

ALOHA V PRAXI – případová studie havárie cisterny přepravující nebezpečnou chemickou látku

Radovan Říman, Petr Skřehot, Jan Bumba, Vilém Sluka

Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., Praha, Jeruzalémská 9, 116 52 Praha 1

e-mail: riman@vubp-praha.cz

Abstrakt

Existuje stále větší množství chemických látek a přípravků, které jsou řazeny mezi tzv. nebezpečné látky. Jejich únik následovaný požárem, výbuchem nebo rozptylem v atmosféře pak právem představuje velké ohrožení. Existuje řada nástrojů, kterými lze modelovat následky těchto nežádoucích situací, ale ne každý nabízí tak širokou paletu modulů jako program ALOHA, který je navíc volně dostupný každému zájemci. Pro prezentaci práce s tímto softwarem má posloužit tento referát, který je také praktickou interaktivní ukázkou simulací nehody provázené únikem toxické látky. Jedná se o nehodu na železnici, která se stala u nás letos v únoru, a kde chybělo opravdu málo ke skutečné tragédii. Tato prezentace si klade za cíl ukázat, že program ALOHA je účinným nástrojem, který může najít uplatnění jak u odborníků na havarijní plánování či bezpečnost v chemickém průmyslu, přes úředníky státní správy až po běžného občana.

Numerický program ALOHA

Součástí vypracování bezpečnostní dokumentace podle zákona č. 59/2006 Sb., o prevenci závažných havárií je také část, zabývající se analýzou a hodnocením rizik. Ta v sobě zahrnuje tři základní body: identifikaci zdrojů rizika, ocenění jejich pravděpodobnosti a ocenění možných následků. K oceňování možných následků můžeme využít mnoha různých metod, anebo nejrůznějších podpůrných softwarových aplikací. Jedním z nich je počítačový program ALOHA 5.4 (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) vyvinutý agenturami U.S. EPA a NOAA. Jedná se o atmosférický rozptylový model užívaný pro hodnocení dopadů úniku nebezpečných chemických látek, který však kromě odhadu rozptylu oblaku plynů/par ve směru větru umožňuje modelovat také požáry nebo výbuchy těchto látek. Grafické výstupy pak formou izopleť vykreslují stopu oblaku nebo zónu zasaženou požárem resp. tepelnou radiací.

Historie programu, která sahá až do začátku 80.-tých let 20. století, je bohatá a představuje celou řadou úprav a zdokonalení, kterými si program postupně prošel (1). V současnosti je dostupná nejmodernější verze č. 5.4 (2), která byla uvedena na jaře 2006. Program lze využívat na počítačích vybavených operačními systémy Windows nebo Macintosh.

Program tvoří součást trojice integrovaných softwarových aplikací:

- CAMEO – originální, přehledná chemická databáze obsahující přes 6000 nebezpečných chemikálií. S každou chemickou látkou jsou spjata její specifické informace o rizicích hořlavosti a výbušnosti, ohrožení zdraví, hasebním prostředkům, dekontaminaci a ochranným prostředkům. Obsahuje také základní informace o zařízeních, ve kterých se chemické látky skladují.
- MARPLOT – jedná se o mapové podklady sloužící k promítnutí výsledků z ALOHA přímo do mapy s možností vyznačení individuálních zájmových míst jako jsou školy, nemocnice, domovy důchodců apod.
- ALOHA – atmosférický rozptylový model užívaný pro hodnocení dopadů havárií s chemickými látkami.

Své uplatnění si postupně program našel u celé řady zájmových skupin, mezi které patří například zpracovatelé bezpečnostní dokumentace, hasiči a záchranáři, odborníci na havarijní plánování, podnikoví dispečeri či úředníci státní správy a samosprávy. Program oslovuje také mnohé občany žijící v blízkosti chemických továren, které zajímá simulace dopadů možných havárií v dotčené oblasti.

Modelování rozptylu toxického oblaku pomocí programu ALOHA

Rozptyl představuje přenos tepla prouděním spojený s šířením látky v prostoru. Rozptylující se oblak se obecně pohybuje ve směru větru, který je dán vektorem směru převažujícího proudění a vektorem směru bočního větru (boční vítr je směr kolmý k převažujícímu proudění). Oblak plynu, který je hustý a je těžší než vzduch (nazývaný těžký plyn), se může také šířit více méně kompaktně bez výraznějšího rozptylu do prostoru, zejména ne vertikálním směrem. Výstupy, které ALOHA generuje, jsou reprezentovány vykreslenými oblastmi, kde bude překročena příslušná limitní koncentrace zadaná na začátku výpočtu. Pro to, abychom mohli získat odhad zóny

ohrožení, musíme nejprve vybrat alespoň jednu hodnotu koncentrace látky v ovzduší, která bude tuto zónu vymezovat. ALOHA nabídne uživateli databázi standardně užívaných prahových limitů toxických účinků pro danou látku, ze kterých si může uživatel vybrat. Program také umožňuje, aby si uživatel zadal tyto hodnoty podle svých potřeb.

Zajímají-li nás následky na obyvatelstvu vystaveného účinkům toxické látky, pak by zadání limitních hodnot mělo vycházet také z uvažovaného scénáře. Pokud ale nemáme žádné zvláštní požadavky, doporučuje se za těchto okolností zadávat hodnoty ERPG, které jsou pro každou látku z databáze ALOHA k dispozici. Maximálně je možné zadat tři hodnoty, které jsou následně vykresleny v grafických výstupech v podobě různě barevných izolinií. Červená křivka představuje nejvyšší koncentrace a tedy i největší nebezpečí. Následují pak oranžová a žlutá. Důležitou informací je, že ALOHA počítá koncentrace znečišťujících látek při zemi a to prostřednictvím dvou různých modelů rozptylu: Gaussova modelu a modelu těžkého plynu. ALOHA je navržena tak, aby automaticky vybírala z těchto dvou modelů. V praxi se ale někdy může stát, že uživatel požaduje vybrat jiný model, než který automaticky vybere program. To může nastat zvláště tehdy, když má látka molekulární hmotnost menší než vzduch, ale uživatel ví, že je skladována v kryogenním stavu. V takovém případě se bude bezprostředně po svém úniku chovat jako těžký plyn. Dalším faktorem ovlivňujícím charakter výsledného rozptylu je způsob úniku dané látky. ALOHA nemusí mít dostatek informací k tomu, aby určila, zda se po úniku těžký plyn vytvoří či nikoli. V takovém případě program automaticky počítá podle Gaussova modelu, ale uživatele upozorní na skutečnost, že by výsledek měl být ověřen také prostřednictvím modelu těžkého plynu. Gaussov model rozptylu je nejlépe použitelný pro malé úniky. Lze jej využít i pro modelování větších úniků, avšak musí být splněno, že molekulová hmotnost uniklé látky a její teplota jsou podobné okolnímu plynnému prostředí, tedy vzduchu. Model rozptylu těžkého plynu je dobře použitelný zejména pro modelování úniků velkého množství látek o molekulové hmotnosti vyšší jak okolní prostředí a o teplotě nižších, než je teplota okolí.

Praktický způsob použití programu si ukážeme na níže uvedené případové studii.

Modelování následků uvažovaného úniku čpavku ze železniční cisterny po srážce vlaků u Káranic

Popis události

Jak bylo již uvedeno (6), dne 9.2.2007 krátce po poledne došlo poblíž Káranic ke srážce nákladního vlaku a rychlíku (viz obr. 1). V nákladním vlaku byl řazen také cisternový vůz, ve kterém bylo převáženo 44 tun bezvodého kapalného čpavku. Tato látka bývá přepravována v jednoplášťových nechlazených cisternách (7), které jsou vybaveny přetlakovými ventily, které zajišťují, aby tlak uvnitř nestoupl nad úroveň, kde by mohlo hrozit roztržení jejího pláště. Uvnitř cisterny se tedy ustaví mezi kapalnou a plynnou fází rovnováha, která je ovlivněna především teplotou kapalného čpavku a tlakem par.



Obrázek 1: Cisterna s amoniakem při nehodě vlaků u Káranic (11).

Na počátku modelování je důležité vědět, odkud bude látka z cisterny unikat. S ohledem na charakter nehody bude uvažován případ, že dojde k poškození přečerpávacích částí cisterny, resp. jejich uražení následkem bočního nárazu s vozem rychlíku v souběžném směru (viz obr. 5). Tyto přečerpávací části sestávají z krátkých trubek, které ústí do tělesa cisterny, a směrem ven jsou zakončeny uzavírací armaturou DN 80 pro kapalnou fázi,

resp. DN 50 pro plynnou fázi (7) – (viz obr. 2). Vzniklou dírou (uvažujeme uražení trubky pro plnění kapaliny) bude čpavek vytékat ven na železniční násep. S ohledem na charakter povrchu (velmi porézní šterková podlož) se nepředpokládá, že by vznikala kompaktní kaluž, tak jako by tomu bylo např. na betonové ploše. Pro modelování je důležité mít na paměti, že unikající čpavek bude mít tendenci s ohledem na své fyzikálně-chemické vlastnosti vřít a okamžitě přecházet do plynné formy. Možnost iniciace a zahoření čpavku nebude uvažována, protože teplota vznícení jeho par je poměrně vysoká a činí 651 °C. Za pomoci numerického programu ALOHA bude nyní provedena simulace následků úniku této látky.



Obrázek 2: Detailní pohled na přečerpávací armatury u železničních cisteren (8).

Způsob aplikace programu ALOHA

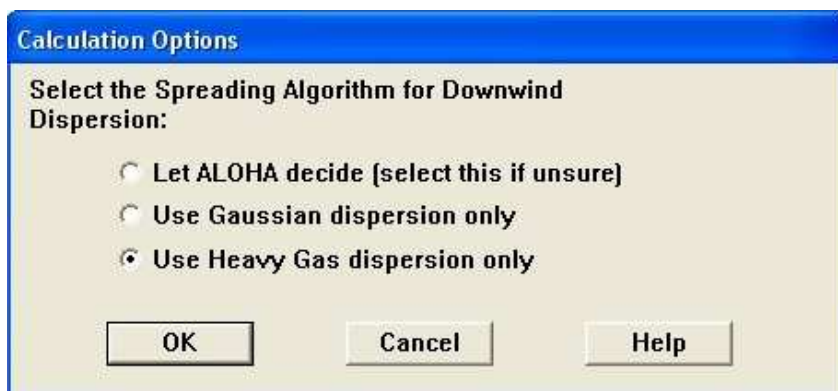
Nejprve je v programu ALOHA nutno zadat lokaci místa a typ okolní krajiny (resp. typ okolní zástavby). Po té provedeme výběr dané látky z databáze (vybíráme čpavek, anglicky AMMONIA). Následně je nutné zadat meteorologické údaje. Pro tuto studii byly využity údaje z hlášení amatérské meteorologické stanice v Kolíně (9), která je z okolních stanic místu nehody nejbližší. Dále bylo nutné vybrat zdroj úniku, tj. typ zařízení, jeho rozměry a množství převážené látky. Tyto informace jsou buď to známy z inženýrské praxe, anebo byly získány z příslušných věrohodných zdrojů (7,10). Po tomto zadání nabídne ALOHA uživateli možné havarijní scénáře, které se váží na typ ruptury, ze které látka uniká, přičemž je rozhodující, zda látka hoří, či nikoli. Jelikož v případě uvažované havárie látka během úniku nehoří, což jsme potvrdili příslušným kliknutím, nabídl program tři možné scénáře (viz obr. 3 v dolním rámečku):

- toxické účinky při rozptylu oblaku par,
- vyhoření oblaku par,
- exploze oblaku par a vznik tlakové vlny.

A screenshot of a software dialog box titled "Type of Tank Failure". The "Scenario:" field contains the text "Tank containing an unpressurized flammable liquid." Below this, the "Type of Tank Failure:" section has three radio button options: "Leaking tank, chemical is not burning and forms an evaporating puddle" (which is selected), "Leaking tank, chemical is burning and forms a pool fire", and "BLEVE, tank explodes and chemical burns in a fireball". Underneath, the "Potential hazards from flammable chemical which is not burning as it leaks from tank:" section lists three items: "Downwind toxic effects", "Vapor cloud flash fire", and "Overpressure (blast force) from vapor cloud explosion". At the bottom of the dialog are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Obrázek 3: Zadání typu poškození cisterny a výběr scénářů

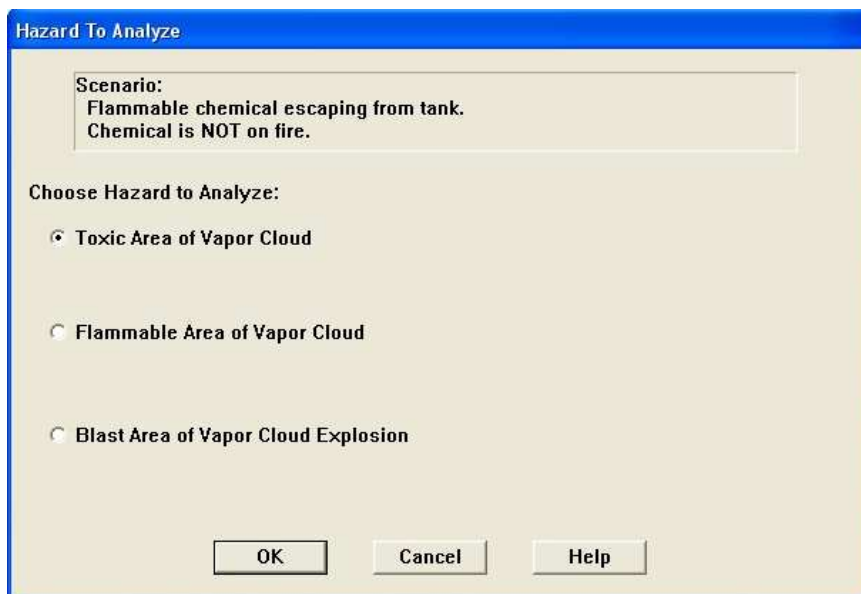
Kliknutím na položku „SetUp“ v nabídce hlavního dialogového okna je možné ještě specifikovat, podle jakého modelu požadujeme, aby program modeloval rozptyl oblaku. Zde se nabízí uživateli možnost výběru Gaussova modelu, modelu těžkého plynu, anebo pokud uživatel není rozhodnut, pak ponechá původně označenou první možnost, tedy „Let ALOHA decide“ (rozhodnutí je ponecháno na programu samém). V našem případě bylo použito modelu těžkého plynu (viz obr. 4), neboť je známo, že čpavek se v ovzduší váže na kapičky vodního aerosolu a vzniká tak oblak plynu, resp. aerosolu, těžšího jak vzduch (11).



Obrázek 4: Dialogové okno pro zadání modelu rozptylu oblaku plynu a par

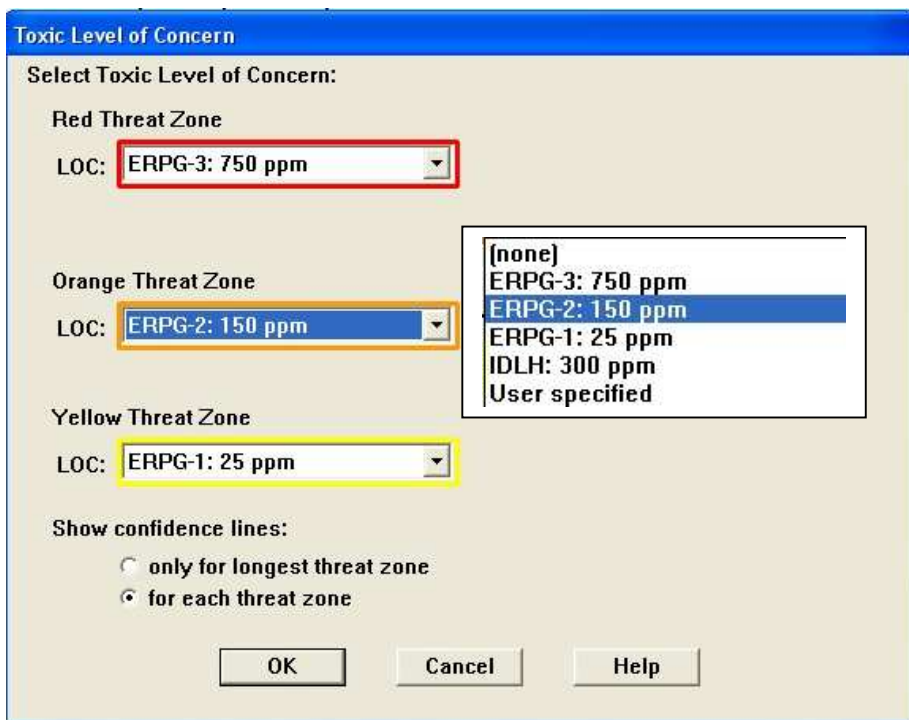
Po tomto výběru postupuje uživatel dále. Po kliknutí na položku „Display“ v hlavním dialogovém okně a následným kliknutím na položku „Threat Zone“ (zóna ohrožení) mu program nabídne pro další analýzu tři možné druhy ohrožení (viz obr. 5):

- výpočet oblasti zamořené nebezpečnými koncentracemi látky,
- výpočet oblasti zasažené požárem par,
- výpočet oblasti zasažené účinky tlakové vlny při explozi par.



Obrázek 5: Okno pro zadání výpočtu druhu ohrožení

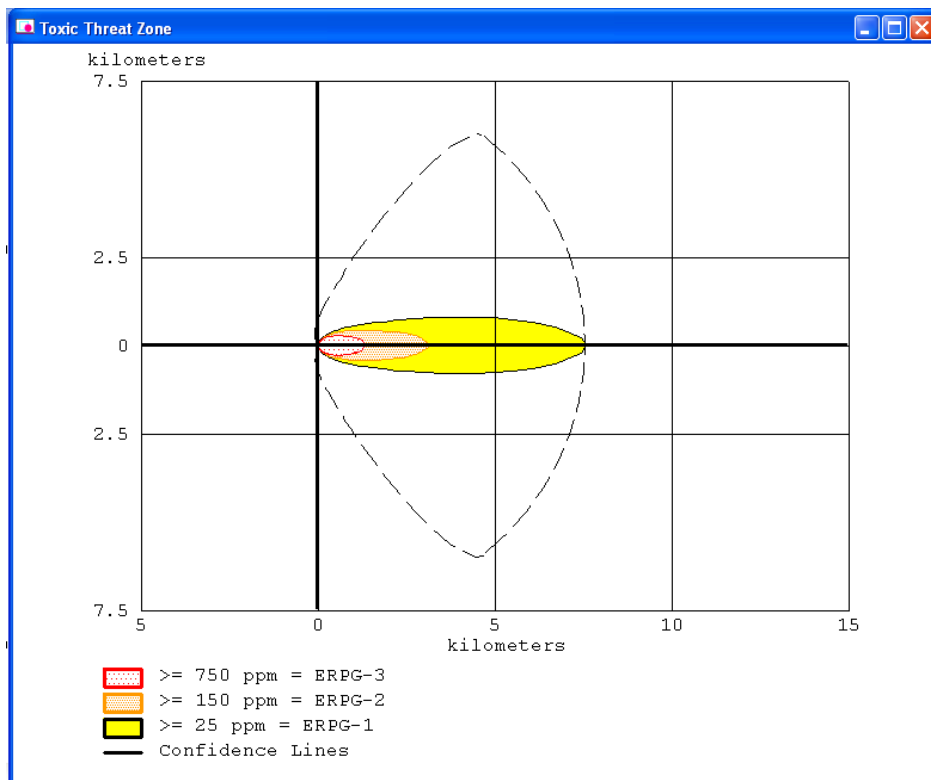
Jelikož nás v tomto případě zajímají následky spojené s šířením oblaku, je vybrána první možnost (tj. Toxic Area of Vapor Cloud). Po tomto výběru již máme zadány všechny potřebné údaje a je možné přejít k finálnímu výpočtu. Po potvrzení výše uvedeného výběru se program uživatele ještě zeptá, jaké limitní hodnoty pro toxické účinky má do výpočtu zahrnout. V nabídce se objeví limitní hodnoty pro ERPG, IDLH anebo si uživatel může sám specifikovat koncentrace, které jej zajímají – v takovém případě musí kliknout na „User specified“. Ve spodní části tohoto dialogového okna (viz obr. 6) je možné ještě zadat vykreslení konfidenčních linií v grafickém výstupu. Po odsouhlasení zadání, již program generuje výsledky výpočtu.



Obrázek 6: Okno pro nastavení prahových hodnot toxických účinků

Výstup modelu

Výstup je proveden v grafické podobě (viz obr. 7), anebo ve formě textového sumáře, který je možné zobrazit po kliknutí na položku „Display“ a po té na „Text Summary“. Ten je pro naše zadání uveden pod obrázkem. Kromě těchto dvou hlavních výstupů můžeme po kliknutí na položku „Source Strength“ v nabídce „Display“ v hlavním dialogovém okně zobrazit ještě i graf znázorňující rychlost úniku látky ze zařízení v čase.



Obrázek 7: Grafický výstup pro rozptyl oblaku plynu

Textový výstup pak představuje níže uvedený sumář.

SITE DATA:

Location: KARANICE, CZECH REPUBLIC
Building Air Exchanges Per Hour: 0.36 (unsheltered double storied)
Time: February 9, 2007 1207 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: AMMONIA Molecular Weight: 17.03 g/mol
ERPG-1: 25 ppm ERPG-2: 150 ppm ERPG-3: 750 ppm
IDLH: 300 ppm LEL: 160000 ppm UEL: 250000 ppm
Ambient Boiling Point: -33.9° 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: 2 meters/second from NE at 3 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 7 tenths
Air Temperature: 5° C Stability Class: B
No Inversion Height Relative Humidity: 70%

SOURCE STRENGTH:

Leak from short pipe or valve in horizontal cylindrical tank
Flammable chemical escaping from tank (not burning)
Tank Diameter: 2.8 meters Tank Length: 15.4 meters
Tank Volume: 94.8 cubic meters
Tank contains liquid Internal Temperature: 5° C
Chemical Mass in Tank: 44000 kilograms
Tank is 73% full
Circular Opening Diameter: 8 centimeters
Opening is 0 meters from tank bottom
Release Duration: 36 minutes
Max Average Sustained Release Rate: 1,270 kilograms/min
(averaged over a minute or more)
Total Amount Released: 44,000 kilograms
Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:

Model Run: Heavy Gas
Red : 1.3 kilometers --- (750 ppm = ERPG-3)
Orange: 3.1 kilometers --- (150 ppm = ERPG-2)
Yellow: 7.6 kilometers --- (25 ppm = ERPG-1)

Interpretace výsledků

Správné zadání vstupních dat i způsob provedení výpočtu je při modelování klíčové. Ovšem neméně důležitá je také správná interpretace získaných výstupů. Hlavní informací, kterou získáme, je dosah zraňujících koncentrací (viz obr. 7). V našem případě červená linie vymezuje oblast, ve které je koncentrace vyšší jak hodnota ERPG-3, což je „maximální koncentrace látky v ovzduší, do níž je možno se domnívat, že by téměř všichni jednotlivci mohli být nechráněni po dobu jedné hodiny, aniž by zakusili nebo se u nich vyvinuly účinky ohrožující zdraví nebo život“(12). Ovšem v oblasti, kterou tato linie ohraničuje, může koncentrace čpavku pochopitelně dosahovat mnohem vyšších hodnot. Známe-li souřadnice bodu nebo jeho vzdálenost od zdroje v příslušném směru, pro který by nás zajímalo prověřit možné ohrožení osob (tj. koncentraci látky v tomto bodě), lze kliknout na položku „Display“ v hlavním dialogovém okně a dále na položku „Threat At Point“. Otevře se okno „Concentration Location“ (viz obr. 8), kde zadáme příslušné vzdálenosti.

Concentration Location

Specify the location at which you want to evaluate the concentration over time.

Relative Coordinates
[Downwind,Crosswind]

Fixed Coordinates
[East-West,North-South]

Input X, the downwind distance from the source and Y, the perpendicular distance from the downwind axis.

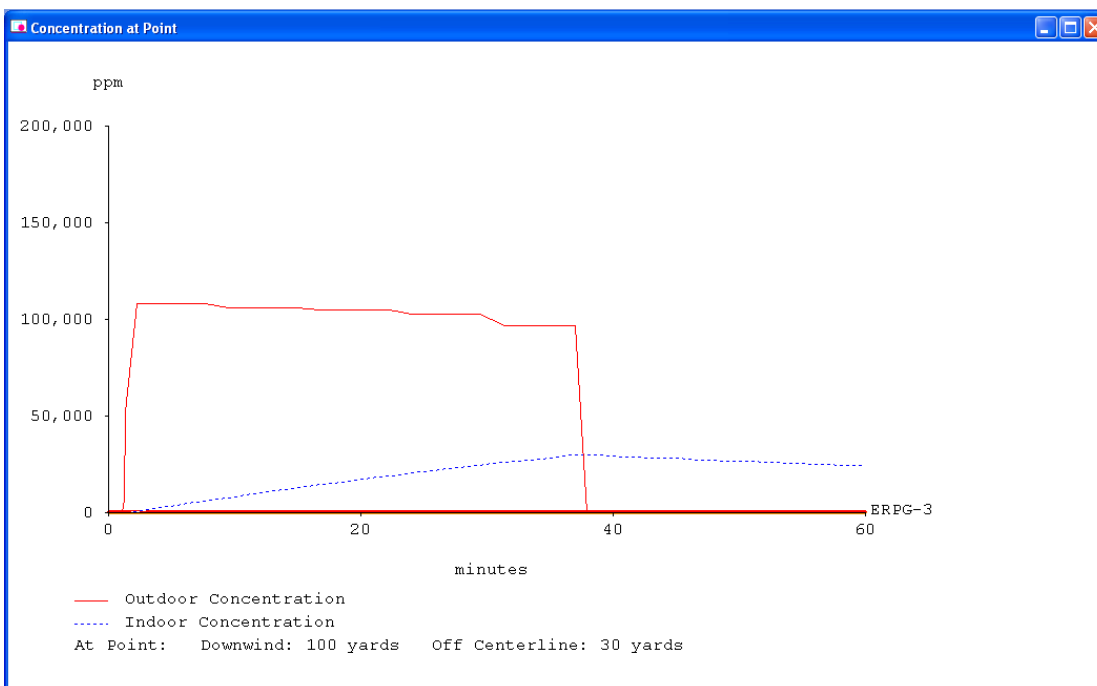
Input X, the downwind distance:

Input Y, the crosswind distance:

feet
 yards
 miles
 meters
 kilometers

Obrázek 8: Okno umožňující zadání souřadnic zájmového místa

Po potvrzení se vykreslí koncentrační křivka znázorňující průběh koncentrací čpavku v čase (viz obr. 9). Zde červená křivka znázorňuje koncentraci ve venkovním prostředí a modrá tečkovaná křivka koncentraci v uzavřených prostorách. Program tedy tímto způsobem dokáže modelovat také koncentrace toxických látek i uvnitř budov, což je důležitá informace pro plánování vhodných opatření směřující k ochraně ohroženého obyvatelstva.



Obrázek 9: Koncentrační křivka v zájmovém bodě

V našem případě byly zadány vzdálenosti relevantní pro pozici nejvzdálenějšího vozu rychlíku od místa havarované železniční cisterny ($x = 100$ m, $y = 30$ m). Z výstupu (viz obr. 9) lze vyčíst, že koncentrace ERPG-3, která je zde vykreslena tučnou červenou čarou souběžnou s osou x, bude mnohonásobně překročena, a že maximální koncentrace čpavku mohou v tomto bodě dosahovat až 92 200 ppm ve venkovním prostředí, resp. 25 500 ppm uvnitř budov (tedy i uvnitř vozů rychlíku). V tomto případě by na volném prostranství koncentrace čpavku v ovzduší dosáhla svých maximálních hodnot již během prvních dvou minut od okamžiku zahájení úniku a příliš by se neměnila až do chvíle, kdy by došlo k vytečení veškerého čpavku z poškozené cisterny a jeho rozptýlení v ovzduší. To by podle modelu nastalo za cca 36 minut. Po uplynutí této doby se dá tedy předpokládat, že by se ve venkovním ovzduší již neměl čpavek nacházet v nebezpečných koncentracích.



Obrázek 10: Přenesení výstupů z ALOHA do mapového podkladu zájmového území

Zjištěné závěry lze shrnout tak, že vypočtené hodnoty jsou natolik vysoké, že se dá předpokládat vysoké procento mortality mezi cestujícími v rychlíku, kteří by se patrně po srážce snažili rychlík ve strachu (např. z požáru) urychleně opouštět. Uvážíme-li, že se v rychlíku pravděpodobně nacházelo až několik stovek cestujících, bylo by naplnění tohoto scénáře skutečně tragickou událostí srovnatelnou jen s těmi nezávažnějšími průmyslovými haváriemi. Dosah zraňujících následků shrnuje obrázek 10, podle kterého lze vyjádřit možný rozsah případné havárie. Nebezpečná koncentrace ERPG-3 (červená barva) zasahuje až na konec obce Káranice, koncentrace ERPG-2 (zelená barva) pak může dosahovat až k dálnici D11 a koncentrace ERPG-1 (modrá barva) pak může podle směru vanutí větru dosáhnout až k městu Chlumci nad Cidlinou vzdálenému 7 km.

Použitá literatura

- (1) ALOHA: An Evolutionary History, zdroj internet: <http://archive.orr.noaa.gov/cameo/alohafaq/history.html>
- (2) The CAMEO[®] Software System, ALOHA[®] 5.4 (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) (2006). User's manual, U.S. Environmental Protection Agency and National Oceanic and Atmospheric Administration.
- (3) ALOHA[®] 5.4 (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) (2006), U.S. Environmental Protection Agency and National Oceanic and Atmospheric Administration, zdroj internet: <http://www.epa.gov/swercepp/cameo/aloha.htm>
- (4) TNO. (1999). GUIDELINES FOR QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT, CPR 18E "Purple Book", 1st Edition, Netherlands.
- (5) Labunska, I. et al. (1999). The Bhopal Legacy: Toxic contaminants at the former Union Carbide factory site, Bhopal, India: 15 years after the Bhopal accident, Technical Note 04/99, Greenpeace Research Laboratories, Department of Biological Sciences, University of Exeter.
- (6) Skřehot P., Říman R. a kol. (2007). Modelování úniku a rozptylu nebezpečných plynných látek v atmosféře, konference „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, 2007“, Úpice.
- (7) Unipetrol Doprava, zdroj: <http://www.unipetrolodoprava.cz/html/index.php?s1=1&s2=2&s3=2&lng=1>
- (8) International Social Security Association. (2003) MIS-IDENTIFICATION OF CHEMICALS: Causes and Precautions for Storage, Transport and Production Plant. ISSA Prevention Series No. 2047 (E). ISBN: 92-843-1159-4.
- (9) Kuchař K. (2007). Sdělení o meteorologické situaci v oblasti Kolínska.

- (10) Internetový portál idnes.cz, zdroj internet:
http://zpravy.idnes.cz/foto.asp?r=krimi&c=A070209_132757_krimi_pei
- (11) Hazard analysis of anhydrous ammonia truck accident (2006). NTIS Report Number: PB-268251, zdroj internet:
<http://1.1.1.1/1754540400/2052362248T070326144205.txt.binXMysM0dapplication/pdfXsysM0dhttp://www.eh.doe.gov/nepa/docs/deis/eis0383/appendix.pdf>
- (12) Sluka V. (2005). Výkladový terminologický slovník některých pojmů používaných v analýze a hodnocení rizik pro účely zákona o prevenci závažných havárií, Výzkumný ústav bezpečnosti práce, Praha.