v ovzduší, jsou i s příslušnými grafickými detaily ilustrovány na obrázku 59.

4.5.5 Vstupní údaje pro modelování rozptylu

Vstupní údaje potřebné k výpočtu znečištění ovzduší lze rozdělit na:

- Údaje o zdrojích.
- Meteorologické a klimatické podklady.
- Údaje o topografickém rozložení referenčních bodů, ve kterých se bude výpočet provádět.
- Informace o výšce a rozmístění budov v zájmovém území.
- Údaje o imisních limitech a přípustných koncentracích znečišťujících látek.

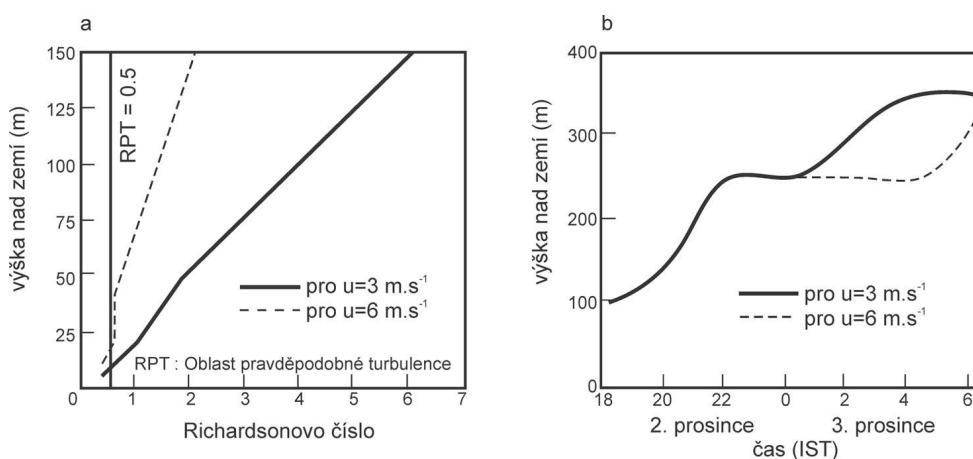
Potřebné vstupní údaje se dále liší podle typu zdroje (bodové, plošné, objemové) a podmínek v atmosféře modelovaných výpočtem (výpočet za běžných podmínek nebo za bezvětří). Nejčastěji používaným souřadným systémem, používaným při popisu umístění zdrojů a referenčních nebo uzlových bodů, je pravoúhlý systém,

kdy osa x míří k východu, osa y míří k severu a osa z míří k zenitu a představuje nadmořské výšky nebo výšky budov (Bubník a kol., 1997)

Z tabulky 17 resp. 19 je zřejmé, že ne všechny třídy stability atmosféry se vyskytují za všech rychlostí větru. V praxi se proto podle Bubníkovy metodiky může vyskytnout celkem jedenáct kombinací tříd stability a tříd rychlosti větru. Větrná růžice, která je vstupem pro výpočet znečištění ovzduší, musí tedy obsahovat relativní četnosti směru větru z osmi základních směrů pro těchto jedenáct různých typů rozptylových podmínek a kromě toho četnost bezvětří pro každou třídu stability atmosféry. Četnosti se udávají v procentech s přesností na dvě desetinná místa.

Směry větru se v meteorologii určují podle toho, odkud vítr vane. Označování směrů větru ve stupních začíná od severu a zvětšuje se postupně ve směru hodinových ručiček. Vítr, který vane od východu, vane ze směru 90° , od jihu z 180° , od západu z 270° a ze severu z 360° . To znamená, že větrnou růžici lze jednoduše vyjádřit v pravouhlé souřadné soustavě, ve které osa x míří k východu a osa y k severu. Uvádějí-li se souřadnice zdrojů a referenčních bodů, resp. uzlových bodů pravidelné sítě v jiných souřadných systémech, kdy osa y nemíří k severu (např. v Křovákových souřadnicích), pak je nutno sjednotit všechny používané souřadné systémy v jeden (Bubník a kol., 1997).

Pro výpočet rozptylu nežádoucích polutantů za situací extrémního znečištění za inverzí a bezvětří je potřeba znát i výšku horní hranice inverze a dobu nepřetržitého trvání podmínek inverze a současného bezvětří. Vliv výškové inverze je zřejmý zvláště v případech, kdy se rozptylují látky s afinitou k vodní páře a těžší než vzduch (příkladem může být havárie v Bhópálu, kde výšková inverze sehrála významnou



Obrázek 60: Vertikální profil hodnot Richardsonova čísla během havárie v pro různé rychlosti větru u ; vpravo změna výšky spodní hranice vrstvy radiální inverze v čase (Sharan a kol., 1994).

roli při zhoršení podmínek rozptylu, díky čemuž bylo intoxikováno několik desítek tisíc lidí). O výšce inverzní vrstvy se můžeme dozvědět z aerologického diagramu (viz obrázek 60), resp. z Richardsonova čísla Ri .

Důležitost informace, kterou nám podává Richardsonovo číslo, je zjevná, neboť jeho hodnota charakterizuje rozvoj turbulentních a konvektivních pohybů ve vzduchové hmotě, což v případě rozptylu oblaku dané látky v podstatě vyjadřuje charakter jeho rozptylu. Pravděpodobnost, že se uniklý plyn bude chovat jako těžký plyn, roste s jeho celkovým uvolněným množstvím, resp. rychlostí úniku, s klesající rychlostí větru a zvyšující se stabilitou teplotního zvrstvení. Hodnota $Ri = 1$ odpovídá stavu, kdy je veškerá turbulentní kinetická energie v mezní vrstvě spotřebována působením stability teplotního zvrstvení. Pro ilustraci tohoto vlivu je na obrázku 60 uveden výškový profil hodnot Ri při havárii v Bhópálu a profil rychlosti větru v čase. Je z něj patrné, že hodnota Ri pro rychlost větru $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dosáhla hodnoty 1 přibližně až ve výšce 20 metrů, takže se uvolněný methylišokyanát rozptyloval při zemi jako těžký plyn. V pravo je pak zřetelná výška spodní hranice radiační inverze s časem (rychlost větru je zde konstantní a udržuje se takto i v čase) (Sharan a kol., 1994).

4.6 Zraňující následky

4.6.1 Účinky toxických látek

Modely toxických následků

Modely toxických dopadů se používají pro hodnocení dopadů expozice toxických látek na lidské zdraví. Z mnoha důvodů je obtížné přesně ocenit účinek expozice toxických látek. Hlavními důvody jsou skutečnosti, že existují rozmanité účinky (např. podráždění, dušení, slepota, poškození smyslových orgánů, poleptání, smrt...) a rozmanité stupně odezvy jednotlivců v typické populaci. Navíc existuje výrazný nedostatek klinických dat týkajících se těchto účinků a experimentování není možné. Data jsou obvykle získávána z řízených experimentů s laboratorními zvířaty. Extrapolace těchto dat na člověka je proto jedinou dostupnou technikou, opomeneme-li data získaná z hodnocení následků různých nehod, která jsou však zatížena určitou nejistotou.

Toxikologické expoziční limity

Pro účely provedení odhadu toxických účinků v rámci modelování havarijních scénářů událostí se využívá srovnání předpokládaných (vypočítaných) koncentrací nebezpečných látek s expozičními hladinami některých „bezpečnostních hladin“. Tyto toxikologické limitní hodnoty nazýváme **expozičními limity**. Ty byly určeny pro většinu nebezpečných látek, a to experimentálně na zvířatech. Jsou tedy pro každou látku specifické a zahrnují v sobě informaci o koncentraci, době expozice a popisu příslušného zdravotního následku. Predikce možných následků v případě mimo-

Tabulka 21: Vybrané expoziční limitní hodnoty užívané v odhadu zraňujících následků.

Označení limitní hodnoty	Doba expozice	Popis
IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health)	30 min	Maximální koncentrace látky v ovzduší, které může být zdravý pracovník vystaven po dobu až 30 minut a ještě být schopen uniknout bez ztráty života nebo bez nevratných poškození zdraví.
NPK (Nejvyšší přípustná koncentrace)	okamžitá	Koncentrace látky v ovzduší, kterým nesmí být zaměstnanec v žádném časovém úseku pracovní doby vystaven. Dříve byly stanoveny nejvyšší přípustné koncentrace v pracovním ovzduší (NPK-P), a to hodnoty průměrné a mezní, což byly takové koncentrace plynů, par a aerosolů v pracovním ovzduší, o nichž se podle tehdejších vědeckých znalostí předpokládalo, že nepoškodí zdravotní stav osob, jež jsou těmto koncentracím vystaveny. Pro koncentrace běžných průmyslových škodlivin byly stanoveny i NPK hodnoty ve volném ovzduší (imisi koncentrace).
PEL (Permissible Exposure Limits)	8 hod	Celosměnové časově vážené průměry koncentrací plynů, par nebo aerosolů v pracovním ovzduší, jimž mohou být podle současného stavu znalostí vystaveni zaměstnanci při osmihodinové pracovní době, aniž by u nich došlo i při celoživotní pracovní expozici k poškození zdraví, k ohrožení jejich pracovní schopnosti a výkonnosti. Přípustné expoziční limity platí za předpokladu, že zaměstnanec je zatěžován tělesnou prací, při které jeho průměrná plicní ventilace nepřekračuje 20 litrů za minutu, a doba výkonu práce nepřesahuje 8 hodin.
ERPG (Emergency Response Planning Guidelines)	60 min	ERPG-1 Hodnota maximální koncentrace látky v ovzduší, do které je možno se domnívat, že téměř všichni jednotlivci by mohli být nechráněni po dobu jedné hodiny, aniž by zakusili jiné nežli mírné přechodné nepříznivé účinky na svém zdravotním stavu nebo postřehli zřetelně nepříjemný zápach. ERPG-2 Hodnota maximální koncentrace látky v ovzduší, do níž je možno se domnívat, že téměř všichni jednotlivci by mohli být nechráněni po dobu jedné hodiny, aniž by zakusili nebo se u nich vyvinuly nezvratné nebo další vážné účinky nebo příznaky, které by mohly poškodit jejich schopnosti podniknout záchrannou činnost. ERPG-3 Hodnota maximální koncentrace látky v ovzduší, do níž je možno se domnívat, že téměř všichni jednotlivci by mohli být nechráněni po dobu jedné hodiny, aniž by zakusili nebo se u nich vyvinuly účinky ohrožující zdraví nebo život.

Označení limitní hodnoty	Doba expozice	Popis
AEGL (Acute Exposure Guideline Levels)	okamžitá	<p>AEGL-1 Koncentrace nebezpečné látky v ovzduší, nad kterou se předpokládá, že běžná populace, včetně vnímavých jedinců, může zakusit patrné nepohodlí, podráždění, nebo určité, smysly nepostřehnutelné, symptomatické příznaky. Účinky nejsou oslabující, jsou přechodné a vratné po přerušení expozice.</p> <p>AEGL-2 Koncentrace nebezpečné látky v ovzduší, nad kterou se předpokládá, že běžná populace, včetně vnímavých jedinců, může zakusit nevratné nebo jiné vážné, dlouhotrvající nepříznivé zdravotní účinky nebo může dojít k zhoršené schopnosti úniku.</p> <p>AEGL-3 Koncentrace nebezpečné látky v ovzduší, nad kterou se předpokládá, že běžná populace, včetně vnímavých jedinců, může zakusit zdravotní účinky ohrožující život nebo může dojít k smrti.</p>
TEEL (Temporary Emergency Exposure Limit)	15 min	<p>TEEL-0 Maximální koncentrace látky v ovzduší, jejímuž vystavení u většiny osob nevede k žádným nepříznivým zdravotním následkům.</p> <p>TEEL-1 Definice stejná jako ERPG-1 (integrační doba, pro kterou se počítá vážený průměr je však 15 minut).</p> <p>TEEL-2 Definice stejná jako ERPG-2 (integrační doba, pro kterou se počítá vážený průměr je však 15 minut).</p> <p>TEEL-3 Definice stejná jako ERPG-3 (integrační doba, pro kterou se počítá vážený průměr je však 15 minut).</p>
EEGL (Emergency Exposure Guidance Level)	1 až 24 hod	Maximální koncentrace látky, která ještě nezpůsobí nevratné poškození zdraví, a které je vystaven personál při výkonu nezbytných úkolů při řešení nouzové situace trvajících 1 až 24 hodin.
NOAEL (No Observable (Observed) Averse Effect Level)	okamžitá	Nejvyšší dávka nebo expoziční koncentrace látky, při které není pozorován žádný statisticky významný nepříznivý účinek na organismus v porovnání s kontrolní skupinou.

řádné události spojené s únikem toxické látky se pro danou koncentraci pak provádí subjektivní interpolací mezi nejbližší nejvyšší a nejbližší nejnižší limitní hodnotou koncentrace (při dané délce expozice). Využití limitní hodnoty lze i opačně. Na základě v nich popsanych následků (při dané délce expozice) lze vybrat „kritickou“ koncentraci, jejíž dosah od zdroje úniku lze následně vypočítat pomocí rozptylových modelů. Nejčastěji užívané toxikologické hodnoty jsou uvedeny v tabulce 21.

Pro vyjadřování koncentrací látek v ovzduší nebo vodě se často užívá pojmu ppm a ppb. Jde o anglickou zkratku „parts per milion“, resp. „parts per bilion“, tedy $1:10^6$, resp. $1:10^9$. Pro objemové koncentrace platí: $1 \text{ ppm} = 1 \text{ ml látky v } 1 \text{ m}^3$ a $1 \text{ ppb} = 1 \text{ } \mu\text{l látky v } 1 \text{ m}^3$; pro vodní prostředí platí: $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg.l}^{-1}$. Přepočet objemové koncentrace (v ppm) na hmotnostní koncentraci (v mg.m^{-3}) dané látky rozptýlené ve vzduchu se provádí podle vzorce platného pro $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a 1013 hPa :

$$c_{hm} = \frac{c_{obj} M_r}{24,45}, \quad (4-44)$$

kde M_r je relativní molekulová hmotnost dané látky, c_{obj} je hmotnostní koncentrace látky v ppm a c_{hm} je koncentrace látky (mg.m^{-3}).

Probitová analýza

Z empirických zkušeností je známo, že vzájemná závislost mortality vzniklé následkem expozice nebezpečné chemické látky a koncentrace této látky (vyjádřené např. LC_{50}) má sigmoidální charakter²² (viz obrázek 61). Takovou závislost však nelze popsat přesnou rovnicí, a tak je nejjednodušší postavit proti hodnotám mortality logaritmy koncentrací (nebo tepelného toku) a závislost vyjádřit pomocí lineární regrese. Ovšem i tato transformace je zatížena chybou, protože na základě zkušeností získaných experimenty se ve zmíněné logaritmické závislosti vyskytuje určitá systematická odchylka, která znemožňuje jednoduchým numerickým způsobem vyjádřit zmíněnou závislost. Proto je potřeba dané závislosti transformovat jiným způsobem, nejlépe funkčním vztahem.

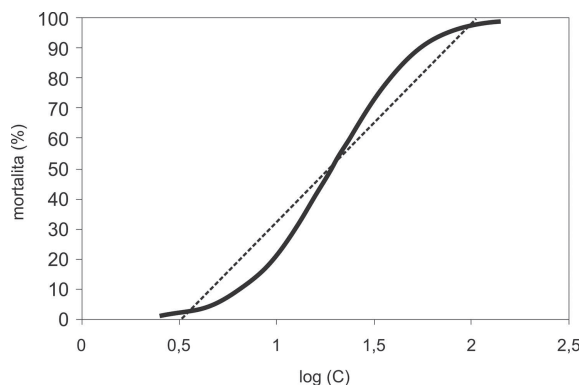
A právě tento problém se snaží řešit tzv. **probitová analýza**. Ta vhodným způsobem transformuje data o mortalitě na tzv. **probit hodnoty** (probability unit), které již mají na logaritmu koncentrace nebo dávky přibližně lineární závislost a mohou tak posloužit pro predikci pravděpodobnosti úmrtí osob vzniklé následkem expozice nebezpečné chemické látky. Zmíněnou závislost prezentuje obrázek 62.

Výpočet probit hodnot se provádí pomocí **probitových funkcí**, které byly navrženy na základě statistických analýz účinku dané látky na populaci laboratorních zvířat extrapolovaných na člověka. Tyto extrapolace samozřejmě mohou být zatíženy chybou, která vychází z empiricky zjištěné zkušenosti, že škody způsobené populaci stejnou dávkou stejné látky se mohou významně lišit v závislosti na síle, zdravotním stavu a charakteristice jednotlivců. Riziko definované jako pravděpodobnost úmrtí je následně definováno rovnicí 4-45.

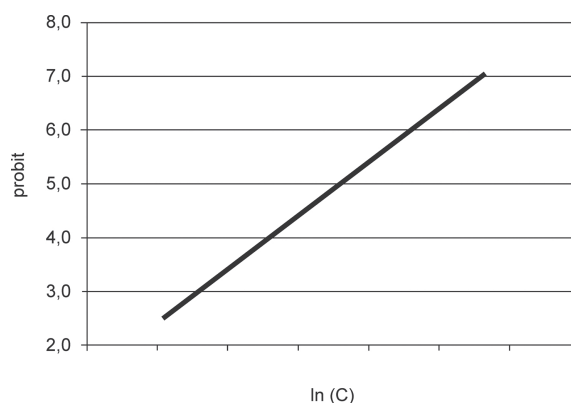
$$R = 0,5 \left[\frac{1 + \text{erf}(\text{probit} - 5)}{\sqrt{2}} \right] \quad (4-45)$$

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

22 Podobnou závislost můžeme pozorovat také v případě expozice tepelné radiaci.



Obrázek 61: Experimentálně zjištěná závislost mortality exponovaných laboratorních zvířat na logaritmu koncentrace toxické látky doplněná o lineární regresi této závislosti.



Obrázek 62: Závislost probit hodnoty na logaritmu koncentrace.

Z toxické dávky je možné vypočítat probit hodnotu pomocí vztahu 4-46.

$$probit = a_{pr} + b_{pr} \ln D, \quad \text{resp.} \quad probit = a_{pr} + b_{pr} \ln(c^{n_{pr}} t) \quad (4-46)$$

kde D je toxická dávka (mg), c je koncentrace látky ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo ppm), t je doba expozice (min) a a_{pr} , b_{pr} , n_{pr} jsou empirické (probitové) konstanty toxické látky. První rovnice má obecnou platnost; druhá rovnice je použitelná pouze v případě, že koncentrace c je v čase konstantní a doba expozice t nepřesáhne 30 minut²³ (Guidelines

²³ Doba expozice t je omezena maximálně na 30 minut, protože probit funkce ukazuje, že i pro kontinuální úniky malých množství látek by případně všichni lidé zemřeli, pokud by byl čas expozice dosti dlouhý. Protože se toto obvykle neočekává, je maximální expoziční doba definována. Proč je zvoleno přesně 30 minut jako doba expozice není známo. Tato hodnota je pravděpodobně odvozena od doby potřebné pro evakuaci anebo doby před poskytnutím první pomoci či od IDLH.

for Quantitative Risk Assessment: Purple Book 1999). Vypočtená hodnota probitu se dosadí do statistické tabulky pro určení očekávaného počtu úmrtí (viz tabulka 28). Hodnoty konstant a_{pr} , b_{pr} , n_{pr} pro vybrané chemické látky shrnuje tabulka 22.

Tabulka 22: Hodnoty konstant a_{pr} , b_{pr} , n_{pr} popisující toxicitu látky²⁴. (Hodnoty jsou platné pro probit funkce s koncentrací c ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) a dobu expozice t (min)).

Látka	a_{pr}	b_{pr}	n_{pr}
Akrolein	-4,1	1	1
Akrylonitril	-8,6	1	1,3
Allylalkohol	-11,7	1	2
Amoniak	-15,6	1	2
Azinfos-methyl	-4,8	1	2
Brom	-12,4	1	2
Chlor	-6,35	0,5	2,75
Chlorovodík	-37,3	3,69	1
Ethylenoxid	-6,8	1	1
Fluorovodík	-8,4	1	1,5
Fosfamidon	-2,8	1	0,7
Fosfin	-6,8	1	2
Fosgen	-10,6	2	1
Kyanovodík	-9,8	1	2,4
Methylbromid	-7,3	1	1,1
Methylisokyanát	-1,2	1	0,7
Oxid dusičitý	-18,6	1	3,7
Oxid siřičitý	-19,2	1	2,4
Oxid uhelnatý	-7,4	1	1
Parathion	-6,6	1	2
Sirovodík	-11,5	1	1,9
Tetraethylolovo	-9,8	1	2

²⁴ Hodnoty pro toxické konstanty a_{pr} , b_{pr} , n_{pr} jsou převzaty z materiálu „Gebruik toxiciteitsgegevens, KO 24-2. Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. 1989“ s výjimkou amoniaku a fosgenu. Probit funkce pro amoniak je převzata z materiálu „Gebruik toxiciteitsgegevens. Ammoniakprobitfunctie. KO 59. Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 1992“ a pro fosgen z materiálu „Gbruik toxiciteitsgegevens. Probitfunctie. KO 86. Hague Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 1994“.

4.6.2 Účinky tepelné radiace

Tepelná radiace je přenos energie (tepla) prostřednictvím elektromagnetického vlnění. Nositeli tepelné energie jsou elementární částice hmoty (fotony), šířící se rychlostí světla. Vyskytuje se u všech typů požárů (Pool Fire, Flash Fire, Jet Fire a Fire Ball, resp. BLEVE). Fyziologické účinky požáru na člověka záleží na míře tepelného toku a na době působení (expozice) požáru na člověka.

Intenzita záření plamene záleží vždy na teplotě, hořící látce velikosti plamene – v případě požáru kaluže na průměru kaluže. Experimentální údaje o tepelné intenzitě pro požáry kaluží jsou dostupné pro širokou řadu materiálů až do průměru kaluže 10 metrů; pro LPG do průměru kaluže 35 metrů a pro kerosin až do průměru kaluže do 50 metrů. Tepelný tok může být výrazně snížen přítomností kouře vznikajícího při požáru. Bylo zjištěno, že husté kouřové vlečky mohou snížit tepelný tok o 50 až 80 %. Tepelný tok emitovaný plamenem při intenzivním požáru rozsáhlé kaluže z tekutých uhlovodíků může dosahovat hodnoty až $140 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Obvykle je to ale jen okolo $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, protože při těchto požárech vzniká velké množství sazí (pro požáry těžších uhlovodíků a za zhoršeného přístupu vzduchu jsou typické koncentrace sazí 7 až 10 % obj.). V případě, že je oheň zcela zastíněn hustým kouřem, může tepelný tok poklesnout i na $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Zkapalněné uhlovodíkové plyny (LPG a LNG) mají větší výhřevnost, a tak při jejich požáru nedochází ani k výraznějšímu vývinu kouře, takže tepelný tok může dosahovat až $200 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. V posledních deseti letech se věnuje značná pozornost také požárům s tryskovým plamenem, a to hlavně z důvodů snížení rizika požárů na vrtných plošinách, které je poměrně vysoké díky rozmístění mnoha procesních zařízení ve stísněném prostoru. Záření od tryskového plamene je normálně charakterizováno jeho viditelným rozměrem. Rozsáhlé požáry zemního plynu tryskajícího z podmořského vrtu (o rychlostech 10 až $20 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$) emitují tepelné záření o intenzitě až $200 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Pokud jde o jev BLEVE, jenž vzniká jako následek katastrofické poruchy tlakové nádoby obsahující zkapalněné hořlavé plyny skladované pod tlakem, často při něm vzniká ohňová koule (Fire Ball), která je zdrojem velmi intenzivní tepelné radiace. Zatímco škoda od výbuchu je obvykle mírná, škoda od tepelného záření je mnohonásobně větší, často s fatálními následky. Většina modelů BLEVE je založena na korelaci pro kvazi ustálený průměr koule, její vzestup směrem vzhůru působením archimédovských sil, dobou trvání jevu a emitovaným tepelným tokem. Na rozdíl od požárů kaluží, má BLEVE krátké trvání (obvykle jen 15 až 45 sekund – v závislosti na celkovém množství látky účastnící se BLEVE), což vede k obtížím při sestavování (a ověřování) modelů pro tepelný tok s ním spojeným (Sadhra a Rampal, 1999).

Expozice může v reálných podmínkách trvat po celou dobu trvání požáru. Avšak pro účely modelování účinků tepelné radiace je omezena maximálně 20 sekundami, což je doba, za kterou mohou lidé utéci na bezpečné místo. Předpokládá se, že lidé uvnitř budovy jsou chráněni před tepelnou radiací, dokud budova nezačne hořet. Práh pro

Tabulka 23: Účinky tepelného toku.

Intenzita tepelného toku IR (kW.m ⁻²)	Pozorované účinky
100	Destrukce ocelových konstrukcí do 3 minut, 100 % úmrtí osob
37,5	Úmrtí osob Dostatečná intenzita pro poškození procesního zařízení
25	Úmrtí/vážné zranění nechráněných osob Minimální intenzita pro zapálení dřeva
12,5	Tavení potrubí z plastu
9,5	Práh bolesti dosažený po 8 sekundách; popáleniny 2. stupně po 20 sekundách
4	Dostatečná intenzita pro způsobení bolesti během 20 sekund; bez smrtelných účinků
1,6	Intenzita tepelného toku dlouhodobě tolerovatelná člověkem

vznícení budov je stanoven na 35 kW.m⁻².²⁵ Jestliže budova hoří, předpokládá se, že všichni lidé uvnitř zahynou. Předpokládá se, že vně budov jsou lidé chráněni před tepelnou radiací oděvem tak dlouho, dokud tepelný tok nedosáhne 35 kW.m⁻² a oděv nevzplane. Ochrana oděvem snižuje počet úmrtí o faktor 14 % při srovnání s absencí oděvu. Dojde-li ke vzplanutí oděvu, předpokládá se, že člověk zahyne (Guidelines for Quantitative Risk Assessment: Purple Book 1999).

Poškození budov a staveb požárem může mít rozsah od odlupování nátěrů až po vznícení a požár objektu. V případě nehořlavých materiálů může teplota dosáhnout takového bodu, kdy materiál ztrácí tuhost a pevnost. Je-li tento materiál použit pro nosné konstrukce, nelze vyloučit, že se stavba vlivem tepelného zatížení zhroutí. Pro poškození konstrukcí je jedním z klíčových hledisek, zda nastane vznícení. Protože při stanovení možnosti vznícení hrají důležitou roli zpracování povrchu, geometrické umístění a další faktory, Eisenberg problém zjednodušil tak, že uvažuje pouze se vznícením dřeva. V publikaci „Green book“, kterou vydala holandská TNO, jsou uvedeny hodnoty kritické intenzity záření pro dřevo, plasty, sklo a nekrytou ocel (Sadhra a Rampal, 1999). Tyto kritické hodnoty záření jsou definovány jako maximální hodnota, při které ještě nenastane vznícení bez ohledu na dobu trvání expozice (jakási obdoba LOAEL u vyjadřování toxických účinků nebezpečných chemických látek na lidi).

²⁵ Kritická intenzita tepelného toku, tj. úroveň záření, při které nastává vznícení při dlouhých dobách expozice, je v rozmezí 25–35 kW.m⁻² pro dřevo, textilie, dřevovláknité materiály, hobru a plastické hmoty, přičemž sklo praská při 4 kW.m⁻². Kritická intenzita tepelného toku je řádu 10–15 kW.m⁻² v přítomnosti plamenů, popř. jisker.

Probitová analýza následků

Pro odhad pravděpodobnosti úmrtí z působení tepelné radiace z tryskového plamene nebo požáru kaluže se používá probitová rovnice ve tvaru podle 4-47.

$$probit = -14,9 + 2,56 \ln D_R \quad (4-47)$$

kde D_R je tepelná dávka (W) počítaná podle rovnice 4-48, t je doba expozice (s) a I_R je tepelný tok ($W \cdot m^{-2}$).

$$D_R = \int_0^T \frac{I_R^{4/3}(t) dt}{10^4} \quad (4-48)$$

Tabulka 24: Rozmezí tepelných dávek, užívaná pro případy bolesti, popálenin a fatalit.

Tepelná dávka D_R (W)	Efekt
85–129	Bolest
250–300	Možnost zranění
210–700	Popáleniny 1. stupně
900–1300	Popáleniny 2. stupně
500–3000	1% úmrtnost běžně oblečeného člověka
2000–3000	Popáleniny 3. stupně / 50% úmrtnost

4.6.3 Účinky tlakové vlny

Tlaková vlna je rychle se šířící vlna zhuštěného vzduchu v atmosféře charakterizovaná postupnou změnou tlaku, hustoty a teploty na jejím čele. Obvykle je vytvořena a uvedena do pohybu explozí. Trajektorie šíření této vlny je ve směru od epicentra výbuchu a pohybuje-li se kontinuálním prostředím, pak její rychlost je ve všech směrech stejná (Encyklopedie BOZP, online).

TNT ekvivalent

Pro vyjádření reálných účinků tlakové vlny a pro jejich snadnější interpretaci se často používá takzvaný ekvivalent TNT. Jak už název sám napovídá, jedná se o množství TNT (trinitrotoluenu), které svým výbuchem vyvolá vzdušnou tlakovou vlnu stejných

parametrů jako zkoušená výbušnina, a která způsobí stejné destrukční účinky. Tento model lze použít pro oblaky plynu, par nebo oblaky prachu v mezích výbušnosti, či kondenzovanou (pevnou) výbušninu (pro posouzení účinků exploze nekondenzované fáze má význam pouze pro srovnání dosahu tlakové vlny) (Encyklopedie BOZP, online).

TNT ekvivalent lze zjistit z experimentálně zjištěných parametrů výbuchových vln, anebo jej lze vypočítat z hodnot výbuchových tepel podle rovnice 4-49.

$$W = \frac{\eta Q E_C}{E_{TNT}} \quad (4-49)$$

kde W je ekvivalent hmotnosti TNT (kg), Q je množství vybuchlého plynu (kg), E_C je spalné teplo plynu ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), η je účinnost výbuchu (stupeň konverze) a E_{TNT} je spalné teplo TNT ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Z ekvivalentu hmotnosti nálože TNT je možné odhadnout charakteristiky tlakové vlny podle maximálního přetlaku na jejím čele v jakékoli vzdálenosti od epicentra výbuchu a tedy i určit (odhadnout) odpovídající škody. Zkušenosti ale ukazují, že toto srovnání nelze použít mechanicky. Experimentálně naměřené hodnoty TNT ekvivalentu pro exploze oblaku par (VCE) jsou mnohem nižší, než byla jejich teoreticky předpovězená horní mez. U většiny explozí oblaku par při závažných haváriích tak ekvivalent TNT dosahuje pouze hodnot od 1 % do 10 % (v závislosti na spalném teple a celkovém množství uniklé hořlavé látky). Ukazuje se, že zřejmě jen relativně malá část celkové dosažitelné spalné energie se skutečně účastní na vzniku tlakové vlny. Ačkoli se v odborné literatuře připouští, že při průmyslových haváriích, při kterých došlo k explozi oblaku par, byly příležitostně pozorovány i mnohem vyšší škody, měření jednoznačně potvrdila, že většina explozí oblaku par hořlavých uhlovodíků v podobě tlakové vlny vyvinula energii pouze mezi 1 až 3 % spalné energie. Proto byl přijat obecný konsensus, že v případě události typu VCE se uvažuje o ekvivalentu TNT ve výši 3 % teoretické hodnoty (viz rovnice 4-49). Tento ekvivalent se zvyšuje pouze v případě reaktivnějších plynů (např. propylenoxid), a to na hodnotu 6 %, a pro vysoce reaktivní plyny (např. etylenoxid) na hodnotu 10 % (Sadhra a Rampal, 1999).

Použití modelu TNT ekvivalentu pro modelování exploze oblaku par (VCE) značně komplikuje také závislost hodnoty ekvivalentu TNT na vzdálenosti od epicentra výbuchu. Analýzou následků vybraných průmyslových havárií se totiž ukázalo, že charakteristiky tlakové vlny vzniklé výbuchem oblaku par (VCE) nejsou ve shodě s charakteristickými následky tlakové vlny vznikající po explozi konvenčních kondenzovaných výbušnin (např. trinitrotoluenu). Tento rozpor však není doposud numericky vyřešen, takže koncept ekvivalentu TNT se i u událostí typu VCE doporučuje i nadále využívat, avšak s použitím výše uvedených korekčních faktorů (Sadhra a Rampal, 1999).

Dosah tlakové vlny

Pro posouzení účinků exploze lze využít také parametr dosah tlakové vlny. Tento ukazatel slouží k vyjádření skutečnosti, do jaké vzdálenosti může dosáhnout tlaková vlna o příslušném přetlaku Δp na svém čele, čímž poskytuje cenné informace o distribuci „zraňující síly“ v okolí epicentra výbuchu (lze ji tedy vynést do mapových podkladů). Rovnice 4-50 vychází z empiricky zjištěných dat a má tvar:

$$\Delta p = \left(\frac{93,2}{Z} + \frac{383}{Z^2} + \frac{1275}{Z^3} \right), \quad (4-50)$$

příčemž

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (4-51)$$

kde Z je redukovaná vzdálenost (m), R je vzdálenost od epicentra výbuchu (m) a W je TNT ekvivalent (kg).

Při výpočtech účinku události typu BLEVE je nutno Δp odvozovat nikoli ze skladovacího nebo pracovní přetlaku uvnitř zařízení, ale od tlaku, při kterém se otevírají pojistné ventily. BLEVE je totiž značně složitý proces, který je způsoben zeslabením stěny nádoby zásobníku působením tepla emitovaného požárem kaluže pod zásobníkem nebo v jeho blízkém okolí. Experimenty ukázaly, že k roztržení pláště nádoby při rychlém nárůstu tlaku a teploty látky uvnitř zařízení dochází, jakmile dosáhne přibližně 1,21 násobku tlaku, na který jsou nastaveny pojistné ventily. Jestliže není pojistný ventil přítomen, uvažuje se při poruše za Δp hodnota tlaku odpovídající zkušebnímu tlaku zásobníku (Guidelines for Quantitative Risk Assessment: Purple Book, 1999).

Jelikož průběh tlaku v tlakové vlně může být značně komplikovaný (viz obrázek 63), je snaha její průběh a dosahy maximálních hodnot přetlaku na jejím čele modelovat. V případě tlakové vlny to však není s ohledem na složitost procesů vedoucích k jejich vzniku i šíření samotné vlny v reálném prostoru tak jednoduché. Praxe nás ale již mnohokrát poučila, že občas i velmi jednoduché koncepty mohou být nápomocné pro porozumění a modelování značně komplikovaných jevů. Ne jinak je tomu i v případě modelování dosahu maximálních hodnot tlakové vlny, pro které se nejnověji používá tzv. **akustický model** (van den Berg a kol., 2006). Jeho základní koncept spočívá v myšlence, že charakter šíření tlakové vlny vzniklé při explozi je stejný jako šíření vlny akustické, tj. zvuku. Tato analogie je postavena na jednoduchém matematickém vyjádření, které se vztahuje na akustickou vlnu přetlaku v určité vzdálenosti vzhledem k síle zdroje zvuku. Analogie akustického zdroje zvuku tak sestává z řešení vlnové rovnice a bere na sebe formu, která je závislá na rozměrových parametrech, charakteru explodující látky a koeficientech popisujících průběh výbuchu. Aplikace modelu tak vyžaduje dokonalou znalost síly zdroje tlakové vlny v podobě funkce

času. Síla analogického zdroje zvuku je zcela určena například únikem kapaliny z rozvíjející se trhliny v procesní nádobě (např. při jevu BLEVE). Zvětšování trhliny je komplexní záležitostí, která se může významně lišit v závislosti na struktuře a tvaru nádoby. Přetlak při vznikající ruptuře nádoby (např. se zkapalněným LPG) přenášející se do prostoru je úměrný časovému odvození síly zdroje, což znamená, že při kontinuálním úniku přehřáté kapaliny do otevřeného prostoru nedochází téměř vůbec ke zvýšení tlaku na rozdíl od úniku jednorázového. Nastane-li ale únik do uzavřeného prostoru, například v tunelu, dojde i při kontinuálním úniku k vyvolání rázového efektu. Všechny tyto skutečnosti byly v posledních letech důsledně zkoumány odborníky z holandské TNO, kteří vytvořili optimalizovaný akustický model určený jak pro exploze do otevřeného prostoru (viz rovnice 4-52) tak i pro ty, které nastávají v tunelech (viz rovnice 4-53).

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\gamma}{2\pi R v_0^2} \frac{2VF(\alpha - 1)}{(\Delta t)^2} \quad (4-52)$$

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\gamma}{2Av_0} \frac{VF(\alpha - 1)}{\Delta t} \quad (4-53)$$

kde p_0 je okolní tlak (tj. atmosférický) (Pa), R je vzdálenost od epicentra výbuchu (m), F je frakce mžikového odparu (při jevu BLEVE je to přibližně 50 %), V je objem nádoby, kde dochází k jevu BLEVE (m^3), α je koeficient expanze tekutiny v páru (pro LPG dosahuje hodnoty okolo 260), Δt je doba úniku látky ze zařízení (s), γ je poměr specifických tepelných kapacit explodující látky a látky tvořící okolní prostředí, A je plocha profilu tunelu (m^2) a v_0 je rychlost zvuku v okolním prostředí (tj. vzduchu) ($m \cdot s^{-1}$).

V tabulce 25 jsou uvedeny hodnoty maximálního přetlaku Δp při explozi typu BLEVE zásobníku s LPG o objemu $50 m^3$ pro vzdálenost 10 metrů od zdroje. Z tabulky lze s ohledem na hodnotu přetlaku dobře odvozovat závažnost následků v závislosti na délce trvání jevu BLEVE (van den Berg a kol., 2006).

Tabulka 25: Hodnoty maximálního přetlaku Δp při explozi typu BLEVE zásobníku s LPG o objemu $50 m^3$.

Doba úniku látky ze zařízení Δt (s)	Přetlak Δp (kPa) ve vzdálenosti $R = 10$ m
0,05	106
0,1	27
0,2	6,7
0,5	1,1
1	0,3

Tabulka 26: Maximální hodnoty přetlaku na čele vlny Δp (kPa) při explozi LPG v tunelu.

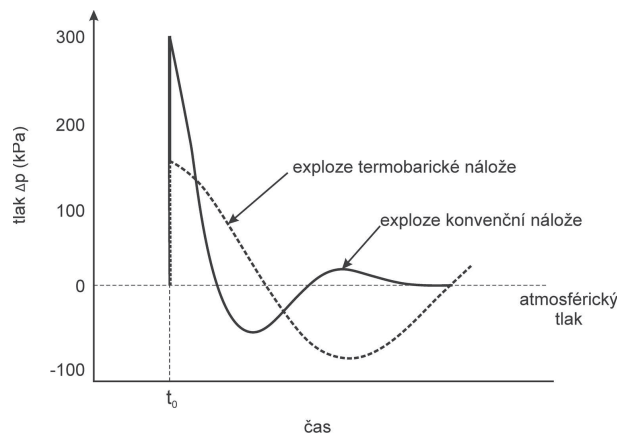
Doba úniku látky ze zařízení Δt (s)	Maximální přetlak na čele vlny Δp (kPa)
0,1	228
0,2	114
0,5	46
1	23
2	11

Za předpokladu exploze 50 m³ LPG o teplotě 326 K při jeho úniku v tunelu o průřezu 60 m² dochází ke vzniku tlakové plny se širokým maximem (tzv. obdélníkový profil vlny). Maximální hodnoty přetlaku na čele vlny Δp (kPa) podle akustického modelu shrnuje tabulka 26 (van den Berg a kol., 2006).

Účinky rázové vlny

Jeden z účinků exploze je náhlý vzestup tlaku vzduchu, který se od epicentra výbuchu pohybuje ve formě vlny. Tvar této vlny závisí na velikosti exploze a na vzdálenosti od epicentra. V případě detonace, kdy se tlaková vlna šíří rychleji než zvuk, je nárůst tlaku v podstatě okamžitý – hovoříme o rázové vlně. Charakter rázové vlny je takový, že se přetlak skokově zvýší až do své maximální hodnoty a pak poměrně rychle poklesne pod hodnotu tlaku atmosférického. Obvykle tento podtlak nehraje důležitou roli ve srovnání s hodnotou maximálního přetlaku, protože pokles tlaku po průchodu čela rázové vlny je relativně pozvolný (byť také velmi rychlý) a absolutní hodnota Δp (oproti tlaku atmosférickému) nebývá větší jak –50 kPa. Při explozi průmyslového zásobníku s LPG o objemu 50 m³, který nastal při jevu BLEVE, dosáhl ve vzdálenosti 10 metrů od epicentra (po 0,09 sekundy po výbuchu) podtlak hodnoty 20 kPa. Ovšem při velmi silných explozích, jako například při explozích jaderných zbraní, má tato tzv. záporná fáze za následek skokové obrácení směru větru, které může způsobovat vymrštění méně hmotných předmětů nebo i povalení a zranění osob (Sadhra a Rampal, 1999). Jelikož při této fázi dochází za určitých okolností k výrazným specifickým ztrátám (např. poškození plic, ušních orgánů apod.), účelově se konstruují tzv. termobarické zbraně²⁶, u nichž je tato fáze časově delší a vzniklý podtlak výraznější (v uzavřených prostorách až 70 kPa) (viz obrázek 63).

²⁶ Jedná se o výbušniny, u nichž je spalná energie řádově menší, než energie výbušnin na bázi uhlovodíků. Výbušnou látku termobarických zbraní tvoří palivová explozivní hmota o hmotnosti od několika desítek kilogramů až po několik tun (u největších pum). Doplněk tvoří dvě oddělené konvenční nálože. První nálož v předem určené výšce nebo určeném okamžiku rozptýlí palivo do vzduchu. Vzniklý oblak smíšený se vzduchem se obvykle dostane do kontaktu s cílem, proti němuž je zbraň použita. S odstupem několika sekund následuje výbuch druhé nálože, který tuto směs zapálí. Následuje exploze, kterou doprovází velmi silná tlaková vlna. Ničivý účinek takové vlny a za ní následujícího podtlaku převyšuje účinnost běžných konvenčních výbušnin.



Obrázek 63: Profil rázové vlny po explozi (okamžik t_0) silné konvenční výbušniny (plná křivka) a termobarické zbraně (přerušovaná křivka).

Když čelo rázové vlny narazí na terénní překážku, dojde k jejímu částečnému odrazu, čímž vzniká relativně malá odrazová vlna. Původní rázová vlna se šíří přes danou překážku dál, a tuto překážku buď strukturálně naruší, nebo „obteče“. V obou případech ovšem ztrácí část své energie. Při zvažování odrazu rázové vlny jsou rozlišovány dva limitní případy. Je-li směr vlny kolmý k povrchu překážky, je tlak působící na překážku maximální (a dochází k normálnímu odraznému zatížení), ale když je směr šíření vlny rovnoběžný s povrchem překážky (resp. s orientací jeho strany o největším rozměru), nenastane žádné výraznější zvýšení tlaku (dochází k postrannímu zatížení). Objekty vystavené jedním či druhým případem zatížení se však specificky deformují. Způsob, kterým se tyto deformace projeví, stejně tak i jejich hodnoty, záleží nejenom na zatížení, ale také na materiálních nebo konstrukčních vlastnostech překážky. Při zasažení rázovou vlnou mohou být některé konstrukce také rozvibrovány, přičemž frekvence vzniklého kmitání hraje z hlediska odolnosti staveb důležitou roli (Sadhra a Rampal, 1999). Jelikož je daná problematika velmi složitá a je spíše otázkou materiálně technickou a stavební, nebudeme se jí zde dále zabývat.

Charakter zranění lidí působením tlakové vlny

Obvykle se určují tři kategorie poranění lidí výbuchem, a to v závislosti na mechanismu, který poranění působí. První kategorie je primární poškození, způsobené přímými účinky tlakové a rázové vlny, kdy dochází k četným smrtelným zraněním vlivem krvácení do plic. Je-li vnější tlak na hrudník větší než vnitřní tlak v těle, hrudník se vmáčkne dovnitř, což vede k pohmožděninám vnitřních orgánů, případně i vnitřnímu krvácení. Nejčastějším bezprostředním zraněním vlivem účinku tlakové vlny je protržení ušního bubínku. Ušní bubínek je poškozen následkem přetlaku, protože charakteristická perioda vibrace orgánů ucha je malá v porovnání s dobou trvání tlakové vlny.

Druhou kategorií je sekundární poškození, způsobené rozletem fragmentů od epicentra výbuchu. Při určování účinků letících úlomků na lidské tělo se rozlišuje mezi úlomky, které způsobují řezné rány a úlomky, které řezné rány nezpůsobují. Zranění, která mohou vzniknout řeznými úlomky, jsou tržné rány a průstřely. Řezné úlomky jsou často lehké (o hmotnosti 10 gramů nebo i méně), a velmi často jsou tvořeny skleněnými střepy nebo jinými ostrými úlomky. Fragmenty, které nezpůsobují řezné rány, jsou většinou velké předměty, které však způsobují zasaženým lidem vnitřní poranění. Není možné teoreticky předpovědět pravděpodobnost ani závažnost poškození zdraví vlivem rozletu fragmentů (Sadhra a Rampal, 1999).

Lidé uvnitř hroutcích se budov jsou vystaveni účinkům dopadu velmi těžkých částí konstrukce budovy. Ze snímků pořízených po zemětřesení či bombardování je vidět, že vertikální části konstrukce se obvykle zřítí a jednotlivá poschodí se navrství jedno na druhé (viz obrázek 15). Počet lidí, kteří přežijí tyto mimořádné události, je pravděpodobně dán náhodným vytvořením kleneb a prostor, vytvořených z trosk budovy, kde lidé mohou přežít. Tam, kde se použije model ekvivalentu TNT, je k dispozici vztah mezi pravděpodobným počtem přeživších osob a vypočítaným přetlakem. Tyto vztahy lze použít na budovy s běžnou stavební konstrukcí, jako jsou obytné domy nebo administrativní či obchodní budovy. Je však třeba pečlivě zvážit použití modelu TNT ekvivalentu na průmyslové budovy. Například ve Flixborough (1974) měla budova, kde se nacházel centrální velín, zpevněný betonový strop, který se však po explozi ve výrobně kaprolaktamu zřítí a nikdo z lidí uvnitř nepřežil (Sadhra a Rampal, 1999).

Třetí kategorií poranění lidí následkem výbuchu je kolize člověka s překážkou vlivem sražení či odhození člověka tlakovou vlnou. Může to nastávat jak během pozitivní fáze tak i negativní fáze rázové vlny. Nejvýraznější účinky terciárních následků nastávají tehdy, je-li člověk v okamžiku exploze ve vzpřímené poloze.

Probitová analýza následků

Pro odhad pravděpodobnosti úmrtí následkem tlakové vlny se používá například rovnice 4-54.

$$probit = -18,1 + 2,79 \ln(\Delta p) \quad (4-54)$$

kde Δp je stanovená hodnota přetlaku v čele tlakové vlny (kPa).

Experimentálně zjištěné následky výbuchů a příslušných hodnot přetlaku Δp v čele tlakové vlny pak prezentuje tabulka 27.

V analýzách a hodnocení rizik však obvykle nevyjadřujeme, do jaké vzdálenosti dosáhne příslušný přetlak Δp , nýbrž vzdálenosti, kde lze očekávat 1 %, 50 % a 95 % fatalitu. Takový výsledek tedy počítáme opačným postupem, tj. ze známých probit hodnot (tj. viz níže) spočítáme odpovídající přetlaky Δp a k nim posléze i příslušné

Tabulka 27: Vyjádření následků tlakové vlny podle přetlaku na jejím čele.

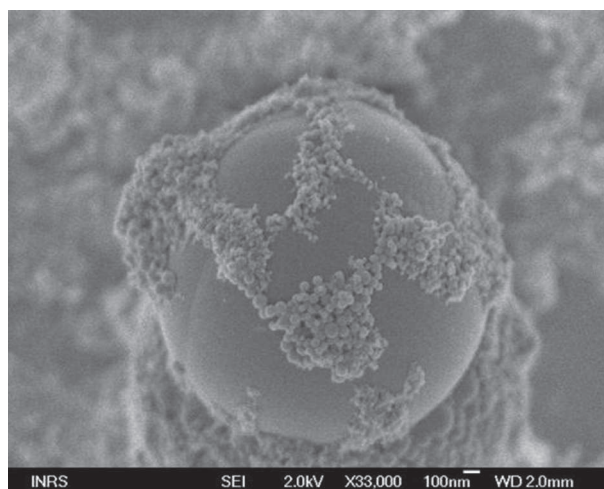
Přetlak v čele tlakové vlny Δp (kPa)	Úroveň zničení budov a konstrukcí
> 83	Úplné zničení
> 35	Vážné škody
> 17	Střední škody
> 3,5	Lehké škody
	Dopady na člověka
16,5	Poškození ušních bubínků 1%
19,3	Poškození ušních bubínků 10%
34,5	Poškození ušních bubínků 50%
43,5	Poškození plic
100	Úmrtí 1%
121	Úmrtí 10%
141	Úmrtí 50%
176	Úmrtí 90%
200	Úmrtí 100%

redukované vzdálenosti Z , resp. vzdálenosti od epicentra výbuchu R – dosahy dopadů na lidi vyjádřených zmíněnými fatalitami. Známe-li střední časový úsek, během kterého se mimořádná událost tohoto rozsahu může v daném místě reálně vyskytnout (např. v příslušné chemické továrně), můžeme vztahením těchto hodnot k časové jednotce jednoho roku získat hodnotu individuálního rizika, tj. rizika pro každého jednotlivce nacházejícího se v určitém místě v blízkosti zdroje tohoto rizika (blíže viz kapitola 5.2.7).

4.6.4 Účinky nebezpečných částic

Hodnocení účinků nebezpečných částic není jednoduché a v podstatě dodnes neexistuje žádný obecně uznávaný přístup. Opomeneme-li vodní prostředí, kde mohou být částice dispergovány a přijímány do těla při konzumaci jídla a vody, je hlavní nebezpečí účinků nebezpečných částic spojeno s jejich transportem vzdušnou cestou a dále jejich depozicí na površích předmětů, včetně povrchu lidského těla. O chování částic aerosolu již bylo sice detailněji pojednáno v prvním díle této knihy, přesto však připomeňme krátce základní vlastnosti velmi malých částic a jejich nebezpečnost.

Částice o velikostech menších jak 10 μm představují pro člověka velké nebezpečí. Díky své velikosti jsou schopny při inhalační expozici pronikat až do horních cest dýchacích, částice o velikostech 1 μm pak až do plicních sklípků, kde se mohou deponovat. Podle svého chemického charakteru se na sliznicích uvnitř lidského těla



Obrázek 64: Nanočástice z kondenzovaných horkých par vznikajících ve svářecím dýmu aglomerované na částici aerosolu – prachové částici o velikosti 2 μm (zdroj: INRS).

mohou rozpouštět a pronikat do krve nebo trávicího traktu; velmi malé částice mohou pak z plicních sklípků přecházet do krevního řečiště přímo. Nanočástice o velikosti menších jak 0,1 μm mohou také pronikat kůží, zvláště pak, mají-li nepolární charakter, který jim umožňuje pronikat přes tukovou vrstvu tvořící přirozenou ochranu pokožky. Nanočástice se také mohou deponovat na částice větších rozměrů a na jejich povrchu migrovat prostředím či se deponovat na vertikálně i horizontálně orientované povrchy (viz obrázek 64).

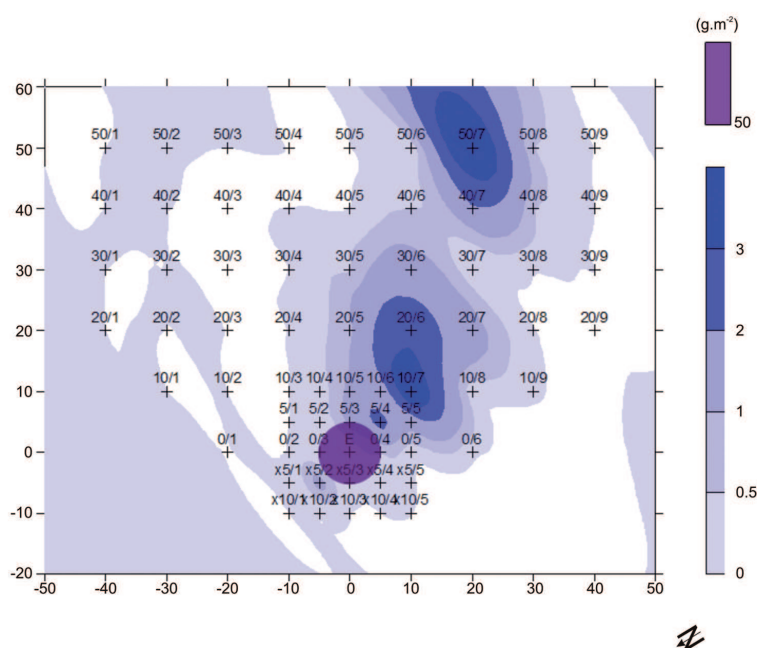
Spad částic aerosolu

Transport aerosolů od zdroje emise (např. místa havárie, bombového útoku apod.) neprobíhá jako v případě plynů pouhým pasivním rozptylem, ale uplatňuje se při něm řada dalších procesů, jako je sedimentace, agregace či resuspenze částic. Na rozdíl od plynů, u nichž dochází k pouhému naředování oblaku vzduchem, se tak v případě aerosolu koncentrace částic může v čase značně měnit, což komplikuje modelování dosahů nebezpečných koncentrací²⁷. Obecně ale platí, že v okolí zdroje emise dochází k rychlé depozici těch největších částic. Tato depozice nemusí probíhat pouze formou spadu, ale také impaktací (záchytem) na vertikálně orientovaných plochách. V reálné atmosféře a pro vzdálenosti v řádech jednotek kilometrů od zdroje emise můžeme u velmi malých částic (pod 1 μm) jejich depozici zanedbat, protože již podléhají Brownově difúzi a sedimentují jen po vzájemné agregaci a vytvoření

²⁷ Koncentrace se v tomto případě udává v hmotnosti hmoty tvořící oblak aerosolu v jednotce objemu ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) na, avšak v této veličině se naprosto neodráží informace o velikostní distribuci částic, takže nelze z ní usuzovat, zda se v oblaku nacházejí „nebezpečně malé“ částice či nikoli, resp. v jakém množství.

větších a hmotnějších celků, jejichž pádové rychlosti jsou vyšší. Také impaktace je u těchto částic relativně malá, protože mají tendenci terénní překážky obtékat spolu se vzdušnými proudy. Pro částice o velikostech okolo $10\ \mu\text{m}$ toto zcela neplatí. Ačkoli se uvádí, že u takto velkých částic nastává sedimentace vlivem proudění v ovzduší nejdříve až za několik hodin, experimentálně se podařilo prokázat, že i takto malé částice podléhají poměrně výrazné sedimentaci, a to i tehdy, byly-li do atmosféry emitovány při výbuchu (typická situace, která nastává při výbuchu špinavé bomby malé ráže).

Celkový spad v okolí epicentra výbuchu je vždy tvořen dvěma příspěvky: hrubými částicemi, které vznikly koagulací popř. agregací jednotlivých částic během výbuchu (ty tvoří spad v nejbližším okolí epicentra), a jemnými neagregovanými částicemi (sedimentují dále od epicentra – podle povětrnostních podmínek). Při experimentálních explozích, kde bylo použito 2 kilogramy trhaviny a 30 kilogramů jemně mletého křemene (částice o $\text{CMD} = 0,98\ \mu\text{m}$), který byl uváděn do vznosu, se potvrdilo, že hlavní část spadu se nachází v okruhu epicentra výbuchu (v tomto konkrétním případě se jednalo o vzdálenosti do 5 metrů, kde se koncentrace spadu pohybovala okolo $50\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). Měřitelný spad jemných částic deponovaných na horizontálně orientované ploše lze v případě takto malých explozí nalézt až do vzdálenosti 80 metrů od epicentra výbuchu, a to v koncentracích nepřesahujících $5\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (viz obrázek 65).



Obrázek 65: Spad v okolí epicentra výbuchu – fialová barva znázorňuje spad hrubých částic a modrá barva spad jemných částic (Projekt SPREAD, 2008).

Množství pevných částic tvořících celkový spad tak na ploše sahající až do vzdálenosti 60 metrů od epicentra dosahuje 7 % až 14 % hmotnosti látky uváděné do vznosu (Projekt SPREAD, 2008).

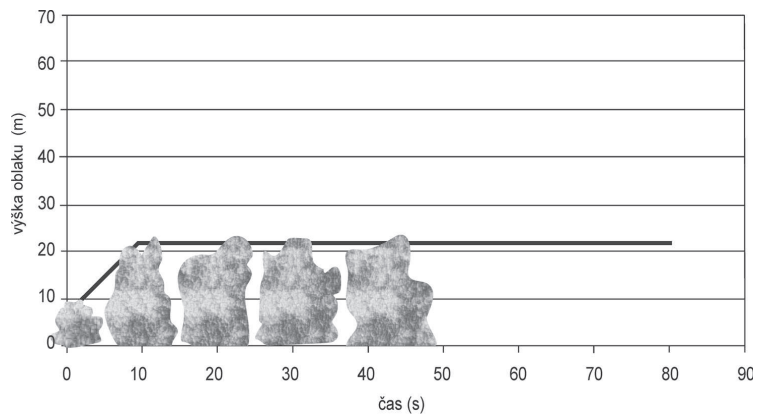
Materiál, který nepodlehl depozici a účastnil se rozptylu, se šíří podobně jako jiné disperze v převažujícím proudění větru. Rozhodující vliv na tvar oblaku a jeho rozšiřování do prostoru má rychlost větru, teplotní zvrstvení (stabilita atmosféry) a drsnost povrchu.

Hlavní fáze rozptylu oblaku aerosolu

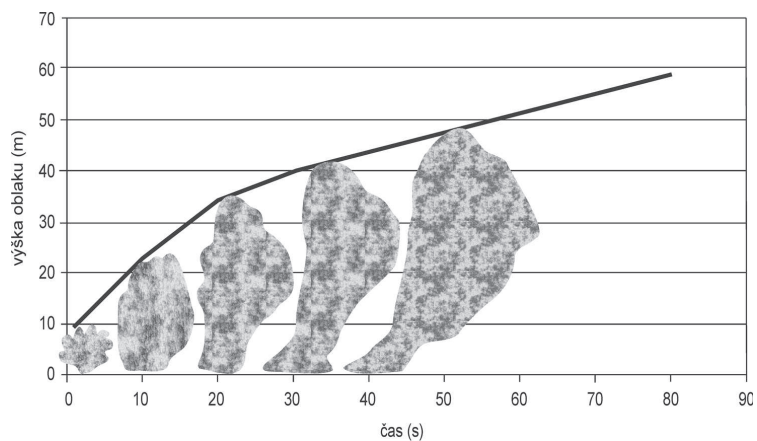
Testy prováděné v rámci projektu SPREAD přinesly řadu cenných informací o rozptylu oblaku aerosolu v závislosti na povětrnostních podmínkách (viz obrázky 66 až 68). V případě použití náložky do 2 kg trhaviny a 30 kg materiálu uváděného do vznosu se ukázalo, že převažují čtyři hlavní fáze rozptylu oblaku (Skřehot a Havlová, 2008):

1. Fáze počátečního růstu – prvních cca 6 vteřin oblak roste, jednotlivé částice ztrácejí počáteční impuls získaný při výbuchu a oblak zaujímá tvar polokoule o průměru 15 až 20 metrů.
2. Fáze poklesu (sestupu) – ty části oblaku, kde je koncentrace částic dostatečně velká (vyjma okrajových partií různých laloků), začnou klesat k zemi. Oblak nabývá tvaru plochého koláče, který se pohybuje ve směru větru. Tato fáze je pozorována pouze v případě silné instability v přízemní vrstvě atmosféry a při rychlosti větru do cca $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V ostatních případech nastává rovnou fáze rozptylu podél kužele.
3. Fáze rozptylu podél kužele – jedná se o rozšiřování oblaku do prostoru, který je ohraničen pláštěm pomyslného kužele, který je orientován tak, že v jeho vrcholu leží epicentrum, a jehož osa míří ve směru větru v horizontální rovině. Vrcholový úhel je závislý na rychlosti proudění a teplotním zvrstvení (stabilitě atmosféry) – s rostoucí rychlostí větru a zvyšující se stabilitou atmosféry se zmenšuje.
4. Fáze pasivního rozptylu (pozitivní vzlínání), popř. fáze konvektivně vzlínání – nastává při dostatečném naředění oblaku, který se začne výrazněji rozptylovat vertikálním směrem (při naředění oblaku pod 1 % obj.). Pozitivní vzlínání urychluje přítomnost konvektivních proudů.

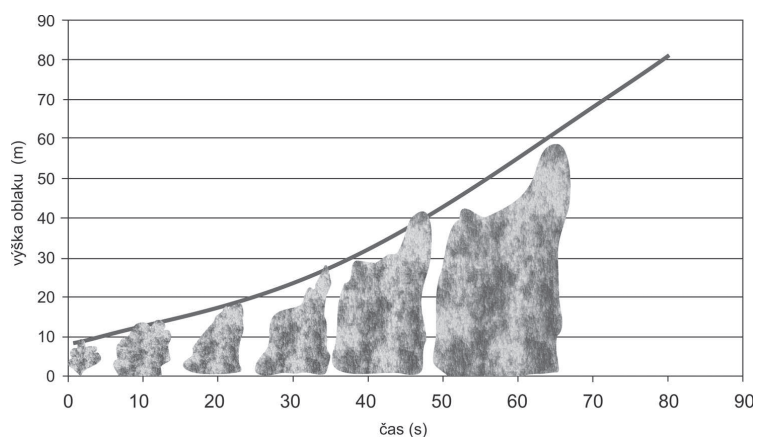
Oblak se postupem času ředí vzduchem, který do něj vstupuje turbulentním prouděním (viz obrázek 32), takže dříve nebo později dospěje do fáze, kdy se dostatečně naředí vzduchem a začne se rozptylovat způsobem pasivního rozptylu. V tu chvíli začne převažovat vertikální složka jeho pohybu, takže oblak začne stoupat vzhůru. Toto je důležitý moment z hlediska možného ohrožení lidí (uvažujeme totiž, že se lidé nacházejí na zemi). Naproti tomu, stejně jako v případě rozptylu těžkých plynů,



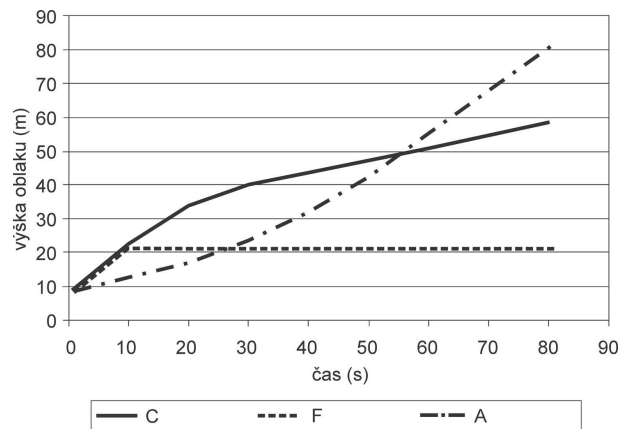
Obrázek 66: Vývoj tvaru a výšky oblaku aerosolu při inverzním počasí (třída stability atmosféry podle Pasquilla – F) (Skřehot a Havlová, 2008).



Obrázek 67: Vývoj tvaru a výšky oblaku aerosolu při slabě konvektivním počasí (třída stability atmosféry podle Pasquilla – C) (Skřehot a Havlová, 2008).



Obrázek 68: Vývoj tvaru a výšky oblaku aerosolu při silně konvektivním počasí (třída stability atmosféry podle Pasquilla – A) (Skřehot a Havlová, 2008).



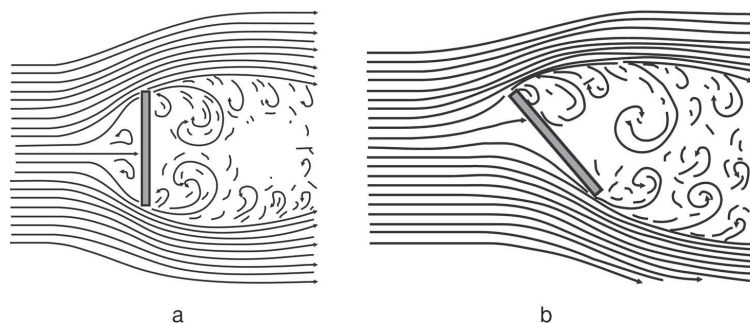
Obrázek 69: Vývoj výšky oblaku v čase při různých podmínkách teplotního zvrstvení přízemní vrstvy atmosféry (žlutá – třída stability atmosféry podle Pasquilla – A, modrá – C, růžová – F) (Skřehot a Havlová, 2008).

je naopak nejkritičtější situace, kdy panuje inverzní charakter počasí. V takovém případě je dominantní rozšiřování oblaku do stran, přičemž již během prvních dvou minut se oblak deformuje do podoby plochého koláče s neohrazenými horními partiemi. Největší množství materiálu v tomto útvaru je možno pozorovat do výšky cca 4 až 5 metrů. Při rychlosti postupu oblaku $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a při silné inverzi nastává pasivní rozptyl ne dříve jak po 6 minutách, přičemž čelo oblaku může dostupit až do vzdálenosti 160 metrů od epicentra (Projekt SPREAD, 2008).

Určení koncentrace počtu částic a hmotnosti v oblaku aerosolu

Pro posouzení nebezpečnosti aerosolu je potřeba zjistit maximální koncentrace hmotnosti aerosolu podél trajektorie rozptýlujícího se oblaku (nebo v jakémkoli jiném místě zájmové plochy) a pro odhad dávky, kterou by člověk obdržel při zmíněné expozici, pak průměrnou koncentraci po celou dobu, kdy oblak nad daným místem přecházel. Vývoj koncentrací v čase lze určit pouze za pomoci aktivních měřicích zařízení, které jsou schopny měřit početní a hmotnostní distribuci²⁸. V reálných podmínkách ale nastává zásadní potíž, a to, že profil distribuce velikosti částic není obvykle znám, a tak nelze určit, kolik částic daného geometrického průměru D_p se v měřeném objemovém elementu vzduchu nachází. Proto je nutné vhodným doplňkovým způsobem zajistit, aby do měřicího zařízení vstupovaly pouze částice o velikostech, které nás zajímají (v našem případě pod $10 \mu\text{m}$). Pro tento účel se používají impaktory, což jsou zařízení, ve kterých jsou částice separovány z nasávaného vzduchu nárazem na překážku, postavenou proudem do cesty. Částice s vyšší

²⁸ Početní koncentrace částic se stanovuje na základě mobility nabitých aerosolových částic v elektrickém poli (měří početní koncentrace částic o velikostním rozmezí obvykle 10 nm – 700 nm) nebo na základě závislosti setrvačnosti částic na jejich velikosti (měří početní koncentrace částic v rozmezí velikostí 0,5 μm – 20 μm).



Obrázek 70: Obtékání destičky orientované kolmo (a), resp. šikmo (b) vůči proudění vzduchu (Janalík, 2008).

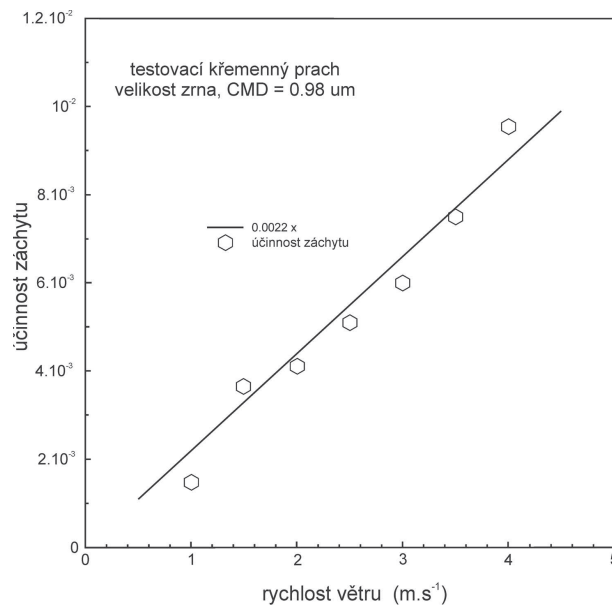
setrvačností při změně směru proudu narážejí na impakční podložku a jsou na ní zachyceny (Dohányosová a kol., 2007, online).

Koncentrace hmotnosti, která je pro tento případ nejvhodnější, se měří laserovým fotometrem umožňujícím stanovovat hmotnostní koncentrace vybrané velikostní frakce částic atmosférického aerosolu s krátkou integrační dobou. Za pomoci předsazeného impaktoru lze stanovovat velikostní frakce PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 . Zkušenosti z praxe ukázaly, že z hlediska nebezpečnosti a také fyzikálních vlastností (např. mobilita v reálné atmosféře, tendence agregovat apod.) je nejdůležitější frakce $PM_{2,5}$ ²⁹.

Průměrná koncentrace aerosolu se v praxi nejjednodušeji stanovuje pomocí soustavy pasivních odběrových zařízení s přesně definovanou depoziční plochou – terčíkem (orientovanou vertikálně a kolmo ke směru větru, což simuluje orientaci lidských úst), na které se impaktací zachycují jednotlivé částice. Za pomoci klasické planimetrie prováděné pod mikroskopem je pak následně na minimálně třech vybraných reprezentativních místech každého terčíku (kde je minimální poškození vzorku a minimum kontaminací částicemi půdního prachu, pylem, hmyzem apod.) spočítán počet impaktovaných částic a výsledky z jednotlivých sčítání jsou následně zprůměrovány. Vztah mezi maximální a průměrnou koncentrací znázorňuje obrázek 70.

Jelikož impaktace probíhá po celou dobu průchodu oblaku, jedná se o celkovou depoziční ve vertikálním směru, a tudíž nelze naprosto usuzovat o vývoji koncentrace v čase. Počet částic impaktovaných na depoziční ploše terčíku však nevypovídá nic o koncentraci, pakliže není známa účinnost zachytu. **Účinnost impaktace** (záchytu) říká, jaké procento z celkového množství částic unášených větrem a pomyslně narážejících na terčík se při dané rychlosti větru trvale deponuje na jeho povrchu. Jelikož

²⁹ Částice o daném aerodynamickém průměru (v tomto případě $2,5 \mu m$) jsou separovány s účinností právě 50 %, přičemž částice menší, jsou ve sledovaném vzorku obsaženy s téměř 100 % pravděpodobností a naopak částice větší nežli daný aerodynamický průměr s pravděpodobností blízkou se nule.



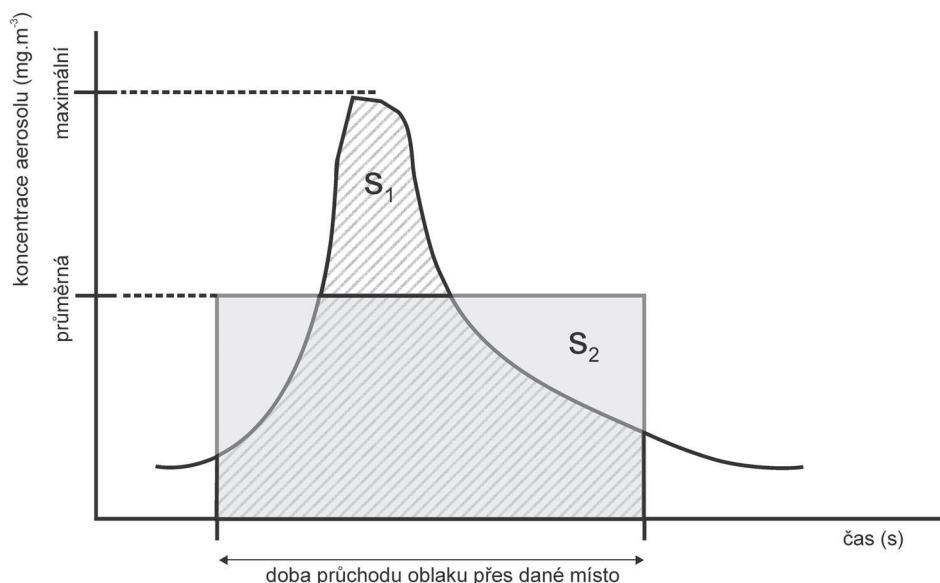
Obrázek 71: Závislost koeficientu účinnosti záchytu na pasivní dozimetr na rychlosti proudění (Skřehot, Hovorka a Havlová, 2008).

víme, že většina „malých“ částic má tendenci překážky malého rozměru spíše obtékat, nežli na ně narážet – stejně jako vzduch (viz obrázek 70a resp. 70b), je zřejmé, že účinnost impaktace bude mít velmi malou hodnotu.

Koeficient účinnosti impaktace (collection efficiency) lze určit pouze specializovaným měřením v aerodynamickém tunelu, kde se simulují podmínky probíhající za reálných podmínek. Příslušná měření jsou však velmi náročná, neboť si vyžadují řadu opakování a musí být při nich použit velký počet experimentálních detektorů (řádově až stovky). Pro částice tvořené SiO₂ o velikostech CMD³⁰ = 0,98 μm, které byly použity i při testech realizovaných v rámci řešení projektu SPREAD, se účinnost impaktace pohybuje v řádech 10⁻³ (pro rychlost větru 1 m.s⁻¹) až 10⁻² (pro rychlost větru 4 m.s⁻¹), což znamená, že pouze cca každá stá až tisíce částice pohybující se ve válci o ploše odpovídající ploše terčíku a kolmé na terčík, se na něm zachytí (viz obrázek 71).

Účinnost záchytu je v reálné atmosféře závislá také na směru proudění, pod kterým částice k terčíku přicházejí. Proto je nutné při přepočtu zjištěného počtu deponovaných částic (cm⁻²) na terčíku na jejich průměrnou koncentraci v oblaku, příslušnou hodnotu účinnosti impaktace ještě vynásobit hodnotou sin(α), kde α je úhel, pod kterým vzduch k detektoru proudil (kolmo na plochu detektoru = 90°, podélně = 0°).

30 Count Median Diameter = medián velikosti částic jejich početní distribuce.

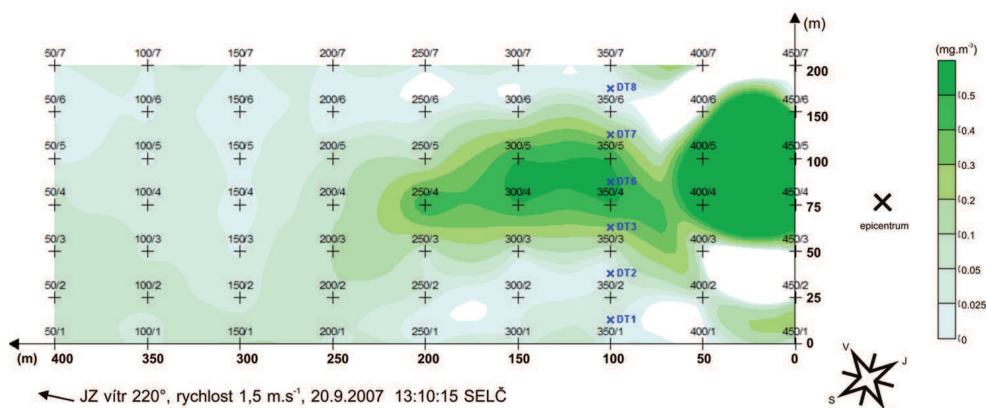


Obrázek 72: Vztah mezi průměrnou koncentrací (zašeděná obdélníková oblast) a reálným průběhem koncentrace v čase (šrafovaná oblast pod křivkou) během průchodu oblaku nad daným místem (Skřehot a Havlová, 2008).

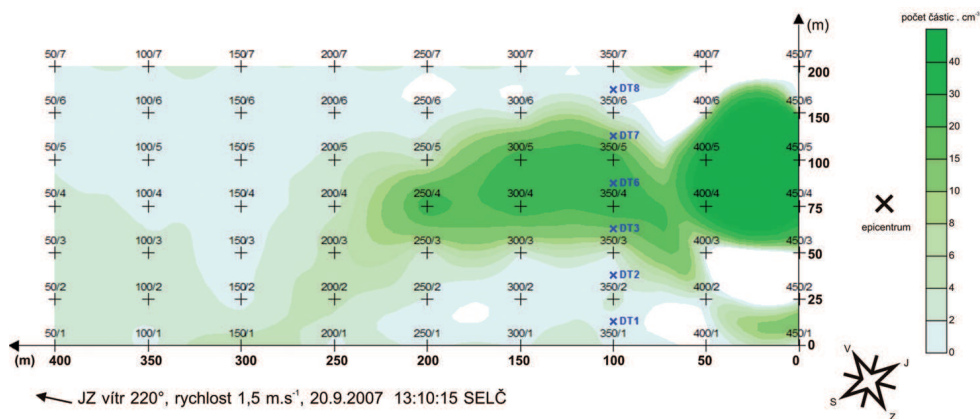
Výsledky získané planimetrickým stanovením a jejich přepočítáním na hodnoty koncentrace počtu částic v jednotce objemu (tedy za využití koeficientů impaktace pro příslušné povětrnostní podmínky a typ detektoru a po korekci pro daný směr větru), lze přepočítat na průměrnou koncentraci aerosolu v ovzduší. K tomu potřebujeme znát převažující velikost částic (hodnotu CMD) a hustotu látky tvořící částice. Vyneseme-li takto vypočtenou koncentraci hmotnosti částic v oblaku do grafu, odpovídá plocha vymezená časem, po který oblak přecházel nad daným místem a hodnotou této koncentrace, dávce, kterou by při stejně dlouhé expozici obdržela exponovaná osoba v případě reálného průběhu koncentrace. Názorně to ukazuje obrázek 72, kde plocha pod píkem (S_1) ohraničená křivkou reálného průběhu koncentrace v době průchodu oblaku je shodná s plochou obdélníku (S_2) vycházející z vypočtené hodnoty průměrné koncentrace (Skřehot a Havlová, 2008).

Soubor hodnot průměrných koncentrací z jednotlivých detekčních bodů plošné sítě lze za pomoci geostatistické metody kriging vynést do grafického zobrazení ve 2D rozměru (viz obrázek 73). Pro ilustraci je pro stejný experiment uvedena níže i průměrná koncentrace počtu částic aerosolu v oblaku (počet částic v 1 cm^3 vzduchu) (viz obrázek 74) a průměrná koncentrace počtu částic aerosolu impaktovaných na terčících (počet částic na 1 cm^2 plochy terče) (viz obrázek 75).

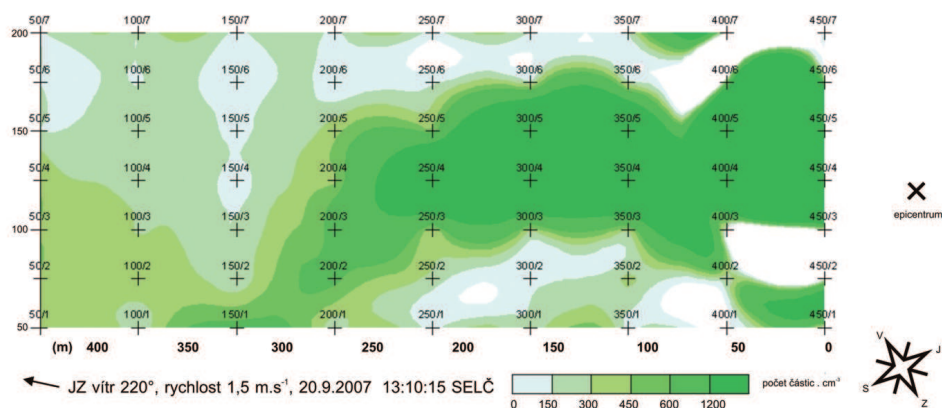
Jelikož se toho o toxikologických vlastnostech pevných aerosolů mnoho neví, nejsou pro ně doposud stanoveny probitové funkce ani příslušné koeficienty a_{pr} , b_{pr} , n_{pr}



Obrázek 73: Průměrná koncentrace hmotnosti částic aerosolu v oblaku po přechodu oblaku na sledované ploše.



Obrázek 74: Průměrná koncentrace počtu částic aerosolu v oblaku po přechodu oblaku na sledované ploše.



Obrázek 75: Průměrná koncentrace počtu částic aerosolu impaktovaných na terčících po přechodu oblaku na sledované ploše.

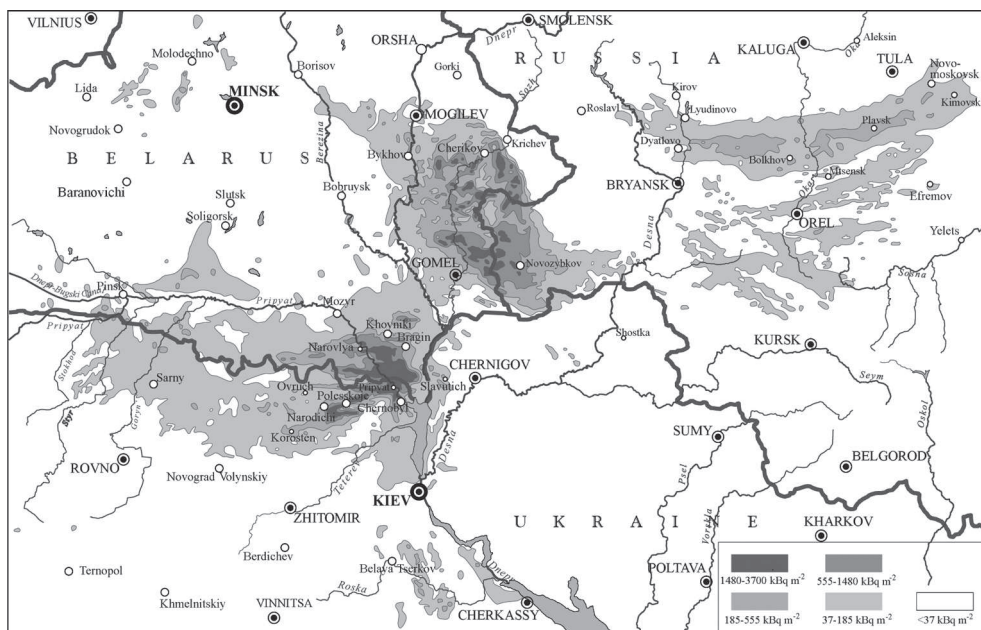
vztažené ke konkrétním nebezpečným látkám, které je mohou tvořit, anebo které mohou být na povrchích částic adsorbovány. Není tedy možné vypočítat pravděpodobnost fatálních následků v případě akutní expozice aerosolům, resp. při obdržení příslušné dávky. V praxi se v současnosti provádí pouze přibližné hodnocení expozice prachu v pracovním prostředí, tj. jedná se pouze o expozici chronickou (blíže viz první díl knihy, kapitola 3.10.2).

Zamoření prostředí radioaktivními částicemi

Radionuklidy, které se postupně deponují na zemský povrch, kontaminují vodní zdroje, půdu a biosféru, odkud dále migrují a stávají se součástí potravinového řetězce. Pozornost je věnována zejména radioizotopům ^{90}Sr a ^{137}Cs , dále radionuklidům ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{91}Y , ^{144}Ce apod., které mohou být emitovány do atmosféry při závažných radiačních haváriích, jako byla například havárie v Černobyli v roce 1986. Tato havárie způsobila radioaktivní zamoření celou řadou látek, mezi kterými dominovaly radioaktivní vzácné plyny, zejména izotopy xenonu a kryptonu a izotopy jódu (v plynné fázi, ve formě aerosolů i ve formě organické). Těkavé prvky a sloučeniny, telur a cesium se do ovzduší dostaly ve formě aerosolů nebo s částicemi rozprášeného jaderného paliva. V menším zastoupení šlo o radioizotopy málo těkavých prvků, jako je cer, zirkonium, barium a stroncium. Tyto netěkavé radionuklidy se vyskytovaly ve formě větších aerosolových částic, a proto byl jejich spád omezen převážně na území v bezprostředním okolí elektrárny. V menším množství se však dostaly i do větší vzdálenosti. S rozprášeným palivem unikly do ovzduší i silně toxické aktinoidy, především izotopy plutonia a americia. Uvádí se, že celková aktivita z radioaktivních plynů a aerosolů emitovaných do atmosféry dosáhla až $14 \cdot 10^{18}$ Bq, což je údajně jen o jeden řád méně, než radioaktivní zamoření způsobené při testování všech atomových zbraní v atmosféře před přijetím smlouvy o zákazu testů v roce 1963 (Černobyl, online).

Podle oficiálních zpráv bylo radioaktivním spadem, jehož hlavní radiační složku tvořilo ^{137}Cs , kontaminováno území o rozloze asi 28 000 km², kde úroveň radioaktivity dosáhla 185 kBq.m⁻². Na ploše o rozloze cca 10 500 km² z tohoto území pak aktivita ^{137}Cs dosáhla hodnot větších než 555 kBq.m⁻². V inkriminované oblasti žilo zhruba 830 000 lidí, přičemž v oblasti největšího spadu na čtvrt milionu lidí, kteří byli také nejvíce postiženi. Z uvedeného území zasaženého silným radioaktivním spadem bylo 7 000 km² na území Běloruska, 2 000 km² na území Ruské federace a 1 500 km² na území Ukrajiny (UNSCEAR, online).

Rozložení radioaktivity na zmíněném území (viz obrázek 76) však ukazuje na zajímavou skutečnost, a to, že spád částic vyvržených při takto mimořádně závažné radiační havárii, vykazuje stejné charakteristické rysy distribuce na horizontální ploše, jako tomu je i při mnohem menších událostech, při nichž jsou částice rozmetány do ovzduší při výbuchu (srovnej s obrázkem 65). I v tomto případě lze vystopovat, že nejvíce nebezpečného materiálu bylo deponováno v bezprostředním okolí epicentra výbuchu, přičemž oblasti s vysokými koncentracemi (v tomto případě reprezento-



Obrázek 76: Zamoření zemského povrchu spadem radioaktivního ^{137}Cs po havárii v Černobylu (zdroj: UNSCEAR).

vanými aktivitou ^{137}Cs) bylo možno vysledovat i ve značně větších vzdálenostech od epicentra výbuchu (po směru vanutí větru), kde se vyskytovaly v poměrně ostře ohraničených oblastech. Tato stopa dává tušit, že se oblak při svém výstupu „odrazil“ patrně od vrstvy výškové inverze a opět klesl k zemi, což se několikrát opakovalo. Tato situace připomíná mokřý míč, který se odráží od země a při každém takovém skoku po sobě na zemi zanechá mokrou stopu. Tato skutečnost jen podtrhuje důležitost informací o počasí nad širším regionem a především o vertikálním teplotním gradientu atmosféry (viz obrázek 51), který nám umožňuje identifikovat přítomnost výškových inverzí.

Pro hodnocení kontaminace radionuklidu platí hygienické směrnice, které přihlížejí k tomu, zda jde o expozici celé populace anebo pouze vybrané skupiny pracovníků. Následující tabulka 28 vychází ze směrnice ICRP Publication 30.

Výbuchy aerosolu

Nejpozoruhodnější a zároveň nejnebezpečnější vlastností aerosolů je jejich schopnost mohutně explodovat při určitých koncentracích ve směsi se vzduchem. V průměru nastane v USA každým rokem čtyřicet silných explozí prachu (Hinds, 1999), přičemž přibližně dvacet z těchto explozí jsou exploze obilného prachu v zemědělských objektech. Dohromady mají tyto exploze každý rok za následek několik smrtelných úrazů a škody na majetku ve výši několika milionů dolarů. S ohledem na závažnost

Tabulka 28: Některé hygienické limity vybraných radionuklidů.

Radio-nuklid	Roční limity příjmu vdechováním (Bq)	Koncentrace ve vzduchu (Bq.m ⁻³)	Příklad
³ H	3.10 ⁹	8.10 ⁵	Tritiovaná voda
¹⁴ C	9.10 ⁷	4.10 ⁴	Organické značené sloučeniny s výjimkou CO a CO ₂
²² Na	2.10 ⁷	1.10 ⁴	Všechny sloučeniny Na
²⁴ Na	2.10 ⁸	8.10 ⁴	Všechny sloučeniny Na
³² P	3.10 ⁷	1.10 ⁴	Všechny sloučeniny P s výjimkou fosforečnanů Zn ²⁺ , Sn ³⁺ , Mg ²⁺ , Fe ³⁺ , Bi ³⁺ a lanthanidů
³⁵ S	8.10 ⁷	3.10 ⁴	S, sulfidy Sr, Ba, Ge, Sm, Pb, As, Sb, Bi, Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, Mo, W, sírany Ca, Sr, Ba, Ra, As, Sb, Bi
³⁶ Cl	9.10 ⁷	4.10 ⁴	Chloridy H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr
⁴⁵ Ca	3.10 ⁷	1.10 ⁴	Všechny sloučeniny Ca
⁴⁶ Sc	9.10 ⁶	4.10 ³	Všechny běžné sloučeniny Sc
⁴⁴ Ti	1.10 ⁶	4.10 ²	Oxidy, hydroxidy, karbidy a halogenidy
⁵¹ Cr	2.10 ⁹	7.10 ⁵	Všechny sloučeniny Cr s výjimkou halogenidů, dusičnanů, oxidů a hydroxidů
⁵⁹ Fe	1.10 ⁷	5.10 ³	Všechny běžné sloučeniny Fe s výjimkou oxidů, hydroxidů a halogenidů
⁶⁰ Co	1.10 ⁶	5.10 ²	Oxidy, hydroxidy, halogenidy a dusičnany Co
⁶³ Ni	1.10 ⁸	4.10 ⁴	Oxidy, hydroxidy a karbidy Ni
⁶⁵ Zn	1.10 ⁷	4.10 ³	Všechny běžné sloučeniny Zn
⁷⁴ As	3.10 ⁷	4.10 ³	Všechny běžné sloučeniny As
⁸² Br	2.10 ⁸	6.10 ⁴	Bromidy H, Li, Na, K, Rb, Cs a Fr
⁸⁵ Kr	Limit 5.10 ⁶ Bq v laboratoři o objemu 500 m ³ je dán především vnějším ozářením; 1.10 ⁹ Bq – kůže		
⁸⁹ Sr	3.10 ⁷	1.10 ⁴	Všechny rozpustné sloučeniny Sr s výjimkou SrTiO ₃
⁹⁰ Sr	7.10 ⁵ 8.10 ⁵ – kůže	1.10 ⁴	Dtto
⁹⁰ Y	3.10 ⁷	1.10 ⁴	Všechny sloučeniny Y s výjimkou oxidů a hydroxidů
^{110 m} Ag	7.10 ⁶	3.10 ³	Dusičnany a sulfidy Ag
¹²⁴ Sb	9.10 ⁶	4.10 ³	Oxidy, hydroxidy, halogenidy, sulfidy, sírany a dusičnany Sb

Radio-nuklid	Roční limity příjmu vdechováním (Bq)	Koncentrace ve vzduchu (Bq.m ⁻³)	Příklad
¹³¹ I	2.10 ⁶ 6.10 ⁶ – štítná žláza	7.10 ²	Všechny sloučeniny I
¹³⁷ Cs	6.10 ⁶	2.10 ³	Všechny sloučeniny Cs
¹³³ Ba	3.10 ⁷	1.10 ⁴	Všechny sloučeniny Ba
¹⁴⁰ La	5.10 ⁷	2.10 ⁴	Běžné sloučeniny La s výjimkou oxidů a hydroxidů
¹⁴¹ Ce	3.10 ⁷	1.10 ⁴	Všechny sloučeniny Ce s výjimkou oxidů a hydroxidů
¹⁸⁵ W	2.10 ⁸	1.10 ⁵	Všechny sloučeniny W
¹⁹⁸ Au	1.10 ⁸	6.10 ⁴	Všechny sloučeniny Au s výjimkou halogenidů, dusičnanů, oxidů a hydroxidů
²⁰³ Hg	4.10 ⁷	2.10 ⁴	Oxidy, hydroxidy, halogenidy, dusičnany a sulfidy Hg
²⁰⁴ Tl	8.10 ⁷	3.10 ⁴	Všechny sloučeniny Tl
²¹⁰ Pb	9.10 ³	4	Všechny běžné sloučeniny Pb
²⁰⁷ Bi	1.10 ⁷	5.10 ³	Všechny sloučeniny Bi s výjimkou dusičnanů
²¹⁰ Po	2.10 ⁴	1.10 ¹	Všechny sloučeniny Po s výjimkou oxidů, hydroxidů a dusičnanů
²²⁴ Ra	6.10 ⁴	3.10 ¹	Všechny běžné sloučeniny Ra
²²⁶ Ra	2.10 ⁴	1.10 ¹	Dtto
²³² Th	4.10 ¹	2.10 ⁻²	Všechny sloučeniny Th s výjimkou oxidů a hydroxidů
²³⁵ U	5.10 ⁴ ; 3.10 ⁴	2.10 ¹ 1.10 ¹	UF ₆ , UO ₂ F ₂ , UO ₂ (NO ₃) ₂ UO ₃ , UF ₄ , UCl ₄
²³³ U	4.10 ⁴ ; 3.10 ⁴	2.10 ¹ 1.10 ¹	Dtto
²³⁷ U	1.10 ⁸ 6.10 ⁷	4.10 ⁴ 3.10 ⁴	Dtto
²³⁷ Np	2.10 ²	1.10 ⁻¹	Všechny sloučeniny Np
²³⁹ Pu	2.10 ²	1.10 ⁻¹	Všechny běžné sloučeniny Pu s výjimkou PuO ₂
²⁴¹ Am	2.10 ²	1.10 ⁻¹	Všechny sloučeniny Am

následků takto vzniklých mimořádných událostí se zde stručně o této problematice zmíníme (blíže viz 1. díl této knihy).

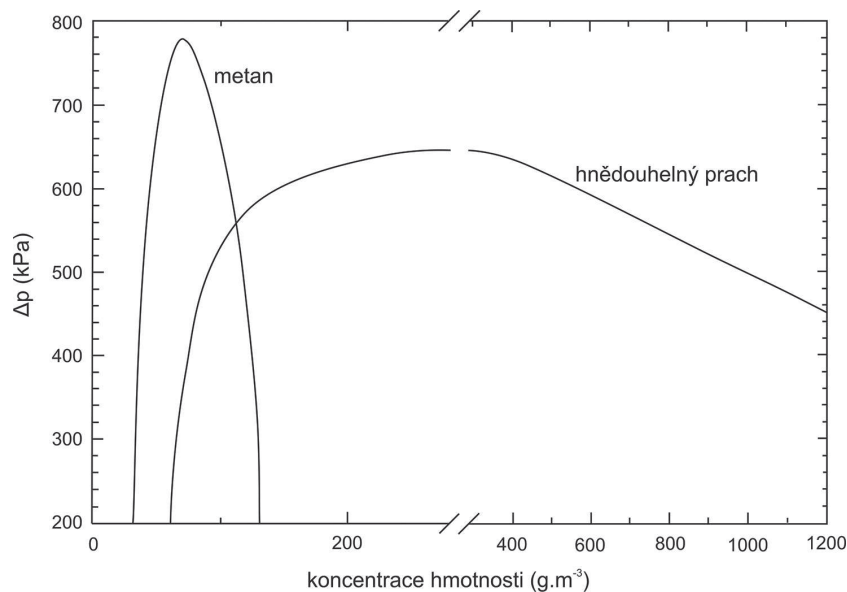
Výbuch aerosolu je složitý jev, a ačkoli jsou k dispozici rozsáhlé experimentální údaje, doposud neexistuje žádná obecně platná teorie explozí prachu. Ačkoli je to méně běžné, může také explodovat mlha z hořlavých kapalin – tj. kapalný aerosol (jedná se o jev podobný VCE), což se ostatně již stalo při havárii tankoviště ropy v anglickém Buncefieldu v roce 2004.

Aby prach v ovzduší vybuchl, musí být jak prach, tak i kyslík přítomny ve vhodné koncentraci a musí být také přítomen zdroj vznícení. Jakýkoli oxidovatelný materiál, včetně všech organických látek a některých anorganických sloučenin a kovů, může hořet, je-li rozprášen v ovzduší v podobě dostatečně malých částic avšak v dostatečně vysoké koncentraci. Minimální koncentrace, při které již dochází k výbuchu aerosolu, je obvykle 20 až 200 g.m⁻³. Je potřeba zdůraznit, že hoření aerosolu nastává důsledkem toho, že se jeho částice působením tepla buďto zcela zplyní, anebo nad jejich povrchy vznikne dostatečně vysoká koncentrace hořlavých plynů, které již mohou být iniciovány.

Proběhne-li hoření v jednom okamžiku, hovoříme o explozi. Při tomto procesu dochází k velkému vývinu tepla, které se do prostoru šíří mnohem pomaleji, než se ve svém zdroji vytváří. Spolu s tím vzniká i velké množství plynných produktů, které se rozpínají do prostoru, což způsobuje skokový nárůst tlaku, který způsobuje takovou vlnu a charakteristické ničivé účinky. Obvykle je v uzavřeném prostoru velká exploze prachu iniciována tlakovou vlnou, která vznikla mnohem menší explozí, která současně rozvířila prach usazený na podlaze, stěnách apod.³¹ Zvláště z hlubinných uhelných dolů je známo, že tento proces může pokračovat, takže nastává domino efekt v podobě série výbuchů. Oproti výbušným plynům představují aerosoly v pracovním prostředí mnohem vážnější nebezpečí, protože v jejich případě ve velkých uzavřených prostorách mnohem snadněji dochází ke vzniku výbušné koncentrace. Stačí pak jakákoli iniciace například způsobená prasknutím některé součásti výrobního zařízení, která je pod tlakem, zahořením fugitivních emisí nebo i běžnou lidskou neopatrností a dochází k výbuchu. Některé exploze prachu mohou být iniciovány dokonce i při malých požárech, kdy použitím hasicího přístroje dochází k rozvíření usazené vrstvy prachu, která následně exploduje (Sadhra a Rampal, 1999).

Některými svými rysy jsou exploze prachu podobné explozím plynu. Například u obou typů exploze existuje dolní výbušná mez (Lower Explosive Limit), tj. minimální koncentrace nutná pro šíření plamene. Na druhé straně plyny mají dobře definovanou horní výbušnou mez, ale pro prach je tato mez definována nedostatečně a lze ji stanovit velmi obtížně. Tato horní mez nastává, když se k jednotlivým částicím

31 Uvádí se, že vrstva prachu silná necelý 1 milimetr již může vytvořit výbušnou koncentraci, nastane-li její úplné zvržení do uzavřeného prostoru (např. průmyslové haly apod.).



Obrázek 77: Rozsah výbušných koncentrací a přetlak (Δp) na čele tlakové vlny v případě exploze metanu a hnědouhelného prachu ve vzduchu.

nedostává dostatečné množství kyslíku, obvykle při koncentraci organického prachu 1500 až 3000 g.m^{-3} . Toto je zobrazeno na obrázku 77.

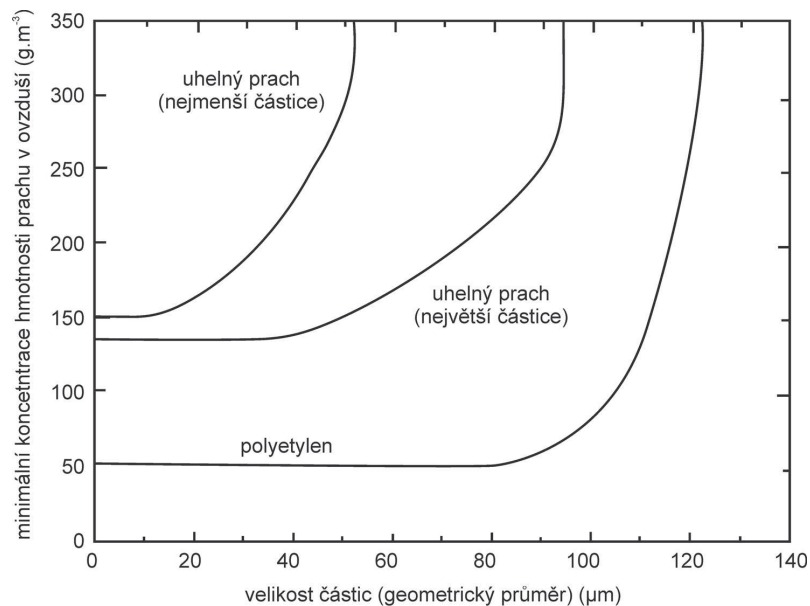
Z obrázku 77 je zjevné, že metan má velmi dobře definovanou minimální a maximální výbušnou koncentraci, ale hnědouhelný prach má dobře definovanou pouze horní mez. Minimální výbušné koncentrace a ostatní vlastnosti reprezentativních druhů prachu jsou uvedeny v tabulce 29. Uvedené údaje pro koncentraci a tlak byly získány v kulové komoře o objemu 1 m^3 nebo o objemu 20 dm^3 . Index nárůstu tlaku (pressure rise index) K_{st} , který se zde uvádí, je mírou síly (prudkosti) exploze. Je konstantní pro daný materiál, distribuci velikosti částic a obsah vlhkosti a je ve vztahu k rychlosti nárůstu tlaku $(dp/dt)_{max}$ podle rovnice 4-55.

$$K_{st} = V_{ch}^{1/3} \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} \quad \text{pro } V_{ch} > 0,002 \text{ m}^3 \quad (4-55)$$

kde V_{ch} je objem explozní komory (m^3).

K_{st} je numericky rovno $(dp/dt)_{max}$ pro komoru o objemu 1 m^3 a je zřejmé, že síla exploze narůstá se zvyšujícími se hodnotami K_{st} i Δp .

Minimální výbušné koncentrace (viz tabulka 29) jsou ale skutečně vysoké a v pracovním ovzduší se normálně nevyskytují. S takto vysokými koncentracemi se ale



Obrázek 78: Závislost minimální koncentrace hmotnosti prachu v ovzduší schopné explodovat na velikosti částic.

můžeme setkávat například v potrubních vedeních, v uzavřených částech výrobních zařízení, v dolech anebo při přechodném zvření způsobeném výbuchem nebo jiným aerodynamickým narušením. Minimální výbušná koncentrace závisí na rozměru částic a na materiálu, jak je uvedeno na obrázku 78. Z něj je vidět, že tvar této křivky je pro různé materiály velmi podobný, ale hodnoty minimální koncentrace, při které může exploze nastat, jsou různé. V oblasti, kde se minimální výbušná koncentrace s rozměrem částic nemění (např. pro polyetylenový prach až do velikosti částic 80 μm), dochází k tomu, že zplynění částic během iniciace proběhne mnohem rychleji, než šíření samotného plamene uvnitř oblaku. Ve střední oblasti (80 až 120 μm pro polyetylenový prach) již nejsou částice zcela zplyněny a hořlavý plyn se vyskytuje pouze těsně nad povrchem jednotlivých částic a tudíž pro zapálení oblaku je potřeba vyšší koncentrace částic v oblaku. Pro částice větší než horní mez (120 μm pro polyetylenový prach) je poměr povrchu k objemu tak nízký, že rychlost zplyňování částic je příliš malá na to, aby se mohl plamen uvnitř oblaku šířit. V takovém případě může nastat pouze jev VCE (vyhoření oblaku), popřípadě k zahoření nedojde vůbec (Hinds, 1999).

Na rozdíl od plynů, nedosahuje vyhoření oblaku aerosolu detonačních podmínek, kdy se rychlost plamene rovná nebo je větší než rychlost zvuku. Hovoříme-li o výbuchu prachu, pak máme na mysli děj nazývaný **deflagrace** (náhlé prudké vznícení), při kterém rychlost šíření plamene dosahuje obvykle jen několik metrů za sekundu, což je výrazně menší rychlost, než jakou se pohybuje čelo tlakové vlny vznikající při explozi plynu (více jak 340 m.s⁻¹). Rychlost šíření plamene uvnitř oblaku aerosolu závisí

na laminární rychlosti hoření (cca $0,2 - 0,3 \text{ m.s}^{-1}$), na homogenitě distribuce částic v inkriminovaném postorou, na rychlosti vývinu hořlavého plynu při zplyňování částic, na intenzitě turbulence v čele šíření plamene a na geometrii prostoru, kde k explozi dochází. Rychlost šíření plamene se zvyšující se koncentrací prachu zvětšuje až na maximální hodnotu a dále se nemění. Je-li exploze prachu omezena na dlouhý tunel otevřený na jednom konci a s vrstvou prachu na jeho stěnách, může expanze plynů urychlit čelo plamene podél potrubí až na nadzvukovou rychlost. Se vzrůstající velikostí částic a při zachování konstantní koncentrace hmotnosti materiálu v oblaku se rychlost plamene postupně snižuje (Hinds, 1999).

Následky exploze prachu záleží na vytvořeném maximálním přetlaku Δp a na rychlosti jeho nárůstu (dp/dt). Příslušné hodnoty pro různé materiály jsou uvedeny v tabulce 29. Pro přírodní organické prachy je maximální přetlak cca 6 až 10 krát větší než tlak před vznícením a nastává při koncentraci hmotnosti rozptýleného materiálu okolo 500 g.m^{-3} . Nárůst tlaku na maximální hodnotu nastane uvnitř uzavřeného zařízení ve zlomku vteřiny sekundy, uvnitř budovy pak v několika sekundách (Hinds, 1999).

Vznícení může být způsobeno jiskrou, plamenem nebo horkým povrchem. Minimální teplota, nutná pro vznícení vybraných prachů je uvedena v tabulce 29. Platí obecné pravidlo, že minimální teplota vznícení se zvyšuje se zvětšující se velikostí částic (míněno ve smyslu geometrického průměru D_g), se zvyšující se relativní vlhkostí

Tabulka 29: *Explozivní charakteristiky vybraných druhů prachu (Hinds, 1999).*

Materiál	Geometrický průměr částic D_g (μm)	Minimální výbušná koncentrace (g.m^{-3})	Maximální přetlak Δp (kPa)	Index nárůstu tlaku K_{st} (kPa.m.s^{-1})	Teplota vznícení ($^{\circ}\text{C}$) ^a
Bavlna	44	100	720	2 400	560
Dřevo (dřevotříska)	43	60	920	10 200	490
Kukuřičný (obilný) škrob	16	60	970	15 800	520
Pšeničné zrní	80	60	930	11 200	–
Bitumenové uhlí	38	125	860	8 600	610
Epoxidová pryskyřice	26	30	790	12 900	510
Polyvinylchlorid	25	125	820	4 200	750
Kyselina askorbová	39	60	900	11 000	460
Organická barviva	< 10	50	11 200	24 900	520
Hliník	22	30	11 500	110 000	500
Zinek	< 10	250	670	12 500	570
Síra	20	30	680	15 100	280

^a Teploty se vztahují k usazené vrstvě prachu.

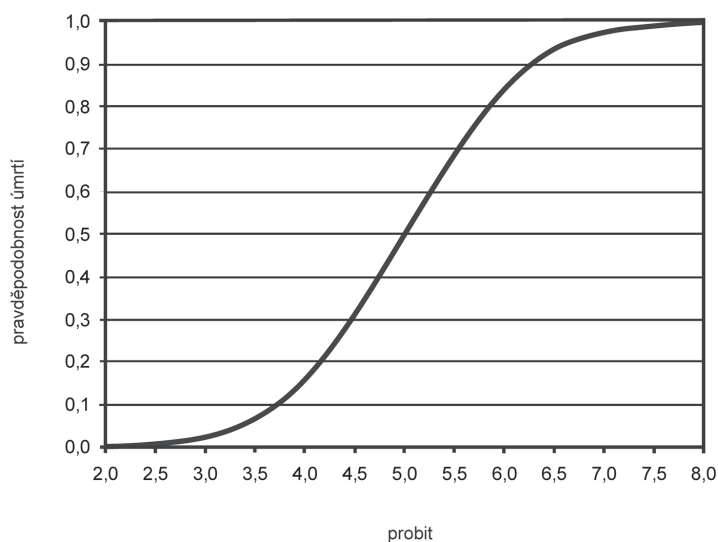
vzduchu a se zvyšujícím se obsahem vlhkosti v samotných částicích rozptýleného aerosolu (prachu). Jiskry vznikající elektrickým zkratem, při tření, broušení nebo svařování mají sice teplotu vyšší než je minimální teplota vznícení, ale jsou omezeny na velmi malý objem, takže ne vždy oblak aerosolu iniciují. Klíčovým parametrem pro vznícení prachu jiskrou je totiž energie, kterou jiskra nese. Minimální energie nutná pro vznícení jiskrou se ale pro různé materiály a velikosti částic pohybuje v širokém rozmezí – od 1 do 4 000 mJ, takže tuto možnost iniciace není radno podceňovat (Hinds, 1999).

4.7 Určení pravděpodobnosti fatálních následků pomocí probitové analýzy

Pro odhad pravděpodobnosti úmrtí člověka následkem toxických účinků, tepelné radiace nebo tlakové vlny podle probitové analýzy navrhl Hurlbert (1984) přepočtovou tabulku s příslušnými probit hodnotami. Vzájemný vztah pravděpodobnosti úmrtí na probit hodnotě má pravidelný sigmoidální charakter podobně jako vztah dávka-účinek (viz obrázek 79).

Pro hodnocení toxických následků jsou koeficienty a_{pr} , b_{pr} , n_{pr} odvozovány od experimentů prováděných na krysách. Pro ilustraci je v tabulce 31 uveden výpočet koncentrací vybraných látek, které způsobí při jednodominutové a 30 minutové expozici smrt 2 % resp. 98 % exponovaných jedinců.

Jednotlivé rovnice pro probitovou analýzu byly uvedeny výše u příslušných typů zraňujících následků.



Obrázek 79: Grafické vyjádření závislosti pravděpodobnosti úmrtí na probit hodnotě.

Tabulka 30: Vztah probit hodnot a pravděpodobnosti úmrtí P.

P	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	–	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
0,1	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
0,2	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
0,3	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
0,4	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
0,5	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
0,6	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
0,7	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
0,8	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
0,9	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33

Tabulka 31: Míry úmrtnosti a jim odpovídající minutové a třicetiminutové letální koncentrace pro krysy exponované vybraným toxickým látkám (Urban, 1995).

Látka	Doba expozice			
	1 minuta		30 minut	
	Úmrtnost			
	2 %	98 %	2 %	98 %
Vypočtená koncentrace (mg.m⁻³)				
Amoniak	27 610	83 619	3564	10 795
Chlor	1 424	13 216	184	1 706
Chlorovodík	32 440	251 993	541	4 200
Fluorovodík	99 678	338 447	1 661	5 641
Formaldehyd	462	2 236	60	289
Fosgen	1 832	5 572	31	93
Kyanovodík	2 238	5 805	128	331
Oxid siřičitý	20 281	142 887	338	2 381

4.8 Softwarové modelovací nástroje

4.8.1 Obecný popis softwarových nástrojů pro modelování dosahů nežádoucích následků

V dnešní době je již většina modelů dostupná v softwarové podobě. Všechny softwarové aplikace jsou postaveny na základních typech modelů úniků a rozptylových modelů, resp. jejich fyzikálních rovnicích. Využití výpočetní techniky může uplatnění daného modelu v praxi významně rozšířit, a to na základě empirických zkušeností přenesených do příslušných algoritmů. Stejně tak ale nemusí být způsob zpracování algoritmů a jejich provázanost správná nebo uživatelské rozhraní přehledné. V takových případech může dojít k paradoxní situaci, kdy jednotlivé SW nástroje generují za stejných podmínek odlišné výstupy.

Podle zkušeností s využíváním jednotlivých modelů lze modely rozdělit na **modely preferované** a **modely doporučené** (SCRAM, 2005, online). Preferované modely jsou takové, které jsou obecně dobře dostupné a v praxi jsou používány nejčastěji. Mají však řadu omezení či nepřesností, o kterých jejich uživatelé často ani neví. Naproti tomu vylepšené modely, které umožňují do výpočtu zahrnout řadu dalších vlivů a jejichž výstupy jsou tedy přesnější, představují zástupce skupiny modelů doporučených. Jejich hlavní nevýhodou je však to, že jsou uživatelsky složité a vyžadují zakoupení uživatelské licence, což vyžaduje nemalé náklady.

Při výběru vhodného rozptylového modelu je nutno přihlížet k několika požadavkům. Modely mohou být pro jednotlivé druhy následků nebo kombinované, tj. umožňují počítat následky požárů, tlakové vlny i dosahů toxických koncentrací. Největší potíže s výběrem a validitou jsou v praxi s modely rozptylu disperzí. Každý model musí být postaven na základních fyzikálních vztazích platných pro rozptyl disperze a poskytovat validní odhady koncentrací sledované látky ve směru větru, které musejí být reprodukovatelné. To však vyžaduje detailní informace o zdroji emise a informace o vnějších podmínkách, tj. o terénu a atmosférických podmínkách. Obecně je ale žádoucí, aby rozsah vstupů byl co možná minimální a model byl uživatelsky co možná nejjednodušší. Všechny modely by měly mít plně zdokumentovaný popis výpočetních algoritmů, v případě SW aplikací pak podrobnou uživatelskou příručku a vhodné uživatelské rozhraní. Každý model by měl projít fází testování v reálných podmínkách nebo alespoň srovnáním jeho výstupů s jiným, již ověřeným modelovacím počítačovým programem.

SW modely se obecně dělí (Macdonald, 2003) na:

- Screeningové modely (Gross screening models).
- Jednoduché modely (Intermediate models).
- Pokročilé modely (Advanced models).
- Specializované modely (Specialized models).

Screeningové a jednoduché modely, které nevyžadují mnoho vstupních údajů, poskytují konzervativní výsledky – tedy mírně nadhodnocují. Tento přístup je odůvodnitelný, protože se jedná o modely určené pro rychlou aplikaci v terénu, kdy s ohledem na časové dispozice a možnosti uživatele není možné získat vstupní data zejména o povětrnostní situaci v požadované kvalitě. Tyto modely se proto musí spokojit pouze s odhady, např. rychlosti větru, vlhkosti, stability atmosféry apod., které provádí uživatel na základě subjektivního pozorování například průvodních jevů (např. pomocí Beaufortovy stupnice). Z praxe je však známo, že zvláště v náročnějších případech uživatel ocení přínos těchto jednoduchých modelů, neboť jejich použitím získá rychlou odpověď na základní otázky, mezi které patří například, zda je nutné uvažovat přesah nebezpečných koncentrací za určitou vzdáleností či nikoli.

Pokročilé modely často požadují kromě výkonného počítače také další externí digitální pracovní stanice. Tyto složité modely totiž vyžadují rozsáhlá meteorologická data a data o koncentraci emisí, která získávají ze sítě externích stanic rozmístěných nad inkriminovanou oblastí. Jedná se tedy o modely určené převážně pro stacionární použití. Tyto modely vyžadují také podrobné informace o terénu (tzv. komplexní terén), tedy rozmístění terénních překážek, jejich velikost a také aktuální informaci o teplotním zvrstvení atmosféry. Nejmodernější modely zahrnují také algoritmy postavené na výpočtech Moninovy-Obuchovovy délky, které slouží k charakterizaci stabilitních poměrů v přízemní vrstvě. Mezi tyto pokročilé modely patří například modely ISC3, AERMOD, ALOHA či CALPUFF vyvinuté americkou U. S. EPA, britský model ADMS, holandský SAVE II, či dánský model OML.

Specializované modely jsou často užívány pro předpověď rozptylu zvláštních materiálů či nebezpečných nákladů, jako jsou bojové chemické látky či biologické zbraně. Modely pro rozptyl těžkého plynu jsou používány také v chemickém průmyslu pro modelování emisních vleček vznikajících jak při běžném provozu, tak především při havarijních únicích. Tyto modely již vyžadují zadávat hodnoty mnoha termodynamických veličin a podrobná meteorologická data. Mezi modely této skupiny patří například SLAB či DEGADIS.

Ačkoli kvalita a rozsah vstupních údajů zvyšují spolehlivost a přesnost výstupů, přesto platí, že komplikované modely jsou citlivější na chybu, která může snadno vzniknout zadáním ne zcela přesné hodnoty některé z požadovaných veličin. Kromě toho, také požadavky na znalosti uživatele jsou u složitých modelů vyšší a snadno se tak může stát, že ne zcela nezkušený uživatel provede chybu při zadávání vstupních dat či výpočtu samotném.

Proto, aby bylo možné různé softwarové modely vzájemně porovnávat, bylo definováno třináct základních posuzovacích kritérií (SCRAM, 2005, online), které je možné využít i před samotným výběrem příslušného SW nástroje. Tyto kritéria jsou:

- Uživatelská přívětivost a vhodně navržené rozhraní (sdělovače, ovladače, barvy apod.).

- Požadavky na hardwarovou podporu.
- Nároky na znalosti a dovednosti uživatele.
- Cena SW nástroje a požadavky na další výdaje (např. přidružené instalace, výcvikové kurzy, manuály apod.).
- Míra využitelnosti nástroje a schopnost modelovat daný typ rozptylu/znečištění.
- Rozsah požadovaných vstupních údajů.
- Schopnost modelu počítat ztrátu znečišťující látky mokrou a suchou depozicí.
- Schopnost modelu zahrnout do výpočtů také příslušné chemické procesy probíhající v atmosféře.
- Schopnost modelu počítat různě dlouhé trvání úniků (tj. jak časově krátké, tak i dlouhodobé úniky).
- Velikost území, pro které model dokáže počítat koncentrace znečišťující látky (jako minimum se udává vzdálenost 1 až 5 km od zdroje).
- Schopnost modelu zahrnout do výpočtu vliv charakteru okolního terénu (tj. stavby, les, volnou krajinu apod.).
- Formát výstupních informací, jejich srozumitelnost a použitelnost pro případné další využití.
- Rating modelu, zkušenosti s jejich použitím apod. (např. odkazy u U. S. EPA, nebo v pracích uznávaných odborníků).

4.8.2 Základní problémy validity softwarových nástrojů

Při používání různých SW nástrojů modelujících rozptyl látek v atmosféře se můžeme setkat s rozdílnými výsledky. Tyto rozdíly obvykle nejsou příliš výrazné, ale dosti často přesahují mez přijatelné statistické odchylky. Většinou je tato skutečnost dána tím, že jednotlivé modely jsou postavené na odlišných algoritmech. Může se ale stát, že i když dva modely využívají tentýž základní matematický algoritmus, přesto poskytují různé výsledky. V takových případech pak lze důvod hledat v různé kalibraci použitého aparátu.

Dvě nejčastěji používané matematické formulace, na kterých jsou SW nástroje postaveny, jsou:

- Gaussovský rozptylový model neboli model pasivního rozptylu.
- Model rozptylu těžkého plynu (dense gas dispersion; heavy gas dispersion).

Bez ohledu na to, zda SW nástroj užívá jeden nebo druhý typ modelu, musí být kalibrován podle skutečných dat. Je proto nutné mít k dispozici experimentální data. Například Gaussovský model rozptylu užívaný v programu ALOHA obsahuje matematické výrazy pro σ_y a σ_z , které vycházejí z experimentálních dat Garyho Briggse z roku 1973 (The CAMEO Software System, 2006). V jeho pojetí představuje σ_y směrodatnou odchylku koncentrace bočního větru ve vzdálenosti x ve směru větru ($x = 0$ je v místě zdroji) a σ_z je směrodatná odchylka vertikální koncentrace ve vzdálenosti x ve směru větru. Tyto hodnoty popisují, jak se výsledný oblak rozšiřuje v čase a také jak se koncentrace plynu uvnitř snižuje naředěním. Briggs vyvinul empirické výrazy pro σ_y a σ_z pro různou atmosférickou stabilitu, a to pomocí experimentů s SO₂ v kansaské prérii prováděných ve vzdálenostech mezi 100 a 10 000 metru od zdroje. Pracoval s tříminutovými integračními dobami pro měření koncentrací SO₂ a drsností povrchu $z_0 = 0,1$ metru. V případě, že drsnost uvažovaného povrchu je větší než 30 cm, pracuje ALOHA (verze 5.2.3 a novější) s jinou sadou hodnot pro σ_z , které taktéž vyvinul Briggs, a to na základě studií v St. Louis v Missouri za využití 60-ti minutových integračních dob. Dnes je známa také celá řada dalších typů datových souborů pro σ_z , které byly publikovány (U. S. Department of Energy, 2004, online).

Obecným problémem je, že nelze provádět experimenty se všemi možnými kombinacemi různých chemikálií, s jejich různými poměry, při různých rychlostech větru, při různé drsnosti povrchu, při různých atmosférických stabilitách a při různé integrační době. Proto je snaha vyvinout z omezené skupiny experimentálních dat takové empirické výrazy nebo algoritmy, které budou schopny poskytovat maximálně pravdivé výsledky i pro podmínky, při kterých model nebyl doposud reálně testován.

4.8.3 Výběr softwarových nástrojů

Ministerstvo životního prostředí ČR vydalo v roce 2007 metodický pokyn, kterým doporučuje způsob pro zpracování dokumentu Analýza a hodnocení rizik závažné havárie, vyplývající z ustanovení zákona č. 59/2006 Sb., o prevenci závažných havárií. Tento dokument, který je určen správním úřadům, právníkům a podnikajícím fyzickým osobám, a kontrolním orgánům, obsahuje také doporučený způsob pro odhad následků reprezentativních scénářů závažných průmyslových havárií na životy a zdraví lidí, hospodářská zvířata, životní prostředí a majetek. V pokynu jsou uvedeny také doporučené softwarové produkty, jejichž výstupy jsou dostatečně validní pro účely zpracování analýzy a hodnocení rizik závažné havárie. Jedná se o programy: ALOHA, WHAZAN, PHAST, SAFETI, RISKAT, EFFECTS, DAMAGE, ROZEX a TEREX. Kromě programu ALOHA, který je volně ke stažení z webových stránek U. S. EPA, jsou všechny ostatní softwarové aplikace licencovanými produkty.

Některé z výše uvedených programů a jejich bližší charakteristiky vztahující se k modelování rozptylu toxických látek v ovzduší jsou detailněji popsány níže.

ALOHA

ALOHA je nástroj určený pro havarijní reakci, tedy pro potřeby zvládnutí rychlého rozvinutí záchranných týmů, jakož i pro havarijní plánování (The CAMEO Software System, 2006). Zahrnuje sílu zdroje, gaussovský model a model rozptylu těžkého plynu. Výstup modelu je jak textový, tak i grafický a obsahuje nákres „stopy, otisku“ oblasti po větru od místa úniku, kde koncentrace může převýšit uživatelem nastavenou prahovou úroveň. ALOHA může dokonce přijímat údaje přenášené z přenosných monitorovacích stanic a může vykreslovat stopu na elektronických mapách v podnikové aplikaci MARPLOT.

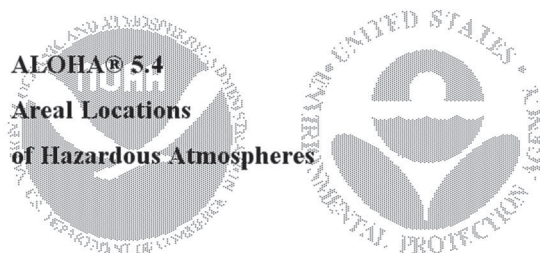
Modely ALOHA jsou validní pouze pro únik a rozptyl čistých, nereagujících chemikálií. Neplatí proto pro členitý terén a průběžné změny rychlosti větru včetně změny jeho horizontální složky. Také nemodeluje disperzi částic a počáteční přetlakový únik plynu z horkého zdroje. Program je validní také jen pro čisté a vzájemně nereagující (uniklé) látky, kterých lze v databázi chemických látek nalézt více jak 1600. Databázový systém CAMEO, jehož součástí program ALOHA je, pak obsahuje informace o více než 6000 čistých chemických látkách (The CAMEO Software System, 2006) (blíže viz kapitola 1.9.3 v 1. díle knihy).

Při prováděných numerických výpočtech program předpokládá konstantní rychlost a směr vanutí větru ve všech horizontálních směrech. ALOHA však dokáže počítat i s účinky vertikálních větrných poryvů jak na gaussovskou disperzi, tak na disperzi těžkých plynů a na odpařování z kaluží. Odraz od povrchu země a od vrstvy nízké atmosférické inverze je také v modelu zohledněn. Z termodynamického hlediska je také počítáno s přenosem tepla z odpařující se kaluže a povrchu země.

Výstup modelu zahrnuje text sumarizující uživatelské vstupy, grafy odhadu koncentrace látky pro středovou linii šíření oblaku a nákres „stopy“ úniku v oblasti po větru, kde koncentrace může převýšit uživatelem nastavenou prahovou hodnotu. Úplný scénář výsledků lze uložit do archivních složek.

Modelování následků prostřednictvím programu ALOHA umožňuje dobře postihnout následky působení toxické látky, resp. dosah zraňujících koncentrací. Model vychází z polohy zdroje rizika, informací o chemických vlastnostech chemické látky, atmosférických podmínkách, charakteru krajiny a množství uniklé látky.

Použití modelu rozptylu v programu ALOHA je určeno pro odhad velikosti a tvaru oblasti o příslušné koncentraci uniklé chemické látky v okruhu do 10 km od zdroje úniku. Doba úniku je omezena maximálně na 1 hodinu. Klíčové hodnoty pro nebezpečí plynoucí z úniku látky jsou její toxicita, hořlavost, tepelné záření nebo přetlak ve skladovacím zásobníku. ALOHA není určena pro modelování úniků radioaktivních látek, kouřových stop nebo dlouhotrvajících přízemních emisí.



Obrázek 80: Úvodní obrazovka po spuštění programu ALOHA, verze 5.4.

Výstupy, které ALOHA generuje, jsou reprezentovány vykreslenými oblastmi, kde bude překročena příslušná limitní koncentrace zadaná na začátku výpočtu, resp. oblastmi ohraničenými příslušnými limitními koncentracemi (tzv. zóny ohrožení). Odhadu zóny ohrožení předchází výběr (zadání) příslušných hodnot koncentrace látky v ovzduší **LOC** (Levels of Concern). ALOHA je vybavena databází standardně užívaných hodnot LOC pro danou látku (IDLH, ERPG, AEGL), ze kterých si může uživatel vybrat, anebo je možné, aby si uživatel zadal konkrétní referenční hodnotu podle svých potřeb.

Zajímají-li nás dopady na obyvatelstvu vystavenému účinkům toxické látky, pak by zadání limitních hodnot mělo vycházet také z uvažovaného scénáře. Pokud ale nemáme žádné zvláštní požadavky, doporučuje se za těchto okolností zadávat toxikologické hodnoty **ERPG**. Maximálně je možné zadat tři hodnoty, které jsou následně vykresleny v grafických výstupech v podobě různě barevných izolinií. Červená křivka představuje nejvyšší koncentrace a tedy i největší nebezpečí. Následují pak oranžová a žlutá. Důležitou informací je, že ALOHA počítá koncentrace znečišťujících látek při zemi, a to prostřednictvím dvou různých modelů rozptylu: (1) gaussovského modelu a (2) modelu těžkého plynu. Po zadání příslušné látky, typu úniku a meteorologických podmínek program podle molekulové hmotnosti látky a podle hodnoty vypočteného Richardsonova čísla Ri následně automaticky vybírá ze zmíněných dvou modelů. Uživatel má však vždy možnost výběr modelu změnit. Toho lze využít zvláště tehdy, když má látka molekulovou hmotnost menší než vzduch, ale uživatel ví, že je skladována v kryogenním stavu. V takovém případě se bude bezprostředně po svém úniku látka chovat jako těžký plyn – příkladem může být amoniak. Pokud nemá program dostatek informací k tomu, aby jednoznačně určil, zda se po úniku těžký plyn vytvoří či nikoli, je výpočet rozptylu prováděn podle gaussovského modelu. V takovém případě ale ALOHA uživatele upozorní na skutečnost, že by výsledek měl být ověřen také prostřednictvím modelu těžkého plynu. Gaussovský model rozptylu je nejlépe použitelný pro malé úniky. Lze jej využít i pro modelování větších úniků, avšak musí být splněno, že molekulová hmotnost uniklé látky a její teplota jsou podobné okolnímu plynnému prostředí, tedy vzduchu. Model rozptylu těžkého plynu je dobře použitelný zejména pro modelování úniků velkého množství látek o molekulové

hmotnosti vyšší jak okolní prostředí a o teplotách nižších, než je teplota okolí. Algoritmy pro modelování těžkých plynů užitých v programu ALOHA jsou postaveny na rovnicích odvozených Spicerem a Bavenou (The CAMEO Software System, 2006), jež byly použity již v modelu DEGADIS. Tento model je obecně uznávaný za vysoce validní, neboť byl ověřen sérií rozsáhlých terénních testů uskutečněných v 80. letech 20. století.

Pro modelování programem ALOHA je po výběru látky a modelu nutné zadat ještě následující fyzikální parametry:

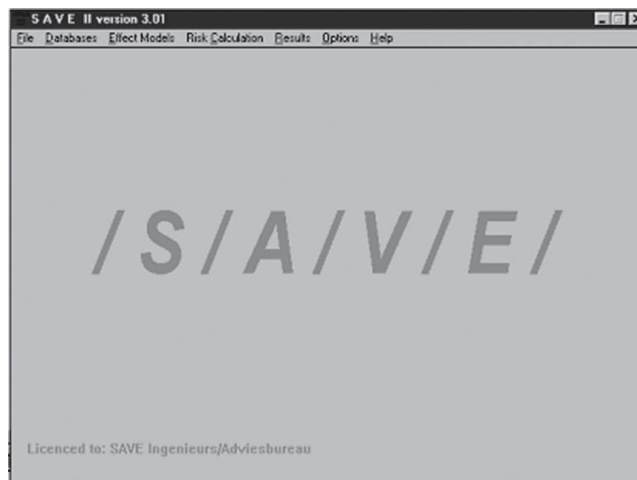
- Celkové množství uniklé látky.
- Střední rychlost větru a směr větru.
- Teplotu vzduchu.
- Koeficient drsnosti povrchu (uživatel může vybírat pomocí zástupných symbolů „volná krajina“, „vodní hladina“ a „město nebo les“, anebo může zadat vlastní specifickou hodnotu).
- Oblačnou pokrývku v desetinách.
- Relativní vlhkost vzduchu.
- Čas, datum a zeměpisnou délku a šířku místa (zeměpisné údaje pro jednotlivá významná města USA jsou uloženy v příložené zeměpisné databázi) – ty jsou požadovány pro výpočet intenzity slunečního záření.
- Atmosférický tlak (počítaný z nadmořské výšky podle zeměpisné databáze), který ovlivňuje některé odhady síly zdroje.

SAVE II

Program SAVE II je numerický program určený pro modelování následků havarijních scénářů. Program umožňuje získávat komplexní výstupy analýzy a hodnocení rizik spojených s nebezpečnými chemickými látkami včetně vykreslení izolinií individuálního rizika a F-N křivky společenského rizika. V tomto ohledu je to nástroj vysoce kvalitní a validní, který rozsahem výstupů převyšuje ostatní srovnatelné produkty. Algoritmus programu je postaven na tzv. holandských přístupech, tj. metodikách CPR 14 a CPR 18 (SAVE Consulting Scientist, 2003). Softwarové řešení programu je provedeno pro práci v prostředí MS Windows, nicméně s operačním systémem MS-DOS je také kompatibilní.

Program umožňuje modelovat chování disperzí v atmosféře prostřednictvím čtyř modulů, které popisují způsob vstupu látky do atmosféry:

- Modul pro rozptyl unikajícího těžkého plynu (Dense/Cold Gas/Vapour).
- Modul pro sprejový rozstřík unikající kapaliny (Spray Release).



Obrázek 81: Úvodní obrazovka po spuštění programu SAVE II, verze 3.01.

- Modul pro vroucí kapalinu (Boiling Liquid).
- Modul pro rozptyl unikajícího neutrálního plynu (Neutral Gas).

Kromě výběru modulu pro výpočet rozptylu disperze musí uživatel zadat také typ úniku látky ze zařízení. Nabízí se pět možností:

- Kontinuální únik následovaný rozptylem toxické látky.
- Jednorázový únik následovaný rozptylem toxické látky.
- Kontinuální únik látky následovaný explozí oblaku.
- Jednorázový únik látky následovaný explozí oblaku.
- Turbulentní tryskový únik látky.

Pro modelování toxického rozptylu je možno použít pouze modul pro rozptyl těžkého plynu anebo modul pro rozptyl neutrálního plynu. Rozptyl neutrálního plynu počítá program podle gaussovského modelu. Do výpočtu je nutno zadat požadovanou třídu stability atmosféry podle Pasquillovy typizace, rychlost větru, koeficient drsnosti povrchu z_0 , rychlost úniku látky ze zařízení ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), počáteční rozměry oblaku L_y a L_z (m) (jedná-li se o objemový zdroj) a efektivní koncentraci ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), jejíž dosah nás zajímá. Pro modelování rozptylu těžkého plynu v atmosféře programem SAVE II je po výběru látky a modelu nutné zadat následující fyzikální parametry:

- Celkové množství uniklé látky.
- Střední rychlost větru.
- Třídu stability atmosféry.

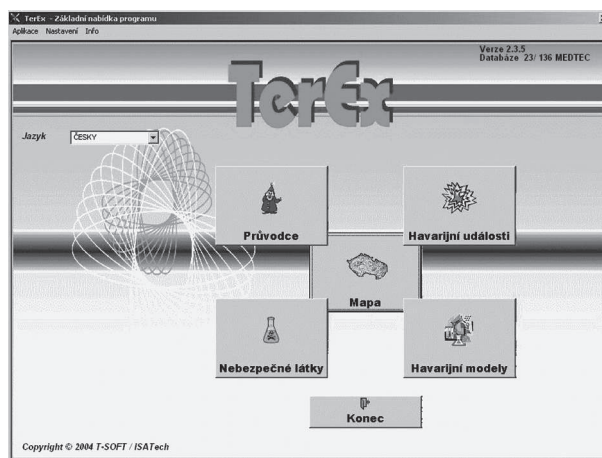
- Teplotu vzduchu.
- Koeficient drsnosti povrchu.
- Rychlost úniku látky ze zařízení.
- Efektivní koncentraci.
- Počáteční hustotu látky.
- Počáteční teplotu při úniku.
- Rychlost unášení.

Kromě toho je potřeba zadat ještě hodnoty dalších veličin, které však nejsou blíže vysvětleny, takže tento krok představuje pro uživatele značnou komplikaci. Novější verze programu vyžadují pro výpočet rozptylu těžkého plynu zadat, zda se jedná o látku těžší než vzduch, anebo o látku nacházející se v kryogenním stavu, přičemž se v tomto případě neuvažuje žádné vypařování látky do atmosféry, ale pouze promíchání vzniklého oblaku s okolním vzduchem. To výrazně usnadňuje práci uživateli, který již nemusí zadávat hodnotu rychlosti unášení. Dále je zohledněno, zda při úniku dochází k rozstříku kapaliny (sprejový efekt) či nikoli. V kladném případě program počítá rychlost výparu uvolněné kapaliny, přičemž uvažuje pouze využití tepla obsaženého v látce samotné a teplo využitelné z okolního vzduchu. Předpokládá se, že se veškerá kapalina vypaří. Program sám již při zadávání dat spočítá, zda využitelné teplo postačí na kompletní vypaření rozstříknutých kapiček. Při uplatnění mžikového odparu program počítá s tím, že vzniklý oblak má teplotu rovnou teplotě varu dané kapaliny. Pro všechny výpočty rozptylu těžkého plynu je nutné, aby počáteční teplota plynu byla nižší než 288 Kelvinů. Výstupem výpočtu obou výše uvedených modelů jsou hodnoty maximální koncentrace látky v předdefinovaných vzdálenostech od zdroje a šířka oblaku v těchto vzdálenostech.

TEREX

TEREX je nástroj určený pro rychlou prognózu dopadů a následků působení nebezpečných látek nebo výbušných systémů, zejména při jejich kategorickém zneužití. Model je vytvořen jako počítačový program s návazností na geografický informační systém (GIS) pro přímé zobrazení výsledků v mapách (T-SOFT, online). Program byl původně určen zejména pro operativní použití jednotkami integrovaného záchranného systému během zásahu, pro rychlé určení rozsahu ohrožení a realizaci následných opatření ochrany obyvatel. Stejně tak je doporučován pro provádění analýzy a hodnocení rizik pro účely havarijního plánování. Program poskytuje výsledky i při nedostatku přesných vstupních informací. Výsledky výpočtu jsou uspořádány poměrně jednoduše a srozumitelně, takže usnadňují rychlé rozhodování. Výsledný havarijní model je možné uložit do databáze „Havarijních událostí“.

Výrobce uvádí, že TEREX splňuje normy NATO pro systém předávání zpráv ve formátu ADatP-3 (T-SOFT, online). Poskytuje také výstup v textovém formátu či



Obrázek 82: Úvodní obrazovka po spuštění programu TEREX, verze 2.3.5.

v XML. Program TEREX disponuje databází obsahující celkem 120 nebezpečných chemických látek (Vrátný a Hejlová, 2008), jejichž fyzikálně-chemické a toxikologické vlastnosti jsou uživateli dostupné. Toho lze s úspěchem využít i při řešení některých specifických problémů anebo jako vstupní parametry do jiných softwarových aplikací, jež nedisponují vlastními databázemi (např. SAVE II). Pro modelování samotné je kromě výběru příslušné látky a požadovaného modelu nutné zadat ještě následující vstupní údaje:

- Celkové množství uniklé látky.
- Střední rychlost větru v přízemní vrstvě.
- Teplotu vzduchu.
- Typ převažujícího povrchu v prostoru potenciálního šíření oblaku (korekce vlivu drsnosti povrchu).
- Oblačnou pokrývku v procentech.
- Dobu vzniku a průběhu havárie (den-noc, roční doba).

Předpověď dopadů a následků je založena na konzervativní prognóze. V praxi to znamená, že výsledky odpovídají takovým podmínkám, při kterých dojde k maximálním možným dopadům a následkům na okolí – tzv. nejhorší varianta. TEREX nabízí uživateli standardní možnosti vyhodnocení základních havarijních situací, v rámci kterých je možno hodnotit také rozptyly plynů v atmosféře. Jedná se o modely typu TOXI, které vyhodnocují dosah a tvar oblaku, které jsou dány zvolenou koncentrací toxické látky. Program umožňuje navolit si příslušný typ úniku látky ze zařízení (PLUME resp. PUFF). U modelu PLUME program umožňuje modelovat:

- Déletrvající únik plynu do oblaku.
- Déletrvající únik vroucí kapaliny s rychlým odparem do oblaku.
- Pomalý odpar kapaliny z louže do oblaku.

V případě modelu PUFF je možno zvolit ze dvou možností:

- Jednorázový únik plynu do oblaku.
- Jednorázový únik vroucí kapaliny s rychlým odparem do oblaku.

Ačkoli do modelu pro rozptyl disperzí vstupuje údaj o atmosférické stabilitě, při vlastním použití programu si uživatel nemůže sám zvolit příslušnou třídu stability, ale může zadat pouze příslušné časové určení prostřednictvím položky „doba vzniku a průběhu havárie“. Program pak automaticky vybere příslušnou třídu atmosférické stability podle vlastních algoritmů, resp. specifických tabulek, založených na Pasquillově-Giffordově typizaci (Vrátný a Hejlová, 2008). Pro modelování rozptylu disperzí taktéž není umožněno zadávat výšku zdroje a model pro dvoufázový výtok látky. Kontinuální únik látky lze modelovat pouze pro zařízení pod tlakem, což nevyhovuje všem situacím, se kterými se můžeme v praxi setkávat.

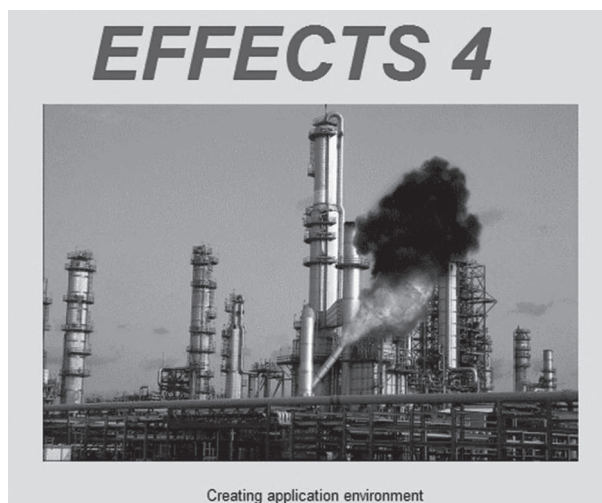
EFFECTS

EFFECTS je program umožňující svým uživatelům odhadnout fyzikální efekty neočekávaných úniků toxických a hořlavých chemických látek. Program sestává z několika modulů umožňujících modelování jednotlivých havarijních situací. Vhodným použitím jednotlivých modulů v kombinaci s databází nebezpečných látek, jež je součástí programu, lze modelovat široké spektrum možných scénářů.

EFFECTS je určen pro provádění výpočtů určených pro odhad havarijních následků pro účely havarijního modelování, mezi které patří například dosahy nebezpečných koncentrací toxických plynů, úroveň tepelné radiace, přetlak na čele tlakové vlny vzniklé při explozi atd. (TNO, 2003). Výsledky jsou generovány buď v textovém, anebo grafickém formátu.

Rozptyl plynů v atmosféře umožňuje program počítat pomocí tří základních modelů:

- Model pro rozptyl neutrálního plynu.
- Model pro rozptyl těžkého plynu.
- Model pro turbulentní únik plynu.



Obrázek 83: Úvodní obrazovka po spuštění programu EFFECTS, verze 4.

Pasivní rozptyl lze modelovat pro různé zdroje úniku. Jedná se o:

- Okamžitý únik látky (do 1 minuty).
- Semi-kontinuální únik látky (od 1 do 10 minut).
- Kontinuální únik (delší jak 10 minut).

Výrobce uvádí, že kontinuální únik je vhodné použít pouze tehdy, je-li místo, pro které modelujeme koncentrační křivku, vzdálené od zdroje úniku méně jak hodnota 1,8-násobku součinu rychlosti větru a doby úniku látky ze zdroje (TNO, 2003). Okamžitý únik naopak je vhodné zadávat tehdy, je-li tento součin větší.

Podobně jako jiné modelovací software i EFFECTS využívá pro výpočet rozptylu disperzí zadání atmosférické stability podle Pasquillovy typizace a rychlosti větru. Použité modely jsou založeny na algoritmech platných pro otevřený, ideálně hladký terén. Jelikož se ale v reálných podmínkách v terénu vyskytují překážky a porost, je nutné korigovat výpočty pomocí koeficientu drsnosti povrchu z_0 . Ten však nemusí uživatel zadávat v podobě číselné hodnoty, ale program mu sám nabízí příslušnou volbu. Model pro rozptyl neutrálního plynu je založený na gaussovském modelu, který je validní pro plyny o hustotě podobné hustotě vzduchu anebo pro plyny, jejichž koncentrace v místě úniku je velmi nízká. Program provádí výpočet koncentrací daného plynu podél osy vanutí větru, tj. maximální koncentrace pro jednotlivé vzdálenosti od zdroje úniku. Rozptyl těžkého plynu je užíván tehdy, má-li plyn vyšší hustotu než vzduch, anebo je uskladněn v kryogenním stavu. Uniká-li plyn pod tlakem, je možné, že na rozdíl od neutrálního plynu se bude šířit i proti směru větru. Modelování rozptylu těžkého plynu je možné provádět pro následující druhy úniku:

- Okamžitý únik.
- Únik plynu nebo disperze odpařováním z kaluže.
- Rozptyl disperze vznikající turbulentním/tryskovým únikem (v horizontálním nebo vertikálním směru).

Výstup z provedeného výpočtu rozptylu zahrnuje:

- Rozměry oblaku (tj. délku a maximální šířku) v zadané výšce.
- Maximální koncentrace plynu v příslušné vzdálenosti.
- Grafické vyjádření zadaných koncentrací látky v podobě horizontálně orientovaných izolinií pro zadanou výšku.
- Grafické vyjádření maximální koncentrace látky, která může být dosažena v různých vzdálenostech od zdroje úniku.

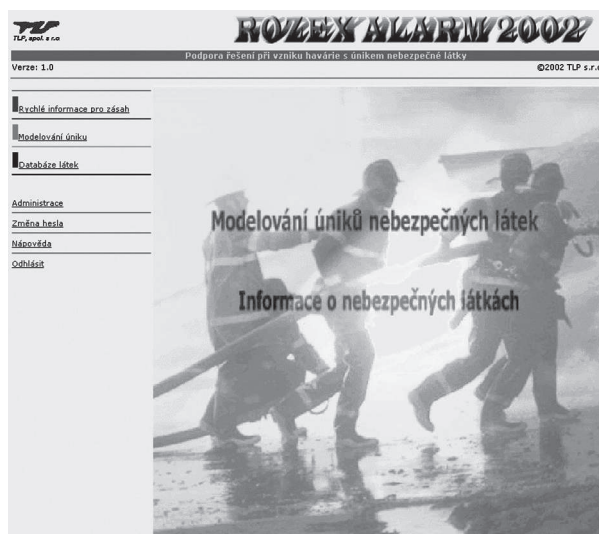
ROZEX Alarm

Program ROZEX Alarm je softwarový nástroj obsahující rozsáhlou databázi přibližně 10 000 látek (TLP, online) a vlastní numerický program ROZEX 2003 . Program je určen podnikatelským subjektům, orgánům státní správy, ale i zásahovým složkám, které se bezprostředně podílejí na likvidaci vzniklé havárie spojené s únikem nebezpečné chemické látky. Kromě toho jej lze využít i k přípravě modelových řešení možných úniků nebezpečných látek a prognózování dopadů havarijních událostí v rámci analýzy a hodnocení rizik.

Program nabízí celkem 19 variant havarijních scénářů spojených s jednorázovým nebo kontinuálním únikem látek ze zařízení s následkem požáru, výbuchu nebo rozptylu toxické látky v atmosféře. Získané výsledky lze následně vyexportovat do mapových podkladů systému GIS. K modelování následků havarijních událostí je zvolen přístup, který je založen na filozofii maximálně možných následků havárie (TLP, 2003). Takový přístup zajišťuje dostatečně přesnou prognózu dopadů havárie, přičemž počet vstupních parametrů pro výpočet je omezen na nezbytné minimum.

Pro modelování programem ROZEX Alarm je po výběru látky a modelu nutné zadat ještě následující fyzikální parametry:

- Skupenství unikající látky.
- Teplotu látky v zařízení při úniku.
- Hodnotu tlaku látky v zařízení.
- Velikost průměru kruhového otvoru, jehož plocha je ekvivalentem otvoru nekruhového o stejné ploše skutečné trhliny na aparátu.



Obrázek 84: Úvodní obrazovka po spuštění programu ROZEX Alarm, verze 1.0.

- Výška sloupce kapaliny v zařízení (vzhledem k umístění únikového otvoru).
- Rychlost větru v přízemní vrstvě atmosféry.
- Třídu atmosférické stability.
- Typ převažujícího povrchu v prostoru potenciálního šíření oblaku (korekce vlivu drsnosti povrchu).
- Hodnotu zvolené koncentrace tvořící okraj toxického oblaku.
- Teplotu vyteklé kapaliny (teplota látky v zařízení před únikem).
- Plochu, kterou zaujme kapalná látka po úniku ze zařízení.
- Množství látky v havarovaném zařízení.

Úniky toxických látek program ROZEX Alarm hodnotí z hlediska dosahu a tvaru vzniklého oblaku při zvolené mezní koncentraci dané látky. Pro modelování rozptylu plynů v atmosféře nabízí program tyto varianty (TLP, 2003):

- Jednorázový únik toxické látky – neutrální plyn: řeší dosah oblaku toxické látky, jejíž molekula je lehčí než vzduch, uniklé v krátkém časovém intervalu.
- Jednorázový únik toxické látky – těžký plyn: řeší dosah oblaku toxické látky, jejíž molekula je těžší než vzduch, uniklé v krátkém časovém intervalu.
- Kontinuální únik toxické látky – neutrální plyn: řeší dosah oblaku toxické látky, jejíž molekula je lehčí než vzduch, unikající o známém množství v delším časovém intervalu.

- Kontinuální únik toxické látky – těžký plyn: řeší dosah oblaku toxické látky, jejíž molekula je těžší než vzduch, unikající o známém množství v delším časovém intervalu.
- Kontinuální únik toxické látky otvorem – neutrální plyn: řeší dosah oblaku toxické látky, jejíž molekula je lehčí než vzduch, unikající otvorem známé velikosti v delším časovém intervalu.
- Kontinuální únik toxické látky otvorem – těžký plyn: řeší dosah oblaku toxické látky, jejíž molekula je těžší než vzduch, unikající otvorem známé velikosti v delším časovém intervalu.

4.8.4 Validita výsledků softwarových nástrojů při modelování scénářů událostí

V USA i v Evropě bylo od počátku 80. let 20. století provedeno mnoho zkoušek v terénu, které měly za cíl ověřit validitu navržených matematických modelů pro rozptyl disperzí. V Evropské unii byly zkoušky prováděny na Thorney Island (v roce 1980) a nedávno pak také dvě rozsáhlé série terénních zkoušek, prováděných paralelně s modelováním ve větrném tunelu. První série obsahovala přes 100 úniků propanu, při druhé pak byl rozptylován amoniak (Sadhra a Rampal, 1999). Na těchto zkouškách se aktivně zapojují především Dánové a Němci, zvláště pak na experimentech s amoniakem, které jsou prováděny v rámci projektu Fladis (Kiša a kol., 2007).

Jelikož se jedná vesměs o data veřejně nedostupná, protože stále probíhá jejich zpracovávání a transponování do modelů typu CFD, zmíníme zde pouze několik praktických poznatků načerpaných testováním samotných softwarových nástrojů, které provedl Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v. v. i. (Skřehot, 2008b) na třech havarijních situacích – únik amoniaku ze strojovny zimního stadionu, únik amoniaku z průmyslového zásobníku a únik amoniaku ze železniční cisterny.

ALOHA

Program ALOHA, který patří mezi pokročilé modely, je považován za komplexní nástroj zaměřený na řešení specifických problémů spojených s rozptylem látek na malé vzdálenosti. Už od samého počátku vývoje programu většina uživatelů pozitivně hodnotila, že ALOHA požaduje pouze takové vstupní údaje, které jsou buď snadno dostupné, anebo které lze odhadnout na základě znalostí o průběhu a charakteru události. Tyto závěry lze jednoznačně potvrdit i na základě zkušeností získaných při použití tohoto nástroje při řešení nejrůznějších analýz rizik. Kromě přívětivého uživatelského rozhraní a dobře zpracované uživatelské příručky lze velmi dobře ohodnotit i kvalitu získaných výstupů. Jednak způsob, jakým jsou výsledky uživateli předloženy, tak i kvalitu vypočtených dat. To lze velmi dobře potvrdit i výpočty pro událost v Bhópálu, pro kterou právě ALOHA poskytla nejpřesnější a nejobsáhlejší výsledky. Z tohoto důvodu jsou často pro hodnocení výsledků z modelování rozptylu

toxických plynů (například amoniaku) použity výstupy z programu ALOHA jako referenční hodnoty. Určitou nevýhodou programu ALOHA je z uživatelského hlediska pouze to, že volně přístupná verze neumožňuje provádět export grafických výstupů do mapového podkladu a dále, že grafické výstupy nelze ukládat ve formátu jpg – veškeré výstupy je možné buďto exportovat přímo do tisku (bez možnosti uložení), anebo uživatel musí provést tisk z obrazovky (Print Screen).

SAVE II

SAVE II patří do skupiny pokročilých modelů a jeho algoritmy vycházejí z tzv. holandských přístupů. Ovšem použití tohoto programu značně komplikuje řada nedostatků. Mezi hlavní nedostatek patří absence kvalitní uživatelské příručky nebo nápovědy, kde by byly vysvětleny jednotlivé vstupní parametry a dále program není vybaven vlastní databází chemických látek. Program je tedy „prázdná schránka“, kterou není jednoduché naplnit, neboť ani na internetu nelze na tento software nalézt žádné ohlasy nebo nápovědu.

Modelování rozptylu amoniak, které bylo tímto programem důkladně provedeno, pro vybrané havarijní události lze shrnout následovně. V případě události spojené s únikem amoniaku z chladicího zařízení zimního stadiónu program SAVE II výrazně nadhodnocoval dosahy referenčních koncentrací, a to nejen s ohledem k výsledkům z programu ALOHA, ale také ke všem ostatním použitým programům, vyjma programu EFFECT. V případě události spojené s únikem amoniaku ze železniční cisterny, program sice dosahy koncentrací oproti ALOHA mírně podhodnotil (v průměru o 15 %), ale tento rozdíl není z hlediska havarijního modelování příliš významný. V případě modelování rozptylu amoniaku při jeho úniku z průmyslového zásobníku pak pouze výstupy z programu SAVE II se s výstupy z ALOHA poměrně dobře shodovaly. Pro malé vzdálenosti program hodnoty koncentrací mírně nadhodnocoval a pro vzdálenosti nad 5 000 metrů naopak mírně podhodnocoval. V průměru se výsledky modelování programem SAVE II od výsledků z programu ALOHA rozcházejí o 17 %, což je z hlediska havarijního modelování akceptovatelný rozdíl.

Práce s programem vyžaduje zadávat množství vstupních údajů, které ale není v praxi jednoduché získat. Také skutečnost, že program SAVE II neobsahuje originální databázi ani nejběžněji se vyskytujících chemických látek, práci s ním značně komplikuje. Zásadním nedostatkem je zadávání vstupních parametrů, které nejsou ani v uživatelském manuálu jednoznačně vysvětleny. Jedná se například o „počáteční teplotu při úniku“ (Initial Release Temp.), kde není zřejmé, zda jde o teplotu unikající látky nebo o teplotu okolního vzduchu vstupujícího do vznikajícího oblaku anebo o veličinu „rychlost unášení“ (Entrainment Rate). Tento parametr lze chápat patrně jako množství vzduchu vstupujícího do tohoto oblaku za jednotku času. Jelikož v případě úniku kapalného amoniaku činí jeho okamžitý odpar 20 % z jeho veškerého uniklého množství, byly experimentálně do programu zadávány hodnoty odpovídající pětinásobku únikové rychlosti při uvažovaném nasycení vzduchu amoniakem.

Opakovanými výpočty však bylo prokázáno, že tato veličina příliš výsledek modelování neovlivňuje, takže její konkrétní hodnota není pro finální výsledek modelování zřejmě tak důležitá.

Jedinou předností programu SAVE II oproti jiným programům je to, že v textovém výstupu je uveden údaj o vzdálenosti, kde dochází k naředění oblaku na objemovou koncentraci uniklé látky 1 %, od které se disperze rozptyluje pozitivně vzlínavým způsobem podle gaussovského modelu.

EFFECTS

Program EFFECTS patří také do skupiny pokročilých modelů a ze všech programů použitých v této práci jej lze označit za „nejpropracovanější“ modelovací nástroj. Tato skutečnost ovšem koreluje s náročností jeho použití. Před modelováním je potřeba si důkladně prostudovat uživatelský manuál a také strávit mnoho času zkušebními aplikacemi, než uživatel dostatečně pochopí práci s programem a jeho funkční možnosti. Práce s programem je proto poměrně náročná i z časového hlediska.

EFFECTS umožňuje získávat výstupy z provedeného modelování rozptylu disperzí v atmosféře jak v textové, tak i v grafické podobě a tyto umožňuje vynášet současně do jednoho obrázku. Výstupy lze průběžně ukládat jako textové soubory, tak i jako obrázky ve formátu jpg.

Výsledky modelování rozptylu amoniaku pro vybrané havarijní události získané programem EFFECTS nelze jednoznačně interpretovat. Například dosahy referenčních koncentrací při modelování rozptylu amoniaku po úniku z chladicího zařízení zimního stadionu nebyl program schopen spočítat a ve výstupech uváděl hlášení o tom, že zadaná koncentrace se v ovzduší nebude vyskytovat. Podobně nejednoznačné jsou i výsledky v ostatních dvou modelových případech. Naproti tomu výsledky z modelování události v Bhópálu se velmi dobře shodují jak s reálnými daty, tak i s výstupy z programu ALOHA. Při zhodnocení těchto skutečností se nabízí myšlenka, že program EFFECTS zřejmě nedokáže vhodným způsobem počítat vysoké koncentrace, tj. koncentrace v malých vzdálenostech od zdroje úniku (ve výsledcích byly výrazně nízké hodnoty ve vzdálenosti 100 metrů od místa úniku).

TEREX

Program TEREX je nástroj ze skupiny jednoduchých modelů pro určení bezpečných zón při havarijním zásahu. Jeho uživatelské rozhraní i charakter výstupů jsou velmi jednoduché, což může za určitých okolností být určitou výhodou. Na rozdíl například od programu EFFECTS, kde se uživatel bez důkladného prostudování uživatelského manuálu neobejde, TEREX nevyžaduje hluboké znalosti uživatele. Program je velmi jednoduchý a uživatel je jednotlivými dialogovými okny veden ke zdárnému výsledku. Pro nápovědu lze navíc využít funkční klávesy „Průvodce“. Tuto možnost ocení nejvíce uživatel, který není specialistou v oboru chemie či havarijního

plánování. Princip řešení za použití funkce „Průvodce“ je postaven na realizaci tří postupných kroků, které průběžně umožňují volit nebo vkládat požadovaná data tak, aby byl vytvořen požadovaný havarijní model.

Hodnocení charakteru výstupů lze shrnout následovně. Kromě výstupu v podobě graficky nepřehledně ztvárněného hlášení program neposkytuje mnoho informací potřebných pro modelování rozptylu látek v atmosféře. Výstup sestává z hlášení „Ohrožení osob toxickou látkou“, které obsahuje informaci „Nezbytná evakuace osob“ a „Doporučený průzkum toxické koncentrace do vzdálenosti od místa úniku“. Z uživatelského manuálu je možné získat informaci, že vzdálenost uváděná ve výstupu jako tzv. „Doporučený průzkum toxické koncentrace“ koresponduje s dosahem koncentrace odpovídající hodnotě IDLH a v grafickém výstupu je tato vzdálenost vykreslena modrým kruhem. Vzdálenost uváděná v textovém výstupu jako tzv. „Nezbytná evakuace osob“ a v grafickém výstupu zobrazená pak jako sytá modrá výseč, není blíže specifikována a ani v uživatelském manuálu není uvedeno, jakou koncentraci látky v ovzduší tato vzdálenost reprezentuje.

Nedostatkem programu je kromě absence těchto základních informací také to, že neumožňuje počítat dosahy referenčních koncentrací, resp. uživatel nemá možnost tyto koncentrace do programu zadávat. Potřebuje-li uživatel provést tyto výpočty, nezbyvá mu, než provést manuální odečet požadovaných hodnot z grafického výstupu v okně „Nezbytná evakuace“. Tento výstup je ale proveden z uživatelského hlediska ne příliš vhodně. Kromě toho, že příslušné okno nelze zvětšit a graf je díky tomu dosti nečitelný, komplikuje odečet především to, že na ose x nejsou vynášeny vzdálenosti pomocí pevně definovaných rozstupů kupříkladu po 500 metrech, nýbrž pomocí hodnot vygenerovaných při každém výpočtu individuálně. Odečte-li uživatel hodnotu koncentrace v dané vzdálenosti od zdroje, musí si následně manuálně nebo pomocí programu ALOHA provést přepočet na požadované jednotky, protože program TEREX ve výstupech uvádí koncentrace pouze v jednotkách $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Kromě tohoto nedostatku lze programu vytknout dále to, že neumožňuje ani v rozšířeném uživatelském zadání vstupních dat zadávat třídu stability atmosféry, ale pouze výběr některé z variant, mezi které patří např. „léto-den“ apod. Je pochopitelné, že pro záchrannáře, který požaduje informaci o dosahu nebezpečných koncentrací v co možná nejkratší době, je tato varianta výhodnější, avšak pro odborníka představuje absence možnosti provádět vlastní volbu stability atmosféry poměrně velký nedostatek.

Kromě zmíněných nedostatků má program TEREX i řadu předností, které mohou být oproti ostatním programům jeho výhodou. Tou hlavní je vlastní databáze nejčastěji používaných chemických látek. Tato databáze sice není tak bohatá jako v případě programu ALOHA nebo ROZEX Alarm, ale pro účely, pro které je program určen, plně postačuje. Ke každé látce lze navíc po kliknutí na tlačítko „Vlastnosti“ zjistit řadu cenných informací. Jedná se o:

- Základní informace o dané látce (kódy, R-věty, S-věty, symboly nebezpečnosti apod.).

- Fyzikálně-chemické vlastnosti látky.
- Havarijní a toxické vlastnosti látky.
- Možné havarijní modely, které lze pro danou látku použít.
- Vlastní popis dané látky (např. zraňující projevy, první pomoc při zasažení danou látkou, hasební prostředky, způsob ochrany apod.).

Tyto informace jistě ocení především záchranáři při vlastním havarijním zásahu. Jistě je dobré zmínit, že informace o fyzikálně-chemických parametrech látek, lze využít i při modelování pomocí jiných programů, které nemají vlastní databázi chemických látek.

Kvalitu numerických výsledků získaných pomocí programu TEREX při modelování vybraných událostí lze vyhodnotit poměrně dobře. Při srovnání výsledků s výsledky z programu ALOHA se v případě kontinuálních úniků (únik z chladicího zařízení zimního stadionu a únik ze železniční cisterny) výsledky programu TEREX velmi dobře shodovaly s výsledky z ALOHA. V obou těchto případech TEREX ve shodě s původním předpokladem výsledky mírně nadhodnocoval – o 22 % v případě úniku z chladicího zařízení zimního stadionu a 4 % v případě úniku ze železniční cisterny. V případě úniku amoniaku z velkého průmyslového zásobníku se však výsledky těchto dvou programů rozcházely poměrně značně.

Nástroj umožňuje získávat výstupy z provedeného modelování rozptylu disperzí v atmosféře v textové i grafické podobě, avšak ani jeden z těchto výstupů není možné ukládat, ani exportovat do textového souboru. Jediná možnost uložení výstupů je pomocí sejmutí obrazovky pomocí funkce Print Screen.

ROZEX Alarm

Český program ROZEX Alarm patří podobně jako program TEREX do skupiny jednoduchých modelů určených především k odhadům dosahu zraňujících koncentrací, a nelze na něj tedy pohlížet jako na vysoce sofistikovaný program, jakými jsou např. EFFECTS nebo SAVE II. Na rozdíl od programu TEREX však poskytuje výstup pouze v podobě strukturované tabulky generované ve formátu pdf. Použití programu je však snadné a možnost provedení chybného zadání vstupních dat je proto téměř vyloučena. Pro účely modelování rozptylu látek v atmosféře však tento program neposkytuje mnoho výstupů, takže není příliš vhodný pro provádění náročnějších modelovacích studií.

Numerické výsledky získané při modelování vybraných událostí programem ROZEX Alarm se s výsledky z programu ALOHA poměrně značně rozcházejí. Ve dvou ze tří modelových událostí byly výsledky příliš odlišné oproti výsledkům z programu ALOHA. Jednalo se o událost s únikem amoniaku ze železniční cisterny a událost s únikem amoniaku z velkého průmyslového zásobníku, kde dosahy všech

referenčních koncentrací podle programu ROZEX Alarm byly výrazně nižší, než jak je spočítal program ALOHA. Pouze v případě modelování rozptylu amoniaku při kontinuálním úniku malého množství látky, tj. v případě úniku z chladicího zařízení zimního stadiónu, byly výsledky ve velmi dobré shodě s výsledky z ALOHA. Průměrná hodnota rozdílu v dosahu referenčních koncentrací činila v tomto případě jen 8 %.

4.8.5 Zkušenosti s používáním vybraných softwarových nástrojů

Modelování konkrétní situace pomocí programu ALOHA je prvním krokem k vytvoření poněkud přesnější představy o celkovém průběhu a následcích případné havárie. Je potřeba vzít ale v úvahu, že program ALOHA je pro řadu aplikací nevhodně podmíněn, proto mají z dnešního pohledu výsledky jeho modelování pouze orientační význam zejména kvůli velké nepřesnosti. Naproti tomu program EFFECTS je schopen realistického modelu havarijní situace. Problémem ale zůstává správné zadání vstupních hodnot, protože program jako takový je uživatelsky značně složitý. Nicméně modelování tímto programem je v současné době patrně jediným dostupným a skutečně reprezentativním postupem pro zhodnocení přijatelnosti společenského rizika. Programy ALOHA, EFFECTS, TEREX a ROZEX Alarm lze použít pro předběžné hrubé výsledky. Jimi poskytované údaje o nebezpečných zónách, tj. dosazích zraňujících účinků, jsou konzervativní a s mnoha nejistotami, zvláště v případech přítomnosti překážek (např. městské prostředí). Výsledky vzájemného srovnání získaných nebezpečných zón pomocí programů ALOHA a EFFECTS lze hodnotit jako podobné, ve stejném řádu (pouze hodnoty pro propan vykazují výraznější rozdíly). U většiny výpočtů se výrazně liší stanovené rychlosti úniků a jejich trvání, v některých případech 6 až 8 krát! Ve většině případů udává program EFFECTS oproti programu ALOHA kratší vzdálenosti dosahů smrtelných účinků. Z pohledu hodnocení rizik je tak program ALOHA více konzervativní (Skřehot, 2008b).

4.9 Havárie a jejich vyšetřování

4.9.1 Statistika havárií

V knize Franka Leese, která vyšla v roce 1996 a která je právem považována za „bibli bezpečnostních inženýrů“, byla publikována zajímavá statistika související s mimořádnými událostmi, zvláště pak průmyslovými haváriemi. V tabulkách 32, 33 a 34 jsou shrnuty nejzajímavější data z této knihy, která mohou dobře demonstrovat, u jakých typů provozů se nejčastěji tyto nehody stávají, o jaké se jedná úniky anebo také, v jaké denní době k nim dochází.

Tabulka 32: Statistika největších požárů v britských chemických závodech a rafinériích mezi lety 1971 až 1973 podle Fire Protection Association (Lees, 1996).

Typy provozů	Podíl (%)
Rafinérie	48
Produkty krakování (petrochemikále)	20
General properties	10
Skladování	8
Výrobní podniky na pobřeží a v přístavech	3
Kamenouhelné doly	2
Typ závodu (podniku)	
Zásobníky a potrubí	23
Rafinérie	22
Výroba nafty a benzínu	13
Monomery a polymery	6
Petrochemikálie (produkty krakování)	6
Hnojiva	5
Produkty těžby uhlí	3
Výroba plynu	3
Ropné produkty	3
Kyseliny, glykoly	3
Aromatické látky	2
Alkoholy, ketony atd.	1
Parafíny	0
Typ výrobní technologie	
Pec nebo ohřívač	10
Potrubí	9
Zásobník nespecifikovaný	7
Vrtná souprava	5
Čerpadlo	5
Kompresor	5
Kotel	5
Výměník tepla	4
Zásobník s kónickým dnem	4
Destilační kolona	3
Skladiště	3

Procesní zásobník	3
Nádrže s pohyblivou střechou	3
Elektrická stanice	3
Reaktor	3
Reformátor	2
Dopravník	2
Stoupací trubka	2
Molo, hráz nebo bójje	2
Generátor plynové turbíny	< 2
Velín, operační středisko	< 2
Násypník	< 2
Transformátor	< 2
Světlice, šachta vysoké pece, vzduchový chladič, odstředivka, filtr, vytlačovací lis, sušička, chlazení, chladicí věž, spalovací pec, elektrický motor, měřiče, měřicí analyzátor, ventil, jeřáb, API oddělovač, vodík, ložná plocha – nádrže, ložná plocha – silniční vozidla, cisternový vůz, hadice, laboratoř, kancelář, počítač	< 1
Stav a fáze provozu podniku	
Bežný provoz	50
Začátek provozu podniku	15
Podnik v době údržby	10
Plnění nádrží nebo zásobníků	6
Doba zásahů do technologie	5
Podnik v době odstavení či zastavení práce	3
Zrušení výroby	2
Vyprazdňování nádrží nebo zásobníků	2
Stavební práce	< 2
Opětovné najetí provozu	< 2
Odstavení a uzavření podniku	< 1
Kotvení a odplouvání lodí	< 1
Úvedení technologie do provozu	< 1
Míchání	< 1
Těžba	< 1
Druh úniku nebo okolnosti, které k němu vedly	
Oheň	33
Exploze	12
Exploze a oheň	10
Únik způsobený větrem, bouřkou nebo záplavou	10

Vytrysknutí látky	5
Únik pevné fáze	5
Únik při srážce lodí	5
Znečištění, zamoření	4
Selhání stroje	4
Ztráta součástky	3
Požár elektrických kabelů	3
Porušení stavební konstrukce	< 1
Příčina úniku	
Chyba obsluhy	17
Vítr, bouře a povodeň	16
Porucha potrubí nebo sváru	7
Porucha trubek	7
Porucha stroje	7
Elektrický zkrat	4
Netěsnost ventilu	4
Netěsnost okraje potrubí	4
Selhání měřicí techniky	4
Srážka vozidla	3
Koroze	3
Selhání uzávěru	3
Špatné osvětlení	< 2
Poškození ukotvení/trupu o přístavní hráz	< 2
Výpadek napájení	< 2
Přetečení zásobníku	< 2
Zablokování ventilu zásobníku	< 2
Nárůst tlaku	< 2
Sabotáž	< 2
Prasknutí nádrže	< 2
Netěsnost kompresoru	< 2
Ujetí reakce	< 2
Ztráta tekutiny v cirkulaci	< 2
Chyba úpravy/designu; eroze; výchozí produkt; přetečení nádoby; hoření vzájemná kontaminace; vodní hráz; nedostatečné proplachování vzduchem; selhání mazání; selhání vzduchového zařízení; samovznětlivý sulfid železa; otevření rozbitého měřidla; korodované elektrické kontakty; působení plamenů; požár unikajícího roztoku; úmyslná škoda/sabotáž	< 1

Hořlavé materiály	
Ropné produkty	41
Produkty krakování	31
Výroba plynu	13
Kyseliny, glykoly, aditiva	6
Monomery a polymery	3
Alkoholy, ketony, étery, aromatické látky, parafíny, hnojiva, produkty těžby uhlí	< 1
Zdroje iniciace	
Nehořlavé látky	35
Pece, kotle	12
Horké povrchy	12
Samovznícení	7
Elektrický oblouk	3
Chyba obsluhy	3
Jiná elektrická zařízení	3
Sváření	3
Tření	< 3
Statická elektřina	< 3
Samovznětlivá látka; spontánní vznícení; zápalky; jiskra; elektromotor; bojler; světlice; výbušná zařízení; vozidlo; blesk; šíření ohně; žhavé uhlí	< 2

Tabulka 33: Statistika počtu požárů ve vybraném podniku vznikajících během dne (Lees, 1996).

Denní doba (h)	Počet požárů	Denní doba	Počet požárů
0.00–1.00	4	12.00–13.00	1
1.00–2.00	0	13.00–14.00	3
2.00–3.00	4	14.00–15.00	2
3.00–4.00	2	15.00–16.00	5
4.00–5.00	3	16.00–17.00	3
5.00–6.00	2	17.00–18.00	6
6.00–7.00	1	18.00–19.00	5
7.00–8.00	4	19.00–20.00	2
8.00–9.00	3	20.00–21.00	5
9.00–10.00	3	21.00–22.00	3
10.00–11.00	3	22.00–23.00	0
11.00–12.00	3	23.00–24.00	2

Tabulka 34: Trendy v počtu závažných havárií ve Velké Británii, Evropě a celosvětově podle Kellera a Wilsona (1991).

Počet smrtelných úrazů	1970–1979		1980–1987		1970–1987		
	Evropa	Celo-světově	Evropa	Celo-světově	Velká Británie	Evropa	Celo-světově
Počet úrazů							
5 až 10	12	53	6	40	3	18	93
10 až 100	10	45	5	30	2	15	75
100 až 10 ³	2	3	0	2	0	2	5
10 ³ až 10 ⁴	0	0	0	1	0	0	1
Četnost úrazů (úraz/rok)							
5 až 10	1,2	5,3	0,75	5			
10 až 100	1	4,5	0,63	3,8			
100 až 10 ³	0,2	0,3	0	0,25			
10 ³ až 10 ⁴	0	0	0	0,13			

4.9.2 Finanční ztráty vzniklé následkem mimořádné události

Jelikož poškození zdraví nebo smrt způsobená mimořádnou událostí může vést i k finančním ztrátám, lze míru příslušného rizika určitým relativním způsobem ocenit také peněžními jednotkami. Obecný vzorec pro tento způsob ocenění rizik neexistuje, ale pro určitý odhad lze využít odborné literatury (Salvendy, 2006; Paleček, 2000; Fuchs, 2008) vycházející z poznatků o náhradách vyplacených pojišťovnami, vládami (například šlo-li o vyplacení odškodnění pozůstalým po příslušnících ozbrojených složek nebo hasičů) nebo z empiricky zjištěných statistických dat z různých zemí.

Cena lidského života

Existuje mnoho přístupů pro vyjádření ceny ztraceného lidského života, avšak žádný z nich není uniformně používán. Jedná se totiž o velmi citlivou otázku, která je v současné společnosti stále ještě určitým tabu. Úmrtí člověka je však možné považovat za ztrátu ať již přímou (ztráta pracovního výkonu, nebo produkce společnosti), tak nepřímou (ztráta zdroje intelektuálního, uměleckého či společenského potenciálu, ztráta blízké osoby). Vyčíslení této finanční ztráty lze provést pouze pro první z uvedených ztrát, druhá pak představuje ztrátu nevyčíslitelnou.

Ocenění lidského života je vždy výsledkem určitého společenského kompromisu, který může provádět pouze soud, jež určuje výši odškodnění pozůstalým. Také stát

často vstupuje do podobných situací, zejména v případě, kdy řeší odškodnění za úmrtí osob pracujících ve zvláštním pracovním režimu, jako jsou například příslušníci ozbrojených složek, hasičů apod.

Výše odškodnění, kterou společnost je ochotna uznat, se odvíjí od materiálních a duchovních hodnot daného národa, resp. na hospodářské a kulturní úrovni daného státu či na síle soudní moci a vymahatelnosti práva v daném státě. Proto se nelze pozastavovat nad tím, že cena lidského života pracujícího člověka v rozvojových zemích je mizivá, a naproti tomu v rozvinutých západních zemích není výjimkou, že soud pozůstalým (samozřejmě v souvislosti s okolnostmi, za kterých k úmrtí pracovníka došlo) přizná odškodnění v řádech milionů USD/Euro. Kupříkladu v USA byla průměrná ztráta vzniklá následkem úmrtí jednoho člověka na rakovinu, jež byla vyvolaná profesionální expozicí nebezpečným chemickým látkám, vyčíslena na 2,14 milionů USD (Skřehot a Jansová, 2007; European Agency for Safety and Health at Work, 2005 online).

Ačkoli je Česká republika členem Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj (OECD), která je společenstvím cca 30 nejrozvinutějších zemí světa, přesto v oceňování ztracených lidských životů patříme stále spíše mezi rozvojové státy. Z proběhlých kauz jsme svědky značného rozptylu hodnot uznaných finančních náhrad (od několika desítek tisíc Kč až k částkám v řádech milionů Kč).

V managementu rizik je však při hodnocení rizik nutné využívat určité orientační hodnoty, které vycházejí ze statistik a empirických zkušeností. Existuje však několik přístupů. Podle Salvendyho (Salvendy, 2006) lze odvozovat cenu lidského života podle matice pro určování rizik, kde jsou vyčísleny orientační náklady vznikající jako následek pracovního úrazu nebo provozní havárie s následkem ztráty na majetku (viz tabulka 35).

Pro relativní vyjádření závažnosti poškození zdraví a ceny vlastního lidského života lze využít přístupy určené pro hodnocení (pracovních) rizik, protože ty se opírají o statisticky ověřená data vycházející z výpočtu nákladů a ztrát vzniklých zaměstnavateli v souvislosti se vzniklým pracovním úrazem. Jelikož ale různí autoři uvádějí různé hodnoty, jsou v tabulce 36 prezentovány tři různé kvantitativní přístupy (dva navržené podle podmínek v České republice a jeden podle podmínek v západní Evropě).

Průměrné náklady a ztráty na jeden pracovní úraz

Náklady a ztráty způsobené pracovními úrazy jsou po poškození lidského zdraví či ztráty života dalším významným následkem této nežádoucí události. Jejich vyčíslení a struktura nám přibližuje porovnání úrovně bezpečnosti v různých oblastech (regionech, odvětvových ekonomických činnostech, skupinách pojištěnců, rocích, družích událostí apod.). Jde především o tyto ukazatele:

Tabulka 35: Stanovení míry rizika maticovou metodou podle (Salvendy, 2006).

Zranění osob	Poškození majetku	Četnost následků				
		velmi zřídka	zřídka	někdy	často	velmi často
		jednou za 5 let	jednou za rok	jednou měsíčně	jednou týdně	více než jednou týdně
Nehoda s ošetřením první pomocí	< 5 tis. €	0	0,01	0,1	0,5	1
Nehoda nevyžadující absenci v práci	< 50 tis. €	0,02	0,1	1	5	10
Nehoda vyžadující absenci v práci	< 100 tis. €	0,2	1	10	50	100
Nehoda s následkem smrti	< 1 mil. €	2	10	100	500	1000
Několik nehod najednou	> 1 mil. €	20	100	1000	5000	10000

Tabulka 36: Ocenění následků na lidském životě a zdraví vzniklé následkem pracovního úrazu – syntéza dat různých autorů (Salvendy, 2006; Paleček, 2000; Fuchs, 2008).

Zranění osob	Západní Evropa (Salvendy)	Česká republika (Paleček)	Česká republika (Fuchs)
Lehké zranění s ošetřením na pracovišti	< 5 000 €	127 500 Kč ^a	> 1 000 Kč
Lehký pracovní úraz bez pracovní absence / bez trvalých následků	< 50 000 €	1 275 000 Kč ^a	> 10 000 Kč
Závažný pracovní úraz s pracovní absencí / s trvalými následky	< 100 000 €	2 550 000 Kč ^a	> 100 000 Kč
Smrtelný pracovní úraz	< 1 000 000 €	25 500 000 Kč ^a	> 1 000 000 Kč
Hromadný smrtelný pracovní úraz	> 1 000 000 €	25 500 000 Kč ^a	> 10 000 000 Kč

^a Přepočteno na Kč byl proveden pro směnný kurz platný v březnu 2008

- Počet nově hlášených případů pracovní neschopnosti pro pracovní úraz na 100 nemocensky pojištěných (tj. počet pracovních úrazů na 100 pojištěnců = pracovní úrazy násobených 100 a dělených počtem pojištěnců).
- Počet kalendářních dnů pracovní neschopnosti na 1 pracovní úraz (tj. počet kalendářních dnů pracovní neschopnosti na 1 pracovní úraz, což se rovná součtu dnů pracovní neschopnosti za sledovanou dobu dělenou součtem pracovních úrazů za sledovanou dobu).
- Průměrné procento pracovní neschopnosti pro pracovní úrazy (což je ukazatel vyjadřující podíl kalendářních dnů pracovní neschopnosti pro pracovní úraz na celkovém kalendářním fondu pojištěnců ve sledovaném období (roce) vyjádřený v procentech, přičemž průměrné procento se rovná počtu dní pracovní neschopnosti násobenému 100 a dělenému počtu 365-násobku počtu pojištěnců).
- Průměrný denní stav práce neschopných pro pracovní úraz (tj. počet nemocensky pojištěných, kteří byli ve sledovaném období (roce) průměrně denně nepřítomni v práci z důvodu pracovní neschopnosti pro pracovní úraz, přičemž průměrný denní stav práce neschopných je počet dnů pracovní neschopnosti dělený 365).
- Počet smrtelných pracovních úrazů na 10 000 nemocensky pojištěných (tj. počet smrtelných úrazů na 10 000 pojištěnců).
- Procento smrtelných pracovních úrazů z nově hlášených případů pracovních úrazů (tj. počet smrtelných úrazů násobených 100 a dělený počtem všech pracovních úrazů).
- Průměrné náklady a ztráty na jeden pracovní úraz/nehodu (tj. průměrné náklady a ztráty podniku na jeden pracovní úraz/nehodu vyčíslené na základě části přidané hodnoty připadající na vrub pracovní doby ztracené v důsledku přerušení práce při úrazu nebo nehodě).

Použijeme-li koeficienty pro odhad ztracené doby ostatních pracovníků a nadřízených v důsledku krátkodobého přerušení práce při pracovních úrazech nebo koeficient pro odhad ostatních přímých nákladů, můžeme, po doplnění aktuálním přepočítávacím koeficientem pro přepočet kalendářních dnů v roce, vytvořit kalkulaci pro odhad ztráty přidané hodnoty v důsledku pracovní neschopnosti pro pracovní úrazy Z_{ph} v podniku nebo jeho organizační jednotce. Pro výpočet hodnoty Z_{ph} se používá následujícího vztahu:

$$Z_{ph} = \frac{T_u K P_H}{(n_{poj}) (1 + k_{OP} + k_{pu})}, \quad (4-56)$$

kde značí Z_{ph} – ztrátu přidané hodnoty v důsledku pracovních úrazů (ostatních a těžkých), T_u – zameškanou pracovní dobu pro pracovní úrazy v kalendářních dnech, K – přepočítávací koeficient kalendářních dnů na pracovní, P_H – přidanou

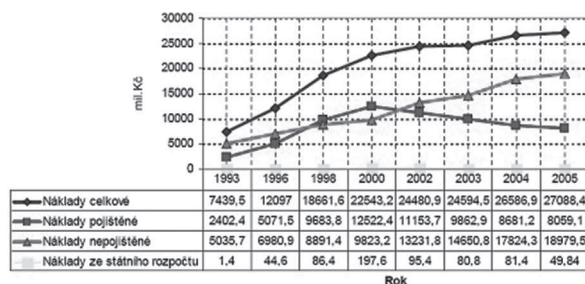
hodnotu (value-added) – součet důchodů výrobních faktorů v dané jednotce za rok, n_{poj} – průměrný počet pracovníků, f – počet pracovních dnů v daném období, k_{op} – koeficient pro odhad ztracené doby spolupracovníků a nadřízených a k_{pu} – koeficient pro odhad ostatních přímých nákladů spojených s úrazem.

Ztráty vzniklé následkem provozních nehod a pracovních úrazů

Ztráty následkem provozních nehod či pracovních úrazů jsou reprezentovány finančním ekvivalentem realizovaných činností a vynaložených prostředků potřebných pro:

- Ošetření zraněného (např. doba potřebná na poskytování první pomoci, přivolání lékařské pomoci, která je ztrátou pracovní kapacity zraněného i ošetřujícího, náklady na odvoz zraněného nebo na prostředky první pomoci).
- Vyšetřování příčin a okolností (např. doba vyšetřování, provedení záznamů, meetingy, hlášení nehody).
- Obnovu majetku (strojů, zařízení, výrobků).
- Náhradu/opravu majetku nebo nákupu/likvidace majetku.
- Přesčasů/nahrazení pracovníka (např. náklady na přesčasy/vyhledání zástupu).
- Nahrazení škody vzniklé zaměstnanci.
- Realizaci nápravných opatření proti opakovanému vzniku provozní nehody nebo pracovního úrazu.

I když se celkový počet pracovních úrazů v České republice postupně snižuje, celkové ztráty vzniklé v souvislosti s pracovním úrazem se podle údajů Českého statistického úřadu neustále zvyšují. To znamená, že se zvyšují i náklady přímo v organizacích, kde tyto úrazy vznikly. Ačkoli trend tohoto vývoje, který zachycuje obrázek 85, není strmý, přesto lze očekávat, že tento typ nákladů bude v budoucnu tvořit významné



Obrázek 85: Vývoj ztrát vznikajících pracovními úrazy a nemocemi z povolání v letech 1993 – 2005 v ČR podle ČSÚ.

procento z celkových ztrát vznikajících firmám v souvislosti s výkonem jejich podnikatelských aktivit.

V Evropské škále pro hodnocení průmyslových havárií (ESIA) je definováno celkem šest úrovní následků na lidských životech, stejně tak jako i následků na majetku (viz kapitola 4.2.3). Ačkoli nelze čistě mechanicky tyto následky vzájemně poměřovat, lze alespoň pro orientaci z ESIA vyjádřit několik následujících skutečností. Úmrtí jednoho člověka z řad zaměstnanců podniku, kde k havárii došlo je hodnoceno ekvivalentním bodovým vyjádřením jako ztráta na majetku ve výši od 0,5 do 2 milionů Euro a úmrtí šesti osob z řad veřejnosti je hodnoceno podobně jako ztráta na majetku ve výši 200 milionů Euro. V této disproporci se jasně odráží fakt, že cena života zaměstnanec je nižší než cena života člověka z řad veřejnosti. Je to dáno patrně tím, že zaměstnanec ochotně a dobrovolně přijímá rizika, která s výkonem jeho práce souvisejí, takže i případné odškodnění za jeho smrt následkem průmyslové havárie by mělo být logicky nižší než v případě člověka z řad veřejnosti, který riziko plynoucí z provozu nebezpečné technologie je nucen jakýmsi způsobem (možná i proti své vůli) akceptovat (blíže viz kapitola 5.2.7). Případné úmrtí člověka z řad obyvatelstva by tak bylo zaviněno procesem, který tento člověk nemohl naprosto nijak ovlivnit, či ovlivnit průběh samotné havárie, včetně toho, že tento člověk patrně ani neměl k dispozici žádné prostředky osobní ochrany (a dost možná o vzniku samotné mimořádné události ani nebyl informován).

4.9.3 Spouštěcí události havárií v chemickém průmyslu

Jak již bylo zmíněno, mimořádné události v průmyslu bývají obvykle způsobeny nebezpečným jednáním člověka a v malé míře pak nebezpečnými podmínkami. V praxi však selhání člověka bývá velmi často důsledkem organizačních selhání, kterým se však pomocí různých opatření lze vyhnout. Toho lze ale dosáhnout pouze tehdy, přistupuje-li podnik/organizace k otázkám bezpečnosti proaktivně a má snahu se také poučit z událostí, které se staly již dříve a to nejen v jeho vlastním provozu.

Na počátku každé havárie stojí **iniciační událost**, tj. působení určité příčiny, která je impulzem stojícím na počátku rozvoje scénáře havárie. Účinná prevence se proto vždy musí opírat o dokonalou analýzu možných iniciačních událostí, se kterými lze počítat v dané technologii či zařízení. Avšak iniciační události jsou veličinami, jejichž charakterizace a kvantitativní popis jsou mimořádně obtížné, protože jsou to veličiny pravděpodobnostního charakteru. Je obtížné již jen sestavit soubor všech možných příčin iniciace havárií. Ke kvantitativnímu popisu výskytu možných iniciačních událostí se využívá popis pravděpodobnosti jejich výskytu. Popis však není příliš úspěšný z následujících důvodů:

- Spektrum iniciačních událostí je velice široké, např. korozní poškození zařízení, omyly obsluhy, špatná údržba, výpadek některé součásti zařízení, mi-

možná režim zařízení, improvizace obsluhy nebo vedení, neúplná znalost chování látek, atd.

- Příčiny iniciace jsou často z hlediska teorie pravděpodobnosti řídkými událostmi s velmi nízkou pravděpodobností výskytu, jejichž uplatnění je obtížné předpovědět, teorie pravděpodobnosti má u řídkých událostí malou vypovídací schopnost.
- Havárie jsou unikátními událostmi, kde příčinou je často souhra různých okolností.
- Skutečné příčiny průmyslových havárií jsou často zatajovány a zkreslovány, obsluha výroby, v níž k havárii došlo, se často snaží pravou iniciační příčinu zatajit, výrobce často nemá zájem na zveřejnění skutečných příčin havárie (poznámka: v minulém režimu bylo striktně zakázáno příčiny havárií a informace o jejich průběhu publikovat a informace se tak šířily jen ústním podáním – tento stav však, bohužel, v určité míře přetrvává dodnes) (Horák, 2008).

Níže jsou stručně uvedeny některé z vybraných typů poruch a příklady z praxe.

Mechanické poruchy zařízení (např. koroze)

Ve světě jsou sbírány údaje o spolehlivosti jednotlivých aparátů. Pro prezentaci možných mechanických poruch níže uvádíme několik reprezentativních událostí.

Prasknutí potrubí tlakového vodíku ve výrobně amoniaku podniku Duslo Šala

Ve výrobě prasklo vysokotlaké potrubí vodíku, unikající vodík vytvořil hořlavý oblak, jehož požár způsobil destrukci jedné výroby. Současně se uplatnil vliv expanzní práce vodíku stlačeného na 300 atmosfér. Obsah kompresní práce v plynu stlačeném na 300 atmosfér je překvapivě vysoký a není radno jej podceňovat.

Prasknutí potrubí spojeného se systémem kapalného propenu v podniku CHEMOPETROL Litvínov

Ve výrobě prasklo potrubí spojené se systémem zkapalněného propenu, vytvořil se explozivní oblak plynu, který byl iniciován patrně od projíždějící soupravy pouliční elektrické dráhy a explodoval. Příčinou bylo možná tzv. nízkoteplotní křehnutí oceli. Výbuch zcela zdemoloval výrobu syntetického lihu. Několik osob bylo usmrceno, avšak rozsah havárie mohl být v tomto ohledu mnohem větší – k výbuchu došlo v sobotu večer.

Výbuch oblaku par toluenu v podniku CHEMOPETROL Litvínov

Na koloně pro destilaci toluenu praskla ucpávka čerpadla zpětného toku horkého toluenu, unikající horký toluen vytvořil oblak, který vybuchl, výbuch zdemoloval budovu.

Ulomení koncové části míchadla ve vsádkovém reaktoru při exotermní reakci

V chemickém závodě se v kotlovém reaktoru ulomila spodní část míchadla s lopatkami. Hřídel míchadla se točila, ale směs nebyla účinně promíchávána. Tím byla omezena intenzita chlazení reakční směsi, obsah reaktoru se přehřál a směs unikla z reaktoru.

Nestandardní situace ve výrobě (odstávky, opravy, najíždění)

Nestandardními situacemi je především najíždění výroby a její odstavování, regenerace katalyzátoru a dále pak údržba a opravy. Při analýze rizika je třeba těmto nestandardním situacím věnovat pozornost a zpracovat pro tyto operace pracovní postupy. Někdy je obtížné odhadnout, jaké všechny nestandardní situace mohou nastat a jak se projeví na riziku havárie.

Havárie související s opravou míchadla

Údržbář opravoval míchadlo v polokontinuálním reaktoru. Reaktor byl provozován tak, že do něj byla napuštěna jedna část reakční směsi, druhá část reakční směsi pak byla za míchání a intenzivního chlazení přípouštěna takovou rychlostí, aby bylo možné odebírat účinné reakční teplo. Údržbář musel vlézt do reaktoru, proto zablokoval spuštění míchadla, aby nikdo nemohl spustit míchadlo, pokud on bude v reaktoru. Po opravě míchadla zapomněl spuštění míchadla odblokovat. Obsluha reaktoru si neuvědomila, že je míchadlo blokováno, napustila první část směsi do reaktoru a přípouštěla (bez míchání) druhou část směsi. Směs bez míchání prakticky nereagovala, reaktor byl naplněn směsí obou látek. Pak obsluha zjistila, že míchadlo není v činnosti a požádala o odblokování. Po spuštění míchadla probíhala reakce tak rychle, že nebylo možné reakční teplo odvést. Výsledkem byl tepelný výbuch reaktoru. Mezi tím byly všechny ostatní aparáty odstaveny a zaměstnanci byli včas evakuováni.

Havárie při odstavení výroby – BorsodChem-MCHZ Ostrava

Při tzv. studené odstávce, tj. při plném odstavení výroby, byly odpadní produkty z různých zařízení vedeny do sběrného zásobníku odpadních produktů. Zásobník vybuchl, patrně proto, že se do něj dostala kyselina sírová. Výbuch téměř zcela zničil výrobu nitrobenzenu.

Havárie při odstavení výroby vinylchloridu – SPOLANA Neratovice

Při odstávce výrobní údržbář omylem místo příruby na odstavené větvi zařízení demontoval přírubu na větvi spojené s tlakovým zásobníkem vinylchloridu. Vytvořil se oblak vinylchloridu, který vybuchl. Výrobna byla zničena.

Drobné úniky látek – SPOLCHEMIE Ústí nad Labem

Při čištění odstaveného zařízení unikla malá, v podstatě neškodná množství chloru a oxidu sírového ze zařízení. Škoda nevznikla žádná a riziko možného ohrožení osob mimo podnik byla minimální. Událost však způsobila zhoršení vztahu občanů k podniku.

Výbuch reaktoru na výrobu ethylenoxidu oxidací ethylenu vzduchem – SLOVNAFT Bratislava

K výbuchu došlo v souvislosti s regenerací katalyzátoru. Katalyzátor byl regenerován oxidací vzduchem. Analyzátor obsahu kyslíku v cirkulačním okruhu reaktoru bylo možné nastavit na dva rozsahy, jeden rozsah byl určen pro regeneraci katalyzátoru oxidací, kdy je obsah kyslíku v cyklu vysoký, druhý rozsah byl určen pro vlastní reakci, kdy je nutné udržovat nízkou koncentraci kyslíku, aby směs nebyla výbušná. Při najíždění procesu obsluha zaměnila rozsahy a vytvořila v cirkulačním okruhu výbušnou směs. Havárie neměla vliv na okolí, reaktor byl však zničen.

Improvizace jako zdroj rizika

V chemických výrobnách, zejména výrobnách založených na vsádkových procesech, je občas nutné operativně řešit aktuální výrobní situaci. Někdy je nutné i improvizovat, pružně reagovat, upravit postup operací, přechodně skladovat některé směsi, atd. Schopnost improvizace je někdy chápána i jako součást kvalifikace obsluhy. Tyto improvizace jsou však vždy zdrojem zvýšeného rizika. V kontinuálních výrobnách je úloha obsluhy potlačena a prostor pro improvizaci je menší. Zdrojem improvizace může být však i přirozená snaha si chytře usnadnit práci.

Havárie reaktoru na výrobu trichlorfenolu – ICMESO v Sevesu – Itálie

Tato, jinak celkem nevýznamná havárie, byla jednou z havárií, která vyvolala rozhořčenou vlnu zájmu veřejnosti o rizika spojená s chemickým průmyslem. Důkazem vlivu této havárie na veřejné mínění je přijetí direktivy EU (SEVESO II).

Podstata havárie. Proces měl dva stupně: Vysokoteplotní stupeň: reakce tetrachlorbenzenu s hydroxidem sodným ve složeném rozpouštědle (ethylenglykol-toluen) při teplotě 360 °C na trichlorfenolát sodný. Nízkoteplotní stupeň: po ochlazení byla směs neutralizována kyselinou sírovou, trichlorfenol byl pak oddělen filtrací.

Podstata improvizace: obsluha se v pátek odpoledne rozhodla provést jen vysokoteplotní stupeň, směs ochladit a ponechat v reaktoru do pondělí, pak teprve přidat kyselinu sírovou a získat produkt. Ponechala 20 minut v chodu míchadlo a chlazení a pak odešla domů. Analýzy prokázaly, že horní víko reaktoru bylo po odstavení horké, od něj se nepromíchávaná směs přehřála, probíhaly exotermní rozkladné reakce, celý obsah reaktoru se přehřál, praskla pojistná membrána a obsah reaktoru se vyvalil do okolí. Rozkladem vzniklo asi 500 g dioxinu, který unikl do okolí.

Havárie výroby na oxidaci cyklohexanu vzduchem v kapalně fázi – Flixborough – Anglie

Havárie ve Flixborough je další havárií, která ovlivnila veřejné mínění v Evropě, a která je používána jako doklad, že chemické výroby představují riziko pro okolí. Ve výrobě byl oxidován cyklohexan vzduchem v kapalně fázi v kaskádě za sebou zařazených velkoobjemových reaktorů na směs cyklohexanolu a cyklohexanonu k výrobě nylonu. Reakční teplota byla 170 °C, reakční směs tedy představovala kapalnou směs přehřátou pod tlakem nad bod varu asi o 100 °C. Na stěně jednoho reaktoru byly objeveny praskliny a vedení výroby rozhodlo tento reaktor z kaskády vyjmout a opravit. Aby nebylo nutné výrobu přerušit, bylo rozhodnuto snížit počet reaktorů v kaskádě a reaktor nahradit spojovací trubkou, v níž byly vloženy vlnovce umožňující dilataci.

Podstata improvizace: Konstrukční úprava neprošla oficiálním schvalovacím řízením, přemostění bylo řešeno improvizací. Analýza po havárii prokázala, že ve spojovacím potrubí s vlnovci byl vlivem přetlaku v zařízení generován rotační moment, jehož vlivem se spojovací potrubí utrhlo, reakční směs vytvořila výbušný oblak, který vybuchl. Výbuchem byla výroba zcela zničena, byly poškozeny i některé domy mimo výrobu. Počet obětí na životech byl relativně malý, protože k havárii došlo v sobotu večer.

Nitrace fenolu – Synthesia Pardubice

Při nitraci fenolu byl fenol do odměrky dávkován ze sudů, jejichž obsah nebyl úplně stejný. Operátor pro nadávkování fenolu do odměrky zjistil, že mu v jednom sudu část obsahu fenolu zbyla. Rozhodl se zbytek ze sudu napustit do prázdného vedlejšího reaktoru a použít jej v příští várce. Neuvědomil si, že v prázdném reaktoru je u dna zbytek nitrační směsi z poslední vsádky. Fenol reagoval bez výměny tepla se zbytkem nitrační směsi, operátor viděl, že z odvodušnění reaktoru vycházejí rudé dýmy, zkontroloval teplotu měřenou čidlem v reaktoru, teplota byla rovna teplotě v okolí. Bylo to tím, že čidlo nedosahovalo do zbytků směsi v reaktoru. Vše se zdálo být v pořádku, pak reaktor vybuchl a víko reaktoru se utrhlo a prolétlo střechou.

Požár výroby SPOLCHEMIE v Ústí nad Labem

Operátor modifikoval výrobní postup a rozhodl se přepustit z procesních důvodů reakční směs přechodně do jiné nádoby a pak ji vrátit zpět do reaktoru. Po této improvizaci zapomněl zavřít ventil pod reaktorem. Otevřeným ventilem pak propadl dávkovaný katalyzátor do potrubí, kde způsobil exotermní reakci za podmínek omezené výměny tepla, jejímž důsledkem byl výbuch. Výbuch inicioval požár.

Svévolné chování obsluhy jako zdroj rizika

U operátorů se někdy projevuje jev, který je možné označit jako „provozní suverenity“ (odborně nazývaná jako **sebeuspokojení**), kdy propadají pocitu, že již zcela ovládají proces, pocitu, že proces je vlastně jednoduchý. Je paradoxní, že tento pocit může být někdy podporován systémem automatického řízení počítačem. Operátor propadne pocitu, že může do řízení procesu aktivně vstoupit. Důvody mohou být i psychologické, kdy obsluha v moderních závodech si připadá jako pasivní součást systému a propadne touze se aktivně projevit. Klasickým příkladem havárie vyvolané svévolností obsluhy je havárie v Černobyli.

Svévolné odstavení havarijního systému ve výrobě nitroglycerinu

Ve výrobě nitroglycerinu bylo měření reakční teploty vázáno na protihavarijní systém. Při překročení jisté teploty byl celý obsah reaktoru převrácením reaktoru vlit do velké nádrže s vodou. Operátoři ve výrobě byli placeni podle dosažené produkce. Odstavili proto protihavarijní systém, aby mohli pracovat při vyšší teplotě, kdy je rychlost produkce vyšší. Důsledkem byla havárie spojená s výbuchem.

Inovace procesu jako zdroj rizika

Zdrojem rizika mohou být i oficiální schválené aktivity k zlepšování procesu, např. použití aktivnějších katalyzátorů nebo iniciátorů. Tyto aktivity jsou součástí technické práce, při níž je nutné vždy jisté riziko neúspěchu či havárie připustit. Podstatné je, aby experimenty byly podepřeny systémem měření v laboratoři či poloprovozu a podloženy metodikou přenosu výsledků z laboratoře do provozu.

„Ujetí reakce“ v polykondenzačním reaktoru

V reaktoru na výrobu fenolformaldehydových pryskyřic byl zkoušen nový typ katalyzátoru. Katalyzátor byl příliš aktivní, produkci tepla nebylo proto možné odvést stěnou reaktoru a obsah reaktoru vypěnil.

Exemplární nepořádek ve výrobě

Typickým příkladem je havárie v Bhópálu (Indie), kdy zahynulo až 8 000 osob a asi 20 000 osob bylo zraněno chemickou látkou. Tento příklad je používán bez uvedení

specifických okolností havárie. Analýza havárie zveřejněná v odborném tisku totiž prokázala, že výrobní byla v extrémně špatném technickém i organizačním stavu, což je stav, ke kterému v chemickém průmyslu v ČR takřka nemůže docházet. Příčinou havárie byl únik methylisokyanátu ze zásobníku vlivem nečekané exotermní reakce. Ve výrobě byla demontována všechna ochranná zařízení (chlazení zásobníku, měření teploty, skrápění koncových plynů louhem a spalování koncových plynů v hořáku (fakli). Navíc, výrobní neměla zajištěnou informovanost obyvatel. Po havárii se k závodu seběhl obrovský dav obyvatel, proto byl počet obětí vysoký.

Všechny výše nastíněné případy prokazují účelnost provádění analýzy a hodnocení rizik. Jedním z cílů zavedení analýzy a hodnocení rizik je právě zajistit, aby byla dodržována bezpečnostní opatření a aby se podobné situace nemohly opakovat.

4.9.4 Příčiny vzniku mimořádných událostí v průmyslu

Každá mimořádná událost a především pak průmyslová havárie by měla být řádně vyšetřena, aby bylo možné nejen odhalit příčinu, viníka či systémové pochybení, ale především, aby bylo možné vyvodit takové důsledky, které jejímu opakování do budoucna zabrání, nebo alespoň výrazně sníží její pravděpodobnost.

Mimořádná událost je důsledkem jevů vyvolaných okolnostmi, které působily v době jejího vzniku. Takovými okolnostmi jsou zejména okolnosti vyplývající z:

- **Lidského činitele** – odborná způsobilost, zdravotní způsobilost, znalost předpisů BOZP, dodržování předpisů BOZP, použití osobních ochranných pracovních prostředků, okamžitý fyzický stav, okamžitý psychický stav, úmyslné jednání, verbální/nonverbální komunikace.
- **Pracovních podmínek** – objemové a dispoziční řešení pracoviště (pracovního místa), mikroklimatické podmínky, hluk, vibrace, osvětlení, viditelnost, kvalita ovzduší, nebezpečná látka, pořádek na pracovišti, mezilidské vztahy.
- **Technických podmínek** – bezpečnostní zařízení, technická závada, ergonomické uspořádání, ovládací prvky, instalace, prostorové poměry, pomůcky, nářadí, nástroje, provozní surovina;
- **Organizace práce** – místo nehody, typ činnosti, osamocení zaměstnanec, forma pracovní doby, příkaz k práci, pracovní postup, přestávky v práci, nepřetržitý odpočinek mezi dvěma směny, pracovní tempo, koordinace činností, poskytnutí osobních ochranných pracovních prostředků, značky a signály, školení BOZP, kontrola/dozor/dohled.

Hlavní faktory, které mohou hrát významnou roli při vzniku provozní nehody nebo průmyslové havárie v rámci uvedeného členění, shrnuje tabulka 37.

Tabulka 37: Hlavní příčinné faktory vedoucí ke vzniku nehod v průmyslu (Ferry, 1988).

Prostředí	Materiály
Sociální prostředí	Únosnost materiálů
Technologie	Podloží
Ekonomické aspekty	Stavební materiály
Politika a právo	Materiály pro zvedání (lana, řetězy)
Management	Materiály z plastů
Informační toky	Materiály z kovů
Počasí	Těsnící materiály a ucpávky
Terén	
Lidský činitel	Pracovní proces
Nejisté jednání a improvizace	Rozvody energií
Neznalost, paměť	Elektřina
Sebeuspokojení, provozní slepota	Hydraulika
Prosté nedopatření	Mazání
Špatné instrukce	Počítače
Nedostatek fyzických nebo duševních schopností	Software
Motivace	Roboti
Nedobrá týmová spolupráce	Chemické a fyzikální procesy
Špatná komunikace	Odpady a vedlejší produkty reakcí

V rámci technického systému často unikají pozornosti tzv. fugitivní emise. Fugitivní emise (to jsou plynné látky unikající nejrůznějšími netěsnostmi procesních aparátů, čerpadel, kompresorů, potrubních tras a jejich příslušenství). Nebezpečí s nimi spojené je, že se mohou koncentrovat v uzavřených prostorech nebo prohlubních (např. kanály), kde mohou být iniciovány, zahořet (Eisler a Rousová, 2009) a stát se tak i příčinou vzniku mimořádné události.

Náhodné drobné fugitivní emise pocházející z možných netěsností některých aparátů, které nelze z konstrukčních nebo funkčních důvodů vyloučit (úky čerpadel, netěsnosti ventilových táhel, netěsnosti vzorkovacích ventilů působených únavou nebo opotřebením materiálu, netěsnosti potrubních spojů atd.), by měly být pravidelně monitorovány a signalizovány. Případné zjištěné úniky by měly být v co nejkratší době odstraněny opravou dané netěsnosti.

4.9.5 Postup při vyšetřování okolností a příčin vzniku mimořádné události

Ke zjištění příčiny (příčin) mimořádné události je třeba napřed poznat okolnosti, které vedly k nežádoucímu následku, nežádoucí následek způsobily nebo jej umožnily. Cílem objasňování příčin je hledání (nalezení) příčinného vztahu mezi jevem, který vyvolala okolnost, a následkem. Tak například bude příčinný vztah mezi porušením předpisu o bezpečnosti práce zaměstnancem, kterému je uloženo nosit ochrannou přilbu a zraněním hlavy, kterému by nošení přilby zabránilo, a nepůjde o příčinný vztah mezi porušením povinnosti a následkem v případě, že zaměstnanci, který nemá přilbu, ač je povinen ji nosit, padající předmět pohmoždí nohu.

Praxe nás učí, že ne vždy je příčina mimořádné události jen jedna. Mimo příčinu hlavní (přímou), která měla rozhodující podíl na vzniku nehody, se na jejím vzniku mohou podílet i příčiny vedlejší (nepřímé), tedy takové, které nehodu přímo nezpůsobily, ale k jejímu vzniku přispěly. Pro účinnou prevenci rizik je třeba zjistit všechny příčiny, které se, byť částečně, na vzniku nehody podílely, neboť i odstranění vedlejší příčiny přispěje k tomu, že k podobné mimořádné události již nedojde.

Zavinění

I když účelem objasňování mimořádných událostí není zjištění osoby, která její vznik bez ohledu na zavinění způsobila („původce“), ale zjištění příčin a okolností, které k mimořádné události vedly, nelze se osobě původce při objasňování zcela vyhnout. Znalost původce, který způsobil škodu (na zdraví, na majetku nebo životním prostředí) je pro zaměstnavatele důležitá zejména pro řízení o náhradě škody a pro jednání s pojišťovnou, u které je zaměstnavatel pojištěn pro případ odpovědnosti za škodu. Právě z osobnosti a osobních poměrů původce mnohdy příčiny mimořádné události pramení a je třeba je poznat³². Došlo-li zaviněným jednáním druhé osoby k poškození zdraví nebo k majetkové škodě, je zásadně povinností orgánů činných v trestním řízení, aby pachatele zjistili. Výsledek takového jednání může pro uplatnění svých práv využít i zaměstnavatel.

Zavinění je právní naukou definováno jako vnitřní, psychický vztah jednatelů k jeho vlastnímu protiprávnímu jednání a k výsledku tohoto jednání. Je založeno jednak na prvku poznání, spočívajícího ve vědomosti a předvídání určitého výsledku, jednak na prvku vůle, spočívajícího v tom, že subjekt projevuje svou vůli tím, že něco chce, ale také tím, že je s něčím srozuměn. Na různé kombinaci obou prvků a stupňů jejich intenzity jsou založeny různé formy a stupně zavinění.

Zavinění rozlišujeme úmyslné (*dolus*) a nedbalostní (*culpa*):

³² Podle § 415 Občanského zákoníku je každý člověk povinen počínat si tak, aby nedocházelo ke škodám na zdraví, na majetku, na přírodě a životním prostředí.

- Úmysl přímý – jednající věděl, že škodu způsobí a chtěl ji způsobit.
- Úmysl nepřímý – jednající věděl, že škodu může způsobit a byl s tímto důsledkem srozuměn.
- Nedbalost vědomá – jednající věděl, že může způsobit škodu, a bez přiměřených důvodů spoléhal na to, že ji nezpůsobí.
- Nedbalost nevědomá – jednající nevěděl, že může způsobit škodu, ač o tom vzhledem k okolnostem a svým osobním poměrům vědět měl či mohl.

V problematice pracovních úrazů, provozních nehod či průmyslových havárií se nejčastěji setkáváme s případy nedbalosti, ať už vědomé nebo nevědomé. Zaviněné jednání není spatřováno jen v tom, že jednající subjekt něco konal. Takové jednání se může projevit i v opomenutí. To platí pro úmyslnou i nedbalostní formu zavinění. Tak například zaviněným nedbalostním jednáním bude, když jednající způsobí havárii jeřábu tím, že začne zvedat břemeno zasypané zeminou (konal). Zaviněným nedbalostním jednáním bude, když jednající nezakryje otvor do jámy na frekventované komunikaci (opomenul).

Příčiny a zavinění mimořádných událostí

Mimořádné události, zvláště pak pracovní úrazy, vznikají jako důsledky porušení povinnosti vyplývající ze zaměstnání, povolání, postavení nebo funkce, nebo porušení předpisů o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci. Jejich hlavní příčinou bývá nekázeň, lajdáctví, přehnané rutinérství, neopatrnost a lehkomyšlnost, zejména při vědomém nepoužívání osobních ochranných pracovních prostředků apod. Zanedbatelný není ani vliv alkoholu nebo jiných návykových látek. Ze strany zaměstnavatele pak jde často o špatnou organizaci práce, nedostatečnou kontrolu dodržování předpisů o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci, nedostatečnou údržbu a obnovu technického zařízení a vybavení pracoviště, nedostatečné vymezení pracovního místa a další příčiny.

Mimořádnou událost může způsobit každá osoba, zařazená do pracovního procesu nebo zdržující se na pracovišti. Závažné (průmyslové) havárie pak mohou být ale způsobeny i jednáním třetích osob, mimo daný podnik (např. v případě domino efektu) anebo i přírodní živly. Těmito typy událostí se zde ale zabývat nebudeme a pozornost soustředíme na jednání lidí na pracovišti, kde k nehodě došlo.

Původce má v průběhu objasňování nehody zájem na tom, aby nebyla zjištěna pravá příčina události, nebo aby mimořádná událost vyšla najevo co nejpozději, resp. aby zůstala utajena. To je dáno obavou z postihu, který může být dle formy zavinění a způsobeného následku pracovněprávní, občanskoprávní, správní i trestní. Stává se, že orgány činné v trestním řízení se o mimořádné události, zejména o poškození zdraví při pracovním úrazu či poškození výrobních zařízení, dozvídají nikoliv od organizace, kde k události došlo, ale od lékaře, od náhodných svědků nebo od

pojišoven. Zpravidla v každém takovém případě je pak zjištěno, že pracovník, který nepodal hlášení o nehodě, se snažil získat čas pro odstranění vlastního nepořádku nebo nepořádku organizace.

Objasňování mimořádných událostí

I když se budeme dále zabývat objasňováním mimořádných událostí zaměstnavatelem, zvláště pak provozních nehod, je třeba se zmínit i o dalších subjektech, které jsou ze zákona povinny nebo oprávněny nehody objasňovat, a se kterými je zaměstnavatel povinen spolupracovat. Uvedené orgány mají prioritu při vyhledávání a zajišťování důkazů (přístup na místo mimořádné události a jeho ohledání, vyhledání stop a jejich zajištění, výslechy osob, písemnosti apod.). Je třeba připomenout, že neumožnění nebo ztěžování výkonu oprávnění uvedených orgánů může být sankcionováno.

Orgány činné v trestním řízení

Orgány činnými v trestním řízení rozumíme policejní orgán, státního zástupce a soud. Z této řady orgánů činných v trestním řízení se vyšetřováním pracovních úrazů a havárií zabývají policejní orgány Policie ČR. Kritériem věcné příslušnosti je mimo jiné závažnost mimořádné události, tj. závažnost poškození zdraví, výše majetkové škody, případně stupeň ohrožení života, zdraví, majetku nebo životního prostředí. Tyto orgány šetří mimořádnou událost z pohledu trestního, tedy z pohledu zavinění fyzickou osobou. Při provádění úkonů k objasnění případu mají prioritu nejen před zaměstnavatelem, ale i před orgány státního odborného dozoru nad bezpečností práce a státního požárního dozoru.

Postup policejních orgánů je upraven trestním řádem a zákonem o policii³³. Zaměstnavatel je povinen s těmito orgány při prověřování nebo vyšetřování úrazu nebo havárie spolupracovat a strpět procesní úkony, které policejní orgán provádí. Orgány činné v trestním řízení shromažďují podklady pro případné rozhodnutí vlastní, státního zástupce nebo soudu. K tomu opatřují důkazy o tom, kdo poškození zdraví nebo majetkovou škodu způsobil (pachatel), jakou povinnost porušil, jaká je výše škody a jaká je příčina vzniku nehodové události.

Orgány inspekce práce a státního požárního dozoru

Jsou jimi oblastní inspektoráty práce, které jsou oprávněny kontrolovat příčiny a okolnosti pracovních úrazů, popřípadě se zúčastňovat šetření na místě úrazového děje³⁴. Tyto orgány jsou při výkonu své činnosti ze zákona oprávněny vstupovat kdykoliv do prostorů organizací a provozních prostorů podnikajících fyzických osob a vyžadovat potřebné doklady, informace a vytvoření podmínek pro výkon dozoru.

³³ Zákon č. 141/1961 Sb., o trestním řízení soudním (trestní řád) a zákon č. 283/1991 Sb., o Policii ČR.

³⁴ Zákon č. 251/2005 Sb., o inspekci práce a zákon č. 552/1991 Sb., o státní kontrole.

Příčiny požárů zjišťují orgány státního požárního dozoru, jejichž činnost a oprávnění jsou upraveny zákonem o požární ochraně³⁵. Zaměstnavatel je povinen umožnit orgánu státního požárního dozoru provedení potřebných úkonů při zjišťování příčiny vzniku požáru. Dále je povinen poskytnout tomuto orgánu bezúplatně výrobky nebo vzorky nezbytné k provedení požárně technické expertízy k zjištění vzniku požáru. Orgány státního požárního dozoru při šetření mimořádné události zjišťují příčiny vzniku požáru a porušení předpisů, které ke vzniku požáru vedlo.

Odborové organizace

Samostatná práva při zjišťování příčin nehod mají též odborové organizace. Odborové organizace se mohou podle § 105 odst. 1 a § 322 odst. 1 zákoníku práce účastnit šetření, které provádí zaměstnavatel, a prověřovat, zda zaměstnavatel řádně vyšetřuje pracovní úrazy, případně mohou samy příčiny pracovních úrazů objasňovat.

Právní úprava povinností a práv při zjišťování příčin mimořádné události zaměstnavatelem

Povinnost zaměstnavatele objasnit příčiny a okolnosti vzniku mimořádné události je zaměstnavateli uložena zákony³⁶. Těto povinnosti není zaměstnavatel/provozovatel zproštěn ani skutečností, že úraz/havárii vyšetřoval jiný, k tomu příslušný orgán. Výsledky šetření těchto orgánů může zaměstnavatel využít.

Při objasňování příčin mimořádné události může zaměstnavatel na pracovištích a v objektech, které spravuje, vlastní, nebo oprávněně užívá, provádět jakékoliv úkony ke zjištění příčin. Zaměstnanec je povinen bezodkladně oznámit svému nadřízenému svůj pracovní úraz nebo jinou provozní událost, pokud mu to jeho zdravotní stav dovolí, anebo událost, jíž byl svědkem, a spolupracovat při objasňování jejich příčin. Spolupráce při objasňování příčin nehod a úrazů spočívá v podání svědecké výpovědi o okolnostech vzniku nehody nebo úrazu a v účasti na dalších úkonech, vedoucích ke zjištění příčin mimořádné události.

Důkazy a dokazování

Cílem objasňování je opatřit, tedy vyhledat a zajistit důkazy o okolnostech a příčinách objasňované události. Dokazování ve smyslu logiky je myšlenková forma, záležející v tom, že o předmětu důkazu, tj. o tvrzení, které se má dokázat, dovozujeme pomocí logického postupu (úsudku), že vyplývá z určitých důkazních prostředků (argumentů). Dokazováním procesním nazýváme zvláštní postup orgánů (soudních, správních) v řízení, jehož cílem je utvořit si poznatky o skutečnostech důležitých pro rozhodnutí. Přitom poznává orgán rozhodnou skutečnost buď přímo svými smysly (např. při ohledání), nebo poznává zprávy o této skutečnosti (např. ze

³⁵ Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně ve znění pozdějších předpisů.

³⁶ Např. § 105 odst. 1 zákoníku práce nebo Přílohy I vyhlášky č. 255/2006 Sb. o rozsahu a způsobu zpracování hlášení o závažné havárii a konečné zprávy o vzniku a dopadech závažné havárie.

svědecké výpovědi). Tento postup je v jednotlivých řízeních zvlášť upraven tak, aby co nejspolehlivěji splnil svůj cíl, tj. aby umožnil pravdivé poznání rozhodných skutečností. Dokazování probíhá tak, že se nejprve důkazy vyhledávají, pak následuje jejich zajištění (dokumentace, zajištění *in natura* apod.), aby bylo možno je později provést. Podle okolností se důkazy prověřují dalšími důkazy a nakonec se důkazy hodnotí.

Pod pojmem **důkaz** rozumíme informaci, která přispěje ke zjištění a objasnění skutečného stavu, který je předmětem šetření. Tuto informaci získává pověřená osoba z důkazních prostředků, které každý právní předpis, dokazováním se zabývající, vymenovává pouze demonstrativně. Pro srozumitelnost uvádějí právní předpisy vlastně „důkazní prostředky“, které jsou nositeli důkazů. Důkaz lze opatřit jen cestou neodporující zákonu. Pokud byl opatřen protizákonně, pozbývá své důkazní hodnoty. Informace získaná důkazem musí být ověřitelná.

Protože důkaz je informace, musí být tato informace nějakým způsobem podána orgánu, který na jejím základě rozhoduje. K tomu slouží **důkazní prostředek**. Jestliže důkazním prostředkem je např. ohledání, je důkazem obsah (výsledek) ohledání – informace, které z něj vyplývají (např. že ohnisko požáru je v rozvodné elektrické skříni – důkaz o tom, že požár vznikl v této skříni). Důkazy dělíme na:

- Důkazy přímé a nepřímé:
 - Přímý důkaz potvrzuje nebo vyvrací dokazovanou skutečnost (např. výpověď svědka, který vznik a průběh události sledoval).
 - Nepřímý důkaz (indicie) potvrzuje nebo vyvrací určitou skutečnost pomocí jiné skutečnosti, která jen nepřímo souvisí s dokazovanou skutečností. Nepřímé důkazy musí tvořit uzavřený okruh (např. určitá osoba byla svědkem viděna před požárem na místě, kde bylo později zjištěno ohnisko požáru, dále bylo zjištěno, že tato osoba před požárem vyhrožovala založením požáru a také, že tato osoba byla již v minulosti podezřelá ze zhářství, aniž jí to bylo dokázáno atd.). Nepřímé důkazy musí tvořit harmonický celek, jehož jednotlivé části musí být navzájem v souladu, vzájemně se potvrzovat a doplňovat.
- Důkazy původní (bezprostřední) a odvozené (zprostředkované):
 - Původní důkaz čerpá z bezprostředního pramene (např. výpověď svědka, který byl účasten události, o které vypovídá).
 - Odvozený důkaz čerpá ze zprostředkovaného pramene (např. výpověď svědka, který slyšel o události vyprávět).
- Důkazy věcné a listinné:
 - Věcným důkazem je věc, která informaci nese (např. poškozený vázací prostředek k zavěšování břemen na zdvihací zařízení).

- Listinným důkazem je psaná, nebo kreslená informace na jakémkoliv podložce, nejčastěji však text na papíře (např. listina, na které je záznam o účasti zaměstnance na školení BOZP, opatřený jeho vlastnoručním podpisem).

Dokumentace objasňování příčin mimořádné události

Objasňování okolností a příčin mimořádné události by se mělo účinkem, pokud by nebylo řádně dokumentováno. Dokumentací objasňování se rozumí shromáždění a uchování podkladových materiálů o průběhu a výsledcích objasňování. Dokumentace se vede zásadně v písemné formě (včetně elektronické), přičemž může obsahovat i obrazové či zvukové záznamy, ať už fotografie, nebo jiné záznamy na nosičích.

Dokumentace obsahuje záznamy o úkonech, které byly provedeny k objasnění mimořádné události, tj. zejména záznamy o ohledání místa nehodové události, o výpovědi poškozeného a svědků, o rekonstrukci nebo vyšetřovacím pokusu, znalecké posudky, listinné důkazy, rozhodnutí jiných orgánů, které nehodovou událost vyšetřovaly, vyhodnocení výsledků objasňování, zpráva o výsledku objasnění okolností a příčin pracovního úrazu, nehody atd.

Je třeba si uvědomit, že v případě, dojde-li při mimořádné události ke vzniku škody ať na majetku, nebo na zdraví, vznikne na jedné straně poškozenému právo na odškodnění a tomu, kdo za škodu odpovídá, povinnost ji odškodnit. Ne vždy dojde ke shodě stran, ne vždy se zaměstnavatel se zaměstnancem (nebo jinou poškozenou osobou) dohodne a vypořádá k oboustranné spokojenosti. Neuspěje argument, že škodu hradí pojišťovna. Nedojde-li ke shodě, řeší spor soud. Aby soud mohl objektivně rozhodnout, musí mít k dispozici podklady pro rozhodnutí. Dokumentace objektivně objasněné mimořádné události i po letech přispěje k rychlému a správnému rozhodnutí soudu. Je třeba si uvědomit, že k projednávání věci před soudem může dojít také mnoho let po vzniku události, zejména došlo-li ke škodě na zdraví.

Zajištění místa mimořádné události

Místem mimořádné události rozumíme místo vzniku a průběhu objasňované události a všechna místa se vznikem a průběhem této události související. Místo mimořádné události nese značné množství objektivních informací o dané události zejména v podobě stop, které událost zanechala. Pro objasňování příčin události má místo nehodové události nezastupitelný význam. Cílem zajištění místa mimořádné události je zachovat toto místo v původním stavu, aby nebyly znehodnoceny stopy, které se zde nacházejí.

Zákon ukládá zaměstnavateli povinnost neměnit bez vážných důvodů stav na místě mimořádné události. Za vážné důvody se považuje zejména poskytnutí první pomoci poškozeným, včetně jejich vyproštění a transportu, a provedení opatření k zamezení dalším škodlivým následkům (např. vypnutí přívodu elektrického proudu či jiných

energií, zastavení chodu stroje, uzavření přívodu škodlivých látek, vyvětrání apod.). Povinnosti zaměstnavatele v takovém případě plní ti zaměstnanci, kteří jsou na místě mimořádné události první, nebo na místě mimořádné události zasahují³⁷.

Povinnost poskytnout **první pomoc** má každý člověk, pakliže se tím sám nevystaví váženému ohrožení. Každá osoba pak má, podle § 18 a 19 zákona č. 133/1985 Sb. o požární ochraně, ve znění pozdějších předpisů, také povinnost poskytnout **osobní a věcnou pomoc** při zdolávání požárů popř. jiných mimořádných událostí. Neposkytnutí pomoci může být trestněprávně sankcionováno podle § 207 a § 208 zákona č. 140/1961 Sb., trestní zákon, ve znění pozdějších předpisů³⁸.

Postup při zajištění místa mimořádné události

Zajištěním místa mimořádné události rozumíme zachování tohoto místa v původním stavu tak, aby nebyly znehodnoceny stopy, které zde událost zanechala, a aby nedošlo ke změnám na místě události. Je-li třeba při záchranných pracích některé věci přemístit, označit se, nebo jinak zadokumentuje jejich původní polohu, pokud je to možné. To platí i pro označení polohy zraněných osob.

Nejúčinnějším způsobem zajištění místa je jeho uzávěra s cílem zamezit vstup nepovolaným osobám. Pokud je místem mimořádné události uzavíratelná místnost, je taková uzávěra snadná. Uzavření místa na volném prostranství nebo v části budovy je náročnější a vyžaduje použití k uzávěře více osob, které na dodržování uzávěry budou dohlížet. Hranice uzávěry tvoří místa, kam až mohla nehodová událost, příp. její stopy dosáhnout. Nachází-li se místo mimořádné události například na vnitropodnikové komunikaci, je třeba učinit taková opatření, aby nedošlo k dalším nehodám (zajistit objížďku, zpomalit provoz okolo místa nehodové události apod.). Pokud místo mimořádné události zasahuje na železniční trať, je třeba okamžitě vyrozumět příslušného odpovědného pracovníka dráhy, který sám zajistí případnou výlukou nebo omezením provozu na trati.

Dalším úkolem při zajištění místa mimořádné události je ochrana stop, které se na místě mimořádné události nalézají, před jejich poškozením, zničením nebo ztrátou. Například trasologické (stopy po obuvi, pneumatikách apod.), chemické nebo biologické stopy je třeba chránit před povětrnostními vlivy vhodným příkrytím (např. otisk pneumatiky nebo krevní stopu příkryt proti znehodnocení deštěm).

³⁷ Hrozí-li například po vzniklé mimořádné události jakákoli další škoda, pak podle § 417 je ten, komu tato škoda hrozí (ať již se jedná o fyzickou nebo i právnickou osobu), povinen zakročit k jejímu odvrácení způsobem přiměřeným okolnostem ohrožení.

³⁸ § 207 odst. (1) zní: „Kdo osobě, která je v nebezpečí smrti nebo jeví známky vážné poruchy zdraví, neposkytne potřebnou pomoc, ač tak může učinit bez nebezpečí pro sebe nebo jiného, bude potrestán odnětím svobody až na jeden rok“; § 207 odst. (2) zní: „Kdo osobě, která je v nebezpečí smrti nebo jeví známky vážné poruchy zdraví, neposkytne potřebnou pomoc, ač je podle povahy svého zaměstnání povinen takovou pomoc poskytnout, bude potrestán odnětím svobody až na dvě léta nebo zákazem činnosti“.

Postup při objasňování okolností a příčin nehodové události

Aby bylo možno určit příčiny mimořádné události, je třeba v první řadě za pomoci důkazů zrekonstruovat skutkový děj, neboli vznik a průběh události. K tomu je třeba poznat okolnosti, které události předcházely, resp. které na ni měly vliv. To je velice složitý úkol. K jeho řešení může pomoci znalost a využití některých osvědčených metod, pomocí kterých jsou vyhledávány a zajišťovány důkazy.

Nejefektivnějším způsobem vyhledávání důkazů je využití osvědčených metod. Musí být ovšem použity v souladu s pravomocí toho, kdo je užívá. Těmito metodami jsou:

- Ohledání místa nehodové události.
- Zajištění dokladů (listin).
- Výslechy osob.
- Konfrontace.
- Prověrka výpovědi na místě.
- Vyšetřovací pokus.
- Rekonstrukce.
- Znalecký posudek.

Ohledání místa mimořádné události

Cílem ohledání je zajistit a dokumentovat situaci na místě mimořádné události, vyhledat a zajistit předměty a stopy, které mají souvislost s objasňovanou událostí. Místo mimořádné události nese velké množství cenných informací, které mohou přispět k úspěšnému objasnění příčin. Tyto informace se zjišťují ohledáním.

Ohledání místa mimořádné události bude ve většině případů provádět policejní orgán. Policie provádí ohledání s cílem zjistit, zda nebyl spáchán trestný čin, a pokud ano, kdo je jeho pachatelem. Zaměstnavatel zjišťuje zejména příčinu mimořádné události. V určitých detailech se tedy směr a rozsah jeho šetření může od šetření policejního lišit. Přesto je možno zpravidla využít informací, které ohledáním zjistila policie. Po dohodě s vedoucím výjezdové skupiny policie nebývá problémem, aby se pověřená osoba zúčastnila ohledání prováděného policejním orgánem jako nezúčastněná osoba. Pokud je jí to umožněno, musí dbát pokynů vedoucího výjezdové skupiny. Účasti na ohledání může pověřená osoba využít k tomu, že paralelně s policejním orgánem provede vlastní ohledání.

Není-li toto policií ve výjimečných případech umožněno, provede pověřená osoba vlastní ohledání po skončení ohledání policií a po ukončení policejní uzávěry místa

mimořádné události. Pokud policie ohledání neprovádí, nic nebrání pověřené osobě, aby ohledání provedla ihned.³⁹

Ohledání je vyšetřovací metoda, kterou se na základě bezprostředního pozorování zjišťuje, zkoumá, hodnotí a podchycuje materiální situace nebo stav objektů, majících vztah k prověřované události, k jejímu poznání a získání důkazů i dalších důležitých informací. Podstata ohledání spočívá v tom, že ten, kdo ohledání provádí, bezprostředně svými smysly poznává fakta o události a jejím charakteru, které mají důkazní nebo taktický význam. Ohledání v sobě zahrnuje pozorování a postupy, kterými je dosahováno účelu ohledání, jako jsou různá měření, zkoumání objektů, zajišťování stop a vzorků *in natura*, experimentování a další, včetně dokumentace postupu i výsledku ohledání.

Smyslové, empirické poznávání materiální situace a objektů materiálního prostředí spolu s logickým myšlením, analýzou a hodnocením takto získaných informací směřuje k co nejobektivnějšímu a nejúplnějšímu poznání zkoumané materiální situace nebo jednotlivých objektů. Základní metodou zjišťování informací ohledání je pozorování. Jde o bezprostřední a cílevědomé pozorování s využitím všech smyslů, především vnímání vizuálního.

Chování na místě mimořádné události

Aby nedošlo ke zmaření účelu ohledání nebo ke snížení důkazní hodnoty jeho výsledků, je třeba na místě mimořádné události respektovat určitá omezení. Na místě mimořádné události je zakázáno zejména:

- Vytvářet nové stopy, tj. kouřit, odhazovat nedopalky, obaly potravin, odkládat oděvní svršky a osobní věci.
- Používat zařízení místností, přístroje a zařízení apod.
- Měnit postavení ovládacích prvků a bezpečnostních zařízení na strojích a zařízeních.
- Vstupovat na místo mimořádné události bez souhlasu nebo výzvy toho, kdo ohledání místa události provádí nebo řídí.

Tyto zákazy platí až do ukončení ohledání a opětovného zpřístupnění místa mimořádné události.

³⁹ Je třeba připomenout, že policie bude zásadně provádět ohledání a povede další šetření jen v případě, bude-li událost kvalifikovat jako trestný čin, resp. nebude-li ještě před začátkem ohledání bezpečně zjištěno, že se o trestný čin nejedná. Policie ohledá vždy místo mimořádné události, došlo-li k těžké újmě na zdraví nebo k usmrcení osoby. V případě havárií bude ohledávat místo mimořádné události, byl-li havárií ohrožen cizí majetek, nebo bylo-li ohroženo zdraví či životy více osob.

Zásady ohledání

Význam ohledání jako jednoho z nejdůležitějších zdrojů důkazů vyjadřují základní zásady ohledání:

- Neodkladnost ohledání – je obecným požadavkem rychlosti a včasnosti zásahu na místě mimořádné události. Materiální situace na místě činu se rychle mění zejména vlivem negativně působících faktorů (povětrnostních podmínek, chemických, fyzikálních a biologických procesů).
- Neopakovatelnost ohledání – je dána tím, že v průběhu ohledání dojde k podstatným a nenávrtným změnám na místě mimořádné události. I když v praxi dochází k tomu, že se ohledání provádí opakovaně, je to jen ve výjimečných případech, kdy až po prvním ohledání vyjdou najevo nové skutečnosti, jejichž podstata či souvislosti by se měly odrazit v místě mimořádné události. Nelze ovšem vyloučit opakované ohledání místa mimořádné události v důsledku nedůsledného nebo nedbalého prvního ohledání.
- Nezastupitelnost ohledání – je dána tím, že informace o situaci na místě mimořádné události a stavu objektů získané přímým pozorováním nelze jiným úkonem plně nahradit. Informace získaná jiným postupem nebo úkonem bude informací zprostředkovanou a jako taková ztrácí částečně svou důkazní hodnotu. Tak by tomu bylo např. v případě, že by ohledání bylo nahrazeno výslechem svědka mimořádné události, který situaci na místě události slovně popíše.

Postup při ohledání

Úspěch a výsledek ohledání je závislý na jeho přípravě. To znamená, že ten, kdo bude ohledání provádět, si musí předem ujasnit důvod, rozsah, postup a cíl ohledání. Předpokládáme, že důvod ohledání je znám již v době přijetí informace o mimořádné události. K zajištění důkazní hodnoty výsledku ohledání je vhodné, aby ohledání neprováděla pověřená osoba osamoceně, ale aby se ohledání, byť jako divák, zúčastnila další osoba, která v případě potřeby potvrdí objektivitu provedeného ohledání. Vhodnou osobou se jeví nejrůznější experti, jakými mohou být bezpečnostní technik, požární technik, safety manager, vedoucí provozu, velitel HZSP apod. Účast takových osob musí být zadokumentována v záznamu o ohledání. Pokud došlo před ohledáním na místě mimořádné události ke změnám, je vhodné přibrat k ohledání osobu, která změny prováděla, nebo která byla změnám přítomna a viděla situaci na místě před změnami.

Rozsah ohledání se zjišťuje orientačním ohledáním místa mimořádné události. Při orientačním ohledání se stanoví postup ohledání. Orientační ohledání se provádí převážně bez vstupu na místo události. Postupem ohledání je stanovení organizace činnosti na místě mimořádné události k naplnění cíle ohledání, tedy rozvření místa události tak, aby žádná jeho část neunikla ohledání a aby nebyly zmařeny stopy, které

se na místě nalézají. Nalézá-li se na místě události zdroj mimořádné události, provede se jeho detailní ohledání.

Dokumentace ohledání

Aby bylo možno výsledky ohledání využít v dalším průběhu šetření mimořádné události, případně též jako důkaz v pozdějším jiném řízení (soudním nebo správním), je třeba ohledání řádně zdokumentovat. Dokumentace musí objektivně zachycovat situaci na místě mimořádné události. Dokumentaci ohledání tvoří:

- Dokumentace písemná (záznam).
- Dokumentace grafická (náčrtek nebo plánek místa nehodové události).
- Fotodokumentace.
- Videozáznam.
- Jiný záznam (dle vývoje záznamové techniky).

Vždy je třeba vyhotovit písemný záznam, ostatní složky dokumentace ohledání jsou vhodné, nikoliv nutné. Je-li místem mimořádné události místo v terénu, je možno dokumentovat polohu místa zakreslením do mapy. K přesnému určení místa v terénu nalézá stále častějšího využití satelitní navigace pomocí přístrojů GPS (Global Positioning System).

Záznam o ohledání musí být srozumitelný a jednoznačný. Musí poskytnout věrný obraz místa mimořádné události. Do záznamu se uvádějí pouze zjištěná fakta, nikoli názory a hodnocení. Nutnými úvodními údaji jsou:

- Důvod ohledání.
- Místo ohledání.
- Čas ohledání.
- Jména přítomných osob.

V popisné části záznamu se uvede:

- Popis místa mimořádné události.
- Situace na místě mimořádné události.
- Popis míst, na kterých byly nalezeny stopy nebo věcné důkazy.
- Negativní okolnosti.
- Další skutečnosti mající příčinný vztah k objasňované mimořádné události, nebo dá-li se příčinný vztah předpokládat.

Negativními okolnostmi jsou míněny takové změny na místě mimořádné události, které jsou v logickém rozporu se vznikem této události nebo s informacemi zjištěnými ohledáním. Jde o neexistenci změn nebo stop, které by vzhledem k ostatním změnám na místě mimořádné události měly existovat, nebo naopak o existenci změn a stop, které by na místě mimořádné události být neměly. Negativní okolnosti vznikají:

- Neodborným zásahem na místě mimořádné události.
- Přírozenými změnami (např. vypaření rozlitých kapalin).
- Nepřírozenými změnami, které jsou většinou způsobeny při odstraňování nebo změnách stop ve snaze mařit objasňování a zakrýt odpovědnost za škodu nebo i odpovědnost trestní.

V závěru je třeba záznam o ohledání opatřit podpisovými doložkami pověřené osoby, která ohledání provedla, a přítomné osoby.

Záznam není třeba sepisovat na místě mimořádné události, ale později v příznivých podmínkách na základě poznámek z ohledání. Ty mohou být ve formě písemné, audiouzáznamu nebo komentovaného videozáznamu. Vhodným a dostupným podkladem pro sepsání záznamu je i fotodokumentace.

Grafická dokumentace v podobě plánu nebo náčrtku místa mimořádné události vhodně (a mnohdy nutně) doplňuje dokumentaci písemnou i fotodokumentaci, neboť dokumentuje rozměry na místě události, zejména rozměry významné pro hodnocení mimořádné události. Proto je třeba v grafické dokumentaci rozměry zaznamenat, nebo ji provést v měřítku. Na většině pracovišť jsou plány objektů, pracovišť a stavenišť k dispozici. V takových případech je možno použít k zaznamenání stavu místa mimořádné události kopie těchto plánů.

Fotodokumentace je dnes běžnou a dostupnou součástí ohledání. Její provedení je snadné a náklady minimální. Přitom vypovídací hodnota fotografie je vysoká. To ovšem za předpokladu, že je dobře provedena. Není výjimkou, že teprve při prohlížení fotografií se zjistí důležité okolnosti, které při ohledání unikly pozornosti ohledávajícího. V dokumentaci se fotografie opatří legendou a k tomu je třeba si již při pořizování záběrů vést poznámky, co je na kterém záběru zachyceno. Při volbě záběru je třeba postupovat od obecného k zvláštnímu, tedy situovat do okolí místo mimořádné události s velkým odstupem nebo širokoúhlým objektivem (pozor na zkreslení), snímat polodetail (např. zařízení jako celek) a nakonec detail zjištěných stop (např. krevní stopa na části snímaného zařízení).

Využití videozáznamu je obdobné jako u fotografie. Videozáznam bude efektivnější při ohledání rozsáhlého objektu. O technice záběru platí to, co bylo uvedeno u fotodokumentace. Důležité je, aby záznam byl souvislý, ucelený a pouze s účelným a citlivým užíváním transfokátoru. Videozáznam má výhodu možnosti synchronního komentáře. Nevýhodou je větší časová náročnost při vyhodnocování záznamu.

Zaměření ohledání

Při ohledání místa mimořádné události je třeba ohledání zaměřit zejména na:

- Identifikační údaje strojů, zařízení, nářadí a nástrojů, které zřejmě byly nebo mohly být zdrojem mimořádné události (typ, rok výroby, výrobní/inventární číslo).
- Technický stav, vybavenost a používání ochranných zařízení na strojích a zařízeních, na nichž došlo ke zranění osob.
- Polohu ovládacích prvků strojů a technických zařízení.
- Kontrolní a pojistné přístroje a zařízení těchto strojů, potrubí a kabely a jejich připojení k energetickým zdrojům a rozvodům, aby mohl být zjištěn jejich stav a poloha v době mimořádné události.
- Stav předepsaných osobních ochranných pracovních prostředků, pokud jimi byl poškozený vybaven a zůstaly na místě události.
- Stav a kvalitu nářadí, nástrojů a pomůcek, kvalitu použitých surovin apod.
- Stopy vzniklé v průběhu mimořádné události, úlomky strojů a nářadí, stopy krve, části tkání, a na jejich lokalizaci.
- Celkovou situaci na pracovišti, průchody mezi stroji a zařízeními, stav podlahy, osvětlení, větrání apod.
- Existenci a stav bezpečnostních zařízení a zábran.
- Umístění a stav bezpečnostních značek a signálů na místech, která takové označení vyžadují.

Došlo-li při mimořádné události k usmrcení poškozeného na místě, je třeba ohledání mrtvého zaměřit zejména na:

- Polohu těla vzhledem ke zdroji rizika (např. zařízení) a vzhledem ke všem ostatním předmětům, které mohou s událostí nějak souviset.
- Zranění na těle, cizí předměty v těle mrtvého (odmrštěné nástroje a nářadí či jejich části, části materiálu, stopy po úrazu elektrickým proudem, poleptání apod.).
- Stav oděvu, krevní stopy a části oděvu na strojích nebo zařízeních, jiné předměty v blízkosti těla.
- Stav osobních ochranných pracovních prostředků, které jsou na těle.

Zajištění stop z místa mimořádné události

Nález stopy je třeba při ohledání zadokumentovat (do záznamu, plánu, fotograficky apod.). Jedná-li se o stopu, kterou je možno zajistit *in natura* (např. odlétnuvší součást zařízení, stroje apod.) pro případné znalecké zkoumání nebo jako věcný důkaz, je třeba tuto stopu řádně označit, aby nemohlo dojít k její záměně.

Výslechy osob

Nezastupitelným zdrojem informací a případně i důkazů při objasňování mimořádných událostí jsou výpovědi osob. Výpověď osob tvoří základ pro další vyšetřovací úkony. Některé úkony (např. rekonstrukce) jsou bez podložení výpovědí neproveditelné.

Cílem výslechu je získat co nejpřesnější a nejpravdivější výpověď o tom, co vypovídající ví o okolnostech, vzniku, průběhu, následcích či příčinách události. Vědomost může vypovídající nabýt tak, že ji chápal svými smysly (zrakem, sluchem, čichem), nebo že informaci získal zprostředkovaně např. od další osoby.

Při získávání svědecké výpovědi od kohokoliv je třeba mít na paměti jednu velmi důležitou ústavní zásadu, která musí být uplatňována nekompromisně ve všech procesně právních předpisech (občanském, správním, trestním) a je třeba ji analogicky a přiměřeně uplatňovat i při objasňování příčin a okolností mimořádných událostí zaměstnavatelem. Výpověď může svědek odepřít, pokud by svou výpovědí způsobil nebezpečí trestního stíhání sobě nebo osobám blízkým⁴⁰.

Na kvalitu podané výpovědi má velký vliv doba, která uplynula od vnímání nějaké skutečnosti do její reprodukce. Dle možnosti je třeba svědky a poškozeného vyslechnout bezprostředně, resp. jak je to možné co nejdříve po události. Taková bezprostřední výpověď je zpravidla spontánní, není ovlivněna spekulacemi jak vlastními, tak sdělenými. Využije se tak prvotní zájem svědka svěřit se někomu se svým zážitkem. To platí tím více, čím je průběh události i událost sama dramatičtější. Svědek ale nesmí být v době výslechu ještě pod vlivem šoku, který prožil. Přesvědčovat k výpovědi osobu v takovém stavu je přinejmenším v rozporu s etickými zásadami. Výpověď, pokud by se podařilo ji vůbec získat, by zřejmě neměla žádnou nebo velmi malou důkazní hodnotu. Pokud by bylo nutné vyslechnout poškozeného při jeho pobytu ve zdravotnickém zařízení, je tak možno učinit jen se souhlasem ošetřujícího lékaře, případně i za jeho účasti při výslechu.

Oddalováním výslechu dochází ke zkreslení výpovědi, a to ať vědomému či nevědomému. K vědomému zkreslení dochází zejména u osob, které mají nějaký podíl

40 Okruh osob blízkých je vymezen v § 116 občanského zákoníku takto: „Osobou blízkou je příbuzný v řadě přímé, sourozenec a manžel; jiné osoby v poměru rodinném nebo obdobném se pokládají za osoby sobě navzájem blízké, jestliže by újmu, kterou utrpěla jedna z nich, druhá důvodně pociťovala jako újmu vlastní.“

na vzniku mimořádné události, nehodu zavinily, nebo chtějí jen chránit nepravdivou či nepřesnou výpověď původce. Nevědomě bývá výpověď zkreslena prožitým šokem, který často způsobí vytěsnění prožitku z vědomí. Častěji bývá zkreslení výpovědi způsobeno diskusemi a hodnocením události v kolektivu spoluzaměstnanců a spekulacemi o příčinách mimořádné události. Výsledky takového hodnocení naruší a pozmění obraz prožitku ve vědomí. Významně se na zkreslení vjemu podílí i paměť. Z uvedených důvodů je třeba před započítím výslechu nebo v jeho úvodní části zjistit, jaký je momentální psychický a fyzický stav vyslychaného a jaký je jeho vztah k objasňované události. Podle toho potom je třeba výslech vést a jeho výsledky hodnotit.

Výslech by neměl vést ten, kdo má k předmětu objasňování nebo k vyslychané osobě či k účastníkovi mimořádné události nějaký osobní vztah. Takový vztah nezaručuje objektivní objasnění mimořádné události, zavdává příčinu k napadání výsledku objasňování tím, kdo se cítí výsledkem poškozen a v neposlední řadě přivádí vyslychajícího do nepříjemné situace. Vyslychající se musí na výslech řádně připravit. Musí být před započítím výslechu obeznámen s předmětem výslechu. Znamená to, že musí znát místo mimořádné události, o které bude svědek nebo poškozený vypovídat, musí mu být známa problematika pracovní činnosti, při které k mimořádné události došlo, a základní předpisy, které předmětnou pracovní činnost upravují. Musí znát organizační strukturu pracoviště, na kterém k události došlo, a vztahy nadřízenosti a podřízenosti (pro předběžné posouzení možné odpovědnosti ve vztahu k taktice vedení výslechu).

Stejně jako osoba a osobnost vyslychajícího, ovlivňuje postoje a zájmy vyslychaného výslechové prostředí. Nelze očekávat dobrý výsledek výslechu, provedeného vstojem na dílenské chodbě, v hluku provozu a s množstvím kolemjdoucích, resp. posluchačů. K výslechu je třeba zvolit vhodnou místnost, kde nebude průběh výslechu nijak rušen. Vhodné výslechové prostředí má význam pro uvolnění vyslychané osoby a její lepší soustředění na předmět výpovědi. Stejný význam má i volba počtu osob, které se výslechu účastní. Tento počet je třeba omezit na minimum. Naopak by neměl výslech být prováděn pouze za přítomnosti vyslychajícího a vyslychaného. Výsledek takového výslechu může být později napaden jako neobjektivní. Mezi osobami, které jsou výslechu přítomny, nemůže být další osoba, která je ve stejném případě rovněž svědkem nebo účastníkem. To by vedlo k vzájemnému ovlivnění výpovědí.

Analýza výpovědi v průběhu výslechu

Analýza výpovědi v průběhu výslechu je důležitou podmínkou a taktickým postupem k získání pravdivých a věrohodných výpovědí i k vyjasnění postoje zvoleného vyslychaným. Analýza spočívá v rozboru informací poskytovaných vyslychaným, jejich průběžným porovnáváním s dosud získanými informacemi, v porovnávání právě předávaných informací mezi sebou a ve vyjasnění dalších okolností.

Aby výsledek analýzy dosáhl účelu, je třeba od vyslýchaného zjistit, zda uváděné informace jsou původní nebo odvozené, a případný zdroj těchto informací. Nedá se opomenout ani zjištění okolností, za jakých vyslýchaný vnímal jevy či skutečnosti, o nichž hovoří.

Účelem analýzy výpovědi je zjištění shody nebo rozporu mezi právě předávanými informacemi a dosud shromážděnými materiály, stejně jako nalezení shody nebo rozporů uvnitř samotné výpovědi vyslýchané osoby. Na základě těchto zjištění pak vyslychající jejich okamžitým hodnocením dospěje k závěru, z jakých důvodů ke shodě, rozporům či mezerám v informacích, jež uvádí vyslýchaný, došlo. Může též posoudit, zda vyslýchaný vypovídá o všech skutečnostech, jež mohl vnímat, případně zda vypovídá o skutečnostech, které vnímat nemohl.

Výsledek analýzy vede vyslychajícího k operativnímu rozhodnutí o dalším postupu nejen probíhajícího výslechu, ale i dalších úkonů. Analýzou výpovědi je možno dospět k závěru, zda vyslýchaný:

- Vypovídá pravdivě a úplně.
- Vědomě vypovídá nepravdivě.
- Chce vypovídat pravdivě, ale jeho výpověď je v rozporu s dosud získanými informacemi, nebo je neúplná v důsledku zapomínání nebo neschopnosti reprodukovat vnímané.

Jestliže vyslýchaný nemá zájem vypovídat pravdivě a pravdivě nevypovídá, musí si vyslychající uvědomit, že lživá výpověď je v podstatě balancování mezi pravdivým odrazem skutečnosti ve vědomí vyslýchaného a mezi vymyšlenou variantou tohoto odrazu, nebo doplňováním vymyšlené legendy, jejíž odraz ve vědomí vyslýchané osoby chybí.

Právě tato skutečnost dává možnost odhalit lživou výpověď pomocí využití rozporu mezi výpovědí a důkazy, či pomocí rozporů ve výpovědi samé. Lživá výpověď je vyslychaným doplňována a rozšiřována na základě informací, jež poskytuje vyslychající vyslychanému (i nechtěně), a detaily legendy jsou vylepšovány, tedy měněny. Požadavek vyslychajícího na opakování některých pasáží výpovědi vede k tomu, že vyslychaný se dopouští v dalších verzích výpovědi nepřesností, které již nedovede vysvětlit. Taková situace dává vyslychajícímu možnost přesvědčit vyslychaného předkládáním faktů a upozorňováním na rozpory ve výpovědi, že záměrně nepravdivou výpověď ničeho nedosáhne, neboť není složité nepravdu odhalit.

Osoby, které chtějí vypovídat pravdivě, ale dříve vnímané skutečnosti jsou deformovány zapomínáním, ovlivněním jinými informacemi (spekulacemi), nebo nejsou schopny tyto skutečnosti srozumitelně reprodukovat, potřebují pomoc vyslychajícího. Pomoc vyslychajícího musí přijít ve vhodné době, zásadně však až po pokusu získat výpověď bez takové pomoci. Pomoc musí být nenásilná, nesuggestivní, pro

vyslýchaného téměř nepostřehnutelná, aby vyslýchaný sám přišel na to, že ve své výpovědi udělal chybu a jakou. Nedoporučuje se při výslechu spěchat a žádat vyslýchaného, aby mluvil jen k předmětu výslechu, pokud od předmětu zcela zjevně neodbočuje.

Vybavování dříve vnímaných skutečností lze pomoci vyvoláním představy podružných, vedlejších okolností. Nemůže-li si vyslýchaný vzpomenout na den nebo čas, započne se výslech k tomuto údaji odvíjet ode dne, se kterým je pro vyslýchaného spojena nějaká příjemná nebo nepříjemná událost apod. Při určování časového sledu děje se započne epizodou, časově přesně určenou, např. příchodem do zaměstnání, obědem apod. Vybavení dříve vnímaného lze pomoci i předložením známých věcí, jež jsou ve spojení s objasňovanou událostí. Často vyslýchaný hledá správný výraz nebo formulaci toho, co chce říci. To se vyskytuje nejčastěji při popisování osob, věcí nebo pozorovaných činností a jevů. V takovém případě je vhodné vyzvat vyslýchaného, aby věc nakreslil, případně aby jev nebo činnost předvedl. Osvědčenou metodou je pokračování (prověrka) výpovědi na místě události.

Aby výpověď měla důkazní hodnotu a bylo ji možno případně použít jako listinný důkaz i v dalším řízení, je třeba, aby byla náležitě zadokumentována. I když je za určitých podmínek možno použít k dokumentaci výpovědi prostředek audiovizuální techniky, tradičně se používá záznamu výpovědi písemnou formou. Výpověď je možno zaznamenat doslova, nebo alespoň stručně a výstižně zaznamenat obsah výpovědi. S obsahem záznamu výpovědi musí být ten, kdo výpověď učinil, seznámen a souhlas s obsahem stvrdit podpisem. Podpisem opatří výpověď i ten, kdo výslech provedl, případně též další osoby, které byly výslechu přítomny. Záznam o výpovědi musí obsahovat identifikační údaje vyslýchaného, místo a čas výslechu. Jestliže vyslýchající zaznamenává výpověď magnetofonem nebo pořizuje-li videozáznam, může tak učinit pouze se souhlasem vyslýchaného. V záznamu musí být souhlas jednoznačně uveden.

Zaměření výslechu

Výslech poškozeného/původce musí směřovat zejména ke zjištění:

- Času a místa mimořádné události.
- Jeho připravenosti k výkonu povolání, znalosti předpisů o bezpečnosti práce, kdy, kým a jakou formou s nimi byl seznámen.
- Stavu stroje nebo zařízení, na kterém pracoval, zda zjistil v minulosti nebo krátce před mimořádnou událostí nějaké nedostatky, jaká byla přijata opatření k jejich odstranění.
- Jak trávil volný čas před nástupem do práce, zda odpočíval, požil-li alkoholické nápoje a v jakém množství.

- Jak probíhal pracovní den do okamžiku vzniku mimořádné události, zda nedošlo ke konfliktu mezi ním a jeho nadřízeným, spolupracovníky apod., jaké úkoly plnil, zda se jednalo o úkoly obvyklé, kdo a jakou formou nařídil činnost, při které došlo k nehodové události.
- Jaký byl jeho subjektivní zdravotní a psychický stav krátce před mimořádnou událostí.
- Zda na stejném místě nebo při stejné činnosti došlo již dříve k obdobné mimořádné události, jaké byly její příčiny a jaká byla přijata preventivní opatření.
- Průběhu mimořádné události (tato část výpovědi bývá nejméně přesná a poškozený i původce si nejméně pamatují).

Dále je třeba vyslechnout jako svědky osoby, které vznik a průběh mimořádné události sledovaly a osoby znalé poměrů. Dále se výslech zaměří ke zjištění:

- Zda v době mimořádné události anebo krátce před ní byla zjištěna nějaká závada na příslušném zařízení či stroji, chyba v technologii nebo v pracovním postupu, kým byla zjištěna, komu oznámena a jaká byla učiněna opatření.
- Pokynů mistrů, vedoucích pracovních čet, dílovedoucích a dalších vedoucích pracovníků, vztahujících se k zajištění bezpečnosti při práci, pracovnímu postupu, k místu mimořádné události, případně ke zdroji události.
- Kdy a jakým způsobem byl poškozený/původce seznámen s bezpečnostními předpisy, technickými normami a pokyny pro obsluhu stroje nebo zařízení, resp. pro činnost, kterou prováděl; zda si tyto předpisy, normy a pokyny skutečně osvojil a zda byl nadřízenými veden k tomu, aby je dodržoval.
- Zda poškozený/původce splňuje kvalifikační předpoklady pro obsluhu stroje, zařízení nebo výkon činnosti.
- Kdy a kdo před nehodou vykonával prohlídku pracoviště nebo zdroje mimořádné události, jaké závady zjistil, koho na ně upozornil, proč je sám na místě neodstranil.
- Jak dlouho vykonával poškozený/původce práci, při které došlo k mimořádné události.
- Zda měl poškozený přiděleny pracovní pomůcky a osobní ochranné pracovní prostředky, které k výkonu práce náležely a zda tyto pomůcky v době mimořádné události skutečně používal.
- Zda poškozený/původce nevykonával práci ve stavu tělesného a psychického oslabení (únava, vliv alkoholu, jiných návykových látek, léků apod.).
- Zda na místě mimořádné události nedošlo před ohledáním ke změnám, a pokud ano, o jaké změny se jednalo a jaký byl původní stav po nehodové události.

Konfrontace

Jestliže výpovědi osob (svědků, poškozeného, původce, osoby znalé poměrů) nesouhlasí v závažných okolnostech, mohou být postaveny sobě tváří v tvář. Konfrontace se může provést až poté, kdy každá z osob, jež mají být konfrontovány, byla již dříve vyslechnuta a o její výpovědi byl sepsán protokol. Při konfrontaci se vyslýchaná osoba vyzve, aby druhé osobě vypověděla v přímé řeči své tvrzení o okolnostech, v nichž výpovědi konfrontovaných osob nesouhlasí, popřípadě, aby uvedla další okolnosti, které s jejím tvrzením souvisejí a o kterých dosud nevypovídala. Osoby postavené tváří v tvář si mohou klást vzájemné otázky jen se souhlasem vyslychajícího. Zkušenosti ukazují, že je vhodné vyzvat k výpovědi tu z osob, jejíž předchozí výpověď je méně věrohodná.

Konfrontace je úkon poměrně výjimečný a jeho plné uplatnění je až v ústním jednání ve správním řízení nebo v řízení před soudem. V průběhu objasňování příčin a okolností mimořádné události by se k tomuto úkonu mělo přistupovat jen ve výjimečných případech.

Prověrka výpovědi na místě

Prověrka výpovědi na místě je specifický vyšetřovací úkon, který v sobě nese prvky ohledání místa události, výpovědi a rekonstrukce. Přistupuje se k ní v případech, kdy je třeba prověřit výpovědi dříve vyslechnutých osob na místě, kde k mimořádné události došlo, nebo na místě, které má k události vztah, a to za předpokladu, že vyslechnutá osoba byla na tomto místě účastníkem události, nebo jí byla alespoň přítomna.

Účelem prověrky výpovědi na místě je upřesnění předchozí výpovědi umožněním vyslychanému, aby si na místě samém prožitoú událost lépe znovu vybavil. Prověrka výpovědi může vést i k nálezů některých stop, které při ohledání nebyly zjištěny. Úkon probíhá tak, že vyslychaný v podstatě ve stručnosti zopakuje svou výpověď, kterou již dříve podal, tuto výpověď upřesní podle detailů na místě události, resp. demonstruje některé prvky události. Prověrkou výpovědi na místě je možno odhalit rozporů ve výpovědi vyslychaného a ty vhodnými otázkami odstranit nebo vysvětlit. Při tomto úkonu se daří odhalit výpověď nepravdivou.

Stává se, že již první výslech osoby bude proveden na místě události. To zejména při objasňování méně závažných případů, když k výslechu dochází bezprostředně po události. Tento postup nelze vyloučit, není však taktický. Vliv místa události se může projevit negativně na kvalitě podané výpovědi, jak již bylo výše vysvětleno. Mimo písemný záznam o průběhu prověrky výpovědi na místě je velice efektivní videozáznam úkonu. Platí i zde to, co je o videozáznamu uvedeno u dokumentace místa události.

Vyšetřovací pokus a rekonstrukce

Vznikne-li pochybnost o možnosti nebo nemožnosti existence nějaké skutečnosti, události nebo jevu, o které svědčí určitý důkaz, vzniká nutnost prověření tohoto důkazu experimentální cestou. Vyšetřovací pokus (experiment) je možno provést jak v podmínkách reálných, tak v podmínkách uměle vytvořených (laboratorních). Nejčastěji se vyšetřovacím pokusem ověřuje, zda někdo mohl něco vidět, slyšet, někam dosáhnout, zda mohl za určitý čas někam dojít apod. Vyšetřovací pokus je velmi efektivní metodou ověření pravdivosti či správnosti výpovědi. Proto se zásadně provádí až po podání výpovědi (výpovědí) k odstranění či potvrzení pochybnosti o její správnosti. Nelze experimentovat tak, aby došlo k ohrožení osob či majetku. Úkon se dokumentuje písemně záznamem a vhodná je i dokumentace fotografická či prostředky audiovizuální techniky podle toho, co je předmětem experimentu.

V případech událostí s menšími rozsahy následků (např. provozní nehody, pracovní úrazy apod.) se při vyšetřování přistupuje k rekonstrukci. Tou se rozumí obnovení a zkoumání věcné situace na místě události, nebo obnovení materiálních objektů a jiných skutkových okolností, významných pro zjištění příčin události. Rekonstrukce obsahuje prvky výslechu, ohledání, prověrky výpovědi na místě a nezřídka se v rámci rekonstrukce provádí vyšetřovací pokus. Je považována za jeden z nejobtížnějších, ale také velmi efektivních vyšetřovacích úkonů. Klade značné nároky na organizační schopnosti a zkušenosti pověřené osoby.

Cílem rekonstrukce je doplnit chybějící prvky vzniku a průběhu mimořádné události po vyhodnocení získaných informací a důkazů z výpovědí poškozeného, svědků, ohledání a dalších již provedených úkonů. Rekonstrukci je možno zásadně provádět jen na tom místě, kde k události došlo. Pokud na místě došlo ke změnám, které by výsledek rekonstrukce mohly ovlivnit, je třeba napřed rekonstruovat místo samé, uvést ho do stavu před vznikem mimořádné události, a pak teprve přistoupit k rekonstrukci nehodového děje.

Rekonstrukce se provádí tak, že ten, kdo byl události přítomen nebo na ní byl účasten, předvádí svou činnost na místě události před jejím vznikem a v době jejího vzniku. Pokud bylo na místě události v době mimořádné události více osob, provádí se rekonstrukce postupně, zásadně vždy jen s jednou z těchto osob. Ostatní osoby nahradí figuranti, tj. osoby na události nezúčastněné. Ten, kdo předvádí své jednání na místě události, současně slovně popisuje, co dělaly ostatní přítomné osoby. Pověřená osoba, která úkon provádí, podle tohoto popisu řídí činnost figurantů. Pověřená osoba pokládá doplňující otázky a požaduje vysvětlení případných rozporů mezi původní výpovědí nebo jiným zjištěním a výsledkem rekonstrukce.

Tento úkon se v praxi provádí jen u závažných a skutkově složitých událostí. K jeho provedení jsou potřeba již značné zkušenosti s objasňováním nehodových událostí. Špatně provedená rekonstrukce může dosavadní výsledky objasňování zcela znehodnotit. Na provedení rekonstrukce je třeba se řádně připravit a řádně ji naplánovat.

Základní podmínkou pro úspěšné vedení rekonstrukce je výborná znalost dosavadních výsledků objasňování nehodové události. Pokud lze předpokládat, že v průběhu objasňování bude třeba vypracování znaleckého posudku, je vhodné přizvat k rekonstrukci znalce a ponechat mu možnost pokládat předvádějícím osobám otázky.

4.9.6 Technický přístup při vyšetřování příčin průmyslových havárií

Výše uvedený postup pro vyšetřování mimořádných událostí lze považovat za obecně platný pouze pro události s relativně malými následky – například vznik provozních nehod s následkem úniku chemických látek nebo médií, poškození zařízení a strojů, vznik úrazů nebo akutních otrav u jednotlivců, popř. usmrcení jednotlivců bez dalších doprovodných následků na ostatních osobách, majetku nebo bezpečnosti provozu. Ovšem v případě závažných havárií, kdy rozsah následků je mnohem větší ať již svým významem (rozsahem škod), tak i šíří zasažení okolí⁴¹, je nutné výše uvedený postup rozšířit o vyšetřování technických prvků, chování pracovníků před vznikem mimořádné události, organizační zajištění bezpečnosti provozu v podniku ze strany managementu, tak i stránky havarijní připravenosti. Pro tento účel navrhl Ferry základní postup (Ferry, 1988), který může být vhodně doplněn o dílčí doporučení uvedená v kapitole 4.9.5. Vyšetřování průmyslové havárie by mělo postupovat v těchto krocích:

1. Stanovení cílů vyšetřování.
2. Příprava vyšetřování a sestavení pracovního týmu.
3. Nashromáždění potřebných informací.
4. Analýza nashromážděných dat.
5. Rozvinutí hypotézy.
6. Analýza scénářů a závěrů.
7. Zpracování zprávy o šetření.
8. Navržení nápravných opatření a doporučení.
9. Realizace nápravných opatření.
10. Sledování účinnosti realizovaných opatření.
11. Kritické zhodnocení průběhu vyšetřování.
12. Dodatečné prověření nápravných akcí.

O jednotlivých krocích bude blíže pojednáno níže popř. v následujících kapitolách.

⁴¹ Například osob uvnitř i vně podniku, únik nebezpečných chemických látek do životního prostředí či velké materiální ztráty jak na zařízení a budovách v podniku, tak i na majetku obyvatelstva žijícího v okolí podniku.

Stanovení cílů vyšetřování

Aby mohlo být vyšetřování mimořádné události úspěšné, je nutné hned na začátku vědět, na jaké základní otázky je potřeba nalézt odpovědi. Mezi ty nejzákladnější obvykle patří:

- Jaký problém nebo situace vedly ke vzniku mimořádné události?
- Je potřeba prezentovat zpětnou vazbu a ponaučení pro zamezení vzniku podobné nehody v budoucnu?
- Je potřeba prověřit stav provozní dokumentace?
- Je potřeba prověřit odpovědnosti pracovníků a jejich pochybení?
- Hledáme přímého původce (viníka) mimořádné události?
- Je snahou odhalit nedostatky v řízení a administrativě, které mohly přispět ke vzniku nehody a následným ztrátám?

Z toho je patrné, že povaha závěrů vyšetřování bude vždy záviset především na účelu a zadání. Je pochopitelné, že pro odlišné cíle poskytne vyšetřování různé závěry. V praxi ale obvykle sledujeme více cílů současně, respektive provádíme komplexní vyšetřování. Snahou je tak získat zevrubné informace o průběhu vzniku a rozvoje nehody, o všech relevantních iniciačních událostech a o jejich příčinách.

Příprava vyšetřování a sestavení pracovního týmu

Nejlepší způsob, jak zvládat havárie a nehody, je být na ně připraven. A to platí také o jejich vyšetřování. Proto je vhodné mít v podniku zpracovanou přehlednou interní směrnici, která obsahuje popis základních procedur, které je nutné při vyšetřování vykonat. Na základě těchto základních požadavků je pak potřeba při každé mimořádné události vypracovat konkrétní plán vyšetřování, který bude zohledňovat specifika dané události (např. technologii, rozsah škod apod.). Plán by neměl obsahovat jen povrchní informace, a na druhé straně by také neměl obsahovat komplexní naprosto vyčerpávající informace a požadavky na vyšetřování. Rozsah a obsah plánu by měl být úměrný závažnosti dané mimořádné události, a proto by neměl být nikdy tak složitý, že by to komplikovalo jeho použití. V plánu by se kromě popisu činností a harmonogramu prací měly objevit také požadavky na personální zajištění vyšetřování a v neposlední řadě také na finance potřebné pro zajištění podpůrných služeb, jakými je doprava, fotodokumentace, různé rozborů a expertízy atd. Důležitou součástí plánu by měl být také definovaný způsob předávání informací od vedoucího vyšetřovacího týmu směrem k managementu podniku (na straně managementu by měla být určena jedna styčná osoba) nebo dotčeným složkám státní správy v průběhu vyšetřování.

Nashromáždění potřebných informací

Shromáždění všech faktů a potřebných informací je stěžejní úkol vyšetřovatelů. Sběr by měl probíhat systematicky podle procedur předepsaných v plánu vyšetřování. Na základě průběhu vyšetřování je potřeba některé informace zjišťovat znovu a znovu, či je ověřovat z různých zdrojů. Proto není radno, zejména informace získané pohovory s účastníky nehody, považovat za definitivní. Informace, které mohou být ve formě záznamů, výstupů z měření či fotografií, je vhodné kombinovat.

Rozvinutí hypotézy

Analýzováním dat lze dospět k závěrům, co se stalo a proč. O této fázi vyšetřování hovoříme jako o rozvinutí hypotéz, která si klade za cíl definovat možné scénáře mimořádné události. Přitom je potřeba zohledňovat všechny významné skutečnosti zjištěné při vyšetřování, avšak je nutné striktně dodržovat profesionální přístup a příliš nepodléhat subjektivním dojmům. I v této fázi, podobně jako při analýze dat, můžeme zjistit, že je potřeba získat další fakta, anebo že některé skutečnosti je potřeba podrobit nové analýze. Proto nemusí být ničím zvláštním, že se vyšetřování vlastně vrátí zpět do fáze sběru dat nebo k jejich analýze.

Analýza scénářů a závěrů

Tento krok vychází z dosavadních prozatímních závěrů, které vzešly z rozvinutých hypotéz. V této fázi již shromažďování dat pomalu končí a nastává fáze definování jednoznačných závěrů vyšetřování, na kterých se shodnou všichni členové vyšetřovacího týmu. Obvykle se při této fázi diskutují dílčí závěry a hledá se nejpravděpodobnější scénář havárie. Shodnou-li se vyšetřovatelé na scénáři mimořádné události, diskuse dále pokračuje v objasnění jejích příčin (Ferry, 1988). Blíže o této fázi pojednává kapitola 4.9.7.

Analýza scénářů a závěrů se musí opírat především o zhodnocení technických, technologických a environmentálních aspektů, které mohly mít možný vliv na vznik a průběh havárie. Pro tento účel bylo definováno několik doporučení (Ferry, 1988), které by měli vyšetřovatelé vzít v úvahu ať již jakožto jednotlivci, tak i jako celý vyšetřovací tým dohromady. Tyto doporučení zní:

- Zhodnoťte všechny vnější podmínky, které mohly mít vliv na vznik a rozvoj mimořádné události a neprověřujte jen samotné místo mimořádné události. Při tomto postupu uvažujte, jaké podmínky panovaly v okamžiku události (počasí, osvětlení, provoz vozidel apod.).
- Zvažte, co se stalo nebo nestalo s jednotlivými částmi pracovního systému, a tedy co v okamžiku nehody fungovalo a co ne, a vše pečlivě zdokumentujte (včetně pořízení fotodokumentace). V tomto směru jsou důležité všechny

informace, a ne jen ty, které by mohly na první pohled vést k odhalení příčiny havárie (např. zjištění, že určitá část systému nepracovala).

- Proveďte důkladnou expertní prohlídku podezřelých systémů (v týmu) včetně podsystémů, a to kousek po kousku a držte se technologického schématu (postup procesu, tok médií, energií).
- Pokud je to možné, obnovte funkci všech částí systému, které byly zasažené mimořádnou událostí a důkladně sledujte, které části nefungují správně nebo dokonce chybí. Při této operaci velmi dbejte na to, aby se mimořádná událost neopakovala, či dokonce nevznikla havárie ještě horších následků.
- Neodpojujte žádné části systému, pokud to není nezbytné z bezpečnostních důvodů, nebo z důvodů detailního prověření technického systému.
- Nedělejte žádné zásahy ani analýzy systému, pokud k tomu nemáte dostatečnou technickou způsobilost – každé vyšetřování má být týmovou prací, takže si do svého týmu angažujte odborníky, kteří jsou schopni kvalifikovaně vykonávat jednotlivé úkony a jsou schopni posoudit stav zkoumaného systému.
- Dejte pozor na přeceňování nebo naopak podceňování některých zjištěných faktů a nevyvozujte ihned závěry.

Pro analýzu scénářů lze využít také řadu osvědčených postupů a metod, jakými jsou metody HAZOP (viz Příloha P-4) nebo složitá ale velice exaktní metoda MORT.

4.9.7 Analýza zjištěných skutečností a vyhodnocení výsledků objasňování mimořádných událostí

Provedení úkonů spojených s vyšetřováním mimořádné události je třeba završit vyhodnocením výsledků objasňování pomocí analýzy zjištěných skutečností. Cílem tohoto procesu je poznání okolností a příčin mimořádné události. Je to velmi náročný proces, který vyžaduje určité zkušenosti odborné i životní (Kučina, 2007).

Analýza zjištěných skutečností je proces, který vyžaduje mít k dispozici již dostatek nashromážděných dat a poznatků, a který zahrnuje jejich mentální zvážení. To je založeno na pečlivém uvážení a logickém posouzení souvislostí všech zjištěných okolností mimořádné události jednotlivě a v jejich souhrnu. Tato první fáze analýzy v podstatě slučuje získané informace s úvahami a zkušenostmi vyšetřovatelů a často vede k navrhování nových otázek a s nimi spojených požadavků na další doplňující informace. Analýza by měla směřovat k navržení určitých závěrů, které poslouží k rozvinutí hypotéz (Ferry, 1988).

Při rozvinutí hypotéz se postupuje tak, že jeden z vyšetřovatelů, který je tímto pověřen, posoudí a vyhodnotí jednotlivé důkazy obsažené v podkladech shromážděných v průběhu objasňování (ohledání, výsledky, listiny a další). Výsledek tohoto hodno-

cení pochopitelně závisí na jeho objektivitě. Stává se, že tato osoba si již v počátku objasňování na základě prvotních informací vytvoří svou představu o příčinách události, a tu nechce opustit ani při hodnocení výsledků objasňování. V důsledku toho dochází k takovým chybám, že při hodnocení nepřihlédne k důkazům, které do této představy nezapadají. Takový postup výsledky objasňování může znehodnotit. Proto jsou předložené návrhy hypotéz dále diskutovány uvnitř vyšetřovacího týmu ve snaze shodnout se na jednom konkrétním scénáři dané mimořádné události, což ve finále umožní dopátrat se pravé příčiny či příčin dané mimořádné události. Podrobná analýza zjištěných okolností a příčin mimořádné události se často provádí i porovnáním s jinými podobnými událostmi v podniku, které mohou být výborným vodítkem při stanovování scénáře.

Zpráva o vyšetřování mimořádné události

Zpráva o vyšetřování mimořádné události má přinášet všechny výstupy z proběhlého vyšetřování – tedy zápisy z jednání a výslechů personálu, plný rozsah analýzy dat, navržené hypotézy a jejich diskusi. Nedílnou součástí zprávy je stručný závěr, který rekapituluje to nejdůležitější a podává odpovědi na otázky položené na začátku vyšetřování.

Každá zpráva o vyšetřování mimořádné události, zvláště pak závažné průmyslové havárie, by měla být završena návrhem nápravných opatření a doporučení. Ty lze právem považovat za nejdůležitější výstup vyšetřování. Zpráva, ve které jsou uvedena pouze fakta o mimořádné události a nejsou v ní vyvozeny důsledky v podobě vhodných opatření, není k ničemu. Stanovení nápravných opatření a doporučení je nutné, protože pouze tak je možné zajistit, aby se podobná událost již neopakovala. Každé doporučení by mělo být soustředěno na odstranění jednoho konkrétního nedostatku. To je důležité zejména z hlediska zajištění přehlednosti a jednoznačnosti. Předložená doporučení musejí být taktéž srozumitelná. Součástí návrhu nápravných opatření ale nemá být finanční rozvaha nebo ocenění materiální náročnosti navržených opatření, protože tyto skutečnosti mohou již předem ovlivnit realizaci navržených opatření. Zcela legitimní však je, pokud budou ve zprávě stanoveny požadavky na personální zajištění realizace navržených opatření i jejich udržování v činnosti během běžného provozu. Tento dokument by měl sloužit jako podpůrný nástroj pro manažery, kteří budou rozhodovat, co, jak a v jakém časovém horizontu se bude realizovat, a kdo za řádnou realizaci příslušných opatření ponese odpovědnost.

4.9.8 Manažerský pohled na provozní nehody a závažné havárie v průmyslu

Nehody, které si vyžádají lidské životy, velké množství zraněných, značné finanční ztráty, anebo poškození složek životního prostředí, obvykle díky tlaku médií a veřejnosti donutí manažery investovat nemalé prostředky na jejich vyšetření. Ovšem nelze zapomínat na to, že další prostředky je nutné vynaložit také na zavedení nápravných

opatření a na sledování jejich účinnosti. Proto je naprosto logické, že si žádná firma nemůže dovolit vynakládat takto vysoké finanční prostředky za všech okolností. To platí především pro vyšetřování nehod s menšími následky, ačkoli i v takových případech by důkladné vyšetření umožnilo odhalit podstatné skutečnosti týkající se nebezpečnosti provozovaných technologických celků, jednotlivých zařízení i pracovních operací, což by mohlo umožnit jejich lepší zabezpečení do budoucna.

Proto se jako efektivní považuje zavedení určitých manažerských přístupů, které umožní provést vyšetřování mnohem rychleji, což náklady na vyšetřování může podstatně snížit. Hlavní myšlenkou tohoto přístupu je to, že nejdůležitější činnosti související s vyšetřováním mimořádné události lze vlastně zjistit před samotným vznikem mimořádné události. Proto se doporučuje, aby byl každý podnik, kde může dojít k nehodě nebo havárii, předem připraven ve čtyřech hlavních rovinách:

- V posouzení, co nehodě může předcházet.
- V průběžném shromažďování důležitých provozních dat.
- V definování preventivních opatření a stanovení režimu jejich udržování v provozuschopném stavu.
- V definování postupů a opatření v případě vzniku mimořádného stavu.

Je nepochybné, že vyšetřování začíná vždy až po vzniku mimořádné události. V takovém případě se vyšetřování stává nezbytným, avšak bez předchozí přípravy jsou vyšetřovatelé nuceni strávit mnoho času sběrem a analýzou dat, aby byli vůbec schopni stanovit směr v postupu vyšetřování. V tomto jejich úsilí jim může výrazně napomoci kvalitně zpracovaná analýza a hodnocení (technologických) rizik, ve které jsou podrobně rozvedeny relevantní scénáře mimořádné události, a identifikovány možné iniciační zdroje a spouštěcí události. Vyšetřovatelé tak mohou již na základě zhodnocení následků či po ohledání místa havárie vyloučit některé scénáře, čímž se situace značně zjednoduší. Po té nastává fáze sběru informací, při které by se měly shromažďovat především ty informace, které mohou potvrdit, či vyvrátit uvažovaný havarijní scénář. Na začátku vyšetřování proto nemá smysl ztrácet čas získáváním zdánlivě méně důležitých či nepodstatných informací. Ty mohou hrát roli samozřejmě při objasňování příčin, to je však krok, který přichází na řadu až po potvrzení příslušného scénáře události. Pro definování nápravných opatření mohou podobným způsobem posloužit právě opatření navrhovaná již dříve coby opatření preventivní. Ne vždy lze sice tohoto způsobu takto jednoduše využít, nicméně je potřeba mít na paměti, že preventivní opatření byla navržena na základě dřívějšího zjištění nedostatků v provozu daného technologického celku, jeho údržbě anebo v organizaci a řízení podniku.

Smysluplnost a efektivnost tohoto postupu se však opírá o proaktivní manažerský přístup. Bezpečnost totiž musí vždy vycházet nikoli odspoda organizační struktury, ale z jejího vrcholu. V tomto směru se nejedná jen o klasickou bezpečnost práce,

kdy manažeři dodržují bezpečnostní opatření a jdou tak svým podřízeným příkladem (např. nošení přilby na pracovištích, kde je to stanoveno, dodržování zákazu kouření apod.), ale především v samotném myšlení. Čím větší ohrožení může podnik pro své zaměstnance i okolí představovat, tím větší prioritou musí bezpečnost a prevence rizik být pro jeho management, a tím více finančních prostředků musejí do jejího udržování vynakládat. Stejně tak je potřeba, aby psaná provozní dokumentace nebyla jen nepoužitelným materiálem, ale musí být neustále prověřována, revidována a zdokonalována podle měnících se podmínek.

4.9.9 Hlavní problémy při provádění vyšetřování mimořádných událostí

Navzdory neustále se zlepšujícím přístupům a metodám používaných pro vyšetřování mimořádných událostí, zvláště pak průmyslových havárií, se v praxi při jejich vyšetřování stále můžeme potýkat s celou řadou problémů. Některé mohou být spojeny s vlastním procesem vyšetřování a jiné s osobami analytiků-vyšetřovatelů. V obou případech však tyto problémy vedou k povrchním nebo nesrozumitelným závěrům vyšetřování, což naprosto degraduje vynaložené úsilí. Mezi nejčastější problémy patří:

- Lídrem vyšetřovacího týmu je člověk s nedostatečnými znalostmi a zkušenostmi.
- Management nedokáže dostatečně pochopit význam prováděného vyšetřování, a tak o jeho průběh neprojevuje dostatečný zájem.
- Závěrečné zprávy z vyšetřování předkládají souhrn kvantitativních dat, avšak v nedostatečné míře diskutují návrhy možných nápravných a preventivních opatření.
- Management má pocit, že není dostatek zdrojů pro provedení důkladného vyšetřování mimořádné události.
- Podnik nevytváří dostatečnou podporu pro důkladné vyšetření mimořádné události (např. lidé na všech stupních řízení nespolupracují s vyšetřovateli apod.).
- Management dostatečně nedeklaruje výhody, které vyplývají z důkladného vyšetření mimořádné události.
- Skutečně důkladné vyšetřování je finančně náročné (a někteří manažeři soudí, že je příliš drahé a tedy zbytečné).
- Vyšetřování se soustředí pouze na výsledky provozního personálu; zahrnutí širšího spektra vyšetřovaných lidí, zvláště pak z řad vyššího managementu, je považováno za nežádoucí.

- Vyšetřovatelé jsou nepřipravení, nemají dostatečnou kvalifikaci nebo praktikuji povrchní přístup a není k dispozici nikdo, kdo by je zaškolil.
- Tvůrci interních směrnic a provozních předpisů se jen zřídka zajímají o závěry vyšetřování proběhlých nehod (chybí zpětná vazba promítnutá jak do legislativy na úrovni vlády, tak i předpisů na úrovni samosprávy či podniku).
- Dobré vyšetřovací techniky jsou náročné na použití a je jen velmi málo odborníků, kteří s nimi umí fundovaně pracovat (z tohoto důvodu tudíž také nedochází k dalšímu vylepšování těchto technik).
- Dobrým vyšetřovatelem nemusí být člověk, který danou technologii dokonale zná (tzv. člověk z praxe), ani akademičtí pracovníci, kteří oplývají odbornou terminologií, ale problematiku znají jen v teoretické rovině (vyšetřovací tým je proto ideální sestavit ze 4 až 7 kvalifikovaných osob, jejichž názory, zkušenosti a znalosti se mohou vhodně doplňovat).
- Jen málokterá organizace promítne závěry vyšetřování do svých aktivních programů prevence.
- Po skončení vyšetřování není nikdo pověřen vypracováním specifických doporučení vzešlých ze závěrů vyšetřování a jejich realizací.

Výše uvedeným problémům je nutné se co možná nejvíce vyvarovat. Často je to otázka přesvědčení managementu, který vyšetřovací tým ustanovuje a dává mu plnou moc provést hloubkovou analýzu proběhlé havárie, aby si v tomto svém kroku „nechal poradit“ kvalifikovanou a pokud možno nezávislou osobou, která se však vlastního vyšetřování nebude účastnit, ale bude plnit spíše roli **supervizora** – osoby zajišťující spojující (a zároveň i kontrolní) článek mezi managementem a vyšetřovacím týmem.

Realizace nápravných opatření, jejich kontrola a management

Podle návrhu nápravných opatření je následně přistoupeno k jejich realizaci. Jedná se vlastně o nápravnou akci směřovanou proti působení faktorů, které se staly příčinami mimořádné události. Snahou je odstranit všechny identifikované negativní vlivy, aby se havárie nebo úraz již neopakovala. O provedených opatřeních je nutné sepsat záznam, ve kterém bude uvedeno, co bylo provedeno, kdo toto opatření provedl, a kdy a jak bude prověřována účinnost daného opatření.

Po realizaci nápravných opatření management rozhodně nesmí získat dojem, že je vše již vyřešeno. Nyní nastává fáze kontroly účinnosti realizovaných opatření, tedy zda vše, co bylo uděláno, přineslo kýžený efekt. Součástí tohoto sledování je také kontrola dodržování správného pracovního postupu na straně pracovníků a kvality odvedené práce (např. zda montáž byla provedena správně, zda nedochází k materiálním změnám apod.).

Kritické zhodnocení průběhu vyšetřování

Účelnou součástí vyšetřovacího procesu je také kritické zhodnocení průběhu vyšetřování mimořádné události. I při této vysoce specifické a odborné činnosti může dojít k mnoha přehlédnutím a opomenutím. Proto je snaha identifikovat slabá místa v samotném procesu vyšetřování, tzv. nalézt „kazy“. Obvykle je nejvíce problémů na straně lidského faktoru. I vyšetřovatelé jsou jen lidé, kteří mohou v mimořádných a vypjatých situacích udělat chybu, nechat se zmást, či podlehnout mylnému dojmu. Je však dobré po skončení vyšetřování provést rekapitulaci celého vyšetřování krok po kroku podle definovaného harmonogramu.

Je důležité říci, že v této fázi je naprosto nezastupitelná role supervizora, protože tento člověk nebyl součástí vyšetřovacího týmu, ale je velmi dobře obeznámen s průběhem vyšetřování, se vzniklými problémy, ale i s finanční stránkou tohoto podniku. Může proto zhodnotit, zda vyšetřování přineslo kýžený efekt anebo bylo jen mrháním času a peněz firmy. Vyšetřování by proto mělo být zakončeno diskuzí „za zavřenými dveřmi“, kde by o průběhu prací na jedné straně pohovořili vyšetřovatelé a na straně druhé by supervizor a zástupci vrcholového managementu podniku kladli dotazy, diskutovali o způsobu realizace navržených opatření, případně oponovali připomínkám uvedeným v závěrečné zprávě. Tato diskuze je velmi účelná, protože pomůže manažery připravit na jednání s pojišťovnami při projednávání likvidace škodní události. Taktéž může přinést poznatky, které napomohou k efektivnějšímu přístupu managementu k prevenci rizik, a podá i zpětnou vazbu na zvolený přístup vyšetřování, což je důležité pro případ, že by jej někdy v budoucnu bylo nutné opětovně provádět.

Dodatečné prověření nápravných akcí

Z bezpečnostní praxe dobře víme, že jen málo činů skutečně završí požadovaný proces snižování rizik. Je-li zapotřebí prověřit účinnost nápravných akcí, není jednorázová kontrola postačující. Důvodem je to, že se lidé postupem času (pakliže nejsou kontrolováni) rádi vracejí ke starým zvykům. Pokud si tedy pracovníci neosvojí nové postupy práce a pravidla, pozbývají realizovaná nápravná opatření na účinnosti. Proto pouze dvojí kontrola může zjistit, zda dané akce a opatření jsou prováděny tak, jak bylo předepsáno. Management zde opět hraje významnou roli, zvláště pak ten na střední a nižší úrovni, který je přímo odpovědný za realizaci a kontrolu stanovených nápravných opatření. Ovšem ani vrcholový management by neměl zůstat stranou a v rámci pravidelných porad by se měl zajímat o zprávy o plnění stanoveného plánu realizace opatření a o úroveň připravenosti provozních pracovníků z vyhodnocení průběžných výcvikových akcí či o výsledky z pravidelných prověrek BOZP.

4.9.10 Poučení se ze závažných průmyslových havárií

Údaje o haváriích

Poučit se z proběhlé havárie, zejména pak jedná-li se o událost s tragickými následky, je smyslem každého vyšetřování této mimořádné události. Často ale zůstávají zprávy z vyšetřování, v nichž jsou klíčové informace, které by byly využitelné i v jiných podnicích a provozech, veřejně nedostupné. Je to vcelku logické, protože ani podniky, u nichž k havárii došlo, ani pojišťovny, které tyto události odškodňovaly, nemají žádný zájem tyto informace zveřejňovat. V tomto případě musí být proto hlavní role na státě, který musí mít eminentní zájem usilovat o to, aby se podobné havárie již znovu nestaly.

V České republice však zprávy z vyšetřování závažných havárií, které soustřeďuje ministerstvo životního prostředí, nejsou veřejně k dispozici. Potřebné informace dostávají pouze inspekční orgány, které mají za úkol, ať již při výkonu **integrované inspekce prevence závažných havárií**⁴² prováděné podle zákona č. 59/2006 Sb. o prevenci závažných havárií, anebo při vyšetřování proběhlých závažných havárií, činit příslušná opatření směřovaná k posílení průmyslové bezpečnosti u provozovatelů objektů a zařízení zařazených do skupiny A, resp. B, a ke snižování ohrožení obyvatelstva vyplývajícího z provozování příslušných zdrojů rizik.

Mnoho firem, zejména velkých nadnárodních korporací, má své vlastní rozsáhlé systémy vyšetřování příčin mimořádných událostí, ale i ty často váhají s jejich rozšiřováním. Bylo vynaloženo značné úsilí odborné veřejnosti na zpřístupnění tohoto druhu informací pomocí systémů výměny informací, například v časopise „Loss Prevention Bulletin“ vydávaným asociací IChemE anebo prostřednictvím nejrůznějších on line databází. Tento typ informací je sice velmi užitečný, ale nabízí spíše informace kvalitativního charakteru (Sadhra a Rampal, 1999). Proto na evropské úrovni byl iniciován vznik mezinárodního programu, jehož cílem by bylo zajišťovat transfer podrobných informací o proběhlých závažných haváriích, a to jak směrem k inspektorům, tak i k ostatní odborné veřejnosti. Tento program dostal název IMPEL.

Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law (IMPEL)

IMPEL je mezinárodní síť inspekčních orgánů zemí Evropské unie v oblasti životního prostředí, která má status mezinárodní neziskové asociace registrované v Belgii (logo viz na obrázku 86). Je řízen výborem, v jehož čele stojí předseda a místopředseda.

⁴² Integrovaná inspekce prevence závažných havárií je prováděna na základě zákona č. 59/2006 Sb. o prevenci závažných havárií, a pod vedením ČIŽP se jí účastní i další inspekční orgány. Předmětem integrované inspekce je provedení kontroly opatření přijatých k prevenci vzniku závažné havárie v objektu nebo zařízení, vhodnosti a dostatečnosti prostředků zmírňujících možné dopady závažné havárie, dodržování preventivních bezpečnostních opatření uvedených v bezpečnostním programu, bezpečnostní zprávě a vnitřním havarijním plánu a další.



Obrázek 86: Logo evropské asociace IMPEL.

IMPEL byl založen v roce 1992 původně jako neformální síť evropských regulátorů a institucí a je zaměřený na implementaci a prosazování práva životního prostředí, ale rozsah činností tohoto programu se postupně značně rozšířil. Jeho členy jsou členské státy EU, přistupující a kandidátské země EU a Norsko – v současnosti je tak zde zapojeno celkem 31 států.

IMPEL je unikátní síť a jeho práce byla výrazně prezentována v rámci Šestého akčního programu pro životní prostředí EU. V rámci programu je řešena řada projektů, z nichž některé se týkají také následků průmyslových havárií, včetně jejich přeshraničních dopadů, nebo také transportu nebezpečných látek, materiálů a odpadů.

V rámci sítě IMPEL se zástupci pověřených organizací jednotlivých signatářských zemí zúčastňují vybraných akcí a aktivně spolupracují na několika projektech. Českou republiku v asociaci IMPEL oficiálně zastupuje Česká inspekce životního prostředí, která do projektů zapojuje i ostatní subjekty státní správy či akademická pracoviště.

Projekt „Lesson learnt from industrial accidents“

„Lesson learnt from industrial accidents“ (tj. poučení ze závažných průmyslových havárií) je projekt zaměřený především na výměnu informací a zkušeností získaných ze závažných průmyslových havárií. Smyslem je podat inspektorům dostatek informací (ponaučení), které budou moci uplatnit v rámci integrované inspekce prevence závažných havárií prováděné podle direktivy Seveso II u provozovatelů zařazených do skupiny A, resp. B, s cílem rozpoznat skrytá rizika, aby se podobné mimořádné události již znovu nestaly. Výměna informací probíhá dvěma způsoby – v rámci databáze ARIA (viz kapitola 4.2.3) a v rámci semináře, který je pravidelně pořádán každé dva roky (poslední se uskutečnil ve dnech 3. a 4. června 2009 v Paříži⁴³). V průběhu semináře jsou prezentovány vybrané (reprezentativní) průmyslové havárie, u nichž

⁴³ Informace o semináři je dostupná na adrese <<http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-02-2009/skrehot-impel-seminar.html>>.

jsou důkladně analyzovány příčiny jejich vzniku a nedílnou součástí každé prezentace je také zhodnocení a popis závažnosti následků podle parametrů Evropské škály pro hodnocení průmyslových havárií (ESIA). Po prezentaci následuje vždy odborná diskuze v plénu. Součástí každé prezentace je i bohatá obrazová část, která přibližuje detaily dané havárie, což je velmi přínosné zvláště pro využití načerpaných poznatků v praxi. Vedoucí a zároveň hostitelskou zemí tohoto projektu, kterého se za Českou republiku vedle ČIŽP účastní také Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v. v. i., je Francie.

Literatura ke kapitole

A Discussion on Gas Dispersion Models. *The First Responder* [online], 2002, vol. 1, no 3 [cit. 2007-02-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.aristatek.com/Newsletter/02%2007%20July/A%20Discussion%20on%20Gas%20Dispersion%20Models.htm>>.

Archiv der NCEP Reanalysis [online]. Bad Herrenalb: Wetterzentrale, [cit. 2009-06-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaur.html>>.

ARIA [online]. Lyon: Bureau for Analysis of Industrial Risk and Pollution (BARPI) [cit. 2009-08-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>>.

BABINEC, F. 2005. Management rizika: loss prevention & safety promotion. Opava: Slezská Universita v Opavě, 2005.

BEDNÁŘ, J.; ZIKMUNDA, O. 1985. *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. Praha: Academia, 1985.

BERNATÍK, A. 2006. *Prevence závažných havárií I.: učební skripta VŠB-TU*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2006. ISBN 80-86634-90-6.

BUBNÍK, J. [et al.]. 1997. *SYMOS'97: Systém modelování stacionárních zdrojů*. Praha: Český hydro-meteorologický ústav. ISBN 80-85813-55-6.

Cargo truck overturned in SW China. *People's Daily Online* [online], updated 09:33, December 19, 2006 [cit. 2008-03-14]. Dostupný z WWW: <http://english.peopledaily.com.cn/200612/19/eng20061219_333872.html>.

CARRUTHERS, D. J. [et al.]. 2003. *PLUME/PUFF Spread and Mean Concentration Module Specifications: ADMS 3*. CERC, 2003 [cit. 2008-03-25]. 24 s. Dostupný z WWW: <http://www.cerc.co.uk/software/pubs/ADMS3-1TechSpec/P1001.P12_01.pdf>.

Česká republika. Parlament ČR. Zákon č. 59/2006 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými přípravky a o změně zákona č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a zákona č. 320/2002 Sb., o změně a zrušení některých zákonů v souvislosti s ukončením činnosti okresních úřadů, ve znění pozdějších předpisů, (zákon o prevenci závažných havárií). *Sbírka zákonů České republiky*, 2006, částka 25, s. 842-869. Dostupný z WWW: <<http://web.mvcr.cz/sbirka/2006/sb025-06.pdf>>.

Černobyl [online] [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.cernobyl.cz/>>.

ČSN IEC 61882. *Studie nebezpečí a provozuschopnosti (studie HAZOP) – Pokyn k použití*. Praha: Český normalizační institut, 2002.

Dispersion Modeling [online]. Support Center for Regulatory Air Models (SCRAM) and Environmental Protection Agency, 2005 [cit. 2007-02-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.iowacleanair.com/af/files/section4>>.

DOCKERY, D. W. [et al.]. 1993. An association between air pollution and mortality in six U. S. cities. *New England Journal of Medicine*, 1993, no. 329. ISSN 1753-1808.

DOHÁNYOSOVÁ, P. [et al.]. 2007. *Výkladový slovník aerosolových termínů* [online]. Praha: Česká aerosolová společnost, 2007 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://cas.icpf.cas.cz/index.php?lang=cz&page=aerosols>>.

DRÁBOVÁ, D. 2006. *Černobylská havárie aneb Pravda není nikdy čistá a málokdy bývá jednoduchá* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2006 [cit. 2009-06-28]. 29 s. Dostupný z WWW: <http://www.sujb.cz/docs/cernobylska_havarie.pdf>.

DRÁBKOVÁ, S. [et al.]. 2007. *Mechanika tekutin: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1508-4.

DVOŘÁK, P. Naučme se číst v aerologickém diagramu. *Portál Flying* [online], 2004, článek č. 436 [cit. 2004-12-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.flying.cz/index.php?id=clanky>>.

DUIJM, N. J.; MAREKRT, F.; PAULSEN, J. L. 2005. *Safety assessment of ammonia as a transport fuel*. Roskilde: Risø National Laboratory, 2005. ISBN 87-550-3415-2.

Guidelines for Quantitative Risk Assessment: Purple Book (CPR 18E). Hague: Committee for the Prevention of Disasters, 1999.

EISLER, J.; ROUSOVÁ, O. 2009. Praktické zkušenosti se snižováním fugitivních emisí VOC. In *Konference VOC 2009 – Emise organických látek z technologických procesů a metody jejich snižování: sborník přednášek*. Pardubice: Český svaz vědeckotechnických společností, 2009. S. 27-32. ISBN 978-80-02-01939-1.

Effects, Damage, EffectsPlus, EffectsGIS: version 5.5: user and reference manual. Apeldoorn: TNO Environment, Energy and Process Innovation Department of Industrial Safety, 2003.

Encyklopedie BOZP [online]. Praha: VÚBP, 2008- [cit. 2009-08-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.bozpinfo.cz/knihovna-bozp/encyklopedie/>>.

European Scale of Industrial Accidents. Committee of Competent Authorities of the Member States which oversees application of the SEVESO directive, 1994.

European Agency for Safety and Health at Work. 2005. *Priorities for occupational safety and health research in the EU-25* [online]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005. 32 s. ISBN 92-9191-168-2. Dostupný z WWW: <<http://osha.europa.eu/en/publications/reports/6805648>>.

„Experience feedback“ on industrial accidents: IMPEL Seminar, Paris, 30-31 May, 2007. Paris: Ministry of Ecology, Sustainable Development and Spatial Planning, 2007.

FERRY, T. S. 1988. *Modern Accident Investigation and Analysis*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1988.

FOSTER, T. C. 1981. Time required to empty a vessel. *Chemical Engineering*, 1981, vol. 88, no. 9, p. 105.

FUCHS, P. 2008. Některé zkušenosti s postupy RCM v reálných podmínkách. In *Mezinárodní konference Národné fórum údržby 2008*. Vysoké Tatry: Slovenská spoločnosť údržby, 2008.

HINDS, W. C. 1999. *Aerosol technology: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles*. 2nd. ed. New York: John Wiley and Sons, Inc. ISBN 0-471-19410-7.

HORÁK, J. 2008. Analýza rizika havárie v chemickém průmyslu dříve a nyní. In *17. konference APROCHEM 2008*. Milovy, 2008.

INES – Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí: uživatelská příručka. Praha: SÚJB, 2001.

Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (INERIS DRA-006): dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul). Paris: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Direction des Risques Accidentels, 2002. 61 s.

JANALÍK, J. 2008. *Obtékání a odpor těles: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1911-2.

KAŠPAR, M. *Vývoj oblačných a srážkových pásů v atmosféře*. Disertační práce. Praha: Univerzita Karlova. Matematicko-fyzikální fakulta. 2001.

KIŠA, M.; JELEMENSKÝ, L.; STOPKA, J. 2007. Je možné využit CFD modelovanie disperzie látok na havarijné modelovanie? In *54. konference CHISA 2007, 15. – 18. 10. 2007, Srní, ČR*.

KUČINA, P. 2007. Objasňování příčin a okolností pracovních úrazů a jiných nehodových událostí. Praha: VÚBP, 2007. 35 s. (Bezpečný podnik). ISBN 978-80-86973-39-5.

LEDVINOVÁ, M. 2002. Nehodové události při přepravě nebezpečných věcí: seminární práce [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2002 [cit. 2008-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://envi.upce.cz/pisprace/ostatni/Ledvinova.doc>>.

LEES, F. 1996. *Loss Prevention in the Process Industries: vol. 1. 2nd. ed.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996. ISBN 0-7506-1547-8.

MACDONALD, R. 2003. *Tudory and Objectives of Air Dispersion Modelling, Modelling Air Emissions for Compliance: MME 474A Wind Engineering*. University of Waterloo, 2003.

Major Accident Reporting System: MARS. Ispra: Major Accident Hazards Bureau [cit. 2009-08-19]. Dostupný z WWW: <<http://mahbsrv.jrc.it/mars/default.html>>.

Maps of radionuclide deposition [online]. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2001 [cit. 2009-07-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.unscear.org/unscear/en/chernobylmaps.html>>.

MARKIEWICZ, M. 2006a. *Modelling of the Air Pollution Dispersion* [online]. Warsaw: Warsaw University of Technology, The Faculty of Environmental Engineering, 2006 [cit. 2008-01-02]. S. 304-348. Dostupný z WWW: <http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/monography_2006_5/part02/5_M_Markiewicz_Modelling%20of%20the%20Air%20pollution%20Dispersion.pdf>.

MARKIEWICZ, M. 2006b. *Mathematical Modelling of the Heavy Gas Dispersion* [online]. Warsaw: Warsaw University of Technology, The Faculty of Environmental Engineering, 2006. S. 280-302 [cit. 2007-02-20]. 24 s. Dostupný z WWW: <http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/monography_2006_5/part02/4_M_Markiewicz_Mathematical%20Modelling%20Heavy%20Gas%20Dispersion.pdf>.

Metodický pokyn odboru environmentálních rizik Ministerstva životního prostředí pro postup při zpracování dokumentu „Analýza a hodnocení rizik závažné havárie“ podle zákona č. 59/2006 Sb., o prevenci závažných havárií. *Věstník Ministerstva životního prostředí*, 2007, ročník XVII, částka 3.

MIKA, O.; VIK, M.; KELNAR, L. 2004. Opomenuté závažné zdroje rizika. *EnviWeb* [online], 10. 05. 2004 [cit. 2008-01-04]. Dostupný z WWW: <http://www.enviweb.cz/?env=havarie_archiv_eibdh/Opomenute_zavazne_zdroje_rizika.html>.

Mimořádná událost. *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online], stránka naposledy editována 28. 10. 2008. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Mimo%C5%99%C3%A1dn%C3%A1_ud%C3%A1lost>.

MUNZAR, J. *Malý průvodce meteorologií*. Praha: Mladá fronta, 1989. 248 s.

- PALEČEK, M. 2000. Rizika na pracovišti a jejich hodnocení. *Bezpečnost a hygiena práce*, 2000, č. 5-6, s. 54-56.
- PALEČEK, M. [et al.]. 2006. *Prevence rizik*. 1. vyd. Praha: Oeconomica, 2006. 257 s. ISBN 80-245-1117-7.
- PITT, R. *Case Study of Fate and Effects of Ammonia Spills*. [online]. 2002 [cit. 2007-10-18]. Dostupný z WWW: <<http://rpitt.eng.ua.edu/Class/EffectsandFates/Module8/Module8.htm>>.
- Projekt SPREAD: Vyhodnocení terénních testů 2008 a analýza sebraných dat*. Praha: VÚBP, T-SOFT, 2008.
- SADHRA, S. S.; RAMPAL, K. G. 1999. *Occupational Health: Risk Assessment in the Process Industries*. Blackwell Science, 1999. ISBN 0-632-04199-4.
- SALVENDY, G. 2006. *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. 3rd ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006. S. 686-688. ISBN 13 978-0-471-44917-1.
- SAVE Consulting Scientist: SAVE II, Windows version 3.03: user's manual*. Apeldoorn, 2003.
- SEIFERT, V. *Počásí kolem nás*. Praha: Grada, 1994. 142 s. ISBN 80-7169-053-8.
- SHARAN, M. [et al.]. 1994. Bhopal Gas Leak: a Numerical Simulation of Episodic Dispersion. *Atmospheric Environment*, 1995, vol. 29, no. 16, s. 2061-2074.
- SKŘEHOT, P. [et al.]. 2006. Prevence a represe v rámci direktivy SEVESO a způsob hodnocení závažných průmyslových havárií v západní Evropě. *112*, 2006, č. 4, s. 25-28.
- SKŘEHOT, P. [et al.]. 2007. Modelování úniku a rozptylu nebezpečných plynných látek v atmosféře. In *Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí: bulletin referátů z konference*. Úpice: Hvězdárna v Úpici, Komise pro otázky životního prostředí AV ČR, 2007. 6 s.
- SKŘEHOT, P.; JANSOVÁ, K. 2007. Priority EU ve výzkumu v oblasti BOZP a ochraně zdraví při práci s nebezpečnými chemickými látkami. *Bezpečnost a hygiena práce*, 2007, č. 12, s. 22-26.
- SKŘEHOT, P.; HAVLOVÁ, M. 2008. Ověření modelu šíření projevů a účinků ohrožujících událostí: projekt SPREAD: část 3: Vyhodnocení naměřených dat a interpretace výsledků. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online], 2008, roč. 1, č. 4. Dostupný z WWW: <http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-04-2008/skrehot_havlova_spread3.html>. ISSN 1803-3687.
- SKŘEHOT, P. 2008a. *Velký atlas oblaků*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2008. 368 s. ISBN: 978-80-251-2015-6.
- SKŘEHOT, P. 2008b. *Modelování rozptylu toxických látek v atmosféře při průmyslových haváriích*. Praha: Univerzita Karlova. Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí, 2008. 93 s., 7 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Doc. RNDr. Eva Tesařová, CSc.
- SKŘEHOT, P.; HOVORKA, J.; HAVLOVÁ, M. Dispersal of Coarse Aerosol from Explosive Blast: Field Measurements. In *2008 AAAR Annual Conference Abstracts*. Orlando: American Association for Aerosol Research, USA, 2008, s. 207.
- Systém řízení bezpečnosti a havarijní plánování: materiály k distančnímu studiu*. Praha: VÚBP, 2005.
- REYNOLDS, R. M. 1992. ALOHA Theoretical Description, Draft Technical Memorandum NOS ORCA-65 Hazardous Materials Response and Assessment Division (HMRAD) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Seattle: NOAA, 1992.
- Rozex Alarm* [online]. Praha: TLP, c1991-2006 [cit. 2007-11-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.tlp-emergency.com/rozex.html>>.

ŘÍMAN, R; SKŘEHOT, P; BORTL, R. 2007. Modelování následků nehody automobilové cisterny s LPG pomocí numerického programu ALOHA. *CHEMagazín*, 2007, č. 6, s. 14-17. ISSN 1210-7409.

TerEx [online]. Praha: T-SOFT [cit. 2007-07-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.tsoft.cz/index.php?q=cz/terex>>.

The CAMEO Software System: ALOHA 5.4 (Areal Locations of Hazardous Atmospheres): user's manual. U. S. Environmental Protection Agency and National Oceanic and Atmospheric Administration, 2006.

ULLMANN, V. *Biologické účinky ionizujícího záření a radiační ochrana* [online] [cit. 2009-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>>.

U. S. Department of Energy. Office of Environment, Safety and Health. 2004. *ALOHA Computer Code Application Guidance for Documented Safety Analysis: Final Report No. DOE-EH-4.2.1.3-ALOHA Code Guidance* [online]. Washington D. C.: U. S. Department of Energy, 2004 [cit. 2007-02-20]. 115 s. Dostupný z WWW: <http://hss.energy.gov/CSA/CSP/sqa/central_registry/ALOHA/Final_ALOHA_Guidance_Reportv52404.pdf>.

Termická konvekce. *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online], stránka naposledy editována 29. 4. 2009. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Termick%C3%A1_konvekce>.

UČENÁ, Š. 2004. *Některé aspekty případné havárie při přepravě zkapalněného chlóru po železnici: seminární práce* [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2004 [cit. 2007-02-20]. 21 s. Dostupný z WWW: <http://envi.upce.cz/pisprace/ks_pha/04/ucena.pdf>.

URBAN, I. 1995. *Hodnocení havárií spojených s výronem inhalačně toxických zkapalněných plynů a těžkých kapalin (nebezpečných škodlivin)*. Lázně Bohdaneč: Institut Civilní ochrany České republiky, 1995.

Uživatelská příručka programu ROZEX Alarm verze 2.0. Praha: TLP, 2003.

VÍLCHES, J. A. [et al.]. 1995. A historical analysis of accidents in chemical plants, accidents due to transport of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention Process Industry*, 1995, vol. 8, no. 2, s. 87-96.

V Itálii explodoval vlak s plynem, zemřelo nejméně třináct lidí. *iDnes.cz* [online], 30. června 2009. Dostupný z WWW: <http://zpravy.idnes.cz/v-italii-explodoval-vlak-s-plynem-zemrelo-nejmene-sestnact-lidi-pwt-/zahranicni.asp?c=A090630_065751_zahranicni_stf>.

Van den BERG, A. C.; Van der VOORT, M. M.; WEERHEIJM, J.; VERSLOOT, N. H. A. 2006. BLEVE Blast by Expansion-Controlled Evaporation. *Process Safety Progress*, 2006, Vol. 25, No.1, pp. 44-51.

VRÁTNÝ, M.; HEJLOVÁ, D. 2008. *Program TerEx: uživatelský manuál, verze 2.8*. Praha: T-SOFT, 2008.

YAMADA, T. 2000. Lagrangian Dispersion Model for Nonneutrally Buoyant Plumes. *Journal of Applied Meteorology* [online], 2000, vol. 39, no. 3, s. 427-436 [cit. 2007-09-15]. Dostupný z WWW: <<http://ams.allenpress.com/archive/1520-0450/39/3/pdf/i1520-0450-39-3-427.pdf>>.