

**IMISNÍ MODEL**  
**ATEM**

**Metodická příručka**

listopad 2005

## 1. ÚVOD

Předložená Metodická příručka obsahuje návody a postupy pro aplikaci modelových postupů ATEM pro výpočet koncentrací znečišťujících látek emitovaných bodovými, liniovými nebo plošnými zdroji znečištění. V příručce je obsažen popis potřebných vstupních informací o jednotlivých typech emisních zdrojů, dále jsou zde uvedeny základní rovnice výpočtu, vztahy pro stanovení dalších, ve výpočtech používaných parametrů a ukázán postup výpočtu hlavních charakteristik (tj. koncentrací) znečištění ovzduší i některé další možné aplikace.

Použitým přístupem k výpočtu charakteristik stavu znečištění spadá předložená metodika do skupiny tzv. gaussovských disperzních modelů. Navazuje jednak na postupy popsané v publikaci „Metodika výpočtu znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů zdrojů“, jež byla v roce 1979 vydána Ministerstvem lesního a vodního hospodářství ČSR [1] a tuto metodiku rozšiřuje a modifikuje na základě řady nově získaných poznatků. Popis předložené metodiky lze nalézt též v [2].

Předložená metodika výpočtu charakteristik stavu znečištění umožňuje

- výpočet znečištění ovzduší plynnými látkami a prachem od velkého počtu bodových, liniových a plošných zdrojů znečištění ovzduší
- výpočet charakteristik znečištění v husté pravidelné i nepravidelné síti referenčních bodů tak, aby výsledky mohly být dále zpracovány např. pomocí geografického informačního systému (GIS) a podány v mapové formě
- výpočet znečištění v relativně komplikovaném terénu
- vycházet při výpočtu z většího počtu větrných růžic, přičemž každá z nich je charakteristická pro určitou část modelové oblasti a popisuje větrné poměry v této oblasti; každá větrná růžice bere v úvahu statistické rozložení směru a rychlosti větru vztažené k třídám vertikální teplotní stability ovzduší v mezní vrstvě atmosféry podle klasifikace Bubníka a Koldovského.

V každém referenčním bodě je možné získat následující charakteristiky znečištění ovzduší:

- maximální možné hodinové koncentrace znečištění, které se mohou vyskytnout ve všech třídách stability ovzduší a rychlosti větru (analog měřených hodinových koncentrací)
- hodnotu maximální možné krátkodobé koncentrace znečištění, již bylo v daném bodě výpočtem dosaženo, bez ohledu na rychlost větru a vertikální teplotní stabilitu (analog měřených hodinových průměrů)
- hodnotu roční průměrné koncentrace
- dobu trvání, po kterou hodnota krátkodobé koncentrace překračuje zadanou hodnotu (např. krátkodobý imisní limit pro daný druh znečištění).

Dále je možno

- v každém referenčním bodě určit procentuální podíl, kterým se jednotlivé skupiny znečišťovatelů (velké vybrané bodové zdroje, dopravní zdroje, definovaná množina zdrojů apod.) podílejí na dosažené hodnotě průměrné roční (dlouhodobé) koncentrace

- určit příspěvky k celkové hodnotě koncentrace z jednotlivých sektorů větrné růžice (jak pro krátkodobé, tak dlouhodobé hodnoty) v každém referenčním bodě
- stanovit konkrétní emisní zdroje, které v daném referenčním bodě přispívají k celkové koncentraci vyšší hodnotou, než je zadaný procentuální podíl
- stanovit výšku bodového zdroje (komína) tak, aby byly splněny emisní limity

Tato metodika, ostatně jako všechny metodiky spadající do oblasti gaussovských disperzních modelů, je především určena k vypracování rozptylových studií použitelných jako podklady pro hodnocení stavu kvality ovzduší v zájmové oblasti. Metodika není vhodná pro studie, kdy rozloha modelové oblasti převyšuje hodnotu cca 100 km a dále není vhodná pro detailní stanovování hodnot koncentrací např. v uličních kaňonech nebo složité zástavbě. Orografie (reliéf terénu) území pokrytého výpočtem by neměla být příliš komplikovaná. Je-li přesto model v orograficky komplikované oblasti použit, pak by v každém případě měla být interpretace výsledků svěřena odborníkovi. Metodiku nelze použít pro určování hodnot koncentrací za velmi nízkých rychlostí větru a za bezvětří – toto je opět společný rys gaussovských disperzních modelů.

## 2. VSTUPNÍ DATA

Vstupní informace potřebné k výpočtu znečištění ovzduší je možno rozdělit do následujících kategorií.

1. Informace o jednotlivých emisních zdrojích, včetně údajů o dálkovém přenosu (tzv. transferech)
2. Meteorologické informace
3. Informace o referenčních bodech
4. Informace o imisních limitech a referenčních koncentracích

Struktura vstupních údajů o emisních zdrojích se liší podle toho, zda se jedná o bodový, liniový nebo plošný zdroj. Jinak je celková sada jednotlivých vstupních souborů pro danou úlohu neměnná a musí obsahovat informace, které budou blíže popsány v následujících odstavcích.

Souřadnice emisních zdrojů i referenčních bodů jsou obvykle zadány v tzv. absolutní soustavě (tj. např. soustavě JTSK, která vychází z Křovákovy souřadné soustavy, ale pro účely využití v GIS byla transformována na pravotočivý souřadný systém). Výpočet pak probíhá v pravotočivé soustavě orientované tak, že osa  $x$  je namířena ve směru proudění a emisní zdroj leží v počátku souřadnic, vertikální souřadnice  $z$  míří k zenitu (tzv. přirozená souřadnicová soustava). Detailní popis souřadnicového systému bude rozebrán v části 3.2.1.

### 2.1. Vstupní údaje o emisních zdrojích

#### 2.1.1 Bodové zdroje

Za bodový emisní zdroj lze považovat komíny, výduchy a odvětrávání, tj. každý emisní zdroj, jehož rozměr (charakteristický délkový rozměr emitující plochy – např. její poloměr) je zanedbatelný proti vzdálenostem, v nichž se počítá znečištění tímto zdrojem působené. Vstupní údaje o každém emisním bodovém zdroji (komínu) jsou následující:

1. identifikátor zdroje, potřebný pro další identifikaci
2. souřadnice paty komínu a nadmořská výška
3. stavební výška komínu (metry)
4. tepelná vydatnost spalin (MW)
5. provozní doba zdroje během roku (hodiny.rok<sup>-1</sup>)
6. třída zdroje – identifikace bodového zdroje udávající, zda se jedná o vybraný velký vzdálený zdroj nalézající se na území ČR, či zdroj ležící v modelové oblasti
7. číslo větrné růžice charakteristické pro oblast, v níž se zdroj nalézá
8. množství emisí daného znečištění za časovou jednotku (g.s<sup>-1</sup>)

### 2.1.2 Liniové zdroje

Pomocí liniových zdrojů jsou téměř výhradně parametrizovány automobilové komunikace (silnice, ulice), pouze výjimečně pak frekventované železniční komunikace. Tvoří-li komunikace přímou linii, pak lze tuto komunikaci aproximovat liniovým zdrojem např. od jedné křižovatky k následující, není-li komunikace přímková pak je aproximována rovnými úseky tak, aby rozdíl mezi skutečným tvarem komunikace a po částech lineární aproximací byl co nejmenší a každá přímková část se uvažuje jako liniový zdroj znečištění. Ke každému liniovému zdroji (tj. přímkovému úseku komunikace) je nutno zadat následující údaje:

1. identifikátor úseku liniového zdroje - slouží k identifikaci zdroje
2. souřadnice a nadmořská výška konců daného úseku liniového zdroje
3. šířka zdroje – vozovky (metry)
4. doba, po kterou trvá po daném úseku provoz během roku (hodiny.rok<sup>-1</sup>)
5. třída emisního zdroje – v případě liniových zdrojů se bude téměř vždy jednat o dopravní zdroj
6. číslo větrné růžice charakteristické pro oblast, kde se komunikace nalézá
7. průměrné roční emise znečišťujících látek z celé délky úseku (g.s<sup>-1</sup>)

### 2.1.3 Plošné zdroje

Pomocí plošných zdrojů jsou v předložené metodice parametrizovány následující druhy reálných emisních zdrojů:

- a) lokální vytápění – velký počet malých bodových zdrojů relativně hustě pokrývajících určitou oblast,
- b) dopravní zdroje – zejména křižovatky, parkoviště
- c) plošně působící stacionární zdroje (lomy, nezpevněné plochy, staveniště).

Informace, které je nutno pro tuto skupinu zdrojů zadat, se sestávají z následujících položek:

1. identifikátor zdroje
2. souřadnice a nadmořská výška středu čtverce aproximujícího plošný zdroj
3. průměrná výška zástavby (u dopravních zdrojů se zadává 0)
4. průměrná tepelná vydatnost (MW, u dopravních zdrojů se zadává 0)
5. délka strany čtverce parametrizujícího plošný zdroj (metry)
6. počet hodin za rok, po něž zdroj emituje
7. třída zdroje – dopravní nebo jiný (vytápění, staveniště apod.) zdroj
8. číslo větrné růžice odpovídající oblasti, v níž se zdroj nalézá
9. emise znečišťujících látek za jednotku času z celé plochy plošného zdroje (g.s<sup>-1</sup>)

Vzhledem k tomu, že plošný zdroj aproximující velké množství bodových zdrojů (např. blok s lokálními topeništi) není pokryt jednotlivými zdroji rovnoměrně, předpokládá se u takovýchto zdrojů hustota zástavby 0,8. V případě dopravních zdrojů metodika předpokládá rovnoměrné rozložení zdrojů po celé ploše zdroje, tj. hustota je rovna 1.

Tepelná vydatnost plošného zdroje (v případě lokálního vytápění) se bere jako průměrná tepelná vydatnost zahrnutých malých lokálních bodových zdrojů, u dopravních zdrojů se zadává 0.

Výška plošného zdroje (v případě lokálního vytápění) se bere jako průměrná stavební výška zástavby v daném plošném zdroji, u dopravních zdrojů se zadává 0.

#### 2.1.4 Vliv dálkového přenosu (Transferů)

Vliv emisních zdrojů, které nejsou explicitně uvedeny v příslušném datovém souboru, je parametrizován pomocí tzv. transferů. V těchto transferech je skryt jednak vliv domácích, do vlastního souboru emisních dat nezahrnutých zdrojů, vliv dálkového přenosu znečištění, pocházejícího ze zahraničí a přírodní pozadí. Transferů jsou dány jako hodnoty koncentrace dané škodliviny, jež závisejí na směru rychlosti proudění a jež je nutno přičíst v každém referenčním bodě k hodnotě vypočtené koncentrace. Pro každý typ znečišťující látky je možno určit i průměrnou roční hodnotu, což je vážený průměr transferů přes jednotlivé sektory větrné růžice, kdy vahami jsou četnosti proudění z daných sektorů. Tuto hodnotu je možno využít při výpočtu průměrné roční hodnoty koncentrace daného druhu znečištění. Není-li hodnota transferů známa či se z nějakého důvodu nemusí do výpočtu zahrnout, je možné nastavit hodnotu transferů přes všechny sektory = 0 a stejně tak i průměrnou roční hodnotu.

#### 2.1.5 Informace o prachu

V případě výpočtu znečištění ovzduší prachem je v současné době pevně zadáno spektrum velikostí prašných částic příslušné jednotlivým velikostním frakcím, procentuální zastoupení těchto frakcí i sedimentační rychlost odpovídající jednotlivým frakcím. Proto v současnosti není nutno tyto údaje zadávat. Autoři si však jsou vědomi omezení plynoucích z tohoto přístupu a připravují modifikaci tak, aby bylo možno zadávat jak „vlastní“ spektrum frakcí, tak i v případě, že uživateli tato veličina není známa, bylo možno použít dosud používaný „přednastavený“ přístup. Současné rozdělení a procentuální zastoupení jednotlivých frakcí udává následující tabulka.

třídy velikostí jednotlivých frakcí [ $\mu\text{m}$ ]	0 - 5	5 - 10	10 – 15	15 – 20	20 - 25	25 – 30	nad 30
Charakteristický průměr $d$ částic v dané frakci [ $\mu\text{m}$ ]	3.15	7.768	12.664	17.618	22.592	27.576	35.00
Procentuální podíl jednotlivých frakcí	33	28	22	10	4	1	2

Výše uvedená tabulka platí pro případ výpočtu koncentrací celkové prašnosti (SPM). V případě hodnocení koncentrací PM10 se uvažují pouze první dvě třídy (0-5 a 5-10  $\mu\text{m}$ ).

Blíže bude o způsobu určení charakteristického průměru a odpovídající sedimentační rychlosti pevných částic pojednáno v části 3.2.7.

## 2.2. Meteorologické vstupní údaje

Skupina gaussovských disperzních modelů, do níž předložená metodika spadá, se vyznačuje relativní nenáročností v požadavcích na data charakterizujících stav atmosféry. Z meteorologických údajů jsou pro výpočet potřebné tzv. větrné růžice, jejich popis bude prezentován v následujících odstavcích.

Zatímco většina gaussovských disperzních modelů využívá při výpočtu jednu větrnou růžici, počet větrných růžic popisujících poměry proudění v zájmové oblasti v této metodice není omezen. Dá se říci, že čím komplikovanější je tvar reliéfu zemského povrchu (tzv. orografie), tím je vhodnější používat více růžic. Naopak v případě naprosto rovinného terénu bude stačit jedna větrná růžice pro popis šíření znečištění od všech místních zdrojů. Tímto způsobem lze do jisté míry zahrnout vliv členitější orografie na prostorové rozložení pole proudění.

Poněkud jiná je situace v případě výpočtu příspěvků od vybraných velkých bodových zdrojů nalézajících se na území ČR a v okolí zájmové (modelové) oblasti. V tomto případě je vhodné využít větrnou růžici ze standardní hladiny 850 hPa případně 925 hPa založenou na datech aerologické sondáže stanice Praha – Libuš.

Při výpočtu příspěvku od těchto zdrojů nemá smysl zacházet do přílišných detailů, neboť vzdálenost zde v řadě případů převyšuje hodnotu, kdy je tato metodika aplikovatelná pro případ, kdy chceme určit konkrétní vliv určitého zdroje (na druhé straně však jde o to, aby se při výpočtu emisního zatížení určité oblasti postihl i vliv nejvýznamnějších vzdálených emisních zdrojů, který nemusí být zanedbatelný). Veškerá data popisující meteorologické podmínky pro tento případ (růžice pro „dálkový“ přenos) jsou proto vztažena k neutrálnímu vertikálnímu teplotnímu zvrstvení.

### 2.2.1 Údaje pro standardní výpočty

Stanovení větrných růžic, tj. rozložení relativních četností proudění do osmi, případně šestnácti základních směrů (tj. sever, severovýchod, východ ...; čím podrobnější dělení na jednotlivé sektory, tím lépe) v závislosti na rychlosti proudění a bezvětří a třídě vertikální teplotní stability doporučujeme zadávat odborníkům. Jak již bylo uvedeno, v případě členitého terénu je vhodné celou modelovou oblast rozdělit na takové podoblasti, kdy pro každou jednotlivou podoblast je možné z hlediska větrných poměrů charakterizovat jednou větrnou růžicí. Podoblasti postupně číslováme od 1 do  $N_{\text{oblast}}$ , kde  $N_{\text{oblast}}$  je nejvyšší číslo podoblasti a stejná čísla přiřazujeme jednotlivým růžicím. Všem emisním zdrojům ležícím v k-té podoblasti pak přiřadíme k-tou větrnou růžici, stejně tak všem referenčním bodům nalézajícím se v k-té podoblasti přiřadíme k-tou větrnou růžici.

Plošným zdrojům přiřadíme číslo růžice podle toho, v které podoblasti se nalézá střed plošného zdroje. Liniový zdroj může mít jeden konec v jedné podoblasti a druhý v jiné. Pak je vhodné rozdělit tento liniový zdroj na dva tak, aby dělicí bod ležel právě na hranici obou podoblastí.

Intenzita, s jakou se znečišťující látky v atmosféře rozptylují, závisí zejména na dvou faktorech: rychlosti proudění a intenzitě termicky podmíněné turbulence, přičemž intenzita termické turbulence je přímo závislá na vertikální teplotní stabilitě atmosféry. Proto relativní četnost proudění z jednotlivých osmi základních směrů kompasové růžice v závislosti na těchto dvou faktorech, tj. rychlosti větru a vertikální teplotní stabilitě atmosféry vytvářejí základní klimatickou informaci poměrech proudění v dané oblasti - větrnou růžici.

Rychlost větru je dána pomocí 3 tříd rychlosti (viz [1], [2] nebo [3]) a uvádí ji následující tabulka:

Třída rychlosti větru	Rozmezí rychlostí (m.s <sup>-1</sup> )	Velikost třídni rychlosti (m.s <sup>-1</sup> )
1. slabý vítr	0 – 2,5 (včetně)	1,7
2. střední (mírný) vítr	2,5 – 7,5 (včetně)	5,0
3. silný vítr	více než 7,5	11,0

Rychlost větru je dána v tzv. anemometrické výšce, tj. ve výšce 10 m nad úrovní terénu. Směr větru je v meteorologii udáván vždy podle toho, odkud vítr vane. Tj. severní vítr označuje vítr vanoucí ze severu, tedy s azimutem 0°, východní vítr pak vítr s azimutem 90°. Při použití např. Křovákovy souřadné soustavy nebo soustavy JTSK je nutno použít transformaci do dané souřadnicové soustavy (viz kap. 3.2.1.1.).

Jak již bylo uvedeno, intenzita termické turbulence je závislá na vertikální teplotní stabilitě atmosféry, tedy na vertikálním teplotním zvrstvení. Předložená metodika popisuje stabilitu vertikálního teplotního zvrstvení pomocí klasifikace podle Bubníka a Koldovského odvozené v ČHMÚ. Tato klasifikace obsahuje 5 tříd vertikální teplotní stability atmosféry:

Třída stability	Vertikální teplotní Gradient (°C/100 m)	Charakteristika
1. superstabilní	$\gamma < -1,6$	silná inverze, velmi špatné rozptylové podmínky
2. stabilní	$-1,6 \leq \gamma < -0,7$	obvyklá inverze, špatné rozptylové podmínky
3. izotermní	$-0,7 \leq \gamma < 0,6$	slabá inverze, izotermie, malá kladná hodnota vertikálního teplotního gradientu, zhoršené rozptylové podmínky
4. normální	$0,6 \leq \gamma \leq 0,8$	indiferentní teplotní zvrstvení, obvyklý případ dobrých rozptylových podmínek
5. konvektivní	$0,8 < \gamma$	labilní teplotní zvrstvení, velmi dobrý rozptyl znečištění v atmosféře



Vertikální teplotní gradient (přesněji lokální vertikální teplotní gradient) je určen vztahem

$$\gamma = - \partial T(z) / \partial z$$

v němž  $T(z)$  udává závislost teploty vzduchu na výšce v daném místě.

Dále je nutno poznamenat, že ne všechny třídy vertikální teplotní stability se mohou vyskytnout při všech hodnotách rychlosti proudění. (3. třída rychlosti se může, podle definice, vyskytovat pouze v 3. a 4. třídě stability; v 1. třídě stability je přípustná pouze 1. třída rychlosti.)

Větrná růžice používaná pro popis transportu a rozptylu znečišťujících látek ze vzdálených bodových zdrojů má relativní četnosti proudění ze všech sektorů pro všechny třídy vertikální teplotní stability a třídy rychlosti jsou položeny rovny 0 kromě 4., tj. normální stabilitní třídy.

## 2.3. Údaje o referenčních bodech

### 2.3.1 Údaje o referenčních bodech

Referenční body, v nichž jsou charakteristiky znečištění určovány, mohou vytvářet jak pravidelnou síť tak mohou být i nepravidelně rozmístěny v oblastech zvýšeného zájmu. V obou těchto případech se musí pro každý z referenčních bodů zadat následující informace:

1. identifikátor bodu
2. souřadnice referenčního bodu
3. nadmořskou výšku místa, kde se referenční bod nalézá – v síti referenčních bodů tato veličina také popisuje orografii modelové oblasti
4. výšku bodu nad terénem – standardně se parametry imisního zatížení počítají pro tzv. respirační výšku, tj. 1,5 m nad úrovní terénu
5. odkaz na růžici, která charakterizuje podmínky proudění v oblasti výskytu referenčního bodu

Souřadnice referenčního bodu (nebo referenčních bodů) jsou zadány v obecném souřadnicovém systému (např. JTSK) a během výpočtu pak jsou transformovány do souřadnicové soustavy spojené se směrem proudění.

### 2.3.2 Možnost výpočtu charakteristik znečištění nad úrovní terénu

Jak bylo uvedeno v předchozím odstavci, charakteristiky znečištění jsou standardně počítány pro výšku 1,5 m nad úrovní terénu, tj. pro tzv. respirační výšku. Chceme-li počítat charakteristiky znečištění v jiných výškových hladinách, pak je nutno ve vstupních informacích o referenčních bodech zadat jinou výšku bodu nad terénem než je respirační

výška. Toho lze např. využít při výpočtu charakteristik v různých patrech na fasádách domů nebo při výpočtu vertikálního profilu charakteristik znečištění (koncentrace) v určitém místě. Při tomto druhu výpočtu zůstávají souřadnice  $x$  a  $y$  referenčního bodu konstantní stejně tak jako nadmořská výška místa kde se referenční bod nalézá, mění se jen hodnota výšky referenčního bodu nad terénem.

#### **2.4. Údaje o imisních limitech a referenčních koncentracích znečišťujících látek**

Jednou z charakteristik počítaných v každém referenčním bodě je určení doby překročení krátkodobého imisního limitu daného druhu znečištění v intervalu jednoho kalendářního roku. Pro určení těchto veličin je nutné, aby do výpočtu vstupovaly informace o imisních limitech pro hodinovou koncentraci, , a tato hodnota je pak srovnávána s vypočtenými krátkodobými hodnotami koncentrace příslušného druhu znečištění. Někdy mohou nastat případy, že je nutné porovnat vypočtené hodnoty s hodnotou denního imisního limitu,. Výpočet hodnot průměrné denní koncentrace daného typu znečištění není součástí této metodiky.

### 3. POPIS METODIKY VÝPOČTU ŠÍŘENÍ ZNEČIŠTĚNÍ

#### 3.1. Základní vztahy pro výpočet koncentrace znečišťující látky

Před tím, než se začneme zabývat vlastními vztahy pro výpočet charakteristik znečištění, uvedeme seznam a vysvětlení významu veličin a parametrů, jež se ve zmíněných vztazích objevují:

$a$ .....	exponent závislý na třídě stability (postupný vznos a vertikální profil větru)
$c(x,y,z_T)$ .....	okamžitá hodnota koncentrace od jednoho zdroje daného typu v referenčním bodě o souřadnicích $(x,y,z_T)$
$c$ .....	v závislosti na indexech (vysvětleno v textu) různě definované hodnoty koncentrací nebo příspěvků k hodnotám koncentrace od $i$ -tého zdroje
$cet_{stab,rych}$ .....	četnost výskytu třídy stability a třídy proudění v jednom sektoru
$cet_{sektor,stab,rych}$ .....	četnost výskytu třídy stability a třídy proudění přes jednotlivé sektory
$CELKCET_{sektor}$ .....	suma všech hodnot $cet_{stab,rych}$ v jednom sektoru
$d$ .....	buď charakteristický průměr částic v $\mu m$ , nebo šířka komunikace v případě liniových zdrojů, nebo délka strany plošného zdroje
$DOBA_{zdroj}$ .....	doba provozu zdroje [hod]
$E$ .....	emisní hmotnostní tok [ $gs^{-1}$ ] pro bodový zdroj
$E_L$ .....	emisní hmotnostní tok [ $gs^{-1}$ ] pro liniový zdroj
$E_P$ .....	emisní hmotnostní tok [ $gs^{-1}$ ] pro plošný zdroj
$f$ .....	tepelná vydatnost zdroje [MW]
$g$ .....	tíhové zrychlení
$h_v$ .....	korekce výšky vlečky $n$ -té frakce prachových částic na sedimentační rychlost této frakce [ $ms^{-1}$ ]
$h_s$ .....	stavební výška zdroje [m]
$H_{ef}$ .....	efektivní výška zdroje [m]
$H_{ef0}$ .....	efektivní výška zdroje nad rovinným terénem (bez korekcí) [m]
$\Delta H$ .....	vznos vlečky [m]
$L_b$ .....	číselný faktor u výpočtu postupného vznosu
$r'_0$ .....	efektivní poloměr plošného zdroje [m]
$R_{dis}$ .....	vzdálenost referenčního bodu od liniového zdroje [m]
$RDOBA_{zdroj}$ .....	$= DOBA_{zdroj} / 8760$
$T_{stab}$ .....	číselný parametr použitý ve vztahu pro korekci $H_{ef}$ na terénní nerovnosti, závislý na třídě stability
$T^{dim}$ .....	doba překročení zadané hodnoty krátkodobé koncentrace v referenčním bodě
$T^{lim}_{sektor}$ .....	doba překročení zadané hodnoty krátkodobé koncentrace v referenčním bodě při proudění z jednoho sektoru
$u(z_p)$ .....	třídní rychlost proudění v anemometrické výšce $z_p$ [ $ms^{-1}$ ]
$u_s$ .....	rychlost v koruně komína [ $ms^{-1}$ ]
$v_{sn}$ .....	sedimentační rychlost $n$ -té frakce prachových částic [ $ms^{-1}$ ]
$WD_{10}$ .....	azimut proudění v anemometrické výšce
$WDI_z$ .....	azimut proudění ve výšce $z$ nad terénem
$X,Y$ .....	souřadnice v absolutní soustavě (např. JTSK)

$x, y$ .....	souřadnice v soustavě souřadné spojené se směrem proudění
$X_i, Y_i$ .....	souřadnice konců liniového zdroje ( $i = 1, 2$ )
$X_p, Y_p$ .....	souřadnice středu liniového nebo plošného zdroje
$X_R, Y_R$ .....	souřadnice referenčního bodu
$x_{Yvirt}$ .....	virtuální vzdálenost pro $\sigma_y$
$x_{Zvirt}$ .....	virtuální vzdálenost pro $\sigma_z$
$z_i$ .....	horní hranice vrstvy směšování [m]
$z_T$ .....	výška referenčního bodu nad terénem (souřadnice z referenčního bodu)
$\alpha_{sektor}$ .....	úhel sektoru, na něž je rozdělena věrné růžice
$\gamma_n$ .....	odrazový koeficient n-té frakce prachových částic
$\phi_n$ .....	relativní podíl n-té frakce prachových částic na celkové emisi prašných částic
$\sigma_y$ .....	rozptylový parametr v horizontálně příčném směru
$\sigma_z$ .....	rozptylový parametr ve vertikálně příčném směru
$\sigma_{y0}$ .....	počáteční hodnota $\sigma_y$ v místě liniového nebo plošného zdroje
$\sigma_{z0}$ .....	počáteční hodnota $\sigma_z$ v místě liniového nebo plošného zdroje
$\sigma_0$ .....	hodnota závislá na stabilitě sloužící k parametrizaci $\sigma_{z0}$

### 3.1.1 Plynné znečištění

Obecné vztahy pro výpočet přízemní koncentrace znečišťující látky emitované ze stacionárních zdrojů lze získat jako řešení rovnice difúze ve stacionárním tvaru, kde se v souladu se statistickou teorií turbulence předpokládá, že ve směrech vertikálně a horizontálně příčném vzhledem ke směru proudění je rozptyl znečišťující látky popsán pomocí směrodatných odchylek Gaussova (normálního) rozložení – tzv. rozptylových parametrů  $\sigma_y$  a  $\sigma_z$ . Tyto vztahy se budou poněkud lišit podle toho, jsou-li odvozeny pro bodový zdroj, nekonečně dlouhý liniový zdroj nebo plošný zdroj. V dalších odstavcích uvádíme příslušné vztahy tak, jak jsou podle předložené metodiky používány k výpočtu koncentrací znečišťujících látek.

#### 3.1.1.1 Výpočet hodnoty přízemní koncentrace plynného znečištění z bodového zdroje

Pro výpočet koncentrace plynného znečištění ze stacionárního bodového zdroje emisí lze vycházet ze vztahu

$$c(x, y, z_T) = \frac{KVDE}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_s} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

$V$  označuje tzv. vertikální člen, jenž je pro nekonečný počet odrazů dán vztahem:

$$V=2 \cdot \exp \left[ -0.5 \left( \frac{z_{\tau} - H_{ef}}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

Pomocí členu  $D$  je parametrizováno jakékoliv odstraňování znečišťující látky z atmosféry. Blíže bude vyjádření tohoto členu popsáno v části 3.2.6.

Velikost číselné konstanty  $K = 10^6$  zajišťuje, že je-li hodnota hmotnostního toku emitovaného znečištění  $E$  zadána v příslušných jednotkách (v případě uváděné metodiky je  $E$  udáváno v  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ), vypočtená koncentrace vyjde v požadovaných jednotkách (zde v  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Vztah pro výpočet koncentrace působené v referenčním bodě bodovým emisním zdrojem platí v souřadné soustavě spjaté se směrem proudění, kdy počátek souřadnic se nalézá v bodovém emisním zdroji a kladný směr osy  $x$  je totožný se směrem proudění. Transformační vztahy základní souřadnou soustavou (např. soustavou JTSK), v níž jsou souřadnice zdrojů a referenčních bodů ve vstupních datech zadány a soustavou spojenou se směrem proudění, budou uvedeny v odstavci 3.2.1.1.

### 3.1.1.2 Výpočet hodnoty přízemní koncentrace plynného znečištění z liniového zdroje

Pro výpočet hodnoty přízemní koncentrace plynného znečištění z liniového zdroje je v předložené metodice používán vztah:

$$c(x_I, y_I, z_I) = \frac{KVDE_L}{2\sqrt{2\pi}u_s\sigma_z} \times \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{0,5d_{kom} \sin \theta + y}{\sqrt{2}\sigma_y} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{0,5d_{kom} \sin \theta - y}{\sqrt{2}\sigma_y} \right) \right]$$

v němž symboly  $K$ ,  $V$  a  $D$  mají stejný smysl a vyjádření jako v případě bodových zdrojů ( $K = 10^6$ ),  $\theta$  označuje úhel mezi liniovým zdrojem a směrem větru. Funkce  $\operatorname{erf}(a)$  je tzv. chybová funkce (error function) argumentu  $a$  a bývá standardní součástí knihoven matematických podprogramů (viz např. [4]).

Uvedený vztah platí v soustavě souřadné spojené se směrem proudění, kdy počátek této soustavy je umístěn do středu liniového zdroje. Symbol  $d_{kom}$  označuje délku komunikace a je dán vztahem:

$$d_{kom} = ((X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2)^{0,5}$$

v němž souřadnice  $(X_1, Y_1)$  a  $(X_2, Y_2)$  označují konce liniového zdroje v absolutní soustavě (např. JTSK) a  $y$  je souřadnice referenčního bodu v soustavě souřadné spojené se směrem

proudění.  $\theta$  označuje úhel, který spolu svírá směr proudění a liniový zdroj. Způsob jeho určení je následující.

Nejprve se určí koeficienty  $A$ ,  $B$  a  $C$  rovnice přímky  $Ax + By + C = 0$ , na níž leží liniový zdroj. Tyto koeficienty jsou:

$$A = (Y_2 - Y_1), B = -(X_2 - X_1), C = Y_1(X_2 - X_1) - X_1(Y_2 - Y_1)$$

Koeficienty  $A_w$  a  $B_w$  pro směr větru jsou rovny:

$$A_w = -\cos WD_{10}, B_w = -\sin WD_{10}$$

kde  $WD_{10}$  označuje azimut větru podle větrné růžice z hladiny 10 m (standardní anemometrická výška). Sinus úhlu  $\theta$  je pak dán vztahem:

$$\cos \theta = \frac{|A A_w + B B_w|}{d_{kom}}$$

$$\sin \theta = (1 - \cos^2 \theta)^{0,5}$$

Při výpočtu koncentrací působených v referenčním bodě  $(X_R, Y_R)$  (souřadnice v absolutní soustavě) liniovým zdrojem, je nutno splnit podmínky pro vzájemnou polohu referenčního bodu a liniového zdroje. Referenční bod při výpočtu nesmí ležet přímo ve zdroji nebo v jeho těsné blízkosti podél celé délky zdroje. Dále nemá smysl, obzvláště v podmínkách městské zástavby, počítat příspěvek liniového zdroje v referenčních bodech, jejichž vzdálenost od zdroje přesahuje určitou velikost.

Nejprve určíme souřadnice průsečíku osy komunikace a kolmice k ose vedené referenčním bodem.

$$x_p = \frac{-\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} X_1 + \frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} X_R + Y_1 - Y_R}{\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} - \frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1}}$$

$$y_p = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} x_p - \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} X_1 + Y_1$$

Následně spočteme vzdálenost referenčního bodu od osy vlečky. Potom:

- a) rozdíl souřadnice  $x$  referenčního bodu (v soustavě spojené s prouděním) a průmětu koncového závětrného bodu komunikace musí být menší než zadaná největší vzdálenost (v metodice je zadána hodnota 1000 m pro tuto horní mez),

$$(x - \text{abs}(0,5 d_{kom} \cos \theta)) < 1000$$

- b) rozdíl absolutní hodnoty souřadnice  $y$  referenčního bodu v systému spojeném s prouděním a veličiny  $0,5 d_{kom} \sin \theta$  (tj. průmětu jednoho koncového bodu liniového zdroje na osu  $y$  v souřadné soustavě spojené s prouděním, přičemž se bere absolutní hodnota této veličiny) musí být menší než zadaná největší vzdálenost,

$$(\text{abs}(y) - \text{abs}(0,5 d_{kom} \sin \theta)) < 1000$$

- c) v případě, že výpočetní bod leží přímo na komunikaci, je posunut na její okraj, přičemž y-ová vzdálenost bodu od středu komunikace je zachována, výpočet je potom proveden pro takto modifikovanou polohu referenčního bodu

Emisní tok ve výpočetní rovnici (při výše zmíněné hodnotě číselného koeficientu  $K = 10^6$ ) vystupuje v jednotkách  $\text{g.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ . Výstupem je hodnota koncentrace v  $\mu\text{g.m}^{-3}$ .

### 3.1.1.3 Výpočet hodnoty přízemní koncentrace plynného znečištění z plošného zdroje

V případě výpočtu znečištění působeného plošným zdrojem v bodě, jenž se od tohoto zdroje nalézá v dostatečné vzdálenosti, je v předložené metodice použit vztah:

$$c(x,y,z_T) = \frac{KVDdE_p}{4\sqrt{2}u_s\sigma_z} \left[ \text{erf}\left(\frac{r_0'+y}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) + \text{erf}\left(\frac{r_0'-y}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) \right]$$

Tento vztah platí v souřadné soustavě spjaté se směrem proudění, kdy počátek souřadnic se nalézá ve středu plošného zdroje a kladný směr osy  $x$  je totožný se směrem proudění. Význam symbolů  $K$ ,  $V$ ,  $D$  a vyjádření veličin, jež označují je totožný jako v předchozích případech.  $E_p$  označuje emisní tok emitovaný plošným zdrojem a je dán v jednotkách  $\text{g.s}^{-1}$ . Při hodnotě  $K = 10^6$  je výstupem koncentrace v jednotkách  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . Symbol  $d$  označuje délku strany plošného zdroje (čtverce),  $r_0'$  je tzv. efektivní poloměr plošného zdroje, t.j. poloměr kružnice, která opisuje plochu rovnající se velikosti plochy čtvercového plošného zdroje o straně  $d$  ( $r_0' = d/\sqrt{\pi}$ ).

Je-li vzdálenost mezi referenčním bodem a středem plošného zdroje tak malá, že referenční bod leží v těsném sousedství plošného zdroje nebo přímo v ploše zdroje, je nutno popsany postup modifikovat. Tato modifikace spočívá v rozdělení plošného emisního zdroje na jistý počet menších plošných zdrojů a s každým z těchto „subzdrojů“ lze pak zacházet jako s normálním plošným zdrojem, jen jeho velikost je patřičně zmenší. Z výpočtu se vyřadí ty subzdroje, pro které opět nejsou splněny příslušné podmínky. Výhodou je to, že se nezanedbá vliv celého původního plošného zdroje, ale pouze jeho určité části.

Podmínky na vzájemnou konfiguraci referenčního bodu a plošného zdroje, které musejí být splněny pro to, aby se v daném referenčním bodě počítal příspěvek od celého plošného zdroje nebo aby se muselo přistoupit k jeho rozdělení na menší části, lze shrnout následovně:

- a) pro výpočet musí platit, že  $(x - r_0') < 2500$  a současně  $(\text{abs}(y) - r_0') < 1000$ . Tato podmínka omezuje maximální vzdálenost, kam až může dosahovat vliv plošného zdroje.  $(x,y)$  jsou souřadnice referenčního bodu v soustavě spojené se směrem proudění.
- b) Je-li  $x < (r_0' + d)$  a současně  $x > (r_0' + 1)$ , pak se plošný zdroj musí rozdělit, neboť referenční bod leží v příliš velké blízkosti, ale stále mimo něj. V tomto případě je v

metodice zvoleno dělení na 9 menších plošných zdrojů ( $3 \times 3$  zdroje). Zavede se pomocný cyklus probíhající všech těchto 9 zdrojů, pro každý z těchto subzdrojů se nově počítají rozptylové parametry  $\sigma_y$  a  $\sigma_z$  a znovu se testuje, zda jsou splněny příslušné podmínky a) až c). Nesplnění podmínek pro některý z těchto subzdrojů tentokrát znamená jeho úplné vyřazení z výpočtu.

- c) Platí-li, že  $x < (r_0' + 1)$ , to znamená, že referenční bod leží v ploše plošného zdroje nebo těsné blízkosti. Pro tento případ je zavedeno dělení na 16 subzdrojů ( $4 \times 4$  zdroje). Dále platí totéž, co bylo uvedeno v bodě b).

### 3.1.2 Znečištění suspendovanými částicemi (tuhý aerosol)

V případě výpočtu znečištění suspendovanými (prašnými) částicemi (tuhým aerosolem) lze použít vztahy uvedené v odstavcích 3.1.1.1. – 3.1.1.3. s tím rozdílem, že ve všech těchto vztazích je nutno použít jiné vyjádření pro vertikální člen  $V$ . Dále se v předložené metodice předpokládá, že pro tento typ znečištění je člen  $D$  parametrizující odstraňování emitované látky z atmosféry roven jedné, neboť rozdílné rychlosti sedimentace jednotlivých frakcí tuhého aerosolu, na něž je celková emise pevných částic rozdělena (viz kapitola 2.1. Vstupní údaje o emisních zdrojích) jsou zahrnuty právě v odlišném vertikálním členu.

Vertikální člen pro  $n$ -tou frakci tuhého aerosolu má vyjádření:

$$V = \phi_n \left\{ 2 \cdot \exp \left[ -0.5 \left( \frac{z_\tau - (H_{ef} - h_v)}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$$

kde  $\phi_n$  je podíl množství  $n$ -té hmotnostní frakce na celkovém množství pevného aerosolu (číslo z intervalu 0–1, které, násobeno 100, udává procentuelní zastoupení  $n$ -té frakce v celkovém množství emitované látky),  $h_v = v_{sn}x/u_s$  udává korekci výšky vlečky pro sedimentační rychlost  $v_{sn}$   $n$ -té frakce,  $u_s$  je rychlost větru ve výšce ústí emisního zdroje a  $x$  je  $x$ -souřadnice referenčního bodu v souřadné soustavě spojené se směrem proudění.

### 3.1.3 Určení hodnot krátkodobých a ročních průměrných koncentrací oxidu dusičitého

Model je možné použít i k výpočtu přízemních koncentrací oxidu dusičitého ( $\text{NO}_2$ ). Způsob výpočtu přízemních koncentrací  $\text{NO}_2$ , a to jak krátkodobých hodnot (tj. analogu hodinových průměrů) tak i dlouhodobých (ročních) průměrných koncentrací, jež je popsán v této části, vychází ze vztahu uvedeného dále a byl navržen ing. Pospíšilem a ing. Vídenem z Ústavu technologie ropy a petrochemie VŠCHT v Praze (ústní komunikace). Popis metodiky výpočtu je uveden pro případ jednoho zdroje libovolného typu v jednom referenčním bodě. Velikost  $\text{IH}_k \text{NO}_2$  způsobená v daném referenčním bodě všemi



## Popis metodiky výpočtu šíření znečištění

přispívajícími zdroji při daném směru proudění je pak rovna sumě příspěvků od těchto jednotlivých zdrojů.

Pro výpočet přízemní koncentrace  $\text{NO}_2$  se vychází z výpočtu přízemní koncentrace  $\text{NO}_x$ , avšak ve vstupních datech musí být zadán emisní poměr  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  (označený jako  $eNO2$ ) a tento poměr je nutno znát pro každý jednotlivý zdroj. Pro vozidla se hodnota  $eNO2$  pohybuje v rozmezí 0,005 – 0,3. To znamená, že pro každý dopravní zdroj (parametrizovaný prostřednictvím liniového nebo plošného zdroje) je nutné na základě spektra vozidel určit příslušnou hodnotu  $eNO2$ . Dále je nutné znát hodnotu  $eNO2$  i pro ostatní typy zdrojů (tj. bodové zdroje – jednotlivé komíny, lokální vytápění atd.). Není-li hodnota  $eNO2$  pro některý zdroj známa, potom se jako „default“ velikost tohoto poměru bere hodnota  $eNO2 = 0,05$ .

Na základě již dříve určené hodnoty  $x_{dist}$  (pro daný pár zdroj-referenční bod) a velikosti rychlosti proudění v úrovni ústí zdroje  $UH0$  je, při daném směru proudění, nejprve určena hodnota proměnné  $time$ , tj. času nutného k překonání vzdálenosti  $x_{dist}$  při rychlosti proudění  $UH0$

$$time = x_{dist} / UH0.$$

Hodnota této proměnné je spolu s hodnotou poměru  $eNO2$  potřebná pro výpočet veličiny  $iNO2$ , tj. imisního poměru  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ , jenž říká, jak velký zlomek z původně emitovaného  $\text{NO}_x$  se transformuje na  $\text{NO}_2$  během přenosu od zdroje do referenčního bodu. Označíme-li koncentraci  $\text{NO}_x$  jako  $c_{nox}$  a koncentraci  $\text{NO}_2$  jako  $c_{no2}$ , pak platí, že

$$c_{no2} = iNO2 * c_{nox}.$$

Velikost  $iNO2$  se určí pomocí výrazu

$$iNO2 = fa(time) + (limNO2 - 0,75) * fb(time) + eNO2 * fc(time),$$

v němž funkce  $fa$ ,  $fb$  a  $fc$  jsou níže uvedené výrazy závislé na čase (proměnná  $time$ )

$$fa(time) = \sqrt{\frac{a + c \cdot time^2 + e \cdot time^4}{1 + b \cdot time^2 + d \cdot time^4 + f \cdot time^6}}$$

kde platí, že

$$a = 8,62 \cdot 10^{-5}, b = 2,56 \cdot 10^{-4}, c = 1,26 \cdot 10^{-4}, d = 2,55 \cdot 10^{-11}, e = 1,43 \cdot 10^{-11}, f = -1,94 \cdot 10^{-21},$$

$$fb(time) = \frac{a + c \cdot time + e \cdot time^2 + g \cdot time^3 + i \cdot time^4 + k \cdot time^5}{1 + b \cdot time + d \cdot time^2 + f \cdot time^3 + h \cdot time^4 + j \cdot time^5}$$

kde platí, že

$$a = -4,67 \cdot 10^{-3}, b = -5,89 \cdot 10^{-3}, c = -2,52 \cdot 10^{-2}, d = 1,27 \cdot 10^{-4}, e = 1,82 \cdot 10^{-4}, f = -4,52 \cdot 10^{-7}, g = -4,19 \cdot 10^{-7}, h = 6,32 \cdot 10^{-10}, i = 3,03 \cdot 10^{-10}, j = 3,64 \cdot 10^{-14}, k = 6,18 \cdot 10^{-14},$$

$$fc(time) = \frac{1}{a + b \cdot time + c \cdot time^2}$$

kde paltí, že

$$a = 1,061210195, b = 2,21 \cdot 10^{-2}, c = 6,85 \cdot 10^{-5}.$$

Veličina  $limNO_2$  je limitní hodnota imisního poměru  $NO_2/NO_x$ . Tato limitní hodnota pro  $time > 10000$  s se v závislosti na meteorologických podmínkách a ročním období pohybuje v intervalu od 0,75 pro letní období do 0,95 v zimě. Vzhledem k tomu, že pro jinak stejné parametry se hodnota  $iNO_2$  liší pro zimní a letní období (různé hodnoty  $limNO_2$ ), a dále vzhledem k tomu, že při výpočtu  $IH_k NO_2$  se určují maximálně možné dosahované koncentrace, pak pro další výpočet za výslednou hodnotu  $iNO_2$  v modelu považujeme větší z obou hodnot  $iNO_2^{zimní}$ ,  $iNO_2^{letní}$ . Je-li splněna podmínka, že  $time > 10000$  s, pak hodnotu  $iNO_2$  pokládáme rovnu 0,95.

Při určování roční průměrné koncentrace  $NO_2$  v daném bodě se použije vypočtená hodnota roční průměrné koncentrace  $NO_x$  působená daným zdrojem v příslušném referenčním bodě pro daný směr proudění (zahrnuta četnost proudění z daného směru a provozní doba zdroje – viz část věnovaná výpočtu průměrných ročních koncentrací), ta se vynásobí roční průměrnou hodnotou  $iNO_2$  určenou jako průměr hodnot  $iNO_2^{zimní}$  a  $iNO_2^{letní}$

$$iNO_2 = 0,5 * (iNO_2^{zimní} + iNO_2^{letní}).$$

Celkový průměrný roční příspěvek daného zdroje k roční průměrné koncentraci  $NO_2$  v daném referenčním bodě se získá postupným opakováním uvedeného postupu přes všechny sektory, na něž je rozdělena větrná růžice. Celková hodnota roční průměrné koncentrace  $NO_2$  v daném referenčním bodě působená všemi zdroji je rovna sumě příspěvků od všech emisních zdrojů, které jsou v modelovém výpočtu zahrnuty, a kdy velikost příspěvku od každého jednotlivého zdroje je určena výše popsáním způsobem.

## 3.2. Definice parametrů a proměnných

### 3.2.1 Použitá souřadnicová soustava

#### 3.2.1.1 Horizontální souřadnicový systém

Výpočet koncentrací znečišťující látky, tj. základní veličiny od níž se pak odvozují další charakteristiky, probíhá v kartézském souřadnicovém systému spojeném se směrem proudění. Horizontální souřadnice bodových emisních zdrojů, konců liniových zdrojů a středů plošných zdrojů stejně jako souřadnice referenčních bodů jsou zadány v pevném pravouhlém souřadnicovém systému (např. Křovákově systému souřadném nebo v systému JTSK). Dále budeme nazývat tento systém jako obecný (souřadnicový) systém. Systém, v němž probíhá výpočet pak budeme označovat jako systém nebo souřadnice spojené s prouděním (přirozená souřadnicová soustava). Z tohoto důvodu je nutné obecné souřadnice zdroje i referenčního bodu transformovat do systému spojeného s prouděním.

Jak již bylo řečeno dříve, systém spojený s prouděním je určen tak, že kladný směr osy  $x$  míří ve směru proudění, kladný směr osy  $y$  míří vlevo od osy  $x$ , takže orientace os odpovídá

pravotočivému systému. Počátek souřadnicového systému spojeného s prouděním se nalézá v emisním zdroji (tj. v bodovém zdroji, středu liniového zdroje nebo středu plošného zdroje). Odtud plyne, že emisní zdroj má v souřadnicovém systému spojeném s prouděním vždy souřadnice  $(0,0)$ . Transformační vztahy mezi oběma systémy mají vyjádření:

$$x = -(X_r - X_p) \sin(WDI_z) - (Y_r - Y_p) \cos(WDI_z)$$

$$y = (X_r - X_p) \cos(WDI_z) - (Y_r - Y_p) \sin(WDI_z)$$

kde  $(x,y)$  jsou souřadnice referenčního bodu v soustavě spojené s prouděním, v němž určujeme velikost koncentrace,  $(X_p, Y_p)$  označuje souřadnice emisního zdroje v základní soustavě souřadné a referenční bod má v základní soustavě souřadnice  $(X_r, Y_r)$ ,  $WDI_z$  označuje azimut rychlosti proudění (severní vítr = vítr vanoucí ze severu, pak  $WDI_z = 0^\circ$ ).

### 3.2.1.2. Vertikální souřadnice

Vertikální souřadnice  $z$  nepotřebuje žádnou obdobnou transformaci jako souřadnice horizontální, přesto se však o ní musíme zmínit, neboť vzájemné vztahy mezi nadmořskými výškami emisních zdrojů a referenčních bodů poskytují jistou možnost jak alespoň minimálním způsobem zahrnout nerovinnou orografii do tohoto typu modelů.

Jak již bylo uvedeno, u každého emisního zdroje známe jeho nadmořskou výšku (tj. nadmořskou výšku paty komína, nadmořskou výšku konců liniového zdroje a tudíž i nadmořskou výšku jeho středu i nadmořskou výšku středu plošného zdroje). V případě liniového zdroje předpokládáme, že sklon komunikace je konstantní podél celého zdroje, v případě plošného zdroje pak předpokládáme, že nadmořská výška celé plochy tohoto typu zdroje je konstantní a má tudíž nadmořskou výšku jako jeho střed (další možností je ovšem zadávat průměrnou výšku za celý plošný zdroj). Dále u každého bodového zdroje je známa jeho stavební výška, u plošného zdroje parametrizujícího lokální vytápění je pak dána průměrná stavební výška všech malých emisních zdrojů nalézajících se v příslušném čtverci plošného zdroje. Dopravní zdroje mají stavení výšku rovnu nule.

První z metod, jak zahrnout vliv orografie spočívá ve využití více větrných růžic. Tak lze, alespoň částečně, postihnout deformaci pole proudění v horizontální rovině. Ve vertikální rovině je vliv orografie parametrizován následovně.

Nechť  $z_R$  označuje výšku referenčního bodu (součet nadmořské výšky a výšky bodu nad terénem) a  $z_p$  označuje nadmořskou výšku zdroje (např. paty komína). Pak hodnota vertikální souřadnice  $z_T$ , která určuje hladinu, v níž se počítá koncentrace znečištění vystupující ve vertikálních členech jak pro plynné znečištění tak pro tuhý aerosol, je dána následujícím vztahem:

$$z_T = \begin{cases} (z_R - z_p) & \text{pro } 0,8H_{ef} \geq (z_R - z_p) > 0 \\ 0,8H_{ef} & \text{pro } (z_R - z_p) > 0,8H_{ef} \\ 0 & \text{pro } (z_R - z_p) \leq 0 \end{cases}$$

kde  $H_{ef}$  označuje korigovanou efektivní výšku emisního zdroje (viz 3.2.2.).

### 3.2.2 Další postižení vlivu vertikální členitosti terénu

Další úprava spočívá v parametrizaci vlivu terénních nerovností na efektivní výšku  $H_{ef}$  zdroje. Necht' opět platí že  $(z_R - z_p) > 0$ . Pak se k vypočtené hodnotě efektivní výšky pro rovinný terén  $H_{ef0}$  přičte korekční člen  $T_{stab}(z_R - z_p)$ , v němž jsou hodnoty číselného parametru  $T_{stab}$  závislé na vertikální teplotní stabilitě podle následující tabulky:

Třída stability	superstabilní	stabilní	izotermní	normální	konvektivní
$T_{stab}$	0,0	0,1	0,2	0,5	0,9

Vyjádření efektivní výšky emisního zdroje pak má vyjádření:

$$H_{ef} = H_{ef0} + T_{stab}(z_R - z_p) = h_s + \Delta H + T_{stab}(z_R - z_p)$$

$h_s$  označuje stavební výšku zdroje a  $\Delta H$  vzhos zdroje.

Uvedený přístup není aplikovatelný na dopravní zdroje, neboť u této skupiny zdrojů se nepočítá vzhos, ale uvažuje se počáteční rozptyl, jenž závisí na vertikální teplotní stabilitě.

### 3.2.3 Určení efektivní výšky zdroje

Efektivní výška zdroje (= stavební výška zdroje + vzhos vlečky) se určuje pro všechny skupiny zdrojů vyjma liniových zdrojů. Stavební výška každého zdroje je konstantní veličina načítaná ze vstupních dat, takže pomocí modelu zbývá určit vzhos zdroje. Ten může být buď postupný nebo okamžitý. V předložené metodice je použit výpočet pro postupný vzhos podle metody navržené v [5].

K výpočtu postupného vzhosu vlečky byl zvolen následující postup (viz [5]). Nejprve se pomocí známého „vzorce čtyř autorů“, tj. vztahu Lucase, Pristleye, Spurra a Moora (např. [1]), určí stabilizovaná efektivní výška vlečky  $H_{ef0}$ , tj. výška, která je nad rovinným terémem již konstantní:

$$H_{ef0} = h_s + \Delta H = h_s + \frac{f Q_S^{1/4}}{u_s}$$

kde  $Q_S$  udává tepelnou vydatnost spalin (v MW),  $u_s$  je rychlost okolního proudění (v m/s) v úrovni koruny komína a  $f$  je číselný parametr, jehož hodnota byla na základě měření stanovena následovně:

$$f = 0,25 \begin{cases} 100 & \text{pro } h_s < 100\text{m} \\ (1,5h_s - 50) & \text{pro } h_s \geq 100\text{m} \end{cases}$$

Hodnoty parametru  $f$  byly původně určeny pro velké elektrárenské a průmyslové zdroje a jsou-li tyto hodnoty použity ve vztahu pro  $\Delta H$ , dochází podle našeho názoru k nadhodnocení vznosu vlečky u většiny neelektrárenských emisních zdrojů. Na základě porovnávání vypočítaných a měřených hodnot přízemní koncentrace znečištění v určitých bodech byl ve výpočtu  $f$  použit korekční faktor 0,25.

Než vlečka této výšky dosáhne, urazí jistou vzdálenost  $x_0$  od emisního zdroje. Velikost této vzdálenosti je funkcí rychlosti proudění a vertikální teplotní stability:

$$x_0 = \left(\frac{20}{3}\right) L_b \Delta H \left(\frac{h_s + \Delta H}{2}\right)^a$$

kde velikosti parametrů  $L_b$  a  $a$  udávají následující tabulky:

Hodnota rychlosti	1,7 ms <sup>-1</sup>	5,0 ms <sup>-1</sup>	11,0 ms <sup>-1</sup>
Velikost parametru $L_b$	0,09	0,41	1,2

Třída stability	superstabilní	stabilní	izotermní	normální	konvektivní
Koeficient $a$	0,33	0,25	0,18	0,14	0,10

Platí-li, že souřadnice  $x$  referenčního bodu je menší než hodnota  $x_0$ , pak se vznos  $\Delta H$  vlečky určí ze vztahu:

$$\Delta H = \frac{f Q_S^{1/4}}{u_s} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{2/3}$$

Pro  $x \geq x_0$  platí:

$$\Delta H = \frac{f Q_S^{1/4}}{u_s}$$

Tímto způsobem se určí efektivní výška zdroje (tj. vzhos + stavební výška) pro rovinný terén a v předchozí části 3.2.2. je uvedena modifikace efektivní výšky v případě terénních nerovností.

V případě plošných zdrojů s nulovou stavební výškou (např. dopravní zdroje) je uvažována efektivní výška rovna počáteční hodnotě vertikálního rozptylu  $\sigma_{z0}$ .

### 3.2.4 Určení rychlosti a směru větru

#### 3.2.4.1 Vztah pro vertikální profil velikosti rychlosti větru

V řadě uvedených vztahů vystupuje rychlost v úrovni výšky koruny komína. Tuto rychlost získáme z Deaconova mocninného profilu větru:

$$u(z) = \begin{cases} u(z_p) & \text{pro } z \leq z_p \\ u(z_p) \left( \frac{z}{z_p} \right)^a & \text{pro } z > z_p \end{cases}$$

kde  $u(z_p)$  je třídí rychlost v anemometrické výšce  $z_p = 10$  m nad úrovní terénu. Hodnota exponentu  $a$  závisí na stabilitě vertikálního teplotního zvrstvení podle nás ledující tabulky:

Třída stability	superstabilní	stabilní	izotermní	normální	konvektivní
Koeficient $a$	0,33	0,25	0,18	0,14	0,10

Jak již bylo uvedeno dříve, minimální rychlost, kterou je možno pro výpočty pomocí této metodiky uvažovat, je rychlost  $1 \text{ ms}^{-1}$ . Tato poznámka platí pro případ, že by se ve vztahu pro Deaconův profil používalo jiné výchozí hodnoty rychlosti než jsou třídí rychlosti standardně používané.

#### 3.2.4.2 Změna směru rychlosti větru s výškou

V předložené metodice se předpokládá stáčení větru o hodnotu  $4^\circ$  na každých 100 m výšky ve směru hodinových ručiček, a to bez ohledu na stabilitní a další poměry v atmosféře. Pro azimut proudění (ve  $^\circ$ ) ve zvolené výšce  $z$ :

$$WDI_z = \begin{cases} WD_{10} + \frac{z-10}{25} & \text{pro } z > 10m \\ WD_{10} & \text{pro } z < 10m \end{cases}$$

kde  $WDI_z$  je azimut proudění v dané hladině  $z$  a  $WD_{10}$  je azimut v hladině 10 m nad terénem. Pro výpočet na počítači je nutno veličiny  $WDI_z$  i  $WD_{10}$  udávat v radiánech. Vyjde-li výsledek  $WDI_z$ , jeho přepočtení na radiány je jednoduše proveditelné:

$$WDI_z (\text{rad}) = WDI_z (\text{úhlové stupně}) \cdot \pi / 180$$

kde  $\pi$  je Ludolfovo číslo.

Určení stočeného směru větru s výškou není aplikováno na vzdálené bodové zdroje, pro něž je doporučeno používat speciálně vytvořenou větrnou růžici z aerosondážních dat (viz část 2.2. Klimatické vstupní údaje). Dále se tato procedura nevztahuje na dopravní zdroje.

Stočení směru rychlosti proudění je počítáno pro výšku koruny komína u bodových zdrojů a pro průměrnou stavební výšku plošného zdroje parametrizujícího lokální vytápění.

### 3.2.5 Rozptylové parametry

Pomocí rozptylových parametrů  $\sigma_y$  a  $\sigma_z$  je popsáno rozložení koncentrace v rovině kolmé na směr proudění. Parametr  $\sigma_y$  popisuje „rychlost“ rozšiřování vlečky (turbulentní difúzi znečištění) ve směru  $y$  (v soustavě spojené se směrem proudění) a parametr  $\sigma_z$  udává totéž pro vertikální směr. Vyjádření rozptylových parametrů obsahuje řadu korekcí, které se uplatňují zejména v blízkosti emisních zdrojů. To proto, že tato metodika byla vyvinuta pro výpočet prostorového rozložení znečištění v městských oblastech, kde se může vyskytovat turbulence působená řadou vlivů i při velmi stabilním teplotním zvrstvení a znečištění je intenzivně rozptylováno již v okamžiku, jakmile opustí emisní zdroj. Použité korekce by měly tento děj parametrizovat.

#### 3.2.5.1 Rozptylové parametry pro bodové zdroje

Hodnota rozptylových parametrů je dána následujícími výrazy:

$$\log_{10} \sigma_y = A_y \log_{10} [\max(1, x/100)]^{B_y} + C_y$$

$$\sigma_z = A_z x^{B_z}$$

v nichž  $x$  označuje vzdálenost emisního zdroje do průmětu referenčního bodu na ose  $x$ . Hodnoty použitých koeficientů  $A_y$ ,  $B_y$ ,  $C_y$ ,  $A_z$  a  $B_z$  jsou funkcemi vertikální teplotní stability a jejich velikost je uvedena v tabulce:

Třída stability	$A_y$	$B_y$	$C_y$	$A_z$	$B_z$
Superstabilní	0,9189	0,9780	0,7482	0,2694	0,5950
Stabilní	0,9112	0,9909	0,8388	0,2779	0,6510
Izotermní	0,9166	0,9912	0,9191	0,2630	0,7130
Normální	0,9208	0,9904	0,5052	0,2390	0,7870
Konvektivní	0,9272	0,9706	1,1818	0,1782	0,9710

Protože by v malých vzdálenostech od emisního zdroje mohla být vlečka příliš kompaktní, byl použit korekční faktor jak pro hodnotu  $\sigma_y$  tak  $\sigma_z$ , jenž „rozmyje“ vlečku v horizontálně příčném směru a zvětší rozptyl ve vertikálně příčném směru. Korekční faktor pro hodnotu  $\sigma_y$  má vyjádření:

$$\sigma_{y0} = x \cdot \text{tg}(\alpha_{\text{sektor}})$$

kde  $\alpha_{\text{sektor}}$  je velikost sektoru, na něž je při výpočtu rozdělena větrná růžice (ve standardním výpočtu je uvažováno 48 směrů, tj.  $\alpha_{\text{sektor}} = 7,5^\circ$ ). Tato hodnota se přičítá k hodnotě  $\sigma_y$  vypočtené pomocí výše uvedené logaritmické rovnice. Kromě tohoto aditivního korekčního faktoru se ještě vyžaduje splnění podmínky:

$$\text{pro } \sigma_y \leq 10 \quad \sigma_y = 10$$

Korekce pro vertikální rozptyl  $\sigma_z$  v blízkosti zdroje, kde je hodnota rozptylového parametru malá, je dána podmínkou:

$$\text{pro } \sigma_z \leq \sigma_0 \quad \sigma_z = \sigma_0$$

kde  $\sigma_0$  závisí na vertikální teplotní stabilitě podle následující tabulky:

Třída stability	Hodnota $\sigma_0$ (m)
1. superstabilní	1,5
2. stabilní	1,5
3. izotermní	1,5
4. normální či neutrální	3,0
5. konvektivní	5,0

### 3.2.5.2 Rozptylové parametry pro liniové zdroje

Základní vztahy pro výpočet rozptylových parametrů pro liniové zdroje jsou tytéž jako u bodových zdrojů – logaritmická rovnice pro  $\sigma_y$  a exponenciální vztah pro  $\sigma_z$ . Před tím, než bude metodika výpočtu rozptylových parametrů liniového zdroje podrobně popsána, je nutno se definovat tzv. virtuální vzdálenost  $x_{\text{virt}}$ .

Virtuální vzdálenost pro rozptylový parametr  $\sigma_y$  je taková vzdálenost  $x_{y\text{virt}}$ , měřená proti směru proudění od středu liniového zdroje, ve které by ležel fiktivní bodový zdroj, jehož horizontální příčný rozptyl v místě liniového zdroje by byl právě roven  $\sigma_y$ . Obdobně lze definovat i virtuální vzdálenost  $x_{z\text{virt}}$  pro vertikální rozptyl  $\sigma_z$ . Obecně se tyto dvě vzdálenosti nemusejí rovnat.

Pro liniové zdroje uvažujeme počáteční hodnoty rozptylových parametrů  $\sigma_{y0}$  a  $\sigma_{z0}$ , které jsou dány vztahy:

$$\sigma_{y0} = d / 2,15$$

$$\sigma_{z0} = \max(\sigma_0, d / 4,3)$$



kde  $d$  označuje šířku pojezdového pruhu.

a velikost parametru  $\sigma_0$  závisí na typu vertikálního teplotního zvrstvení podle následující tabulky (viz. předchozí kapitola).

Virtuální vzdálenost  $x_{Yvirt}$  se následně určí ze vztahu:

$$x' = (\log_{10}(\max(1, \sigma_{y0})) - C_y) / A_y$$

$$\text{jestliže } x' < 0 \text{ } x_{Yvirt} = 100$$

$$\text{jinak } x'' = x'^{1/B_y} \text{ a } x_{Yvirt} = 10^{(2+x'')}$$

V logaritmické rovnici pro  $\sigma_y$  je pak uplatněna následující modifikace:

$$\log_{10} \sigma'_y = A_y \log_{10} [\max(1, (x + x_{Yvirt}) / 100)]^{B_y} + C_y$$

$$\sigma_y = \sigma'_y + \sigma_{y0}$$

Pro malé vzdálenosti od emisního zdroje musí být splněna ještě podmínka:

$$\text{jestliže } \sigma_y < 10 \text{ pak } \sigma_y = 10$$

Obdobně se určí i virtuální vzdálenost pro vertikální rozptyl  $\sigma_z$ :

$$x_{Zvirt} = (\sigma_{z0} / A_z)^{1/B_z}$$

$$\sigma'_z = A_z (x + x_{Zvirt})^{B_z}$$

$$\text{jestliže } \sigma'_z < \sigma_{z0} \text{ pak } \sigma'_z = \sigma_{z0}$$

$$\sigma_z = \sigma'_z + \sigma_{z0}$$

tedy výsledná hodnota rozptylového parametru pro vertikální rozptyl je dána jako součet počáteční hodnoty rozptylového parametru a vypočtené velikosti  $\sigma'_z$  závislé na souřadnici  $x$  referenčního bodu a virtuální vzdálenosti.

#### 3.2.5.4. Rozptylové parametry pro plošné zdroje

Metodika výpočtu rozptylových parametrů pro plošné zdroje je analogická metodě výpočtu pro liniové zdroje. Odlišuje se pouze ve způsobu stanovení počáteční hodnoty rozptylu  $\sigma_{z0}$  a  $\sigma_{y0}$  a ve způsobu stanovení virtuální vzdálenosti. Plošné zdroje mohou mít, na rozdíl od liniových nenulovou stavební výšku, a to v případě parametrizace lokálního vytápění (pro dopravní plošné zdroje je stavební výška nulová).

Výpočet počátečních hodnot rozptylu se provádí podle následujících vztahů:

$$\sigma_{y0} = d / 4,3$$

$$\sigma_{z0} = \sigma_0 \quad (\text{pro dopravní plošné zdroje})$$

$$\sigma_{z0} = h_s / 2,15 \quad (\text{pro ostatní plošné zdroje})$$

$d$  označuje délku strany čtverce plošného zdroje,

$h_s$  stavební výšku plošného zdroje

Virtuální vzdálenosti pro parametrizaci rozptylu se počítají způsobem uvedeným v předchozí kapitole. Vypočtené hodnoty jsou následně zmenšeny o hodnotu efektivního poloměru plošného zdroje  $r'_0$ .

Další způsob výpočtu je totožný s výpočtem rozptylových parametrů u liniových zdrojů.

### 3.2.6. Zahrnutí vlivu depozice a transformace znečišťujících látek

Člen označený symbolem  $D$  ve vztazích pro výpočet koncentrace plyných látek působené všemi typy zdrojů (tj. bodovými, liniovými či plošnými) parametrizuje odstraňování znečišťujících látek z atmosféry v důsledku depozice (sedimentace znečištění na zemském povrchu), chemických transformací a reakcí (**pozor:** neznamena to však, že by tento typ modelů umožňoval zahrnout chemické reakce do výpočtu, pomocí tohoto členu je pouze parametrizován úbytek té části emitovaného znečištění, která se v důsledku chemických reakcí transformovala v jinou sloučeninu a nepřispívá tudíž již k hodnotě koncentrace znečištění v referenčním bodě).

Člen  $D$  má vyjádření:

$$D = \exp \left[ \text{koef} \frac{x}{u_s} \right]$$

koeficient  $\text{koef}$  má rozměr  $[\text{čas}^{-1}]$  a platí pro něj vztah:

$$\text{koef} = \frac{0,693}{T_{1/2}}$$

Poločas zániku příslušného znečištění  $T_{1/2}$  se udává v sekundách (např. pro  $\text{SO}_2$  je  $T_{1/2} = 4$  hod (= 14 400 s) v podmínkách městské zástavby, což znamená  $\text{koef} = 0.0000481 \text{ s}^{-1}$ ). Pro znečištění s dlouhou rezidentní dobou v atmosféře se hodnota  $\text{koef} \rightarrow 0$  a  $D \rightarrow 1$ . Hodnota  $D = 1$  se v modelu bere jako předdefinovaná hodnota pro tento člen, vyjma výpočtu koncentrace  $\text{SO}_2$  a organických látek, kdy se vychází z výše uvedené hodnoty poločasu zániku.

### 3.2.7. Sedimentační rychlost pevných částic

V případě výpočtu koncentrace tuhého aerosolu (prachových částic):

1. člen  $D = 1$ ,
2. vertikální člen je vyjádřen pomocí vztahu, v němž vystupují velikosti sedimentačních rychlostí pro jednotlivé frakce, na něž je celková emise prašných částic rozdělena.

Každá z frakcí je charakterizována charakteristickým průměrem  $d$  částic dané frakce podle vztahu (viz [6]):

$$d = \left[ 0.25 (d_1^3 + d_1^2 d_2 + d_1 d_2^2 + d_2^3) \right]^{1/3}$$

kde  $d_1$  a  $d_2$  je spodní, resp. horní mez dané velikostní frakce.

Charakteristické velikosti pro přednastavené rozdělení primárních emisí prachových částic jsou uvedeny v tabulce v části 2.1.1.

Sedimentační rychlost  $n$ -té frakce  $v_{sn}$  se pak určí ze vztahu (viz např. [5]):

$$v_{sn} = \frac{2\rho g r^2}{9\mu}$$

v němž  $\rho$  představuje hustotu prachové částice,  $g$  je tíhové zrychlení,  $r$  ( $= d/2$ ) poloměr prachové částice (pro jednoduchost se předpokládá, že prachové částice mají kulový tvar) a  $\mu$  je dynamická viskozita vzduchu.

V důsledku rozdílných velikostí sedimentačních rychlostí  $v_{sn}$  pro jednotlivé frakce, na něž je celková emise tuhého aerosolu (prachových částic) rozdělena, se z jednoho emisního zdroje pro jeden směr rychlosti proudění dostává vlastně tolik dílčích vleček, na kolik frakcí je emise tuhého aerosolu z daného zdroje rozdělena. Osa každé z těchto dílčích vleček je skloněna pod určitým úhlem k zemskému povrchu, nejmenší úhel s povrchem svírá vlečka odpovídající nejjemnější frakci, největší pak vlečka pro nejhrubší frakci.

### 3.3. Výpočet hlavních charakteristik znečištění ovzduší

Předložená metodika umožňuje v referenčním bodě výpočet následujících hlavních charakteristik znečištění ovzduší působených emisním bodovými, liniovými a plošnými zdroji. Nicméně je nutno uvést, že primární charakteristika, od níž se vše další odvíjí, je hodnota koncentrace v referenčním bodě určená pomocí výše zmíněných vztahů v části 3.1.

Pod hlavními charakteristikami znečištění ovzduší rozumíme:

- maximální krátkodobou koncentraci znečišťujících látek v daném referenčním bodě pro každou možnou kombinaci třídy vertikální teplotní stability a třídy rychlosti proudění,
- absolutní maximální hodnotu krátkodobé koncentrace znečišťujících látek v daném referenčním bodě bez ohledu na třídu vertikální teplotní stability a třídu rychlosti proudění,

- průměrnou roční koncentraci,
- určení doby překročení krátkodobého imisního limitu ( $IH_k$ ) v daném referenčním bodě pro časové údobí jednoho kalendářního roku.

Před uvedením popisů výpočtu charakteristik znečištění ovzduší se ještě zmíníme o nutnosti úpravy základních větrných růžic. V základním datovém vstupu bývá větrná růžice (relativní četnosti proudění v % z jednotlivých sektorů pro dané třídy rychlosti a vertikální teplotní stability a bezvětří) zadána pro 8, resp. 16 základních směrů a bezvětří. Toto dělení je však příliš hrubé. Při přepočtu na nové, jemnější dělení lze postupovat podle následujícího algoritmu. Ve standardním výpočtu podle metodiky ATEM se používá dělení růžic na 48 směrů.

Mějme větrnou růžici dělenou podle tříd rychlosti proudění a stability pro 8 základních směrů rychlosti proudění a bezvětří, tj. šířka sektoru růžice  $\alpha_{sekt} = 45^\circ$  (v případě 16 dílné růžice  $\alpha_{sekt} = 22,5^\circ$ ). Dále je zadána relativní četnost výskytu bezvětří. Nejprve se rozpočte četnost výskytu bezvětří do všech směrů základní růžice, a to pro 1. třídu rychlosti proudění v každé třídě stability podle poměru četností. Četnosti  $cet_{stab, rych}(\alpha)$  pro  $\alpha \in \langle \alpha_1, \alpha_2 \rangle$  pro podrobnější dělení větrné růžice se pak určí následujícím způsobem:

$$cet_{stab, rych}(\alpha) = \frac{1}{100 \alpha_{sekt}} \left[ cet_{stab, rych}(\alpha_1) + (\alpha - \alpha_1) \frac{cet_{stab, rych}(\alpha_2) - cet_{stab, rych}(\alpha_1)}{\alpha_{sekt}} \right]$$

kde  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  označují směry větru v sousedních sektorech původní větrné růžice ( $\alpha_1 - \alpha_2 = \alpha_{sekt}$ ),  $cet_{stab, rych}(\alpha_1)$  a  $cet_{stab, rych}(\alpha_2)$  označují četnosti ve směrech  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  původní růžice a  $\alpha$  je směr větru odpovídající novému dělení podrobné větrné růžice. Takto určená hodnota relativní četnosti pro nové dělení větrné růžice bude číslo z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$  (chceme-li výsledek v %, pak zlomek před závorkou bude pouze  $1/\alpha_{sekt}$ ).

### 3.2.6 Výpočet charakteristik v libovolně zadaném bodě

Aplikace uvedených formulí pro jeden referenční je základ jakéhokoliv výpočtu. Metodiku je možno využít pro výpočet výše zmíněných hlavních charakteristik (i dalších veličin, které budou rozebrány v následující kapitole) pouze v jednom libovolně zadaném bodě, kdy vstupní informace pro referenční bod jsou popsány v části 2.3. V tomto ohledu se přístup neliší od případů, kdy se výpočet aplikuje na síť pravidelně či nepravidelně rozmístěných bodů, protože vždy se nejprve vypočtou údaje pro jeden referenční bod a pak se přistupuje k výpočtu pro další referenční bod. Toho je možno využít v případě, kdy kromě hodnot určených v zadané pravidelné síti bodů chceme navíc znát podrobnější informace o stavu kvality ovzduší v určitých vybraných bodech, které nejsou totožné s body pravidelné sítě.

### 3.2.7 Výpočet charakteristik v pravidelné síti bodů

Ke stanovení prostorového rozložení charakteristik znečištění ovzduší je nutno znát vypočtené hodnoty koncentrací ze sítě bodů. Způsob uspořádání sítě je libovolný, záleží zejména na povaze řešené úlohy a dalším zpracování dat. Jak bylo uvedeno v předchozím odstavci, celý výpočet je koncipován tak, že se nejprve spočtou charakteristiky v jednom referenčním bodě od všech zdrojů, jež jsou do dat zahrnuty, a poté se přistupuje k výpočtu pro následující referenční bod. Cyklus přes jednotlivé referenční body tvoří vnější cyklus modelového výpočtu. Zde je na místě připomenout, že s počtem emisních zdrojů narůstá i délka výpočtu informací pro jeden referenční bod, takže je-li oblast pokryta větším množstvím referenčních bodů a do výpočtu jsou zahrnuty informace o větším počtu emisních zdrojů všech typů, může výpočet trvat řadu hodin.

### 3.2.8 Výpočet maximálních krátkodobých hodnot koncentrací

Mějme  $K_{MAX}$  referenčních bodů a  $I_{MAX}$  emisních zdrojů rozdělených do  $N$  skupin (např. velké bodové zdroje ležící mimo výpočetní oblast – pro ně je k výpočtu zapotřebí speciální růžice pro dálkový přenos, místní bodové zdroje, liniové zdroje a plošné zdroje – lokální vytápění a dopravní zdroje). Dále mějme k dispozici  $N_{oblast} + 1$  větrných růžic (tj. minimálně dvě, chceme-li postihnout vliv vzdálených zdrojů a pro popis větrného režimu v modelové oblasti stačí jen jedna růžice – plochý terén). Pak v každém referenčním bodě můžeme pomocí vztahů uvedených v části 3.1.1. nebo 3.1.2. určit maximální krátkodobé koncentrace znečišťující látky pro proudění z každého sektoru, na něž je větrná růžice rozdělena, pro všechny přípustné kombinace tříd rychlosti a stability. Dostaneme tak výsledky, které označíme jako  $c_{sektor,stab,rych}$ . Chceme-li zahrnout vliv dálkového přenosu (požadové koncentrace), je k této hodnotě ještě nutno přičíst velikost transferu příslušného znečištění odpovídající danému sektoru (transfery nejsou funkcemi tříd stability a rychlosti proudění).

Na tomto místě je nutné uvést následující poznámku. Je-li růžice dělena do  $L$  sektorů, pak můžeme pro každý bod dostat  $15 L$  hodnot  $c_{sektor,stab,rych}$  (některé z nich budou rovny nule) a pro celkový počet referenčních bodů tento soubor obnáší  $15 K_{MAX} L$  hodnot krátkodobých koncentrací. Tento soubor informací je možno uspořádat do  $15 L$  souborů, kdy jeden soubor bude obsahovat vždy  $K_{MAX}$  hodnot  $c_{sektor,stab,rych}$  odpovídající proudění z jednoho sektoru a jedné kombinaci třídy rychlosti a třídy stability. Některé soubory budou obsahovat pouze nulové hodnoty  $c_{sektor,stab,rych}$ , neboť daná kombinace třídy rychlosti a třídy stability se v atmosféře nemůže vyskytovat (ve větrných růžicích tomuto případu odpovídají nulové četnosti). I tak zůstává počet souborů s uvedenými hodnotami krátkodobých koncentrací velmi vysoký.

Výše zmíněný enormní úhrn informací lze zmenšit tak, že pro každý směr proudění vybereme největší hodnotu  $c_{sektor}$  z hodnot  $c_{sektor,stab,rych}$ . V každém bodě pak dostaneme  $L$  hodnot veličiny  $c_{sektor}$  a pro všechny referenční body tato informace bude obnášet  $K_{MAX} L$  hodnot. Tím se počet výstupních souborů redukuje na  $L$ , tj. na počet sektorů, na něž je větrná růžice rozdělena.

V některých případech stačí určit pouze maximální hodnotu  $c_{max}$  bez ohledu na ostatní parametry, tj. sektor, odkud proudění přichází a kombinace tříd stability a rychlosti. V tomto případě se dostane pouze  $K_{MAX}$  hodnot veličin  $c_{max}$ , které mohou tvořit jediný výstupní soubor.

Při určení maximální krátkodobé koncentrace je nutné se zmínit o dopravních zdrojích a emisích z těchto zdrojů. Zatímco v případě všech ostatních skupin zdrojů se při výpočtu jak

## Popis metodiky výpočtu šíření znečištění

krátkodobých koncentrací tak průměrné roční koncentrace vycházelo z hodnoty průměrného emisního toku, v tomto případě je nutno brát v úvahu fakt, že hodnoty maximálních emisí (odpovídající dopravním špičkám) se výrazně odlišují od průměrné roční hodnoty. V metodice je proto zadán poměr mezi maximální a průměrnou emisí. Pro liniové zdroje je použita hodnota 2,4 (tj. velikost špičkové dopravní emise z liniových zdrojů =  $2,4 \times$  průměrná hodnota této emise). Tato hodnota vychází z pravidla, že v tzv. „špičkové“ hodině se obvykle realizuje 10 % z celodenní dopravy. U plošných dopravních zdrojů (zejména křižovatek) takovýto jednoznačný přepočtení neexistuje, neboť každá křižovatka se vyznačuje specifickými podmínkami v závislosti např. na tom, zda je světelně řízena, jaký má tvar a jak frekventované komunikace se na ní kříží. Stanovení poměru průměrné a špičkové emise se v tomto případě provádí již při výpočtu emisní bilance a do výpočtu se zadává příslušným zvýšením okamžité emise a snížením celkové provozní doby zdroje.

### 3.3.4. Výpočet hodnot dlouhodobých (ročních) průměrů koncentrací

Při určení hodnot dlouhodobých (ročních) průměrů koncentrací znečišťující látky se vychází ze stejných vztahů, které jsou použity pro výpočet krátkodobých hodnot. V případě určení této veličiny je však nutno vzít do úvahy počet hodin za rok, po který každý emisní zdroj emituje do ovzduší znečišťující látky. Pro každý emisní zdroj je tento parametr označený  $DOBA_{zdroj}$  znám, jeho hodnota může nabývat hodnot od  $DOBA_{zdroj} = 0$  (zdroj v daném roce neemitoval znečištění) až po  $DOBA_{zdroj} = 8760$  (zdroj emitoval nepřetržitě po dobu celého roku;  $8760 = 24 \times 365$ ). Pro každý zdroj se pak určí podíl:

$$RDOBA_{zdroj} = DOBA_{zdroj} / 8760$$

který nabývá hodnot z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Pokud se týče četnosti proudění, je nutno pro každý sektor určit velikost celkové četnosti proudění:

$$CELKCET_{sektor} = \sum_{rych} \sum_{stab} cet_{sektor,stab,rych}$$

kde *rych* označuje třídy rychlosti proudění a *stab* třídy vertikální teplotní stability. Ve větrných růžicích může být četnost zadána dvojím způsobem. Buď v procentech, pak je nutno hodnotu  $CELKCET_{sektor}$  vydělit 100 nebo jsou četnosti zadány již ve tvaru parametrů nabývajících hodnot  $\langle 0,1 \rangle$  a výsledek  $CELKCET_{sektor}$  vyjde též ve tvaru přímo použitelném ve výpočtu.

Hodnoty průměrné roční koncentrace  $c_{ROK}$  je možno určit dvojím způsobem. První z nich spočívá výpočtu této hodnoty jako váženého průměru hodnot  $c_{sektor,stab,rych}$ , kdy vahami jsou jednotlivé četnosti (ve tvaru hodnot z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ ) odpovídající proudění z daného sektoru při dané třídě stability a rychlosti. Ještě před výpočtem váženého průměru je nutno příspěvek od každého emisního zdroje (tj. hodnotu  $c_{i,sektor,stab,rych}$ ) k hodnotě  $c_{sektor,stab,rych}$  vynásobit hodnotou  $RDOBA_{zdroj}$ , aby byla vzata do úvahy doba, po kterou byl zdroj v provozu.

Druhá možnost spočívá ve využití předpokladu, podle kterého lze průměrné stabilitní poměry během celého roku považovat za blízké čtvrté, tj. normální stabilitní třídě. Označíme-li hledanou hodnotu průměrné roční koncentrace jako  $c_{ROK}$  pak:

$$c_{ROK} = \sum_i \sum_{\text{sektor}} \sum_{\text{rych}} \left( \sum_{\text{stab}} c_{et, \text{sektor}, \text{stab}, \text{rych}} \right) c_{i, \text{sektor}, 4, \text{rych}}$$

kde  $c_{i, \text{sektor}, 4, \text{rych}}$  je hodnota koncentrace působená i-tým emisním zdrojem pro normální (čtvrtou) stabilitní třídu pro daný sektor a danou třídu rychlosti proudění (stejně jako v předchozí možnosti výpočtu průměrné roční koncentrace je nutno přispěvek každého emisního zdroje k hodnotě  $c_{i, \text{sektor}, 4, \text{rych}}$  vynásobit parametrem  $RDOBA_{\text{zdroj}}$ ). Hodnotu průměrné roční koncentrace  $c_{ROK}$  pak opět dostaneme jako vážený průměr, kdy vahami v tomto případě jsou sumy přes třídy stability  $\sum_{\text{stab}} c_{et, \text{sektor}, \text{stab}, \text{rych}}$  pro každý sektor a každou třídu rychlosti,

$c_{et, \text{sektor}, \text{stab}, \text{rych}}$  označuje četnost proudění z daného sektoru při dané třídě rychlosti a stability.

Pro postižení vlivu dálkového přenosu (pozařové koncentrace) je k hodnotě  $c_{ROK}$  nutno přičíst průměrnou roční hodnotu transferu daného druhu znečištění, která je buď součástí vstupního souboru s hodnotami transferů, nebo se určí jako vážený průměr transferů z jednotlivých sektorů, kdy vahami jsou celkové četnosti proudění z jednotlivých sektorů získané sumací přes všechny třídy rychlosti a stability v daném sektoru.

### 3.3.5. Výpočet délky doby překročení krátkodobého imisního limitu daným druhem znečištění

Pro to, aby mohl proběhnout výpočet délky doby překročení krátkodobého imisního limitu daným druhem znečištění  $T^{\text{lim}}$  v daném referenčním bodě, je nutno zadat tuto prahovou hodnotu, kterou označíme jako  $c^{\text{lim}}$ . Algoritmus výpočtu je následující.

Pro jednotlivé sektory určíme celkovou hodnotu koncentrace působenou v daném referenčním bodě všemi emisními zdroji při proudění z těchto sektorů tak, že postupně načítáme hodnoty krátkodobých koncentrací  $c_{i, \text{sektor}, \text{stab}, \text{rych}}$  působených jednotlivými zdroji a dosažených při proudění z daného sektoru při jednotlivých kombinacích tříd stability a proudění. Testuje se, zda suma načtených hodnot nepřesáhla hodnotu  $c^{\text{lim}}$ . Došlo-li k tomu, že hodnota  $c^{\text{lim}}$  byla skutečně překročena při určité kombinaci tříd rychlosti proudění uloží se hodnota  $c_{et, \text{stab}, \text{rych}}$  odpovídající danému sektoru a přejde se k načítání příspěvků emisních zdrojů při proudění ze stejného sektoru při jiné kombinaci rychlostních a rozptylových podmínek. Takto se pro jeden sektor určí hodnoty krátkodobých koncentrací a sečtou se četnosti kombinací tříd stability a rychlosti proudění, za nichž byly dosaženy hodnoty koncentrací vyšších než  $c^{\text{lim}}$ . Dostaneme tak jim odpovídající hodnotu  $T_{\text{sektor}}^{\text{lim}}$  pro jeden sektor větrné růžice. Výsledná hodnota doby překročení krátkodobého imisního limitu v daném referenčním bodě je pak dána jako:

$$T^{\text{lim}} = \sum_{\text{sektor}} T_{\text{sektor}}^{\text{lim}}$$

Veličina  $T^{\text{lim}}$  udává horní odhad doby překročení krátkodobého imisního limitu, neboť při zdrojích neemitujících po celou dobu roku se může stát, že v okamžiku, kdy by daný zdroj mohl ovlivnit hodnotu dosažené koncentrace v daném referenčním bodě, právě nebude emitovat.



## 4. DALŠÍ MOŽNÉ APLIKACE VÝPOČTU ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ

### 4.1. Výpočet příspěvku ke krátkodobé hodnotě koncentrace z daného sektoru

Tato charakteristika, tj. „jak vysoké okamžité hodnoty koncentrace v referenčním bodě odpovídají určitému směru proudění“, poskytuje informace o závislosti velikosti koncentrace v referenčním bodě na směru proudění a tím i o rozložení emisních zdrojů vůči zkoumanému bodu. Podobně jako v případě určení krátkodobých hodnot koncentrací i zde existuje několik možností pro této charakteristiky, která se někdy též nazývá jako růžice znečištění.

Nejobsáhlejší informaci obsahuje přístup, kdy pro jeden sektor určíme všechny dosažené hodnoty okamžitých koncentrací od všech emisních zdrojů pro jednotlivé kombinace tříd rychlosti a stability, tj.:

$$c_{stab, rych}^{sektor} = \sum_i c_{i, stab, rych}^{sektor}$$

kde index  $i$  probíhá přes všechny emisní zdroje. V jednom referenčním bodě tak dostaneme maximálně 15 růžic znečištění pro všechny možné kombinace tříd rychlosti a stability (některé růžice bude možno vynechat, neboť budou obsahovat pouze nulové hodnoty).

Druhá možnost spočívá v tom, že z krátkodobých hodnot znečištění dosažených v daném referenčním bodě se vybere hodnota nejvyšší, která bude odpovídat určité třídě rychlosti a stability a pro ni se pak určí jedna růžice znečištění. Problém spočívá v tom, že v dalších referenčních bodech může být maximální krátkodobá hodnota koncentrace dosažena pro jiné rozptylové podmínky (třídu rychlosti a stability) a růžice pak budou navzájem do jisté míry nesouměřitelné. Zde neexistuje obecný návod, který způsob volit, ale vždy je nutno rozvážit, k čemu dané charakteristiky mají sloužit a podle toho pak volit přístup.

### 4.2. Výpočet příspěvku k průměrné roční hodnotě koncentrace z daného sektoru

V tomto případě je situace jednodušší o to, že se nemusí uvažovat odlišný vliv rozptylových podmínek v jednotlivých referenčních bodech, neboť pro každý bod je k dispozici pouze jedna průměrná roční hodnota koncentrace. Hodnoty průměrné roční koncentrace pro jednotlivé sektory  $c^{sektor}$  lze určit následujícím způsobem.

Pro jednotlivé sektory se provede následující sumace:

$$c^{sektor} = \sum_{rych} \left( \sum_{stab} c_{et, stab, rych} \right) c_{i, 6, rych}^{sektor} \Big|_{sektor}$$

## Další možné aplikace výpočtu znečištění ovzduší

kde  $cet_{i,6,rych}^{sektor}$  označuje příspěvky od jednotlivých zdrojů (index  $i$  probíhá přes všechny zdroje) k hodnotě průměrné roční koncentrace pro daný sektor rŕžice, proto parametr  $stab = 6$ , v jednom sektoru. Hodnota parametru  $stab = 6$  bude nadále také znamenat, že při výpočtu příspěvku daného zdroje k průměrné roční koncentraci je vzata do úvahy doba, po kterou zdroj emituje v průběhu kalendářního roku (tzv. provozní doba zdroje).

### 4.3. Určení relativního podílu jednotlivých skupin zdrojů na průměrné roční hodnotě koncentrace v daném bodě

Každý emisní zdroj má přiřazenu informaci, k jaké skupině zdrojů náleží (viz část 2.1. vstupní údaje o emisních zdrojích). Je-li známa hodnota průměrné roční koncentrace v daném referenčním bodě  $c_{ROK}$ , pak je postup při určení relativního podílu vybrané skupiny zdrojů na průměrné roční hodnotě koncentrace v daném bodě následující.

$$c_{ROK}^{j skupina} = \sum_{sektor} \sum_{rych} \left( \sum_{stab} cet_{stab, rych} \right) c_{i, sektor, 6, irych}^{j skupina}$$

při splnění podmínky, že identifikátor skupiny zdroje pro příslušný zdroj má hodnotu  $j skupina$ . Takto se určí hodnota průměrné roční koncentrace působená pouze vybranou skupinou zdrojů. Relativní podíl se pak určí:

$$c_{ROK}^{j skupina} (\%) = \frac{c_{ROK}^{j skupina}}{c_{ROK}} 100$$

Obdobně se určí podíly i dalších skupin zdrojů.

### 4.4. Výpočet podílu (absolutního i relativního) jednotlivých zdrojů na průměrných ročních hodnotách koncentrací v referenčním bodě

Je-li známa hodnota průměrné roční koncentrace v daném referenčním bodě  $c_{ROK}$ , a příspěvek k této hodnotě od každého emisního zdroje  $c_{i,6}$ , kde je již určen vážený průměr přes jednotlivé sektory, třídy rychlosti a stability pro tento příspěvek, pak absolutní příspěvek daného emisního zdroje je právě hodnota  $c_{i,6}$  a relativní podíl je dán jako poměr

$$c_{podil}^{zdroj} (\%) = \frac{c_{i,6}}{c_{ROK}} 100$$

## Další možné aplikace výpočtu znečištění ovzduší

---

Hodnotu  $c_{podil_{ROK}}^{zdroj}$  (%) je vhodné zdola omezit určitou prahovou hodnotou (např. 5%) a ve výstupech nechat tisknout jen ty zdroje, jejichž příspěvek je větší než tato prahová hodnota, neboť při větším počtu emisních zdrojů by se pro každý referenční bod dostal neúměrně dlouhý seznam emisních zdrojů, jejichž příspěvek tvoří pouze zlomky procent.

Údaje získané pomocí tohoto výpočtu pomohou odhalit hlavní přispěvovatele k hodnotě průměrné roční koncentrace daného druhu znečištění, což může být užitečným zdrojem informací pro řadu kroků např. v procesu rozhodování.

## 5. INTERPRETACE VÝSLEDKŮ CHARAKTERISTIK ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ

Jestliže to parametry úlohy dovolí (tj. počet referenčních bodů a hustota, s níž pokrývají modelovou oblast), je nejlépe zobrazovat výsledky výpočtů ve formě map případně ve formě grafů a diagramů. Některé z vypočtených hodnot je naopak možno uvádět pouze ve formě tabulek. Přestože zde bude uvedeno několik poznámek k interpretaci modelových výsledků, je vždy nejvhodnější, když tuto interpretaci provádí odborník v problematice fyziky atmosféry, zejména tehdy, bude-li se jednat o modelové výpočty prováděné nad komplexním terénem.

Při interpretaci modelových výsledků je nutno vycházet z následujících faktů:

- Jakýkoliv model představuje zjednodušený popis reálných procesů. Gaussovské modely jsou navíc příkladem velmi zjednodušeného popisu reality, a tudíž musejí vyhovovat řadě podmínek, za nichž jsou výsledky interpretovatelné – podmínky pro minimální rychlost proudění, reliéf terénu modelové oblasti a mnohé další, jejichž diskuse je mimo rámec této příručky.
- Vstupní údaje, a to jak klimatické tak i údaje o emisních zdrojích, vycházejí z průměrných ročních hodnot. Skutečné okamžité hodnoty popisující jak stav atmosféry tak i velikost emisního toku se mohou od těchto údajů značně odlišovat a navíc klimatická data představují určitou, za delší časové období zprůměrovanou informaci, která se může lišit od konkrétních podmínek v daném roce.
- Metodika nezohledňuje fakt, že v jakémkoli zvlněném terénu bude pole proudění vykazovat deformace v horizontální rovině (přenos znečištění nebude probíhat přímočaře od zdroje ve směru proudění).
- Protože použité vztahy pro výpočet koncentrací od jednotlivých typů zdrojů (bodové, liniové či plošné) jsou vlastně řešením rovnice difúze pro stacionární případ, je nutno předpokládat, že v celé modelové oblasti panují konstantní podmínky charakterizující stav atmosféry a tyto podmínky jsou konstantní nejen v časovém, ale i v prostorovém smyslu.

Kromě výše uvedených limitujících faktů zde existuje i řada dalších faktorů, které je dobré mít na zřeteli, ale jejichž diskuse přesahuje rámec příručky. Právě proto je vhodné, aby interpretace výsledků byla svěřena do rukou odborníka.

## LITERATURA

- [1 ] Ministerstvo lesního a vodního hospodářství: Výpočet znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů zdrojů. Praha, 1979.
- [2 ] Brechler, J.: Gaussovský disperzní model šíření znečišťujících příměsí v atmosféře. Habilitační práce, MFF UK Praha, 1998.
- [3 ] Maňák, J., Bubník, J., Keder, J., Macoun, J.: SYMOS'97 Systém modelování stacionárních zdrojů. ČHMÚ, Praha 1997
- [4 ] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, Flannery, B.P.: Numerical Recipes in Fortran. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 1992.
- [5 ] Holpuch, J.: Modelování postupného vznosu kouřových vleček. Diplomová práce KMOP MFF UK, Praha, 1995.
- [6 ] U.S. Environmental Protection Agency: User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC2) Dispersion Model. Volume II - Description of Model Algorithms. Research Triangle Park, North Carolina, 1992.

## PŘÍLOHA A: VYJÁDŘENÍ FUNKCE ERF(X)

Chybová funkce erf(x) a komplementární chybová funkce erfc(x) jsou definovány vztahy:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$$

a platí pro ně následující:

$$\operatorname{erf}(0) = 0 \quad \operatorname{erf}(\infty) = 1 \quad \operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x)$$

$$\operatorname{erfc}(0) = 1 \quad \operatorname{erfc}(\infty) = 0 \quad \operatorname{erfc}(-x) = 2 - \operatorname{erfc}(x)$$



**ATEM**  
ATELIÉR EKOLOGICKÝCH MODELŮ

---

**ÚPRAVA METODIKY  
IMISNÍHO MODELU  
ATEM**

**Metodika byla vypracována za podpory Technologické agentury ČR – projekt TD020342 Rozvoj metodiky pro modelování rozptylu znečišťujících látek v atmosféře.**

Praha  
prosinec 2015

**OBSAH**

---

1. Úvod .....	2
2. Cíle a očekávané přínosy metodiky .....	3
3. Charakteristika použitých postupů .....	4
4. Ovlivnění rozptylu znečištění terénními překážkami .....	5
5. Rozptyl znečišťujících látek v blízkosti komunikací .....	6
6. Rozptyl znečišťujících látek od portálů tunelů .....	9
7. Prodloužení doby rozptylu nad komunikacemi .....	11
8. Seznam předchozích publikací .....	12
9. Literatura.....	13



## 1. Úvod

---

Metodika ATEM byla českou legislativou zakotvena jako jedna z tzv. „referenčních metod pro modelování“. Dle vyhlášky 330/2012 Sb., příloha 6, část B (dříve nařízení vlády 350/2002 Sb., příloha 8) je model ATEM společně s modelem SYMOS'97 určen pro výpočty rozptylu znečištění v městských oblastech nad úrovní střech budov a ve venkovských oblastech.

Metodika ATEM spadá do kategorie tzv. gaussovských modelů. S ohledem na potřebu zachování kontinuity v modelových výpočtech navazuje na postupy popsané v publikaci „Metodika výpočtu znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů zdrojů“ (viz [1]). Tuto metodiku rozšiřuje a modifikuje. Výchozí rovnice metodiky ATEM je možné nalézt též v [2]. Úplný popis metodiky je dostupný v [3] a [4].

Metodika ATEM umožňuje

- výpočet znečištění ovzduší plynnými látkami a prachem od velkého počtu bodových, liniových a plošných zdrojů znečištění ovzduší
- výpočet charakteristik znečištění v husté pravidelné i nepravidelné síti referenčních bodů tak, aby výsledky mohly být dále zpracovány např. pomocí geografického informačního systému (GIS) a podány v mapové formě
- výpočet znečištění v relativně komplikovaném terénu
- vycházet při výpočtu z většího počtu větrných růžic, přičemž každá z nich je charakteristická pro určitou část modelové oblasti a popisuje větrné poměry v této oblasti; každá větrná růžice bere v úvahu statistické rozložení směru a rychlosti větru vztažené k třídám vertikální teplotní stability ovzduší v mezní vrstvě atmosféry podle klasifikace Bubníka a Koldovského.

Při používání tohoto modelu, mimo jiné i pro zpracování rozptylových studií ve smyslu zákona 201/2012 Sb., zákon o ochraně ovzduší, bylo identifikováno několik oblastí, na které by bylo vhodné zaměřit pozornost pro zpřesnění výstupů modelu. Jednalo se zejména o problematiku dopravních staveb (tj. rozptylu znečišťujících látek z komunikací) a modelování transportu a rozptylu znečištění v komplexním terénu. Návrh příslušných úprav přináší tento materiál. Při jeho zpracování bylo klíčovým požadavkem zachování souladu mezi původní metodikou a upravenými postupy.

## **2. CÍLE A OČEKÁVANÉ PŘÍNOSY METODIKY**

---

Modelování kvality ovzduší (rozptylové studii) je standardním způsobem posuzování vlivů stávajících i plánovaných zdrojů znečišťování na kvalitu ovzduší v místě dopadu. Doposud používaná metodika a model ATEM však nedovolují adekvátním způsobem hodnotit některé nové typy zdrojů emisí, které se ve větší míře objevují s rozvojem společnosti. Jedná se zejména o oblast dopravních zdrojů, kdy ve snaze minimalizovat dopady nové silniční infrastruktury na obytnou zástavbu se stále častěji objevují projekty mimoúrovňově vedených dopravních staveb – podzemních tunelů či naopak dlouhé mostní konstrukce, estakády apod. V souvislosti s ustanovením § 12 zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší (kompenzační opatření) se také zvýšily nároky na přesnější modelování imisních příspěvků v blízkém okolí komunikací a na vyčíslení účinnosti rozličných opatření ke snížení těchto příspěvků, jako jsou vegetační bariéry, zpevnění krajnic, čištění vozovky, úpravy křižovatek apod.

Cílem projektu je proto modernizovat výpočetní metodiku tak, aby lépe odpovídala požadavkům, které jsou na ni kladeny. Současně je úprava zaměřena i na odstranění některých nedostatků používané metodiky, které byly zjištěny v rámci dosavadní praxe uchazeče, zejména v oblasti ovlivnění rozptylu znečištění terénními překážkami.

Hlavním očekávaným přínosem nové je zvýšení přesnosti rozptylových studií, která umožní orgánům veřejné správy lépe rozhodovat v případě povolování nových zdrojů znečišťování a při přijímání opatření ke zlepšení kvality ovzduší v silně zatížených oblastech. Předpokládá se i zásadní využití nové metodiky a modelu při realizaci kompenzačních opatření dle zákona o ochraně ovzduší. Předpokládanými uživateli metodiky jsou tedy zejména zpracovatelé rozptylových studií a pracovníci orgánů veřejné správy všech úrovní.

### 3. CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH POSTUPŮ

Úprava metodiky ATEM přináší upřesňující a rozšiřující postupy zaměřené na zlepšení výpočtu transportu a rozptylu znečištění v ovzduší. V porovnání se stávající metodikou přináší následující nové přístupy:

- ovlivnění rozptylu znečištění terénními překážkami: pro zohlednění vlivu terénu byl použit postup navržený v metodice SYMOS'97; jedná se o obdobný postup, který využívají i zahraniční modely.
- zpřesnění rozptylu znečištění v blízkosti komunikací: rozptyl znečišťujících látek od liniových zdrojů je v modelu ATEM parametrizován pomocí tzv. chybové funkce; tento přístup dává realističtější pole koncentrací v okolí liniových zdrojů, než ostatní postupy používané v Gaussovských modelech; jeho slabinou byla reprezentace pole koncentrací přímo v oblasti komunikace; navržený postup tento nedostatek odstraňuje;
- nové řešení rozptylu znečištění od komunikací položených mimoúrovňově ve vztahu k výpočtovým bodům: v posledních letech jsou mnohem častěji využívány při stavbě komunikací estakády, dlouhá přemostění, mimoúrovňová křížení a další obdobné stavby, které vedou dopravu po vyvýšených konstrukcích. Tyto stavby mají kladný vliv nejen na plynulost provozu, ale snižují i úroveň imisní zátěže v oblastech pod takovýmito komunikacemi; dosavadní metodika do značné míry ignorovala posledně uvedenou skutečnost; navržené úpravy tento nedostatek odstraňují;
- nové řešení rozptylu znečištění od portálů silničních tunelů: častější využívání tunelů při dopravních stavbách přineslo otázku korektní interpretace rozptylu znečišťujících látek zejména v oblasti portálů silničních tunelů. Po úplný popis rozptylu znečištění je třeba využít komplikovaných modelů zohledňujících terén, aktuální proudění, aktuální strukturu a frekvenci dopravy apod.; použití těchto modelů je velmi komplikované a nachází se mimo možnosti při zpracování běžných rozptylových studií. Navržená úprava přináší postup, který umožňuje parametrizovat vliv portálů tunelů na rozptyl znečištění i v Gaussovských modelech;
- zpřesnění transformační funkce  $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$  v bezprostřední blízkosti komunikací: při výpočtu imisní zátěže oxidem dusičitým je důležitá doba, po kterou jsou znečišťující látky přítomny v atmosféře, tedy doba po kterou probíhají chemické reakce mezi  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ . Vzduchová částice neopouští komunikaci ihned, ale vlivem turbulence indukované projíždějící dopravou dochází k jistému zdržení v oblasti komunikace. Výsledné koncentrace oxidu dusičitého v těsné blízkosti liniového zdroje jsou tedy v reálu poněkud vyšší, než odpovídalo dosavadnímu výpočtu; navržená úprava zohledňuje tento proces a zlepšuje tak výsledky v uvažované oblasti komunikace.

Předložené úpravy do jisté míry vycházejí ze zahraničních zdrojů citovaných v návrhu doplňku metodiky. Tyto poznatky kombinují a aplikují je na potřeby modelu ATEM a podmínky České republiky. Umožňují tak udržet metodiku a model ATEM na současné úrovni vědeckého poznání.

#### 4. OVLIVNĚNÍ ROZPTYLU ZNEČIŠTĚNÍ TERÉNNÍMI PŘEKÁŽKAMI

Stávající metodika ATEM nadhodnocuje koncentrace v oblastech za terénními překážkami, tj. v případech kdy se mezi zdrojem a referenčním bodem nachází např. rozsáhlejší pohoří. V literatuře je tato situace řešena převážně rozdělením vlečky na dva případy: vlečku sledující terén a horizontální vlečku (viz např. [5]). Obdobným způsobem je situace řešena i v modelu SYMOS'97 (viz [6]), který je společně s modelem ATEM zařazen mezi národní referenční modely. S ohledem na vzájemnou kompatibilitu výsledků získaných jednotlivými modely navrhujeme aplikaci obdobného přístupu, jaký byl použit v modelu SYMOS'97. Model pracuje s tzv. „horním odhadem úrovně znečištění“ a „dolním odhadem úrovně znečištění“, které korespondují přístupu použitému např. v modelu AERMOD.

Pro vyjádření vertikálního členu  $V$  je použit vztah:

$$V = \left[ (1 + \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z - H_{ef})^2}{2(\sigma_z + \sigma_{z0})^2}\right) + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(|z| + H_{ef})^2}{2(\sigma_z + \sigma_{z0})^2}\right) \right]$$

kde je:

- $\vartheta$  – koeficient pro zvlněný terén [-]
- $z$  – převýšení referenčního bodu nad patou komína [m]
- $H_{ef}$  – efektivní výška zdroje po provedení korekcí [m]
- $\sigma_y$  – rozptylový parametr v horizontálně příčném směru
- $\sigma_z$  – rozptylový parametr ve vertikálně příčném směru
- $\sigma_{y0}$  – počáteční hodnota  $\sigma_y$  v místě liniového nebo plošného zdroje
- $\sigma_{z0}$  – počáteční hodnota  $\sigma_z$  v místě liniového nebo plošného zdroje

Koeficient vlivu terénu  $\vartheta$ , který byl navržen Maňákem [6] pro postžení vlivu zvlněného terénu, se pro každou dvojici zdroj - referenční bod určí z profilu nadmořské výšky terénu  $z(x')$  mezi zdrojem a referenčním bodem takto

$$\vartheta = \max\left(0, \frac{1}{x \cdot (z_R - z_P)} \cdot \int_0^x (z_1(x') - 2 \cdot z_2(x')) \cdot dx'\right) \quad \text{pro } z_R > z_P$$

$$\vartheta = 0 \quad \text{pro } z_R \leq z_P$$

kde je

- $x$  – vzdálenost referenčního bodu od zdroje [m]
- $z_1(x') = z(x') - z_P$  pro  $z(x') > z_P$
- $z_1(x') = 0$  pro  $z(x') \leq z_P$
- $z_2(x') = z(x') - z_P$  pro  $z(x') > z_R$
- $z_2(x') = 0$  pro  $z(x') \leq z_R$

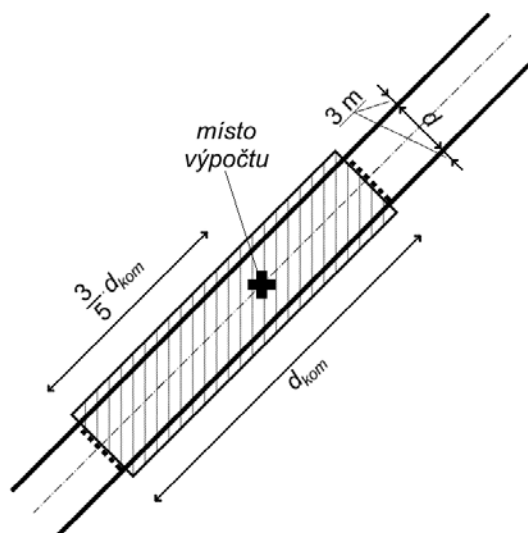
Vzhledem k tomu, že výpočet koeficientu vlivu terénu je časově náročný, bude možno v situacích, kdy to charakter terénu umožňuje tuto funkci v programu vypnout.

## 5. ROZPTYL ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK V BLÍZKOSTI KOMUNIKACÍ

Dosavadní metodika ATEM neumožňovala korektně počítat imisní příspěvek liniového zdroje v případě, že referenční (výpočtový) bod ležel přímo na komunikaci, nebo v jeho těsné blízkosti podél celé délky zdroje. Metodicky byl tento problém ošetřen doporučením umisťovat body až od určité vzdálenosti, výpočtový model pak byl nastaven tak, že v daném případě nezapočítal příspěvek z příslušné části komunikace k celkovým koncentracím znečišťující látky. To se projevovalo zejména při modelování větších území v pravidelné síti bodů tím, že body umístěné u komunikací vykazovaly významný pokles koncentrací – zde bylo nutno sít referenčních bodů v blízkém okolí komunikací vždy manuálně upravit, což přirozeně představovalo komplikaci při zpracování příslušné úlohy.

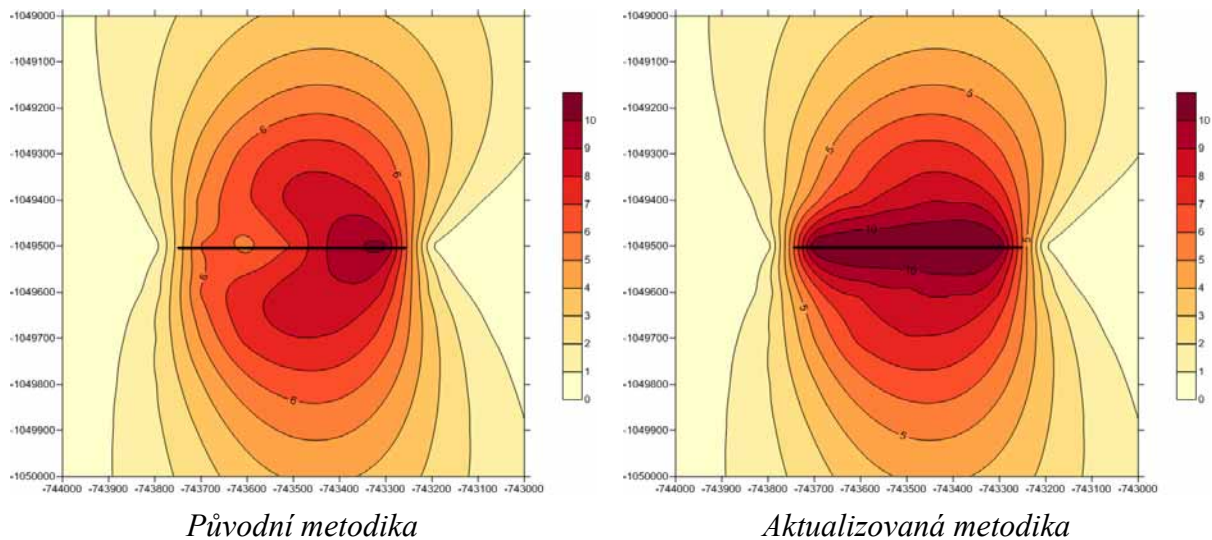
Pro odstranění tohoto problému byl v souladu s [7] aplikován předpoklad, že v oblasti komunikace je vlivem dopravně indukovaných turbulencí ustavena „mixing zone“ – oblast, kde jsou koncentrace prakticky uniformní. Podle [7] tato oblast zasahuje přibližně 3 m od okraje komunikace. Výpočetní postupy metodiky byly změněny tak, aby pro referenční bod, který se nachází uvnitř komunikace nebo ve vzdálenosti menší než 3 m od okraje komunikace, byl výpočet proveden v podélné ose komunikace v  $3/5$  celkové délky daného úseku komunikace. Tato vzdálenost byla stanovena empiricky s ohledem na zachování úrovně znečištění na hraně vymezené oblasti komunikace.

Obr. 1. Schematické znázornění modelového úseku komunikace



Následující obrázek ukazuje změnu modelového pole koncentrací způsobené jedním liniovým zdrojem podle původní metodiky a po aplikaci uvedeného postupu.

Obr. 2. Modelový výpočet průměrných ročních koncentrací od liniového zdroje v rovinném terénu

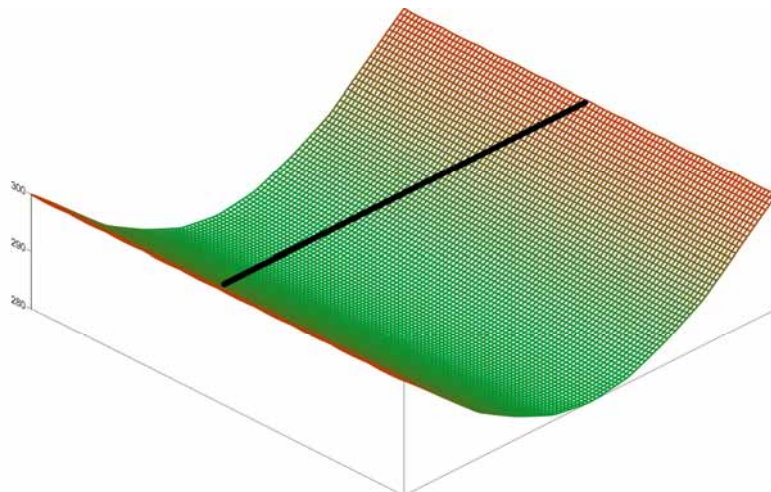


Druhým řešeným problémem byla skutečnost, že metodika ATEM nezohledňovala u liniových zdrojů záporné převýšení referenčního bodu vůči zdroji emisí, tj. vedení silniční komunikace po mostě. V takových případech bylo převýšení považováno za rovné nule a výpočet probíhal prakticky v rovině.

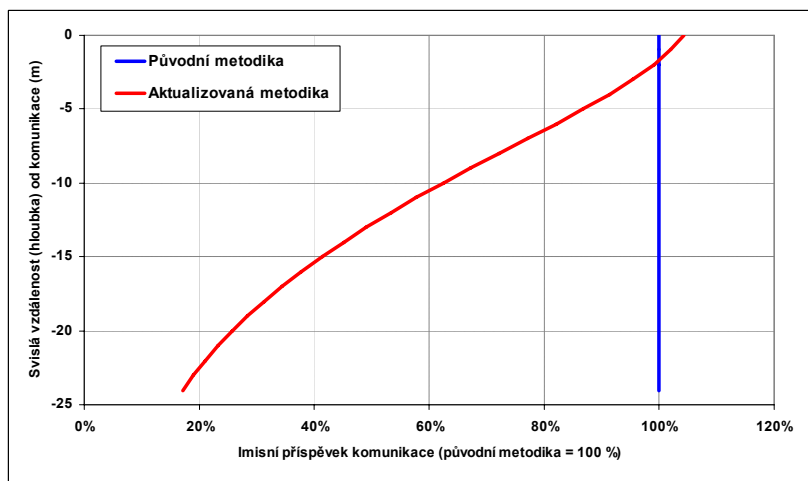
Zde je nutno uvést, že vzhledem k obvyklé rozteči referenčních bodů se tento aspekt projeví prakticky až u mostů dlouhých řádově stovky metrů až kilometrů; podobné modelové úlohy se v době tvorby modelu téměř nevyskytovaly, přičemž nebyla otázce vertikálního rozptylu od liniového zdroje věnována zvláštní pozornost. V souvislosti s posuzováním staveb kapacitních silničních komunikací, se však emisně významné mimoúrovňově vedené liniové zdroje objevují stále častěji. Proto bylo nezbytné výpočetní algoritmy v této oblasti přepracovat.

Použitá úprava metodiky počítá vertikální rozptyl podobně jako v případě bodových zdrojů (tj. je zohledněno i záporné převýšení referenčního bodu vůči zdroji). Výška nad terénem, ve které dochází k rozptylu (analogie stavební výšky zdroje u bodových zdrojů) byla s ohledem na turbulentní charakter prostředí nad komunikací stanovena na 2 m nad úroveň komunikace. Vertikální průběh imisních příspěvků liniového zdroje je pak znázorněn na následujícím obrázku.

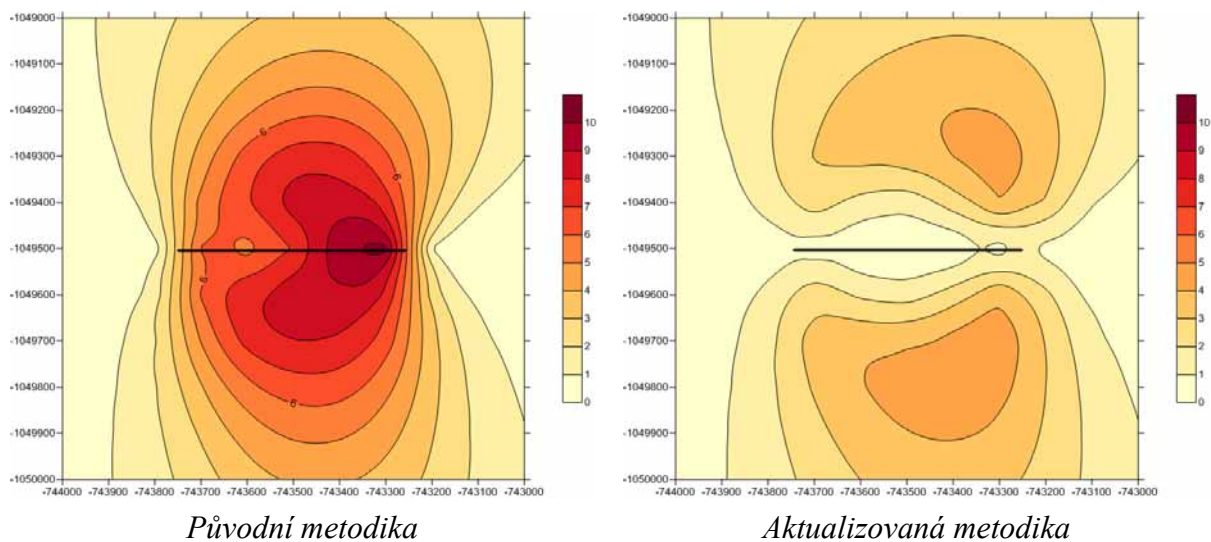
Obr. 3. Modelový terén v okolí mostu



Obr. 4. Průběh koncentrací od liniového zdroje v závislosti na svislé vzdálenosti od zdroje



Obr. 5. Modelový výpočet průměrných ročních imisních příspěvků komunikace nad údolím kolmým na osu liniového zdroje (převýšení údolí 120 m, koncentrace jsou modelovány ve výšce 1,5 m nad terénem)



## 6. ROZPTYL ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK OD PORTÁLŮ TUNELŮ

V rámci projektové přípravy silničních staveb je stále častěji plánováno vedení části úseků v tunelech, zejména v místech kontaktu komunikace s obytnou zástavbou. Samotný tunel představuje bezpochyby stavbu chránící obyvatele před imisemi z dopravy, výjimkou jsou však výjezdové portály, které naopak představují významný zdroj emisí znečišťujících látek. Vliv portálů silničních tunelů na kvalitu ovzduší v jejich okolí lze podle [8] charakterizovat ve třech zónách:

1. Těsné sousedství portálu – do vzdálenosti cca 100 – 200 m od portálu. Koncentrace na výstupu z tunelu mohou dosahovat maximálních hodnot zaznamenaných v tunelu. Tyto hodnoty s rostoucí vzdáleností od portálu rychle klesají. Měření ukazují, že ve vzdálenostech okolo 100 m klesají přibližně na úroveň pozadí.
2. Okolí portálu – oblast zasahující přibližně do vzdálenosti 1 km. Vliv emisí z portálu na úroveň koncentrací je relativně malý.
3. Širší okolí – oblast ovlivněná portály tunelu nepřímo díky soustředění dopravy využívající tunel

Jak je zřejmé, k největšímu ovlivnění kvality ovzduší dochází v první zóně, tj. v těsné blízkosti portálu. V modelových úlohách se lze často setkat s tím, že výjezdový portál posuzovaného silničního tunelu je dominantním zdrojem imisní zátěže v dané části sídla, obzvláště je-li zohledněn i předpoklad snižování emisí z ostatních zdrojů ve výhledovém stavu. To přirozeně představuje podstatnou komplikaci pro realizaci jinak prospěšných dopravních investic, a proto je kladen důraz na taková řešení, která zajistí minimalizaci imisních příspěvků výjezdových portálů v dotčených lokalitách. S tím souvisí i požadavky na přesnost modelového výpočtu. Přitom je však modelování rozptylu znečištění od tunelových portálů úlohou značně komplikovanou. Rozptyl je totiž výrazně ovlivněn výstupní rychlostí vynášené vzdušiny – jedná se v zásadě o ekvivalent výdechového objektu, avšak s tím rozdílem, že vektor výstupní rychlosti není orientován vertikálně, ale horizontálně. Tento faktor není v rozptylových modelech gaussovského typu standardně aplikován, a to ani u zahraničních modelů pokročilého typu; portály tunelů jsou reprezentovány jako plošný zdroj a ovlivnění prouděním z tunelu je zanedbáno.

Zpracování takového výpočetního algoritmu, který uvedený faktor zohlední a tím výrazně zpřesní výsledky modelových výpočtů v okolí tunelových portálů, bylo proto jedním z hlavních úkolů inovace metodiky ATEM. Prověřováno bylo více možných řešení, uváděných v literatuře, ve výsledku se jako nejvhodnější ukázal postup dle [8], spočívající v tom, že před portál tunelu je umístěn fiktivní liniový zdroj, jehož směr je totožný se směrem výjezdu z tunelu. Délka tohoto zdroje je proměnná v závislosti na výstupní rychlosti vzdušiny. S ohledem na místní podmínky může být takto vytvořený fiktivní zdroj rozdělen na více segmentů, jejichž emise klesá se vzdáleností od portálu, součet emisí za všechny segmenty je pak ekvivalentní množství znečišťující látky, emitované příslušným výjezdovým portálem tunelu.

Při standardních rychlostech proudění vystupujícího z tunelu ( $3-4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) předpokládáme ve shodě s [8] délku liniového zdroje 100 m. Při nulové výstupní rychlosti předpokládáme, že rozptylu je významně omezen. Za této situace navrhuje minimální délku liniového zdroje



50 m. Stejně tak zavádíme maximální délku fiktivního liniového zdroje rovnu přibližně 150 m. Ke stanovení délky fiktivního zdroje je možno použít následující vztah:

$$\begin{aligned} \text{pro } u_t < 0 \text{ m.s}^{-1} & \quad d_{kom} = 50 & \quad (\text{situace kdy je do tunelu vzduch nasáván}) \\ \text{pro } u_t \geq 0 \text{ m.s}^{-1} & \quad d_{kom} = 15 \cdot \min(u_t, 7) + 50 \end{aligned}$$

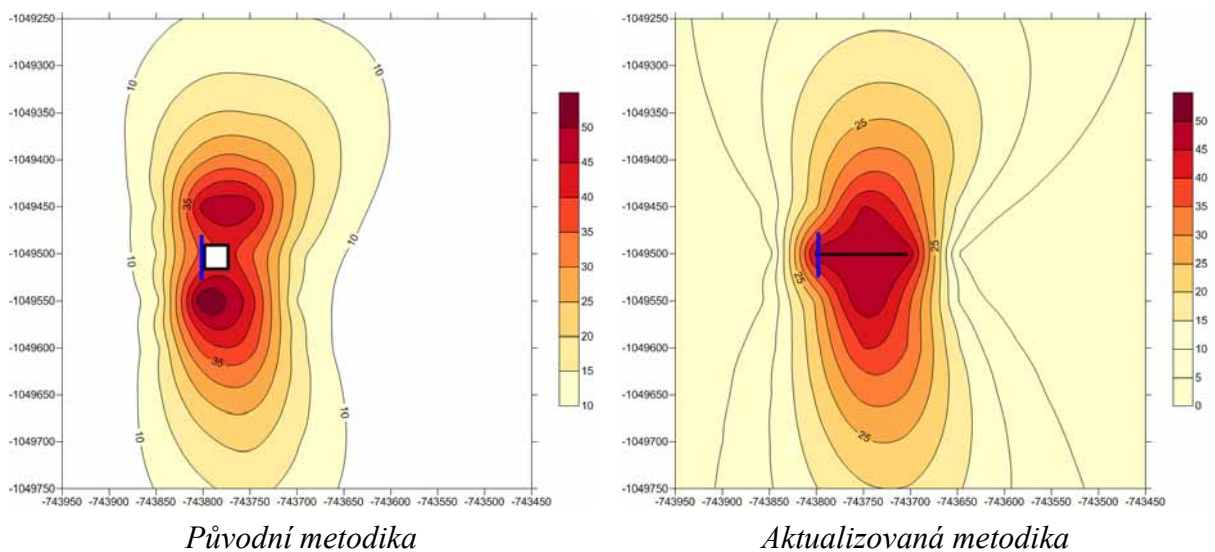
kde je:

$$\begin{aligned} u_t & \quad - \text{výstupní rychlost proudění z tunelu (záporná při nasávání) [m.s}^{-1}] \\ d_{kom} & \quad - \text{délka fiktivního liniového zdroje} \end{aligned}$$

Provozní hodiny zdroje pak odpovídají počtu hodin, kdy je předpokládáno proudění vystupující z tunelu. Šířka zdroje je nastavena na šířku výstupního portálu zvětšenou na obě strany o 3 m (po výstupu z portálu dojde k prakticky okamžitému rozšíření proudu vzduchu).

Detailnější popis situace na výstupu z tunelu by vyžadoval použití mnohem sofistikovanějších modelů např. modelů třídy CFD (Computational Fluid Dynamics), které popisují komplexně proudění v okolí portálu tunelu. Využití těchto modelů je ale vyhrazeno vzhledem ke své náročnosti jak na vstupní data tak na výpočetní čas pouze pro speciální výpočty.

Obr. 6. Modelový výpočet průměrných ročních koncentrací od výjezdového portálu silničního tunelu



## 7. PRODLOUŽENÍ DOBY ROZPTYLU NAD KOMUNIKACEMI

Při pohybu vozidel po komunikaci dochází k současnému působení mnoha faktorů, které ovlivňují rozptyl znečišťujících látek od tohoto typu zdroje. Základními jsou vlastní rychlost vozidla a nabíhající proudění. Především za projíždějícím vozidlem se vytváří oblast turbulence. Všechny tyto vlivy mají za následek jednak poměrně dobré promíchávání vzduchu nad komunikací a jednak určité „zdržení“ vzduchových částic v oblasti silnice.

Vznik oblasti s relativně homogenními koncentracemi je v modelech parametrizován pomocí počátečních hodnot rozptylu (viz též kapitola 5). Zmiňované „zdržení“ vzduchové částice nad silnicí má vliv především na stupeň konverze NO na NO<sub>2</sub> v okamžiku, kdy vzduchová částice opouští oblast komunikace. Vozidla se spalovacími motory emitují do ovzduší, mimo jiné, i oxidy dusíku. Ty představují směs oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO<sub>2</sub>), přičemž podíl NO<sub>2</sub> na celkových emisích z dopravy se pohybuje dle složení dopravního proudu v rozmezí do 30% z celkových emisí NO<sub>x</sub>. NO relativně rychle konvertuje na NO<sub>2</sub>. Pokud tedy nezohledníme v modelech zmiňované „zdržení“ vzduchových částic nad komunikací, dochází k podhodnocení koncentrací NO<sub>2</sub> v blízkosti komunikace. (Ve větších vzdálenostech od zdroje je již ustavena rovnováha mezi koncentrací NO a NO<sub>2</sub>, takže toto opomenutí je zanedbatelné.)

Úplné vyhodnocení procesů, ke kterým dochází při průjezdu vozidel, vyžaduje detailní znalost geometrie a rychlosti jednotlivých projíždějících vozidel, včetně hustoty dopravního proudu, geometrie vozovky a okamžitých rychlostí a směrů nabíhajícího proudění. Této problematice se věnuje aerodynamika, jakožto obor fyziky specializovaný na zkoumání obtékání tekutin okolo těles. Takto komplexní vyhodnocení daleko přesahuje rámec modelů určených pro zpracování rozptylových studií. V modelu zohledníme alespoň vliv nenulové rychlosti dopravního proudu.

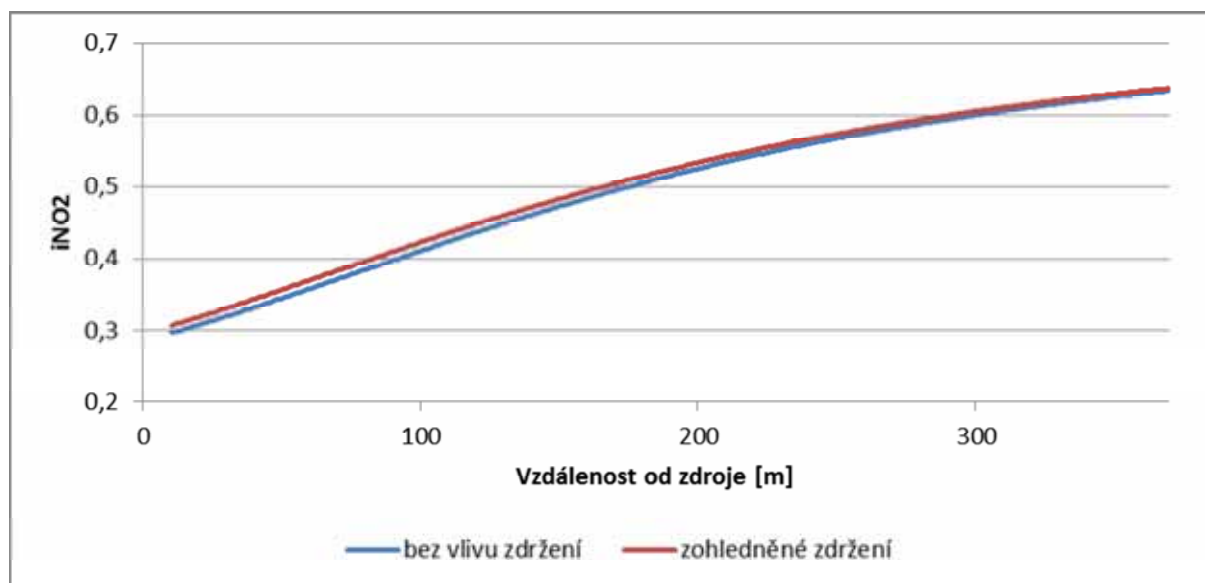
Předpokládejme, že vzduchová částice je ovlivňována pouze dvěma faktory: jednak rychlostí nabíhajícího proudění a jednak rychlostí projíždějících vozidel. Je tedy unášena napříč komunikací (samozřejmě mimo případů s prouděním rovnoběžným s komunikací) a jednak rovnoběžně se směrem projíždějících vozidel. Dobu, po kterou se vzduchová částice „zdrží“ v oblasti komunikace můžeme tedy v prvním přiblížení parametrizovat jako dobu, za kterou by byla sledovaná vzduchová částice přenesena nabíhajícím prouděním napříč komunikací. Tento přístup je ve shodě s experimenty, ze kterých vyplývá, že doba „zdržení“ vzduchové částice nad komunikací je v řádu sekund.

$$\tau = u_k' \cdot d \qquad u_k' = \max(1, u_k)$$

kde je:

- $u_k$  – složka rychlosti kolmá na komunikaci [m.s<sup>-1</sup>]
- $d$  – šířka komunikace [m]

Obr. 7. Vliv „zdržení“ vzduchové částice v oblasti komunikace ( $iNO_2$  je poměr mezi  $NO_2/NO_x$  v imisích)



## 8. SEZNAM PŘEDCHOZÍCH PUBLIKACÍ

- [1] Karel, J. a kol.: Projekt TA ČR č. TD020342 Rozvoj metodiky pro modelování rozptylu znečišťujících látek v atmosféře – Průběžná zpráva za rok 2014. Praha, 2015.
- [2] Macoun, J., Karel J.: Výpočet rozptylu znečištění od specifických dopravních zdrojů emisí pomocí modelu gaussovského typu – aktualizace metodiky ATEM. Dopravní inženýrství 2/2015, Plzeň 2015

## 9. LITERATURA

---

- [1] Ministerstvo lesního a vodního hospodářství: Výpočet znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů zdrojů. Praha, 1979.
- [2] Brechler, J.: Gaussovský disperzní model šíření znečišťujících příměsí v atmosféře. Habilitační práce, MFF UK Praha, 1998.
- [3] Imisní model ATEM, Metodická příručka, ATEM – Ateliér ekologických modelů, Praha, listopad 2005
- [4] Model ATEM, verze 1.0, Uživatelská příručka, ATEM – Ateliér ekologických modelů, Praha, listopad 2005
- [5] AERMOD: Description of model formulation, US EPA, EPA-454/R-03-004, Research Triangle Park, North Carolina, září 2004
- [6] Maňák, J., Bubník, J., Keder, J., Macoun, J.: SYMOS'97 Systém modelování stacionárních zdrojů. ČHMÚ, Praha 1997
- [7] CALINE4 – A Dispersion model For Predicting Air Pollutant Concentrations Near Roadways, Final Report, November 1984, revised June 1989, State of California, Department of transportation, Division of new technology and research
- [8] Air Quality in and Around Traffic Tunnels, Final Report 2008, National Health and Medical Research Council, ISBN 1864963573
- [9] Šulc Jan, Řízení ventilace tunelu Blanka, diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Praha, 2012
- [10] Bednář J., Brechler, J., Bubník J., Keder J., Macoun J., Píša V.: Kompendium ochrany kvality ovzduší. Část 6: Modelování přenosu a rozptylu znečišťujících příměsí v atmosféře. Gaussovské rozptylové modely. Ochrana ovzduší 1/2006
- [11] Dietmar Oettl, Peter Johann Sturm, Michael Bacher, Gerhard Pretterhofer, Raimund Alfons Almbauer, A simple model for the dispersion of pollutants from a road tunnel portal, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, Inffeldgasse 25, 8010 Graz, Austria
- [12] Eskridge R. E., Rao T., Measurement and Prediction of Traffic-Induced Turbulence and Velocity Fields Near Roadways, American Meteorological Society, srpen 1983
- [13] Berkowicz R., Hertel O., Modelling traffic pollution in streets, Ministry of Environment and Energy, Denmark, leden 1997