

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



**DISERTAČNÍ PRÁCE
PRÁCE**

2024

**JAKUB
MAREK**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

MODELOVÁNÍ ÚNIKU CHLORU ZA POUŽITÍ MODELU VIRTUÁLNÍHO ZDROJE

MODELING CHLORINE LEAKAGE USING A VIRTUAL SOURCE MODEL

Disertační práce

Ing. Jakub Marek, MSc.

Kladno, prosinec 2024

Doktorský studijní program: Ochrana obyvatelstva

Studijní obor: Civilní nouzová připravenost

Školitel: doc. Mgr. Zdeněk Hon, Ph.D., dr. h. c.

Školitel specialista: doc. RNDr. Mgr. Petr A. Skřehot, Ph.D., MSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem „Modelování úniku chloru za použití modelu virtuálního zdroje“ vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne 1. 12. 2024

.....
Ing. Jakub Marek, MSc.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému školiteli doc. Mgr. Zdeňku Honovi, Ph.D., dr. h. c. za trpělivý a lidský přístup, cenné rady a kritické, ale konstruktivní připomínky při tvorbě disertační práce.

Dále bych rád poděkoval i mému školiteli specialistovi doc. RNDr. Mgr. Petru Skřehotovi, Ph.D., MSc., dr.h.c. za věcné a odborné rady při řešení odborných problémů.

Abstrakt

Základním předpokladem havarijní připravenosti je schopnost predikovat realistické havarijní scénáře. Cenná ponaučení lze získat zejména z proběhlých událostí. Takto nabyté zkušenosti ale ukazují, že naše dosavadní poznatky o chování chloru v reálných podmínkách jsou stále značně omezené, což logicky limituje i přesnost matematického modelování.

Cílem disertační práce je soustředit a zanalyzovat dostupné informace a aktuální vědecké poznatky využitelné pro zpřesnění stávajících přístupů uplatňovaných při modelování masivních úniků chloru ze skladovacích zařízení (průmyslové stacionární zásobníky, automobilové nebo železniční cisterny apod.).

V rámci teoretické části je provedena analýza dostupných literárních zdrojů a datových souborů (databáze ARIA, eMARS ad.), přičemž zvláštní pozornost je věnována získání empirických poznatků o chování chloru po jeho úniku do atmosféry. Prostudovány byly jak zprávy o haváriích proběhlých v minulosti, tak i zprávy o provedených terénních experimentech (např. Jack Rabbit).

V praktické části je popsán navržený optimalizovaný přístup pro modelování úniku chloru a prostřednictvím ukázkové simulace (za současného využití numerického programu ALOHA) je prezentována jeho aplikace v reálných podmínkách. Na základě získaných poznatků jsou navrženy obecně použitelná metodická doporučení pro zpřesnění matematického modelování úniku chloru s přihlédnutím k faktorům ovlivňujících jeho šíření v reálných podmínkách. Navržený optimalizovaný přístup vychází z modelu virtuálního zdroje a uplatnění vhodných korekčních koeficientů.

Klíčová slova

Těžký plyn, chlor, nehoda, masivní únik, analýza, experiment, virtuální zdroj, modelování, ALOHA.

Abstract

The basic prerequisites of emergency preparedness are the ability to predict a realistic emergency scenarios. Valuable lessons can be learned especially from past events. However, the experience gained in this way shows that our current knowledge about the behavior of chlorine in real conditions is still very limited, which logically also limits the accuracy of mathematical modeling.

The aim of the dissertation is to analyze available information and current scientific knowledge that can be used to refine existing approaches used in modeling massive chlorine releases from storage facilities (industrial stationary facilities, automobile or railway tanks, etc.).

As part of the theoretical part, an analysis of available literary sources and data sets (ARIA database, eMARS, etc.) is performed, while special attention is paid to obtaining empirical knowledge about the behavior of chlorine after its release into the atmosphere. Both reports on past accidents and reports on conducted field experiments (e.g. Jack Rabbit) were studied.

In the practical part, the proposed optimized approach for modelling chlorine leakage is described and its application in real conditions is presented by means of an example simulation (using the numerical program ALOHA). On the basis of the obtained findings, generally applicable methodological recommendations for refining the mathematical modelling of chlorine leakage are proposed, taking into account the factors influencing its propagation in real conditions. The proposed optimized approach is based on a virtual source model and the application of appropriate correction coefficients.

Keywords

Dense gas; Chlorine; Accident; Massive leak; Analysis; Experiment; Virtual source; Modelling; ALOHA software.

Obsah

1	ÚVOD	12
2	CÍL PRÁCE A SOUVISEJÍCÍ VÝZKUMNÉ OTÁZKY	13
2.1	Cíle práce.....	13
2.2	Výzkumné otázky	14
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	16
3.1	Těžký plyn.....	16
3.1.1	Vlastnosti těžkého plynu.....	16
3.1.2	Vznik oblaků těžkého plynu při haváriích	20
3.1.3	Rozptyl oblaku těžkého plynu	22
3.2	Chlor	24
3.2.1	Vlastnosti chloru.....	24
3.2.2	Využití chloru v praxi	34
3.2.3	Skladování a přeprava chloru	35
3.3	Nehody spojené s únikem chloru	38
3.3.1	Události evidované v evidenci Chlorine accidentology.....	39
3.3.2	Události evidované v databázi ARIA.....	43
3.3.3	Události evidované v databázi eMARS	46
3.3.4	Významné havárie ze Spojených států amerických.....	51
3.4	Počítačové modelovací nástroje	61
3.4.1	ALOHA	62
3.4.2	EFFECTS.....	63
3.4.3	TerEx	64
3.4.4	ROZEX Alarm.....	65
4	METODY A POSTUP ŘEŠENÍ.....	66
4.1	Metodologie disertační práce	66
4.1.1	Použité metody	66
4.1.2	Postup řešení	67

4.2	Teoretická východiska	70
4.2.1	Možnosti modelování rozptylu těžkého plynu	70
4.2.2	Model virtuálního zdroje	74
4.2.3	Masívní únik chloru ze zásobníku	76
4.2.4	Vliv topografie terénu na tečení oblaku těžkého plynu	86
4.2.5	Vliv překážek na rozptyl oblaku těžkého plynu	88
4.2.6	Vliv depozice na snížení koncentrace polutantu v oblaku	95
4.2.7	Vliv mokré depozice	105
4.3	Případová studie	108
4.3.1	Popis analyzované události	108
4.3.2	Modelování havarijní situace pomocí programu ALOHA	111
4.4	Experiment	119
4.4.1	Popis zájmové lokality	119
4.4.2	Simulace úniku chloru	124
5	VÝSLEDKY	131
5.1	Predikce šíření chloru v zájmové lokalitě	131
5.2	Parametrizace virtuálního zdroje	133
5.2.1	Stanovení emisní síly virtuálního zdroje	133
5.2.2	Stanovení parametrů virtuálního zdroje pomocí iterace	137
5.3	Modelování vybraných scénářů	138
5.4	Parametrizace faktorů snižujících koncentraci chloru v oblaku	141
6	DISKUZE	143
6.1	Diskuse k dílčím teoretickým problémům	143
6.1.1	Možnosti snížení následků v případě masívního úniku chloru	144
6.1.2	Přijatelnost rizika uvažovaného havarijního scénáře	149
6.2	Diskuse k používaným modelovacím nástrojům	153
6.2.1	Zkušenosti s vybranými počítačovými programy	153
6.2.2	Software ALOHA a jeho validita	154
6.3	Diskuse ke stanoveným výzkumným otázkám	158

7	ZÁVĚR	161
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	164
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	165
10	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....	185
11	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	190
12	SEZNAM PŘÍLOH	191
13	PŘÍLOHY	192
	Příloha 1: Nulový scénář, 1 m.s ⁻¹ (Scénář 0.1).....	192
	Příloha 2: Nulový scénář, 3 m.s ⁻¹ (Scénář 0.3).....	194
	Příloha 3: Virtuální zdroj kulový zásobník, 1 m.s ⁻¹ (Scénář 2.1)	196
	Příloha 4: Virtuální zdroj kulový zásobník, 3 m.s ⁻¹ (Scénář 2.3)	200
	Příloha 5: Virtuální zdroj kaluž, 1 m.s ⁻¹ (Scénář 3.1)	204
	Příloha 6: Virtuální zdroj kaluž, 3 m.s ⁻¹ (Scénář 3.3).....	208
	Příloha 7: Grafické vyobrazení na podkladu areálu SPOLCHEMIE	212

1 ÚVOD

Závažné havárie spojené s únikem toxických těžkých plynů, jako je například chlor nebo amoniak, jsou téměř vždy spojeny se závažnými následky na životech a zdraví lidí. Bohužel, tyto události se ve světě stávají, a to navzdory neustálému zlepšování úrovně bezpečnosti v průmyslu i v dopravě. Proto je nanejvýš důležité, abychom se z každé takové havárie dokázali poučit (tj. princip Lessons learned). Základním předpokladem havarijní připravenosti je schopnost predikovat realistické havarijní scénáře spojené například s únikem chloru. Zkušenosti ale ukazují, že dosavadní poznatky o chování chloru v reálných podmínkách jsou stále značně omezené, což logicky limituje i přesnost matematického modelování, které hraje v oblasti ochrany obyvatelstva významnou roli. Velmi užitečný může být například počítačový program ALOHA, který umožňuje nejen modelovat různé scénáře úniku, ale také predikovat dosahy zraňujících koncentrací toxických látek uniklých do ovzduší za daných meteorologických podmínek. A právě takovéto poznatky mohou být následně využity pro posouzení efektivity zavedených opatření, respektive pro návrh opatření kvalitativně lepších.

2 CÍL PRÁCE A SOUVISEJÍCÍ VÝZKUMNÉ OTÁZKY

2.1 Cíle práce

Zaměření této disertační práce vychází ze skutečnosti, že výsledky počítačového modelování havarijních scénářů spojených s rozptylem těžkých plynů v reálném prostředí se značně rozcházejí s reálnými hodnotami. Tuto skutečnost, bohužel, opakovaně potvrzují proběhlé havárie, což u odborníků na modelování rozptylu logicky vyvolává otázku, zda a nakolik má vůbec smysl usilovat o přesné výsledky takovýchto simulací. Při řešení tak složitého úkolu totiž musíme počítat s určitou mírou nejistoty, která je o to větší, čím jednodušší model použijeme a současně, čím méně přesná vstupní data do něj zadáme. Na druhou stranu je zde velká komunita lidí (hasiči, pracovníci krizového řízení, místní politická reprezentace, občané), kteří naopak oprávněně požadují co nejpresnější informace o dosahu zraňujících koncentrací toxických plynů v případě vzniku havárie, a navíc ideálně prezentované ve srozumitelné a jednoduché podobě. Vyhovět oběma těmto stranám je značně komplikované, ale nemusí to být nemožné. A právě na této premise staví tato disertační práce, která si jako **hlavní cíl** stanovila soustředit a zanalyzovat dostupné informace a aktuální vědecké poznatky využitelné pro zpřesnění stávajících přístupů uplatňovaných při modelování masivních úniků chloru ze skladovacích zařízení (průmyslové stacionární zásobníky, automobilové nebo železniční cisterny apod.) a následně navrhnout obecně použitelná metodická doporučení pro zpřesnění matematického modelování úniku chloru s přihlédnutím k faktorům ovlivňujících jeho šíření v reálných podmínkách.

Pro dosažení tohoto cíle je nutné splnit několik **dílčích cílů** nezbytných pro zdárné řešení této práce.

1. Soustředit a analyzovat dostupné literární zdroje a datové soubory (databáze ARIA, eMARS ad.), přičemž zvláštní pozornost bude věnována studiu empirických poznatků o chování chloru po jeho úniku do atmosféry, získaných při terénních experimentech (např. Jack Rabbit Programme).
2. Za využití modelu virtuálního zdroje navrhnout optimalizovaný přístup pro zpřesnění výsledků získaných počítačovým modelováním tak, aby věrohodnost a reliabilita těchto údajů byla co největší (tj. přibližovala se reálným hodnotám). Jako referenční plyn bude využit chlor, jehož chování v reálné atmosféře je dobře popsáno; jako výchozí software bude použit program ALOHA.
3. Experimentálně ověřit validitu navrženého postupu za pomoci fyzického modelu referenční lokality (areál SPOLCHEMIE v Ústí nad Labem). Referenčním zdrojem úniku bude stacionární zásobník obsahující 65 tun zkapalněného chloru.
4. Definovat sérii vhodných korekčních koeficientů, které umožní zohlednit účinky prostředí, v němž se oblak těžkého plynu rozptyluje. Zejména pak účinky suché a mokré depozice a impakce aerosolových částic na překážkách bránících tečení oblaku těžkého plynu.

2.2 Výzkumné otázky

V rámci vědecké roviny řešení této disertační práce jsem si stanovil tři výzkumné otázky, které úzce souvisí s řešeným tématem (resp. hlavním cílem práce). Odpovědi na tyto otázky mají určující vliv na postup řešení a na dosažení plánovaného výsledku. Jednotlivé výzkumné otázky jsem ověřoval v různých fázích (etapách) řešení, a to na základě postupně získaných dat a poznatků. Odpovědi na jednotlivé otázky jsem zahrnul do diskuse.

Výzkumná otázka č. 1: Lze dostupné empirické poznatky z proběhlých havárií nebo z provedených terénních experimentů účelně využít pro návrh optimalizovaného přístupu pro modelování úniku chloru?

Hledání odpovědi na tuto výzkumnou otázku proběhlo v rámci řešení teoretické části disertační práce.

Výzkumná otázka č. 2: Lze experimentem provedeným na fyzickém modelu referenční lokality objektivně prokázat, že unikající těžký plyn se při průchodu v silně urbanizovaném prostředí chová podobně jako kapalina (tj. nastává zřetelná fáze tečení)?

Hledání odpovědi na tuto výzkumnou otázku proběhlo v rámci řešení experimentální části disertační práce.

Výzkumná otázka č. 3: Je možné aplikovat model virtuálního zdroje také pro účely modelování rozptylu těžkého plynu?

Hledání odpovědi na tuto výzkumnou otázku proběhlo v rámci řešení návrhové části disertační práce.

Kromě zodpovězení výše uvedených výzkumných otázek byly na základě získaných výsledků stanovena vhodná doporučení pro snížení dosahu zraňujících koncentrací v případě masivního úniku chloru z průmyslového zásobníku.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

3.1 Těžký plyn

3.1.1 Vlastnosti těžkého plynu

V průmyslu se lze setkávat s celou řadou plyných látek, které při svém úniku do atmosféry mohou vytvářet oblaky, které klesají k zemskému povrchu, podél něhož se následně šíří (odtud název „těžký plyn“).

Z fyzikálního hlediska je těžký plyn definován jako plyn nebo směs plynů, který má vyšší molekulovou hmotnost než vzduch ($28,96 \text{ g.mol}^{-1}$), anebo se nachází ve stavu, kdy má oproti vzduchu významně vyšší hustotu ($1,29 \text{ kg.m}^{-3}$). V termodynamice se používá alternativní označení „negativně vznášivý plyn“ [1].

V průmyslové praxi je první z uvedených skupin zastoupena například fluorem, chlorem, chlorovodíkem, ozonem, fosgenem nebo oxidem uhličitým. Druhá skupina pak může zahrnovat prakticky všechny plyny skladované pod vysokým tlakem nebo v kryogenním stavu – například fluorovodík, amoniak, kyslík, dusík atd.

Podle databáze eMARS je až 50 % všech závažných průmyslových havárií spojeno s úniky látek do ovzduší [2], z nichž 97 % vede ke vzniku oblaků těžkého plynu [27]. Nejčastěji se jedná o úniky amoniaku, chloru a chlorovodíku, což jsou látky velmi reaktivní a toxické.

Kromě průmyslových havárií mohou oblaky těžkých plynů vznikat také při dopravních nehodách, poruchách výrobních zařízení nebo v důsledku úniků z kompresorových stanic či tranzitních plynovodů.

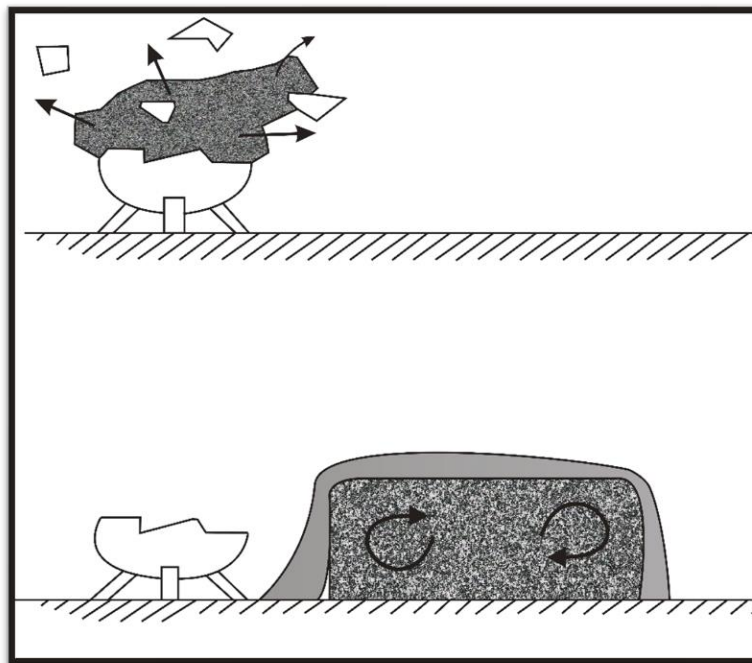
Samotný vznik těžkého plynu závisí především na fyzikálně-chemických vlastnostech unikajícího plynu a na podmínkách, za kterých je tento plyn skladován. V tomto smyslu hraje největší roli rozdíl tlaku mezi jednotlivými prostředími (tj. tlak uvnitř zařízení, resp. tlak volné atmosféry, do které plyn uniká). U plynů skladovaných pod vysokým tlakem se během jejich úniku uplatňuje tzv. Joule-Thomsonův jev, který způsobuje jejich ochlazení. Vysvětlení Joule-Thomsonova jevu bezprostředně souvisí s existencí mezimolekulárních sil (van der Waalsových). Při expanzi plynu totiž dochází ke změnám vzdáleností mezi molekulami, k čemuž je nutno vykonat práci působící proti těmto silám, které se snaží udržet molekuly co nejbližší u sebe [1]. Závislost teploty plynu na tlaku lze v takovém případě popsat rovnicí 1:

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H dp = \mu \cdot dp \quad (1)$$

kde $\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H$ definuje závislost teploty plynu na tlaku za konstantní entalpie H a představuje tak Jouleův-Thomsonův koeficient označovaný μ [K.Pa⁻¹].

Vznik těžkého plynu dále ovlivňuje i hmotnostní rychlost úniku a charakteristiky úniku (např. velikost únikového otvoru). Jedná-li se o intenzivní kontinuální únik (např. typu „jet“), anebo o jednorázový únik velkého množství, má plyn tendenci okamžitě se rozepnout do okolního prostoru. Jelikož ale expanduje do reálné atmosféry a nikoli do vakua, dochází nejen k překonávání účinku mezimolekulárních van der Waalsových sil (viz výše), ale také odporu, který mu klade okolní vzduch. Tento odpor vzniká jednak v důsledku turbulentního tření na čele rozšiřující se „bubliny“ plynu a jednak v důsledku existence atmosférického tlaku, který nutí unikající plyn konat objemovou práci (plyn vlastně „zdvihá atmosféru“ nad ním). Z tohoto důvodu unikající plyn zaujme menší objem, než by

tomu bylo ve vakuu, díky čemuž nabude vůči vzduchu i výrazně vyšší relativní hustotu [1] (viz Obrázek 1).



Obrázek 1 Oblak těžkého plynu vzniklý při jednorázovém úniku látky [4]

Při expanzi se plyn současně i ochlazuje. V reálné atmosféře tento děj probíhá adiabaticky a lze jej popsat Poissonovou rovnicí [3] (viz rovnice 2).

$$p^{1-\kappa}T^{\kappa} = konst. \text{ přičemž } \kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (2)$$

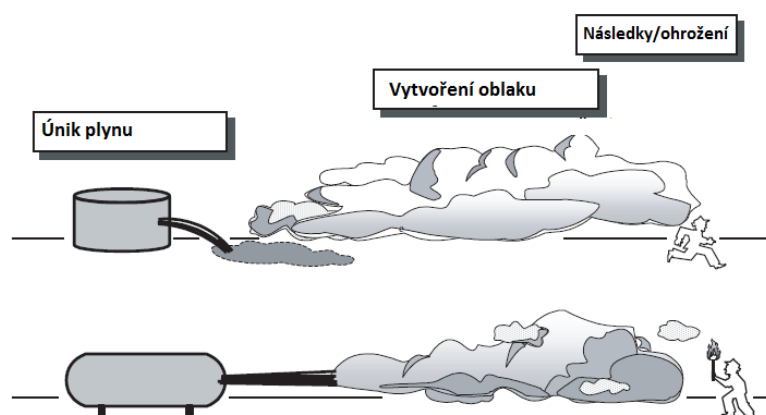
kde κ je Poissonova konstanta (pro vzduch je $\kappa = 1,4$).

Při velkém počátečním tlaku (řádově 100 barů) se unikající plyn může ochladit až o desítky stupňů. Největší ochlazení nastává tehdy, když plyn uniká přes malý otvor (např. únik typu „jet“) nebo přes pórovitou přepážku [3].

Tím, jak unikající plyn vtéká do atmosféry, vytváří ostře ohraničenou chladnou „bublinu“, která působením gravitační síly klesá k zemskému povrchu. Nepůsobí-li na ni současně i turbulentní proudění způsobené větrem, rozlévá se postupně do stran a vytváří přízemní vrstvu, popř. „zatéká“ do nejrůznějších prohlubní. V takovém případě se „bublina“ s okolním vzduchem prakticky nemísí, neboť díky její odlišné teplotě nad ní vzniká lokální teplotní inverze [5].

Je-li dotace látky během úniku skutečně velká a úbytek tepla rychlý, což nastává zejména při dvoufázovém úniku zkapalněných plynů nebo únicích typu „jet“, dochází současně též ke vzniku disperze. Disperze představuje aerosol tvořený viditelným shlukem drobkových, okem nerozeznatelných kapiček (např. při úniku zkapalněného kyslíku, chloru, dusíku nebo amoniaku) nebo krystalků (např. při úniku stlačeného oxidu uhličitého) [6]. Tento oblak je pozorovatelný tehdy, je-li jeho hustota alespoň o 1 % větší než hustota vzduchu [4]. Obě tyto situace ilustrativně zachycuje Obrázek 2 [7].

Efekt tvorby viditelného oblaku v průběhu úniku pozvolna ustává, dokud nedojde k vyprázdnění zásobníku a vyrovnání jeho vnitřního tlaku s tlakem atmosférickým.



Obrázek 2 Vznik oblaku aerosolu po dvoufázovém úniku zkapalněného plynu (situace nahoře), resp. po úniku plynu typu „jet“ (situace dole) [7]

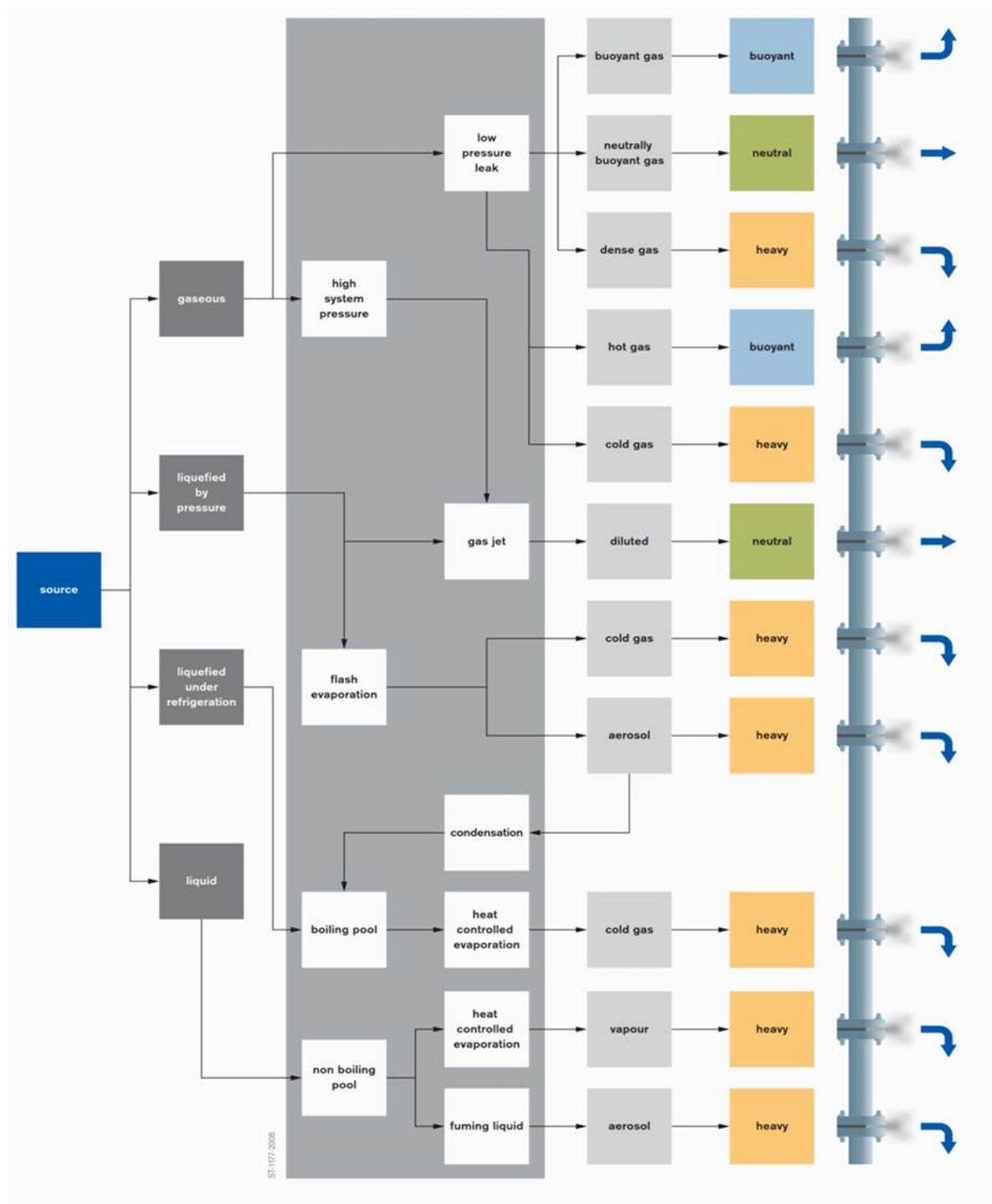
3.1.2 Vznik oblaků těžkého plynu při haváriích

Na základě skupenství skladované látky, tlaku uvnitř zařízení a způsobu vzniku emise, lze rozlišit celkem 11 různých scénářů, které vedou ke vzniku vznášivého (buoyant), neutrálního (neutral) nebo těžkého (heavy) plynu (viz Obrázek 3).

U plynů zkapalněných tlakem nebo ochlazením dochází po jejich úniku ze zařízení k mžikovému odparu. Ten může nastat v podstatě trojím způsobem [41]:

- **Dvoufázovým únikem**, kdy plynná fáze vzniká rychlým odpařováním tryskající kapalné fáze, která se při průchodu únikovým otvorem tříští na menší kapky.
- **Šampusovým efektem**, kdy plynná fáze vzniká rychlým odpařováním povrchů bublin vznikajících varem tryskající kapalné fáze.
- **Rychlým výparem z kaluže** vzniklé rozlitím většího množství kapalné fáze na zemský povrch.

V případě, že je plyn skladován pod vysokým tlakem (nikoli ale ve zkapalněné formě), dochází při jeho úniku k uplatnění Jouleho-Thomsonova jevu. Ten způsobí ochlazení, které je o to větší, čím větší je rozdíl tlaků uvnitř zařízení a vně a dále čím větší je rychlost úniku (expanze plynu do prostoru). Jedná se o poměrně složitý proces závislý na mnoha parametrech. Pro účely modelování možných havarijních situací je proto nutné tento problém určitým způsobem zjednodušit [8]. Jednou z možností je rozdělení procesu rozptylu na několik částí, které jsou následně řešeny odděleně.

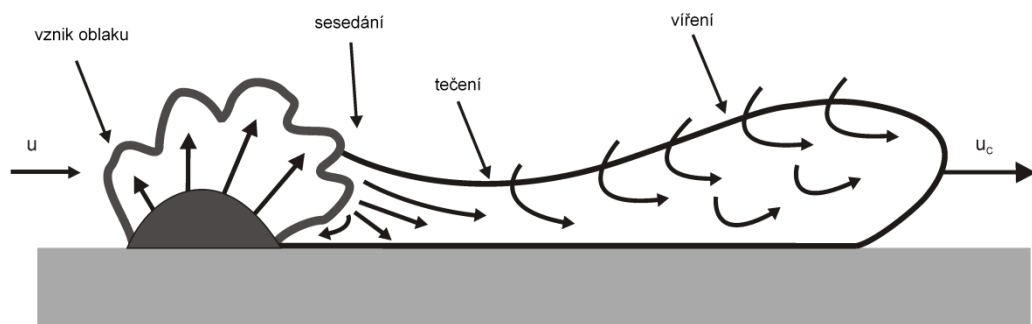


Obrázek 3 Variantní scénáře úniků plyných látek skladovaných za různých podmínek [2]

3.1.3 Rozptyl oblaku těžkého plynu

Jak již bylo uvedeno, typickou vlastností těžkých plynů je, že po svém vzniku klesají k zemskému povrchu, podél něhož se šíří a postupně rozptylují. Za klidného počasí a při relativně rovném, nepříliš zdrsněném povrchu se proudění těžkého plynu podél zemského povrchu blíží laminárnímu. Tato situace ale ve skutečnosti nastává zcela ojediněle, neboť v reálné atmosféře se vždy určitým způsobem uplatňují vlivy způsobující turbulence. Turbulentní proudění představuje poměrně složitou strukturu pohybu jednotlivých částic, kdy se jejich proudnice často vzájemně „proplétají a mísí“, a to zpravidla s výraznou časovou proměnlivostí až chaotičností [8]. K tomu, aby proudění nabylo turbulentního charakteru, musí poměr v něm působících setrvačných sil k silám vazkým (vznikajících působením tření mezi proudícím plynem a okolním vzduchem), respektive silám odporovým (vznikajících působením tření mezi proudícím plynem a zemským povrchem), překročit jistou kritickou hodnotu [9].

Na základě empirických zkušeností [10, 11, 12] lze tento kontinuální proces rozdělit do tří základních časových fází (viz Obrázek 4).



Obrázek 4 Jednotlivé fáze rozptylu oblaku těžkého plynu (u je rychlost větru, tj. vzduchu vstupujícího do oblaku a u_c je rychlost postupu čela oblaku) [4, 11]

V **první fázi** (tj. již během úniku plynu a následného vzniku disperze) se nejvíce uplatňuje gravitační síla. Těžký plyn klesá k zemi („sesedá“) a snaží se energeticky stabilizovat.

Ve **druhé fázi**, během které se rozšiřuje podél zemského povrchu („teče“), se postupně začínají uplatňovat odporové a vazké síly. Při tečení plyn ochotně zaplňuje nejružnější prohlubně.

Kovalets a Maderich [13] uvádějí, že za bezvětří je při fázi „tečení“ účinek turbulentní difúze překonán účinky gravitace, která se projevuje laterálním šířením těžkého plynu. Oblak se tedy rozšiřuje (roztéká) do stran podobně jako kapalina rozlitá na podložku. Tento efekt se vysvětluje tak, že při rozšiřování oblaku do stran dominují tíhové a vztakové síly, zatímco turbulentní difúze se uplatňuje spíše při šíření oblaku ve směru převažujícího proudění nebo ve vertikálním směru. Má-li navíc oblak stabilní stratifikaci, dochází k potlačení turbulentního proudění až o 20 %. Oblak se tak drží při zemi a jeho povrch je více méně hladký. To se pozitivně projeví nakonec i v rychlosti větru ve vrstvě nacházející se bezprostředně nad oblakem. Podle Kovaletse a Madericha [13] je průměrná rychlost větru v této vrstvě až 1,3-krát vyšší než v případě, kdy oblak stabilní stratifikaci nemá. V reálných podmínkách se ale oblak promíchává („víří“) a naředuje s okolním vzduchem, který do něj proniká. Turbulenci ovlivňují především rychlost šíření oblaku podél povrchu (daná hybností získanou při úniku ze zařízení), a také účinky proudícího vzduchu nebo přirozené tepelné konvekce [14]. Pro svou chaotičnost je tato fáze rozptylu jen velmi obtížně fyzikálně popsatelná. Pro určitou aproximaci se používají složité parciální diferenciální rovnice nelineárního typu, tzv. Navierovy a Stokesovy pohybové rovnice [9].

Konečně **třetí fázi** rozptylu je pak úplné naředění těžkého plynu vzduchem, tj. jeho splynutí s okolní atmosférou. Zde se uplatňují zejména síly dynamické,

způsobené mechanickými účinky větru a v menší míře pak i molekulová difúze působící ve směru koncentračního gradientu. Tuto fázi rozptylu nejvíce ovlivňují panující povětrnostní podmínky, kdy má významný vliv stabilita atmosféry [5].

3.2 Chlor

3.2.1 Vlastnosti chloru

Chlor je chemický prvek s protonovým číslem 17, který náleží do skupiny halogenů (skupina VII.A v periodické tabulce prvků). Jeho základní fyzikálně-chemické vlastnosti shrnuje Tabulka 1. Na Zemi se kromě velmi malého množství volného chloru v sopečných plynech vyskytuje pouze jako součást chemických sloučenin. V zemské kůře je zastoupen 0,017 hmotnostními procenty. Přírodní chlor je směsí dvou stabilních izotopů: chloru-35 (75,53 %) a chloru-37 (24,47 %). Nejběžnější sloučeninou chloru je chlorid sodný, který se v přírodě vyskytuje jako krystalická kamenná sůl, nebo v rozpuštěné formě v mořské vodě [79].

Tabulka 1 Fyzikálně-chemické vlastnosti chloru [79]

Atomová hmotnost	35,446 až 35,457
Molekulární hmotnost	70,91 g.mol ⁻¹
Bod tání	-103 °C
Bod varu	-34 °C
Kritická teplota	144 °C
Hustota plynu (při tlaku 1 baru a teplotě 0 °C)	3,214 g.dm ⁻³
Hustota kapaliny (při bodu varu)	1,5623 g.cm ⁻³
Relativní hustota par (chlor/vzduch)	2,5
Rozpustnost ve vodě (při teplotě 30 °C)	5,1 g.dm ⁻³
Oxidační stavy	-1, +1, +3, +5, +7
Elektronová konfigurace	1 s ² 2 s ² 2 p ⁶ 3 s ² 3 p ⁵

Chlor je nehořlavá, ale velmi reaktivní látka, která se ochotně slučuje s většinou prvků periodické soustavy. Výbušně reaguje nebo tvoří výbušné sloučeniny s mnoha látkami, jako například s acetylenem, etherem, terpentýnem, amoniakem, vodíkem a s některými kovy v práškové podobě. Při pokojové teplotě a za normálního atmosférického tlaku se jedná o žlutý až žlutozelený plyn. Ten lze snadno zkapalnit ochlazením pod bod varu, anebo stlačením na několik atmosfér [79] (viz fázový diagram znázorněný na Obrázek 10). V kapalném stavu se jedná o těžkou olejovitou tekutinu oranžově žluté barvy (viz Obrázek 5), která se na vzduchu rychle vypařuje a vytváří oblaky nasycených par [19] (viz Obrázek 29).



Obrázek 5 Kapalný chlor s nasycenými párami [80]

Chlor má silný dráždivý a dusivý účinek a je vysoce toxický pro vodní organismy. Ve vodě je dobře rozpustný, přičemž se vzrůstající teplotou jeho rozpustnost klesá. Rozpouštěním chloru ve vodě vzniká silně kyselý roztok kyseliny chlorné (HClO) a kyseliny chlorovodíkové (HCl), který má žíravé a bělicí účinky, tzv. chlorová voda [15]. Chlorová voda má také silné korozivní účinky,

protože aktivní chlor se ochotně slučuje se železem za tvorby chloridu železitého (FeCl_3).

Chlor je jedním z nejreaktivnějších prvků vůbec, protože má vysokou elektronegativitu a vysokou elektronovou afinitu. Ta je dokonce o něco vyšší než u fluoru. Afinita chloru k vodíku je dokonce tak velká, že reakce s ním probíhá až explozivně. Reakce vodíku s chlorem, během které vzniká chlorovodík, se proto musí provádět tak, že proud vodíku je přiváděn do komory zaplněné chlorem, kde vodík na trysce hoří stříbřitým plamenem. Vysoká afinita k vodíku umožňuje chloru reagovat s mnoha sloučeninami obsahujícími vodík. Velmi ochotně tak reaguje s uhlovodíky, v nichž postupně nahrazuje atomy vodíku (dochází k chloraci). Pokud je uhlovodík nenasycený, atomy chloru dvojnou nebo trojnou vazbu adují [79].

Chlor se ochotně slučuje s většinou prvků periodické soustavy, vyjma lehčích vzácných plynů, dusíkem, kyslíkem a uhlíkem. Chlor také dokáže vytěsnit ze sloučenin těžší, méně elektronegativní halogeny, jakými jsou brom a jód. Těmito reakcemi vznikají chloridy. V chloridech kovů vzniká iontová vazba, zatímco v chloridech polokovů a nekovů vazba kovalentní. Chlor je velmi reaktivní jak v molekulární podobě, tak i v podobě radikálu.

Chlor se vyrábí ve velkém měřítku některou z mnoha různých metod. Nejčastěji se jedná o elektrolýzu koncentrovaného roztoku chloridu sodného rozpuštěného ve vodě, kdy na katodě vzniká vodík a na anodě chlor. Současně v elektrolytu vzniká hydroxid sodný. Většina vyrobeného chloru se používá pro chemické procesy zahrnující zavádění chloru do organických sloučenin.

Reakcí s některými látkami mohou vznikat velmi nebezpečné produkty. S dusíkatými sloučeninami chlor reaguje za vzniku výbušného chlorodusíku [16].

Reakcí s oxidem uhelnatým pak vzniká karbonylchlorid (COCl_2) neboli fosgen. Jedná se o prudce jedovatý plyn, který je v chemickém průmyslu hojně využíván, například při výrobě isokyanátů, polyuretanů nebo v metalurgii k přeměně některých oxidů na chloridy [79].

Práce s chlorem jednoznačně patří mezi velmi rizikové činnosti. V minulosti již došlo k mnoha nehodám se smrtelnými následky. Při manipulaci s touto látkou je proto nezbytné zachovávat přísná bezpečnostní opatření [18]. Ta jsou stanovena v různých právních předpisech a doporučeních, jako například v nařízení vlády č. 361/2007 Sb. [82] nebo v příručce NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [21] (viz Tabulka 2).

Tabulka 2 Informační karta pro chlor podle NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [21]

Chlorine	Formula: Cl ₂	CAS#: 7782-50-5	RTECS#: FO2100000	IDLH: 10 ppm
Conversion: 1 ppm = 2.90 mg/m ³		DOT: 1017 124		
Synonyms/Trade Names: Molecular chlorine				
Exposure Limits: NIOSH REL: C 0.5 ppm (1.45 mg/m ³) [15-minute] OSHA PEL†: C 1 ppm (3 mg/m ³)			Measurement Methods (see Table 1): NIOSH 6011 OSHA ID101, ID126SGX	
Physical Description: Greenish-yellow gas with a pungent, irritating odor. [Note: Shipped as a liquefied compressed gas.]				
Chemical & Physical Properties: MW: 70.9 BP: -29°F Sol: 0.7% Fl.P: NA IP: 11.48 eV R _{GasD} : 2.47 VP: 6.8 atm FRZ: -150°F UEL: NA LEL: NA Nonflammable Gas, but a strong oxidizer.	Personal Protection/Sanitation (see Table 2): Skin: Frostbite Eyes: Frostbite Wash skin: N.R. Remove: N.R. Change: N.R. Provide: Frostbite wash	Respirator Recommendations (see Tables 3 and 4): NIOSH 5 ppm: CcrS*/Sa* 10 ppm: Sa:Cf*/PaprS*/CcrFS/GmFS/ ScbaF/SaF §: ScbaF: Pd, Pp/ SaF: Pd, Pp: AScba Escape: GmFS/ScbaE		
Incompatibilities and Reactivities: Reacts explosively or forms explosive compounds with many common substances such as acetylene, ether, turpentine, ammonia, fuel gas, hydrogen & finely divided metals.				
Exposure Routes, Symptoms, Target Organs (see Table 5): ER: Inh, Con SY: Burning of eyes, nose, mouth; lac, rhin; cough, choking, subs pain; nau, vomit; head, dizz; syncope; pulm edema; pneu; hypox; derm; liquid: frostbite TO: Eyes, skin, resp sys			First Aid (see Table 6): Eye: Frostbite Skin: Frostbite Breath: Resp support	

Vysvětlivky k Tabulce 2:

- MW = molární hmotnost látky
- BP = bod varu při tlaku 1 atm

- Sol = rozpustnost ve vodě při 68 °F, % hmotnosti (např. g/100 ml)
- Fl.P = teplota vznícení
- IP = ionizační potenciál
- Sp.Gr = specifická hmotnost při 68 °F vztažená k vodě při teplotě 39,2 °F (4 °C)
- RGasD = relativní hustota plynu vztažená ke vzduchu (označuje, kolikrát je plyn těžší než vzduch).
- VP = tlak nasycené páry při určité teplotě °F
- FRZ = bod tání
- UEL = horní mez výbušnosti
- LEL = spodní mez výbušnosti
- MEC = minimální explozivní koncentrace, g.m⁻³ (pokud je dostupná)
- SKIN = doporučení pro používání osobního ochranného oděvu
- EYES = doporučení používat prostředků k ochraně očí
- WASH SKIN = doporučení pro důkladné omytí těla v případě zasažení danou látkou
- REMOVE = doporučení odstranit ochranné oděvy v případě kontaminace
- CHANGE = doporučené intervaly výměny ochranných oděvů
- PROVIDE = doporučení používat oční sprchy
- ER = nebezpečný kontakt s kůží nebo s očima
- SY = potenciální symptomy expozice
- TO = seznam cílových orgánů

Silné toxicity chloru bylo úmyslně využito v 1. světové válce. Plynný chlor coby bojová chemická látka byl poprvé použit německou armádou dne 22. dubna 1915 v polích západně od belgického města Ypres (viz Obrázek 6). Při útoku bylo vypuštěno zhruba 170 tun chloru z přibližně 5 700 tlakových lahví pravidelně rozmístěných na šestikilometrovém úseku fronty (viz Obrázek 7). Odhaduje se, že jím bylo zasaženo na 7 000 francouzských vojáků, z nichž 350 zemřelo bezprostředně po zasažení (viz Obrázek 8). Jako bojový prostředek byl následně používán oběma válčícími stranami; první britský chlorový útok byl podniknut 24. září 1915. V pozdějších letech 1. světové války byl chlor nahrazen ještě toxičtějšími plyny – fosgenem (18x účinnější než chlor) a yperity (38x účinnější než chlor) [49, 81].



Obrázek 6 První použití chloru německými vojáky [83]



Obrázek 7 Letecký pohled na německý plynový útok [83]



Obrázek 8 Výjevy po útoku chlorem (obraz Johna Singera Sargenta z roku 1918) [49]

Z jednoho litru kapalného chloru se může za normálních podmínek vytvořit až 475 dm³ plynného chloru [15]. Jistou výhodou plynného chloru ovšem je, že má dobré "varovné" vlastnosti – je cítit již při koncentracích 0,01 ppm až 0,31 ppm. Pro lepší představivost lze uvést, že 1 ppm chloru odpovídá koncentraci cca 3 mg.m⁻³. Podráždění očí nastává při koncentraci 3 ppm, u vnímavějších jedinců již od 1 ppm [18].

Příznaky intoxikace jsou:

- pálení očí, nosu, úst,
- slzení (výtok slz), rinorea (výtok nosního hlenu),
- kašel, dusivost, bolest vyskytující se za hrudní kostí,
- nevolnost, zvracení,
- bolest hlavy, závratě, synkopa,
- plicní otok,
- pneumonitida,
- hypoxie (snížená koncentrace kyslíku v krvi),
- dermatitida.

Koncentrace chloru ve vzduchu, nad kterou se předpokládá, že u běžné populace, včetně odolných jedinců, se projeví zdravotní účinky ohrožující život:

- 50 ppm při expozici 10 min,
- 20 ppm při expozici 60 min,
- 7 ppm při expozici 8 hodin.

Osoby s chronickými respiračními problémy, jako je astma, reagují citlivěji [20], takže výše uvedené hodnoty je nutné chápat jako orientační. Konkrétní hodnoty toxikologických limitů stanovených pro chlor shrnuje Tabulka 3 níže.

Tabulka 3 Vybrané toxikologické limity pro chlor (podle [14, 20, 21, 22])

Koncentrační limit	Doba expozice	Popis limitu	Hodnota
LC _{Lo}	5 min	Nejnižší koncentrace látky ve vzduchu, která při akutní expozici způsobí exponované osobě smrt.	od 500 ppm ¹
	30 min		od 420 ppm ²
IDLH	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.	10 ppm
NPK-P	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 (imisní koncentrace).	1 ppm
PEL	8 hod	Celosměnově časově vážená průměrná koncentrace látky 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.	0,5 ppm

¹ Některé zdroje uvádějí hodnotu 1000 ppm (např. [22]).

² Některé zdroje uvádějí hodnotu 840 ppm (např. [22]).

Koncentrační limit	Doba expozice	Popis limitu	Hodnota
ERPG-1	60 min	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.	1 ppm
ERPG-2	60 min	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 nebo se u nich vyvinuly nezvratné nebo jiné vážné účinky nebo příznaky, které by mohly poškodit jejich schopnosti podniknout záchrannou činnost.	3 ppm
ERPG-3	60 min	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 nebo se u nich vyvinuly účinky ohrožující zdraví nebo život.	20 ppm
AEGL-1	60 min	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.	0,5 ppm
AEGL-2	60 min	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.	2 ppm
AEGL-3	60 min	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.	20 ppm
PAC-1	60 min	Koncentrace nebezpečné látky v ovzduší, při jejímž dosažení se předpokládají mírné, přechodné účinky na zdraví exponovaných osob.	0,5 ppm

Koncentrační limit	Doba expozice	Popis limitu	Hodnota
PAC-2	60 min	Koncentrace nebezpečné látky v ovzduší, při jejímž dosažení se předpokládají nevratné nebo jiné závažné účinky na zdraví exponovaných osob, které by mohly narušit schopnost provést ochrannou činnost.	2 ppm
PAC-3	60 min	Koncentrace nebezpečné látky v ovzduší, při jejímž dosažení mohou nastávat život ohrožující účinky na zdraví exponovaných osob.	20 ppm

Vysvětlivky zkratk použitých v Tabulce 3:

Přepočet koncentrací pro chlor: 1 ppm = 3 mg.m⁻³

- IDLH = Immediately Dangerous to Life and Health
- NPK-P = Nejvyšší přípustná koncentrace v pracovním ovzduší
- PEL = Přípustný expoziční limit
- ERPG = Emergency Response Planning Guidelines
- AEGL = Acute Exposure Guideline Levels
- PAC = Protective Action Criteria

3.2.2 Využití chloru v praxi

Chlor ať již v elementární podobě nebo ve formě sloučenin má poměrně široké praktické využití [16, 19, 23]. Nejčastěji se používá pro:

- **Dezinfekci vody.** K dezinfekci vody se dnes kromě ozónu používají především chlor, chlornany, oxid chloričitý nebo organické chlorderiváty. Všechny tyto chemické látky jsou buď přímo silná oxidační činidla, nebo jejich prekurzory. Chlor a jeho sloučeniny se používají především při čištění odpadních vod. Výhody ClO_2 oproti chloru jsou lepší oxidační vlastnosti, menší závislost na pH a hlavně nevznikají organické chlorderiváty.
- **Výrobu pyrotechniky.** V pyrotechnice se využívají především sloučeniny chloru se silnými oxidačními účinky. Jsou to např. chlorečnany a chloristany, které prudce reagují s mnoha organickými i anorganickými látkami.
- **Vojenské účely.** Chlor a mnoho organických halogenderivátů (fosgen, yperit, lewisit apod.) patří mezi tzv. otravné látky neboli bojové plyny. Jsou to vesměs chemické látky velmi toxické pro živé organismy včetně člověka, a proto byly a jsou zneužívány pro vojenské účely.
- **Stavební průmysl.** Ve stavebním průmyslu a sportu se uplatňují především chlorované polymery neboli plasty. Pro stavební průmysl a nejrůznější řemeslné práce (instalatérství) je velmi důležitý a rozšířený polymer PVC.
- **Sport.** Pro vodní sporty, zejména potápění, je hojně využíván chlorovaný polymer – chloropren, známější pod obchodním označením Neopren.
- **Zdravotnictví.** V minulosti se v medicíně jako celkové inhalační anestetikum používal chloroform, dnes byl nahrazen méně nebezpečnými fluorderiváty. Mezi chemické sloučeniny obsahující chlor patří i cisplatina ze skupiny chemoterapeutik určených pro léčbu některých druhů rakoviny. Mezi dezinfekční prostředky patří například dettol.

- **Chemický průmysl.** V chemickém průmyslu se uplatňuje velké množství sloučenin chloru a dokonce i chlor elementární. Chlor se využívá při výrobě velmi čistých prvků (např. křemík), plastů, rozpouštědel, freonů, pesticidů atd. Kyselina chlorovodíková se využívá jako činidlo v organické syntéze k výrobě halogenderivátů jako meziproduktů mnoha reakcí (při výrobě polykarbonátů, polyuretanů – sedadla nebo přístrojové desky, nebo aramidů – ohnivzdorné materiály a neprůstřelné vesty), při přípravě chloridů atd. Používá se též pro přípravu lučavky královské (triviální název pro směs kyseliny chlorovodíkové a kyseliny dusičné v poměru 3 : 1). Chlorid kobaltnatý se používá jako příměs do sušidel v chemické laboratoři díky barevným změnám.

3.2.3 Skladování a přeprava chloru

Chlor bývá skladován a přepravován nejčastěji jako zkapalněný plyn. Jako přepravní obaly jsou nejčastěji používány nesnímatelné cisterny (tj. cisternová vozidla), snímatelné cisterny, bateriová vozidla, cisternové kontejnery, přemístitelné cisterny, MEGC (vícečláňkové kontejnery na plyny) a velké množství tlakových nádob různých objemů, jako jsou tzv. drobné obaly, tj. tlakové láhve a tlakové sudy. V praxi se můžeme nejčastěji setkávat s těmito přepravními jednotkami [24]:

- ocelové tlakové lahve o vodním objemu až 50 litrů (pro laboratoře, veřejné bazény, koupaliště a aquaparky),
- tlakové ocelové sudy o vodním objemu až 500 litrů (pro úpravny pitných vod),
- automobilové cisterny typu P22DH(M) o ložném vodním objemu až 38 m³,
- přemístitelné cisterny (mobilní zásobníky) 20FT T50 o ložném vodním objemu 24 m³ (tj. 30 tun kapalného chloru) (viz Obrázek 12).

- železniční cisterny typu P22DH(M) o ložném vodním objemu 40 m³ (tj. pro max. 50 tun kapalného chloru) nebo 53 m³ (tj. pro max. 66 tun kapalného chloru)³ (viz Obrázek 11) ⁴.

Zařízení pro přepravu chloru musí být označena v souladu s požadavky mezinárodních úmluv ADR a RID, a to zejména tabulkou s Kemlerovým kódem (265, nebo 266, nebo 268) a UN kódem 1017 (viz Obrázek 9).



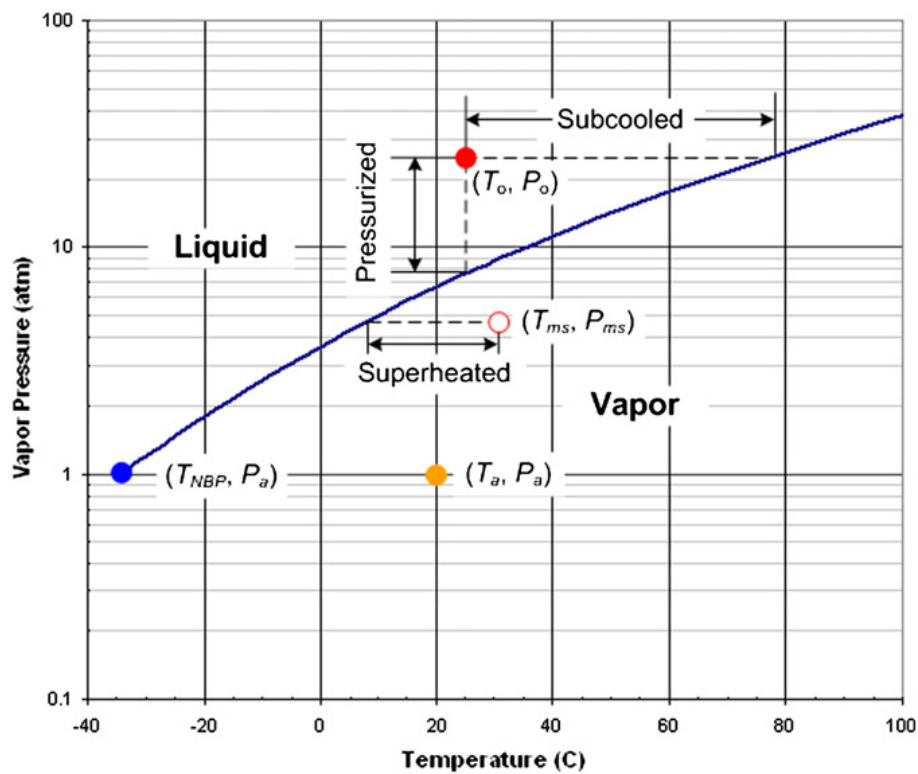
Obrázek 9 Označení železniční cisterny převážející chlor [108]

V průmyslu bývá chlor skladován v místě použití ve stacionárních zásobnících, zpravidla horizontálních cylindrických (viz Obrázek 13), o vodním objemu od jednotek m³ až do 55 m³, výjimečně i větších [23, 26]. Zde je chlor udržován v kapalném skupenství jednak stlačením a jednak ochlazováním na teplotu umožňující jeho bezpečné skladování za stavu rovnovážného tlaku par. Tento stav se za daného tlaku nachází těsně pod bodem varu [78]. Parametry skladování chloru v průmyslových zásobnících bývají následující: teplota přibližně -1 °C a tlak par

³ Podle Řádu pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečného zboží (RID) je maximální hmotnost plnění železniční cisterny kapalným chlorem stanovena v poměru 1,25 kg kapalného chloru na 1 litr objemu železniční cisterny. Tomu odpovídá limit pro plnění železničních cisteren kapalným chlorem na úrovni 80 % jejich vodního objemu. Někteří výrobci však z důvodu dodržení podmínek pro nejvyšší užitečné zatížení náprav použitého železničního vozu plní cisterny pouze na úroveň 70 %.

⁴ V USA se pro přepravu chloru používají železniční cisternové vozy ve třech velikostech s nosností 55 tun, 85 tun a 90 tun. (viz <https://www.saferack.com/bulk-chemical/chlorine-loading-platforms/>).

chloru 345 kPa. V případě atmosférických zásobníků ovšem musí být teplota kapalného chloru udržována pod $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ (viz Obrázek 10).



Obrázek 10 Saturační křivka pro chlor [78]



Obrázek 11 Železniční cisterna pro přepravu 66 tun kapalného chloru používaná ve SPOLCHEMIE [88]



Obrázek 12 Mobilní zásobník 20FT T50 [17]



Obrázek 13 Stabilní cylindrické zásobníky pro venkovní skladování chloru [117]

3.3 Nehody spojené s únikem chloru

Ačkoli je chlor poměrně hojně používanou, resp. vyráběnou a převáženou nebezpečnou chemickou látkou, havárií, při nichž došlo k jeho masivnímu úniku, není mnoho. Do roku 1989 se většina evidovaných nehod stala v USA (135) a v Nizozemí (82), následovalo Německo (22), Kanada (13) a Velká Británie (10). V ostatních státech světa se v tomto období jednalo pouze o jednotky případů. Historicky nejhorší havárie, o níž ale nejsou známy bližší informace, se stala v USA

v roce 1979. Během hodiny údajně uniklo 470 tun chloru, který vytvořil oblak dlouhý přes padesát kilometrů, přičemž koncentrace 2 ppm byly naměřeny 45 km od místa havárie [22]. Téhož roku, konkrétně 10. listopadu, se pak v Mississauga v Kanadě, stala vůbec nejhorší havárie v dějinách Ameriky. Vykolejil zde nákladní vlak se 106 vagony, v nichž byly převáženy mimo jiné výbušniny, různé chemikálie a také chlor. Následkem několika výbuchů, z nichž jeden byl tak silný, že jednu cisternu dokonce odhodil až kilometr daleko, došlo k porušení cisterny s chlorem a k úniku 90 tun této toxické látky [50].

Z dostupné odborné literatury a otevřených zdrojů lze získat poměrně hodně informací o historických nehodách spojených s únikem chloru. Pro účely této práce byli výchozími zdroji dvě oficiální databáze a jedna souhrnná analýza:

- BARPI Chlorine accidentology [25],
- Databáze ARIA [26],
- Informační systém MARS [27].

3.3.1 Události evidované v evidenci Chlorine accidentology

Jedná se o souhrnnou zprávu francouzské agentury BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles) se sídlem v Lyonu, která byla vypracována na základě informací o 557 nehodách (251 událostí z Francie a 306 událostí z ostatních zemí), ke kterým došlo v období od ledna 1917 do 31. května 2003. Dokument se zaměřuje na nehody, ke kterým došlo během skladování, zpracování nebo přepravě velkého množství chloru.

Z uvedeného počtu 557 nehod došlo při 35 z nich k okamžitému anebo k následnému usmrcení celkem 240 lidí, přičemž k 42 % úmrtí došlo v chemickém průmyslu a 38 % úmrtí připadá na nehody mobilních zařízení přepravujících chlor.

U celkem 369 nehod je známo uniklé množství (viz Tabulka 4). Z hlediska uniklého množství chloru, lze nehody přepravních zařízení považovat za závažnější než nehody stacionárních zdrojů (výrobní nebo skladovací zařízení), neboť k velkým únikům (tj. více jak 1 000 kg chloru) došlo při 25 % z nich, zatímco ze stacionárních zařízení uniklo stejné množství chloru pouze ve 14 % případů. Pokud jde o malé úniky (tj. méně jak 100 kg chloru) je v případě stacionárních zařízení i mobilních zařízení stejný poměr (66 % nehod).

Z 557 havárií s únikem chloru vedlo nejméně 42 z nich k úniku více než 1 000 kg chloru, přičemž v jedenácti z těchto případů došlo k usmrcení nejméně jednoho člověka.

Tabulka 4 Statistika havárií s následkem úniku chloru [25]

Celkové uniklé množství chloru	Počet nehod přepravních zařízení	Počet nehod stacionárních zařízení	Počet nehod v plaveckých bazénech a v úpravnách vod	Celkem
0	23	2	0	25
méně jak 100 kg	16	126	108	250
100 až 500 kg	5	24	5	34
500 až 1 000 kg	1	16	1	18
1 000 až 5 000 kg	1	14	0	15
5 000 až 10 000 kg	3	3	0	6
více jak 10 000 kg	11	10	0	21
Celkem	60	195	114	369

Z uvedeného dokumentu lze jako vhodné kazuistiky použít celkem 7 případů úniku chloru ze stacionárního zásobníku, které jsou současně uvedeny také v databázi ARIA.

Baton Rouge (USA)

Havárie se stala 10. 12. 1976, kdy několik minut po restartování kompresoru pro zkapalňování chloru, který byl vypnut z důvodu údržby, došlo k výbuchu zkapalňovací jednotky. Výbuch byl způsoben tím, že do potrubí určeného pro chlor byl přes trasu inertizátoru omylem vtlačen zemní plyn. Ten byl totiž ve stejnou dobu, kdy probíhala odstávka kompresoru, použit pro zkoušku těsnosti vodíkového kompresoru. Jeden ze zásobníků obsahujících 130 tun kapalného chloru (skladovací tlak 7 barů), se účinkem výbuchu nadzvedl a při zpětném dopadu dosedl na tlakový snímač, který jej propíchl. Vzniklým otvorem o rozměrech 150 x 40 mm následně chlor unikl 5,5 hodiny, přičemž uniklo celkem 91 tun chloru. Ze zasažené oblasti bylo evakuováno více než 10 tisíc osob, avšak ke ztrátám na lidských životech naštěstí nedošlo.

Brückl (Rakousko)

Havárie se stala v roce 1976 v závodě Donau Chemie, kdy během odplyňování a následného plnění zásobníku došlo k úniku 2 tun kapalného chloru. Obě operace se prováděly současně, přičemž spojovací ventil mezi kapalným chlorem a odplyňovacím potrubím zůstal v otevřené poloze. Chlor tak byl strháván do odplyňovacího potrubí z PVC, namísto toho, aby tekł do zásobníku. PVC bylo chlorem rozleptáno a chlor tak začal unikat do ovzduší. Chybné napouštění navíc nebylo včas odhaleno, protože v zásobníku nefungovalo hladinové čidlo. Několik přítomných zaměstnanců bylo intoxikováno.

Borregaard (Norsko)

Havárie se stala 5. 5. 1950, kdy po nevydařené opravě ventilu zásobníku došlo k úniku 1,5 až 2 tun plynného chloru do ovzduší. Při havárii došlo k intoxikaci dvou dělníků a část obyvatel města Borregaard byla evakuována.

Rauma (Finsko)

Havárie se stala 5. 11. 1947, kdy došlo k rozvalení nádrže obsahující 25 tun chloru v důsledku jejího přeplnění. Došlo k explozi, která způsobila destrukci několika budov v průmyslovém areálu. Potrubí a ventily dalších 5 zásobníků byly při explozi vážně poškozeny. Při výbuchu došlo k rozmetání celkem 43 kontejnerů obsahujících 1 tunu chloru, avšak nedošlo k jejich poškození. Při nehodě došlo k úniku 25 tun chloru z rozvaleného zásobníku a dalších 15 tun uniklo z ostatních poškozených zařízení během následujících dvou dnů. Celkem zahynulo 19 osob a přibližně 100 lidí bylo intoxikováno.

Strömsbruk (Švédsko)

Havárie se stala 13. 12. 1953, kdy při opravě jednoho z ventilů zásobníku došlo k jeho nesprávnému smontování, což při opětovném uvedení zařízení do provozu způsobilo únik 10 tun kapalného chloru.

Flix (Španělsko)

Havárie se stala 10. 8. 1981, když se vřeteno, kterým byl ovládán vypouštěcí ventil zásobníku s chlorem, zlomilo. Celý obsah zásobníku čítající 2 tuny chloru unikl. Došlo k intoxikaci 7 lidí.

Acajutla (Salvador)

Havárie se stala 1. 4. 1997 v závodě na výrobu pracích prostředků, kdy došlo k úniku 30 tun chloru ze zásobníku. Následkem toho došlo k intoxikaci 400 osob (většinou dětí). Stovky dalších byly evakuovány.

3.3.2 Události evidované v databázi ARIA

ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents) [26] je databáze průmyslových havárií provozovaná od roku 1992 francouzským ministerstvem ekologie a trvale udržitelného rozvoje prostřednictvím jím řízené agentury BARPI. Databáze byla původně založena pro potřeby francouzských úřadů, ale pro svou dostupnost byla po svém uvedení na internet brzy využívána i uživateli mimo Francii. 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 (srpen 2024) je v databázi ARIA uvedeno 60 588 havárií a nehod, přičemž každý rok je do databáze přidáno přibližně 1 200 nových událostí.

Jak bylo uvedeno výše, v evidenci Chlorine accidentology byly uvedeny pouze nehody, které se staly do 1. 5. 2003. Abych získal ucelený obrázek o nehodách spojených s úniky chloru, provedl jsem analýzu nehod, které se staly po tomto datu (tj. v období od 1. 6. 2003 do 31. 7. 2023). V databázi ARIA jsem dohledal 126 událostí, z nichž se v 55 případech jednalo o únik chloru do ovzduší, který vedl k intoxikaci lidí nebo ohrožení obyvatel. Uvedené nehody lze v principu rozdělit do pěti skupin podle charakteru zdroje úniku:

- Úniky v průmyslových podnicích (chemická výroba, metalurgické výroby, plynárny, elektrárny) – 39 událostí.
- Úniky při přepravě chloru železničními nebo automobilovými cisternami – 7 událostí.
- Úniky v úpravnách vod nebo čistírnách odpadních vod – 4 události.
- Úniky související s používáním nebo skladováním bazénové chemie – 3 události.
- Jiné události spojené s úniky chloru – 2 události.

Nejvíce událostí se stalo v průmyslu. Typicky šlo o úniky menšího množství chloru v důsledku nežádoucí chemické reakce bělidla nebo desinfekčního prostředku obsahujícího chlornan sodný, případně reakce chloridu hlinitého s některou z minerálních kyselin (HCl , HNO_3 , H_2SO_4). Jen velmi málo událostí bylo spojeno s masívním únikem chloru ze zásobníků, tlakových lahví nebo z elektrolyzérů. Relativně malé úniky chloru se staly také v úpravnách vody, resp. čistírnách odpadních vod, přičemž příčiny těchto incidentů jsou obdobné jako v případě průmyslových závodů, tj. smíchání desinfekčního prostředku nebo koagulantu (chloridu hlinitého) s kyselinami. Příčinami všech těchto událostí byla povětšinou lidská chyba nebo opomenutí.

Poněkud odlišný průběh mají úniky chloru při používání/skladování bazénové chemie. Zejména ve velkých veřejných aquacentrech se stává, že dojde k nadměrnému dávkování desinfekčního prostředku na bázi chlornanu sodného, díky čemuž se z vody v bazénech uvolňuje plynný chlor. Uvolněné množství chloru sice nebývá velké, ale díky jeho hromadění nad hladinou vody může dojít k vážnému ohrožení lidského zdraví i při relativně nízkých koncentracích tohoto plynu. Kromě toho může docházet k úniku chloru z technického zázemí aquacenter, a to opět z důvodu nešikovné manipulace s chlornanem sodným, kdy

dochází k rozlítí, případně v důsledku úkapů netěsnostmi v potrubním systému anebo při jeho smíchání s kyselinou.

Úniky vzniklé při přepravě chloru železničními nebo automobilovými cisternami jsou pro změnu spojené s velkými úniky, ke kterým ale naštěstí dochází ve venkovním prostoru. Z evidovaných událostí se až na jednu všechny staly na železnici, a to v důsledku vykolejení železničních cisteren při jejich posunu na seřadovacím nádraží, nebo při jejich odplynování. Proběhlé nehody také poukázaly na důležitou skutečnost, a to, že i v odstavených vyčerpaných železničních cisternách se nachází nemalé zbytkové množství kapalného chloru (až 1,6 tuny), který může uniknout a způsobit vážné následky. Jedna z evidovaných událostí se stala při dopravní nehodě, kdy došlo převrácení kamionu převážejícího IBC kontejnery s různými chemikáliemi. V uvedeném případě se jednalo o desinfekční prostředek obsahující chlornan sodný a kyselinu chlorovodíkovou, které se při nehodě smísily, což vedlo ke vzniku plynného chloru.

Mezi analyzovanými 55 událostmi byly i dva poměrně netradiční případy. Prvním byl únik plynného chloru z plynovodu dlouhého 3,6 km, v němž se po dlouhé roky hromadil korozivní produkt chlorid železitý. Při údržbě plynovodu došlo k průniku vlhkosti do vnitřku potrubí, což způsobilo hydrataci chloridu železitého s následným vznikem vodíku, který se po dosažení koncentrace 20 % objemových samovznítil. Při výbuchu došlo ke čtyřem rupturám, jimiž uniklo 475 kg chloru. Druhý případ se stal v sýrárně, kdy pracovníci používali pro odstranění vodního kamene z dřezu koncentrovanou organickou kyselinu. Z neznalosti pak po provedeném čištění do dřezu nalili 2 litry dezinfekce, která v potrubí zreagovala s kyselinou za vývinu plynného chloru. Nikdo nebyl naštěstí vážně zraněn.

Pomocí filtru jsem v databázi ARIA vyhledal také všechny historické události, při kterých došlo k úniku nebezpečných látek klasifikovaných stupněm 3 a vyšším (tj. únik více jak 1 tuny nebezpečné látky). Celkem se jednalo o tři události:

- Únik 6,5 tun chloru ze železniční cisterny po dobu 3,5 hodiny (20. 7. 2003, USA).
- Únik 83,5 tuny 2,6 % bělidla (chlornanu sodného), které se začalo rozkládat za vývinu chloru (7. 10. 2015, Francie).
- Únik 12 tun chloru během přečerpávání železniční cisterny, kdy došlo k poškození přečerpávacího potrubí v důsledku výbuchu cisterny s methanthiolem (dominoefekt) nacházející se v blízkosti stáčecího místa (14. 7. 2001, USA).

3.3.3 Události evidované v databázi eMARS

Databáze eMARS (Major Accident Reporting System) je oficiální informační systém Evropské komise, který soustřeďuje systematizované informace o proběhlých závažných haváriích na území členských států EU [27]. Sestává z 15 lokálních databází provozovaných v některých státech Evropské unie a jednoho centrálního systému, který provozuje výzkumné středisko Major Accident Hazard Bureau v Ispře. MARS byl zaveden v roce 1993 a od roku 2001 je provozován online prostřednictvím webového rozhraní. Obsahuje nicméně i hlášení o starších událostech. Ke dni zpracování této disertační práce zde bylo uvedeno 1 188 hlášení.

Událostí klasifikované stupněm „Major Accident“ je v databázi uvedeno osmnáct (viz Obrázek 14). Jedná se o takové události, které splňují kritéria pro oznamování havárie Evropské Komisi podle direktivy Seveso, které jsou v českém právním řádu uvedeny v Příloze č. 3 k zákonu č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií. Níže je ve stručnosti popsáno několik z nich.

[About this site](#) | [Legal notice](#) | [Privacy Statement](#) | [Cookies](#) | [Contacts](#) | [Search](#) | [JRC Science Hub](#) | English (en) ▼



EUROPEAN COMMISSION

European Commission > JRC Science Hub > MINERVA Portal
Login

[Back to dashboard](#)
Search Accident Reports

Accident date
 From: ... To: ...

Accident Year *

Legislation

Event Type

Industry Type

Sort by

☒ Ascending
 ☐ Descending

Results per page

*Due to routine process time, the most recent three calendar years are incomplete and not representative of total accidents occurring in the EU in those years. The numbers from the list three years of data should NOT be used in an analysis to represent yearly trends.

Results - 18 accident reports

Start Date	Legislation	Event Type	Accident Title	Industry Type
25/04/1985	EU Seveso I Directive	Major Accident	Chlorine release in the hot ...	Processing of metals
11/03/1986	EU Seveso I Directive	Major Accident	Release of Chlorine and ...	Processing of metals
15/08/2002	EU Seveso II Directive	Major Accident	Chlorine release due to large ...	General chemicals manufacture (not included above)
06/08/1981	EU Seveso I Directive	Major Accident	Chlorine leak due to pipe ...	General chemicals manufacture (not included above)
08/02/1984	EU Seveso I Directive	Major Accident	Leak of liquid chlorine from ...	General chemicals manufacture (not included above)
01/03/1984	EU Seveso I Directive	Major Accident	Dispersion of chlorine caused ...	General chemicals manufacture (not included above)
14/07/1985	EU Seveso I Directive	Major Accident	Chlorine release after ...	General chemicals manufacture (not included above)
06/07/1991	EU Seveso I Directive	Major Accident	Nitric acid leaked from a ...	Wholesale and retail storage and distribution (excluding LPG)
20/05/1992	EU Seveso I Directive	Major Accident	Explosion and chlorine ...	Wood treatment and furniture
04/03/1995	EU Seveso I Directive	Major Accident	Chlorine release due to a ...	General chemicals manufacture (not included above)
30/09/1998	EU Seveso I Directive	Major Accident	Release of liquid chlorine at ...	General chemicals manufacture (not included above)
06/09/1988	EU Seveso I Directive	Major Accident	Chlorine leakage at start-up ...	General chemicals manufacture (not included above)
09/09/1996	EU Seveso I Directive	Major Accident	Chlorine release in a leisure ...	Leisure activities
26/10/1986	EU Seveso I Directive	Major Accident	Nitrogen oxides and ...	General chemicals manufacture (not included above)
05/11/1992	EU Seveso I Directive	Major Accident	Thick acrid smoke plume ...	Plastic and rubber manufacture
06/06/1989	EU Seveso I Directive	Major Accident	Accident occurred during ...	General chemicals manufacture (not included above)
15/08/2002	EU Seveso II Directive + OECD	Major Accident	Chlorine release due to large ...	General chemicals manufacture (not included above)
11/02/2004	EU Seveso II Directive	Major Accident	Release of Chlorine into the ...	General chemicals manufacture (not included above)

Obrázek 14 Výstup z databáze eMARS shrnujících havárie provázené únikem chloru

47

Únik chloru v důsledku vnitřní koroze potrubí

K nehodě došlo 6. 8. 1981 během normálního provozu elektrolyzy alkalických chloridů, kdy došlo ke korozi potrubí mezi kondenzátorem a sběrným zásobníkem chloru. Uniklo asi 500 až 1 000 kg chloru. Došlo ke zranění jednoho člověka a poškození okolo rostoucí vegetace (jehličnaté stromy).

Únik chloru z pojistného ventilu

Havárie se stala 1. 3. 1984. Opakovaným spouštěním turbokompresoru byla vyvolána tlaková vlna, která otevřela pojistný ventil instalovaný na chlorovém potrubí, což způsobilo únik asi 1 500 kg plynného chloru. Uvolněný chlor byl rozptýlen do atmosféry pomocí třicetimetrového ventilačního komínu. Únik trval 18 minut. Bylo zraněno 13 zaměstnanců a 6 osob z řad obyvatelstva.

Únik kapalného chloru z prokorodovaného potrubí

K havárii došlo 8. 2. 1984. V důsledku dlouhodobého hromadění vlhkosti v izolaci potrubí na potrubním mostě došlo k prokorodování pláště potrubí určeného pro kapalný chlor. Trhlinou o průměru 15 mm uniklo asi 500 kg chloru. Zraněn byl jeden zaměstnanec.

Uvolnění chloru z rozprašovacího systému horké vody v hutním závodě

Dne 25. 4. 1985 došlo v tavárně hliníku, kde byly provozovány tři slévárenské pece, k havárii. Pro odstranění hořčíku z taveniny zde byl používán chlor zaváděný ze dvou 500 kg tlakových lahví umístěných ve speciální, částečně otevřené místnosti. Jedna láhev byla připojena k chlorační jednotce, zatímco druhá byla náhradní. Ovládání chlorační jednotky bylo provedeno pomocí prodlužovací tyče, která byla napojena na uzavírací ventil lahve. Vřeteno ventilu a závitové pouzdro

tyče byly ale vyšroubovány, protože u něj vypadl zajišťovací šroub. Pouzdro a dřík ventilu vypadly, takže plynný chlor začal vytékat ventilem ven. Uniklo 160 kg chloru. Byli zraněni čtyři zaměstnanci a čtyři zasahující hasiči.

Uvolnění chloru po desorpční regeneraci aktivního uhlí

Dne 14. 7. 1985 po desorpční regeneraci filtru obsahujícího aktivní uhlí pomocí vzduchu došlo ke kontaktu chloru a železa, což vedlo ke vznícení chloru. Oheň způsobil uvolnění dalšího chloru do životního prostředí. Uniklo 550 kg chloru, což způsobilo poškození vegetace v blízkosti místa úniku.

Únik plynného chloru v důsledku nekontrolované reakce po přeplnění nádrže obsahující chlornan sodný

K nehodě došlo 11. 3. 1986 ve skladu pracoviště na moření kovů za studena. Celkem 4 lidé zemřeli a 6 bylo zraněno.

Únik chloru netěsností z výroby chlormethanu

Událost se stala 6. 9. 1988. Během spouštění výroby chlormethanu došlo k nesprávnému odvádění chloru do hlavního potrubí odplyňovacího systému a jeho následnému úniku. Havarijní četa závodu nasadila vodní clonu, aby zastavila šíření chloru z výroby chlormethanu. Při události uniklo neznámé množství chloru; zraněno bylo 5 zaměstnanců.

Únik chloru během údržby ohřívače chlorového okruhu

K nehodě došlo 6. 6. 1989 během údržby ohřívače chlorového okruhu jednotky elektrolyzy. Celkově bylo v zařízení 40 litrů kapalného chloru (tj. 55 kg). Skutečně

uniklé množství chloru ale činilo asi jen 25 litrů (35 kg), který unikl po dobu 1 až 2 hodin. V blízkosti továrny byl cítit chlor, nikdo ale nebyl zraněn.

Výbuch zásobníku obsahující kyselinu chlorovodíkovou s následným únikem chloru

Událost se stala 20. 5. 1992, kdy do nádrže obsahující kyselinu chlorovodíkovou bylo omylem napuštěno asi 100 litrů chlornanu sodného. Došlo k vývinu chloru a roztržení zásobníku. Příčinou bylo chybné označení autocisterny, která obsahovala chlornan sodný namísto kyseliny chlorovodíkové. Chybu udělali pracovníci dodavatelské firmy. Celkem 80 osob bylo vystaveno účinkům chloru a 34 z nich muselo být hospitalizováno.

Únik chloru z elektrolyzační jednotky

K havárii došlo 4. 3. 1995, kdy v důsledku exploze směsi chloru a vodíku vytvořené během elektrolýzy alkalických chloridů došlo k úniku asi 100 kg chloru. Byli zraněni tři hasiči a jeden zaměstnanec.

Únik chloru ze zařízení na úpravu vody v aquaparku

Havárie se stala 9. 9. 1996 v důsledku nesprávné manipulace s ventilem na chlorovacím potrubí. Celkem bylo zraněno 13 zaměstnanců, z nichž 10 bylo hospitalizováno a 2 byli vážně zraněni.

Únik kapalného chloru z plnárny železničních cisteren

Havárie se stala 30. 9. 1998. V důsledku nesprávné činnosti ventilu na plnicí trase kapalného chloru umístěném na cisternovém voze došlo k úniku kapalného chloru. Jakmile byl únik tekutého chloru zjištěn, byl ihned ručně uzavřen havarijní ventil

vozu. Personál zařízení ale nebyl schopen řešit vzniklou situaci (zapnutí odsavače par, spuštění vodní clony, evakuace zamořeného prostoru). Navíc dveře objektu plnárny byly celou dobu otevřené v rozporu s bezpečnostními předpisy. Množství uniklého chloru není známo. Zraněno bylo 28 osob, z nichž 26 bylo krátce hospitalizováno.

Únik chloru z poškozených zásobníků během povodně

Havárie se stala 15. 8. 2002, kdy během povodně na řece Vltavě voda zaplavila areál závodu Spolana Neratovice. Došlo k zaplavení nouzových retenčních jímek, nad nimiž byly umístěny zásobníky kapalného chloru. Zásobníky byly vyzdviženy, čímž došlo k uražení přívodních potrubí. Následkem toho došlo k úniku 80,42 tun chloru, který unikl do ovzduší po několik dní. Ohroženo bylo 5 zasahujících hasičů, zraněn ale nebyl nikdo.

3.3.4 Významné havárie ze Spojených států amerických

Zajímavé poučení nabízí také některé havárie spojené s masívními úniky chloru, které se staly v USA, z nichž mnohé byly dobře zdokumentované. Jako ilustrativní příklady uvádím kasuistiky nehod z Hendersonu (viz [20]), Riverview (viz [52]), Graniteville (viz [54, 31]) a Festusu (viz [51, 55]).

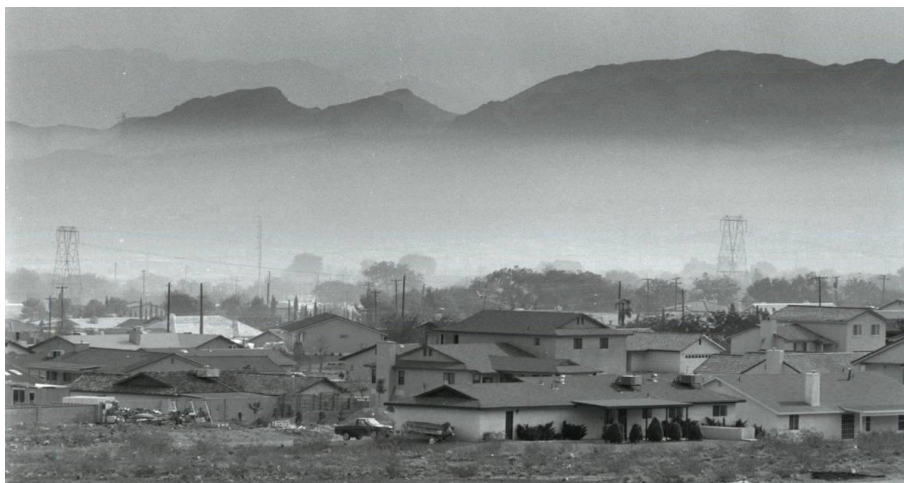
Havárie v Hendersonu

Havárie se stala v nočních hodinách 6. 5. 1991 v továrním komplexu Basic Management Inc. ve městě Henderson v Nevadě, která se nachází přibližně 10 km jihovýchodně od Las Vegas. Když byl komplex během druhé světové války založen, nacházel se v poušti, několik kilometrů od stávajících osídlených oblastí. Poblíž vznikla osada Henderson, kde byli ubytováni dělníci pracující v továrně. Osada se ale rychle rozrostla a v současnosti je město Henderson součástí hustě osídleného

předměstí Las Vegas s více než 60 000 obyvateli. Tovární komplex BMI je dnes téměř úplně obklopen rezidenčními čtvrtěmi města Henderson [20].

K úniku chloru došlo v chemičce Pioneer Chlor Alkali Co., kde se vyrábí plynňý chlor elektrolyzou solanky. Chlor je kompresory zkapalněn a uložen do osmi skladovacích nádrží, z nichž každá má kapacitu 150 tun. Celý skladovací systém má kapacitu přibližně 1 200 tun. Zkapalněný chlor je uložen v nádržích při tlaku přibližně 345 kPa a teplotě přibližně -1 °C. Před uskladněním se chlor suší, aby neměl korozivní účinky na vnitřní stěnu skladovacího zásobníku. Příčinou nehody patrně bylo právě poškození některé z trubiček uvnitř tepelného výměníku, což vedlo k průniku vody do jednoho ze zásobníků. Když pracovníci začali přečerpávat obsah této nádrže do železniční cisterny, žíravá kapalina rychle prokorodovala přečerpávací ocelové potrubí. V potrubí vznikl otvor umístěný za ventilem na výtláčné straně čerpadla. V 1:10 hod. byl v prostoru stáčiště detekován chlor. Provozní personál ihned zastavil čerpadlo a uzavřel vypouštěcí ventil, aby se zastavil výtok ze zásobních nádrží do netěsného potrubí. Zdálo se, že se jedná o menší únik, který byl dobře zvládnut. Přibližně v 1:50 hod. jedna řidička oznámila na policejní stanici v Hendersonu, že když po dálnici projížděla okolo chemického komplexu BMI, cítila silný štiplavý zápach. Hlášení bylo předáno hasičům z Las Vegas. Operační důstojník se rozhodl vyčkat, neboť zápach z okolí továrny je hlášen poměrně často. Přibližně ve 2:00 hod. obdrželi druhé hlášení. Na místo byla ihned vyslána hasičská jednotka z požární stanice Clark County. Po příjezdu ihned identifikovali zápach jako chlor. Jakmile hasiči dorazili k výrobě Pioneer Chlor Alkali Co., našli tam několik zaměstnanců, kteří byli vystaveni plynnému chloru a potřebovali okamžitou lékařskou péči. Byli to pracovníci, kteří odstavovali zařízení z provozu a snažili se izolovat únik. Ačkoli si všichni mysleli, že byla situace zvládnuta, během několika minut se ze stáčiště vyvalil hustý oblak chloru. Velitel zásahu požádal dispečink o pomoc a nařídil okamžitý ústup půl míle od místa

úniku, směrem do kopce. Zde bylo zřízeno velitelské stanoviště. Postupně na místo přijely další jednotky. S příchodem rána, jakmile vyšlo slunce, bylo možné vizuálně detekovat oblak chloru i zasaženou oblast. Několik čtverečních mil bylo pokryto žlutozeleným oparem, který tekł těsně nad zemí (viz Obrázek 15). Ukázalo se, že únik stále trvá a k jeho zastavení bude zapotřebí speciální zásah. Nebylo známo, kolik chloru uniklo, odhad činil 100 tun a více. Havárie si nevyžádala žádné lidské životy, zraněno bylo více než 200 osob a přibližně 30 bylo hospitalizováno. Evakuováno bylo až 7 000 osob a 700 lidí bylo dočasně ubytováno v evakuačních centrech [20].



Obrázek 15 Pohled na již stratifikovaný oblak chloru vznášející se nad městem Henderson [123]

Havárie v Riverview

Dne 14. 7. 2001 v brzkých ranních hodinách přečerpávali dva pracovníci chemičky ATOFINA Chemicals v Riverview v Michiganu (USA) ze dvou železničních cisteren methanthiol. V blízkosti se nacházely také dvě cisterny s kapalným chlorem. Ve 3:45 hod. došlo k odtržení přečerpávacího potrubí a do ovzduší uniklo 67 až 74 tun vysoce hořlavého a toxického methanthiolu. Pracovník, který prováděl přečerpávání, ještě stihl spustit tlačítko požárního poplachu a varovat tak ostatní

pracovníky, kteří ihned přivolali hasiče. Bohužel, oba pracovníci přečerpávací jednotky se uniklým methanthiolem otrávil.

Přivolání hasiči nasadili vodní clony a současně začali chladit cisternu, z níž unikl methanthiol. Z cisterny začal stoupat dým a ve 4:09 hod. se methanthiol vznítil. Vznikla ohnivá koule o průměru 15 metrů, která dosáhla výšky 61 metrů. Hasiči usilovně chladili přilehlé cisterny s chlorem, na které se oheň nerozšířil. Intenzivní žár ale poškodil přírodní potrubí (hadice) a došlo k uvolnění chloru. Bylo odhadnuto, že uniklo až 81 tun plynného chloru.

Povětrnostní podmínky naštěstí byly pro rozptyl uniklých polutantů příznivé. Severozápadní bríza odvála kouř daleko od města. V následujících hodinách se oblak začal šířit na ostrov uprostřed řeky Detroit. Bylo rozhodnuto informovat obyvatele z přilehlé čtvrti, aby zůstali uvnitř budov. Evakuováno bylo asi 400 lidí z okruhu 1 km od místa havárie. V dalších hodinách bylo evakuováno dalších 2 000 lidí z několika dalších městských čtvrtí. Říční plavba na řece Detroit byla uzavřena. Požár se postupně rozšířil i na ostatní objekty v chemičce. Uhašen byl až v 9:30 hod. Teprve až ve 12:47 hod. se podařilo zastavit únik chloru. Okolo 13. hodiny byly provedeny analýzy ovzduší mobilní laboratoří US EPA, které ukázaly, že koncentrace chloru je již pod hygienickými limity.

Vyšetřováním se prokázalo, že primární příčinou nehody bylo prokorodování přečerpávacího potrubí, které se při zatížení utrhlo. Koroze byla jak na vnější, tak i na vnitřní straně potrubí, přičemž v místě praskliny byla stěna potrubí ztenčena o 23 %. Je tedy zřejmé, že vizuální prohlídky potrubí, které měly být před každým přečerpáváním prováděny, byly prováděny ledabyly nebo vůbec. Nehoda tak byla současně důsledkem nedostatečné údržby přečerpávacího zařízení. Prokázalo se, že na daném potrubí nebyla provedena žádná podstatná údržba nebo výměna materiálu v posledních 5 letech. Dalším aspektem, který významně ovlivnil

následky nehody, bylo, že podnik neměl zpracován havarijní plán a prakticky vůbec nebyl připraven na podobné události.

Celkové škody této havárie se vyšplhaly až na 6,2 milionu USD. Tato částka zahrnovala vzniklé hmotné škody, tak i pokutu vyměřenou inspekčním orgánem (US EPA), sankce vyměřené místními municipalitami, kompenzace evakuovaným osobám a náklady za zavedení technických a organizačních opatření proti opakování nehody [52].

Havárie v Graniteville

Dne 6. 1. 2005 ve 2:38 hod. se poblíž městečka Graniteville v Jižní Karolíně v USA srazil nákladní vlak přepravující mimo jiné i kapalný chlor s odstaveným nákladním vlakem. Došlo k vykolejení vlaku a k protržení pláště cisterny s chlorem (viz Obrázek 16, Obrázek 17). V cisterně bylo téměř 70 tun chloru. Při úniku chloru se vytvořil hustý toxický oblak složený z plynu a aerosolových částic kapalného chloru, které se začaly rozptylovat do okolního prostředí, které bylo tvořeno především průmyslovou zástavbou. Bezprostředně zemřelo 9 lidí – jednalo se hlavně o zaměstnance přilehlé textilní továrny a dalších cca 500 lidí bylo zraněno účinky chloru. Likvidace havárie si vyžádala evakuaci asi 5 000 lidí v okruhu 1,6 km od místa nehody, kteří se po dobu 9 dní nesměli vrátit do svých domovů.

Během vlastního havarijního zásahu se krizoví manažeři opírali o výsledky modelovacích software a o meteorologické předpovědi vytvořené Savannah River National Laboratory a Department of Energy Savannah River Site. Tyto instituce měly vytvořenou měřicí síť rychlosti a směru větru v reálném čase na lokální úrovni doplněnou o satelitní snímky dané oblasti. Data z tohoto měření se ukládala v 15 minutových intervalech a zároveň kontinuálně probíhal výpočet simulačního modelu pro odhad směru a rychlosti větru. V okruhu 25 kilometrů okolo

Graniteville bylo rozmístěno celkem 14 měřících stanic, přičemž vzdálenost mezi nimi se pohybovala v rozmezí 3 až 15 km. Terén v okolí Graniteville má charakter zalesněné pahorkatiny. Většina stanic byla umístěna tak, že na měření neměla vliv místní topografie. Pro oblast byl vytvořen šestihodinový detailní předpovědní 3D model RAMS (Reginal Atmospheric Modeling System), jehož výstupy byly generovány ve tříhodinových intervalech do mapy s horizontálním gridem 2 km a dále ve 36-hodinových předpovědích pro 10 km gridem. K lokálním simulacím rozptylu toxického oblaku byly použity vstupní podmínky poskytnuté National Centers for Envirionmental Prediction vložené do RUC modelu (Rapid Update Cycle). Do modelu byly použity informace o topografii, typu vegetace, typu půdy. Topografická data spolu s daty vegetace byla poskytnuta US Geological Survey s různým rozlišením. Pro období havárie (03:00 až 06:00 hod.) byl modelem spočítán rozsah rychlostí větru 0,9 až 1,8 m.s⁻¹ ve výšce 3 metry, průměrná teplota v rozmezí 11 až 13 °C, relativní vlhkost 92 až 98 % a odvozena třída atmosférické stability D až E. Synoptická situace v daný den díky tlakové výši generovala dostatečně silné větrné proudění, které bylo schopné překonat lokální větrné proudění způsobené nerovnostmi terénu. Měřená rychlost větru byla na všech stanicích podobná. Tyto podmínky byly dostačující k tomu, aby mohlo docházet k turbulentnímu promíchávání a poměrně rychlému rozptylu chlorového oblaku [54].

První televizní záběry z rána ukázaly, že z místa havárie byla poměrně dobrá dohlednost, což ukazovalo na to, že došlo k naředění a odfouknutí nejhustšího oblaku chloru z mělkého údolí, ve kterém se město nachází. To také pravděpodobně způsobilo, že zde nebylo tolik obětí na životech. Největší množství chloru uniklo bezprostředně po prasknutí pláště cisterny, následně po několik hodin unikalo výrazně menší množství chloru v důsledku jeho postupného odpařování (cca 0,5 kg.s⁻¹). I když byla hodnota koncentrace stanovená simulačním modelem zatížena velkou nejistotou, předpovědi ukazovaly, že po směru větru havárie bude

ve vzdálenosti 1,6 km koncentrace chloru maximálně 3 ppm. Tato koncentrace se v USA považuje za bezpečnou pro expozici do 60 minut [54].

Asi 20 km severně od havárie hlásilo během dopoledne několik řidičů pohybujících se na dálnici č. 20 silný zápach. V tu dobu už byla k dispozici terénní měření chloru, která nezjistila žádné detekovatelné koncentrace v oblasti po směru větru od místa nehody. Spočítaná rychlost úniku chloru tak pravděpodobně odpovídala realitě [54].

Při detailním modelování rychlosti větru byla vypočtena rychlost větru v době havárie 3 m.s^{-1} , pozdě odpoledne dosahovala maximální rychlost větru až 8 m.s^{-1} . V průměru se pohybovala rychlost větru od 1 m.s^{-1} v dopoledních hodinách do $4,5 \text{ m.s}^{-1}$ v odpoledních hodinách. Jelikož bylo místo nehody situováno níže než samotné město Graniteville, uplatnila se při úniku chloru gravitační síla. Chlor tak tekla z místa havárie po mírně svažitém terénu proti směru vanutí větru. Měsíc po incidentu byla provedena studie vlivu havárie na okolní vegetaci. Rozložení spálené vegetace korelovala s modely, které předpokládaly tečení chloru po spádnici. K poškození vegetace dochází při koncentracích chloru od 0,1 do 5 ppm po dvou a více hodinách expozice. Bylo pozorováno viditelné poškození vegetace ve směru sever-jih přesně podél mělkého údolí. Nejvíce poškozené byly borovice a jalovce, a to tak, že byla spálená nejnižší patra stromů. U vysokých stromů nedošlo k žádnému nebo velmi malému poškození horních partií. To ukázalo, že oblak chloru nebyl vertikálně příliš mohutný, nanejvýš několik metrů až pár desítek metrů nad povrchem [54].

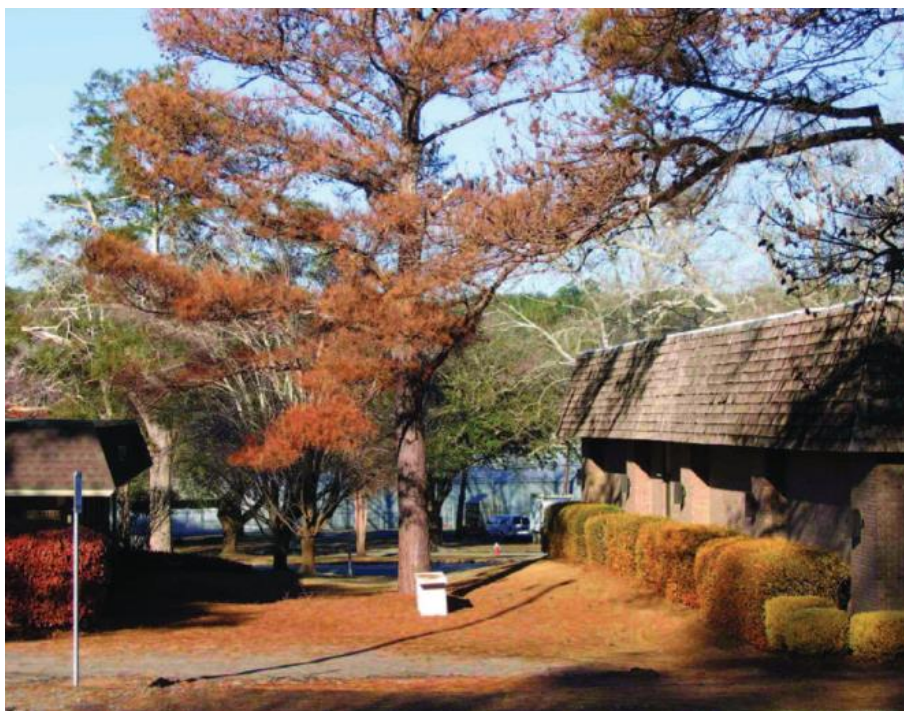
Na stav vegetace jeden měsíc po havárii se zaměřili Hunter a Buckley. Zjistili, že borovice a jalovce byly poničené zhruba až do vzdálenosti 2 km od havárie po směru větru [54] (viz Obrázek 18 a Obrázek 19).



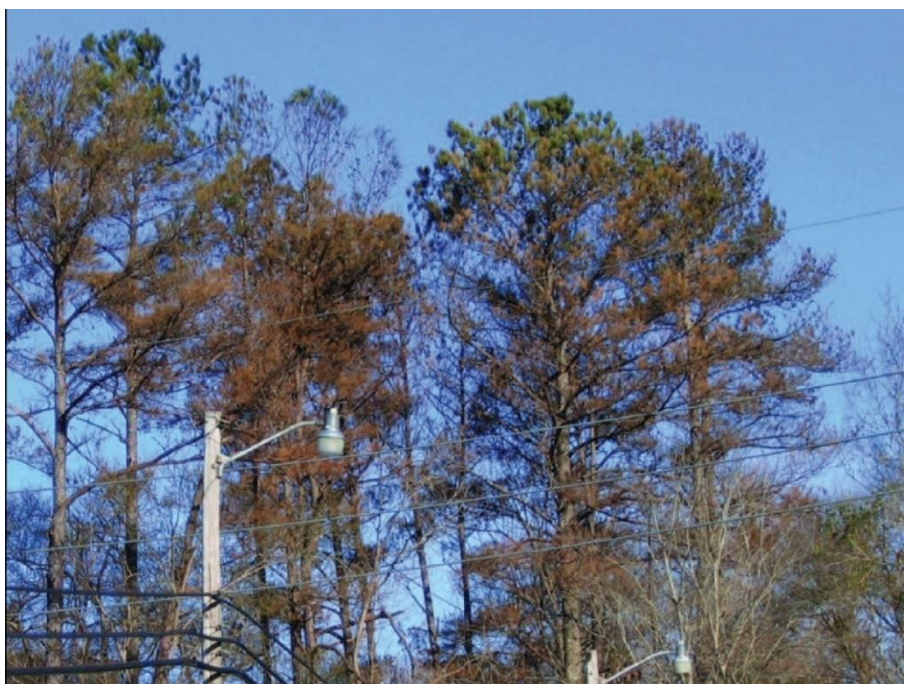
Obrázek 16 Pohled na místo nehody v Graniteville [54]



Obrázek 17 Pohled na místo nehody v Graniteville [54]



Obrázek 18 Pohled na poškozené borovice ve vzdálenosti 30 metrů od místa nehody v Graniteville [56]



Obrázek 19 Pohled na poškozené borovice ve vzdálenosti 100 metrů od místa nehody v Graniteville [56]

Havárie ve Festusu

Dne 14. srpna 2002 v 9:20 hod. došlo k totální ruptuře jedné ze tří hadic o průměru 1 palce (2,54 cm) používaných pro přečerpávání chloru ze železničních cisteren do zásobníků firmy DPC Enterprises. K ruptuře došlo ve výšce 3,5 m nad povrchem. Místo nehody se nacházelo asi 5 kilometrů od města Festus ve státě Missouri v USA. Během úniku, který trval 3 hodiny, postupně vyteklo 48 000 liber chloru (cca 22 tun). Průměrná rychlost uvolňování byla $2,02 \text{ kg.s}^{-1}$. Příčinou takto dlouhého úniku byla skutečnost, že automatické samouzavírací ventily selhaly a armatury na zařízení se musely uzavřít až ručně.

Během nehody naštěstí vál vítr ve směru od okolních obytných zón, takže při nehodě nikdo nezemřel. V místní nemocnici ale bylo pro respirační obtíže ošetřeno 63 osob a 3 lidé byli krátce hospitalizováni. V blízkém okolí byl vyhlášen zákaz vycházení a obyvatelé byli nuceni po dobu 4 hodin použít své domovy jako improvizované úkryty. Na 1,5 hodiny byl také zcela zastaven provoz na dálnici č. 55, která byla od místa úniku vzdálena 800 metrů. Tři příslušníci zásahových složek, kteří v chemických oblecích prováděli uzavření armatur, byli mírně poleptáni na kůži [57].

Z dostupných dat není zcela zřejmé, zda chlor unikl ze železniční cisterny [55] nebo ze zásobníku, do něhož byl obsah cisterny přečerpáván [52] (viz Obrázek 20). Podle videozáznamů televizní společnosti CNN [51] unikající chlor vytvářel hustý oblak těžkého plynu, který rychle zaplnil prostor železniční vlečky. Vlečka byla obehnaná 2 metry vysokou betonovou zdí a hustým stromořadím. Jelikož se chlor chová jako těžký plyn, posloužila tato bariéra jako účinná pasivní ochrana proti jeho šíření do okolního prostoru (viz Obrázek 21). Chlor tak vytekl pouze do prostoru vlečky, kde vytvořil hustou oblačnou lagunu.



Obrázek 20 Pohled na unikající chlor [51]



Obrázek 21 Oblak těžkého plynu v prostoru železniční vlečky [51]

3.4 Počítačové modelovací nástroje

V dnešní době je již většina fyzikálních modelů dostupná v softwarové podobě. Všechny softwarové aplikace jsou postaveny na základních modelech úniku látek ze zařízení a na rozptylových modelech. 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 softwarové nástroje generují za stejných podmínek odlišné výstupy [10].

Dva nejčastěji používané algoritmy, které softwarové nástroje využívají, jsou:

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

Níže jsou popsány čtyři vybrané software, které jsou v praxi využívány nejčastěji.

3.4.1 ALOHA

Program ALOHA je nástroj určený pro havarijní reakci, tedy pro potřeby zvládnutí rychlého rozvinutí záchranných týmů, jakož i pro havarijní plánování. Zahnuje 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 aplikace Google Earth. Výstupy, které ALOHA generuje, jsou reprezentovány vykreslenými oblastmi, kde se předpokládá překročení příslušné limitní koncentrace zadané 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, PAC), ze kterých si může uživatel vybrat, anebo je možné zadat konkrétní referenční hodnotu podle svých potřeb [4]. Nejnovější dostupnou verzí programu ALOHA je 5.4.7, která byla uveřejněna v září 2016.

3.4.2 EFFECTS

EFFECTS je pokročilý počítačový program umožňující svým uživatelům odhadnout fyzikální efekty neočekávaných úniků toxických a hořlavých chemických látek. EFFECTS byl původně vyvinut na základě příruček od holandského TNO⁵, takzvaných "barevných knih" ⁶ (viz Obrázek 22) a od té doby (cca 35 let) je nepřetržitě rozšiřován a vylepšován podle nejnovějších poznatků. Je používán a celosvětově přijímán jako referenční nástroj v celé řadě bezpečnostních studií [4].

Program sestává z několika modulů umožňujících modelování jednotlivých havarijních situací. Vhodným použitím jednotlivých modulů v kombinaci s databází nebezpečných látek, která 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. Výsledky jsou generovány buď v textovém, anebo grafickém formátu [33].

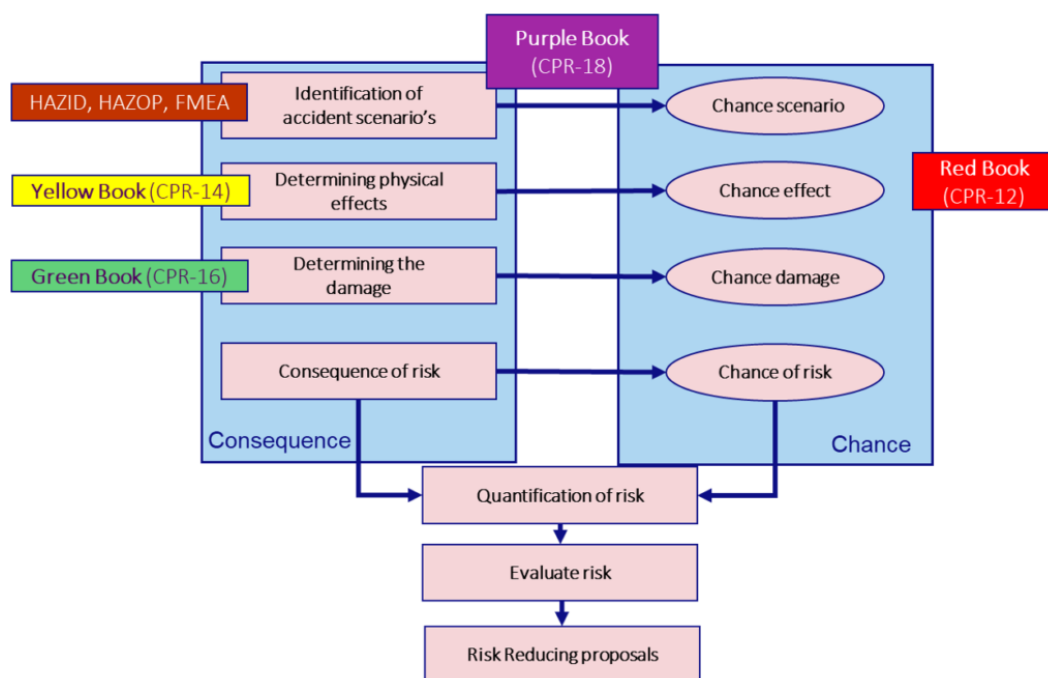
⁵ Nizozemská organizace pro aplikovaný vědecký výzkum.

⁶ Yellow Book (CPR-14): C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings (ed.). Methods for the calculation of physical effects. Hague : The Director-General for Social Affairs and Employment, 3th. ed., Second revised print, 2005.

Green Book (CPR-16): C.J.H. van den Bosch (ed.). Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials. Hague : The Director-General for Social Affairs and Employment, 2nd ed., 1992.

Red Book (CRP-12): J. C. H. Schüller, J.L. Brinkman, P.J. van Gestel, R.W. van Otterloo. Methods for Determining and Processing Probabilities, Hague : The Director-General for Social Affairs and Employment, 2nd. ed., 1997.

Purple book (CPR-18): P.A.M. Uijt de Haag, B.J.M. Ale. Guidelines for quantitative risk assessment. Hague : The Director-General for Social Affairs and Employment, 3th ed. 2005.



Obrázek 22 Použití "barevných knih" v rámci konstrukce programu EFFECTS pro provádění kvantitativního hodnocení rizika [33]

3.4.3 TerEx

Program TerEx (Terroristic Expert) představuje komerční internetovou aplikaci určenou k rychlému odhadu následků úniků nebezpečných látek a pro stanovení bezpečných zón při havarijním zásahu. Jedná se o jednoduchý softwarový nástroj, který obsahuje celkem 12 samostatných modulů. Moduly DEGAS, SPREAD a SPREAD EXPLOSIVE vznikly jako výstupy původního výzkumu [53], kterých se doktorand v minulosti osobně účastnil ⁷. Tyto moduly byly validovány a verifikovány prostřednictvím simulačních zkoušek a terénních testů [10].

⁷ 1H-PK2/35 Ověření modelu šíření a účinků ohrožujících událostí (SPREAD); Ministerstvo průmyslu a obchodu – program POKROK; řešeno v letech 2005 – 2009.

TH01031098 Validace a verifikace modelu šíření a disperze těžkého plynu za specifických situací (DEGAS); Technologická agentura ČR – program EPSILON; řešeno v letech 2015 – 2018.

Aplikace TerEx disponuje vlastní databází, obsahující celkem 1 014 nejčastěji používaných chemických látek nebo nebezpečných materiálů. Uživatelské rozhraní aplikace i charakter jejich výstupů jsou jednoduché a intuitivní, což může být pro uživatele výhodou, obzvláště při stresových situacích. Program uživatele navádí ke zdárnému výsledku prostřednictvím jednotlivých dialogových oken obsahujících vysvětlivky. Výstupy prováděných simulací jsou prezentovány formou textu a jednoduché grafiky, které podávají informaci o dosahu zraňujících následků.

3.4.4 ROZEX Alarm

Software ROZEX Alarm slouží k modelování a predikci následků úniku nebezpečných chemických látek včetně vizualizace chemického ohrožení nad mapovým podkladem. Program obsahuje databázi chemických látek (včetně integrace na databázi MEDIS ALARM), v níž je zahrnuto přibližně 10 000 látek.

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 dopadu havarijních událostí v rámci analýzy a hodnocení rizik [34].

Program nabízí celkem 19 variant havarijních scénářů spojených s jednorázovým nebo kontinuálním únikem látek ze zařízení s následkem požáru, výbuchu nebo rozptýlu toxické látky v atmosféře. Získané výsledky lze následně vyexportovat do mapových podkladů GIS. K modelování následků havarijních událostí je zvolen přístup, který je založen na filozofii maximálně možných následků havárie. Takový přístup zajišťuje základní prognózu dopadu havárie, přičemž počet vstupních parametrů pro výpočet je omezen na nezbytné minimum [4].

4 METODY A POSTUP ŘEŠENÍ

4.1 Metodologie disertační práce

4.1.1 Použité metody

Disertační práce se zabývá výzkumem v oblasti modelování havarijních následků spojených s únikem toxického plynu – chloru, což s sebou nese využívání přístupů typických pro empirický výzkum v kombinaci s metodami výzkumu kvalitativního [72]. Předmětem výzkumu je zkoumání určitého fenoménu, kterým je v kontextu této práce chování těžkého plynu v intravilánu vysoce urbanizovaného městského/industriálního prostředí. Pro potřeby řešení této disertační práce bylo postupně využito následujících výzkumných metod a přístupů:

- Literární rešerše – tj. soustředění odborných zdrojů, databází, videozáznamů atd., jejich studium a následná extrakce klíčových poznatků.
- Analýza – tj. zpracování získaných poznatků, jejich redukce, utřídění a sumarizace.
- Deskripce – tj. vytvoření uceleného souboru informací (popis současného stavu řešené problematiky) vycházejícího ze sumarizovaných poznatků.
- Indukce – tj. formulace výzkumných otázek za účelem vysvětlení obecných zákonitostí vztahujících se ke zkoumanému fenoménu.
- Observace – tj. podrobné studium zkoumaného fenoménu za účelem objasnění vzájemných souvislostí, příčin a následků. Při observaci byla využita data a poznatky z místního šetření v zájmové lokalitě a z provedené případové studie.

- Experiment – tj. získání nových empirických poznatků v plánované a řízené situaci za využití měřicí nebo záznamové techniky. Design experimentu vycházel ze závěrů indukce a poznatků získaných při observaci.
- Dedukce – tj. definování nových výroků (tvrzení, závěru) na základě logického úsudku vycházejícího z poznatků získaných při všech fázích výzkumu.
- Evaluace – tj. interpretace získaných poznatků a formulace výsledného návrhu/postupu založeného na ověřitelných argumentech a objektivních datech z provedeného experimentu. Výstupy evaluace jsou využity také v diskusi.

4.1.2 Postup řešení

Vlastní řešení disertační práce bylo rozděleno do tří hlavních částí (etap):

- Teoretická část.
- Experimentální část.
- Návrhová část.

V rámci **teoretické části** jsem provedl analýzu dostupných literárních zdrojů a datových souborů. Vědecké zdroje jsem čerpal z licencované platformy ScienceDirect® provozované společností Elsevier. Pro vyhledávání jsem použil klíčová slova dense gas; chlorine; release. Celkem jsem získal 9 743 výsledků, a to 1 566 přehledových článků, 4 503 výzkumných článků, 420 encyklopedických výstupů a 3 254 kapitol z odborných knih. Mezi časopisy převažovaly Journal of Hazardous Materials (199), Geochemistry and Cosmochemistry Acta (174) a Science of The Total Environment (169).

Získané odkazy jsem postupně utřídil a pro další analýzu vybral pouze ty z nich, které se explicitně věnovaly tématům souvisejícím s touto disertační prací. Vybrané zdroje (celkem 64) jsem detailně prostudoval a provedl extrakci klíčových poznatků, které byly následně souhrnně zpracovány do přehledu současného stavu (viz kapitola 3).

Experimentální část zahrnovala provedení dvou dílčích úkolů – případové studie a experimentu. V obou případech bylo účelem simulovat únik chloru z průmyslového zásobníku a zkoumat jeho šíření ve vysoce urbanizovaném prostředí, respektive jeho následný rozptyl v atmosféře. Případovou studii jsem zaměřil na ověření možnosti použití software ALOHA pro modelování masivního úniku chloru, přičemž účelem bylo zjistit, zda výsledky dosahu zraňujících koncentrací, získané pomocí tohoto počítačového nástroje, se shodují s reálnými hodnotami naměřenými přímo na místě dané události. Pro tento účel jsem musel nejprve vybrat vhodnou havarijní událost, která je dobře zdokumentována, případně i zachycena na videozáznam, a která by mohla posloužit jako ilustrativní. Jako nejvhodnější se ukázala havárie v jordánském přístavu Al Durra, k níž došlo 27. června 2022, a která jako jedna z mála tyto atributy splňuje.

Smyslem vlastního experimentu pak bylo ověřit chování těžkého plynu ve vysoce urbanizovaném prostředí za simulovaných (ideálních) podmínek, na kterých jsou založeny počítačové modelovací nástroje (včetně software ALOHA (viz [14])). Tento úkol ovšem vyžadoval vytvoření fyzického modelu zmenšeniny zájmové lokality a následnou simulaci úniku těžkého plynu z imaginárního zásobníku.

Při návrhu designu experimentu jsem vycházel z poznatků získaných detailním studiem filmových záznamů několika experimentů provedených během výzkumného programu Jack Rabbit II. Tento obsáhlý výzkum zahrnoval deset

terénních experimentů provedených v dubnu a květnu 2010, při kterých byl simulován únik 1 až 2 tun zkapalněného chloru z tlakového zásobníku a plynného bezvodého amoniaku. V navazující etapě bylo od srpna 2015 do září 2016 provedeno dalších devět pokusů, při kterých bylo uvolněno 5 až 20 tun zkapalněného chloru pod tlakem z nádrže umístěné asi 1 m nad povrchem. Experimenty vyvrcholily simulací havarijního úniku 20 tun chloru z automobilové cisterny. Tyto experimenty se zaměřovaly na simulaci rozptylu těžkého plynu v urbanizovaném městském prostředí a na otevřeném prostranství. Taktéž byl studován průnik chloru do vnitřního prostředí jednoduchých stavebních objektů a osobních automobilů. Při pokusech bylo získáno přibližně 19 milionů údajů o koncentracích chloru v různé vzdálenosti od zdroje emise [73].⁸

Uvedené poznatky mi velmi pomohly při návrhu designu vlastního experimentu založeném na simulaci úniku chloru ve vybrané zájmové lokalitě. Při výrobě fyzického modelu této lokality (areál SPOLCHEMIE v Ústí nad Labem) jsem vycházel jak z otevřených zdrojů (např. [87, 88], mapové podklady stažené z portálu mapy.cz), tak i z fotografií a osobních poznatků získaných při místním šetření v areálu SPOLCHEMIE, kterého jsem se zúčastnil v roce 2019 v rámci jiného projektu.

V **návrhové části** jsem popsal navržený optimalizovaný přístup pro modelování úniku chloru za využití modelu virtuálního zdroje a prostřednictvím ukázkové simulace (za využití programu ALOHA) jsem prezentoval jeho aplikaci v reálných

⁸ Program Jack Rabbit organizoval Úřad pro bezpečnost dopravy a financovalo jej Ministerstvo vnitřní bezpečnosti (U.S. Department of Homeland Security). Jednalo se o unikátní a velmi robustní vědecký projekt, jehož cílem bylo získat nové empirické poznatky potřebné pro lepší pochopení rychlých a rozsáhlých úniků toxických látek vytvářející oblaky těžkých plynů. Projekt provádělo Centrum pro analýzu chemické bezpečnosti (CSAC) a vlastní experimenty proběhly ve vojenském prostoru americké armády v Dugway Proving Ground v Utahu. [64].

podmínkách. V této části jsem také uvedl obecně použitelná doporučení pro zpřesnění matematického modelování úniku chloru s přihlédnutím k faktorům ovlivňujících jeho šíření v reálných podmínkách. Zejména se jedná o zahrnutí depozice na zemském povrchu, nad kterým se oblak těžkého plynu šíří, a zachytu (impakce) na environmentální objekty, jakými jsou vegetace, zaparkované automobily, průmyslové konstrukce či drobné stavby.

4.2 Teoretická východiska

4.2.1 Možnosti modelování rozptylu těžkého plynu

Pro případ modelování úniku a šíření plynu je nutné rozlišit dva základní případy. Jedná se o děje probíhající v bezprostřední blízkosti zdroje úniku (tzv. blízkém poli) a na děje probíhající ve větší vzdálenosti od zdroje (tzv. vzdáleném poli). V obou těchto oblastech má totiž rozptyl různý charakter, resp. jej determinují jiné procesy [10].

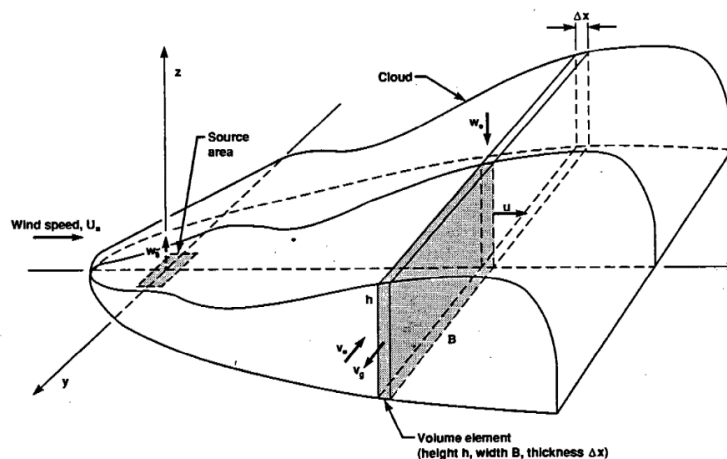
V bezprostřední blízkosti zdroje úniku se v důsledku vyšší hustoty unikajícího plynu oproti hustotě atmosféry neuplatňují vztahové síly, nýbrž dominantně síla gravitační. Nezáleží přitom na tom, zda se zdroj nachází na zemském povrchu nebo v určité výšce nad ním [10].

Hlavním úskalím, které je spojeno s počítačovým modelováním rozptylu těžkých plynů, je **nepřesnost predikovaných dosahů zraňujících koncentrací**. Většina používaných numerických programů, které dokáží modelovat rozptyl těžkého plynu, se vyznačuje dvěma negativními aspekty ovlivňujícími celkovou reliabilitu výsledků:

- nepřesnost box modelu v oblasti blízkého pole a
- nadhodnocené koncentrace plynných látek v oblasti vzdáleného pole generované Gaussovskými modely.

V oblasti blízkého pole počítačové programy používají modely, které jsou verifikovány podle základního „box modelu“⁹ (viz Obrázek 23). Tento model je založen na předpokladu, že unikající látka se zcela a okamžitě mísí se vzduchem dostupným pro ředění, a tedy že koncentrace látky uvnitř "boxu" je konstantní. Dále se předpokládá, že rozptyl disperze se uskutečňuje nad vodorovným povrchem bez překážek a současně v laminárním poli proudění vzduchu. Určujícími silami, které mají dominantní vliv na rozptyl oblaku v prostoru, je pouze gravitace a homogenizace (tj. vnitřní promíchávání).

Box model staví na tom, že rozšiřování oblaku v prostoru je po celou dobu simulovaného rozptylu rovnoměrné ve všech směrech a dále, že proudění uvnitř oblaku není vyvolané větrem vstupujícím do oblaku zvenčí, nýbrž pouze účinkem vnitřních sil, zejména účinkem teplotního gradientu a molekulární difúzí.



Obrázek 23 Schéma box modelu použitého v počítačovém modulu SLAB [35]

⁹ Box model je jednoduchý model atmosférické disperze používaný k výpočtu přízemních koncentrací konkrétních znečišťujících látek v ovzduší emitovaných z bodových zdrojů. Je založen na předpokladu, že znečišťující látky emitované do atmosféry jsou rovnoměrně smíchány v objemu neboli „boxu“. Nejkritičtější aspektem použití tohoto modelu je stanovení vertikálních rozměrů hypotetického boxu, což je parametr determinovaný především rychlostí a směrem vanoucího větru. Kromě toho musí být stanoveno časové období, za které se budou emise znečišťujících látek posuzovat (obvykle 1 hodina). Úvahy o časovém a fyzickém rozměru boxu jsou založeny na předpokladu ustálených vnějších podmínek. To znamená, že emise, rychlost větru a charakteristiky vzduchu dostupného pro ředění oblaku se v průběhu času nemění [36].

Některé softwarové nástroje využívající box model se snaží zohlednit také efekt fázového přechodu, tedy vznik aerosolových částic dané látky (kapičky nebo krystalky) při expanzi látky ze zdroje, respektive jejich postupné vypařování a přechod zpět do plynné fáze. Snaha o vyřešení tohoto značně komplikovaného problému, ale obvykle do výsledného výpočtu vnáší jen další chybu [37].

S ohledem k výše uvedenému lze tedy konstatovat, že box modely jsou validní pouze pro jednorázové úniky látek, které se rozptylují nad ideálně hladkou plochou (např. vodní hladinou či ledovou vrstvou) a v laminárním poli proudění. Avšak v praxi se setkáváme především s kontinuálními úniky nebezpečných látek, k nimž dochází v členitém terénu a za povětrnostních podmínek notně vzdálených ideálním. Dotace látky do šířícího se oblaku je ve skutečnosti postupný dynamický proces, a tedy i samotný rozptyl neprobíhá podle diskrétních tří fází, tak jak je uvažují právě box modely (např. počítačové programy SLAB, DEGADIS, HGM apod.). Taktéž vliv turbulence způsobené větrem není v těchto modelech dostatečně zohledněn, neboť se jedná o proces vyznačující se značnou nahodilostí, kterou nelze matematicky seriózně podchytit. Díky všem těmto omezením tak model predikuje na hranici oblasti blízkého pole poměrně vysoké (nereálné) koncentrace dané látky [38].

V oblasti vzdáleného pole (tj. cca dále jak 100 metrů od zdroje úniku) počítačové programy ve výpočtu automaticky přecházejí na Gaussovské modely, které ovšem popisují pasivní rozptyl látek v atmosféře. Tyto modely umožňují dosahy koncentrací počítat prakticky až do nekonečné vzdálenosti od zdroje, neboť Gaussovský model je funkce hmoty a prostoru. Matematicky vzato, hodnota koncentrace dané látky je nulová až v nekonečnu. Ani Gaussovský model si nedokáže dobře poradit s vlivem turbulence a ani s terénními překážkami, které se na ředění oblaku významně podílejí. Čím dříve se v reálu oblak naředí, tím dříve se

dostává do vznosu, tedy nad horizontální rovinu, kde by mohla být daná látka pro lidi nebezpečná. Tento postup výpočtu tak opět vede k nepřesným a nadhodnoceným výsledkům, což ostatně potvrdily i mnohé terénní testy [10, 48].

Je nesporné, že v rámci ochrany obyvatelstva potřebujeme znát dosahy zraňujících koncentrací daných látek co možná nejpřesněji. Konzervativní přístupy, které jsou v havarijním plánování standardně používány, vycházejí z premisy, že je v zájmu bezpečnosti předpokládat, že se zraňující koncentrace mohou za určitých okolností dostat i do velkých vzdáleností. Tudíž, logicky, za takto vypočtenými hranicemi se již vyskytuje "bezpečná zóna", ze které už není potřeba provádět evakuaci nebo ukrytí potenciálně ohrožených osob. Opačný pohled na tento problém ale vede k závěru, že navzdory skutečnému průběhu možné havárie, musí zásahové složky provádět evakuaci lidí i z oblastí, kde se ve skutečnosti zraňující koncentrace reálně ani nemohou vyskytnout. To si ovšem žádá značné požadavky na síly a prostředky, přičemž limitujícím faktorem evakuace je vždy čas. Je potřeba si uvědomit, že při průměrné rychlosti větru 3 m.s^{-1} se čelo oblaku nebezpečného plynu dostane do vzdálenosti 1 000 metrů od místa úniku už za 5,5 minuty, resp. do vzdálenosti 2 000 metrů za 11 minut. Takto krátký čas na hromadnou evakuaci ve větším městě rozhodně nestačí, a leckdy ani na pouhé vyhlášení plošné výzvy k ukrytí obyvatelstva [39] (vezme-li se do úvahy prodlení mezi nahlášením úniku nebezpečné látky, zpracováním této informace, její ověření a vyhlášení pomocí jednotného systému varování a vyrozumění).

Je tedy evidentní, že pro zvládnutí těchto situací je nezbytné, aby predikované scénáře možných havárií byly co možná nejrealističtější. Současně je potřeba, aby získání požadovaných realistických výsledků nebylo podmíněno složitým a finančně náročným matematickým modelováním proudění tekutin v simulovaném 3D prostoru (např. modely Computational Fluid Dynamics – CFD), nýbrž aby bylo

možné využít dostupných modelovacích nástrojů, jakým je například počítačový program ALOHA.

Při používání různých softwarových nástrojů modelujících rozptyl látek v atmosféře se lze setkat také 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 proto snadno stát, že i když dva modely využívající tentýž základní matematický algoritmus, poskytují významně odlišné výsledky. V takových případech pak lze důvod hledat v různé kalibraci použitého aparátu.

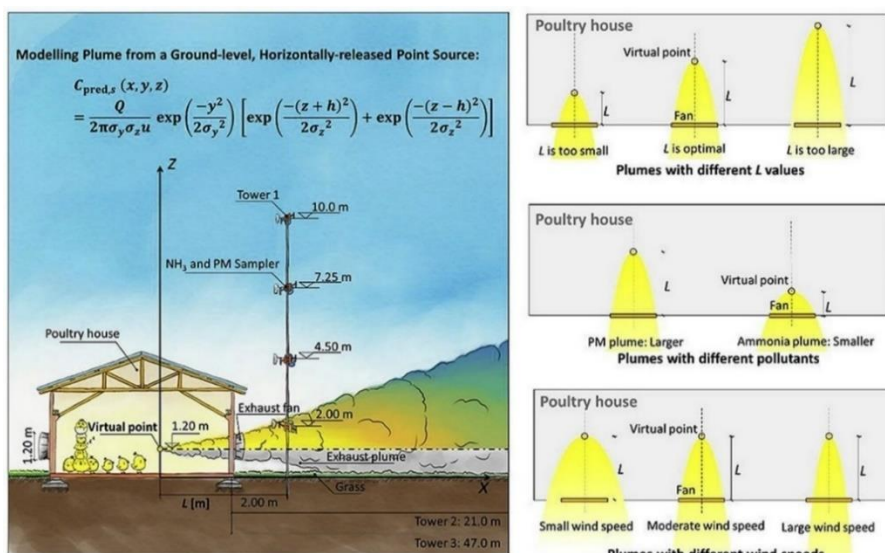
Dílčí závěr: V rámci řešení této disertační práce budu vycházet z předpokladu, že při simulované havarijní situaci dojde k tak masívnímu úniku chloru z průmyslového zásobníku, že v celé oblasti blízkého pole se bude oblak těžkého plynu nacházet ve fázi tečení. Samotný rozptyl oblaku, který bude možné modelovat pomocí numerických počítačových programů, bude nastávat až ve vzdáleném poli. Pokud jde o výběr vhodného software, pak na základě analýzy dostupných programů a také mé osobní zkušenosti, preferuji a používám program ALOHA. Vhodnost použití tohoto nástroje pro modelování rozptylu chloru z virtuálního zdroje však musím ověřit prostřednictvím případové studie.

4.2.2 Model virtuálního zdroje

Model virtuálního zdroje (někdy nazývaného též virtuální bod) představuje speciální postup pro zjednodušení jinak náročného fyzikálního modelování časové a prostorové distribuce hmoty nebo energie emitované z plošného nebo objemového zdroje, aniž by došlo k výraznějšímu zkreslení výsledku výpočtu.

Ústřední myšlenkou je, že virtuální zdroj, který simuluje skutečný reálný zdroj emise, se nachází mimo zájmový prostor (odtud tedy název „virtuální“) [61]. Virtuální zdroj tak představuje imaginární zdroj emise, který sice fyzicky neexistuje, ale působí, fyzikálně se chová a navenek se projevuje stejně, jako by se o reálný zdroj jednalo.

Metody založené na virtuálních zdrojích se široce používají zejména k přiblížení řešení vlnového záření a problémů rozptylu řízených Helmholtzovou rovnicí [61]. Tento přístup ale našel uplatnění i v řadě jiných oblastí. Jako příklad lze uvést modelování šíření seismického vlnění při zemětřesení [75], šíření zvuku emitovaného různými zdroji současně ve vymezeném prostoru [40], šíření kouřových vleků při požárech uvnitř tunelů [62] nebo také šíření pachových látek emitovaných z objektů stájového chovu hospodářských zvířat [41] (viz Obrázek 24). V oblasti modelování šíření plynů při chemické havárii tento model doposud nebyl aplikován¹⁰.



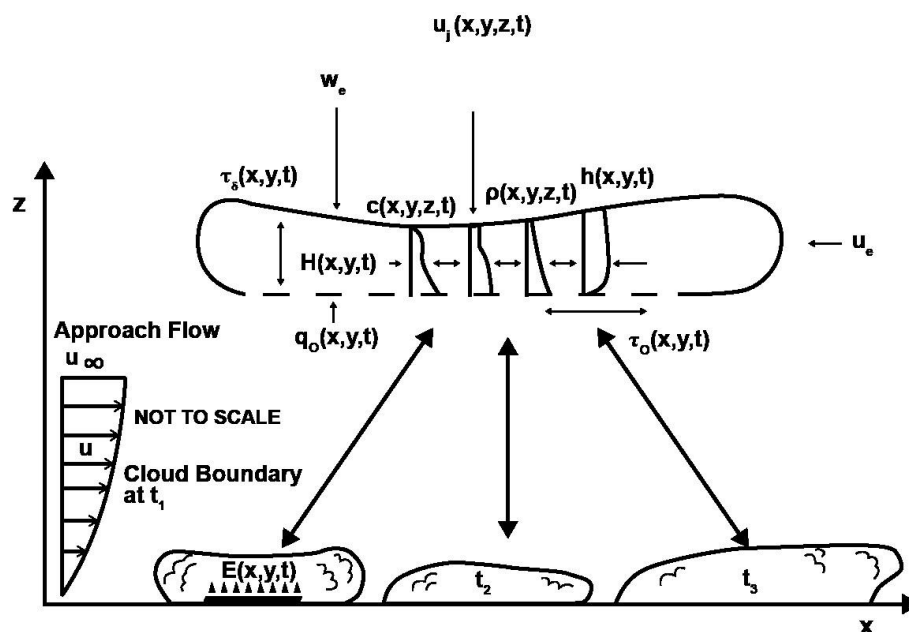
Obrázek 24 Princip aplikace modelu virtuálního zdroje podle Yanga a kol. [41]

¹⁰ V rámci literární rešerše nebyla v databázích Web of Science a Scopus nalezena žádná publikace na toto téma.

Dílčí závěr: Z výše uvedeného teoretického východiska vyplývá, že model virtuálního zdroje by principiálně bylo možné použít pro účely modelování rozptylu těžkého plynu. Klíčovým úkolem této práce proto bude navrhnout způsob parametrizace virtuálního zdroje tak, aby oblak těžkého plynu, coby reálný zdroj nebezpečné chemické látky, mohl být aproximován do hypotetického objemového či plošného zdroje vyznačujícího se stejnou emisní silou (tj. hmotnostní rychlostí úniku a celkové doby úniku daného plynu). Parametry takto definovaného virtuálního zdroje pak mohou být následně použity jako vstupní data do numerické simulace provedené za použití vybraného modelovacího software.

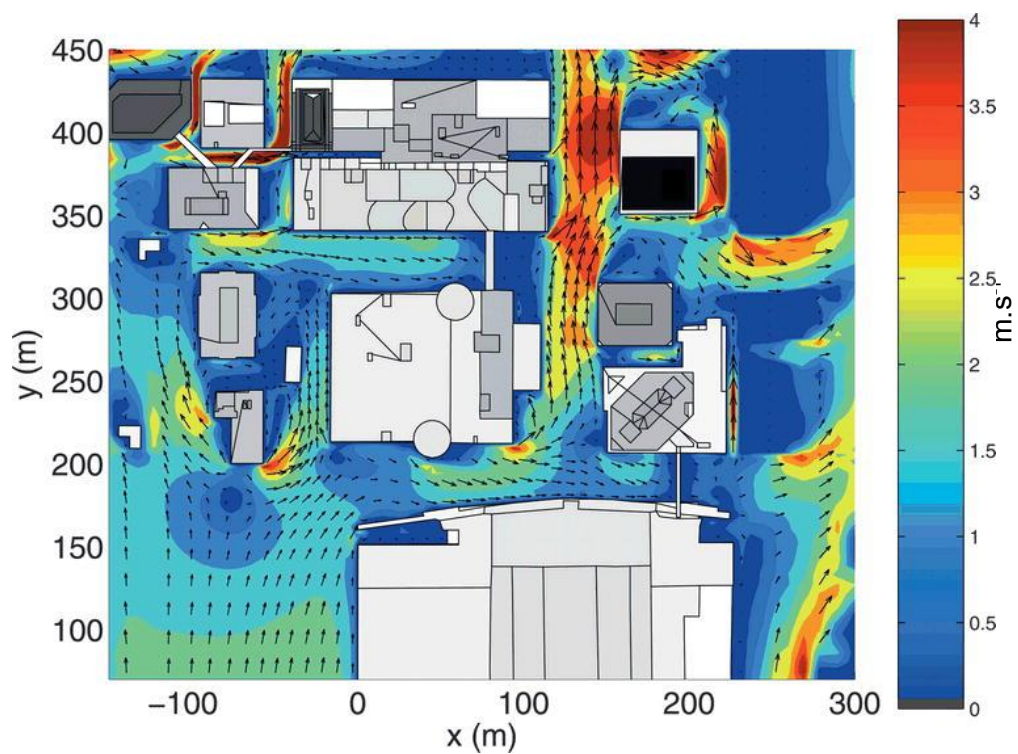
4.2.3 Masívní únik chloru ze zásobníku

Typickou vlastností těžkých plynů je, že se v prvních fázích svého rozptylu chovají jako kapaliny [64]. Jedná se o důsledek tří efektů – vysoké molekulové hmotnosti unikající látky, její nízké teploty a vysoké koncentrace malých kapiček aerosolu. V první fázi vznikají husté oblaky aerosolu, které v případě chloru mohou mít efektivní počáteční hustotu až 20krát vyšší než okolní vzduch [48]. Oblak je tak zpočátku velmi kompaktní a snaží se zaujmout stabilní polohu při zemském povrchu. Pakliže tomu nebrání výrazné terénní překážky (viz např. [51]), tak se ihned po dosažení zemského povrchu začne roztékat rovnoměrně do všech stran, přičemž směrem k okraji se jeho vertikální rozměr zvětšuje (viz Obrázek 25). Dynamika roztékání je závislá na tom, zda oblak vznikl po jednorázovém úniku anebo po úniku kontinuálním. Při kontinuálním úniku pak záleží na celkové dotaci látky za jednotku času (tj. na hmotnostní rychlosti úniku ze zdroje). Při masívních kontinuálních únicích je roztékání oblaku podél zemského povrchu intenzivnější než při jednorázovém úniku. Při této fázi rozptylu má na oblak dominantní vliv gravitační síla, což znamená, že oblak přetéká z míst o vyšší nadmořské výšce do níže položených míst.

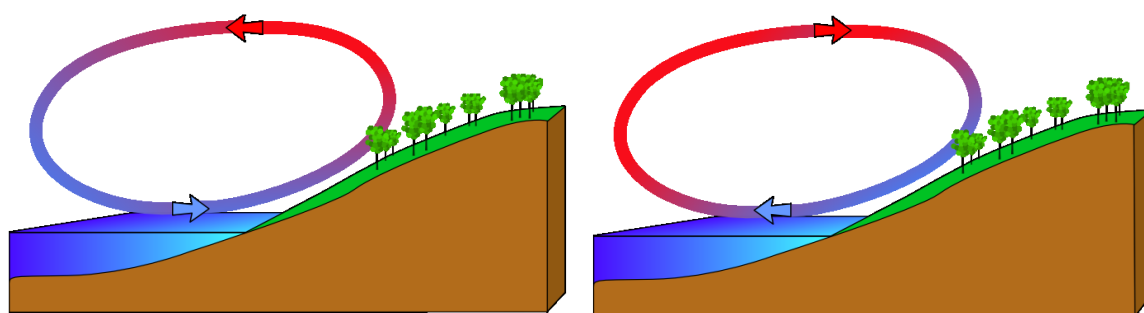


Obrázek 25 Schéma formování oblaku těžkého plynu při masivním úniku a jeho vývoj v čase (úseky t_1 až t_3) [59]

Na charakter tečení těžkého plynu má pochopitelně vliv také vítr. Ačkoli je během této fáze určující silou gravitace, mohou v praxi nastávat situace, kdy právě vítr způsobí zcela odlišné chování oblaku. Oblak může být kupříkladu unášen do výše položených míst, anebo se jeho postup stáčí či složitě klikatí [86]. Tato situace nastává například v místech, kde vlivem rozložení významných terénních útvarů vzniká konfluence (tj. sbíhání proudnic v poli větru – viz Obrázek 38) [9] nebo úplavy (tj. stacionární rotorové proudění) [93], jako například v hlubokých údolích nebo uličních kaňonech (viz Obrázek 26). Taktéž v blízkosti mořského pobřeží [76] se lze setkávat s podobně zvláštními situacemi. V důsledku nerovnoměrného zahřívání mořské vody a pobřežních hor zde totiž dochází ke vzniku brízové cirkulace, která může způsobovat, navzdory gravitaci, zanášení oblaků těžkých plynů do výše položených míst. Tato situace nastala například při události v Al Durra v roce 2022. Princip vzniku mořské brízy je názorně demonstrován níže (viz Obrázek 27).



Obrázek 26 Vektory přízemního větru (m.s^{-1}) v centrální obchodní čtvrti Oklahoma City (simulace provedena za využití dat získaných při terénních testech Joint Urban 2003 Field Campaign) [84]



Denní brízová cirkulace

Noční brízová cirkulace

Obrázek 27 Princip vzniku mořské brízy [77]

V silně urbanizovaném prostředí tvořeném hustou zástavbou představuje predikce šíření oblaku těžkého plynu velmi složitý úkol. Proudění komplikuje přítomnost budov, které významně mění jeho charakter. Polutanty uvolňované na úrovni zemského povrchu se ve městech často pohybují do nečekaných směrů a mohou být také strhávány výstupnými proudy vzhůru. Není tak nic neobvyklého, když se vznášejí nad vysokými (~ 100 m) budovami [84].

Členité prostředí s překážkami až násobně převyšujícími vertikální rozměr oblaku vylučuje možnost použití standardních výpočtových modelů. Řešení tohoto problému nabízí pouze CFD modely založené na složitých výpočtech Navier-Stokesových rovnic metodou konečných prvků [84], což ale rozhodně není postup rutinní povahy, který by bylo možné použít v rámci řešení této disertační práce. Pro řešení praktických úkolů, se kterými se obvykle v bezpečnostním inženýrství setkáváme, je proto smysluplnější vycházet z empirických dat a ta vhodným způsobem iterovat. Naštěstí, v případě masívních úniků chloru máme dostatek poznatků z proběhlých havárií a z terénních testů [55, 56, 60].

Patrně nejlepší poznatky o průběhu masívního úniku kapalného chloru ze stacionárního cylindrického zásobníku lze získat z publikovaných výstupů programu Jack Rabbit II, z nichž lze vyvodit níže uvedený chronologický sled událostí a jevů:

1. Po vzniku velké ruptury v plášti zásobníku nastává dvoufázový únik kapalného chloru. Při masívním úniku nevzniká pod zásobníkem kaluž kapalného chloru, neboť proud unikajícího chloru se tříští o hranu únikového otvoru, což vytváří aerosol (viz Obrázek 28). Výsledkem je hustý kompaktní oblak chloru tvořený směsí kapiček a nasycených par (viz Obrázek 29). Hanna, Britter a McQuaid uvádí, že při experimentech Jack Rabbit II se zjistilo, že asi 35 % emitovaného kapalného aerosolu okamžitě vyprší a

následně se vypaří [89]. Při malém úniku je ovšem z pořízených videozáznamů patrné, že kapalný chlor volně stéká na zemský povrch, kde se hromadí a rychle se vypařuje [78]. Vypařování ze vzniklé kaluže v tomto případě trvalo asi 5 až 10 minut za vzniku mlžné laguny tvořené nasycenými chlorovými parami (viz Obrázek 31).

2. Vzniklý oblak má výrazně nižší teplotu než původní kapalná fáze, resp. než teplota okolního vzduchu. Oblak má vyšší hustotu než okolní vzduch, takže setrvává při zemském povrchu (viz Obrázek 30 a Obrázek 31). Příčinou tohoto jevu je mžikový odpar, kdy dochází k velmi rychlému fázovému přechodu z kapalné fáze do plynné.
3. Působením turbulence, vzniklé jako důsledek rychlého pohybu oblaku a jeho tření o zemský povrch, se oblak divoce víří a má viditelně ohraničený kupovitý vzhled. Jeho pohyb (resp. kontinuální tok) se uskutečňuje podél zemského povrchu (viz Obrázek 32), neboť oblak je stále velice hustý.
4. Oblak se velmi rychle roztéká do okolního prostoru (viz Obrázek 33). Rychlost pohybu je determinována rychlostí dotace nové látky do oblaku, tj. množstvím unikajícího kapalného chloru ze zásobníku a rychlostí větru. V urbanizovaném prostředí se oblak velmi rychle šíří také mezi blízkými terénními překážkami, které obtéká nebo i přetéká (viz Obrázek 34). V řádu jednotek vteřin se oblak rozlije do vzdálenosti desítek metrů od epicentra úniku.
5. Se vzrůstající vzdáleností od místa úniku se stále více uplatňují odporové a vazké síly, což vede k výraznému zpomalení rychlosti pohybu čela oblaku. Oblak postupně ztrácí původní kupovitý tvar (viz Obrázek 34), homogenizuje se a vizuálně připomíná mlžný závoj (Obrázek 35 a Obrázek 36). Při této fázi rozptylu se dominantně uplatňuje turbulentní míchání způsobené obtékáním oblaku okolo terénních překážek a molekulová difúze. Za stabilních povětrnostních podmínek (tj. přízemní inverze a bezvětří) pak může ojediněle

docházet také ke stratifikaci oblaku, tedy k jeho rozdělení na dvě nebo více horizontálně orientovaných vrstev obsahující plynný chlor o různé hustotě (viz Obrázek 37).

6. Ve volném prostoru a postupném naředění okolním vzduchem je oblak unášen větrem. Postupně se stane vizuálně nedetekovatelným a při koncentraci nižší jak cca 10 000 ppm jeho rozptyl přejde do pasivní fáze. Poslední fází je úplné naředění oblaku vzduchem, a tedy de facto jeho splynutí s okolní atmosférou. Withers a Lees uvádí, že tato fáze může nastat již ve velmi krátké vzdálenosti od místa úniku [91]. Tyto závěry do značné míry potvrdily také terénní testy Jack Rabbit II provedené v roce 2015, kdy se ukázalo, že koncentrace chloru se vzdáleností rychle klesají ¹¹ [90]. To, jak rychle přejde těžký plyn do pasivní fáze rozptylu, závisí jak na celkovém uniklém množství, ale především pak na povětrnostních podmínkách [92].

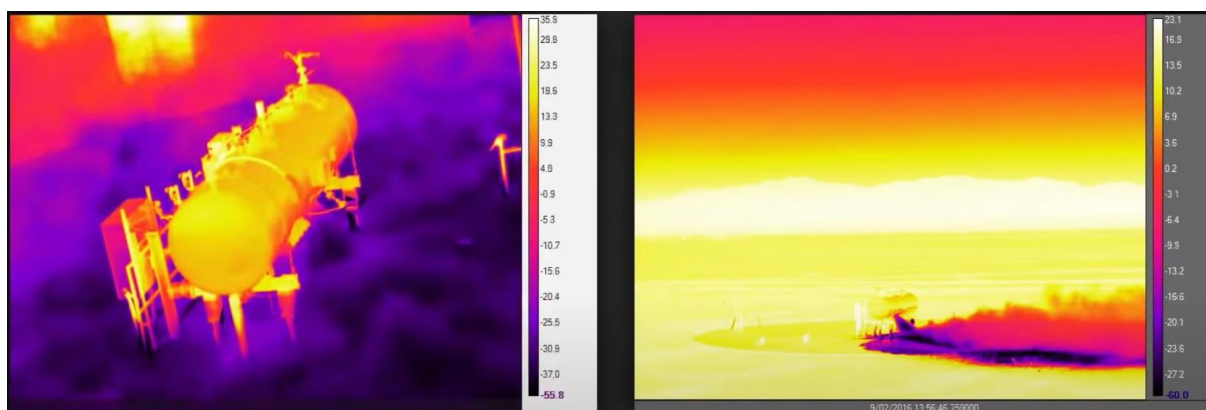
¹¹ Při experimentu č. 3 byly v ose šíření oblaku zaznamenány koncentrace ve vzdálenostech 1 a 2 km. Dále po větru, ve vzdálenosti 5 km, byly detekovatelné koncentrace zaznamenány pouze jedním čidlem, které zaznamenalo maximum pouhé 4 ppm. Ve vzdálenosti 11 km byly všechny naměřené koncentrace v podstatě nulové. Tato naměřená data byla mnohem nižší než při experimentu č. 1, který zahrnoval srovnatelnou hmotnost uvolněného chloru, kdy ve vzdálenosti 11 km dosáhla maximální koncentrace 20 ppm. Tyto výsledky tak naznačují, že rychlost větru ($3,9 \text{ m.s}^{-1}$ při experimentu č. 3, resp. $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ při experimentu č. 1) hraje dominantní roli v přechodu těžkého plynu do pasivní fáze rozptylu [90].



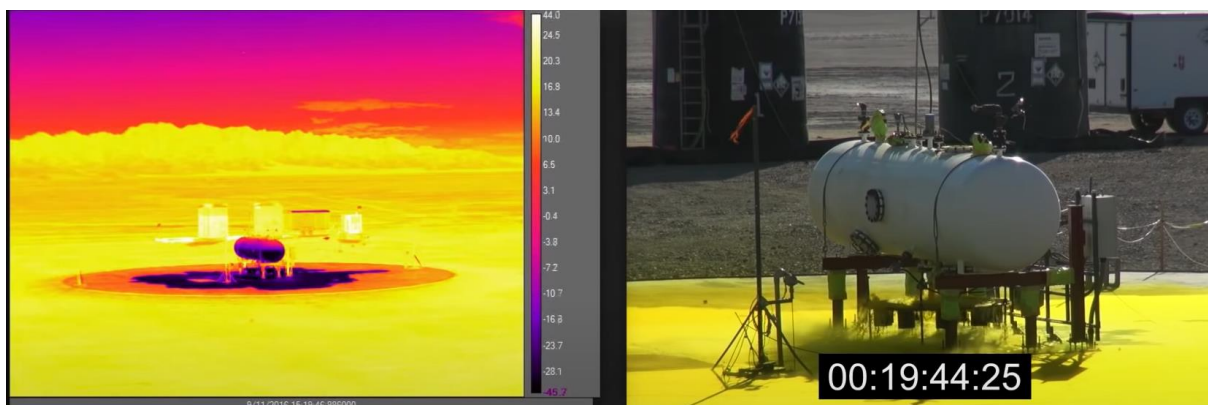
Obrázek 28 Okamžik zahájení masivního úniku chloru ze zásobníku [73]



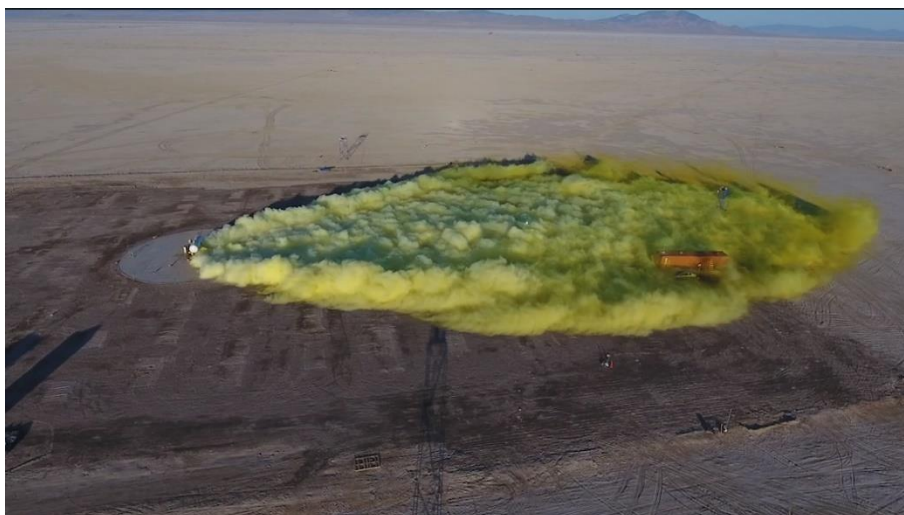
Obrázek 29 Okamžik zahájení masivního úniku chloru ze zásobníku [73]



Obrázek 30 Masivní únik chloru ze zásobníku – záznam z termokamery [73]



Obrázek 31 Únik chloru menší rupturou [73]



Obrázek 32 Vzhled oblaku chloru během fáze tečení ve volném prostoru [63]



Obrázek 33 Rozšiřování oblaku chloru do prostoru [73]



Obrázek 34 Oblak obtéká blízké překážky [73]



Obrázek 35 Naředění oblaku vzduchem a jeho postupná homogenizace – 1 minuta od zahájení úniku [73]



Obrázek 36 Naředění oblaku vzduchem a jeho postupná homogenizace – 3 minuty od zahájení úniku [73]



Obrázek 37 Stratifikace oblaku – cca 10 minut od zahájení úniku [64]

Dílčí závěr: Hovoří-li se v této práci o **masívním úniku**, je tím míněn stav, při kterém dochází k rychlému úniku velkého množství nebezpečné chemické látky (v řádech desítek tun) z technologického zařízení (tj. stacionárního zásobníku nebo mobilní cisterny). Obvykle je tato situace spojena s bezprostředním a závažným ohrožením životů osob nacházejících se v zóně možného dosahu zraňujících koncentrací unikající nebezpečné chemické látky [111]. Navzdory tomu, že se v bezpečnostním inženýrství tento pojem standardně nepoužívá, je v této disertační práci použit záměrně, neboť asi nejlépe vyjadřuje charakter zde uvažované modelové havarijní situace. Ta může v principu nastávat buď při jednorázovém úniku chloru (tj. úniku veškerého jeho skladovaného množství do 1 minuty), anebo při časově omezeném úniku chloru (tj. úniku většiny skladovaného množství do 10 minut), přičemž celkové uniklé množství chloru je natolik velké, že může způsobit smrt nebo těžké zranění velkého množství osob nacházejících se v zájmové lokalitě. Pojmy „jednorázový únik“, resp. „časově omezený únik“ sice vyjadřují časový úsek dané události (resp. úniku látky ze zařízení), avšak nepodávají vůbec žádnou informaci o celkovém množství uniklé nebezpečné látky, což jejich použití v kontextu této práce významně limituje. Modelová havarijní situace, na kterou se v této disertační práci zaměřuji, současně představuje také nejhorší možnou

variantu nehody, která může v zájmové lokalitě nastat za daných podmínek. V tomto případě se jedná o únik veškerého množství kapalného chloru skladovaného v cylindrickém zásobníku rupturou v přečerpávacím potrubí. Tento scénář předpokládá únik celkem 65 tun kapalného chloru během 10 minut, a to za nepříznivých povětrnostních podmínek (atmosférická stabilita třídy F a rychlost větru $1,7 \text{ m.s}^{-1}$). Ačkoli doposud nebyly provedeny žádné výzkumné experimenty, při kterých by bylo uvolněno takto velké množství chloru (experiment simulující totální nehodu velkého průmyslového zásobníku nebo železniční cisterny by byl krajně obtížný a velmi nebezpečný), určitou představu o průběhu takovéto havarijní situace lze získat shlédnutím filmových záběrů pořízených při terénních testech provedených v rámci programu Jack Rabbit.

4.2.4 Vliv topografie terénu na tečení oblaku těžkého plynu

Oblak těžkého plynu se během fáze tečení chová jako tekutina a dominantní vliv na její šíření v prostoru má právě gravitační síla. Oblak má tak tendenci téct z míst o vyšší nadmořské výšce do míst s nižší nadmořskou výškou. Tento jev se nazývá **topografický efekt** a uplatňuje se o to významněji, čím svažitéjší terén je. Ve skutečnosti ale na tekoucí oblak nepůsobí pouze gravitační síla. Trajektorie šíření oblaku je v horizontální rovině určena směrem, v němž látka uniká z primárního zdroje (tj. uplatnění hybnosti) a směrem vanutí větru (tj. uplatnění síly větru). Ve vertikálním směru pak na oblak působí gravitační síla a proti ní působící síla vztlaková (tj. uplatnění termické konvekce). Všechny tyto síly jsou vektorovými veličinami, jež jsou určeny směrem a velikostí. To, jaký bude výsledný vektor síly působící na šířící se oblak, pak závisí na aktuálních místních podmínkách. S ohledem na to, že se jedná o variabilní parametry (vyjma gravitační síly), nelze jejich společný účinek jednoduše kvantifikovat. Nicméně, na základě empirických zkušeností z proběhlých událostí je známo, že oblaky těžkého plynu bývají poměrně účinně blokovány nejen vertikálními překážkami, jakými jsou budovy (viz

havárie ve Festusu nebo Graniteville), ale také okolním svažitém terénem. Je-li sklon svahu větší jak cca 45° a je-li tato terénní překážka vyšší než vertikální rozměr samotného oblaku, pak jej oblak těžkého plynu nepřeteče (viz havárie v Hendersonu nebo Al Durra). Účinek topografického efektu tak lze zjednodušeně vyjádřit jako funkci svažitosti¹², respektive jako tangens úhlu sklonu svahu.

Účinek topografického efektu prokázal Hanna a kol., kteří provedli simulaci havárie v Graniteville a využili k tomu šest modelů včetně SLAB. Použité modely předpověděly koncentraci v řádu stovek ppm ještě ve vzdálenostech převyšujících 10 km od místa havárie. Přitom ale empirické poznatky z této nehody jasně ukázaly, že tomu tak nebylo, neboť k poškození zasažené vegetace došlo jen v relativně blízkém okolí místa úniku (cca do 0,5 km). Oblak chloru tak byl evidentně blokován z jedné strany místní zástavbou a z druhé strany návrším [69].

U nižších hodnot svažitosti (cca do 20 %) může být za příhodných podmínek účinek gravitační síly překonán účinkem větru. Podrobná měření sice doposud nebyla prováděna, nicméně ze zkušeností z proběhlých událostí nebo terénních testů (např. Jack Rabbit) se jeví, že takovýto vliv může mít vítr o rychlosti větší jak cca 10 m.s^{-1} (viz např. [7, 13, 48]). Tyto závěry do značné míry potvrzují také výsledky experimentů, které provedli Zhao a Liu. Ti zjistili, že při rychlostech větru do $3,6 \text{ m.s}^{-1}$ se i při úniku chloru směrem vzhůru formuje hustý oblak, který rychle sesedá k zemi. Naproti tomu při rychlosti větru nad 10 m.s^{-1} je oblak větrem strháván a unášen do větších vzdáleností [112]. To zřetelně ukazuje na to, že při

¹² Svažitost představuje příkrost povrchu. Jedná se o úhel, který svírá nakloněná rovina zemského povrchu s vodorovnou osou. Lze jej vyjádřit ve stupních nebo v procentech. Hodnota udávaná v procentech představuje změnu nadmořské výšky na 100 metrů planimetrické vzdálenosti. Úhel sklonu 45° odpovídá svažitosti 100 %.

nižších rychlostech větru má na chování oblaku plynu podstatně větší vliv gravitační síla a nikoli vítr.

Dílčí závěr: Topografický efekt lze uvažovat pouze za situace, kdy je sklon svahu, podél něhož oblak teče, menší jak cca 45° . Jeho příspěvek lze vyjádřit jako tangens úhlu sklonu svahu. Uvažovat vliv topografického efektu má smysl také pouze v případě, že rychlost větru není vyšší jak 10 m.s^{-1} .

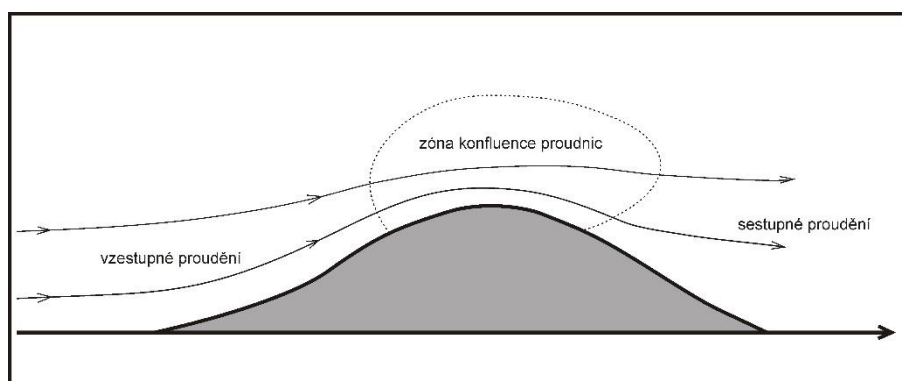
4.2.5 Vliv překážek na rozptyl oblaku těžkého plynu

Při modelování rozptylu oblaků plynů se zvažuje nejen vliv terénu, ale také jeho kvalita, resp. typ zemského povrchu nebo půdního pokryvu. Pro kvantifikaci aerodynamického účinku povrchu na rozptyl oblaku těžkého plynu se používá koeficient drsnosti povrchu z_0 [86]. V pohybujícím se oblaku totiž vzniká tenká vrstva, která se v důsledku tření oblaku o zemský povrch pohybuje pomaleji než zbytek oblaku. Čím je povrch drsnější, tím k výraznějšímu tření v této vrstvě dochází. Z fyzikálního hlediska tak koeficient drsnosti vyjadřuje účinek zemského povrchu na proudění vzduchu a na vertikální transport hybnosti, tepla, vodní páry a různých příměsí v přízemní vrstvě atmosféry (tj. rozptylující se plyn nebo aerosol). Tento koeficient poměrně spolehlivě popisuje vliv nízkých terénních překážek (drobné prohlubně, tráva, různé výčnělky apod.), ovšem výrazné terénní překážky, jakými jsou kopce, hory, hluboká údolí nebo i budovy v urbanizovaném prostředí, však zohlednit nedokáže [35]. Standardní hodnoty koeficientu drsnosti z_0 [10] pro jednotlivé druhy povrchů uvádí Tabulka 5.

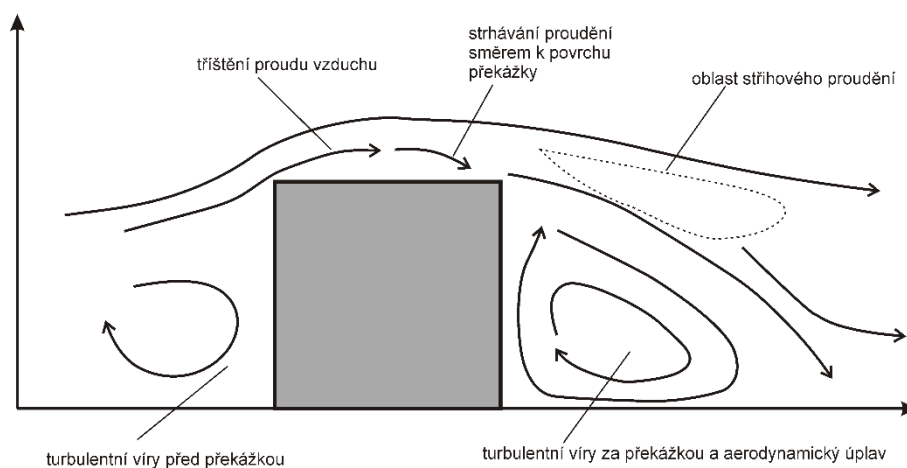
Tabulka 5 Charakteristika jednotlivých druhů povrchů a jejich hodnot koeficientu drsnosti povrchu z_0 [10]

Typ terénu	z_0 [m]
Zaledněná plocha	10^{-5}
Letištní ranvej	$2 \cdot 10^{-5}$
Rozlehlé vodní hladiny	$10^{-4} - 6 \cdot 10^{-4}$
Pěstěný trávník (do výšky 1 cm)	10^{-4}
Travní plocha letištního typu	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Travnatý povrch prémie	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Travnatý povrch 7,5 cm vysoký	10^{-2}
Travnatý povrch 10 cm vysoký	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Rovinaté strniště	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Buš (travnatý povrch s občasnými keři a stromy)	$4 \cdot 10^{-2}$
Vzrostlá tráva, obilné pole (50 cm výšky)	$5 \cdot 10^{-2}$
Terén obrostlý vegetací 1 až 2 m vysokou	0,2
Savana (travnatý povrch s hustější vzrostlou vegetací)	0,4
Stromy (10 až 15 m vysoké)	0,5 – 0,7

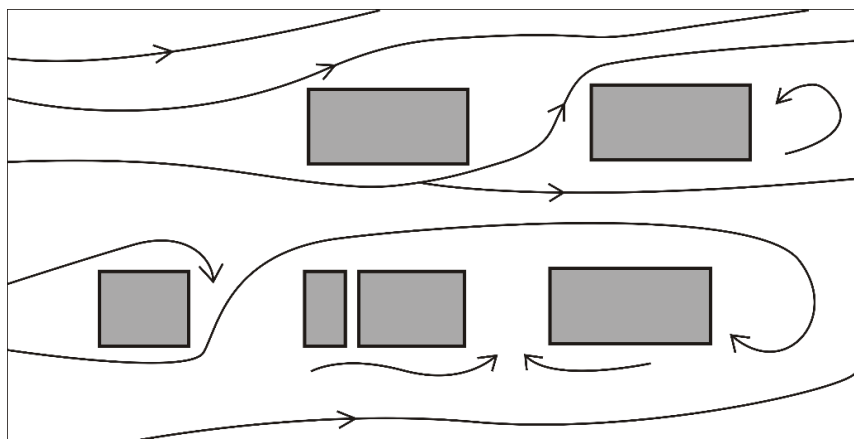
Kromě drsnosti povrchu ovlivňuje rozptyl znečišťujících látek v atmosféře charakter proudění, které je určeno rychlostí a směrem vanutí větru a turbulentním promícháváním, vznikajícím vlivem terénních překážek [85]. To vede ke vzniku nehomogenit v proudění, jakými je stáčení proudnic, konfluence, turbulentní víry, rotorové proudění apod. (viz Obrázek 38 až Obrázek 40).



Obrázek 38 Obtékání velkých terénních překážek vzduchem [4]



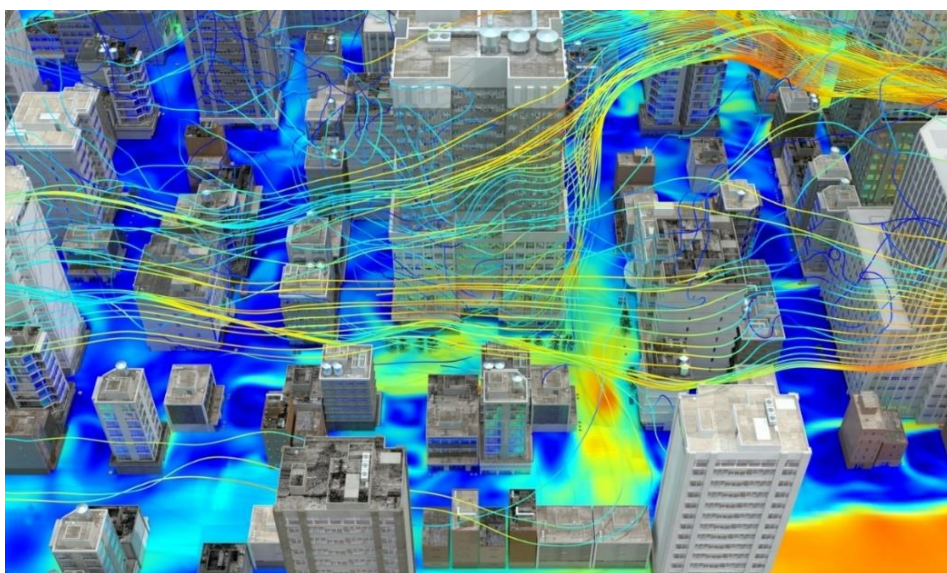
Obrázek 39 Turbulence ve vertikálních směrech při proudění vzduchu podél budov [4]



Obrázek 40 Turbulence v horizontálních směrech při proudění vzduchu podél budov [4]

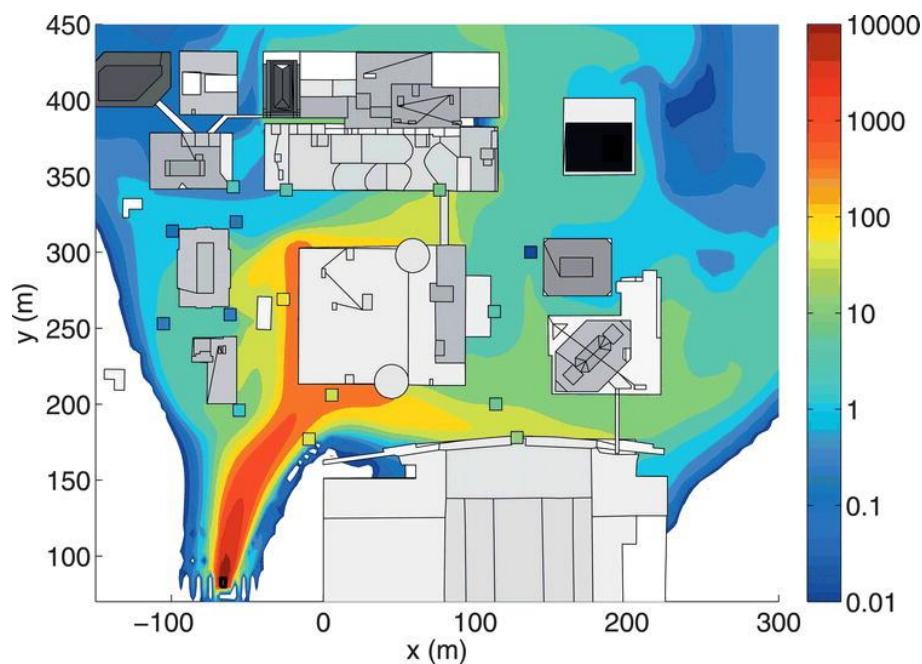
Značně komplikovaná situace je v důsledku tohoto proudění uvnitř velkých měst, kde vzduch proudí kolem budov a mezi nimi a jeho směr a rychlost se dynamicky mění v celém trojrozměrném prostoru (viz Obrázek 41). Mezi budovami v uličních kaňonech mohou vznikat vertikálně rotující víry, kdežto horizontálně rotující víry se často objevují v blízkosti rozhraní kaňonu, tj. v prostoru křižovatek. Na zadních stranách vysokých budov se pak často vyskytují vzestupné proudy, kdežto na předních plochách vysokých budov se naopak vítr stáčí dolů a vznikají silné spádové proudy. Tyto komplikované pohyby vzduchu vyvolávají na úrovni zemského povrchu, resp. v osách ulic, **divergenci proudění** [85].

V některých částech uličních kaňonů tak může docházet k zesílenému proudění, které se v závislosti na geometrii ulic na křižovatkách rozdvíjí a větrný tok díky tomu může pronikat i do bočních ulic nebo i do zcela uzavřených míst. Tato proudění někteří autoři označují jako **kanálové větry** [85]. V komplikovaném prostředí velkých měst tyto větry vzájemně interagují, soutěží spolu, spojují se se vzestupnými a sestupnými proudy a vytváří prostorově značně proměnlivé proudění [98]. Jak se převažující směry větru posouvají, vertikálně rotující víry se mohou změnit na spirálové víry, sestupné proudy mohou ztrácet na intenzitě, jak převládající vítr naráží na vysoké budovy v šikmých úhlech. Kanálové větry v některých ulicích nabývají na intenzitě, jinde polevují, což významně ovlivňuje transport a rozptyl oblačných vleků uvnitř města. Na úrovni některých ulic mohou být v důsledku zesílené ventilace významně nižší koncentrace znečišťující látky, zatímco jinde jsou koncentrace velmi vysoké v důsledku zadržení postupujícího oblaku vlivem stacionárního rotorového proudění (viz Obrázek 42) [84, 85].



Obrázek 41 Vizualizace složitěho charakteru proudění vzduchu nad velkoměstem a šíření těžkého plynu v uličních kaňonech (simulace pomocí modelu CFD)¹³ [120]

¹³ Význam jednotlivých barev viz Obrázek 42.



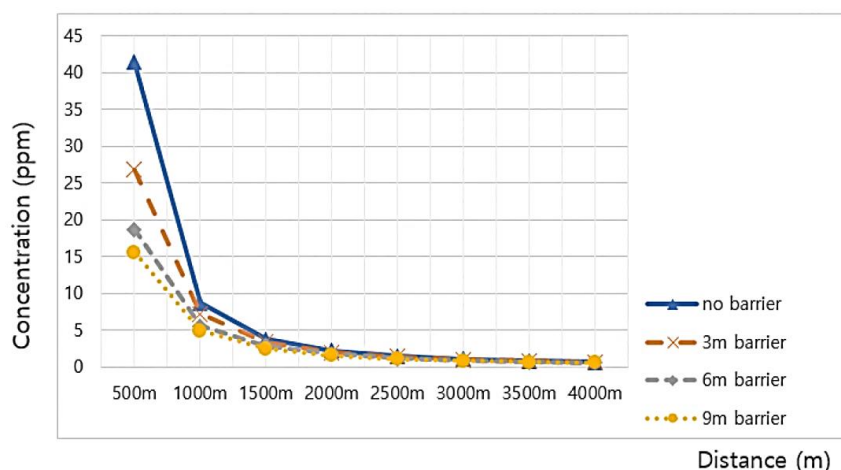
Obrázek 42 Predikce šíření oblaku těžkého plynu v silně urbanizovaném prostředí vytvořená pomocí CFD modelu FEM3MP (lze porovnat s rychlostí větru v uličních kaňonech uvedených na Obrázek 26) [84]

Pole proudění v urbanizovaných městských oblastech může být ovlivněno také přítomností **vegetace**. Ta působí nejen jako překážka, ale také jako ředící prvek. Wang a kol. [47] uvádí, že ve srovnání s terénem, kde jsou pouze budovy, může přítomnost stromů nebo keřů vést k zadržení oblaku těžkého plynu a působit tak proti jeho rozptylu. Bylo také zjištěno, že čím vyšší je pórovitost vegetace, tím menší je účinek blokování větrného proudění a tím slabší je také schopnost vegetace zachycovat rozptylující se plyn. Vzhledem k přítomnosti stromů existují dvě oblasti zpomalení rychlosti větru: návětrná a závětrná strana stromů. Čím blíže je proud vzduchu ke stromům, tím výraznější je pokles rychlosti větru. Důležitou roli hraje také hustota korun stromů. Čím řidší jsou větve, resp. čím méně je listů nebo jehličí, tím slabší je účinek blokování větru. Rychlost větru v okolí stromů je tak výrazně nižší v důsledku blokování kmenem a korunou porézního média, zejména pak na závětrné straně, kde může docházet k tvorbě turbulentních vírů [93].

Na blokování proudění má vliv také umístění stromů vůči budovám. Stromy vysázené na návětrné straně budovy blokují vítr více, což ale snižuje rychlost větru za nimi, a tedy i zvyšuje koncentraci znečišťující látky u pláště budovy. Stromy na závětrné straně budovy naproti tomu zvyšují turbulentní proudění, což vede k vyšší rychlosti větru a rychlejšímu naředění těžkého plynu [47].

Stromy mohou bránit rozptylu těžkého plynu a prodlužovat dobu rozptylu. Na volném prostranství mohou ale působit také jako účinná bariéra proti postupujícímu oblaku těžkého plynu. Naproti tomu keře nemohou plnit tuto roli, protože jejich blokovací účinek je ve srovnání se stromy malý, avšak oproti stromům se vyznačují podstatně lepším ředícím účinkem [93].

Podobný blokovací účinek jako vegetace mají také nejruznější stěny nebo valy. Zejména pak při fázi tečení těžkého plynu mohou posloužit jako účinná bariéra bránící pronikání nebezpečné plynné látky do okolí. Ostatně i havárie ve Festusu ukázala, jak významnou roli mohou betonové zdi mít. Min a kol. [95] proto provedli studii, v rámci které se pokusili kvantifikovat blokovací účinek zdí o výšce 3 metry, 6 metrů a 9 metrů. Stěny se nacházely ve vzdálenosti 100 metrů od zdroje úniku chloru, přičemž se jednalo o reprodukci havarijní situace, která byla experimentálně ověřována již v roce 1986 v rámci projektu Goldfish. Výsledky potvrdily očekávání, že čím vyšší bariéra je, tím vyšší má blokovací účinek. Blokovací účinek je nejvyšší v blízkosti epicentra úniku a se vzdáleností se snižuje (viz Obrázek 43).



Obrázek 43 Vliv stěnové bariéry o různé výšce na průběh koncentrace chloru [95]

Dílčí závěr: Z výše uvedeného vyplývá, že v rámci této disertační práce nebudu moci provést složité modelování pomocí CFD modelu. Nicméně při modelování chování těžkého plynu v zájmové lokalitě využiji poznatky o chování oblaku těžkého plynu v systému uličních kaňonů, kdy budu vycházet z předpokladu, že jednotlivé proudy se budou do prostoru šířit analogicky jako kapalina. Směr toku proudu bude dominantně určovat geometrie terénu (tj. účinek gravitační síly), přičemž účinek kanálových větrů ani jiných nehomogenit v proudění (např. turbulentních vírů) nebudu pro jejich stochastickou povahu uvažovat. Proudění se budou postupně rozdělovat v určitém poměru v závislosti na šířce kaňonu a jeho orientaci vůči dominantnímu směru tečení. Provedená simulace bude předpokládat tečení proudů pouze jedním dominantním směrem. Spojování jednotlivých větví se bude brát do úvahy pouze v těch případech, kdy tato skutečnost bude mít podstatný vliv na výslednou emisní sílu předpokládaného virtuálního zdroje. Virtuální zdroj bude představovat místo, kde se budou uvedené větve proudu chloru stékat. Jelikož se bude jednat o kontinuální proces, bude výsledná emisní síla virtuálního zdroje určena na základě zákona zachování hmoty – tedy množství chloru, které do virtuálního zdroje přiteče ve formě oblaku těžkého

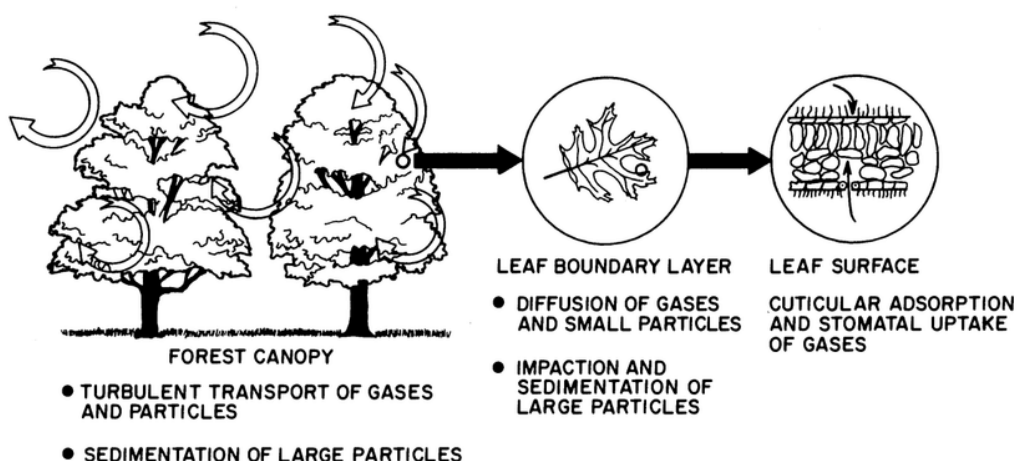
plynu, se musí ve stejný čas rozptýlit do atmosféry v plynném skupenství. Celková dotace emisního zdroje přitom bude představovat poměrnou část hmotnosti chloru uniklého z průmyslového zásobníku, která dotekla až k virtuálnímu zdroji. Umístění virtuálního zdroje bude nutné zvolit tak, aby bylo možné tento výpočet provést. Další podmínkou je, že umístění virtuálního zdroje musí umožňovat provést simulaci rozptylu velkého množství chloru pomocí zvoleného softwarového nástroje. Hypotézu o charakteru tečení oblaku těžkého plynu bude nutné potvrdit anebo vyvrátit na základě provedeného experimentu, kterým bude simulován masivní únik chloru v zájmové lokalitě. Za tímto účelem bude nezbytné vytvořit fyzický model této lokality. Při návrhu a provedení experimentu bude zohledněn také případný blokovací účinek vegetace nebo výrazných konstrukčních prvků (stěny nebo valy). Vstupní data pro výrobu modelu budou čerpána z dostupných mapových podkladů a z fotodokumentace zájmové lokality.

4.2.6 Vliv depozice na snížení koncentrace polutantu v oblaku

Rozptyl oblaků těžkého plynu ovlivňují také procesy suché nebo mokré depozice. Na rozdíl od jiných dynamických procesů, jako je koagulace a nukleace, nelze v případě rozptylu oblaku těžkého plynu depozici opomenout. Zejména pak zachyt **aerosolových částic** jejich depozicí nebo impakcí na povrchu překážek může koncentraci nebezpečné chemické látky tvořící oblak účinně snížit [101]. Suchá depozice je za normálních okolností proces pomalý, avšak kontinuální.

Suchá depozice se může významněji uplatňovat zejména během fáze tečení oblaků těžkých plynů. To dochází k usazování aerosolových částic na površích překážek, které oblak obtéká nebo jimi prostupuje. Celková depozice závisí na velikosti částic, charakteristikách pole proudění a na geometrii překážek (viz Obrázek 44). Čím je povrch překážky, na němž se mohou částice aerosolu zachytávat větší, tím je rychlost depozice vyšší. Současně čím větší částice oblak

tvoří, tím výrazněji se u nich uplatňuje gravitační usazování [101]. Rychlost depozice aerosolových částic na drsných površích je celkově vyšší než na hladkých površích [101].



Obrázek 44 Princip suché depozice plynných látek a aerosolových částic v korunách stromů [99]

V oblaku těžkého plynu šířícího se v reálné atmosféře probíhá řada dynamických procesů, které depozici ovlivňují. Kromě Brownovy difúze a gravitačního usazování se zde uplatňuje také turbulentní promíchávání a turboforéza, které ovšem nelze s dostatečnou přesností matematicky popsat [101]. Pro modelování depozice částic aerosolu v podmínkách reálné atmosféry se proto používají zjednodušené modely, jako například Raupachův model [102]. Tento model zahrnuje jak sedimentaci, tak i Brownovu difúzi. Je parametrizován Schmidtovým číslem Sc , frikční rychlostí u^* a Stokesovým číslem St . Na základě laboratorních pokusů bylo zjištěno, že rychlost depozice závisí především na Stokesově čísle¹⁴ a

¹⁴ Stokesovo číslo v obecné rovině vyjadřuje poměr brzdné dráhy částice k charakteristickému rozměru; obecně se používá jako indikátor podobnosti chování částic při obtékání překážek.

na typu povrchu (resp. jeho drsnosti). Vztah pro výpočet depoziční rychlosti, který z Raupachova modelu odvodili Bae a kol. [103], uvádí rovnice 3.

$$V_d = V_t + \frac{u_*^2}{u_r} \left[0,75a_f \left(\frac{St}{St+\alpha} \right)^2 + (0,25a_v Sc^{-2/3}) \right] \quad (3)$$

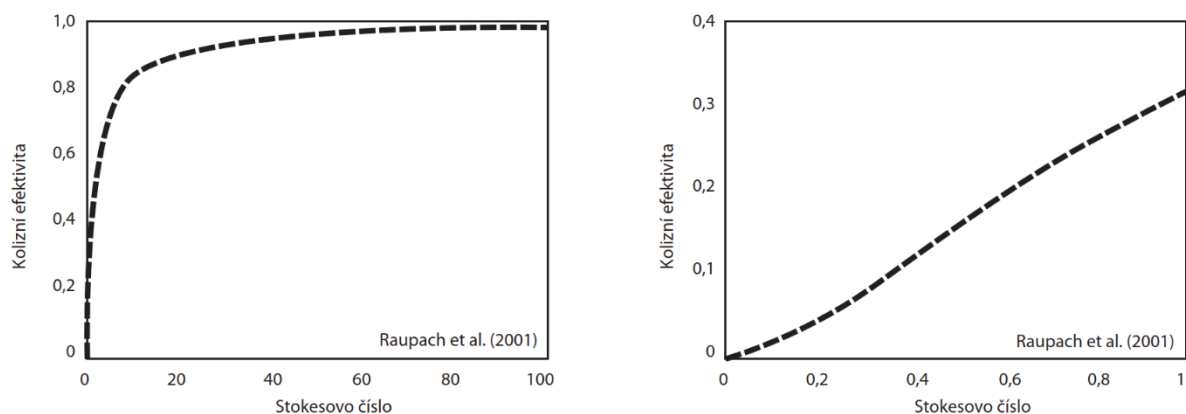
přičemž

$$V_t = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\mu_a}; \quad St = \frac{\rho_p d_p^2 u_*^2}{18\mu_a v}; \quad Sc = \frac{3\pi\mu_a^2 d_p}{\rho_a k_b T C_c}; \quad C_c \cong 1 + 3,34 \frac{\lambda}{d_p}$$

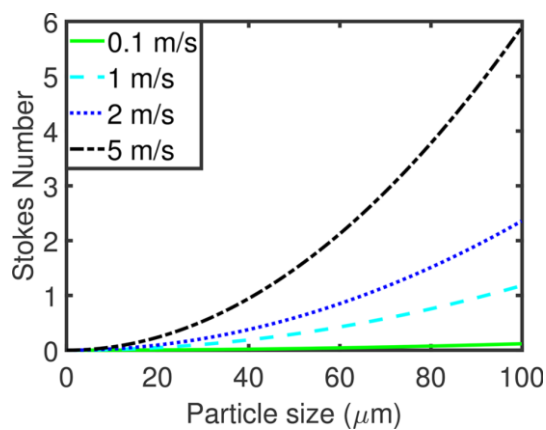
kde V_d je depoziční rychlost pro suchou depozici (cm.s^{-1}), ρ_p je hustota materiálu tvořících částice aerosolu (g.cm^{-3}), ρ_a je hustota vzduchu (g.cm^{-3}), d_p je aerodynamický průměr částic (cm), g je gravitační zrychlení (cm.s^{-2}), C_c je Cunninghamův korekční faktor, μ_a je viskozita vzduchu (g.cm^{-1}), u^* je frikční rychlost (cm.s^{-1}), u_r je rychlost větru v referenční výšce (cm.s^{-1}), Sc je Schmidtovo číslo¹⁵, St je Stokesovo číslo, v je kinematická viskozita ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$), k_b je Boltzmannova konstanta ($\text{g.cm}^2.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-2}$), T je teplota (K), a_f a a_v jsou empirické koeficienty ($a_f = 2$; $a_v = 8$).

Účinnost zachytu lineárně narůstá až do $St = 1$. Pro vyšší hodnoty St pak nárůst není tak rychlý a limitně se blíží hodnotě 1 pro $St > 100$ (viz Obrázek 45). Závislost Stokesova čísla na velikosti částic aerosolu a rychlosti jejich pohybu ve vzduchu je poté uvedena na Obrázku 46 [103].

¹⁵ Schmidtovo číslo v obecné rovině vyjadřuje poměr kinematické viskozity k difúznímu koeficientu.



Obrázek 45 Účinnost záchytu v závislosti na hodnotě Stokesova čísla podle Raupachova modelu [103]



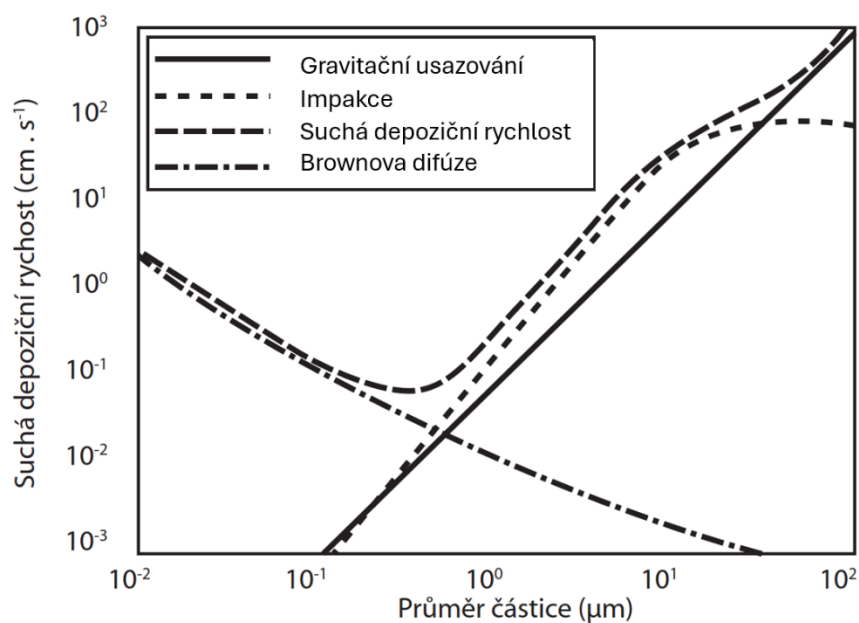
Obrázek 46 Závislost Stokesova čísla na velikosti částic aerosolu a rychlosti jejich pohybu ve vzduchu [110]

Nespornou výhodou rovnice 3 je, že ji lze aplikovat v praxi, protože hodnoty jednotlivých proměnných lze vypočítat na základě tabelovaných hodnot. Jak již bylo zmíněno výše, uvedený vztah zahrnuje také charakter povrchu, nad kterým se oblak aerosolu rozptyluje. Nikoli však prostřednictvím koeficientu drsnosti z_0 , nýbrž pomocí koeficientu α (viz Tabulka 6), jehož hodnoty byly odvozeny Weselym [105].

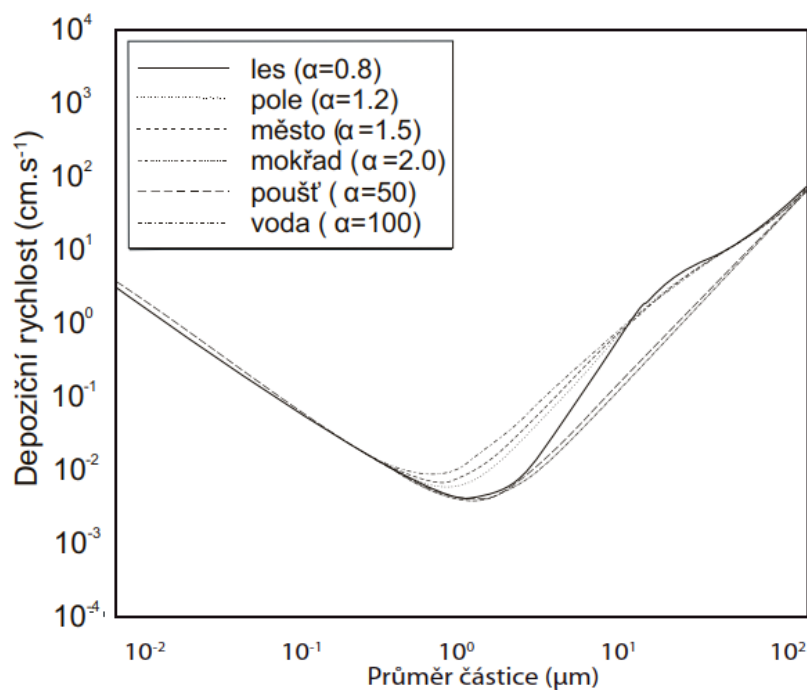
Tabulka 6 Hodnoty koeficientu α podle jednotlivých typů povrchů [105]

Typ povrchu	α
Listnatý les	0,8
Jehličnatý les	0,8
Zemědělská krajina	1,2
Louky, pastviny	1,2
Nezalesněné bažiny	1,2
Urbanizovaná krajina	1,5
Smíšený les a mokřadní porosty	2,0
Poušť	50
Hory a skaliska	50
Vodní hladina a zamrzlé plochy	100

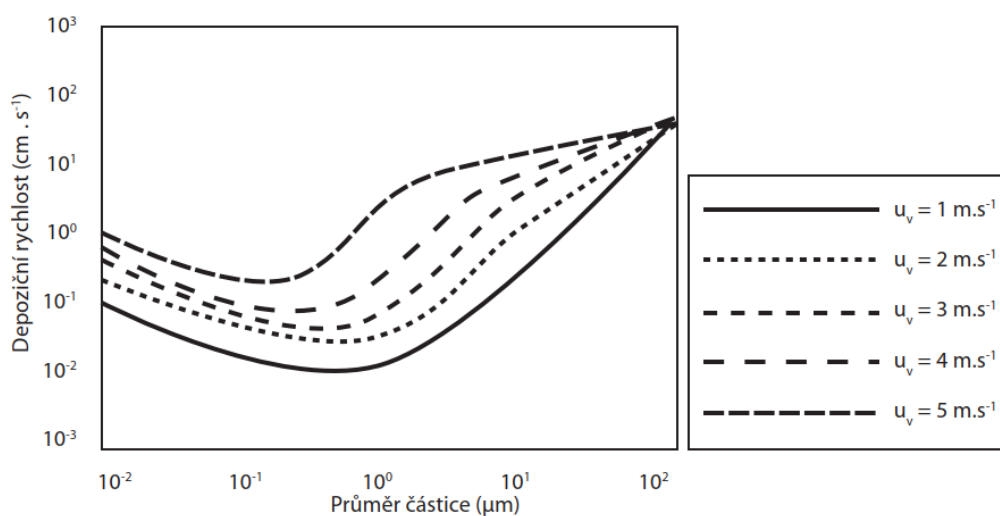
Obrázek 47 ukazuje, že z hlediska depoziční rychlosti je kritická hodnota velikosti částic $d_p = 0,5 \mu\text{m}$. Při této velikosti mají částice nejmenší V_d . Pro částice menší je dominantní Brownova difúze, pro částice větší pak impakce a gravitační usazování. U částic od $d_p 0,5$ do $10 \mu\text{m}$ pak převažuje vliv impakce a pro částice větší jak cca $50 \mu\text{m}$ je již dominantní gravitační usazování (sedimentace). Obrázek 48 pak prezentuje průběh hodnot depoziční rychlosti pro různé typy povrchů a Obrázek 49 ukazuje vliv rychlosti větru (v referenční výšce 10 metrů nad zemským povrchem) na příspěvek impakce k celkové depoziční rychlosti.



Obrázek 47 Vliv jednotlivých procesů na suchou depozici aerosolových částic [103]



Obrázek 48 Závislost depoziční rychlosti na typu povrchu [103]



Obrázek 49 Závislost depoziční rychlosti impakce na rychlosti větru [103]

Depozice může být v principu proces buď vratný, anebo nevratný. Vratný je tehdy, když deponovaná kapalná nebo plynná fáze dané látky s povrchem chemicky nereaguje a po čase se znovu vrátí zpět do atmosféry (např. procesem resuspenze). Nevratná pak nastává tehdy, když k chemické reakci dochází a původní látka se mění na látky jiné [4]. Mnoho toxických průmyslových látek (např. chlor, fluor, amoniak nebo chlorovodík) je velmi reaktivních a ochotně se slučuje s celou řadou chemických látek a materiálů běžně se vyskytujících v půdním pokryvu nebo složkách vegetace. Tyto reakce ale mají své limity, neboť každý materiál, včetně rostlinného, může reagovat s danou chemickou entitou jen do určité míry (viz Obrázek 50).

Rychlost takovýchto reakcí byla v minulosti studována pro koncentrace typické pro běžné plynné polutanty (tj. na úrovni jednotek až desítek ppm) [94] (viz Tabulka 7). Ovšem v případě havarijních úniků, kdy v blízkém poli koncentrace těchto látek v ovzduší dosahují hodnot o mnoho řádu vyšších (tisíce až statisíce ppm), nelze tento přístup použít [43].



Obrázek 50 Stopa po průchodu oblaku chloru jako důsledek interakce chloru s pouštním pískem
(Jack Rabbit II, 2016) [31]

Tabulka 7 Maximální depozice plynného chloru na vybraných depozičních površích
(dle údajů z Argonne National Laboratory) [94]

Materiál	Maximální depozice (mg.m ⁻²)
Jetel plazivý	700
Šťavel evropský	5 000
Smrk sivý	5 000
Půda (0 % vlhkosti)	5 000
Půda (2 % vlhkosti)	1 000
Půda (4 % vlhkosti)	600
Půda (4 % vlhkosti)	600

Pokud jde o **plynné polutanty**, pak základní model povrchové depozice popsany Weselym a Hicksem předpokládá zachytávání plynného polutantu jako soustavu odporů zahrnujících vliv atmosférické turbulence a chemických reakcí probíhajících na depozičním povrchu [94].

Jedná se o:

- R_a – aerodynamický odpor, který je spojen s turbulentní výměnou s nejnižšími vrstvami atmosféry.
- R_b – odpor mezní vrstvy atmosféry, který závisí na převrácené hodnotě rychlosti větru a na molekulární difuzivitě daného plynu (polutantu).
- R_c – efektivní odpor zachytu, který představuje konečnou rychlost chemické reakce daného polutantu s materiálem tvořícího depoziční povrch.

Depozici tak lze vyjádřit jako hmotnostní tok dané látky na depoziční povrch, který je určen součinem koncentrace dané látky v ovzduší C a depoziční rychlosti V_d (viz rovnice 4).

$$F = V_d C = \frac{C}{R_a + R_b + R_c} \quad (4)$$

Úskalím výše uvedené rovnice je, že v praxi obvykle neznáme hodnoty depoziční rychlosti V_d ¹⁶, takže je nutné vycházet pouze z hodnot jednotlivých odporů. Hodnoty R_a a R_b jsou ale pro většinu plynů deponovaných na površích vegetace velmi malé [100]. Jelikož ale R_b zahrnuje také faktor omezení Brownovy difúze, lze jeho hodnotu odhadnout za pomoci Schmidtova čísla Sc a frikční rychlosti u^* . V případě chloru činí $Sc \approx 0,32$. Laboratorními pokusy bylo nicméně prokázáno, že příspěvek odporu mezní vrstvy R_b není v případě chloru příliš významný [94]. Podstatný vliv na suchou depozici plynné fáze šířícího se polutantu tak má pouze

¹⁶ Existuje jen velmi omezené množství informací o hodnotách depoziční rychlosti pro jednotlivé plyny a depoziční povrchy, které byly stanoveny na základě dat z provedených experimentů. Kupříkladu pro oxid dusičitý se tato hodnota pohybuje v rozmezí od $0,3 \text{ cm.s}^{-1}$ (savana) až po $11,7 \text{ cm.s}^{-1}$ (hustý lesní porost) [94]. V případě chloru činí depoziční rychlost na travnatém povrchu přibližně $0,035$ až $0,48 \text{ cm.s}^{-1}$ [100].

efektivní odpor záchytu R_c , který lze v podstatě považovat za výsledný odpor vůči přenosu plynné látky na depoziční povrch.

Dílčí závěr: Ačkoli se na základě výše uvedeného může jevit problém související s uplatněním depozice poměrně komplikovaný, lze na základě zjištěných poznatků vyvodit několik zjednodušujících závěrů. Předně, při suché depozici hraje dominantní roli pouze typ (poréznost) a celková plocha depozičního povrchu, koncentrace daného polutantu v ovzduší a rychlost větru (resp. frikční rychlost). Dále je evidentní, že při krátkých epizodických událostech spojených s havarijními úniky nemá prakticky smysl uvažovat jakékoli významnější uplatnění depozice plynné fáze oblaku těžkého plynu. Plyn totiž obtéká překážky mnohem snáze než aerosolové částice, takže jejich záchyt, ať již impakcí nebo sedimentací, je během tak krátkého časového úseku takřka nulový. Podobně hovoří také Hanna a kol. [43], kteří na základě empirických poznatků získaných při terénních experimentech Jack Rabbit II dospěli k závěru, že příspěvek depozice plynné fáze chloru tvořícího oblak těžkého plynu byl prakticky nulový, zatímco depozici aerosolových částic nelze opomíjet, neboť sedimentované kapalné kapičky chloru prokazatelně interagovaly s půdním pokryvem (viz Obrázek 50).

To znamená, že v rámci řešení praktické části této disertační práce bude nutné vycházet z faktu, že při průchodu oblaku aerosolu vysoce urbanizovaným prostředím, případně hustými porosty stromů a křovin, se mohou uplatňovat dva depoziční efekty. Prvním je snížení rychlosti proudění vzduchu, které se projevuje zvýšením depoziční rychlosti aerosolových částic, neboť při nízkých rychlostech se významně uplatňuje gravitační usazování. Druhým efektem je pak přímý záchyt aerosolových částic na vertikálně orientovaných površích, například na stavebách nebo listech vegetace, a to zejména procesem impakce. Určujícím faktorem je přitom pórovitost překážek a jejich výška [104].

Celková depoziční rychlost velmi závisí také na velikosti aerosolových částic. V rámci ochrany veřejného zdraví jsou standardně sledovány částice frakce PM_{10} , jejichž chování je dobře popsáno. U částic PM_{10} dosahuje účinnost vegetační bariéry pro výšku $H = 11$ m až 32 %, $H = 7$ m až 24 % a $H = 3$ m až 17 % [104]. Nicméně v oblacích těžkého plynu se nachází také částice větší jak $10\text{ }\mu\text{m}$, které mohou v hmotnostním spektru aerosolových částic tvořit dominantní příspěvek (tj. zahrnují největší příspěvek k celkové hmotě oblaku). Proto je pro účely této práce vhodné uvažovat mnohem širší frakci, a to PM_{75} . Dostupné prameny uvádí, že u částic PM_{75} dosahuje účinnost vegetační bariéry pro výšku $H = 11$ m až 95 %, $H = 7$ m až 80 % a $H = 3$ m až 60 % [104]. Podobné závislosti lze logicky předpokládat také u „porézních“ staveb, jakým jsou průmyslové objekty, kovové konstrukce, potrubní mosty apod. Pro zahrnutí depozice do modelu virtuálního zdroje tak bude nutné odvodit či odhadnout vhodné korekční koeficienty.

4.2.7 Vliv mokré depozice

Mokrá depozice obvykle představuje rychlé vymývání polutantu z atmosféry, ať se již nachází v plynné podobě nebo ve formě aerosolu. Může nastávat jak přirozeně v důsledku atmosférických srážek (déšť, mlha), anebo uměle v důsledku skrápění za využití vodní mlhy [10].

Účinnost mokré depozice je vyšší pro aerosolové částice než pro plynné polutanty a roste s délkou trvání vymývání, intenzitou padajících srážek, pádovou rychlostí kapek a se zmenšující se velikostí kapek vody [38]. Schatz a Koopman provedli sérii testů ve větrném tunelu, kde zjišťovali efektivitu použití vodní clony ke snížení koncentrace fluorovodíku, což mělo simulovat jeho únik ze zásobníku [66]. Pracovali s různě modifikovanými systémy skrápění a spočítali, že účinnost těchto systémů se pohybuje od 25 % do 90 % v závislosti na poměru množství vody a množství vymývaného fluorovodíku. Z jejich experimentů vyplynulo, že rychlost

větru a vlhkost vzduchu nemá na účinnost žádný podstatný vliv. Nejlepší výsledky (až 90 %) pak byly dosaženy při poměru množství skrápěcí vody k množství fluorovodíku 40 : 1. Provedené experimenty identifikovaly další proměnné, které se významně podílí na celkové účinnosti vymývání vodní clonou:

- velikost kapiček – kapky o velikosti 160 μm měly nejvyšší účinnost vymývání (menších kapiček se dosáhne větším tlakem v systému),
- orientace rozstříkovaného proudu vody – pokud se provádí rozstřík proti směru postupu polutantu, významně to zvýší účinnost vymývání,
- vzdálenost mezi jednotlivými rozprašovacími hlavicemi – nejlepší výsledky byly naměřeny u hlavic instalovaných v rozestupu 60 až 100 cm; menší vzdálenosti (30 cm) již neměly na celkovou účinnost vliv.

Naproti tomu vliv ostatních parametrů se ukázal jako zanedbatelný, konkrétně:

- přítomnost aditiv ve skrápěcí vodě,
- teplota vzduchu nebo skrápěcí vody,
- více skrápěcích clon umístěných za sebou,
- rychlost větru,
- relativní vlhkost vzduchu.

Kromě výše uvedeného má na účinnost vymývání vliv také to, jak hustý je skrápěný oblak, jak velká je dotace skrápěné látky a nakolik je rozpustná ve vodě a také po jak dlouhou dobu skrápění probíhá. Obecně lze konstatovat, že čím je oblak hustší, tím je relativní účinnost skrápění vyšší. Stejně tak se pozitivně projevuje i schopnost dané látky rozpouštět se ve vodě, ačkoli tento příspěvek je notně závislý na velikosti rozstříkovaných kapiček a jejich celkovém množství. Vodní kapky totiž fungují jednak jako chemické rozpouštědlo, ale současně při svém pádu narážejí do částic pevného aerosolu, s nimiž agregují a následně na sebe „nabalují“ další kapky

(koalescenční efekt). Pokud jde o vliv času, tak bylo zjištěno, že čím déle skrápění působí, tím je celkové množství vymytého polutantu vyšší [81]. Nicméně největší rychlost úbytku polutantu byla vždy pozorována na začátku skrápění a s postupujícím časem klesala. Důvodem je, že koncentrace vymývaného polutantu se s časem rychle snižuje.

Dílčí závěr: Padající vodní srážky mají poměrně vysokou schopnost pohlcovat polutanty obsažené v atmosféře, a to ať už se jedná o plynné látky, tak zejména o suspendované částice. Proces vymývání, tj. mokrou depozici, lze proto úspěšně využívat pro cílené snížení koncentrací nebezpečných látek uvolněných do ovzduší při haváriích. Účinnost vymývání roste se zmenšující se velikostí vodních kapiček a s jejich celkovým počtem v objemové jednotce vzduchu. Rozprašování vodní mlhy pomocí stabilního skrápěcího systému tak představuje vysoce efektivní nástroj pro snížení dosahů zraňujících koncentrací řady toxických látek, včetně chloru. V reálné atmosféře se ale vyskytují také vodní kapičky přirozeného původu, zejména pak v blízkosti vodních ploch a toků. I ty se mohou mokré depozice účastnit, byť s nepoměrně menším významem. Kupříkladu Buckley a kol. [116] zpracovali případovou studii věnovanou transportu chloru uniklého do atmosféry během nehody v Graniteville a odhadli, že tímto způsobem došlo k depozici více jak 20 kg chloru. Opominout zahrnutí mokré depozice do rozptylových modelů by tedy bylo zásadní chybou. Na základě dostupných informací se nicméně zdá, že mokrá depozice může mít podstatný vliv během fáze tečení oblaku těžkého plynu, kdy jsou koncentrace daného polutantu velmi vysoké, a tedy i účinek vymývání je nejvyšší. Naopak během fáze rozptylu (zejména pasivního) už mokrá depozice nehraje takovou roli.

4.3 Případová studie

Pro další řešení disertační práce bylo nutné ověřit hypotézu, že pro simulaci masivních úniků chloru a rozptylu oblaku těžkého plynu v silně urbanizovaném prostředí je vhodné použít softwarový nástroj ALOHA. Jak bylo uvedeno v kap. 3.4, dostupných software existuje několik, nicméně ALOHA se vyznačuje dvěma podstatnými výhodami. Jednak vychází z robustního numerického základu umožňujícího generovat validní výstupy (použité algoritmy jsou založeny na empirických zkušenostech a byly vyvíjeny po čtyři desetiletí) a jednak pro svou uživatelskou jednoduchost nabízí dobrou možnost fitování (na rozdíl například od programu EFFECTS).

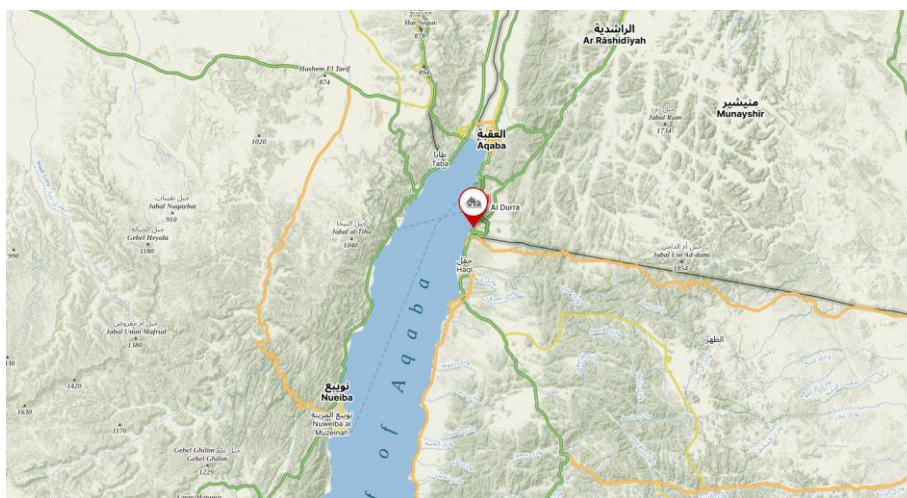
4.3.1 Popis analyzované události

V rámci teoretické části jsem nejprve provedl analýzu odborných zdrojů věnujících se masivním únikům chloru. Průběh i následky některých havarijních událostí (viz kap. 3.3.4) jsou poměrně podrobně popsány, takže je možné tyto informace využít pro ověření vhodnosti navrženého postupu řešení. V roce 2022 se nicméně přihodila bezprecedentní událost, která je svým charakterem jednorázového úniku velkého množství chloru naprosto unikátní, a která byla navíc zachycena na videozáznam.

Jednalo se o nehodu, která se stala dne 27. června 2022 v námořním přístavu Al Durra poblíž jordánského města Aquaba (viz Obrázek 51), a při které zemřelo 13 lidí a 251 bylo vážně zraněno. Událost se stala během nakládky kontejnerové lodi Forest 6 mířící do Džibuti, kdy v 16:15 hod. místního času došlo k prasknutí vázacích lan jeřábu a k následnému pádu mobilního zásobníku 20FT T50 obsahujícího 25 tun kapalného chloru. Následkem pádu z výšky cca 5 metrů došlo k roztržení pláště

zásobníku (viz Obrázek 56) a k okamžitému úniku veškerého množství kapalného chloru. Průběh události je chronologicky zachycen viz Obrázek 52 až Obrázek 55.

Z pohledu kauzality, jakož i dobře zmapovanému průběhu šíření oblaku chloru hustou zástavbou přístavu, bylo možné provést její retrospektivní analýzu za využití počítačového programu ALOHA.



Obrázek 51: Mapa oblasti okolo přístavu Al Dura [119]



Obrázek 52: Nakládka mobilního zásobníku (v červeném kroužku) [45]



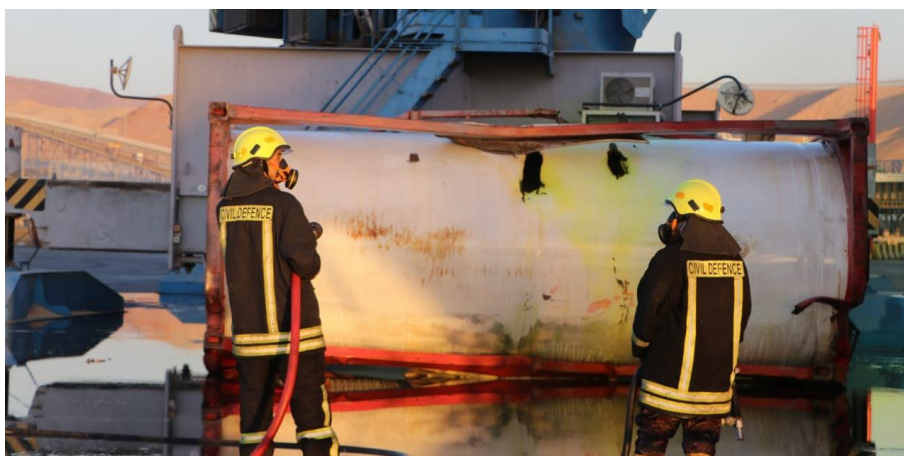
Obrázek 53: Pád mobilního zásobníku s následky vzniku ruptur v plášti a okamžitým únikem kapalného chloru [45]



Obrázek 54 Jednorázový únik chloru [45]



Obrázek 55: Pohled na šířící se oblak chloru [45]



Obrázek 56: Pohled na přepravní cisternu poškozenou pádem [45]

4.3.2 Modelování havarijní situace pomocí programu ALOHA

Pro modelování bylo nutné nejprve zjistit informace o místních povětrnostních podmínkách a dále parametry zdroje úniku. Datum a čas události, jakož i počasí v místě, bylo možné zjistit z otevřených zdrojů. Pokud jde ale o směr a sílu větru, tuto informaci bylo nutné získat až na základě analýzy videozáznamů. Na inkriminované lodi byla zřetelně vidět lodní vlajka třepotající se ve větru, takže podle jejího napínání a orientaci vůči lodi byla za pomoci Baufortovy stupnice odhadnuta rychlost větru ve výšce 10 metrů nad zemí, resp. směr vanutí větru.

Taktéž parametry zdroje úniku a vzniklého oblaku chloru bylo nutné získat na základě rozboru dostupných videozáznamů a článků zveřejněných na zpravodajských serverech. Rovněž nebyl znám celkový počet osob, které se v okamžiku nehody vyskytovaly v přístavu, nicméně z informací o počtu zraněných a s ohledem na rozlehlost areálu přístavu lze předpokládat, že se jednalo o stovky osob. Známými údaji bylo celkové množství uniklého chloru, velikost ruptury a samotný průběh nehody.

Do programu ALOHA pak byly zadány níže uvedené vstupní parametry (viz Tabulka 8).

Tabulka 8 Parametry události v Al Durra

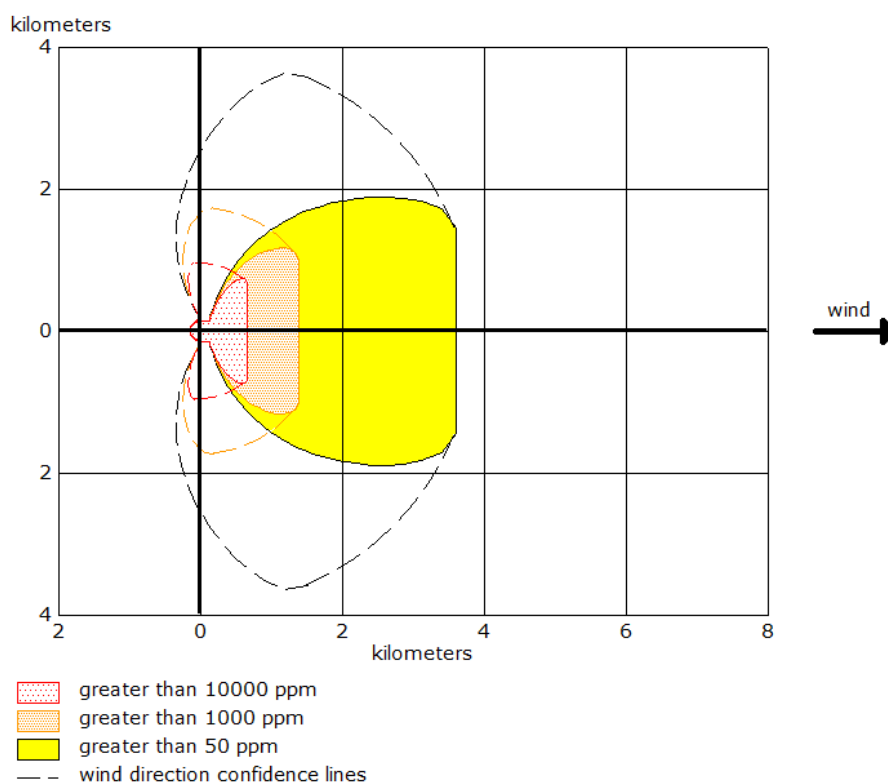
Parametry zdroje	
Druh zásobníku	Horizontální cylindrický zásobník
Rozměry	6.058 m (d) x 2.4 m (ø)
Max. pracovní tlak	16,4 bar
Vodní objem	23 900 l
Množství uskladněného chloru	25 t
Teplota uskladněného chloru	v rovnováze s teplotou vzduchu
Parametry ruptur v přepravní cisterně ¹⁷	
Rozměry ruptury 1:	0,18 m (š) x 0,48 m (v)
Rozměry ruptury 2:	0,18 m (š) x 0,36 m (v)
Meteorologické podmínky	
Teplota vzduchu:	29 °C
Relativní vlhkost vzduchu:	25 %
Rychlost větru v 10 metrech:	2 m/s
Směr vanutí větru:	Jihozápadní

¹⁷ Vzhledem ke skutečnosti, že software ALOHA neumožňuje modelaci pro více únikových otvorů najednou, bylo nutné korekci stanovit jeden únikový otvor/rupturu o velikosti 0,66 m (v) x 0,27 m (š).

Stupeň pokrytí oblohy mraky:	Jasno (0/10)
Třída stability atmosféry:	C
Výskyt inverze	NE

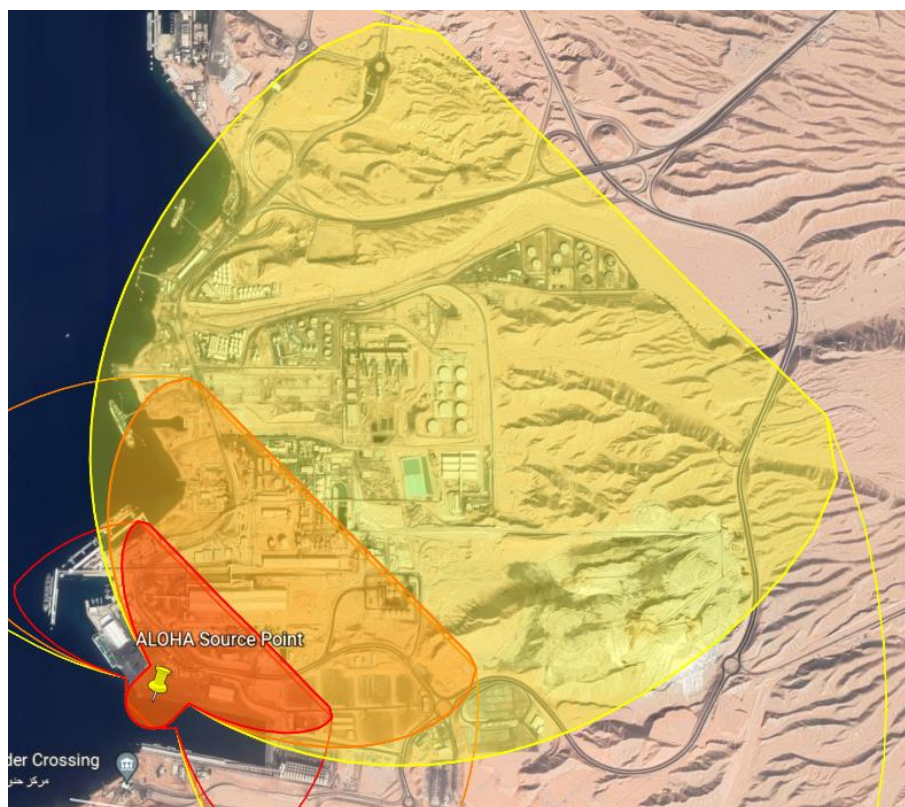
Výsledky a diskuse

Po zadání parametrů zdroje a místních podmínek do software ALOHA byl proveden první výpočet. Jeho výsledky se však významně rozcházel se skutečností (pořízenými videozáznamy z nehody), neboť ukazovaly, že šíření oblaku mělo výrazně směrový charakter, přičemž stopa oblaku pro koncentraci 50 ppm výrazně překračovala 10 km. Tento výsledek se s realitou evidentně značně rozcházel. Proto byla postupně provedena dílčí úprava (zpřesnění) vstupních parametrů pomocí fitování a současně byl explicitně zadán výpočtový model "Heavy Gas Dispersion". Výsledky takto provedeného modelování pak zachycuje Obrázek 57 až Obrázek 60.

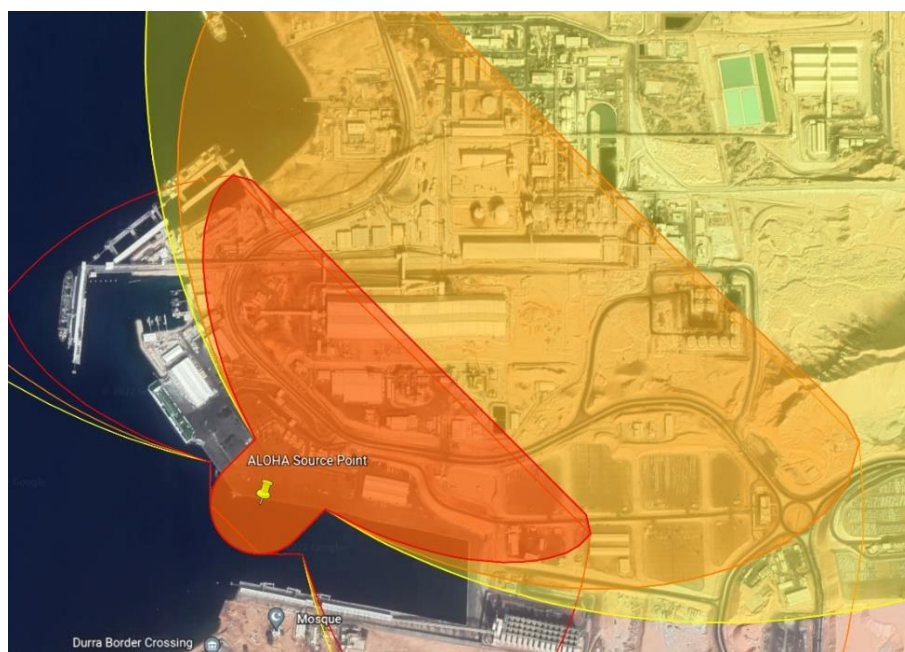


Obrázek 57: Zóny zranitelnosti vytvořené v programu ALOHA [zdroj vlastní]

Pro vykreslení jednotlivých zón zranitelnosti byly použity tři úrovně koncentrací (50 ppm, 1 000 ppm a 10 000 ppm). Koncentrace chloru 50 ppm je koncentrace život ohrožující, neboť již při expozici trvající 10 minut může dojít k úmrtí člověka. V případě, že koncentrace dosahuje 100 ppm, může dojít k úmrtí člověka již po jedno minutové expozici. Žlutá zóna (viz Obrázek 58) dosahuje do vzdálenosti 3,6 km a široká je téměř 4 kilometry. Koncentrace chloru 1 000 ppm již představuje koncentraci, která bezprostředně způsobuje smrt člověka. Stačí tedy jen pouhý okamžik, tj. jedno nadechnutí, a člověk okamžitě umírá [21, 106]. Tato zóna je na obrázcích vyznačena oranžově a dosahuje do vzdálenosti 1,4 km od místa úniku. Třetí zónou pak byla oblast, kde koncentrace chloru mohly přesahovat hodnotu 10 000 ppm. To je koncentrace, při které oblak těžkého plynu ještě není naředěn natolik, aby se mohl rozptylovat pasivním způsobem (podle Gausovského modelu). Při této koncentraci se tedy oblak chová jako těžký plyn a současně je ještě vizuálně dobře pozorovatelný [10]. Níže jsou tyto zóny promítnuty do mapového podkladu za využití aplikace Google Earth (viz Obrázek 58 a Obrázek 59).



Obrázek 58 Zóny zranitelnosti vynesené na mapový podklad Google Earth [46]



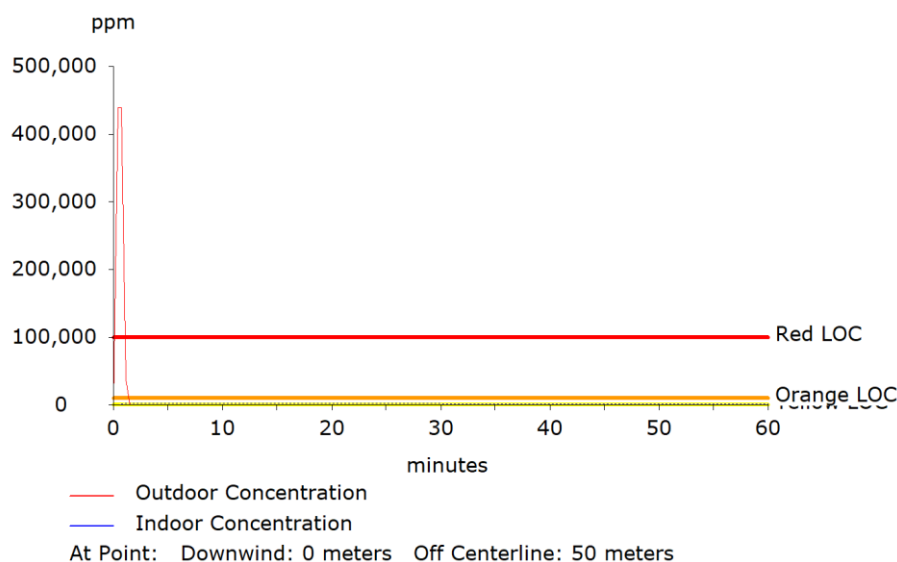
Obrázek 59: Detailní pohled na červenou a oranžovou zónu zranitelnosti [46]

Obrázek 58 zřetelně ukazuje, že oblak plynného chloru o koncentraci 50 ppm se postupně rozšířil přes celý přístav. Lidé vystavení účinkům šířícího se chloru v této oblasti již byli bezprostředně ohroženi na životě, a to i při krátké expozici (cca desítky sekund), neboť žlutá zóna představuje oblast, kde se koncentrace mohly pohybovat v rozmezí 50 až 1 000 ppm. V červené a v oranžové zóně (viz Obrázek 59) pak neměl šanci na přežití nikdo, kdo by byl, byť na krátký moment, plynným chlorem zasažen. S ohledem na množství lidí, kteří se v přístavu nacházeli, tak lze hovořit o obrovském štěstí ba až zázraku, že si takto závažná a rozsáhlá nehoda vyžádala „jen“ 13 životů. Na druhou stranu tyto informace mohou vyvolávat oprávněnou otázku, nakolik jsou výsledky z provedené modelace správné, respektive realistické.

Zajímavý pohled nicméně podává výpočet dosahu koncentrace plynného chloru 10 000 ppm. V tomto případě výsledek do značné míry koresponduje s realitou, neboť podle záznamů z videokamer se viditelný oblak chloru rozšířil přibližně do vzdálenosti 200 až 300 metrů od místa úniku. Je ale potřeba zdůraznit, že část uniklého chloru se rozlila nad vodní hladinu mezi přístavními moly, neboť se jednalo o níže položené místo. Oblak postupující přístavem se ale šířil ve směru proti svažitému a hustě zastavěnému terénu, což postup ve směru vanutí větru značně omezovalo. Proto měl oblak tendenci spíše se rozlévat do stran, tj. podél vrstevnice, nežli postupovat vpřed, směrem do vnitrozemí. Tento charakter rozptylu nicméně program ALOHA s jistou mírou nejistoty i predikoval, jak je ostatně patrné z vykreslených konfidenčních linií. V tomto prostoru program apriori nevyloučil možný výskyt oblaku těžkého plynu, vzhledem k zadaným vstupním parametrům.

Pomocí provedeného modelování bylo možné zjistit také to, jak vysoké koncentrace chloru se vyskytovaly v místech, kde se v daný okamžik pohybovali

přístavní dělníci. Podle záznamů z videokamer totiž tito lidé panicky prchali před šířícím se oblakem chloru a bylo tedy zřejmé, že ještě nebyli zasaženi vysokými koncentracemi chloru (1 000 ppm a více). Podle měřítka použité mapy bylo možné odhadnout, že se jednalo o vzdálenost cca 50 metrů od lodi a za využití funkce "Treat At Point" pak bylo možné spočítat koncentraci chloru. Výsledky ukázaly, že v této vzdálenosti dosahovaly koncentrace chloru ve svém maximu až nepředstavitelných 450 000 ppm. Čelo oblaku zde dorazilo v řádu jednotek sekund po úniku, jak to ostatně dokládají i analyzované videozáznamy. Takto vysoká koncentrace je pochopitelně pro nechráněného člověka smrtelná. Zdá se tedy, že tito lidé měli obrovské štěstí, neboť před šířícím se oblakem chloru dokázali uniknout. Jelikož ale není znám osud těchto lidí, jen těžko lze usuzovat, zda nakonec přežili, případně s jakými následky. Je totiž nepravděpodobné, že by nebyli chlorem zasaženi vůbec. Dle dostupných videozáznamů je zřejmé, že se oblak chloru šířil velmi rychle a přinejmenším až do vzdálenosti cca 1 km dosahovaly jeho koncentrace hodnot, které nebyly slučitelné se životem.



Obrázek 60: Průběh koncentrace chloru ve vzdálenosti 50 metrů od místa úniku, kolmo na směr vanutí větru [zdroj vlastní]

Dílčí závěr

Provedená modelace prokázala, že software ALOHA skutečně poskytuje velmi validní výsledky, které se shodují s realitou. Nezbytnou podmínkou úspěšného modelování je ale pečlivá příprava, zejména pak zadání vstupních údajů. Neméně důležité je také „použití rozumu a důvtipu“ při následném fitování. Účelem fitování je totiž nalézt takové optimální hodnoty vybraných modelovaných parametrů, aby se výsledek výpočtu nejlépe shodoval s reálnými hodnotami. V případě modelování masivních úniků toxických látek se fitování provádí tak, že se snažíme nalézt takové parametry emisního zdroje, aby výsledek výpočtu odpovídal údajům o skutečném dosahu zraňujících koncentrací dané toxické látky. Tento přístup byl aplikován také při zpracování této případové studie, což vede k závěru, že jej lze použít k modelování virtuálního zdroje, aniž by došlo k výraznějšímu zkreslení získaných výsledků.

Z vlastní modelace vyplynula také další zjištění s praktickým významem. Předně koncentrace chloru na úrovni 1 000 ppm, která již při expozici několika minut může způsobit smrt zasaženého člověka, měla dle výpočtu dosáhnout až do vzdálenosti 1,4 km, což se ale neshodovalo s poznatkami o usmrčených lidech v přístavu. Podle dostupných zpráv bezprostředně při nehodě zemřelo "jen" 13 lidí, což se s ohledem na rozsah a průběh události jeví jako těžko uvěřitelné. Pokud by se tato skutečnost zakládala na pravdě, pak z ní lze dovozovat, že při nehodách, kdy dochází ke vzniku oblaků těžkých plynů tvořených toxickými látkami, jakými jsou chlor, amoniak, methyloxyanát apod., se mnohem výrazněji uplatňují mechanismy, které snižují dosah zranitelných koncentrací, než se všeobecně předpokládá. Na tuto možnost do značné míry již dříve poukázal například Hanna a kol. (např. viz [43, 47, 58] aj.), když komentoval naměřená data o dosahu koncentrací chloru při terénních experimentech Jack Rabbit II. Nejčastěji je to přičítáno směrovosti úniku,

kdy se kompaktní oblaky těžkých plynů šíří do vymezené části prostoru a nikoli do celé předpokládané výseče a také uplatnění suché depozice a impakce aerosolových částic tvořících podstatnou část těchto oblaků na vertikálních površích překážek (objekty, vzrostlá vegetace), případně i na zemském povrchu (přízemní vrstvě půdy či rostlinného pokryvu). V některých případech, jako například při šíření oblaků vysoce urbanizovaným prostředím, se mohou uplatňovat kanálové větry nebo bariérový účinek objektů, což šíření oblaku zbrzdí a poskytne lidem čas pro únik do bezpečí.

4.4 Experiment

Jak již bylo uvedeno v kap. 4.1.2, pro úspěšné splnění cílů této disertační práce bylo nezbytné provést také praktické ověření předpokládaného chování oblaku těžkého plynu v zájmové lokalitě. Za tímto účelem jsem navrhl a provedl laboratorní experiment, při kterém byl simulován havarijní únik chloru a jeho následné šíření vysoce urbanizovaným prostředím. Experiment byl založen na použití fyzického modelu, jež byl věrnou kopií zájmové lokality ve zmenšeném měřítku, a simulantu předpokládaného emisního zdroje, tj. reálného průmyslového zásobníku.

4.4.1 Popis zájmové lokality

Zájmovou lokalitou pro tuto disertační práci byl chemický závod firmy Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a.s. (dále jen SPOLCHEMIE), který se nachází v krajském městě Ústí nad Labem. Hranice výrobního areálu SPOLCHEMIE je již historicky situována cca 500 metrů od samotného centra města v nadmořské výšce 160 až 200 metrů. V jeho bezprostředním okolí postupně vyrostly obytné čtvrti jako například Předlice, Ovčí vrch nebo Klíše, kde je velké osídlení obyvatel. V těsné

blízkosti areálu protéká Klíšský potok, který se následně po 300 metrech vlévá do řeky Bíliny, která ústí za dalších 1 000 metrů do řeky Labe. V jižním směru se v těsné blízkosti podniku nachází nádraží Ústí nad Labem – západ, které slouží také jako seřadiště nákladních vlaků. V bezprostřední blízkosti severní hranice areálu je umístěn kampus Univerzity Jana Evangelisty Purkyně (dále jen UJEP) a hypermarket Kaufland. Provoz chlorové chemie, ve kterém je umístěno pět zásobníků pro uskladnění kapalného chloru, se nachází ve výšce 152 m n. m. Areál UJEP se nachází ve výšce 172 m n. m. Převýšení od skladu chloru k objektu UJEP činí 20 metrů. Vzdálenost mezi skladem chloru a areálem UJEP činí vzdušnou čarou 680 metrů. Přehled o místní situaci a rozložení zmíněných míst v zájmové lokalitě podávají Obrázek 61 až Obrázek 63.



Obrázek 61 Celkový pohled na umístění jednotlivých zájmových objektů – letecký snímek. [118]

Vysvětlivky k Obrázku 61:

- 1 – sklad kapalného chloru
- 2 – centrum města Ústí nad Labem
- 3 – nádraží Ústí nad Labem – západ

- 4 – kampus Univerzity Jana Evangelisty Purkyně
- 5 – hypermarket Kaufland
- 6 – řeka Labe



Obrázek 62 Kolejiště u stáček místo chloru (pohled východním směrem) [zdroj vlastní]



Obrázek 63 Stěna lemující objekty Chlorové chemie od západu a severu [zdroj vlastní]

SPOLCHEMIE je v současnosti jediným výrobcem chloru v České republice, neboť konkurenční SPOLANA s.r.o. Neratovice svou výrobu chloru ukončila v listopadu 2017. SPOLCHEMIE a její provozy jsou na základě množství skladovaných a zpracovávaných nebezpečných chemických látek zařazeny do kategorie B dle zákona č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií [87].

Chlor se vyrábí speciální membránovou elektrolýzou, jejímiž produkty jsou hydroxid sodný a hydroxid draselný (vznikají souběžně v kapalně fázi), vodík a plyný chlor. Ten chemička dále zpracovává ve výrobních provozech chlorové chemie na další produkty (např. kyselina chlorovodíková, perchloretylen, allylchlorid a epichlorhydrin) [107]. Plyný chlor je z provozu elektrolýzy přiváděn do sušiček a následně je potrubím veden do výroby kapalného chloru, kde se komprimuje a část se zpracovává v návazných provozech. Zbývající chlor se následně zkapalňuje při tlaku 0,28 MPa a stéká do zásobníků, odkud je stlačeným vzduchem čerpán do skladovacích zásobníků umístěných v přízemí skladového objektu. Chlor se skladuje v kapalném stavu v pěti cylindrických zásobnících 3x 65 tun (viz Obrázek 64) a 2x 55 tun (viz Obrázek 65) a dále v železničních cisternách (používají se cisterny o objemu 40 m³ pro 44 tun kapalného chloru, resp. o objemu 53 m³ pro 66 tun kapalného chloru). Z největších zásobníků je vždy minimálně jeden udržován prázdný jako bezpečnostní rezerva. Plnění železničních cisteren se provádí na třech stáčecích pozicích, a to pomocí tlakového sušeného vzduchu ze zásobníků kapalného chloru přes pneumatické rychlouzavírací dálkově ovládané ventily. Takto naplněná cisterna je připravená k transportu po vlečce v areálu podniku a převzata některým z přepravců, kteří ji přepravují po železnici ke koncovému zákazníkovi [87, 88].



Obrázek 64 Tři zásobníky se skladovací kapacitou 65 tun kapalného chloru [zdroj vlastní].



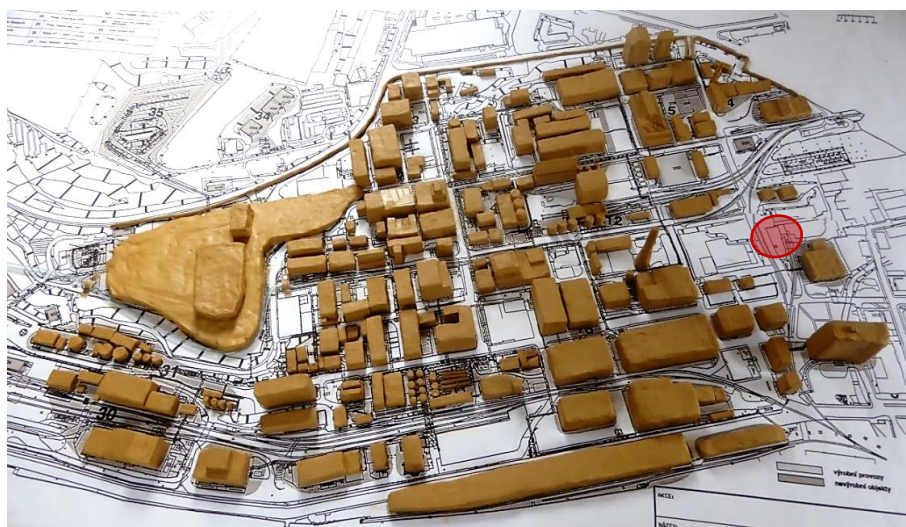
Obrázek 65 Dva zásobníky se skladovací kapacitou 55 tun kapalného chloru [zdroj vlastní].

4.4.2 Simulace úniku chloru

Pro potvrzení předpokládaného chování těžkého plynu v zájmové lokalitě byl proveden praktický experiment za využití fyzického modelu areálu SPOLCHEMIE. Model byl vyroben ze dřeva a modelovací hmoty v měřítku 1 : 650. Jednotlivé stavební objekty byly provedeny v jednoduchých geometrických tvarech bez detailů (viz Obrázek 67 až Obrázek 70). Aby svými rozměry a rozmístěním v prostoru odpovídaly realitě, bylo nutné použít mapový podklad areálu SPOLCHEMIE a 3D letecké pohledy (viz Obrázek 66). Model zohledňoval také svažitost terénu, aby bylo možné simulovat účinek gravitace na tečení oblaku těžkého plynu (Obrázek 68).



Obrázek 66 3D letecký snímek areálu SPOLCHEMIE [mapy.cz]



Obrázek 67 Fyzický 3D model areálu SPOLCHEMIE – pohled shora [zdroj vlastní]



Obrázek 68 Fyzický 3D model areálu SPOLCHEMIE – pohled západo-východním směrem z profilu [zdroj vlastní]



Obrázek 69 Fyzický 3D model areálu SPOLCHEMIE – pohled severo-jihním směrem [zdroj vlastní]



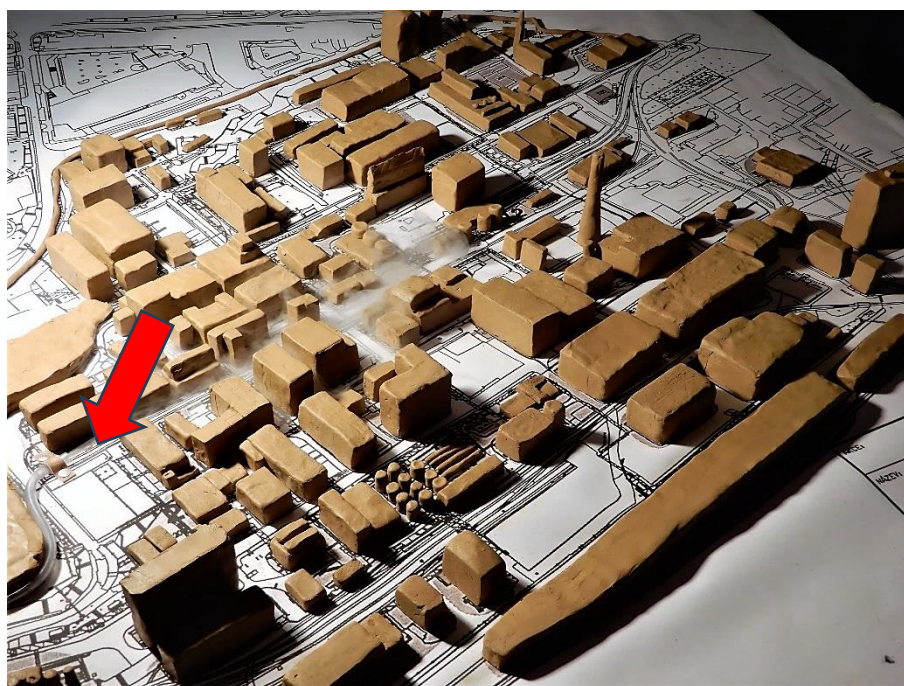
Obrázek 70 Fyzický 3D model areálu SPOLCHEMIE – pohled východo-západním směrem [zdroj vlastní]

Oblak těžkého plynu byl simulován pomocí aerosolového stopovače. Původní úvaha o použití oxidu uhličitého se neukázala jako vhodná, neboť CO_2 ze zásobní lahve unikal příliš vysokou rychlostí, kterou nebylo možné jakkoli regulovat. Design experimentu proto bylo nutné upravit tak, aby bylo možné použít jiný emisní zdroj. Inspiraci pro potřebné úpravy bylo nutné čerpat z odborných zdrojů [109]. Nakonec byl zvolen vaporizér a vybrán přístroj Arizer XQ2, který umožňuje emitovat aerosol z 1,2-propylenglykolu a vody v rozmezí teplot od $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přístroj lze ovládat dálkovým ovládačem (Obrázek 71). Jeho další výhodou je, že na jeho hlavici lze připevnit hadičku. Ta byla následně implementována do modelu a zafixována před budovou skladu chloru, tj. v místě předpokládaného úniku chloru. Vaporizér byl použit s nastavením různých teplot, přičemž nejvyšší emisní výkon poskytoval při teplotě $500\text{ }^{\circ}\text{F}$ (tj. $260\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Obrázek 71 Vaporizér Arizer XQ2 [121]

Tímto způsobem byl simulován masivní únik chloru z uvažovaného emisního zdroje (tj. některý z pěti zásobníků obsahujících 55 tun, resp. 65 tun chloru), nacházejícího se v objektu skladu chloru. Průběh šíření aerosolu mezi jednotlivými továrními objekty byl monitorován pomocí videokamery a taktéž byly pořizovány fotografie z různých míst a v různém detailu (viz obrázky níže).



Obrázek 72 Umístění emisního zdroje [zdroj vlastní]



Obrázek 73 Simulovaná emise [zdroj vlastní]

Pro simulaci větrného proudění v zájmové lokalitě byl použit malý stojanový ventilátor s možností regulace otáček, který byl umístěný v dostatečné vzdálenosti od modelu, aby bylo větrné proudění co nejvíce laminární.

Jak dokládá Obrázek 74, provedený experiment prokázal, že oblak těžkého plynu se i v tomto malém měřítku choval dle předpokladů. Šířil se mezi jednotlivými stavebními objekty způsobem, jako by se jednalo o tečení kapaliny. Oblak postupně stékal do níže položených míst, avšak netekl do výše položených partií lokality (tj. v severním směru). Fotografie zachycují také viditelné nehomogenity v podobě kalmů a úplavů okolo jednotlivých objektů nebo přetékaní nižších objektů.

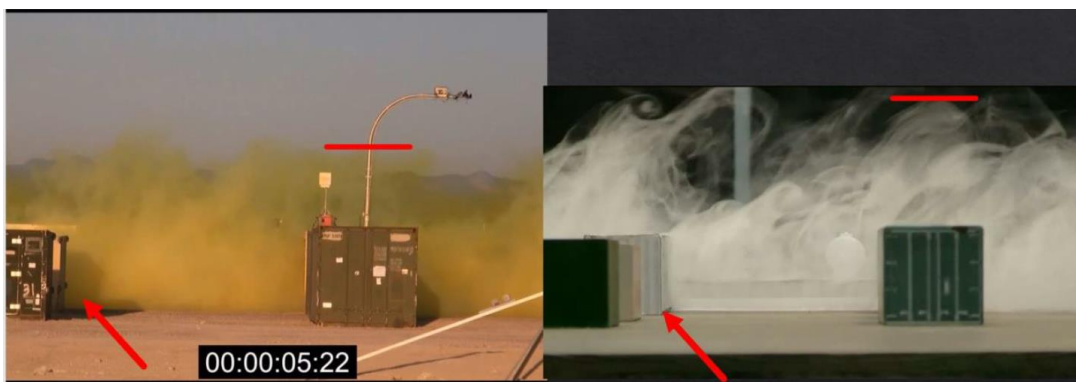


Obrázek 74 Šíření aerosolu mezi továrními objekty v modelu areálu SPOLCHEMIE [zdroj vlastní]

Podobnou simulaci za využití zmenšeného 3D modelu (v měřítku 1: 50) provedla také Williams v roce 2019 University of Arkansas v rámci své diplomové práce na katedře chemického inženýrství. Její experiment byl proveden v podobném uspořádání jako v tomto případě a jeho účelem bylo simulovat šíření chloru během terénních experimentů č. 3, 4 a 5 provedených v rámci projektu Jack Rabbit II mezi 83 lodními kontejnery CONEX. Jako stopovač Williams použila také aerosol vytvořený ze směsi 1,2-propylenglykolu a vody, a to generovaný mlhovačem Virhuck 400W Fog Machine. Její výsledky jednoznačně prokázaly, že takto provedený experiment dokáže věrohodně simulovat únik a šíření oblaku těžkého plynu tvořeného chlorem (viz Obrázek 75 a Obrázek 76). Z uvedeného tak plyne dílčí závěr, že experiment, který jsem provedl, byl vhodně navržen a jeho výsledky lze použít jako východisko pro návrh modelu virtuálního zdroje.



Obrázek 75 Ověření šíření chloru v urbanizovaném prostředí pomocí laboratorního experimentu za využití netoxického stopovače [74,109]



Obrázek 76 Detailní pohled na turbulentní proudění při šíření oblaku aerosolu mezi kontejnery [109]

5 VÝSLEDKY

5.1 Predikce šíření chloru v zájmové lokalitě

Provedený experiment ukázal, jakým způsobem se pravděpodobně bude v zájmové lokalitě areálu SPOLCHEMIE šířit oblak těžkého plynu tvořeného chlorem unikajícím ze skladu kapalného chloru. Na základě pečlivé observace postupného roztékání stopovače mezi jednotlivými objekty byly následně do mapového podkladu pomocí metody „tužka-papír“ zaznamenány směry toků jednotlivých proudů. V místech, kde docházelo k rozdělování proudů na dva nebo tři, byl expertním odhadem určen poměr rozdělení hmoty tekoucího oblaku. Poté byla provedena vizualizace distribuce těžkého plynu v prostoru mezi jednotlivými stavebními objekty (Obrázek 77). Pro lepší názornost bylo použito dvou barev – červená barva uvádí zónu, kde se předpokládá výskyt hustého kompaktního oblaku tvořeného směsí kapiček a nasycených par chloru, který bude mít viditelně ohraničený kupovitý vzhled (viz Obrázek 33). V této relativně malé zóně bude docházet k divokému víření oblaku, přičemž ředění oblaku vstupujícím vzduchem bude minimální. Naproti tomu oranžová barva zahrnuje zónu, do které se oblak chloru pozvolna rozteče, jeho pohyb se třením o povrch a překážky postupně zpomalí a oblak se začne ředit vzduchem a homogenizovat se. V těchto místech bude mít vzhled mlžného závoje (viz Obrázek 36).

Díky převažujícímu větru, který zde nejčastěji vane od západu až jihozápadu, bude dominantní směr šíření jednotlivých proudů směrem k východu. V tomto směru jsou také orientovány hlavní komunikace, které budou působit jako uliční kaňony (viz Obrázek 70). Jednotlivé proudy se budou postupně stékat, čímž vznikne pět hlavních toků (označených A-B-C-D-E), které budou tvořit celkovou dotaci látky do virtuálního zdroje. Jakmile tyto proudy směřující východním

směrem dotečou až k ploše vyznačené na mapě červeným obdélníkem, rozšíří se do prostoru a jeho další postup v původním dominantním směru se prakticky zastaví. Zde se nachází volná plocha, v jejímž středu bude dále uvažováno umístění virtuálního zdroje (Obrázek 78). Naproti tomu proudy šířící se jižním směrem postupně dotečou až k seřadišti vagónů, resp. až k hranici areálu, která je tvořena dvou metrovým betonovým plotem. Prostor seřadiště a plochy za ní jsou ale uzavřeny ze tří stran, takže dle principů mechaniky tekutin lze předpokládat, že oblak chloru se zde bude postupně hromadit a vytvářet lagunu, podobně jako tomu bylo při nehodě ve Festusu (viz Obrázek 21).



Obrázek 77 Vizualizace předpokládaného šíření oblaku chloru mezi objekty v areálu SPOLCHEMIE
[zdroj vlastní]



Obrázek 78 Lokalizace virtuálního zdroje [zdroj vlastní]

V další fázi rozptylu se již začne podstatným způsobem uplatňovat účinek větru, který v případě vanutí z jižních směrů, může oblak unášet severně ve směru k univerzitnímu kampusu UJEP. Na základě poznatků z testů Jack Rabbit II se dá předpokládat, že zde již bude oblak natolik naředěný, že nebude vizuálně pozorovatelný, případně bude mít vzhled lehce nažloutlého závoje. I přes to se ale bude v ovzduší vyskytovat životu nebezpečná koncentrace chloru (v řádu jednotek tisíc ppm). S postupným rozptylem se ale bude rychle snižovat.

5.2 Parametrizace virtuálního zdroje

Lokalizace virtuálního zdroje je nezbytným předpokladem pro jeho parametrizaci, a ta zase pro jeho následné modelování za využití zvoleného softwarového nástroje. Modelovat rozptyl vybraného polutantu z virtuálního zdroje lze spolehlivě pouze za předpokladu, že se virtuální zdroj nachází na dostatečně velkém prostranství mimo silně urbanizované prostředí nebo vzrostlou vegetaci. Je totiž nezbytné, aby rozptyl polutantu nebyl příliš ovlivněn turbulentním promícháváním, respektive, aby probíhal v prostoru s laminárním polem proudění.

5.2.1 Stanovení emisní síly virtuálního zdroje

Základním parametrem virtuálního zdroje je jeho emisní síla. Z pohledu standardního numerického modelování se jedná o průměrnou hodnotu hmotnostní rychlosti úniku během předpokládané doby úniku. Stanovení emisní síly proto vyžaduje odhadnout celkové množství látky, která do virtuálního zdroje vstupuje a celkovou dobu trvání tohoto děje. Množství látky, které do virtuálního zdroje vstupuje za jednotku času, pak musí odpovídat množství látky, které z něj vystupuje, resp. se rozptyluje do atmosféry. Určení emisní síly zdroje, který je

předmětem tohoto modelování, tak vyžaduje provedení výpočtu příspěvků jednotlivých proudů napříč všemi předpokládanými trajektoriemi (viz Obrázek 77).

Proudy se v některých místech rozdělují, jinde se zase stékají. Při znalosti místních podmínek a vedených pohovorů se zaměstnanci podniku, lze dospět k závěru, že dotaci virtuálního zdroje, který je umístěn na volném prostranství (viz červený bod), bude tvořit pět hlavních proudů (A až E). Postupnými výpočty metodou tužka-papír lze dovodit, že proud A bude tvořit 0,295-násobek emise z primárního zdroje, proud B bude tvořit 0,155-násobek, proud C bude tvořit 0,125-násobek, proud D bude tvořit 0,105-násobek a proud E bude tvořit 0,085-násobek. Celkem tak do místa virtuálního zdroje doteče 0,765-násobek celkového množství uniklého z primárního zdroje (tj. 76,5 % celkového množství uniklého ze zásobníku chloru umístěného v objektu skladu).

Počítat proudy chloru v jednotlivých větvích metodou tužka-papír je značně komplikované a zdlouhavé, neboť míst větvení jednotlivých proudů je v daném areálu značné množství. A proto je jednodušší spočítat proudění pouze těmi větvemi, kterými se chlor bude dostávat mimo zájmovou oblast. Celková dotace látky do virtuálního zdroje pak bude dána rozdílem množství chloru uniklého ze zásobníku a tohoto spočítaného množství chloru. Zbývající množství chloru, které do virtuálního zdroje „nedoteče“, tak de facto představuje úbytek chloru vzniklý v důsledku působení topografického efektu.

Výsledná dotace virtuálního zdroje může být negativně ovlivněna také účinkem suché depozice. Případně se může uplatnit mokrá depozice v případě, že by byl aktivován systém havarijního skrápění pomocí sprinklerů nebo vodní clony. Odhad úbytku chloru účinkem suché depozice vychází z předpokladu, že se oblak těžkého plynu bude do prostoru šířit rychlostí 3 m.s^{-1} a převažující velikost aerosolových částic uvnitř oblaku bude cca $50 \text{ }\mu\text{m}$. Pro tento případ pak lze odhadnout hodnotu

Stokesova čísla na $St \cong 0,9$ [110] (viz Obrázek 476). Příspěvek impakce pro tuto hodnotu činí cca 25 %. Pro takto velké částice je depoziční rychlost pro gravitační usazování a pro impakci přibližně stejná (viz Obrázek 47), z čehož lze dovodit, že příspěvek sedimentace k celkové suché depozici bude taktéž přibližně na úrovni 25 %. Uvedené hodnoty se poměrně dobře shodují i s odhady publikovanými v dostupných zdrojích, kdy se uvádí, že účinnost suché depozice v případě chloru dosahuje cca 30 až 50 % [42, 65] v závislosti na rychlosti větru, drsnosti povrchu a poréznosti překážek. Velmi porézní překážky, jakými jsou například pásy vzrostlých stromů, mohou mít účinnost suché depozice až 95 % [104], což ale není tento případ. Podobně vysoký účinek ovšem může mít mokrá depozice. Skrápění pomocí sprinklerů či za použití vodní mlhy má účinnost mezi 25 % a 90 % [66], a to v závislosti na velikosti rozprašovaných kapiček vody, vzdálenosti mezi skrápěcími hlavicemi, množství rozstříkované vody, rychlosti větru apod. Uplatnění mokré depozice ale v tomto případě není uvažováno.

Při konzervativním přístupu tedy lze v daném případě uvažovat celkovou účinnost depozice ve výši 50 %. Z toho lze následně spočítat, že parciální množství chloru, které bude tvořit dotaci virtuálního zdroje, bude činit $0,765 \times 0,5 = 0,3825$ -násobek celkového uniklého množství. Tímto koeficientem tedy bude nutné vynásobit také předpokládanou hmotnostní rychlost úniku chloru z primárního zdroje.

Tu lze zjistit pomocí modelování úniku chloru z primárního zdroje za použití vybraného počítačového programu ALOHA 5.4.7. Vlastní modelování bylo provedeno pro nepříznivé rozptylové podmínky, tj. zimní den před východem slunce, s teplotou vzduchu 0 °C, rychlostí větru 1 m.s⁻¹, relativní vlhkostí vzduchu 90 %, třídou stability atmosféry D a zcela zataženou oblohou. Tento tzv. **nulový scénář** (označený jako Scénář 0.1) předpokládá únik veškerého uskladněného chloru

Z provedeného výpočtu Scénáře 0.1 vyplývá, že chlor bude z primárního zdroje unikat rychlostí $6\,450\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$. Do virtuálního zdroje ale bude přitékat chloru méně. Hmotnostní rychlost jeho dotace bude činit $6\,450 \times 0,3825 \approx 2\,467\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$. Stejným způsobem je nutné redukovat také celkové množství uniklého chloru, tedy množství, které bude tvořit celkovou dotaci virtuálního zdroje (tj. $65\,000 \times 0,3825 \approx 24\,863\text{ kg}$).



5.2.2 Stanovení parametrů virtuálního zdroje pomocí iterace

Pro účely modelování musí být přítok chloru do virtuálního zdroje a jeho únik do volné atmosféry kontinuálním procesem. Ve virtuálním zdroji se totiž žádná látka nezadržuje, neukládá ani netransformuje na látku jinou. Virtuální zdroj je tak určitou analogií vysavače, do kterého nasávací hubicí proudí vzduch a výfukem z něj zase tentýž vzduch vychází. Jediný rozdíl je pouze v parametrech vstupního a výstupního proudu.

Vrátíme-li se tedy k řešenému problému, pak do místa, kde je zvažováno umístění virtuálního zdroje, bude chlor přitékat již naředěný, a to z pěti směrů označených jako proudy A-B-C-D-E (viz Obrázek 77). Samotné umístění virtuálního zdroje je situováno přibližně do geometrického středu volného prostoru mezi nízkými jednopodlažními stavebními objekty. Virtuální zdroj se nachází cca 470 metrů vzdušnou čarou východně od primárního zdroje (sklad chloru). Teprve až od tohoto místa lze smysluplně a s podstatnou mírou spolehlivosti modelovat rozptyl chloru za využití vybraného softwarového nástroje.

V této fázi řešení je klíčové definovat parametry virtuálního zdroje, tj. vstupní a okrajové podmínky. Ty musí nejen věrohodně popisovat ono imaginární zařízení, z něhož chlor hypoteticky uniká, ale také skutečné charakteristiky oblaku chloru, které lze v daném místě předpokládat na základě empirických znalostí o jeho chování. Parametrizace virtuálního zdroje se provádí za využití iterace.

S ohledem na vlastnosti virtuálního zdroje lze uvažovat pouze dvě hypoteticky možné a fyzikálně realistické varianty geometrie virtuálního zdroje:

- a) Kulový zásobník obsahující plyný chlor, který uniká kruhovitým otvorem.
- b) Kaluž kapalného chloru, ze které se chlor uvolňuje do ovzduší.

Ačkoli variantu kontinuálního plošného zdroje z odpařující se kaluže použili pro simulaci průběhu rozptylu chloru také Hanna a kol. [48], v rámci této disertační práce byly stanoveny parametry pro obě uvažované geometrie. Za využití iterace byly stanoveny rozměry uvedených virtuálních zdrojů, přičemž v případě varianty a) bylo nutné najít optimální kombinaci poloměru kulového zásobníku a velikosti únikového otvoru (průměr ruptury kruhového tvaru) a v případě varianty b) bylo nutné najít poloměr louže kapalného chloru. V obou případech pak bylo podmínkou, aby emisní síla virtuálních zdrojů na začátku úniku byla přibližně $2\,467\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ a celkové množství chloru uniklého do ovzduší bylo přibližně $24\,863\text{ kg}$. Výsledné parametry uvádí Tabulka 10.

5.3 Modelování vybraných scénářů

Pro obě varianty uvažovaných geometrií virtuálního zdroje bylo modelování rozptylu chloru provedeno pro dvě uvažované rychlosti větru $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a za meteorologických podmínek uvedených v Tabulka 9:

Tabulka 9 Uvažované meteorologické podmínky pro modelování vybraných scénářů

Teplota vzduchu:	0 °C
Relativní vlhkost vzduchu:	90 %
Stupeň pokrytí oblohy mraky:	Zataženo (10/10)
Třída stability atmosféry:	D
Výskyt inverze:	NE
Drsnost povrchu (z_0):	100 cm

Celková doba úniku chloru se v jednotlivých případech lišila, nicméně základním předpokladem bylo, že po celou dobu úniku bude konstantní. Dlužno uvést, že doby úniků uváděné v Tabulka 10 nemají žádný praktický význam, neboť jsou pouze výsledkem provedené iterace.

Modelováním úniku chloru za výše uvedených podmínek (z virtuálního zdroje) byl následně vypočítán dosah koncentrace 500 ppm (letální koncentrace při okamžité expozici) a dosah koncentrace 20 ppm (koncentrace potenciálně ohrožující život při expozici 60 minut). Současně byl proveden výpočet koncentrace chloru ve dvou zájmových bodech, které byly odvozeny z mapových podkladů zájmové lokality. Jedná se o místa, kde by v případě havarijního úniku chloru z areálu SPOLCHEMIE mohlo docházet k ohrožení (nechráněného) obyvatelstva. Prvním bodem bylo nejbližší místo hranice areálu SPOLCHEMIE od virtuálního zdroje (bod A) a druhým bodem pak parkoviště kampusu UJEP (bod B) (viz Obrázek 80). Výsledky provedeného modelování uvádí Tabulka 10.



Obrázek 80 Určení vzdálenosti zájmových bodů a jejich převýšení od místa virtuálního zdroje [zdroj vlastní]

Tabulka 10 Výsledky modelování virtuálního zdroje

Označení scénáře	Geometrie virtuálního zdroje	Skutečně uniklé množství chloru [kg]	Maximální rychlost úniku ze zdroje [kg.min ⁻¹]	Doba úniku [min]	Rychlost větru [m.s ⁻¹]	Dosah 500 ppm [m]	Dosah 20 ppm [m]	Koncentrace chloru [ppm]	
								Na hranici areálu (bod A)	Na parkovišti kampusu UJEP (bod B)
0.1	cylindrický zásobník (primární zdroj)	58 967	6 450	10	1	1 600	5 100	55 800	16 300
0.3		58 967	6 450	10	3	1 100	7 200	6 700	2 770
2.1	kulový zásobník o průměru 18 m	24 957	2 470	20	1	1 000	4 200	13 600	4 620
2.3		24 957	2 470	20	3	765	5 300	2 890	1 330
3.1	kaluž 635 m ²	24 857	2 470	50	1	649	3 200	7 290	1 730
3.3	kaluž 585 m ²	24 857	2 460	38	3	669	3 700	2 750	1 220

Poznámka:

- Výstupy z programu ALOHA pro jednotlivé scénáře jsou uvedeny v Přílohách.
- Ve výstupech z programu ALOHA čárky u jednotlivých hodnot vyjadřují řád 10³; tečky značí desetinnou čárku.

5.4 Parametrizace faktorů snižujících koncentraci chloru v oblaku

Jak již bylo popsáno v kapitole 4.2, rozptyl oblaku těžkého plynu významně ovlivňují nejrozličnější vnější okolnosti. Těmi hlavními jsou především topografie terénu, bariéry a překážky a v neposlední řadě také depozice. Některé z těchto vlivů je nutné uvažovat také při modelování rozptylu těžkého plynu z virtuálního zdroje, neboť výsledná koncentrace dané chemické látky v zájmovém bodě může být díky tomu významně nižší, než jak standardně predikují výpočtové modely.

Bariéry mění charakter rozptylu oblaku těžkého plynu v blízkém poli tak, že blokují jeho postup (např. stavební objekty, vegetace), snižují rychlost jeho šíření a také umožňují jeho ředění okolním vzduchem. Účinek depozice pak může být v principu dvojitý. Suchá depozice neboli impakce je jev, kdy se část aerosolových částic obsažených v oblaku zachytí na vertikálně nebo horizontálně orientovaných površích. Zde se může deponovat trvale (např. dochází k chemické reakci s materiálem, na němž se zachytí), anebo dočasně (dochází k následnému odpaření kapalné fáze zachycené látky do ovzduší). Mokrý depozice pak může nastávat při dešti, mlze nebo použití systému zkrápění vodní mlhou.

Chlor je ve vodě dobře rozpustný za vzniku směsi kyseliny chlorovodíkové a kyseliny chlorné. Tuto reakci lze popsat následovně:



Tato směs reaguje s kovovými materiály za tvorby korozivních produktů v podobě chloridů. Podobně reaguje také s organickou hmotou (např. vegetace), kdy dochází k chloračním reakcím. Skrápění oblaku tak umožňuje poměrně výrazně snížit koncentrace chloru v ovzduší.

Poslední z dříve zmiňovaných účinků, a to topografický efekt, nemá při modelování rozptylu z virtuálního zdroje smysl uvažovat, neboť fáze tečení těžkého plynu již nenastává.

Aby byl výsledný výpočet dosahu zraňujících koncentrací chloru unikajícího z virtuálního zdroje co nejpřesnější, je nutné do něj zohlednit právě i výše uvedené faktory prostředí. Kromě vlivu prostředí je nutné zohlednit také systematickou chybu výpočtu rozptylu těžkého plynu v blízkém poli, kterou je zatížena většina modelovacích nástrojů. Těžký plyn se v silně urbanizovaném prostoru šíří velmi komplikovaně a standardní modelovací nástroje ho dokážou simulovat jen přibližně [20]. Na základě provedených srovnávacích studií se tato systematická chyba výpočtu odhaduje na 20 % až 40 % [42, 69]. Oč je rychlost větru nižší, tím je tato chyba větší.

Všechny výše uvedené vlivy lze kvantifikovat pomocí korekčních koeficientů, které jsem navrhnul na základě vyhodnocení získaných odborných poznatků a po konzultaci se školitelem a školitelem-specialistou (na základě brainstormingu). Korekční koeficienty jsou navrženy pro oblast blízkého pole. Výsledek shrnuje Tabulka 11.

Tabulka 11 Návrh korekčních koeficientů popisujících vliv faktorů prostředí

Rychlost větru	Korekční koeficient		
	E	I	D
1 m.s ⁻¹	0,60	0,50 – 0,80	0,40 – 0,60
3 m.s ⁻¹	0,70	0,60 – 0,90	0,50 – 0,70
6 m.s ⁻¹	0,80	0,70 – 0,95	0,60 – 0,80

Vysvětlivky k Tabulce 11:

- E (error) = vliv systematické chyby výpočtu při modelování rozptylu v blízkém poli
- I (impaction) = vliv impakce aerosolových částic na porézních překážkách a vegetaci
- D (deposition) = vliv mokré depozice (skrácení oblaku vodní mlhou)

6 DISKUZE

Diskusi k tak obsáhlému tématu, jakým modelování úniku chloru v reálné atmosféře je, jsem pro přehlednost rozdělil do tří okruhů:

1. Diskuse k dílčím teoretickým problémům, které vyplynuly z řešení.
2. Diskuse k používaným modelovacím nástrojům.
3. Diskuse ke stanoveným výzkumným otázkám.

6.1 Diskuse k dílčím teoretickým problémům

Při řešení této disertační práce jsem musel postupně prostudovat náročnou problematiku týkající se šíření oblaku těžkého plynu v reálných podmínkách a současně také získat vlastní osobité zkušenosti vycházející z provedeného praktického experimentu a srovnávací studie. Všechny tyto poznatky pak pro mne byly určujícími východisky pro další úvahy a následnou diskusi. Za zásadní považuji otázky vlivu některých faktorů prostředí na rozptyl oblaků těžkých plynů a možnosti snížení následků případné havárie způsobené masívním únikem chloru. Ve své podstatě se totiž jedná o přímo související témata, která mají značný praktický význam. A konečně jako navazující principiální otázku spatřuji v úvaze o přijatelnosti rizika. Výsledkem mé práce je několik modelových havarijních scénářů, jejichž pravděpodobnost (četnost, frekvence), jakož i dosah zraňujících následků jsme schopni s větší, či menší přesností spočítat nebo alespoň odhadnout. Nicméně tyto informace nám nevypovídají nic o tom, zda a nakolik se máme takovéto hypotetické události obávat. Problém přijatelnosti rizika sice představuje otázku kardinální, avšak založenou na ryze subjektivních pocitech jednotlivců – ať již na strachu z možných hrůz a utrpení, tak i na víře, že se nejčernější scénář nenaplní.

6.1.1 Možnosti snížení následků v případě masivního úniku chloru

Výroba a skladování chloru představuje významný zdroj nebezpečí jak pro zaměstnance dané firmy, tak i pro okolní obyvatelstvo. Předcházení následkům havárií (tzv. Loss prevention) stojí na dvou principech – prevenci a havarijní represi. Historie nás mnohokrát poučila, že prevence je v konečném důsledku minimálně 10x levnější, než náklady spojené s možnými dopady (ztrátou). V případě prevence závažných havárií tento poměr snad ani nelze adekvátně použít, protože zde se primárně nezaměřujeme na ochranu materiálních hodnot, nýbrž hodnot nemajetkové povahy, jakými jsou lidské životy nebo životní prostředí.

Zcela objektivně je potřeba si připustit, že žádné havárie nelze, ani při sebevětší snaze stoprocentně předejít. Náhodné úniky nebezpečných látek, stejně jako i jiné nežádoucí situace v lidském životě, představují realistické jevy s nenulovou pravděpodobností výskytu, ať už je jejich příčina jakákoliv. Čemu ale účinně předcházet lze, jsou důsledky takovýchto nežádoucích jevů.

Při nakládání s velkým množstvím chloru, jako je tomu v případě SPOLCHEMIE, lze reálně uvažovat níže uvedené aspekty, které mohou účinně pomoci ke snížení následků možných úniků chloru:

- Překážky bránící tečení oblaku těžkého plynu.
- Skrápění vzniklého oblaku těžkého plynu.
- Havarijní připravenost na úrovni podniku.

Pokud jde o **uplatnění bariér** (včetně vegetace), lze se v mnohém poučit z proběhlých havárií a také z řady provedených vědeckých experimentů. Je evidentní, že ve srovnání s rovinným terénem přítomnost zástavby prodlužuje dobu zadržení oblaku těžkého plynu v blízkosti zdroje úniku, což může na jednu

stranu ohrozit na životě lidi v zamořené lokalitě, ale na druhou stranu to současně poskytuje lidem nacházejícím se v dosud nezamořené oblasti čas na to, aby se bezpečně ukryli. Zpomalení rozptylu způsobuje dramatický nárůst koncentrace nebezpečné látky v zamořené oblasti, což může být dále zesilováno účinky velmi složitého turbulentního proudění mezi překážkami. Wang a spol. [47] pomocí provedených simulací zjistili, že velký vliv má také kvalita/charakter těchto překážek. V rámci jimi provedených pokusů zjistili, že v oblastech, kde se nacházely pouze budovy, byla koncentrace sledovaného polutantu 1,5krát vyšší než v otevřené krajině, a v oblasti, kde byla navíc také vzrostlá vegetace, byly koncentrace až 4 krát vyšší. Stromy a vyšší keře tak mají značný vliv na charakter a trvání rozptylu těžkého plynu. Ostatně dobrým příkladem uplatnění účinku vegetace může být nehoda ve Festusu, jejíž průběh byl dobře zdokumentován televizní stanicí FOX2. Čím vyšší a hustší vegetace, tím vyššího blokovacího účinku lze dosáhnout.

To má zásadní praktický význam. V místech, kde je žádoucí vytvořit takovou bariéru, tak lze doporučit vysázet rychle rostoucí vitální dřeviny s hustou korunou, jejichž výška převyšuje 9 až 10 metrů. Ideální jsou celoročně olistěné stromy, neboť listy mají velký povrch, který funguje jednak jako fyzická bariéra a jednak jako aktivní povrch pro depozici. Některé jehličnany, jako například smrk, pro tento účel vhodné nejsou, neboť v případě jejich zasažení chlorem jsou velmi náchylné ke zničení. Brennan a kol. [113] na základě studia následků havárie v Graniteville zjistili, že v případě borovic dochází k relativně rychlému fatálnímu vegetativnímu poškození již při nízkých koncentracích chloru (do 10 ppm) působících po krátkou dobu (zhruba 15 minut). Z tohoto důvodu jsou vhodnější spíše listnaté stromy, jakými jsou topol, osika nebo habr, které mají mnohem větší schopnost následné regenerace. Jako vhodné opatření tak může být výsadba více druhové skladby dřevin, zejména pak kombinace stromů a keřů, a to ve více řadách.

Jelikož má vegetace skutečně zásadní vliv na rozptyl těžkého plynu, dávalo by smysl zohlednit ji také v rámci navrženého modelu virtuálního zdroje. Z fyzikálního hlediska se ale jedná o stochastické jevy, které není možné seriózně odhadovat. Tudíž ani já jsem nemohl do své návrhové části zahrnout tento vliv v podobě samostatného korekčního koeficientu, byť jsem tento úmysl zpočátku měl.

Pokud jde o **skrápění vzniklého oblaku** těžkého plynu, pak je nutné vycházet z předpokladu, že účinnost vodního postřiku závisí na nastavení a parametrech celého skrápěcího systému (např. velikost kapek, typy trysek a jejich počet, rychlost výstřikového proudu, intenzita dodávky vody atd.) a také na vnějších parametrech, jako jsou fyzikální vlastnosti oblaku, chemické vlastnosti obsaženého plynu, rychlost větru, stabilita atmosféry [97]. Základní účinky vodních sprejů na oblaky těžkých plynů jsou v zásadě trojího druhu. Za prvé jde o mechanické zředění oblaku, kdy do oblaku vstupuje další vzduch obsažený ve spreji, za druhé jde o uplatnění fyzikálně-chemické absorpce polutantu ve vodních kapkách spreje (tzv. vypršení) a za třetí dodání tepla do oblaku, což vede ke zvětšení jeho objemu, a tedy snížení jeho hutnosti.

Vlastní zkušenosti s použitím skrápěcích zařízení mají také hasiči, kteří vodní mlhu standardně používají při likvidaci úniků nebezpečných plynů. Stabilní požární zařízení v podobě vysokotlakých mlhovačů nachází stále větší uplatnění také uvnitř průmyslových areálů. Jejich předností je, že umožňují hašení požáru při použití podstatně menšího množství vody – cca 10 % oproti sprinklerům. Díky tomu jsou také škody způsobené při aktivaci systému výrazně menší a jejich sanace je snadná a rychlá. Pracovní tlak v tomto zařízení bývá 3,5 až 140 MPa, což zajišťuje větší účinnost hašení s menším počtem trysek a také možnost použití potrubí s menším průměrem. Velikost emitovaných kapiček je 0,025 až 0,2 mm (u sprinklerů se velikost kapky pohybuje okolo 1 až 3 mm). Výhodou těchto systémů jsou také

malé prostorové nároky na strojovnu a potrubní rozvody a tím snadná a rychlá instalace. Při vhodném designu se tak nemusí jednat o technicky náročnou záležitost [114].

Pokud jde o **havarijní připravenost**, tak je potřeba počítat s tím, že každá událost má svůj specifický průběh, který je ovlivněn celou řadou faktorů, jež mohou být časově značně variabilní. Z proběhlých nehod lze jistě také čerpat řadu cenných ponaučení. Jelikož se ale historicky mnoho masivních úniků chloru nestalo, nelze v tomto ohledu příliš paušalizovat. Velkým úskalím při havarijních únicích toxických plynů bývá rozhodnutí, zda evakuovat lidi ze zasažené oblasti, anebo je naopak vyzvat, aby zůstali ukryti uvnitř objektů, přesunuli se do výše položených míst domu, zavřeli dveře a okna a utěsnili je lepící páskou nebo namočenou smotanou textilií. V takovém případě jsou lidé v relativní bezpečí, neboť dovnitř pronikne jen velmi malé množství chloru. Uvedeným problémem se zabývali mimo jiné Sohn a kol. [96], kteří testovali průnik chloru do interiéru běžných stavebních buněk a lodních kontejnerů CONEX, což jsou objekty hermeticky neutěsněné. Došli k překvapivému závěru, že i uvnitř těchto objektů bude ukrytá osoba exponována toxické dávce chloru o dva až tři řády nižší než nechráněná osoba nacházející se venku.

Dokonce i běžné osobní automobily mohou za určitých okolností posloužit jako improvizovaný úkryt. V rámci testů Jack Rabbit II byl ověřen průnik chloru do vnitřku osobního automobilu za situace, kdy bylo vozidlo zasaženo tekoucím oblakem [73]. Ačkoli se vně vozidla, s ohledem na vzhled oblaku chloru (Obrázek 81), vyskytovaly koncentrace chloru výrazně převyšující 10 000 ppm (dost možná převyšující i 100 000 ppm), koncentrace chloru uvnitř vozidla nepřesáhla hodnotu 500 ppm (viz Obrázek 82). Je tedy zřejmé, že i takový úkryt dává člověku šanci na přežití. Ostatně také videozáznamy z havárie v přístavu Al Durra ukázaly, že

mnoho přítomných lidí si zachránilo život tím, že se před šířícím se chlorem schovali v kabinách parkujících kamionů [111].

S přihlédnutím k vlastnostem chloru i výše uvedeným zkušenostem se tedy jednoznačně potvrzuje, že nejlepší je udržet lidi uvnitř objektů nebo v autech a čím výše nad zemským povrchem, tím lépe. K evakuaci by tedy mělo být přistoupeno jen výjimečně, neboť ve venkovním prostředí mohou být lidé vystaveni mnohem větším koncentracím chloru nežli uvnitř budov. Použije-li ukrytá osoba současně také improvizované prostředky pro ochranu dýchacích cest, jakými jsou mokrá kapesník nebo šátek přes obličej a ústa, pravděpodobnost přežití, resp. omezení závažných následků na zdraví, se tímto podstatně zvýší [15].

Jako příklad špatné praxe lze naproti tomu uvést záchranné práce při havárii v Hendersonu. Zde byli obyvatelé vyzváni k evakuaci, avšak ta neprobíhala tak rychle, jak se záchranáři původně domnívali. Prodlévání lidí venku po dobu, kdy čekali na příjezd evakuačních autobusů, si nakonec vyžádalo zranění více jak dvou set lidí, kterým chlor poleptal dýchací orgány, kůži a oči. Přitom kdyby zůstali ukryti v budovách, počet zraněných by byl mnohonásobně menší [58].



Obrázek 81 Pohled z vnitřku automobilu na šířící se oblak chloru [73]



Obrázek 82 Měření koncentrace chloru uvnitř osobního automobilu zasaženého oblakem chloru [73]

6.1.2 Přijatelnost rizika uvažovaného havarijního scénáře

My lidé si s oblibou složité věci zjednodušujeme pomocí převodníků a čísel. Snadno se pak ale dostáváme do paradoxu, že výsledek, byť je matematicky správně, nedává smysl nebo jde takříkajíc „proti zdravému rozumu“. Typickým příkladem mohou být kritéria a limitní hodnoty používané pro odhad následků scénářů možných závažných havárií. Každý provozovatel objektu nebo zařízení zařazeného do kategorie A nebo B podle zákona č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií, je povinen provést posouzení rizika závažné havárie, které ve finále vede k určitému výsledku – hodnocení přijatelnosti rizik na základě kritéria skupinového rizika. Tedy, zda je riziko přijatelné či nikoli. Je však nutné podotknout, že tento závěr představuje výsledek formální a nikoli výsledek dohody zainteresovaných lidí – provozovatele, zaměstnanců daného podniku, občanů žijících v okolí, místních politiků a zájmových uskupení. A také naprosto nic nevypovídá o tom, jak moc se máme vlastně uvažovaného havarijního scénáře skutečně obávat, kupříkladu s přihlédnutím k pravděpodobnosti vzniku jiných událostí s možnými fatálními následky (např. dopravní nehody, pracovní úrazy, úder blesku apod.), anebo s ohledem na již přijatá preventivní a fungující

bezpečnostní opatření. A co teprve, když do této úvahy zahrneme také "cenu lidského života", který by mohl být zmařen v důsledku uvažované havárie? Byť je lidský život z etického hlediska hodnotou naprosto nenahraditelnou a finančně nevyčíslitelnou, v každé společnosti je přeci jen nějak formálně (úředně) oceněn¹⁸. Mimo to si i každý člověk svého života nějak cení, byť asi ne každý stejně (viz řidič hazardér versus řidič dodržující dopravní předpisy apod.). Kritéria a limity tedy slouží pouze k účelové regulaci, přičemž se mohou místně a časově měnit. Na tomto uvažování je postaveno také kritérium přijatelnosti skupinového rizika ve smyslu vyhlášky č. 227/2015 Sb., o náležitostech bezpečnostní dokumentace a rozsahu informací poskytovaných zpracovateli posudku. Podle tohoto předpisu aktuálně platí, že riziko uvažovaného scénáře je považováno za přijatelné, pakliže je splněna podmínka $F_h < F_p$, kde F_h je zjištěná roční frekvence daného scénáře závažné havárie a F_p je přijatelná roční frekvence závažné havárie. Zde je na místě uvést, že F_h představuje číslo, které ve skutečnosti představuje jen odhad.

Všude na světě je snahou haváriím předcházet a s přihlédnutím k počtu všech existujících zdrojů rizik na této planetě, resp. celosvětovému objemu vyráběných, skladovaných a přepravovaných nebezpečných látek, se to lidstvu více méně i daří. Havárií je tak ve srovnání s počtem možných příležitostí k jejich vzniku ve skutečnosti jen velmi málo. Proto i snaha tabelovat hodnoty frekvence určitých „standardních“ událostí (v tomto případě okamžitý únik celého obsahu zásobníku) tak odborníky nutí tato čísla odhadovat s přihlédnutím k historickým zkušenostem. Pro skutečnou statistiku totiž není k dispozici dostatečně velký a univerzálně

¹⁸ Například podle § 271i zákona č. 262/2006 Sb., zákoník práce, náleží každému pozůstalému po zemřelém zaměstnanci (tj. při smrtelném pracovním úrazu) jednorázová náhrada nemajetkové újmy nejméně ve výši dvacetinásobku průměrné mzdy v národním hospodářství zjištěné za první až třetí čtvrtletí kalendářního roku předcházejícího kalendářnímu roku, ve kterém právo na tuto náhradu vzniklo.

použitelný soubor dat, na základě něhož by bylo možné pro jednotlivé uvažované scénáře realistickou hodnotu F_h stanovit. Někteří autoři (např. [41, 61]) dokonce tvrdí, že lze považovat za úspěch, když se toto číslo podaří určit s přesností $\pm$ jeden řád.

Druhá proměnná v uvedené podmínce je F_p , pro kterou platí vztah:

$$F_p = \frac{10^{-3}}{N^2}$$

kde N je odhad počtu usmrčených osob.

I tento parametr je ale značně diskutabilní, protože odhad počtu usmrčených osob nelze na základě stávajících vědeckých poznatků postavit *de facto* na ničem jiném než na probitové analýze. Nutno ale podotknout, že její výsledky jsou bytostně závislé na dalších proměnných – na hodnotě koncentrace dané látky v daném místě (kterou opět jen odhadujeme na základě simulačního výpočtu) a dále na dalších třech koeficientech (a , b , n), které jsou specifické pro každou (plynnou) chemickou látku. Ty jsou v současnosti tabelovány jen pro necelé tři desítky chemických látek. Nad to, nikdo ve skutečnosti ani neví, nakolik přesný tento postup hodnocení mortality vlastně je. Chybí totiž „tvrdá“ experimentální data poskytující informaci o úmrtnosti lidí při expozici různým chemickým látkám, po různě dlouhou dobu. Veškeré stávající hodnoty tak představují v podstatě jen expertní odhady, jež vycházejí z pokusů na zvířatech transponovaných (opět odhadem) na člověka. Relativně nejpřesněji (tj. řekněme s přesností jednoho řádu) lze odhadovat pouze maximální počet osob, které se mohou vyskytovat v zájmovém území.

Na skutečnou mortalitu zasažené populace má kromě výše uvedeného vliv i celá řada jiných aspektů. Nejen individuální rozdíly mezi lidmi (zdravotní stav, fyzická

kondice, věk atd.), ale také to, kde se v okamžiku nehody daný člověk nacházel, zda byl nějak chráněn či jen to, zda měl štěstí a nehodě o vlasek unikl. Někteří autoři se nad podobnými otázkami již zamýšleli. Například Min a kol. [95] zvažovali možný účinek fyzických bariér (objekty, stěny) o výškách 3 m, 6 m a 9 m, které blokovaly šíření oblaku chloru do prostředí, na výslednou mortalitu ve vzdálenosti do 500 metrů od této bariéry. Čím vyšší byla bariéra, tím měla větší blokovací účinek, a tedy tím nižší koncentrace chloru byla za zdí. Výsledná odhadovaná mortalita se pak dle uvedených autorů snížila o 17 % v případě třímetrové bariéry, resp. o 34 % v případě šestimetrové bariéry, resp. o 41 % v případě devítimetrové bariéry. Nakolik lze ale těmto závěrům důvěřovat, je však otázkou.

Smyslem této úvahy bylo poskytnout náhled do principů, podle kterých se dnes snažíme posuzovat přijatelnost rizik souvisejících s možnými účinky nebezpečných chemických látek na člověka. Jak bylo uvedeno, všechny parametry, které do tohoto výpočtu vstupují, jsou zatíženy poměrně vysokou nejistotou. S určitostí tak lze konstatovat pouze to, že takový přístup o míře rizika ve skutečnosti mnoho nevypovídá. Natož pak o jeho společenské přijatelnosti. Tudíž nemá na tomto místě ani valný smysl diskutovat, zda a jakým způsobem může ovlivnit celkovou míru rizika různý stupeň zaplnění jednotlivých zásobníků kapalným chlorem. Jednalo by se totiž pouze o spekulativní „hru s čísly“.

V prevenci závažných havárií platí zásada uvažovat pouze nejhorší možný, respektive realisticky možný, scénář. Při řešení takto komplexních úloh je tudíž mnohem užitečnější vycházet z empirických poznatků, které by měly provedené výpočty rozumně korigovat. V tomto duchu byla vypracována také tato disertační práce. Byl zde použit netradiční a dosud neotřelý přístup spočívající ve využití modelu virtuálního zdroje. Ten sice představuje pouze aproximaci určitého fyzikálně chemického procesu, nicméně se jedná o jeden z nejvěrohodnějších

kvantitativních popisů uvažovaného havarijního děje. Jeho konstrukce totiž vychází z praktických zkušeností o chování chloru po jeho úniku do atmosféry s přihlédnutím k možnému uplatnění dalších vlivů.

6.2 Diskuse k používaným modelovacím nástrojům

6.2.1 Zkušenosti s vybranými počítačovými programy

Software ALOHA se po celém světě úspěšně používá pro řešení rutinních, ale i náročných problémů spojených s rozptylem plyných látek na menší vzdálenosti (cca do 5 000 metrů od zdroje úniku). S ohledem na téměř 40letý vývoj, poskytuje tento program poměrně validní výsledky. Další předností je jeho ovládání, které je relativně jednoduché a intuitivní. Vstupní údaje jsou buď snadno zjistitelné, anebo je lze spolehlivě odhadnout na základě znalostí o průběhu a charakteru dané havárie. Podstatnou výhodou je také jeho dostupnost, neboť se jedná o freeware.

Naproti tomu program EFFECTS je komerční, placený produkt. Z výše uvedených nástrojů se ale jednoznačně jedná o „nejpropracovanější“ modelovací nástroj. Tato skutečnost ovšem koreluje s náročností jeho použití. Před modelováním je potřeba důkladně prostudovat uživatelský manuál a také strávit mnoho času zkušebními aplikacemi, než uživatel dostatečně pochopí práci s programem a jeho funkční možnosti. Samotná práce s programem je rovněž časově náročná. Při provádění zkušebního modelování havárií v laboratoři Fakulty bezpečnostního inženýrství VŠB-TU Ostrava, kterou jsem v rámci řešení svého studentského grantu (SGS) navštívil, jsem došel k závěru, že výsledky modelování rozptylu těžkého plynu, generované tímto modelem, nelze jednoznačně interpretovat. Například dosahy referenčních koncentrací chloru při některých simulacích nebyl program schopen spočítat a ve výstupech uváděl hlášení o tom, že zadaná koncentrace se v ovzduší nebude vyskytovat.

Komerčním produktem je také aplikace TerEx. Její výhodou je, že získané výsledky lze získat poměrně snadno a rychle. Oproti programu ALOHA nebo EFFECTS je TerEx jednodušší na ovládání, ale s ohledem na skutečnost, že nevyžaduje tak široké spektrum vstupních dat, nejsou jím generované výsledky příliš validní. TerEx je primárně určen pro rychlé orientační vyhodnocení vzniklé havarijní situace, což má svůj význam pro vydání včasné výstrahy nebo vymezení zóny, kde může docházet k ohrožení lidí, nicméně pro seriózní numerické modelování jej spolehlivě použít nelze. Výstupy z aplikace TerEx jsou generovány v textové i grafické podobě, lze je uložit a exportovat do .xls souboru.

Podobně jako TerEx také software ROZEX Alarm patří do skupiny jednoduchých nástrojů, které jsou určeny především k odhadům dosahu zraňujících koncentrací. Nejedná se o nijak sofistikovaný nástroj a jeho výsledky jsou diskutabilní. Navíc není možné z dostupných zdrojů zjistit, podle jakého modelu tento program vlastně rozptyl plynů počítá. Z tohoto důvodu nelze tento nástroj považovat za vhodný pro modelování havarijních scénářů, spojených s únikem látek vytvářejících oblaky těžkých plynů.

6.2.2 Software ALOHA a jeho validita

S ohledem na výše uvedené osobní poznatky jsem pro účely této práce použil software ALOHA, verzi 5.4.7. Stejně jako kterýkoli jiný simulační program, má i ALOHA své limity a omezení. Při jeho použití je potřeba si nejprve osvojit jeho ovládání, které je na jednu stranu sice intuitivní, ale leckdy svádí k mechanickému použití. To je také důvodem, proč se řada uživatelů dopouští mnohdy zbytečných chyb – například při nastavování jednotek používaných veličin (SI jednotky versus anglosaské jednotky), při vkládání desetinných čísel (pro desetinnou čárku se používá klávesová značka tečky a nikoli čárka), anebo při výběru typu zástavby nebo povrchu (mnoho uživatelů si neuvědomuje důležitost těchto údajů pro finální

výpočet a „naslepo něco vybere“). Mimo to ALOHA může za určitých okolností poskytovat i značně zkreslené výsledky. Zejména je potřeba dávat si pozor při modelování za situací, kdy se vyskytují:

- velmi nízké rychlosti větru (méně jak 1 m.s^{-1}),
- změny rychlosti větru v horizontálním směru (tzv. střih větru),
- stabilní atmosférické podmínky, kdy je velmi malý vertikální gradient rychlosti větru (zejména třída stability E a F),
- velmi členitý nebo svažité terén,
- úniky látek trvající déle jak 60 minut.

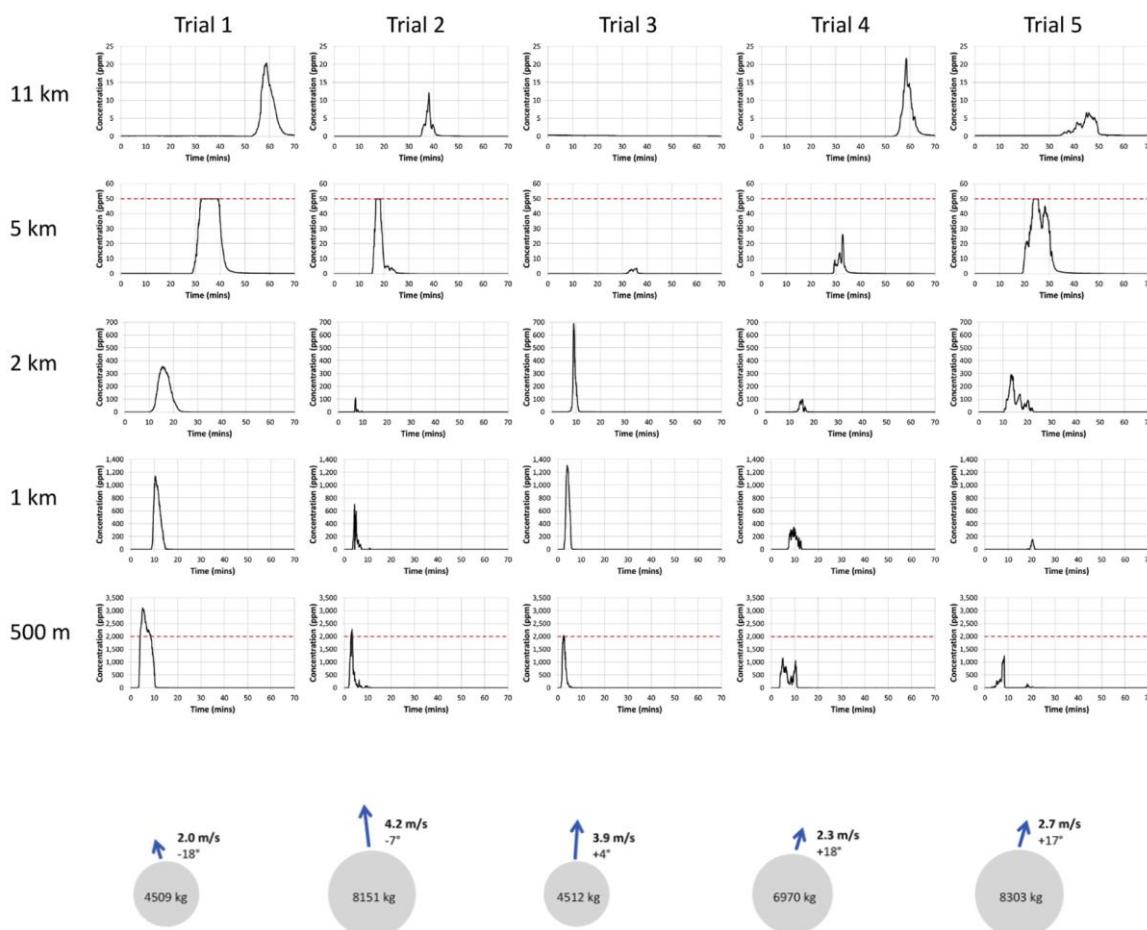
Na druhou stranu, ALOHA je pokročilý nástroj, který automaticky zohledňuje výškový profil rychlosti větru, a to jak v případě Gaussovského rozptylu, tak i v případě disperze těžkých plynů a při odpařování z kaluží. Při zadání informace o výšce spodní hranice inverzní vrstvy pak do výpočtu dokáže zahrnout korekci zohledňující účinek této blokující atmosférické vrstvy na charakter rozptylu disperze. Z termodynamického hlediska ALOHA také počítá s přenosem tepla z odpařující se kaluže a povrchu země.

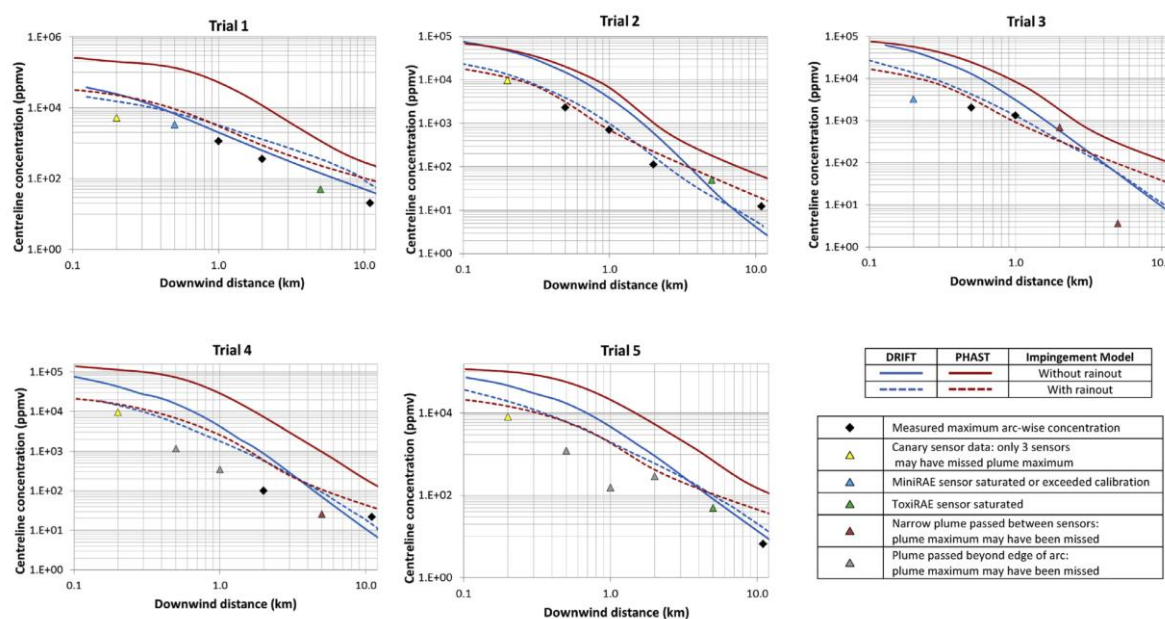
Navzdory těmto zpřesňujícím algoritmům je nutné program ALOHA vnímat jako konzervativní modelovací nástroj, který nadhodnocuje dosahy zraňujících koncentrací. Částečně je do této kategorie tím, že modelování rozptylu jakékoli emise je z důvodu existence velkého množství proměnných zatíženo významnou matematickou chybou. A částečně je to i záměr tvůrců programu, který vychází z obecně uznávané zásady, že pro účely havarijní připravenosti je vhodnější používat údaje na horním limitu intervalu spolehlivosti.

Algoritmy pro modelování těžkých plynů užitých v programu ALOHA jsou postaveny na rovnicích odvozených Spicerem a Bavenou [14], jež byly použity už

ve starším modelu DEGADIS. Ten byl po dlouhou dobu všeobecně uznáván jako vysoce validní nástroj. Nicméně postupně se ukázalo, že neposkytuje zcela přesné výsledky. Zjistilo se to jak během skutečných havárií, kdy se podle výsledků z ALOHA předpokládaly větší dosahy zraňujících koncentrací, než k nimž ve skutečnosti došlo [69], tak i srovnáním s výsledky z prováděných experimentů (např. Goldfish Test Series a Desert Tortoise) [70], kdy byly naopak výsledky v blízkosti zdroje úniku značně podhodnocené. Na nepřesnost modelu DEGADIS, jehož algoritmy ALOHA využívá, přitom upozorňovaly už některé starší studie (např. [71]). Proto byly do ALOHA postupně implementovány algoritmy z modelu SLAB (viz Obrázek 23), což výrazně zpřesnilo generované výsledky. Jedinou slabinou a prokázanou nevýhodou modelu SLAB je, že pro velmi malé vzdálenosti od zdroje úniku (v řádu desítek až stovek metrů) predikované koncentrace nadhodnocuje (viz [5]). Na základě mnou provedených simulací pomocí programu ALOHA mohu tuto skutečnost potvrdit. Při simulaci tzv. nulového scénáře (viz Příloha 1 a 2), kdy jsem modeloval kontinuální únik veškerého množství chloru z primárního zdroje v podobě cylindrického zásobníku, ALOHA pro rychlost větru 1 m.s^{-1} spočítala dosah koncentrací chloru 500 ppm až do vzdálenosti 1 600 m od zdroje. Při aplikaci modelu virtuálního zdroje a při zahrnutí účinku impakce (Tabulka 11) byly dosahy koncentrace 500 ppm významně menší, a to jen 1 000 metrů. Při porovnání těchto výsledků je rozdíl zřejmý. Prostá automatická aplikace programu ALOHA bez započtení vlivu impakce, tak vede k získání nadhodnocených dosahů, a to cca o 60 %. Z pohledu řešení havarijní situace se však jedná o rozdíl zcela zásadní. V hustě obydlené oblasti, což bezprostřední okolí areálu společnosti SPOLCHEMIE je, je z praktického i časového hlediska velký rozdíl, zda bude vyhlášena evakuace osob, resp. nařízeno jejich ukrytí, v okruhu o poloměru 1,6 km (tj. 8 km^2) nebo jen 1 km (tj. $3,1 \text{ km}^2$).

K podobným závěrům nezávisle došli také Gant a kol. [90], kteří za využití retrospektivní analýzy experimentů provedených v rámci programu Jack Rabbit II zjistili, že v reálu koncentrace chloru se vzdáleností klesaly významně rychleji, než vycházelo z výpočtů numerických programů DRIFT a PHAST (viz Obrázek 83). Tedy i tyto nástroje koncentrace chloru nadhodnocovaly, a to navzdory tomu, že PHAST je obecně považován za přesnější nástroj než ALOHA [115]. Tuto skutečnost jsem proto musel promítnout do návrhu korekčních koeficientů, kdy jsem na základě sumarizovaných literárních zdrojů odhadl míru chybovosti programu ALOHA pro blízké pole.





Obrázek 83 Maximální koncentrace chloru naměřené během experimentů Jack Rabbit II versus koncentrace predikované na základě simulace pomocí počítačových nástrojů DRIFT a PHAST [90]

6.3 Diskuse ke stanoveným výzkumným otázkám

Na počátku řešení byly stanoveny tři výzkumné otázky, které vycházely z úvahy o vlastním smyslu a účelu této disertační práce. Na základě teoretických dat, empirických poznatků i osobních praktických zkušeností, které jsem během řešení této disertační práce získal, mohu nyní objektivně posoudit jejich relevanci, respektive je zodpovědět.

Výzkumná otázka č. 1 zněla: *Lze dostupné empirické poznatky z proběhlých havárií nebo z provedených terénních experimentů účelně využít pro návrh optimalizovaného přístupu pro modelování úniku chloru?*

S přihlédnutím k faktu, že mnoho proběhlých havárií spojených s masivním únikem chloru bylo poměrně dobře popsáno či dokonce zaznamenáno na videozáznam, existuje dostatek poznatků o reálném chování tohoto plynu při těchto událostech. Tyto informace pak doplňují také poznatky o chování těžkých plynů za

určitých podmínek, které byly získány při několika experimentech, jako například Jack Rabbit nebo Goldfish. Vybrané události, jakož i některé z uvedených terénních testů, byly v této práci zevrubně popsány (viz kapitoly 3.3 a 4.2.3). Taktéž zde byly citovány související publikované práce. Na základě toho tedy lze konstatovat, že uvedené poznatky lze účelně a smysluplně využít pro návrh optimalizovaného přístupu pro modelování úniku chloru, resp. tak bylo i učiněno.

Výzkumná otázka č. 2 zněla: *Lze experimentem provedeným na fyzickém modelu referenční lokality objektivně prokázat, že unikající těžký plyn se při průchodu v silně urbanizovaném prostředí chová podobně jako kapalina (tj. nastává zřetelná fáze tečení)?*

Nespornou výhodou každého laboratorního experimentu je, že je prováděn za řízených přesně stanovených a měřitelných podmínek, je přesně popsán a zdokumentován. Díky tomu je provedený pokus opakovatelný na rozdíl od terénního experimentu, který obvykle probíhá v přirozeném neřízeném prostředí. Mnou provedeným experimentem, při kterém jsem použil fyzický model zmenšeniny zájmové lokality areálu SPOLCHEMIE, jsem poměrně věrohodně simuloval chování těžkého plynu, který zvolna tekla mezi jednotlivými stavebními objekty. Průběh experimentu byl natočen také na videozáznam, který bude prezentován při obhajobě této práce. Jednotlivé sekvence uvedené na Obrázek 72 až Obrázek 74 nicméně zřetelně dokládají, že těžký plyn se skutečně za určitých podmínek chová podobně jako kapalina.

Výzkumná otázka č. 3 zněla: *Je možné aplikovat model virtuálního zdroje také pro účely modelování rozptylu těžkého plynu?*

Virtuální zdroj představuje imaginární zdroj určité emise (energie nebo chemické látky), který sice fyzicky neexistuje, ale chová se a navenek se projevuje stejně, jako by se o reálný zdroj jednalo. Smyslem modelu virtuálního zdroje tak je co možná

nejvěrohodněji fyzikálně simulovat tento reálně existující zdroj. Model virtuálního zdroje představuje zcela nový přístup, který doposud nebyl v souvislosti s modelováním rozptylu těžkého plynu aplikován. Nepřekvapí tedy, že nejen v české odborné literatuře, ale také v zahraniční, se o virtuálním zdroji mnoho nedočteme. Neexistují tedy žádné vědecky ověřené poznatky o reliabilitě tohoto modelu ani o jeho vhodnosti pro tyto účely. Volbu uvedeného tématu pro tuto disertační práci tak lze označit za počin pionýrský.

Řešením této práce se nicméně prokázalo, že model virtuálního zdroje lze úspěšně použít také pro účely modelování rozptylu těžkého plynu. Pro dosažení potřebné věrohodnosti výsledků modelování uvažovaných havarijních scénářů, je však současně nutné zohlednit některé faktory prostředí, které mají určující vliv na emisní sílu virtuálního zdroje. Zmíněný postup pak byl názorně předveden za využití ukázkové simulace dvou variant rozptylu chloru (kulový zásobník s plyným chorem a kaluž s kapalným chlorem) za využití programu ALOHA, které vycházely ze zvoleného havarijního scénáře úniku kapalného chloru ze zásobníku v areálu SPOLCHEMIE (viz kap. 5.2), coby primárního zdroje.

7 ZÁVĚR

V případě úniku plynů těžších, než vzduch dochází ke vzniku kompaktního oblaku, který zpočátku teče podél zemského povrchu. Díky tomu je jeho škodlivý potenciál pro lidské zdraví vysoký, zvláště pak, jedná-li se o plyn toxický. Rozptýl těchto oblaků lze podpořit pomocí více či méně nákladných technik, jako je použití výkonných ventilačních zařízení, anebo lze nebezpečnou koncentraci snížit jejich skrácením za využití sprinklerů nebo vysokotlakých mlhových zařízení. Problém nastává v případě, kdy se oblak těžkého plynu, obsahující nebezpečnou chemickou látku, může dostat do prostředí s výskytem většího počtu lidí. Negativní účinky na lidské zdraví jsou tím větší, čím je oblak hustější, obsahuje velké množství ještě nenařazené nebezpečné chemické látky a v jeho šíření napomáhá např. směrové vanutí větru. V rámci havarijního řešení nehody spojené s masivním únikem těžkého plynu je proto klíčové znát parametry šířícího se oblaku, aby bylo možné s co největší přesností predikovat jeho dopady na zdraví zasažených osob. Předně je třeba neprodleně zjistit směr šíření oblaku těžkého plynu a rovněž koncentrace nebezpečné chemické látky v zájmové oblasti. K tomu slouží metody numerického (počítačového) modelování, které dokážou odhadnout zmíněné parametry oblaku těžkého plynu. Problematika modelování masivních úniků těžkých plynů je velice složitá, neboť jejich šíření ovlivňuje řada atributů (charakter prostředí, tj. hustota zástavby a vegetace, místní meteorologické podmínky, tj. rychlost a směr a vanutí větru, stabilita atmosféry atd.). A právě meteorologické podmínky, přesněji směr a rychlost vanutí větru, mají na predikci šíření oblaku těžkého plynu podstatný vliv. Nelze ovšem nikdy s přesností odhadnout, zda směr vanutí větru zůstane neměnný, anebo zda nedojde k jeho náhlé změně. S touto nenadálou situací nepočítají ani sofistikované modelovací softwarové nástroje, neboť se jedná o velice složitou záležitost.

Cílem této disertační práce bylo navrhnout a použít právě pro tyto případy, tzv. model virtuálního zdroje. Tento model napomáhá řešit situace, které za normálních okolností nelze pomocí běžných modelovacích software řešit s dostatečnou přesností. Díky tomu, lze v rámci havarijní připravenosti predikovat koncentrace nebezpečné chemické látky i poté, kdy došlo k náhlým a podstatným změnám v průběhu vzniklé nehody, spojené s masivním únikem nebezpečné látky. Použitelnost modelu virtuálního zdroje dosud nebyla v oblasti modelování nehod spojených s únikem těžkého plynu uplatněna. Z výsledků testů a experimentů provedených v rámci této disertační práce lze s jistotou říct, že model virtuálního zdroje je nejen pro zamýšlené případy použitelný, ale především i efektivní.

Přínos práce pro vědní obor

V rámci řešení této práce byl v ČR poprvé navržen a rozpracován model virtuálního zdroje pro potřeby modelování havarijních scénářů spojených s masivními úniky nebezpečných chemických látek. Funkčnost, resp. možné použití tohoto modelu, byla ověřena na několika případech simulovaných v softwarovém nástroji určenému k modelování úniků těžkých plynů (software ALOHA). Z výsledků vyplynulo, že v případě náhlé změny povětrnostních podmínek (změna směru vanutí větru) se může oblak vytvořeného těžkého plynu dostat například i do oblastí s hustou koncentrací osob a v tomto případě lze pomocí modelu virtuálního zdroje odhadnout úroveň koncentrace nebezpečné chemické látky i v této oblasti. S tímto scénářem samotné modelovací nástroje pracovat nedokážou, jelikož se jedná o velice složitý problém. Použití virtuálního zdroje tak umožňuje poměrně efektivní způsob při jeho řešení.

Přínos práce pro praxi

Použitím modelu virtuálního zdroje mohou organizace nakládající s nebezpečnými chemickými látkami, které se po svém úniku mohou chovat jako těžký plyn, využít v rámci havarijní připravenosti na neobvyklé situace, které mohou v případě vzniklých nehod vést ke značným škodám na lidském zdraví. Použití tohoto modelu přímo podporuje i potřebu plnění požadavků právních předpisů, které výše uvedeným subjektům ukládají povinnost hodnotit relevantní rizika související s jejich činností a mající možné negativní následky na lidské zdraví.

V rámci řešení této disertační práce byl dále definován pojem „Masivní únik“, který byl převzat do oficiálního online informačního zdroje Encyklopedie BOZP, který je provozován Výzkumným ústavem bezpečnosti práce, v.v.i. (viz Obrázek 84). Díky tomu je tento pojem nyní pevně zakotven do odborné terminologie používané v oboru prevence závažných havárií.



Obrázek 84: Definice Masivního úniku převzatá do Encyklopedie BOZP [122]

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ADR	Accord Dangereuses Route (Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí)
AEGL	Acute Exposure Guideline Levels
ALOHA	Areal Locations of Hazardous Atmospheres software
ARIA	Analysis, Research and Information on Accidents database
BARPI	Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles
CFD	Computational Fluid Dynamics
DEGADIS	Dense Gas Dispersion Model
ERPG	Emergency Response Planning Guidelines
EU	Evropská unie
HGM	Heavy gas dispersion model
IBC	Intermediate Bulk Container
IDLH	Immediately Dangerous to Life or Health
LOC	Levels of Concern
MARS	Major Accident Reporting System
MEGC	Multiple Element Gas Container
NPK-P	Nejvyšší přípustná koncentrace v pracovním ovzduší
PAC	Protective Action Criteria for Chemicals
PEL	Přípustný expoziční limit
PVC	Polyvinylchlorid
RID	Règlement concernant le transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses (Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečného zboží)
SLAB	An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases
SPOLCHEMIE	Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a.s.
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
UJEP	Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem
US EPA	United States Environmental Protection Agency
USA	Spojené státy americké
USD	americký dolar

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. HON, Z. [et al.]. Modelování nebezpečných dopadů chemických havárií. In: *22. medzinárodná vedecká konferencia Riešenie krízových situácií v špecifickom prostredí*. Žilina: Fakulta bezpečnostného inžinierstva UNIZA, 2017, s. 116-122. ISBN 978-80-554-1332-7.
2. Dräger Safety AG & Co. KGaA. Gas Dispersion. In: *Dräger* [online]. Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2023 [cit. 2023-11-10]. Dostupné z: <https://www.draeger.com/Content/Documents/Products/sab-gas-dispersion-br-9046434-en-en.pdf>.
3. KOLAFA, J. O vypouštění vzduchu z pneumatiky. In: *Jiří Kolafa – private homepage* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [cit. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/kolafa/pneu.pdf>
4. SKŘEHOT, P. [et al.]. *Prevence nehod a havárií: 2. díl: mimořádné události a prevence nežádoucích následků*. 1nd ed. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., T-SOFT a.s., 2009. ISBN 978-80-86973-73-8.
5. SKŘEHOT, P.A. [et al.]. Náhled do problematiky těžkých plynů a modelování jejich rozptylu. In: *Aktuálne otázky bezpečnosti práce*. Košice: Technická univerzita v Košicích, 2015, s 88-95, ISBN 978-80-553-2302-2.
6. *Výkladový slovník aerosolových termínů* [online], 2007. Česká aerosolová společnost [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <http://cas.icpf.cas.cz/aerosolovnik.php>
7. KUKKONEN, J. and NIKMO, J. Modeling atmospheric dispersion of heavier-than-air clouds containing aerosol. In: *The Handbook of Handbook of Hazardous Materials Spills Technology* [online]. New York: McGraw-Hill, 2002 [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/CHAPTER-27-MODELING->

ATMOSPHERIC-DISPERSION-OF-Kukkonen-

Nikmo/eda3ead8b91f9a00c053fe362640deaca81db826.

8. SKŘEHOT, P.A., MAREK J., SKŘEHOTOVÁ, M. and PAUČOVÁ V.
Charakteristiky oblaku těžkého plynu vzniklého jako důsledek chemické havárie. In: *Bezpečnost a ochrana zdraví při práci*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s., 2016, s. 91-95. ISBN 978-80-7385-175-0.
9. BEDNÁŘ, J. a BRECHLER J., FUKA V. Modelování atmosférické turbulence. In: *VESMÍR* [online]. 2012, 91, s. 498-501. [cit. 2024-01-22]. ISSN 1214-4029.
Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2012/cislo-9/modelovani-atmosfericke-turbulence.html>
10. SKŘEHOT, P. [et al.]. *Rozptyl těžkého plynu v atmosféře : Teorie-modely-experimenty*. 1nd ed. Praha: T-SOFT a.s., 2018. ISBN 978-80-905401-2-5.
11. MARKIEWICZ, M.T. Mathematical Modelling of the Heavy Gas Dispersion.
In:
MANHAZ Monograph, eds. *Models and techniques for health and environmental hazard assessment and management* [online]. Otwock-Swierk: Institute of Atomic Energy, 2006, s. 279-302. [cit. 2024-01-20]. ISBN 83-914809-7-6.
Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/301890610_Mathematical_modeling_of_the_heavy_gas_dispersion
12. VAN ULDEN, A. P. A New Bulk Model for Dense Gas Dispersion: Two-Dimensional Spread in Still Air. In: *Atmospheric Dispersion of Heavy Gases and Small Particles*. Springer, Heidelberg: International Union of Theoretical and Applied Mechanics, August 29 – September 2, 1983, s. 419-440. [cit. 2023-09-01]. ISBN 978-3-642-82291-9
13. KOVALETS, I.V. and MADERICH, V.S. Numerical simulation of interaction of the heavy gas cloud with the atmospheric surface layer. In: *Environmental Fluid Mechanics 6*. Kiev: Institute of Mathematical Machine & System

- Problems, 2006, s. 313-340. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/226345543_Numerical_Simulation_of_Interaction_of_the_Heavy_Gas_Cloud_with_the_Atmospheric_Surface_Layer
14. The CAMEO® Software System. ALOHA® 5.4.7 [software]. 2016. Dostupné z: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>
15. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. Únik chloru. In: *Hasičský záchranný sbor České republiky* [online]. Praha: Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 30.listopadu 2017 [cit. 2023-11-20]. Dostupné z:
<https://www.hzscr.cz/soubor/8-l-l-ml-16-r-unik-chloru-pdf.aspx>
16. JURSIK, F. *Anorganická chemie kovů*. 1nd ed. Vydavatelství VŠCHT, 2008. ISBN 9788070805046.
17. General Tank Containers Co., Ltd. Liquid Chlorine tank containers. In: *General tank containers* [online]. General Tank, 2023. [cit. 2023-09-01]. Dostupné z: <http://www.generaltank.com/services/liquid-chlorine-tank-containers/>
18. Hasičský záchranný sbor Jihomoravského kraje. Chlor. In: *KRIZPORT* [online]. Portál krizového řízení JHM, 2023 [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://www.krizport.cz/ohrozeni/nebezpecne-latky-v-jmk/chlor>
19. Význam a využití chloru a jeho sloučenin. In: *Halogeny* [online]. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, 2023 [cit. 2023-08-08]. Dostupné z:
https://web.natur.cuni.cz/~kudch/main/halogeny/HALOGENY/HALOGENY/chlor/vyznam/vyznam_uvod1.html
20. ROUTLEY, J. G. Massive Leak of Liquefied Chlorine Gas Henderson, Nevada. In: *Technical Report Series* [online]. U.S. Fire Administration, 1991 [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: https://www.interfire.org/res_file/pdf/Tr-052.pdf

21. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. In: *Centers for Disease Control and Prevention* [online]. Washington: U.S. Department of Health & Human Services, 2023 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/default.html>
22. DROGARIS, G. Community documentation centre on industrial risk - Review of accidents involving chlorine. In: *Institute for Systems Engineering and Informatics* [online]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1992 [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: http://publications.europa.eu/resource/genpub/PUB_CLNA14444ENC_PDF_A1B.1.4
23. LEES, F. 1996. Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 1. 2nd. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996. ISBN 0-7506-1547-8.
24. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. Bojový řád jednotek požární ochrany (1. 1. 2018): Metodické listy kapitoly L.: In: *Hasičský záchranný sbor České republiky* [online]. Praha: Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2023 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/bojovy-rad-jednotek-pozarni-ochrany-v-dokumentech-491249.aspx>
25. Bureau for Analysis of Industrial Risks and Pollutions. Chlorine accidentology. In: *ARIA database* [online]. Ministry of Environment: General Directorate for Risk Prevention, 2002 [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/chlorineaccidentology.pdf
26. Bureau for Analysis of Industrial Risks and Pollutions. *ARIA database*. Online. 2023 [cit. 2023-09-25]. Dostupné z: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/?lang=en&s=>
27. European Commission. *eMARS*. Online. 2023 [cit. 2023-09-25]. Dostupné z: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/accident/search>

28. KHAN, I. F. and ABBASI, S.A. An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. Vol. 14, Issue 4. ELSEVIER, 2001, s. 283-306. [cit. 2023-09-15]. ISSN: 1873-3352. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423000000486>
29. KHAN, I. F. and ABBASI, S.A. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. In: *Journal of Loss Prevention in the process Industries* [online]. Vol. 12, Issue 5. ELSEVIER, 1999. s. 361-378. [cit. 2023-09-15]. ISSN: 1873-3352. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095042309800062X>
30. VINCE, I. *Major Accidents to the Environment: A Practical Guide to the Seveso II-Directive and COMAH Regulations*. 1nd ed. England: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN: 9780080976297.
31. CULLEY, J. M. [et al.]. A Validation Study of 5 Triage Systems Using Data From the 2005 Graniteville, South Carolina Chlorine Spill. In: *Journal of Emergency Nursing* [online]. Vol. 40, Issue 5. National Library of Medicine, 2014. s. 453-460 [cit. 2023-10-19]. ISSN: 1527-2966. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0099176714002190>
32. BUCKLEY, R. L. Buckley [et al.]. A case study of chlorine transport and fate following a large accidental release. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 62. ELSEVIER, 2012. s. 184-198. [cit. 2023-09-15]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231012007972>
33. Gexcon AS. EFFECTS [software]. 2023. Dostupné z: <https://www.gexcon.com/software/effects/>
34. TLP Solutions, spol. s r.o. ROZEX [software]. 2020. Dostupné z: <https://www.tlp-solutions.cz/produkty/software-rozex/>

35. ERMAK, D.L. User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases. In: Lawrence Livermore National Laboratory [online]. California: United States Department of Energy, 1990. [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/ttn/scram/models/nonepa/SLAB.PDF>
36. MAREDDY, A. R. Impacts on air environment. In: *Environmental Impact Assessment: Theory and Practice* [online]. Butterworth-Heinemann, 2017, s. 171-216. [cit. 2023-09-15]. ISBN 978-0-12-811139-0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128111390000050?via%3Dihub>
37. LI, Ch. [et al.]. Study on two-phase cloud dispersion from liquefied CO₂ release. In: *Chinese Journal of Chemical Engineering* [online]. Vol. 60. ELSEVIER, 2023. s. 37-45. [cit. 2023-11-11]. ISSN: 2210-321X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1004954123000496>
38. HINDS, W.C. *Aerosol technology : Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles*. 2nd. ed. New York : John Wiley and Sons 1999. ISBN 0-471-19410-7.
39. HOU, J. [et al.]. Statistical analysis of evacuation warning diffusion in major chemical accidents based on real evacuation cases. In: *Process Safety and Environmental Protection* [online]. Vol. 138. ELSEVIER, 2020. s. 90-98. [cit. 2024-01-29]. ISSN: 1744-3598. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582019320543>
40. SPAGNOL, S. [et al.]. Distance rendering and perception of nearby virtual sound sources with a near-field filter model. In: *Applied Acoustics* [online]. Vol. 115. ELSEVIER, 2017. s. 61-73. [cit. 2024-01-15]. ISSN: 1872-910X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X16302407>
41. YANG, Z. [et al.]. Modification and validation of the Gaussian plume model (GPM) to predict ammonia and particulate matter dispersion. In: *Atmospheric Pollution Research* [online]. Vol. 11, Issue 7. ELSEVIER, 2020. s. 1063-1072. [cit.

- 2024-01-06]. ISSN: 1309-1042. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1309104220300763>
42. DILLON, M. B. The role of deposition in limiting the hazard extent of dense-gas plumes. In: *Journal of Hazardous Materials* [online]. Vol. 164, Issues 2–3. ELSEVIER, 2009. s. 1293-1303. [cit. 2024-01-06]. ISSN: 1309-1042. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408013794>
43. MAZZOLA, T. [et al.]. Results of comparisons of the predictions of 17 dense gas dispersion models with observations from the Jack Rabbit II chlorine field experiment. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 244. ELSEVIER, 2021. [cit. 2023-08-06]. ISSN: 1878-2442. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135223102030621X>
44. SOBOTKA, M. V jordánském přístavu unikl po nehodě chlor: 13 mrtvých a 251 zraněných. In: *Novinky.cz* [online]. Ammán, 2022. [cit. 2022-08-26]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/zahranicni-blizky-a-stredni-vychod-v-jordanskem-pristavu-unikl-po-nehode-chlor-13-mrtvych-a-251-zranenych-40401430>
45. LatestLY, 2022. *Jordan: Toxic Chlorine Gas Leak In Aqaba Port Leaves 13 Dead, Over 250 Injured*. YouTube [online]. [cit. 2022-08-26]. Dostupné z:
<https://www.youtube.com/watch?v=a-z5Vbs9smI&t=42s>
46. GOOGLE. Google Earth 9.169.0.0 [software]. [Transformace dat ze software ALOHA v místě Al Durra, Jordánsko]. Vytvořeno 23. srpna, 2022, from <https://www.google.cz/intl/cs/earth/>
47. WANG, H. [et al.]. Study on convection and dispersion characteristics of dense gases in urban environment considering trees. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. Vol. 72. ELSEVIER, 2021. [cit. 2024-01-06]. ISSN: 1873-3352. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423021001868>

48. HANNA, S. [et al.]. The Jack Rabbit chlorine release experiments: Implications of dense gas removal from a depression and downwind concentrations. In: *Journal of Hazardous Materials* [online]. Vol. 213–214. ELSEVIER, 2012. s. 406–412. [cit. 2023-07-20]. ISSN: 1873-3336. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389412001598>
49. DOSOUDIL, T. Smrtící mlha u Yprés: Kdo stál za prvním chemickým útokem na bojišti? In: *100+1* [online]. Praha: Extra Publishing, 2018, 10.10.2018 [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.stopplusjednicka.cz/smrtici-mlha-u-ypres-kdo-stal-za-prvnim-chemickym-utokem-na-bojisti>
50. 1979 *Mississauga train derailment*. In: Wikipedie [online]. [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/1979_Mississauga_train_derailment
51. CNN, 2013. *Chlorine Leak*. YouTube [online]. [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=7Gp2wx2zIRI>
52. Investigation Report: Chlorine Release. In: *U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board* [online]. Arizona: DPC ENTERPRISES, L.P., 2002. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <http://www.csb.gov/file.aspx?DocumentId=351>
53. T-SOFT a.s. TEREX – TERoristický Expert [software]. 2023. Dostupné z: <https://tsoft.cz/teroristicky-expert/>
54. HUNTER, C.H. [et al.]. The Savannah River National Laboratory's Response to the Graniteville, SC Train Accident. In: *National Technical Reports Library* [online]. Washington, DC.: United States Department of Commerce, 2005. [cit. 2022-09-17]. Dostupné z: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE2006881477.xhtml>
55. FESTUS MISSOURI 2002 CHLORINE RELEASE ACCIDENT. In: *AristaTek* [online]. Aristatek, Inc., 2007. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: www.aristatek.com/Newsletter/OCT07/TechSpeak.pdf

56. BUCKLEY, R.L. [et al.]. Modeling Dispersion from Toxic Gas Released after a Train Collision in Graniteville, SC. In: *Journal of the Air & Waste Management Association* [online]. Vol. 57, Issue 3. Taylor & Francis, 2012. s. 268-278 [cit. 2023-10-19]. DOI: 10.1080/10473289.2007.10465329
57. KASHI E. [et al.]. Temperature Gradient and Wind Profile Effects on Heavy Gas Dispersion in Build up Area. In: *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* [online]. Vol. 4, Issue 12. AJBAS, 2010. s. 6010-6020 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2010/6010-6020.pdf>
58. HANNA S.R. [et al.]. Estimating emissions of toxic industrial chemicals (TICs) released as a result of accidents or sabotage. In: *Chemical Biological Information Systems (CBIS) Conference and Exhibition, Austin, TX* [online]. Austin: National Defense Industrial Association, January 2007. [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: <https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2007/cbis/wednesday/hannaWed1130.pdf>
59. HAVENS, J.A. The Atmospheric Dispersion of Heavy Gases: An Update. In: *ICHEME Symposium Series No. 93* [online]. Arkansas: Chemical Engineering Department, University of Arkansas, April 1985. S. 143-164. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.icheme.org/media/11992/viii-paper-09.pdf>
60. STORWOLD, D.P. [et al.]. Jack Rabbit Test Program Trial Summary. In: *Special Symposium on Applications of Air Pollution Meteorology* [online]. Washington: U.S. Army Dugway Proving Ground, 2011. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://ams.confex.com/ams/91Annual/webprogram/Paper182090.html>
61. ACOSTA, S. and KHAJAH, T. Method of virtual sources using on-surface radiation conditions for the Helmholtz equation. In: *Engineering Analysis with Boundary Elements* [online]. Volume 159. ELSEVIER, 2024. s. 342-351 [cit.

- 2024-07-20]. ISSN 0955-7997. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955799723005763>
62. TIAN, X. [et al.]. Numerical and experimental study on the effects of a ceiling beam on the critical velocity of a tunnel fire based on virtual fire source. In: *International Journal of Thermal Sciences* [online]. Volume 159. ELSEVIER, 2021. [cit. 2024-02-27]. ISSN 1290-0729. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S129007292031084X?via%3Dihub>
63. BYRNES, A. [et al.]. Final Report: The Jack Rabbit II Project's Impacts on Emergency Responders. In: *U.S. Army Dugway Proving Ground* [online]. Utah: Utah Valley University, 2017. [2023-08-17]. Dostupné z:
<https://www.uvu.edu/es/docs/jackrabbit/jr17/finalreports/uvu-jack-rabbit-final-report-2017.pdf>
64. DAMON, N., NORMAN, L., ALLISON, H. Final Test Report for Jack Rabbit (JR) II. 2017. In: *U.S. Army Dugway Proving Ground* [online]. 2017. [2023-08-17]. Dostupné z:
https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/CSAC_Jack%20Rabbit%20II%20Final%20Report.pdf
65. JONSSON L. [et al.]. Toxic gas clouds: effects and implications of dry deposition on concentration. In: *Journal of Hazardous Materials* [online]. Vol. 124, Issues 1-3. ELSEVIER, 2005. s. 1-18. [cit. 2023-06-20]. ISSN: 1873-3336. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389405002013?via%3Dihub>
66. SCHATZ, K.W., KOOPMAN, R.P. Water spray mitigation of hydrofluoric acid releases. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industry* 3 [online]. Vol. 3, Issue 2. ELSEVIER, 1990. s. 222-223 [cit. 2022-12-05]. ISSN: 1873-3352.

Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/095042309085006U>.

67. TAUSEEF, S. M. [et al.]. A critical assessment of available software for forecasting the impact of accidents in chemical process industry. In: *International Journal of Engineering, Science and Mathematics* [online]. Vol. 6, Issue 7. International Journals of Multidisciplinary Research Academy, 2017. s. 269-289 [cit. 2022-12-10]. ISSN: 1878-2442. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321330454_A_critical_assessment_of_available_software_for_forecasting_the_impact_of_accidents_in_chemical_process_industry
68. CHAN, W.R. [et al.]. Effectiveness of urban shelter-in-place. II. Residential districts. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 41, Issue 33. ELSEVIER, 2007. s. 7082–7095 [cit. 2022-10-10]. ISSN: 2320-0294. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231007004347>
69. HANNA, S.R. [et al.]. Comparison of Six Widely-Used Dense Gas Dispersion Models for Three Actual Railcar Accidents. In: *NATO Science for Peace and Security Series Series C: Environmental Security* [online]. Springer, Dordrecht, 2008. s. 443-451. [cit. 2022-08-12]. ISBN 978-1-4020-8453-9
70. TURNER, D. Comparisons of Dense Gas Dispersion Models with Field Experiments. In: *THE FISRT RESPONDER* [online]. Vol. VII, Issue 11. AristaTek, 2008 [cit. 2023-11-10]. Dostupné z: <https://aristatek.com/Newsletter/NOV08/NOV08ts.aspx>
71. BLAHA, F. *Compliance Guidance and Model Risk Management Program for Water Treatment Plants*. Denver, Colorado: AWWA Research Foundation and U.S. EPA, 1998. ISBN 0-89867-965-6.
72. HENDL, Jan. *Kvalitativní výzkum: základní metody a aplikace*. Praha: Portál, 2005. ISBN 80-7367-040-2.

73. Chlorine Institute, 2020. *Jack Rabbit: Chlorine Properties*. YouTube [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=AQk_vdjQ7lw&t=700s
74. Flow Visualization of Jack Rabbit II Trial 5, 2023. YouTube [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=jslzDvzNHBA>
75. ENTWISTLE, E. [et al.]. Constructing new seismograms from old earthquakes: Retrospective seismology at multiple length scales. In: *J. Geophys. Res. Solid Earth* [online]. Vol. 120, Issue 4. ADVANCING EARTH AND SPACE SCIENCE, 2015. s. 2466–2490 [cit. 2022-08-26]. Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JB011607>
76. HAO T. [et al.]. An observational study on the impact of sea-land breeze and low-level jet on air pollutant transport in the Bohai Bay. In: *Atmospheric Pollution Research* [online]. Volume 15, Issue 7. ELSEVIER, 2024. [cit. 2024-06-26]. ISSN 1309-1042, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1309104224001089>
77. Bríza. Wikipedie [online]. [cit. 2022-08-26]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Br%C3%ADza>
78. BRITTER, R. [et al.]. Toxic industrial chemical (TIC) source emissions modeling for pressurized liquefied gases. In: *Atmospheric Environment - ATMOS ENVIRON* [online]. Volume 45, Issue 1. ELSEVIER, 2011. s. 1-25. [cit. 2022-10-26]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231010007867>
79. Chlorine: chemical element. In: *Britannica* [online]. The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2024. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/chlorine>. Accessed 21 April 2024.
80. Explosive properties of chlorine dioxide. In: *Chemistry* [online]. Wilco Oelen, 2024. [cit. 2024-03-06]. Dostupné z:

https://woelen.homescience.net/science/chem/exps/ClO2_properties/index.html

81. MATĚJKA, J. [et al.]. Chemická služba: učební skripta. 1nd ed. Praha: Ministerstvo vnitra - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2012. ISBN 978-80-87544-09-9.
82. ČESKO. Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2007, Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361>
83. Chemical Weapons In WW1. In: *AR.INSPIREDPENCIL* [online]. 2021. [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://ar.inspiredpencil.com/pictures-2023/chemical-weapons-in-ww1>
84. CHOW, F.K., KOSOVIC B., CHAN, S. Source Inversion for Contaminant Plume Dispersion in Urban Environments Using Building-Resolving Simulations. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* [online]. Vol. 47, Issue 6. American Meteorological Society, 2008. s. 1553–1572. [cit. 2023-08-26]. ISSN: 1558-8432. Dostupné z: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/47/6/2007jamc1733.1.xml>
85. NEOPHYTOU, M. [et al.]. An inter-comparison of three urban wind models using Oklahoma City Joint Urban 2003 wind field measurements. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [online]. Vol. 99, Issue 4. ELSEVIER, 2011. s. 357-368. [cit. 2023-11-06]. ISSN 0167-6105. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167610511000122?via%3Dihub>
86. ZHANG, M. [et al.]. Urban-canopy airflow dynamics: A numerical investigation of drag forces and distribution for generic neighborhoods, and their relationships with breathability. In: *Science of The Total Environment* [online]. Vol. 926. ELSEVIER, 2024. [cit. 2024-06-06]. ISSN 0048-9697. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972401979X?via%3Dihub>

87. VLČEK, J. *Modelace nehody železniční cisterny převážející chlor na nádraží v Ústí nad Labem*. Kladno, 2021. [cit. 2023-04-15]. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství. Dostupné z:
<https://theses.cz/id/u5xvvl/>.
88. HANUŠ, M. *Analýza a hodnocení rizik při stáčení chloru ve Spolchemii, a. s.* Ostrava, 2011. [cit. 2023-04-15]. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Dostupné z:
https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/88655/HAN441_FBI_B3908_3908R001_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y
89. HANNA, S. Britter and McQuaid (B&M) 1988 workbook nomograms for dense gas modeling applied to the Jack Rabbit II chlorine release trials. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 232. ELSEVIER, 2020. [2023-12-17]. ISSN 1352-2310. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231020302740>
90. GANT, S. [et al.]. Dense gas dispersion model development and testing for the Jack Rabbit II phase 1 chlorine release experiments. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 192. ELSEVIER, 2018. s. 218-240. [2024-06-20]. ISSN 1352-2310. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231018305260?via%3Dihub>
91. WITHERS, R.M.J. and LEES, F.P. The assessment of major hazards: The lethal toxicity of chlorine: Part 3, crosschecks from gas warfare. In: *Journal of Hazardous Materials* [online]. Vol. 15, Issue 3. ELSEVIER, 1987. s. 301-342 [2024-06-20]. ISSN: 1873-3336. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0304389487850331>

92. GRIFFITHS, R.F. and FRYER, L.S. A comparison between dense-gas and passive tracer dispersion estimates for near-source toxic effects of chlorine releases. In: *Journal of Hazardous Materials* [online]. Vol. 19, Issue 2. ELSEVIER, 1988. s. 169-181. [2023-06-23]. ISSN: 1873-3336. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0304389488850489>
93. WANG, H. [et al.]. Study on convection and dispersion characteristics of dense gases in urban environment considering trees. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. Vol. 72. ELSEVIER, 2021. [2023-11-17]. ISSN 0950-4230. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423021001868?via%3Dihub>
94. SPICER, T.O. [et al.]. Preliminary assessment of chlorine reactivity with environmental materials accounting for boundary layer and maximum deposition effects. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 256. ELSEVIER, 2021. [2023-05-17]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231021000923?via%3Dihub>
95. MIN, M. [et al.]. 3-D dispersion model for simulation of accidental toxic gas releases in a metropolitan area. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. Vol. 69. ELSEVIER, 2021. [2024-04-27]. ISSN 0950-4230. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423020306240>
96. SOHN, M.D. [et al.]. Analysis of a series of urban-scale chlorine dispersion experiments and implications on indoor health consequences. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 212. ELSEVIER, 2019. s. 83-89. [2024-01-12]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231019303097?via%3Dihub>

97. DANDRIEUX-BONY, A. [et al.]. A simple model for calculating chlorine concentrations behind a water spray in case of small releases. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. Vol. 18, Issues 4–6. ELSEVIER, 2005. s. 245-253. [2024-01-22]. ISSN 0950-4230. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095042300500077X>
98. HANNA, S.R. [et al.]. Detailed Simulations of Atmospheric Flow and Dispersion in Downtown Manhattan: An Application of Five Computational Fluid Dynamics Models. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. Vol. 87, Issue 12. American Meteorological Society, 2006. s. 1713-1726. [2024-01-22]. ISSN: 1520-0477. Dostupné z: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/87/12/bams-87-12-1713.xml>
99. LOVETT, G. Atmospheric Deposition of Nutrients and Pollutants in North America : An Ecological Perspective. In: *ECOLOGICAL APPLICATIONS* [online]. Vol. 4, Issue 4. Ecological Society of America, 1994. s. 629–650. [2023-03-22]. ISSN: 1939-5582. Dostupné z: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2307/1941997>
100. SOURABIE, DEO-GRATIAS. [et al.]. First quantitative constraints on chlorine 36 dry deposition velocities on grassland: Comparing measurements and modelling results. In: *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. Vol. 268–269, 2023. ELSEVIER, 2023. [2024-04-20]. ISSN 0265-931X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X23001571?via%3Dihub>
101. HUSSEIN, T. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 43, Issue 4. ELSEVIER, 2009. s. 905-914. [2023-09-16]. ISSN 1352-2310. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231008010005?via%3Dihub>

102. RAUPACH, M.R. [et al.]. Endosulfan Transport: II. Modeling airborne Dispersal and Deposition by Spray and Vapor. In: *Journal of Environmental Quality*. Vol. 30, Issue 3. John Wiley & Sons, Inc., 2001. s. 729-740. [2024-01-19]. ISSN:0047-2425.
103. BAE, S. Y. [et al.]. Development of an Aerosol Dynamics Model for Dry Deposition Process Using the Moment Method. In: *Aerosol Science and Technology* [online]. Vol. 43, Issue 6. s. 570-580. Philadelphia : American Association for Aerosol Science, 2009. ISSN 0278-6826. [cit. 2023-07-20].
Dostupné z:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786820902798476#d1e286>
104. Metodika pro realizaci výsadeb dřevin pohlcujících prachové částice podél silničních komunikací i u tzv. plošných zdrojů prašnosti. Atem - Ateliér ekologických modelů, s. r. o. 2016. Dostupné z:
[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zdroje_znecistovani_ovzdusi/\\$FILE/000-metodika_vysadby_drevin-20200714.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zdroje_znecistovani_ovzdusi/$FILE/000-metodika_vysadby_drevin-20200714.pdf)
105. ZHANG, L. [et al.]. A Size-Segregated Dry Deposition Scheme for an Atmospheric Aerosol Module. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 35, Issue 3. ELSEVIER, 2001. s. 549-560. ISSN: 1352-2310. [cit. 2023-09-01].
Dostupné z:
<http://data.cas.manchester.ac.uk/database3/Ian%20Longley/old%20projects/Tiwi%20Islands/input%20data/Zhang%20et%20al%20%202001.pdf>
106. TSENG, J.M. [et al.]. Emergency response plan of chlorine gas for process plants in Taiwan. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. Vol. 21, Issue 4. ELSEVIER, 2008. s. 393-399. [cit. 2022-08-29]. ISSN 0950-4230.
Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423008000077?via%3Dihub>

107. Spolchemie Ústí nad Labem. In: *Toxické látky* [online]. Praha: Arnika, 2022. [cit. 2022-08-29]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/nase-temata/prumyslove-znecisteni/kauzy-v-cr/spolchemie-usti-nad-labem>
108. MILETÍN, J. a KONEČNÝ, P. *ADR 2015: přeprava nebezpečných věcí po silnici: příručka pro školení řidičů a osob podílejících se na přepravě nebezpečných věcí dle Dohody ADR*. 1. vydání. Praha: M Konzult s.r.o., 2015. ISBN 978-80-902202-4-9.
109. WILLIAMS, Ch. Scale Model and Flow Visualization of Jack Rabbit II Chlorine Field Test. In: *Chemical Engineering Undergraduate Honors Theses* [online]. Vol. 5. 2019. [cit. 2023-09-01]. Dostupné z: <https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1156&context=cheuguht>
110. PENG, N. [et al.]. Computational study on the transmission of the SARS-CoV-2 virus through aerosol in an elevator cabin: Effect of the ventilation system In: *Physics of Fluids* [online]. Vol. 33, Issue 10. AIP PUBLISHING, 2021. [cit. 2024-06-10]. ISSN: 1070-6631. Dostupné z: <https://pubs.aip.org/aip/pof/article/33/10/103325/1064984/Computational-study-on-the-transmission-of-the>
111. MAREK, J.; SKŘEHOT, Petr A.; HON, Z. Retrospektivní analýza masivního úniku kapalného chloru v jordánském přístavu Al Durra. In: *AWHP 2022: Aspekty práce pomáhajících profesí: sborník příspěvků ze studentské vědecké konference*. Praha: ČVUT, Fakulta biomedicínského inženýrství, 2022. s. 464-482. ISBN 978-80-01-06982-0.
112. ZHAO P. and LIU Z. Impacts of Wind Speed and Leakage Height on Chlorine Leakage Diffusion. In: *Procedia Engineering* [online]. Vol. 84.

- ELSEVIER, 2014. s. 672-681. [cit. 2023-05-12]. ISSN: 1877-7058. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814018062>
113. BRENNAN E., LEONE I.A., DAINES R.H. Response of Pine Trees to Chlorine in the Atmosphere. In: *FOREST SCIENCE*. Vol 12, Issue 4. OXFORD ACADEMIC, 1966. s. 386–390. ISSN 0015-749X.
114. RYBÁŘ, P. Mlhová stabilní hasicí zařízení pro protipožární ochranu objektů a technologií (1. část). In: *Požární bezpečnost staveb* [online]. Portál TZB-info, 2017. [cit. 2023-06-07]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/16205-mlhova-stabilni-hasici-zarizeni-pro-protipozarni-ochranu-objektu-a-technologie-1-cast>
115. POUYAKIAN, M. [et al.]. A systematic review of consequence modeling studies of the process accidents in Iran from 2006 to 2022. In: *Heliyon* [online]. Vol. 9, Issue 2. ELSEVIER, 2023. [cit. 2023-08-25]. ISSN 2405-8440. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13550>.
116. BUCKLEY, R. [et al.]. A case study of chlorine transport and fate following a large accidental release. In: *Atmospheric Environment* [online]. Vol. 62. ELSEVIER, 2012. s. 184-198. [cit. 2023-09-01]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.025>.
117. Bombardier Aviation. In: *Fuel Storage & Transfer Systems* [online]. Core Engineered Solutions, 2024. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://core-es.com/solutions/bulk-storage-tanks>
118. MAPY.CZ. Ústí nad Labem-centrum. Online. Seznam.cz, 2023. Dostupné z: <https://mapy.cz/letecka?q=spolchemie&source=firm&id=417311&ds=1&x=14.0257815&y=50.6619306&z=16>, [citováno 2023-09-10].
119. MAPY.CZ. Al Durra, Jordánsko. Online. Seznam.cz, 2023. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?source=osm&id=14008681&ds=1&x=34.9380754&y=29.3178988&z=10>, [citováno 2023-09-10].

120. Computational Fluid Dynamics (CFD). In: *STRUCTURAL ENGINEERING* [online]. SWECO, 2023. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.sweco.fi/en/services/buildings-and-urban-areas/structural-engineering/simulations/cfd/>
121. Stolní vaporizér Arizer XQ2. In: Vaporizéry [online]. Weedshop, 2023. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.weedshop.cz/zbozi/vaporizer-arizer-xq2/>
122. Masivní únik. In: *Encyklopedie BOZP* [online]. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., 2023. Stránka naposledy edit. 15. 05. 2024 v 17:06. [cit. 2024-06-03]. Česká verze. Dostupné z: https://ebozp.vubp.cz/wiki/index.php?title=Masivní_únik
123. APGAR, B. Ominous cloud' sickened hundreds in Henderson 30 years ago. In: *Las Vegas Review-Journal* [online]. Las Vegas Review-Journal, Inc., 2021. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.reviewjournal.com/local/henderson/ominous-cloud-sickened-hundreds-in-henderson-30-years-ago-2344150/>

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Oblak těžkého plynu vzniklý při jednorázovém úniku látky	18
Obrázek 2 Vznik oblaku aerosolu po dvoufázovém úniku zkapalněného plynu (situace nahoře), resp. po úniku plynu typu „jet“ (situace dole).....	19
Obrázek 3 Variantní scénáře úniků plyných látek skladovaných za různých podmínek	21
Obrázek 4 Jednotlivé fáze rozptylu oblaku těžkého plynu (u je rychlost větru, tj. vzduchu vstupujícího do oblaku a u_c je rychlost postupu čela oblaku) .	22
Obrázek 5 Kapalný chlor s nasycenými párami.....	25
Obrázek 6 První použití chloru německými vojáky	29
Obrázek 7 Letecký pohled na německý plynový útok	29
Obrázek 8 Výjevy po útoku chlorem (obraz Johna Singera Sargenta z roku 1918) .	29
Obrázek 9 Označení železniční cisterny převážející chlor	36
Obrázek 10 Saturační křivka pro chlor	37
Obrázek 11 Železniční cisterna pro přepravu 66 tun kapalného chloru používaná ve SPOLCHEMIE	37
Obrázek 12 Mobilní zásobník 20FT T50	38
Obrázek 13 Stabilní cylindrické zásobníky pro venkovní skladování chloru	38
Obrázek 14 Výstup z databáze eMARS shrnujících havárie provázené únikem chloru	47
Obrázek 15 Pohled na již stratifikovaný oblak chloru vznášející se nad městem Henderson	53
Obrázek 16 Pohled na místo nehody v Graniteville	58
Obrázek 17 Pohled na místo nehody v Graniteville.....	58
Obrázek 18 Pohled na poškozené borovice ve vzdálenosti 30 metrů od místa nehody v Graniteville	59

Obrázek 19 Pohled na poškozené borovice ve vzdálenosti 100 metrů od místa nehody v Graniteville	59
Obrázek 20 Pohled na unikající chlor	61
Obrázek 21 Oblak těžkého plynu v prostoru železniční vlečky	61
Obrázek 22 Použití "barevných knih" v rámci konstrukce programu EFFECTS pro provádění kvantitativního hodnocení rizika	64
Obrázek 23 Schéma box modelu použitého v počítačovém modulu SLAB.....	71
Obrázek 24 Princip aplikace modelu virtuálního zdroje podle Yanga a kol.	75
Obrázek 25 Schéma formování oblaku těžkého plynu při masívním úniku a jeho vývoj v čase	77
Obrázek 26 Vektory přízemního větru v centrální obchodní čtvrti Oklahoma City	78
Obrázek 27 Princip vzniku mořské brízy	78
Obrázek 28 Okamžik zahájení masívního úniku chloru ze zásobníku.....	82
Obrázek 29 Okamžik zahájení masívního úniku chloru ze zásobníku.....	82
Obrázek 30 Masívní únik chloru ze zásobníku – záznam z termokamery	82
Obrázek 31 Únik chloru menší rupturou	83
Obrázek 32 Vzhled oblaku chloru během fáze tečení ve volném prostoru	83
Obrázek 33 Rozšiřování oblaku chloru do prostoru	83
Obrázek 34 Oblak obtéká blízké překážky	84
Obrázek 35 Naředění oblaku vzduchem a jeho postupná homogenizace – 1 minuta od zahájení úniku.....	84
Obrázek 36 Naředění oblaku vzduchem a jeho postupná homogenizace – 3 minuty od zahájení úniku.....	84
Obrázek 37 Stratifikace oblaku – cca 10 minut od zahájení úniku	85
Obrázek 38 Obtékání velkých terénních překážek vzduchem.....	89
Obrázek 39 Turbulence ve vertikálních směrech při proudění vzduchu podél budov	90

Obrázek 40 Turbulence v horizontálních směrech při proudění vzduchu podél budov.....	90
Obrázek 41 Vizualizace složitého charakteru proudění vzduchu nad velkoměstem a šíření těžkého plynu v uličních kaňonech (simulace pomocí modelu CFD)	91
Obrázek 42 Predikce šíření oblaku těžkého plynu v silně urbanizovaném prostředí vytvořená pomocí CFD modelu FEM3MP.....	92
Obrázek 43 Vliv stěnové bariéry o různé výšce na průběh koncentrace chloru.....	94
Obrázek 44 Princip suché depozice plyných látek a aerosolových částic v korunách stromů.....	96
Obrázek 45 Účinnost zachytu v závislosti na hodnotě Stokesova čísla podle Raupachova modelu.....	98
Obrázek 46 Závislost Stokesova čísla na velikosti částic aerosolu a rychlosti jejich pohybu ve vzduchu.....	98
Obrázek 47 Vliv jednotlivých procesů na suchou depozici aerosolových částic	100
Obrázek 48 Závislost depoziční rychlosti na typu povrchu.....	100
Obrázek 49 Závislost depoziční rychlosti impakce na rychlosti větru	101
Obrázek 50 Stopa po průchodu oblaku chloru jako důsledek interakce chloru s pouštním pískem (Jack Rabbit II, 2016).....	102
Obrázek 51: Mapa oblasti okolo přístavu Al Dura	109
Obrázek 52: Nakládka mobilního zásobníku (v červeném kroužku)	109
Obrázek 53: Pád mobilního zásobníku s následky vzniku ruptur v plášti a okamžitým únikem kapalného chloru.....	110
Obrázek 54 Jednorázový únik chloru	110
Obrázek 55: Pohled na šířící se oblak chloru	111
Obrázek 56: Pohled na přepravní cisternu poškozenou pádem.....	111
Obrázek 57: Zóny zranitelnosti vytvořené v programu ALOHA.....	113
Obrázek 58 Zóny zranitelnosti vynesené na mapový podklad Google Earth.....	115

Obrázek 59: Detailní pohled na červenou a oranžovou zónu zranitelnosti.....	115
Obrázek 60: Průběh koncentrace chloru ve vzdálenosti 50 metrů od místa úniku, kolmo na směr vanutí větru	117
Obrázek 61 Celkový pohled na umístění jednotlivých zájmových objektů – letecký snímek	120
Obrázek 62 Kolejiště u stáčení místa chloru (pohled východním směrem).....	121
Obrázek 63 Stěna lemující objekty Chlorové chemie od západu a severu	121
Obrázek 64 Tři zásobníky se skladovací kapacitou 65 tun kapalného chloru.	123
Obrázek 65 Dva zásobníky se skladovací kapacitou 55 tun kapalného chloru.	123
Obrázek 66 3D letecký snímek areálu SPOLCHEMIE	124
Obrázek 67 Fyzický 3D model areálu SPOLCHEMIE – pohled shora.....	125
Obrázek 68 Fyzický 3D model areálu SPOLCHEMIE – pohled západovýchodním směrem z profilu	125
Obrázek 69 Fyzický 3D model areálu SPOLCHEMIE – pohled severojižním směrem	125
Obrázek 70 Fyzický 3D model areálu SPOLCHEMIE – pohled východozápadním směrem	126
Obrázek 71 Vaporizér Arizer XQ2.....	127
Obrázek 72 Umístění emisního zdroje	127
Obrázek 73 Simulovaná emise	128
Obrázek 74 Šíření aerosolu mezi továrními objekty v modelu areálu SPOLCHEMIE	129
Obrázek 75 Ověření šíření chloru v urbanizovaném prostředí pomocí laboratorního experimentu za využití netoxického stopovače	130
Obrázek 76 Detailní pohled na turbulentní proudění při šíření oblaku aerosolu mezi kontejnery	130
Obrázek 77 Vizualizace předpokládaného šíření oblaku chloru mezi objekty v areálu SPOLCHEMIE.....	132

Obrázek 78 Lokalizace virtuálního zdroje.....	132
Obrázek 79 Výsledky simulace Scénáře 0.1.....	136
Obrázek 80 Určení vzdálenosti zájmových bodů a jejich převýšení od místa virtuálního zdroje	139
Obrázek 81 Pohled z vnitřku automobilu na šířící se oblak chloru.....	148
Obrázek 82 Měření koncentrace chloru uvnitř osobního automobilu zasaženého oblakem chloru.....	149
Obrázek 83 Maximální koncentrace chloru naměřené během experimentů Jack Rabbit II versus koncentrace predikované na základě simulace pomocí počítačových nástrojů DRIFT a PHAST	158
Obrázek 84: Definice Masívního úniku převzatá do Encyklopedie BOZP	163

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Fyzikálně-chemické vlastnosti chloru	24
Tabulka 2 Informační karta pro chlor podle NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards	27
Tabulka 3 Vybrané toxikologické limity pro chlor.....	31
Tabulka 4 Statistika havárií s následkem úniku chloru.....	40
Tabulka 5 Charakteristika jednotlivých druhů povrchů a jejich hodnot koeficientu drsnosti povrchu z_0	88
Tabulka 6 Hodnoty koeficientu α podle jednotlivých typů povrchů.....	99
Tabulka 7 Maximální depozice plynného chloru na vybraných depozičních površích.....	102
Tabulka 8 Parametry události v Al Durra	112
Tabulka 9 Uvažované meteorologické podmínky pro modelování vybraných scénářů.....	138
Tabulka 10 Výsledky modelování virtuálního zdroje.....	140
Tabulka 11 Návrh korekčních koeficientů popisujících vliv faktorů prostředí	142

12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Nulový scénář 1 m.s⁻¹ (Scénář 0.1)
- Příloha 2** Nulový scénář 3 m.s⁻¹ (Scénář 0.3)
- Příloha 3** Virtuální zdroj kulový zásobník, 1 m.s⁻¹ (Scénář 2.1)
- Příloha 4** Virtuální zdroj kulový zásobník, 3 m.s⁻¹ (Scénář 2.3)
- Příloha 5** Virtuální zdroj kaluž, 1 m.s⁻¹ (Scénář 3.1)
- Příloha 6** Virtuální zdroj kaluž, 3 m.s⁻¹ (Scénář 3.3)
- Příloha 7** Grafické vyobrazení na podkladu areálu SPOLCHEMIE

13 PŘÍLOHY

Příloha 1: Nulový scénář, 1 m.s⁻¹ (Scénář 0.1)

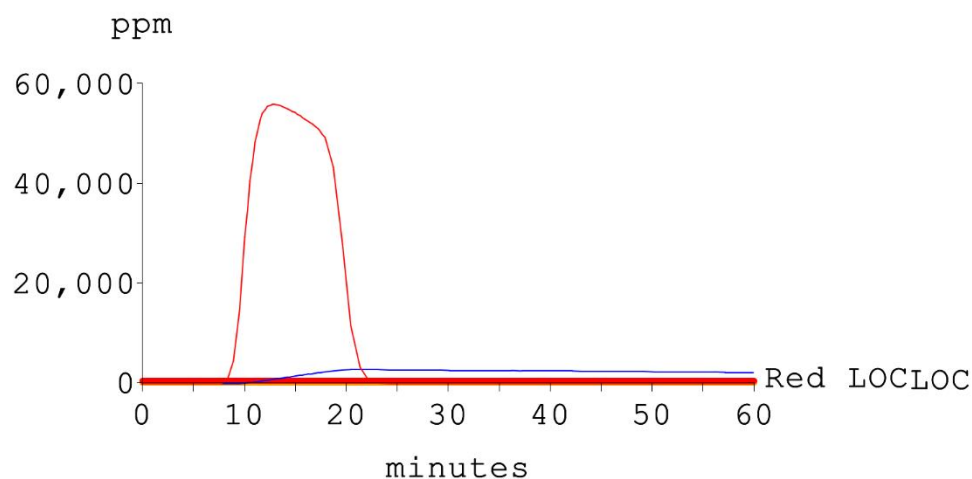
Hodnoty koncentrací chloru ve vzdálenostech 260 metrů, resp. 415 metrů od zdroje úniku.

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



```
Time: December 23, 2019 0600 hours ST (user specified)
Chemical Name: CHLORINE
Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (sheltered double storied)
THREAT AT POINT:
Model Run: Heavy Gas
Concentration Estimates at the point:
Downwind: 260 meters                               Off Centerline: 0 meters
Max Concentration:
Outdoor: 55,800 ppm
Indoor: 2,800 ppm
```



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 260 meters Off Centerline:

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2019 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

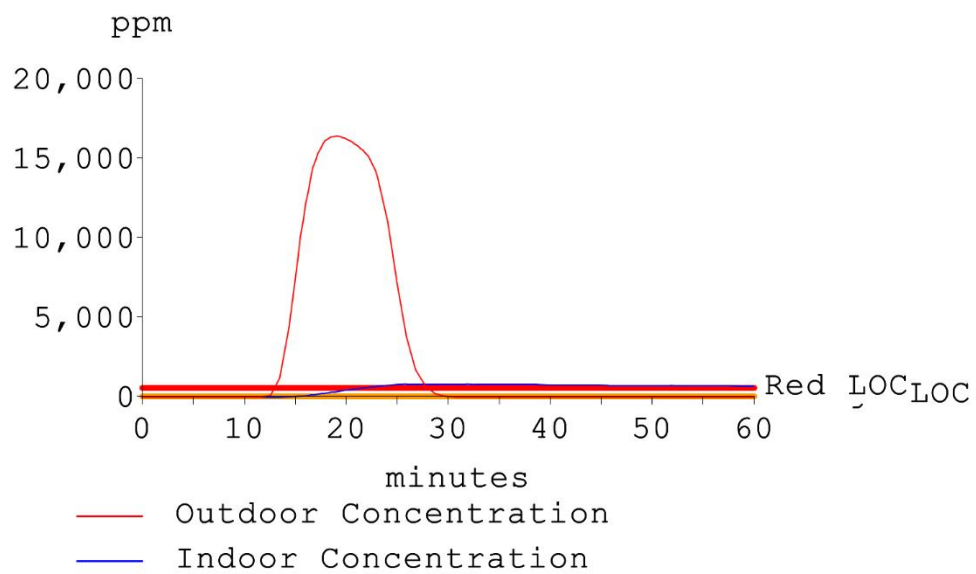
Downwind: 415 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 16,300 ppm

Indoor: 831 ppm



At Point: Downwind: 415 meters Off Centerline:

Příloha 2: Nulový scénář, 3 m.s⁻¹ (Scénář 0.3)

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2019 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.45 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

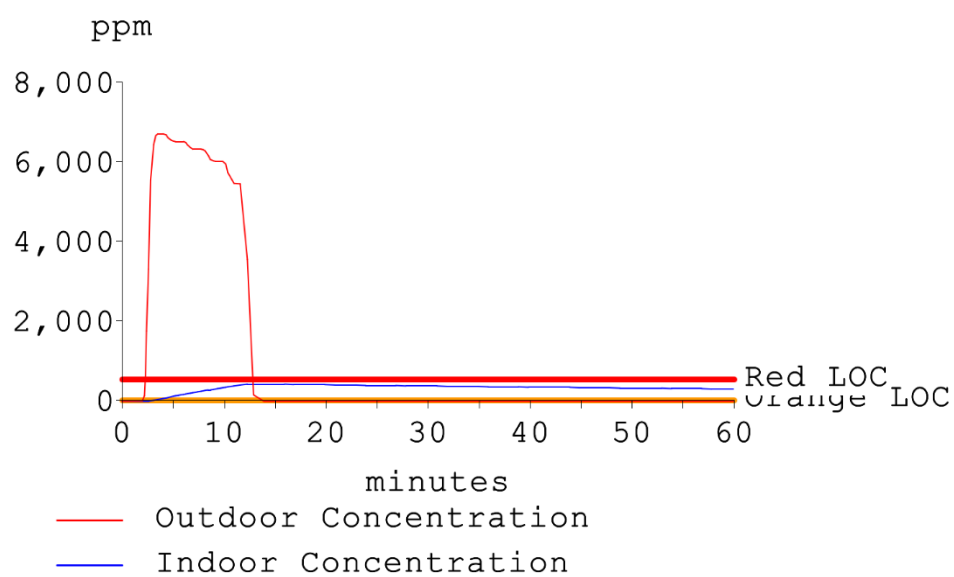
Downwind: 260 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 6,700 ppm

Indoor: 433 ppm



At Point: Downwind: 260 meters Off Centerline:

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2019 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.45 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

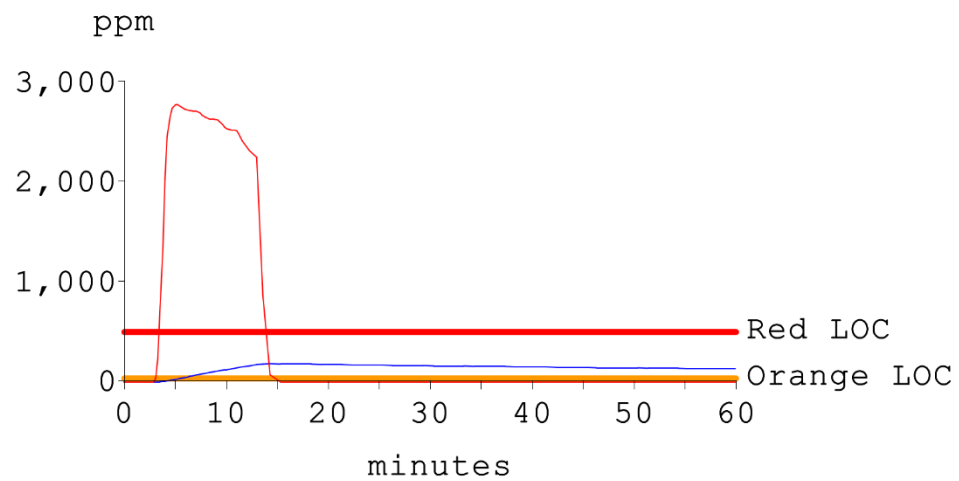
Downwind: 415 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 2,770 ppm

Indoor: 180 ppm



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 415 meters Off Centerline:

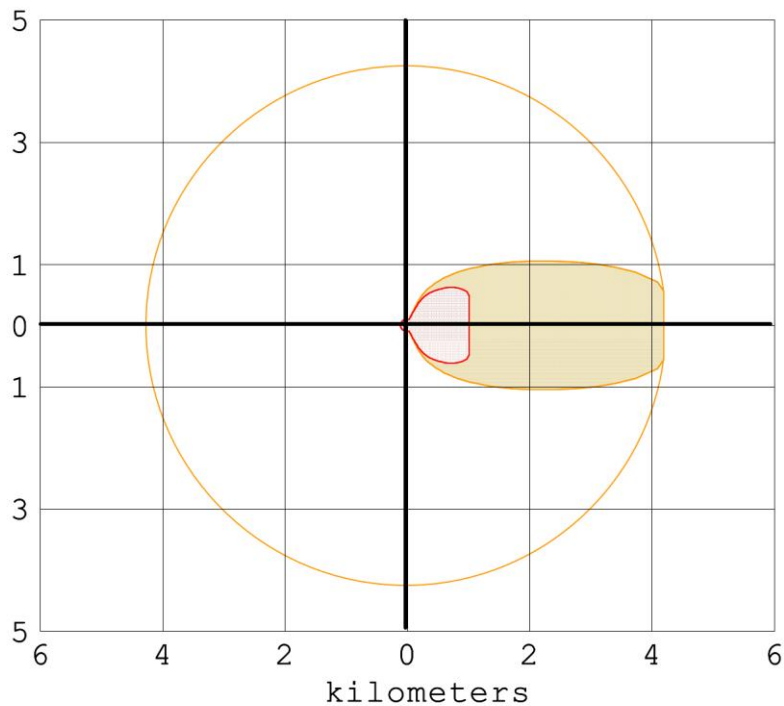
Příloha 3: Virtuální zdroj kulový zásobník, 1 m.s⁻¹ (Scénář 2.1)

Toxic Threat Zone

ALOHA® 5.4.7 

Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)
Chemical Name: CHLORINE
Wind: 1 meters/second from w at 3 meters
THREAT ZONE: (HEAVY GAS SELECTED)
Model Run: Heavy Gas
Red : 1.0 kilometers --- (500 ppm)
Orange: 4.2 kilometers --- (20 ppm = PAC-3)

kilometers



-  greater than 500 ppm
-  greater than 20 ppm (PAC-3)
-  wind direction confidence lines

Text Summary

ALOHA® 5.4.7



SITE DATA:

Location: USTI NAD LABEM (CZ), CZECH REPUBLIC
Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (sheltered double storied)
Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20

ppm

IDLH: 10 ppm
Ambient Boiling Point: -34.6° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 1 meters/second from w at 3 meters
Ground Roughness: 100.0 centimeters Cloud Cover: 10 tenths
Air Temperature: 0° C Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 90%

SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in spherical tank
Non-flammable chemical is escaping from tank
Tank Diameter: 18 meters Tank Volume: 3,054 cubic meters
Tank contains gas only Internal Temperature: 0° C
Chemical Mass in Tank: 39.3 tons
Circular Opening Diameter: 28.1 centimeters
Release Duration: 20 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 2,470 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 24,957 kilograms

THREAT ZONE: (HEAVY GAS SELECTED)

Model Run: Heavy Gas
Red : 1.0 kilometers --- (500 ppm)
Orange: 4.2 kilometers --- (20 ppm = PAC-3)

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

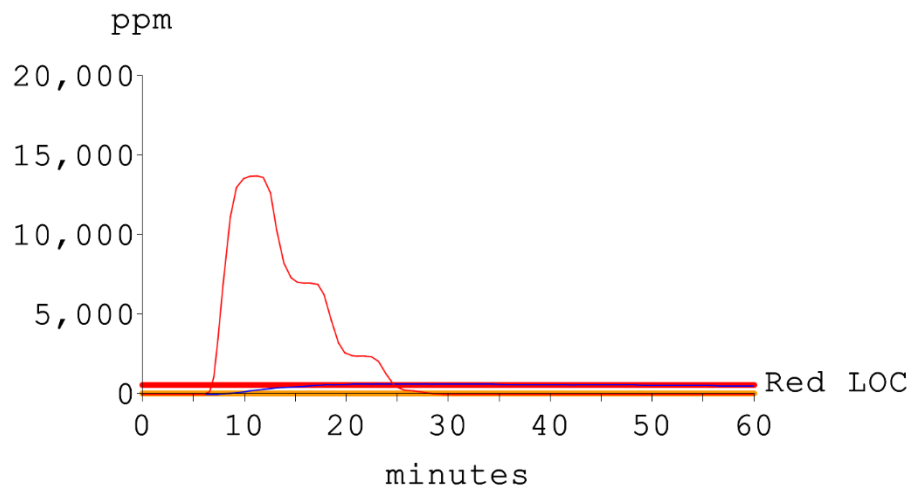
Downwind: 260 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 13,600 ppm

Indoor: 639 ppm



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 260 meters Off Centerline:

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

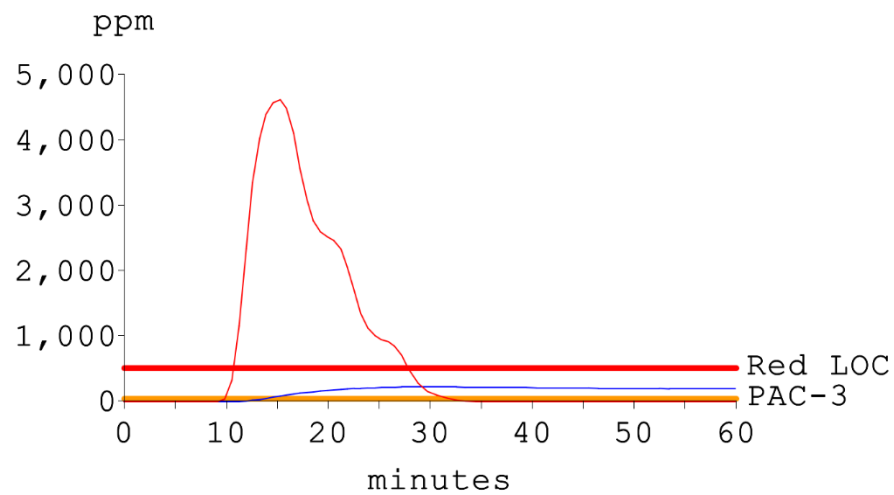
Downwind: 415 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 4,620 ppm

Indoor: 225 ppm



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 415 meters Off Centerline:

Příloha 4: Virtuální zdroj kulový zásobník, 3 m.s⁻¹ (Scénář 2.3)

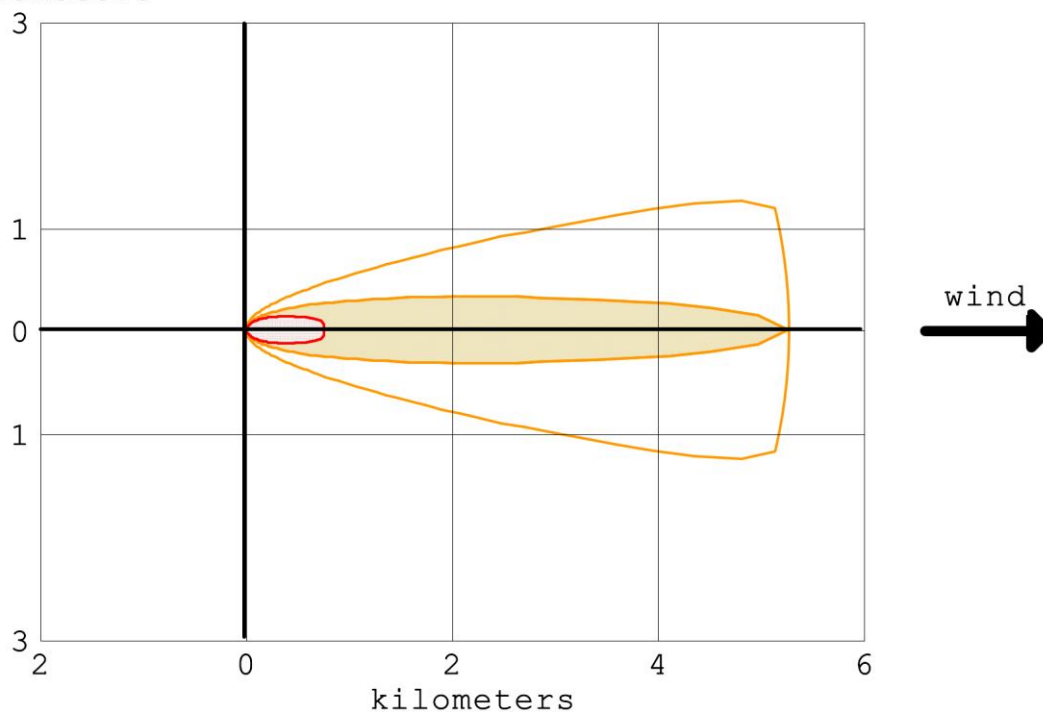
Toxic Threat Zone

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)
Chemical Name: CHLORINE
Wind: 3 meters/second from w at 3 meters
THREAT ZONE: (HEAVY GAS SELECTED)
Model Run: Heavy Gas
Red : 765 meters --- (500 ppm)
Orange: 5.3 kilometers --- (20 ppm = PAC-3)

kilometers



-  greater than 500 ppm
-  greater than 20 ppm (PAC-3)
-  wind direction confidence lines

Source Strength (Release Rate)

ALOHA® 5.4.7



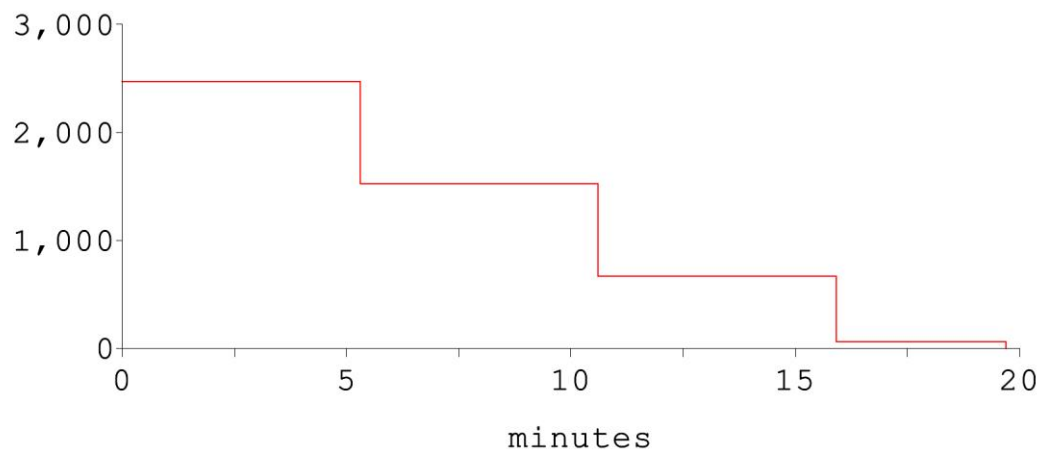
Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in spherical tank
Non-flammable chemical is escaping from tank
Tank Diameter: 18 meters Tank Volume: 3,054 cubic meters
Tank contains gas only Internal Temperature: 0° C
Chemical Mass in Tank: 39.3 tons
Circular Opening Diameter: 28.1 centimeters
Release Duration: 20 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 2,470 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 24,957 kilograms

kilograms/minute



Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7 

Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.45 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

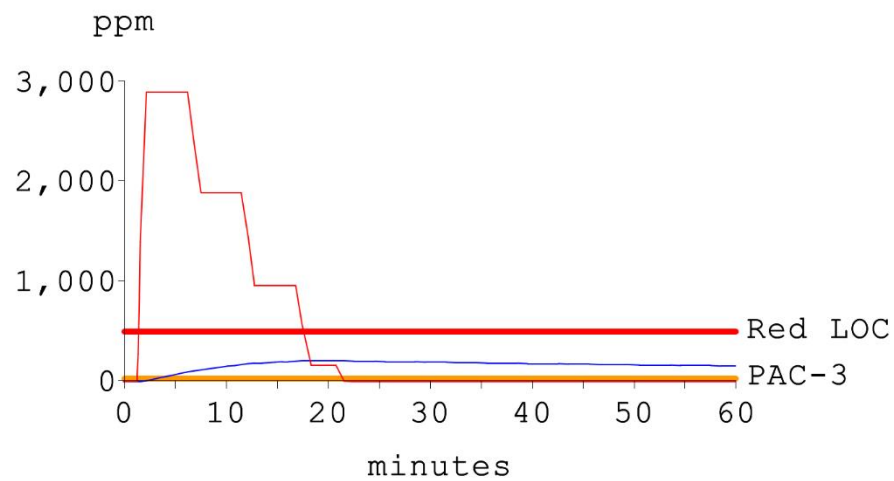
Downwind: 260 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 2,890 ppm

Indoor: 210 ppm



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 260 meters Off Centerline:

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7 

Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.45 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

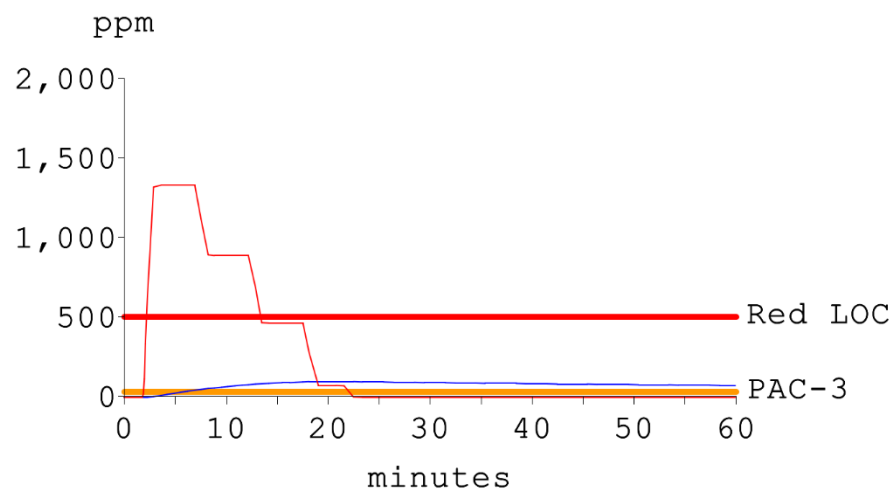
Downwind: 415 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 1,330 ppm

Indoor: 98.1 ppm



Outdoor Concentration

Indoor Concentration

At Point: Downwind: 415 meters Off Centerline:

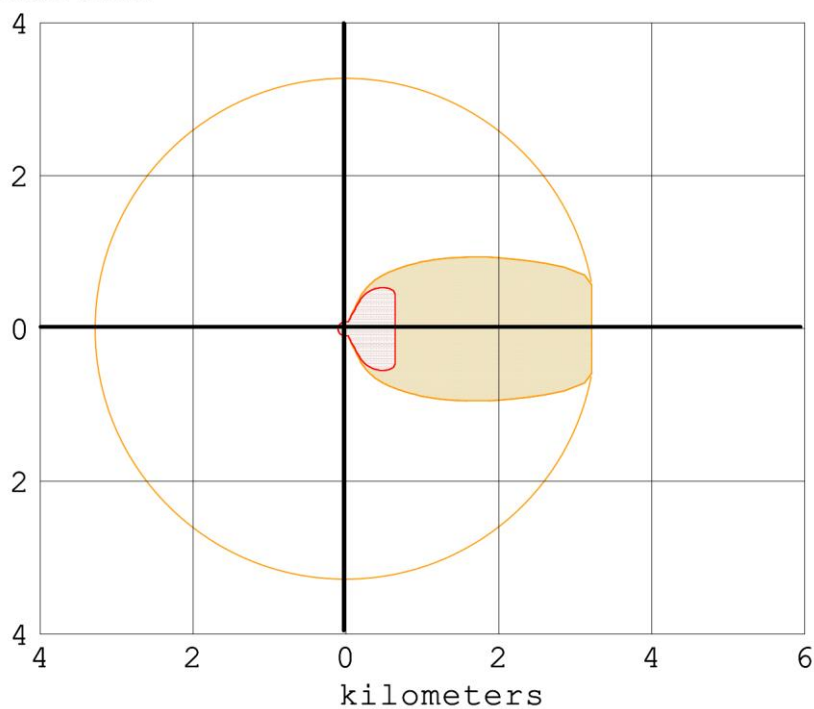
Příloha 5: Virtuální zdroj kaluž, 1 m.s⁻¹ (Scénář 3.1)

Toxic Threat Zone

ALOHA® 5.4.7 

Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)
Chemical Name: CHLORINE
Wind: 1 meters/second from W at 3 meters
THREAT ZONE: (HEAVY GAS SELECTED)
Model Run: Heavy Gas
Red : 649 meters --- (500 ppm)
Orange: 3.2 kilometers --- (20 ppm = PAC-3)

kilometers



-  greater than 500 ppm
-  greater than 20 ppm (PAC-3)
-  wind direction confidence lines

Text Summary

ALOHA® 5.4.7



SITE DATA:

Location: USTI NAD LABEM (CZ), CZECH REPUBLIC
Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (sheltered double storied)
Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20

ppm

IDLH: 10 ppm
Ambient Boiling Point: -34.6° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 1 meters/second from W at 3 meters
Ground Roughness: 100.0 centimeters Cloud Cover: 10 tenths
Air Temperature: 0° C Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 90%

SOURCE STRENGTH:

Evaporating Puddle
Puddle Area: 635 square meters Puddle Mass: 27.4 tons
Ground Type: Default soil Ground Temperature: 0° C
Initial Puddle Temperature: -34.6° C
Release Duration: 50 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 2,470 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 24,857 kilograms

THREAT ZONE: (HEAVY GAS SELECTED)

Model Run: Heavy Gas
Red : 649 meters --- (500 ppm)
Orange: 3.2 kilometers --- (20 ppm = PAC-3)

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

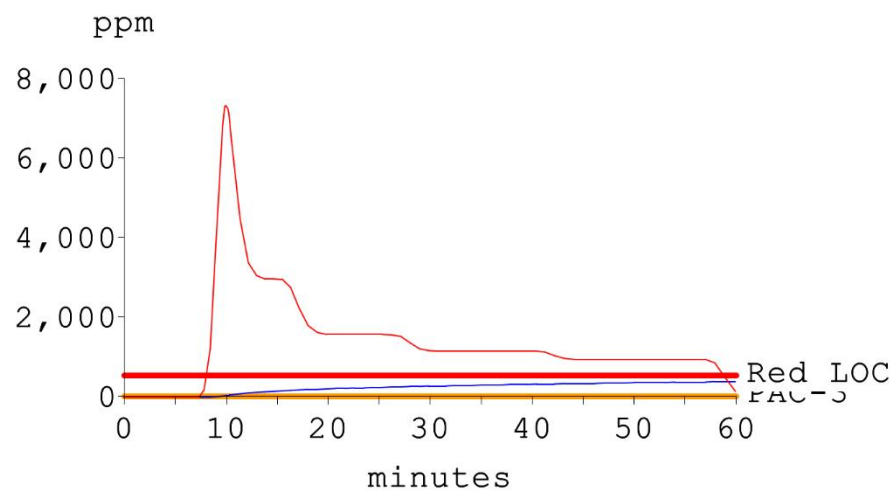
Downwind: 260 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 7,290 ppm

Indoor: 389 ppm



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 260 meters Off Centerline:

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.34 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

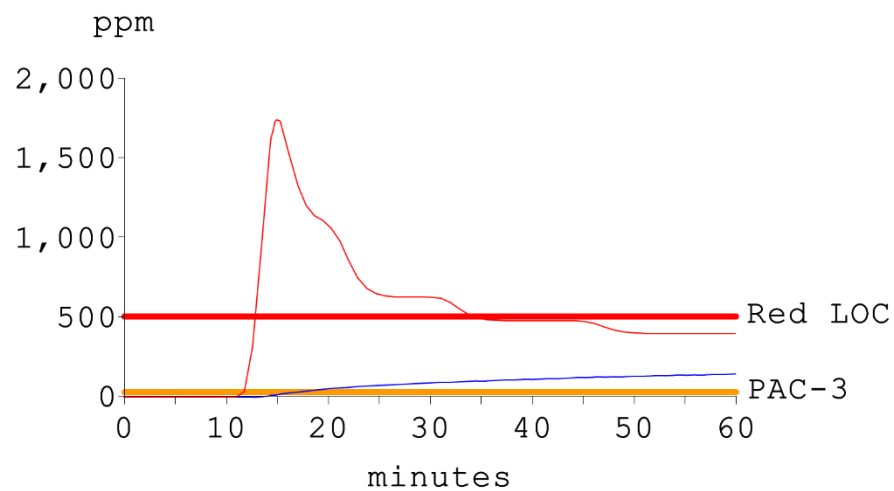
Downwind: 415 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 1,730 ppm

Indoor: 146 ppm



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 415 meters Off Centerline:

Příloha 6: Virtuální zdroj kaluž, 3 m.s⁻¹ (Scénář 3.3)

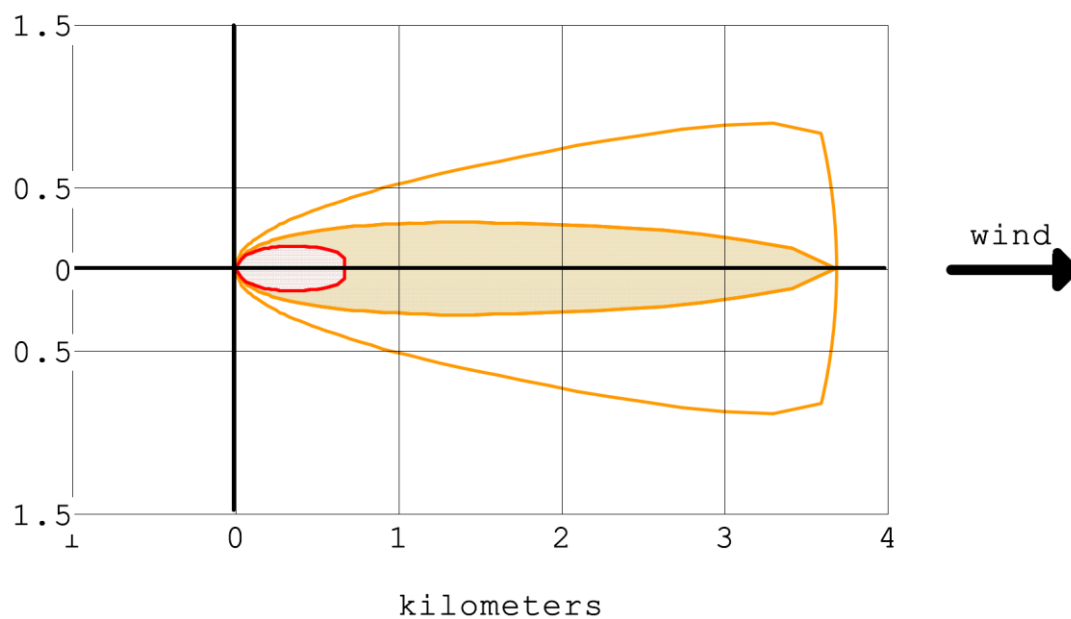
Toxic Threat Zone

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)
Chemical Name: CHLORINE
Wind: 3 meters/second from W at 3 meters
THREAT ZONE: (HEAVY GAS SELECTED)
Model Run: Heavy Gas
Red : 669 meters --- (500 ppm)
Orange: 3.7 kilometers --- (20 ppm = PAC-3)

kilometers



-  greater than 500 ppm
-  greater than 20 ppm (PAC-3)
-  wind direction confidence lines

Text Summary

ALOHA® 5.4.7



SITE DATA:

Location: USTI NAD LABEM (CZ), CZECH REPUBLIC
Building Air Exchanges Per Hour: 0.45 (sheltered double storied)
Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20

ppm

IDLH: 10 ppm
Ambient Boiling Point: -34.6° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 3 meters/second from W at 3 meters
Ground Roughness: 100.0 centimeters Cloud Cover: 10 tenths
Air Temperature: 0° C Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 90%

SOURCE STRENGTH:

Evaporating Puddle
Puddle Area: 585 square meters Puddle Mass: 27.4 tons
Ground Type: Default soil Ground Temperature: 0° C
Initial Puddle Temperature: -34.6° C
Release Duration: 38 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 2,460 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 24,857 kilograms

THREAT ZONE: (HEAVY GAS SELECTED)

Model Run: Heavy Gas
Red : 669 meters --- (500 ppm)
Orange: 3.7 kilometers --- (20 ppm = PAC-3)

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.45 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

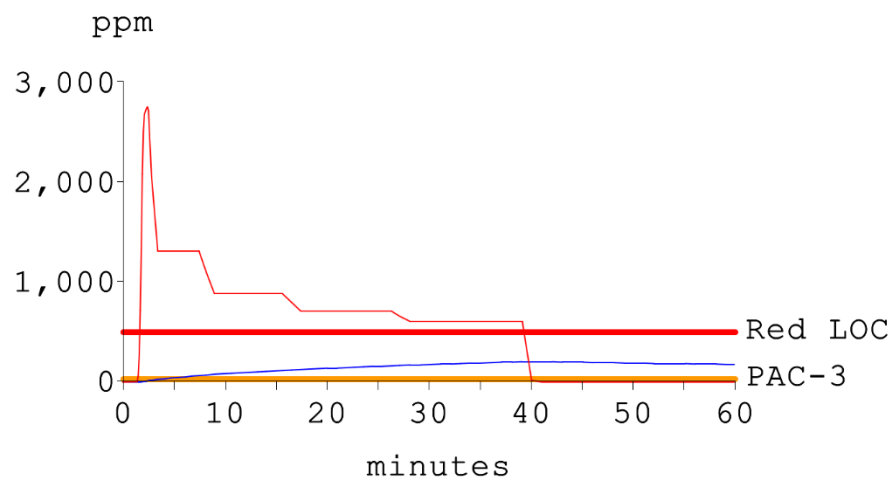
Downwind: 260 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 2,750 ppm

Indoor: 205 ppm



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 260 meters Off Centerline:

Concentration at Point

ALOHA® 5.4.7



Time: December 23, 2023 0600 hours ST (user specified)

Chemical Name: CHLORINE

Building Air Exchanges Per Hour: 0.45 (sheltered double storied)

THREAT AT POINT:

Model Run: Heavy Gas

Concentration Estimates at the point:

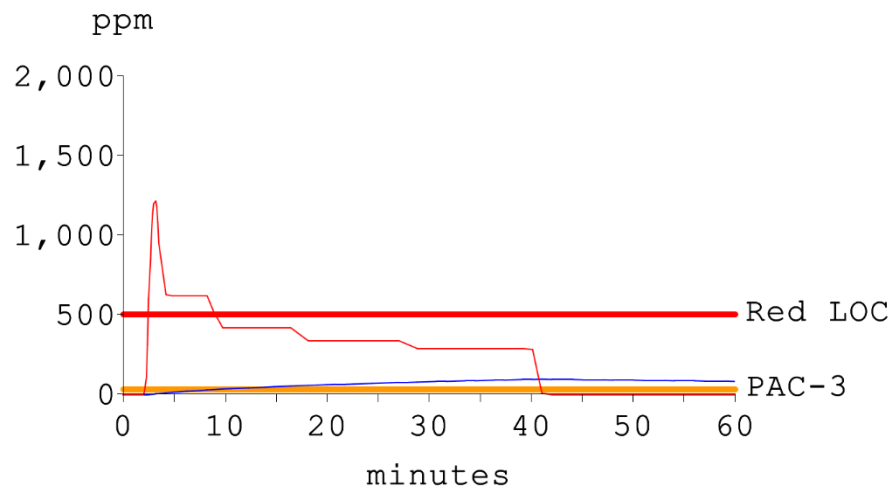
Downwind: 415 meters

Off Centerline: 0 meters

Max Concentration:

Outdoor: 1,220 ppm

Indoor: 97.6 ppm



— Outdoor Concentration

— Indoor Concentration

At Point: Downwind: 415 meters Off Centerline:

Příloha 7: Grafické vyobrazení na podkladu areálu SPOLCHEMIE

Na obrázku níže je uvedena vizualizace předpokládaného rozlivu oblaku chloru v areálu SPOLCHEMIE v případě masivního úniku kapalného chloru ze zásobníků umístěných ve skladových objektech. Nejvíce zasažené oblasti jsou podbarveny červeně a oranžově (červená barva = fáze těžkého zcela nasyceného oblaku chloru, oranžová barva = fáze tečení chloru); v oblasti podbarvené žlutě se předpokládá pasivní rozptyl chloru ve směru vanutí větru. Virtuální zdroj je vyznačen červenou tečkou.

