


Ověření modelu šíření projevů a účinků ohrožujících událostí - projekt SPREAD

 30.01.2009

Část 3: Vyhodnocení naměřených dat a interpretace výsledků

verification of the spread model of LIFE-endangering events effects and impacts -SPREAD project

Part 3: Evaluation of the measured data and result interpretation

Michaela Havlová¹, Petr Skřehot², Jan Píšala³

¹T - SOFT spol. s r.o., havlova@tsoft.cz

²Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., skrehot@vubp-praha.cz

³HaPMK Brno, jan@pisala.cz

aerosoly

atmosféra

modelování

rozptyl

terénní testy

Abstrakt

Tento článek navazuje na předchozí dva díly publikace zaměřené na prezentaci výzkumného projektu č. 1H-PK2/35 „Ověření modelu šíření ohrožujících událostí - SPREAD“ a celé téma završuje rekapitulací získaných výsledků. Pro připomenutí, první díl byl zaměřen na popis přípravy terénních testů, výběr lokality, vhodných termínů a dalších náležitostí důležitých pro provádění vlastních testů. V druhém díle pak byly popsány postupy a materiálně-technické zajištění testů, průběh jejich provádění a také způsobu organizace práce v terénu. Tento, v pořadí již třetí a závěrečný díl, se pak snaží prezentovat způsob vyhodnocení získaných experimentálních dat a předkládá jejich interpretaci, tolik důležitou pro ověření modelu rozptylu oblaku aerosolu vzniklého výbuchem.

Klíčová slova: aerosoly, modelování, rozptyl, terénní testy, atmosféra

Abstract

The article follows up the previous two sections in the publication presenting the results of the research project No. 1H-PK2/35 „Ověření modelu šíření ohrožujících událostí - SPREAD“, this subject tops recapitulation of the results obtained. To remind, the first part was focused on preparation of field tests, location selection, suitable dates and other items pertinent to the test run. The second part was dedicated to the proceedings and material and technical support of the

tests, their run and field work organisation. The third and final part of the publication aims to present the way of evaluation of the selected experiment data and their interpretation which is an essential step for verification of dispersion model of an aerosol cloud being subject to explosion.

Keywords: aerosols, modelling, dispersion, field tests, atmosphere

Úvod

Experimenty prováděné v reálných podmínkách i měřítku lze bezesporu považovat ze nejzajímavější část každého výzkumného projektu. Vyhodnocování získaných dat a jejich následná interpretace je ale pro úspěšné řešení vždy naprosto klíčová. Proto je této fázi nutné věnovat značnou pozornost a dokonale se na ni připravit. Hlavní důraz by měl být kladen na výběr a správné použití metod, které umožní získaná hrubá data vhodným způsobem zpracovat. Snahou řešitelů je získat jednoznačné a srozumitelné výsledky využitelné dále v praxi, což však nemusí být tak snadné. Ze zkušeností víme, že během téměř každého výzkumu se obvykle vyskytnou neočekávané těžkosti, zejména pak tehdy, pokud danou problematiku doposud nikdo po praktické stránce neřešil a není tedy možné se opřít o zkušenosti druhých. Proto je nutné umět vhodně improvizovat, ale zároveň využít takových postupů, které jsou ve shodě s jinými, obecně uznávanými přístupy a znalostmi, protože každý výsledek musí být vždy reprodukovatelný a obhajitelný.

Vzhledem k tomu, že terénní testy, jejichž cílem bylo prostudovat průběh rozptylu oblaků aerosolu a určit dosahy referenčních koncentrací aerosolu, probíhaly ve třech sériích a na poměrně velké ploše, kterou bylo letiště v Ústí nad Labem, bylo získáno velké množství experimentálních dat. Jejich vyhodnocování proto bylo nutné provádět několika různými metodami a postupy, z nichž některé byly spojeny s doplňujícími laboratorními experimenty. Výsledky, které se však níže popsaným způsobem podařilo získat, budou dále využity nejen pro validaci matematického aparátu rozptylového modelu, ale také významným způsobem pomohly rozšířit obecné znalosti o rozptylu oblaků aerosolu emitovaných z jednorázových zdrojů směrem do reálné atmosféry.

Vyhodnocení prováděných testů

Určení fází rozptylu oblaku

Jak již bylo uvedeno v předchozím díle, součástí terénních testů bylo také vizuální sledování rozptylu oblaku. Účelem bylo popsat chování oblaku po výbuchu, tj. jeho růst a následný rozptyl a určit základní fáze rozptylu. Tyto skutečnosti totiž podle dostupných zdrojů doposud nebyly řešeny, na rozdíl například od rozptylu oblaků z kontinuálních zdrojů. Získané výsledky významnou měrou pomohly zpřesnit navržený model, pro jehož vývoj bylo nutné znát velikost tzv. objemového zdroje jednorázové emise aerosolu. Tento objemový zdroj představuje oblak, který již dále neroste na základě impulsu uděleného jednotlivým částicím při samotném výbuchu. Kromě toho, načerpané poznatky také posloužily pro kvalitativní popis možného ohrožení osob po výbuchu špinavé bomby, neboť znalost chování takto vzniklého oblaku v čase je nezbytnou podmínkou pro definování efektivních způsobů ukrytí nebo evakuace.

Tvar oblaku bylo možné popsat po důkladné analýze videozáznamů, pro odhad jejich rozměrů však bylo potřeba použít matematického výpočtu. Kromě sítě vyrobené z reflexních motouzů umístěné před jednu z videokamer, byly pro výpočet využity také čtyřmetrové tyče, které byly rozmístěny na hlavní linii detekční sítě. Na těchto tyčích byly v předem definovaných výškách umístěny fábory, které pro pozorování z dálky posloužily jako vertikální měřítko. Určení výšky oblaku pak bylo prováděno na základě rozboru videozáznamu pořízeného z kamery, před níž byla umístěna síť z motouzů, a z kamery, která snímala rozptyl oblaku z profilu, tj. kolmo na hlavní linii tyčí s detektory. Tímto způsobem se podařilo získat relevantní informace o rozvoji oblaku v čase. Pro svou složitost a časovou náročnost bylo stanovení výšky oblaku provedeno jen pro tzv. typické povětrnostní situace. Bylo totiž vyzorováno, že růst oblaku a jeho rozptyl je výrazně závislý na teplotní stabilitě atmosféry, takže lze přistoupit ke zjednodušení, které sestává z detailní

analýzy jen vybraných testů provedených za různých podmínek:

- a) při stabilním až inverzním zvrstvení atmosféry (třída stability E, F),
- b) při indiferentním zvrstvení (třída stability C) a
- c) při instabilním zvrstvení (třída stability (A, B).

Ačkoli byly v roce 2007 prováděny celkem tři série terénních testů (duben, červen a září), optimální podmínky pro tato stanovení panovaly při dubnových testech, kdy se průběžně vyskytly všechny tři zmíněné stabilitní podmínky. To bylo výhodou, protože bylo možné použít stejného rozmístění měřicí techniky a také výška pokosu trávníku byla při všech těchto testech stejná (koeficient drsnosti povrchu z_0 činil 0,45 cm). Stanovení rozptylových fází tak bylo maximálně objektivizováno.

Určení třídy stability atmosféry podle vnějších podmínek bylo provedeno pomocí Pasquillovy typizace zkonfrontované s aktuálními měřeními vybraných povětrnostních prvků a doplněné o konzultaci s přítomným meteorologem ČHMÚ. Podmínky pro vybrané testy shrnuje tabulka 2.

Označení testu	Datum/čas exploze	Rychlost větru ve 2 metrech	Třída stability atmosféry	Popis povětrnostní situace
DUBEN_3	25.4.2007 11:42:38	2,5 m.s ⁻¹	C	V noci ubývala oblačnost, zesláblo proudění a vytvořily se tak podmínky pro radiační prochlazování zemského povrchu a následný vznik radiační přízemní teplotní inverze. Po východu slunce se stala radiační a tepelná bilance zemského povrchu kladnou a původní přízemní inverze se transformovala na výškovou s postupně se zvyšující spodní hranicí. K zániku radiační teplotní inverze došlo v době mezi 9. a 10. hodinou dopoledne (časy jsou uvedeny v SELČ). Poté převládalo polojasné počasí, zpočátku s indiferentním, postupně s instabilním vertikálním teplotním zvrstvením. Proudění bylo v ranních hodinách v přízemní vrstvě jen slabé (do 2 m.s ⁻¹), s proměnlivým směrem určeným místními podmínkami. Po rozpuštění teplotní inverze převládalo jižní až jihovýchodní proudění s rychlostí 3 až 6 m.s ⁻¹ .
DUBEN_4	26.4.2007 8:00:15	0,5 m.s ⁻¹	E	V noci se při malé oblačnosti a slabém proudění vytvořila nejprve přízemní radiační teplotní inverze, která se po východu slunce transformovala na výškovou se stoupající spodní hranicí. Po 10. hodině už teplotní inverze zanikla a teplotní zvrstvení bylo instabilní. Proudění v přízemní vrstvě bylo v ranních hodinách jen slabé (do 2 m.s ⁻¹), s proměnlivým směrem daným místními podmínkami. Po rozpuštění inverze převládalo jihovýchodní proudění, rychlosti dosahovaly na stanicích v regionu hodnot mezi 3 až 7 m.s ⁻¹ .

DUBEN_6	26.4.2007 11:06:05	2 m.s ⁻¹	A
---------	-----------------------	---------------------	---

Tabulka 2: Podmínky během testů série DUBEN vybraných pro stanovení rozptylových fází oblaku aerosolu

Na základě provedené analýzy videozáznamů testů lze chování oblaku v čase obecně definovat následovně:

Po výbuchu oblak nebyl vždy kompaktní a bylo možné pozorovat několik oblačných laloků způsobených patrně rozletem aglomerátů či fragmentů. Po cca 6 vteřinách se oblak již dále nerozšiřoval do prostoru vlivem počátečního impulsu a nejvyšší partie začaly klesat k zemi. Při klesavé fázi se oblak postupně rozšiřoval při zemi do stran a začal se pohybovat ve směru proudění větru. I přes to si ale hlavní část oblaku udržovala zpravidla tvar polokoule, ze které zespod jakoby „vytékal“ materiál do stran. V případě, že panuje indiferentní nebo instabilní zvrstvení, začne vrcholová část oblaku po několika vteřinách vzlínat směrem vzhůru (čím instabilnější podmínky, tím je tato doba kratší). Tvar oblaku se tak začne rozšiřovat podél kužele, přičemž spodní partie oblaku se díky tření o povrch při svém pohybu „opoždí“ oproti svrchním partiím. Dále se oblak naředoval vzduchem vstupujícím do něj turbulencí a rozptyluje se podle panujících povětrnostních podmínek.

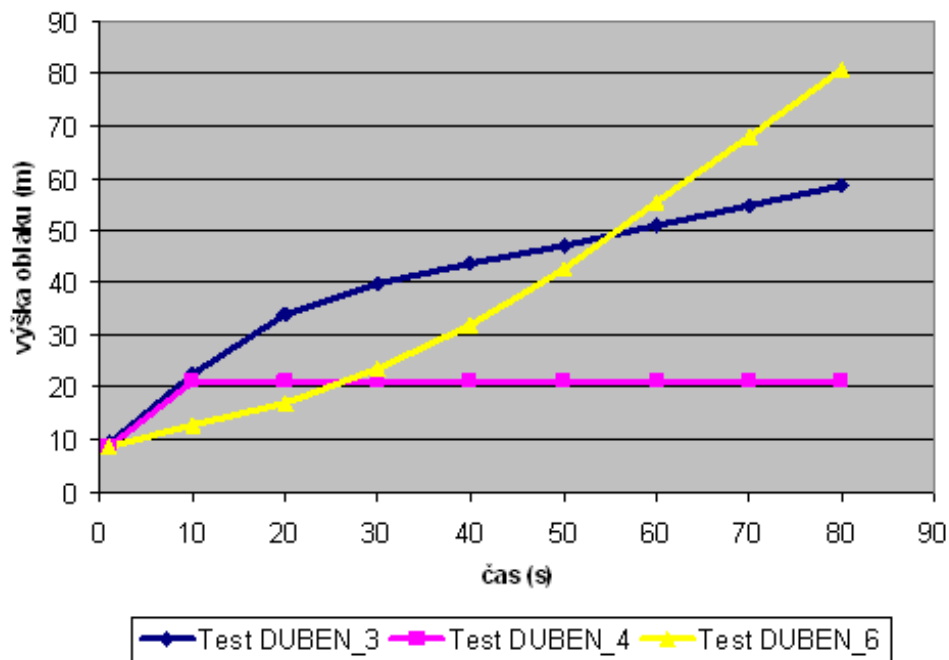
Test DUBEN_3: Již po první fázi se začal oblak rozšiřovat podél kužele, takže klesavá fáze se neuplatnila. Tuto skutečnost lze vysvětlit pouze tak, že se uplatnil vliv proudění (rychlost větru byla cca 2 m.s⁻¹).

Test DUBEN_4: U tohoto testu byla výrazná fáze poklesu. Opět panovalo téměř bezvětří, takže oblak byl více méně kompaktní. První fáze (fáze růstu oblaku, resp. fáze zastavení rozšiřování vlivem počátečního impulsu) trvala v tomto případě 11 sekund. Oblak se výrazněji rozšiřoval do stran, takže po 60 sekundách vytvořil jakýsi plochý koláč s neohrazenými horními partiemi. Největší množství materiálu v tomto útvaru bylo možno pozorovat do výšky cca 4 až 5 metrů. Rychlost postupu oblaku byla cca 0,5 m.s⁻¹. Pozitivně vzlínat začal oblak až po 6,5 minutách, tj. ve vzdálenosti čela oblaku 160 metrů od epicentra.

Test DUBEN_6: Po 5 vteřinách od okamžiku výbuchu přestal oblak růst vlivem počátečního impulsu a začal se rozptylovat ve směru proudění, kde se rozšiřoval podél kužele. Rychlost pohybu oblaku činila 1,5 až 2 m.s⁻¹. Po 80 vteřinách od výbuchu se již začala uplatňovat konvekce, resp. oblak nabral výstupný proud, který jej zcela rozptýlil ve výšce (to nastalo cca ve vzdálenosti 150 metrů od epicentra).

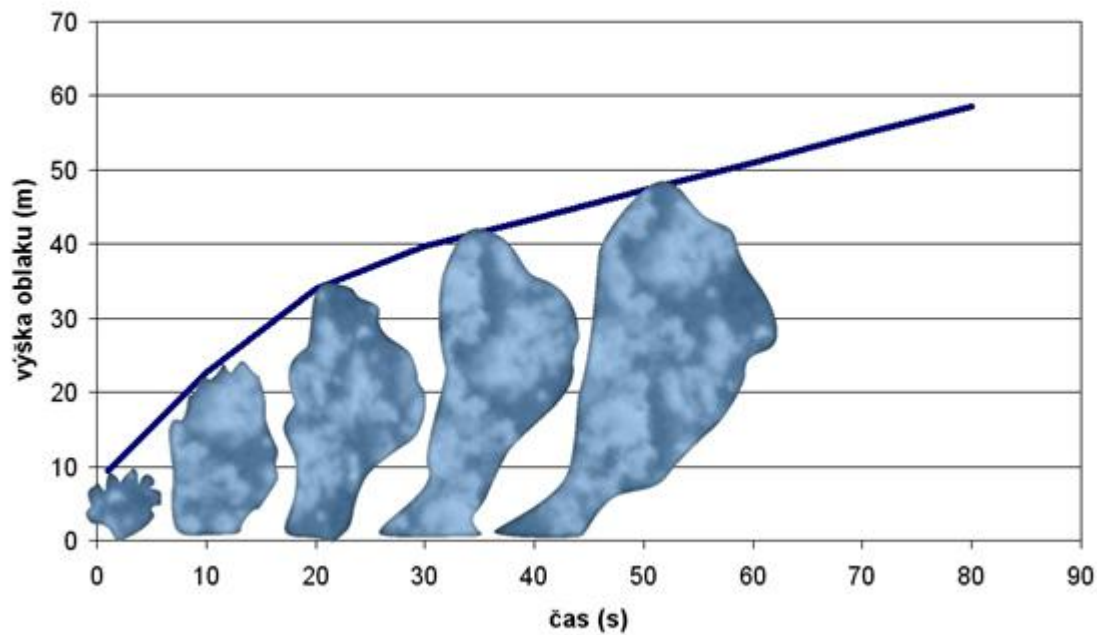
Níže uvedené obrázky 23 až 26 graficky shrnují výše uvedené poznatky.

Vývoj výšky oblaku v čase



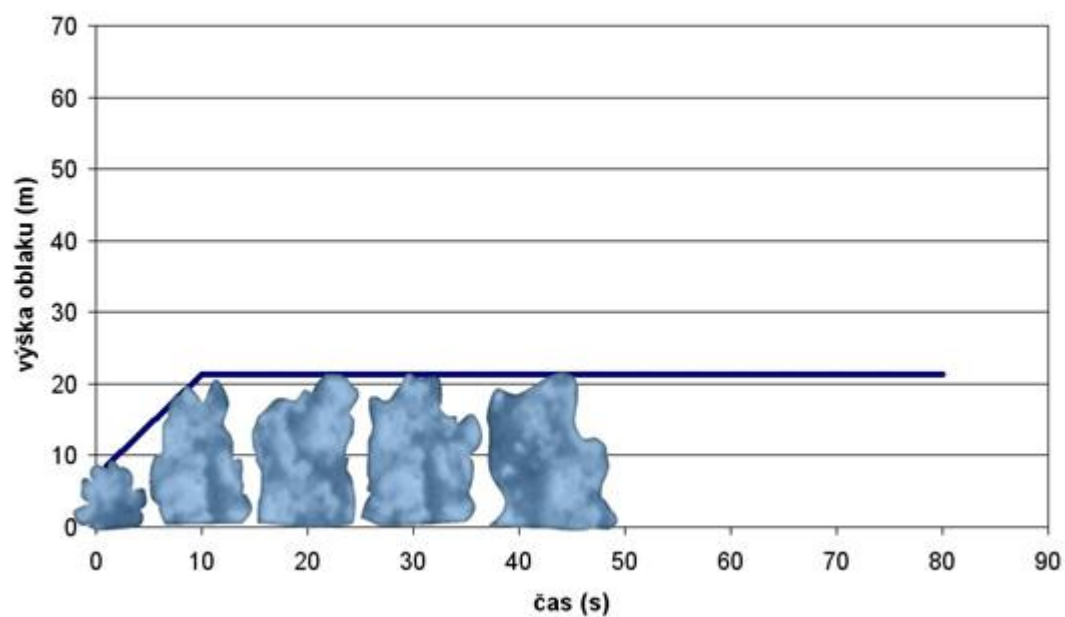
Obrázek 23: Vývoj výšky oblaků v čase při různých stabilitních podmínkách (modrá - indiferentní teplotní zvrstvení, fialová - stabilní teplotní zvrstvení, žlutá - instabilní teplotní zvrstvení)

Test DUBEN_3



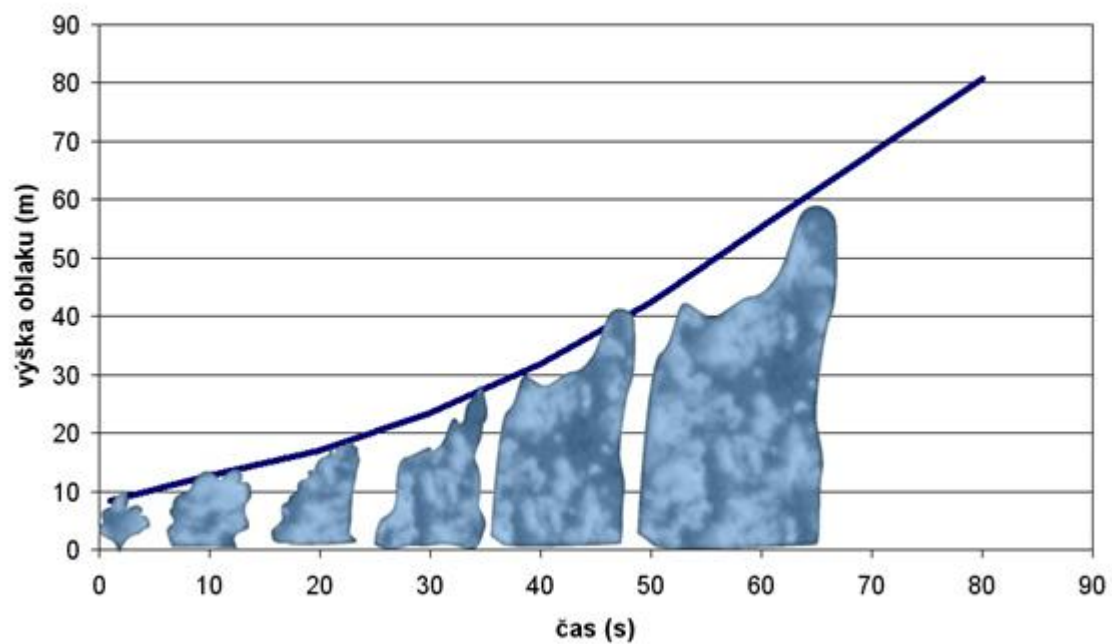
Obrázek 24: Vizualizace vývoje tvaru a velikosti oblaku při testu DUBEN_3 v čase

Test DUBEN_4



Obrázek 25: Vizualizace vývoje tvaru a velikosti oblaku při testu DUBEN_4 v čase

Test DUBEN_6



Obrázek 26: Vizualizace vývoje tvaru a velikosti oblaku při testu DUBEN_6 v čase

Poznámka: Jelikož jsou tvary oblaků vyneseny do grafu s časovou osou, není v obrázcích zachován reálný poměr šířky oblaku ku výšce. Obrázky mají zachycovat především tvar oblaku, tak, jak byl vyexportován z videozáznamů, a dále výšku oblaku. V čase se oblaky vždy rozšiřovaly také v horizontálním směru, což níže uvedené obrázky nezahnují.

Výše uvedená zjištění potvrzená i u dalších testů vedla ke zjištění, že při rozptylu oblaku se postupně uplatňují následující čtyři hlavní fáze:

1. **Fáze počátečního růstu** – prvních cca 6 vteřin oblak roste, jednotlivé částice ztrácejí počáteční impuls získaný při výbuchu a oblak zaujímá tvar polokoule nebo tvar jemu podobný;

2. **Fáze poklesu (sestupu)** – ty části oblaku, kde je koncentrace částic dostatečně velká (vyjma okrajových partií různých kupovitých laloků), začnou klesat k zemi. Oblak nabývá tvaru plochého koláče, který se pohybuje ve směru větru. Tato fáze je pozorována pouze v případě, kdy rychlost větru nepřesáhne cca $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V ostatních případech nastává rovnou fáze rozptylu podél kužele;

3. **Fáze rozptylu podél kužele** – jedná se o rozšiřování oblaku do prostoru, který je ohraničen pláštěm pomyslného kužele, který je orientován tak, že v jeho vrcholu leží epicentrum, a jehož osa míří ve směru větru. Vrcholový úhel je závislý na rychlosti proudění a třídě stability atmosféry – s rostoucí rychlostí větru a zvyšující se stabilitou atmosféry se zmenšuje;

4. **Fáze pasivního rozptylu (pozitivní vzlínání)**, popř. fáze konvektivně vzlínavá – nastává při dostatečném naředění oblaku, který se začne výrazněji rozptylovat vertikálním směrem (při naředění oblaku pod 1 % objemové). Pozitivní vzlínání urychluje přítomnost konvektivních proudů.

Vyhodnocení expozice terčů

Po sběru exponovaných terčů (viz druhý díl článku) bylo nutné vyhodnotit, kolik částic aerosolu se na pasivních detektorech během expozice (tj. během průchodu oblaku detekčním polem) deponovalo. Vyhodnocení depozice bylo provedeno v laboratořích, kde jednotlivé plastové vzorkovnice (typ Micro Mount) s grafitovými terčíky byly vizuálně kontrolovány v binokulárním stereoskopickém mikroskopu (Kruss – Optronics system, Hamburg) s vrchním osvětlením (5500 K) a v UV světle (366 nm a 254 nm). Tímto způsobem se docílilo lepšího vyniknutí některých druhů především biologických kontaminací, jakými byly například pylová zrna, hmyz apod. Následně bylo provedeno planimetrické vyhodnocení, které bylo provedeno vždy na třech vybraných reprezentativních místech každého terčíku (v místě, kde bylo minimální poškození vzorku a minimum nežádoucích kontaminací). Plocha, na níž byla planimetrie aplikována, byla o velikosti $1,5 \text{ mm}^2$. Výsledky z jednotlivých sčítání byly následně zprůměrnovány a přepočítány na jednotkovou plochu 1 cm^2 .

Bodová data získaná planimetrickým vyhodnocením byla dále zpracována pomocí vybraných metod geostatistiky. Základem tohoto vyhodnocování je teorie prostorově závislé proměnné, což je veličina, jejíž hodnoty závisejí na poloze bodů, v nichž byly stanoveny, v prostoru – v našem případě dvourozměrném. Jako optimální metoda se pro naše účely ukázala metoda odhadu – kriging. Tato metoda je založena na interpolaci váženého průměru hodnot okolních bodů, kdy se váhy jednotlivých hodnot určují na základě variogramu. Hlavní výhodou krigingu, oproti běžné interpolaci, je kromě zahrnutí většího počtu hodnot do výpočtu také možnost určení odhadu rozptylu vypočtené hodnoty. Postup při analýze bodových hodnot koncentrací byl následující:

1. provedení popisné statistiky,

2. sestrojení histogramu,
3. analýza extrémů a jejich vyloučení,
4. sestrojení variogramu,
5. provedení krigingu s uvážením příslušného variogramu,
6. vynesení výsledků do grafické podoby s průmětem na detekční síť.

Takto získané výsledky prezentovaly informaci o distribuci deponovaných částic vyjádřenou pomocí izoploch, tj. míst se stejnou plošnou koncentrací částic na 1 cm^2 a to podél celé plochy detekční sítě (150 x 400 metrů) (viz obrázek 29). Tento výsledek sice poskytuje názornou informaci o tom, kolik aerosolu se po výbuchu zachytilo na sledované ploše, ale nevypovídá nic o dosazích jednotlivých objemových koncentracích v ovzduší od epicentra výbuchu ve směru vanutí větru. Během testů byly sice pro kontinuální měření koncentrací aerosolu v ovzduší (v $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) použity laserové fotometry DustTrak, avšak výsledky z nich získané poskytovaly informaci o změně koncentrace částic $\text{PM}_{2,5}$ v čase pouze v bodě umístění tohoto měřicího zařízení (viz obrázek 27). Jejich výsledky bylo tedy možné použít pouze jako ukazatele absolutních hodnot maximálních koncentrací v daných vzdálenostech od epicentra (v závislosti na geometrii rozmístění, která se průběžně měnila za účelem získání co nejširšího počtu relevantních výsledků).



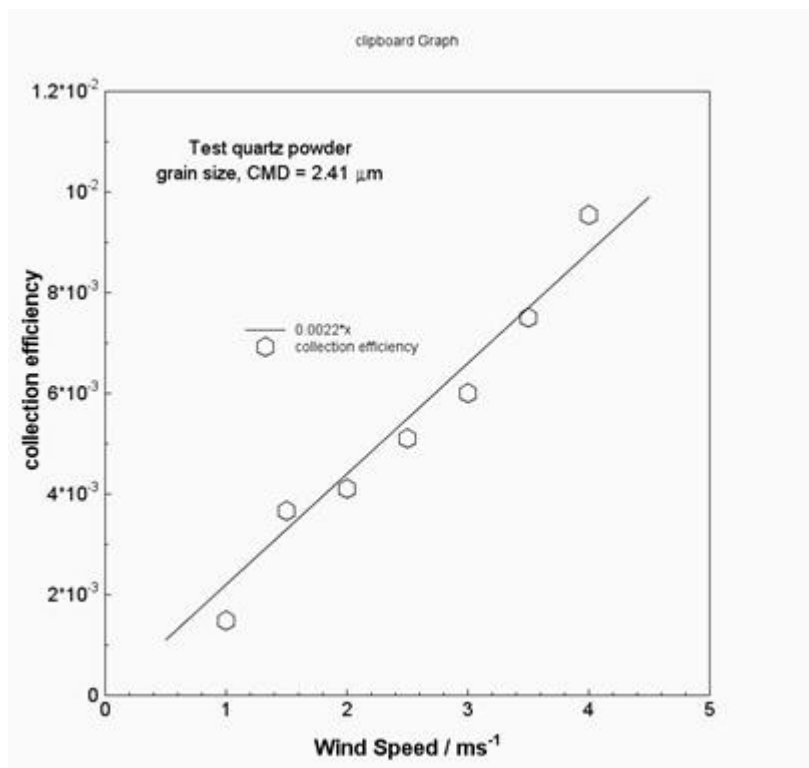
Obrázek 27: Podoba výstupů z laserového fotometru DustTrak - celkový časový průběh koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ během testu ZÁŘÍ_6 (průchod oblaku aerosolu znázorňují píky vpravo)

Získat z distribuce plošných koncentrací údaje o koncentraci částic aerosolu v jednotkovém objemu vzduchu však je možné, pakliže je pro danou rychlost větru známa účinnost zachytu částic aerosolu dané velikostní frakce na použitých detektorech. Tato koncentrace však představuje pouze průměrnou, nikoli maximální, koncentraci, protože je vypočítána z celkového počtu částic deponovaných na ploše terčiku po dobu průchodu oblaku daným místem.

Určit účinnost zachytu ale bylo možné pouze na základě měření ve větrném tunelu v laboratoři. Příslušná měření, která si vyžádala velké množství opakování a stanovování na celkem 90ti experimentálních detektorech osazených krabičkami s terčíky (tj. konstrukčně stejné detektory jako v případě terénních testů), proběhla v Ústavu pro životní prostředí Univerzity Karlovy v Praze. Pro měření změny velikostní distribuce počtu částic v uzavřeném okruhu větrného

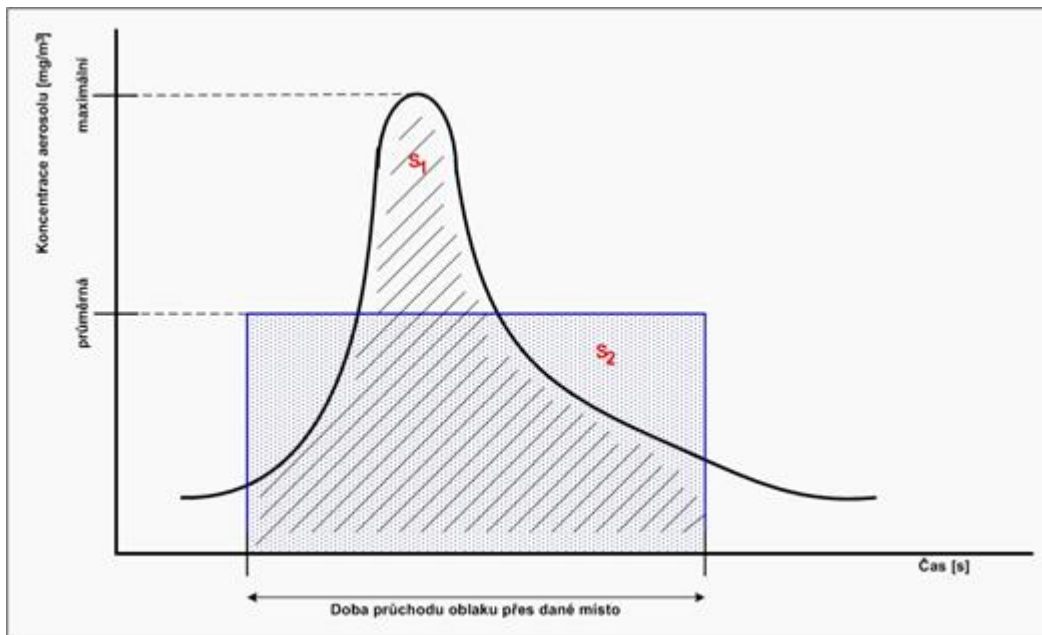
tunelu byl použit aerodynamický spektrometr částic (model APS 3321, TSI) s integrační dobou měření pro každou velikostní frakci 6 sekund. Experimentální částice byly do tunelu injektovány z generátoru aerosolu AGK 2000 (Palas GmbH). Každé stanovení bylo prováděno po dobu 30 minut, takže celkový počet velikostních distribucí činil kolem 300 pro každý jednotlivý experiment.

Výsledek z těchto experimentů pak shrnuje obrázek 28, který uvádí účinnost záchytu částic aerosolu (collection efficiency) pro rychlosti větru od 0,5 do 5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ při velikosti částic 2,41 μm (což odpovídá mediánu velikosti částic početní distribuce (CMD) prášku z mikromletého křemene použitého při terénních testech) a za podmínky vanutí větru kolmo na plochu terčíku. Z obrázku je patrné, že účinnost záchytu je velmi malá – pohybuje se v řádech 10^{-3} (pro rychlost větru 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) až 10^{-2} (pro rychlost větru 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), což znamená, že pouze cca každá stá až tisíce částice pohybující se ve válci o ploše odpovídající ploše terčíku a kolmé na terčík, se na něm zachytí. Z obrázku 28 je také patrné, že podíl zachyceného aerosolu s rostoucí rychlostí větru roste, ale ani při rychlosti větru 5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ nedosahuje ani 2%. Zbylých 98 % částic tak terčík „obtečou“ v turbulentním proudění, které vzniká kolem tyče, na které je detektor s terčíkem umístěn.



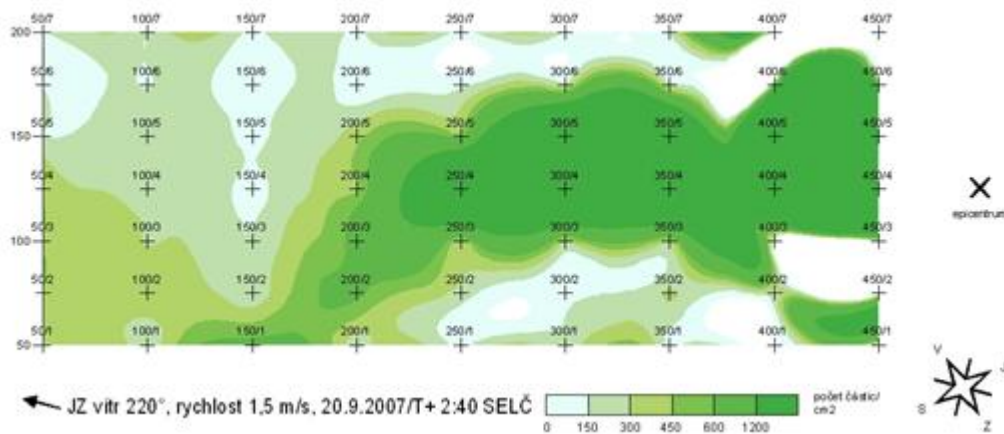
Obrázek 28: Závislost koeficientu účinnosti záchytu na pasivní dozimetr na rychlosti proudění

Účinnost záchytu je v reálné atmosféře závislá také na směru proudění, pod kterým částice k detektoru přicházejí. Proto bylo nutné pro každý terénní test, resp. příslušnou rychlost větru, hodnotu účinnosti záchytu odečtenou ze závislosti uvedené na obrázku 28 ještě vynásobit hodnotou $\sin(\theta)$, kde θ je úhel, pod kterým vzduch k detektoru proudil (kolmo na plochu detektoru = 90° , podélně = 0°). Uvedeným postupem pak mohla být stanovena průměrná koncentrace aerosolu v ovzduší, která představuje hodnotu koncentrace odpovídající stejné expozici během průchodu oblaku nad daným místem jako v případě reálného průběhu koncentrace (tj. plocha pod píkem (S_1) je shodná s plochou obdélníku (S_2)) (viz obrázek 29).

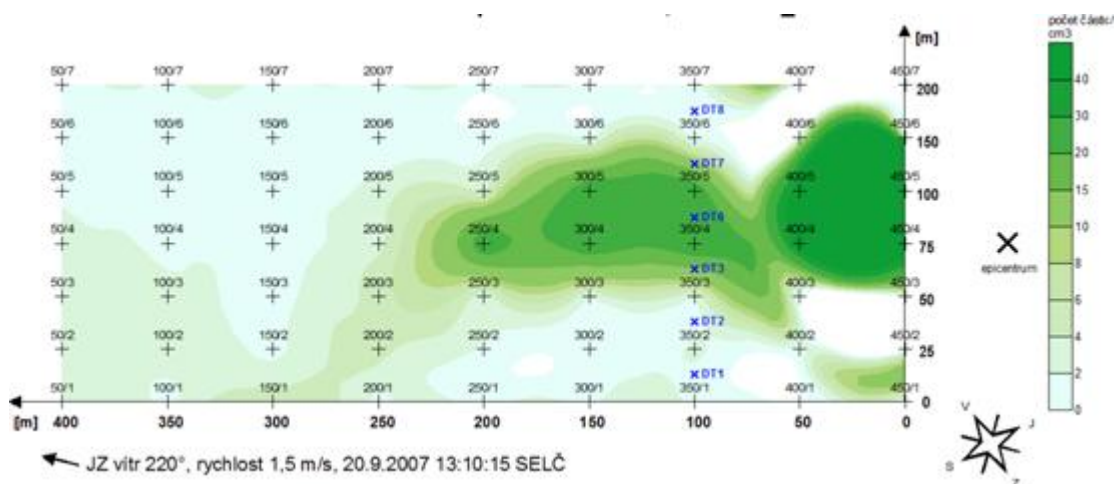


Obrázek 29: Vztah mezi průměrnou koncentrací (oblast s modrými tečkami) a reálným průběhem koncentrace v čase (šrafovaná oblast) během průchodu oblaku nad daným místem

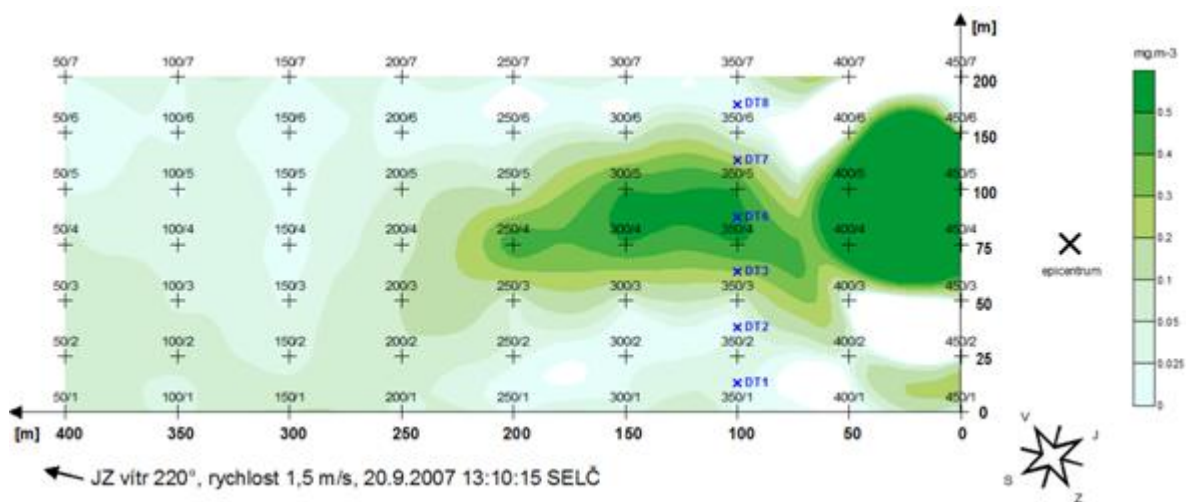
Základem pro vyhodnocení vybraných testů, které byly hodnoceny jako dobré (jednalo se celkem o 7 testů z celkově provedených 18), se tedy stal základní výstup z krigingu aplikovaného na výsledky planimetrického stanovení počtu částic na jednotlivých detektorech. Tento grafický výstup, který uvádí distribuci celkové depozice částic aerosolu v počtu částic na 1 cm^2 , je uveden na obrázku 29 (jedná se o test ZÁŘÍ_6). Jak bylo zmíněno výše, tento výstup sice poměrně dobře vykresluje „stopu oblaku“ ve výšce 1,7 metru (výška umístění detektorů), ale nevypovídá nic o koncentracích, které bylo v jednotlivých místech detekční sítě možné naměřit. Proto byly výsledky z planimetrického stanovení přepočítány za využití experimentálně stanovených koeficientů účinnosti záchytu pro příslušné povětrnostní podmínky panující během jednotlivých testů (viz výše) a takto získané hodnoty pak byly opět za pomoci krigingu vyneseny do grafického zobrazení. Tímto způsobem byly získány výstupy v podobě průměrné koncentrace částic aerosolu, které byly v ovzduší během přechodu oblaku aerosolu, v jednotkách počtu částic na 1 cm^3 (viz obrázek 30). Při zohlednění hustoty použitého mikromletého křemene (SiO_2) a jednotkového objemu částice o průměru $2,41 \mu\text{m}$, tj. částice z nejpočetnější velikostní frakce (potvrzeno měřením Ústavu pro životní prostředí UK), bylo možné vypočítat průměrné koncentrace aerosolu během přechodu oblaku v $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, které byly opět za pomoci krigingu vyneseny do grafického zobrazení (viz obrázek 31). Takto vyhodnocená data z vybraných testů v podstatě představují stěžejní výsledky terénních testů, které poskytují informaci, která je využitelná v praxi, neboť z ní lze usuzovat i na dávky, které mohou obdržet exponované osoby a tedy na ohrožení obyvatelstva při emisi nebezpečných aerosolů.



Obrázek 29: Distribuce celkové depozice částic aerosolu v počtu částic na 1 cm² na měřené ploše pro test ZÁŘÍ_6



Obrázek 30: Průměrná koncentrace částic aerosolu během přechodu oblaku v počtu částic na 1 cm³ pro test ZÁŘÍ_6

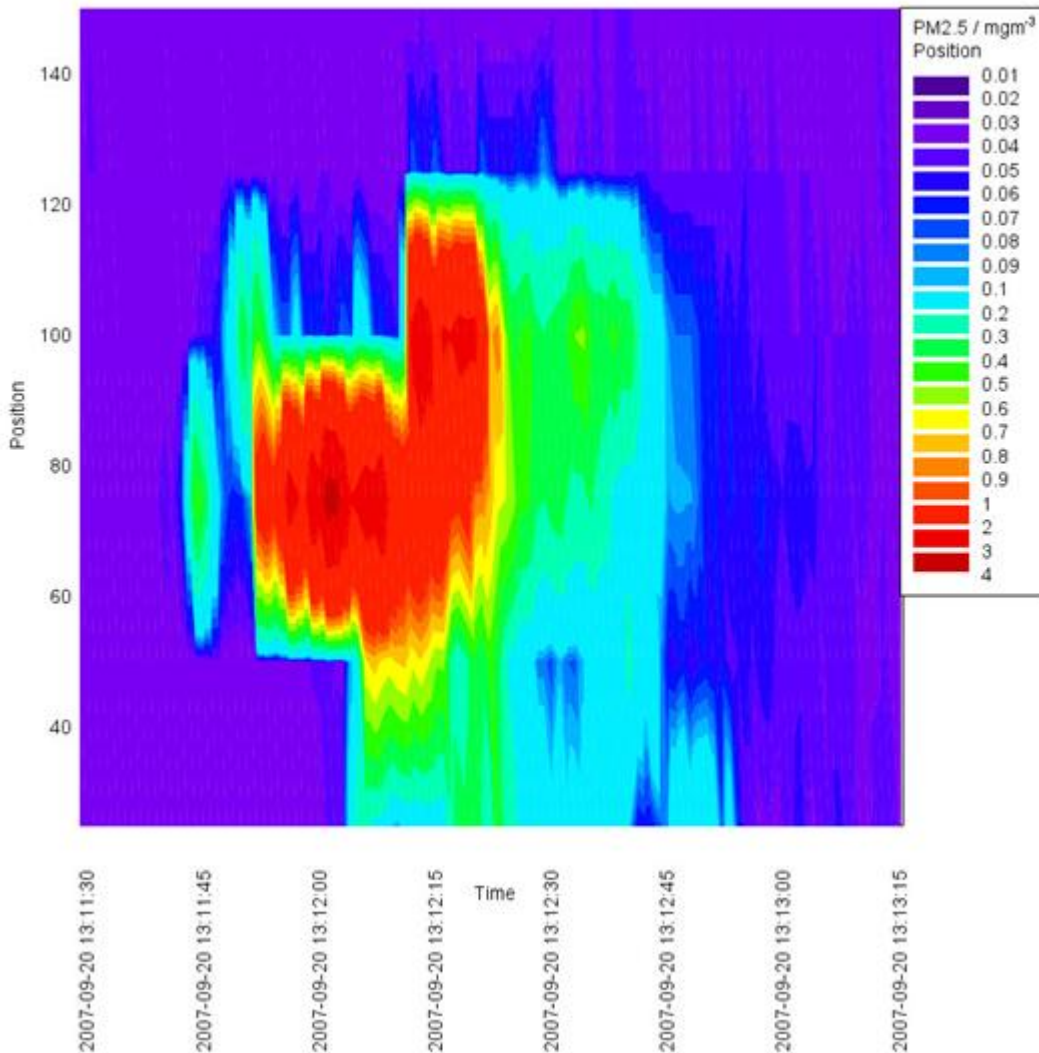


Obrázek 31: Průměrná koncentrace aerosolu během přechodu oblaku v mg·m⁻³ pro test ZÁŘÍ_6

Výpočet profilu koncentrace aerosolu v čase

Za využití speciálního software byly výsledky z kontinuálního měření koncentrace aerosolu z fotometrů DustTrak pro tři vybrané testy (DUBEN_5, ZÁŘÍ_2, ZÁŘÍ_6) dále využity pro výpočet profilu koncentrace aerosolu v čase. Tento složitý výpočet byl založen na interpolaci hodnot koncentrací aerosolu $PM_{2,5}$ naměřených jednotlivými fotometry v týchž časových okamžicích (přičemž integrační doba fotometrů činila 1 sekundu) během přechodu oblaku přes jednotlivé fotometry, které byly uspořádány v linii (viz obrázek 31 – pozice fotometrů jsou znázorněny značkami DT1 až DT8). Výsledky výpočtu byly pak také vyneseny do grafického zobrazení (viz obrázek 32), kde na ose x je vynášen čas (v tomto případě v SELČ), na ose y vzdálenost dle kót detekční sítě a jednotlivé barevné odstíny uvnitř grafu pak představují různé koncentrace podle škály uvedené vpravo. Toto vyobrazení tedy znázorňuje, jaké koncentrace aerosolu v $mg.m^{-3}$ se vyskytovaly v průběhu času podél linie, na které byly umístěny fotometry DustTrak, přičemž v případě obrázku 32 se jedná o příčnou linii nacházející se ve vzdálenosti 100 metrů od epicentra výbuchu (jedná se konkrétně o test ZÁŘÍ_6). Dá se říci, že toto vyobrazení v sobě zahrnuje všechny čtyři rozměry časoprostoru současně – tři rozměry prostoru ($x = 100$ m (vzdálenost od epicentra výbuchu – umístění linie fotometrů); $y = 20$ m až 150 m (pozice na linii s rozmístěnými fotometry); $z = 1,7$ m (výška fotometru nad zemí)) a rozměr času (běžícího od okamžiku výbuchu do ukončení měření).

Ačkoli se jedná o výstup, jehož interpretace je poměrně náročná, jeho praktický význam je značný. Poskytuje totiž informaci, jak moc se hodnota průměrné koncentrace aerosolu, tak jak jsme ji vypočítali na základě planimetrického stanovení a následného krigingu, liší od maximální hodnoty absolutní koncentrace, která se vyskytla v daném místě v průběhu průchodu oblaku. Výstup kromě toho také umožňuje získat představu o tom, jak byl oblak vnitřně strukturován – například, zda se v něm maximální koncentrace aerosolu vyskytovaly na čele či uprostřed oblaku, anebo zda měl více „hustších“ či „řidších“ míst a kde. Pro již zmiňovaný test ZÁŘÍ_6, jehož vyhodnocení je uvedeno na obrázku 32, pak lze z výsledku vyčíst, že ačkoli v linii vzdálené 100 metrů od epicentra výbuchu, kde byly fotometry umístěny, byla nejvyšší hodnota průměrné koncentrace částic aerosolu cca $0,5 mg.m^{-3}$ (viz obrázek 31), ale absolutní koncentrace aerosolu zde dosahovaly až hodnoty $4 mg.m^{-3}$, byly tedy 8x vyšší.



Obrázek 32: Profil koncentrace aerosolu v čase v linii vzdálené 100 metrů od epicentra výbuchu pro test ZÁŘÍ_6

Maximální koncentrace bylo dosaženo ve 13:12:02 SELČ, tedy 107 sekund od výbuchu. Čelo oblaku bylo ostře ohraničené (viditelný náhlý vzrůst koncentrace aerosolu ve 13:11:52 SELČ; zelený odstín zcela vlevo podle záznamu na obrázku 27 zjevně k oblaku vzniklého po výbuchu nepatří), nejhustší část oblaku s koncentracemi nad $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ měla zpočátku šířku 12 metrů a postupně se oblak rozšiřoval a zužoval (od 13:11:52 do 13:12:10), což svědčí o jeho kompaktnosti a vypovídá o oválném profilu. Ve 13:11:10 se však oblak opět prudce rozšířil, což je důkaz o druhé „husté části“ oblaku, ve které koncentrace převyšovaly hodnotu $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Rozměr oblaku v ose y, tedy jeho šířka zde dosahovala maximálně cca 60 metrů. Také těl této druhé „husté části“ oblaku byl poměrně ostře ohraničen, avšak nižší koncentrace aerosolu, od $0,1$ do $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, se zde vyskytovaly ještě dalších cca 35 sekund, z čehož lze usoudit, že se oblak v horizontální rovině značně protáhl díky tření jeho základny o zemský povrch. Z vypočtených časových intervalů lze při vynásobení hodnotou rychlosti větru určit také přibližný rozměr oblaku podél osy x, a to pro časový okamžik, kdy touto linií procházel těl oblaku. Pro tento výpočet je ale nutné vzít v úvahu fakt, že se část oblaku přiléhající k zemskému povrchu (do cca 5 metrů výšky) nepohybuje stejnou rychlostí jako okolní proudění vzduchu, ale

pouze rychlostí odpovídající cca 0,8 násobku rychlosti větru (tato hodnota byla určena odborným odhadem provedeným z videozáznamů). Tedy v případě uváděného testu ZÁŘÍ_6 činil rozměr oblaku (zahrnující části s koncentracemi aerosolu vyššími než $0,1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) v čase 150 sekund od výbuchu (tj. 107 s + 53 s) přibližně 64 metrů – numerický výpočet je: $53 \text{ [s]} * 1,5 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}] * 0,8 \approx 64 \text{ metrů}$.

Závěr

Tento článek byl zaměřen na prezentaci způsobu řešení a výsledků projektu 1H-PK2/35 „Ověření modelu šíření ohrožujících událostí – SPREAD“, který byl za finančního přispění Ministerstva průmyslu a obchodu ČR řešen v letech 2005 až 2008 konsorciem společností T-SOFT, s.r.o., Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., ISATech, s.r.o. a Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a.s. Cílem článku bylo nejen popsat obsahovou stránku projektu či zdokumentovat postup jeho řešení, ale také zveřejnit nové poznatky z oblasti rozptylu oblaků aerosolů, které jeho řešení přineslo. Toto téma nebylo vůbec snadné, ale z představených výsledků je patrné, že si řešitelský tým dokázal poradit s celou řadou problémů a těžkostí, které provázejí každý projekt, jehož těžištěm jsou experimenty prováděné v terénu. A právě terénní testy lze jednoznačně označit za nejzajímavější část řešení. Byly provedeny postupně v celkem pěti sériích, z nichž tři zahrnovaly provedení experimentů zaměřených na studium rozptylu oblaků aerosolu a zjištění dosahu referenčních koncentrací, a kterým se také věnoval tento třídílný článek.

První díl článku byl zaměřen na fázi přípravy testů, představil lokalitu vybranou pro jejich realizaci, způsob stanovení nevhodnějších termínů i požadavky na materiálně-technické zajištění, což byly klíčové požadavky pro úspěšné provedení všech plánovaných experimentů. Druhý díl pak detailně seznamoval se všemi pracovními operacemi, které si vlastní provádění testů vyžádalo. Mezi ně patřilo například provedení návrhu a konstrukce systému sběru dat, provádění operativních analýz povětrnostní situace a měření relevantních meteorologických veličin, snímání obrazu a řada dalších. Třetí a poslední díl tohoto článku pak prezentoval výsledky, které projekt přinesl a také jejich interpretaci. Jedním z výstupů je podání detailního popisu způsobu rozptylu oblaků aerosolu vzniklých jednorázovou emisí (výbuchem) v reálné atmosféře, kterému se dle dostupných odborných prací doposud nikdo ve světě v této šíři a s tímto zaměřením nevěnoval. Výsledky testů také umožní validovat navrhovaný rozptylový model, jehož softwarová podoba bude sloužit jako rychlý vyhodnocovací nástroj hasičům, záchranářům, odborníkům z praxe i úředníkům zodpovědným za havarijní plánování. Kromě těchto zmíněných přínosů se nabízejí i další, které budou v rámci řešení projektu ještě realizovány.

Při uvážení všech výše uvedených skutečností lze konstatovat, že projekt splnil svůj cíl, neboť nejenže byly úspěšně řešeny jeho jednotlivé etapy, ale především proto, že přinesl řadu unikátních (původně neočekávaných) zkušeností, poznatků a informací, které postupně jistě naleznou uplatnění v různých oborech i mimo bezpečnostní inženýrství či krizové řízení.

Autor článku:

[Ing. Michaela Havlová](#)

[Mgr. Jan Píšala](#)

[RNDr. Mgr. Petr Skřehot, Ph.D.](#)