

ČESKÝ
HYDROMETEOROLOGICKÝ
ÚSTAV

Metodika SYMOS

Principy a fungování metodiky SYMOS '97

Mgr. Ondřej Vlček, OME ČHMÚ

Prezentace byla aktualizována 24. 7. 2017





Základní princip

Suttonova verze Gaussovského rozptylového modelu.

Vychází se z předpokladu, že pro časový úsek, během něhož počítáme krátkodobé koncentrace, jsou neměnné:

1. Parametry zdroje (výstupní teplota, rychlost, objem a emise) - *tyto parametry se zpravidla uvažují konstantní i během celého výpočtu*
2. Střední rychlost a směr proudění po celé délce trajektorie
3. Ve směru proudění převládá transport nad rozptylem

Při výpočtu se uvažuje úplný odraz vlečky od zemského povrchu

Dle vyhlášky použitelný do 100 km od zdroje, nicméně vzhledem k výše uvedeným omezením lze doporučit spíše vzdálenosti do 50 km a i u nich je třeba ověřit splnění uvedených předpokladů.

V textu je odkazováno na aktualizaci metodiky SYMOS zveřejněnou ve Věstníku MŽP č. 2013/11.





Na následujících slidech bude vysvětlen význam jednotlivých členů rovnice pro výpočet koncentrací plyných látek a suspendovaných částic PM₁₀ a PM_{2,5}, u nichž zanedbáváme pádovou rychlost.

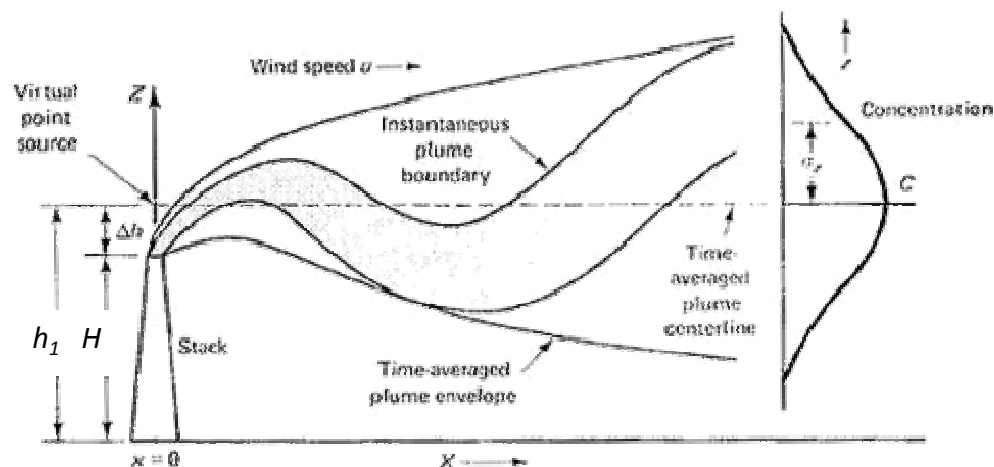
Tato rovnice má následující tvar (rovnice 3.1 v metodice Symos):

$$c = \frac{M_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h_1} + V_s} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-k_u \cdot \frac{x_L}{u_{h_1}}\right) \cdot K_h \cdot$$
$$\cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{J}) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \mathcal{J} \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$


Základní princip

U koncentrací předpokládá s rostoucí vzdáleností od osy vlečky Gaussovský profil ve vertikálním i horizontálním směru kolmém na směr proudění:

$$c = \frac{M_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h_1} + V_S} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(z - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$



H stavební výška komína

Δh ... vznos vlečky

$h_1 = H + \Delta h$... **efektivní výška zdroje**

$z = z_r - z_z$... výška referenčního bodu r nad patou komína zdroje z

σ_y, σ_z ... rozptylové parametry

u ... rychlost proudění

M_z ... emise

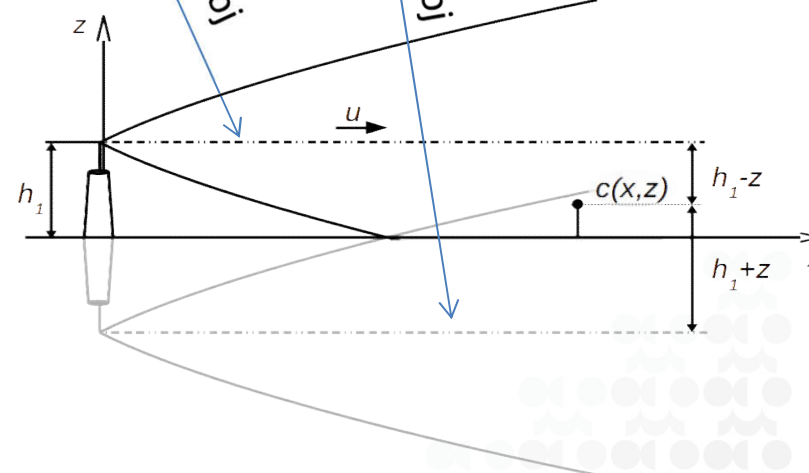
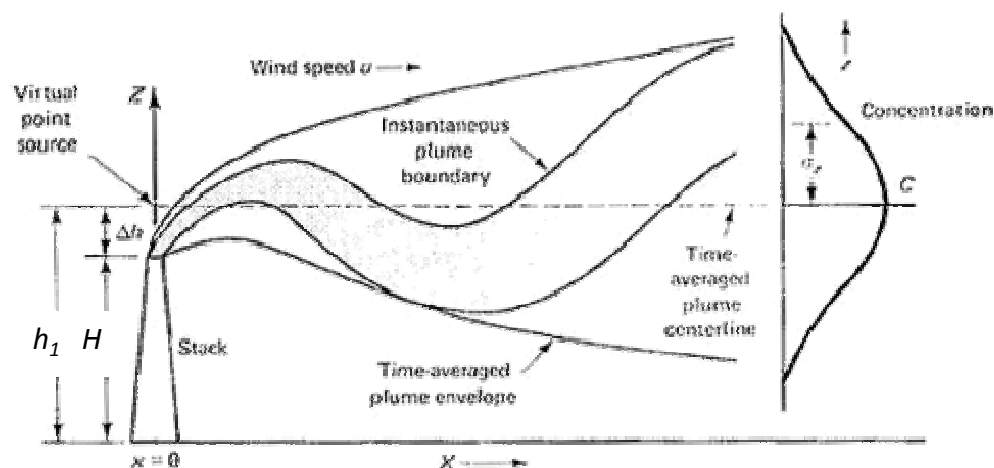
V_S ... objemový tok spalin

$2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u + V_S$... objem, do jakého se rozptýlí počáteční emise ve vzdálenosti x_L od zdroje

Základní princip

Metodika SYMOS počítá s úplným odraze vlečky od zemského povrchu:

$$c = \frac{M_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h_1} + V_S} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$



Korekce na složitý terén

$$c \sim \frac{M_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h1} + V_s} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2\sigma_y^2}\right).$$

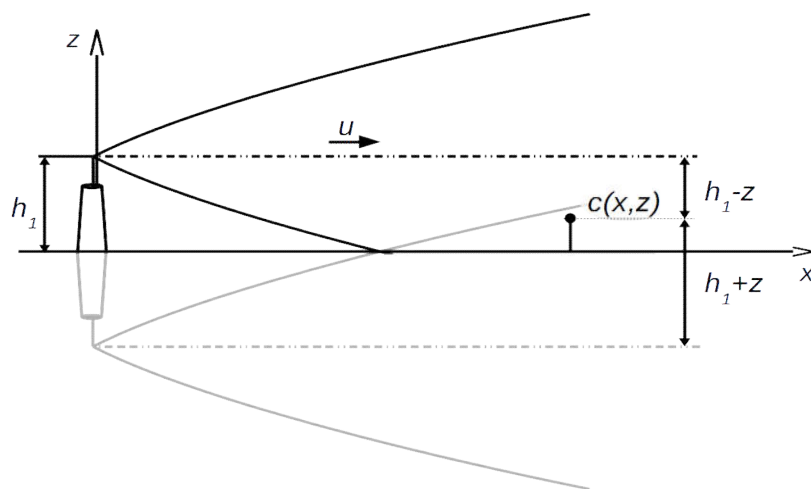
$$\cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \mathcal{G} \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Význam není zřejmý na první pohled. Vztah je dán postupným vývojem metodiky od 70. let, kdy se v závislosti na tvaru terénu mezi zdrojem a referenčním bodem stanovovala koncentrace subjektivně v rozmezí dolního (c_D) a horního (c_H) odhadu. Dolní odhad přitom počítal s odrazem od roviny ve výšce paty komína a horní odhad s odrazem od roviny ve výšce referenčního bodu:

Korekce na složitý terén

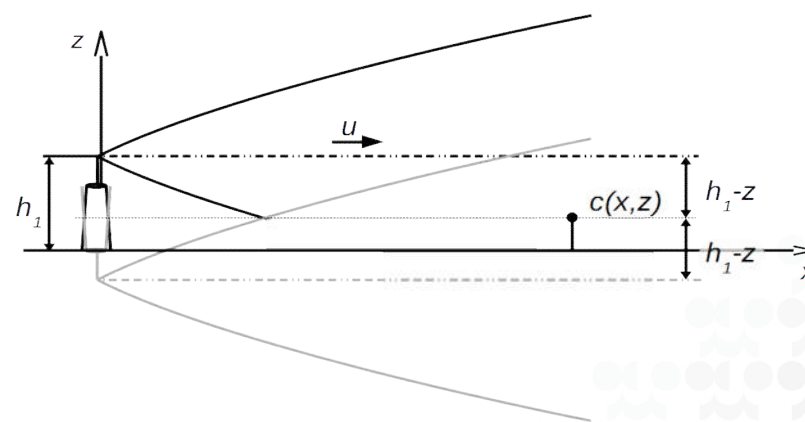
Dolního odhad koncentrací (c_D) -
odraz od roviny procházející patou
komína:

$$c_D \sim \left[\exp\left(-\frac{(z-h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$



Horní odhad koncentrací (c_H) -
odraz od roviny procházející
referenčním bodem:

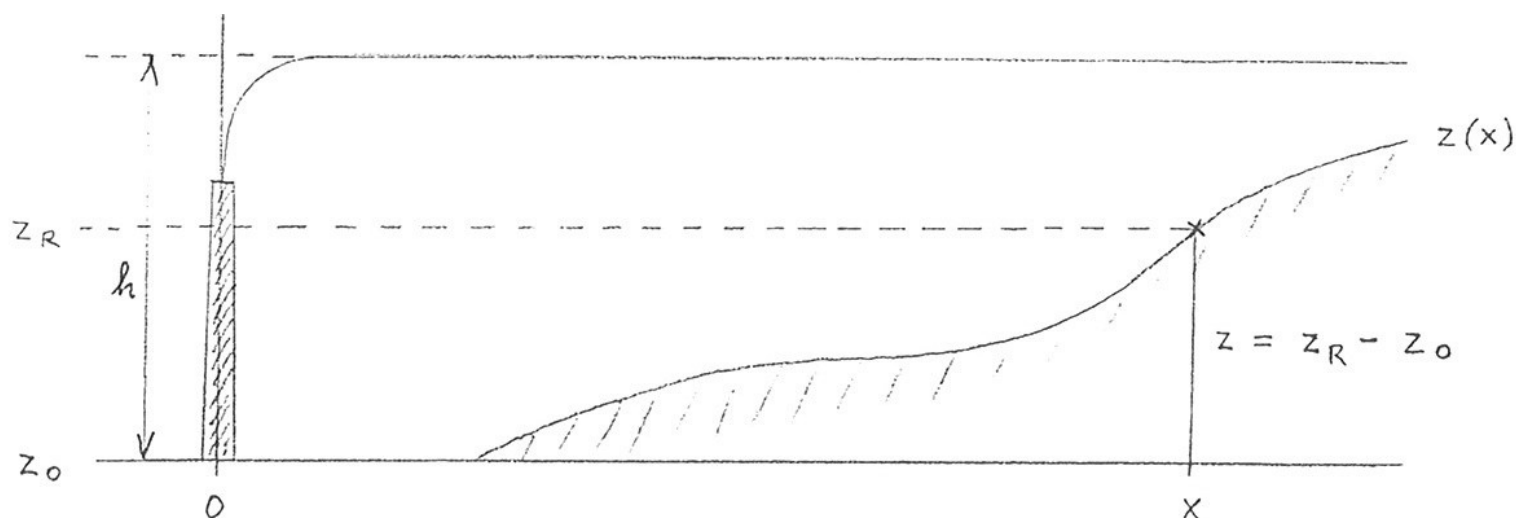
$$c_H \sim 2 \cdot \exp\left(-\frac{(z-h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$



Korekce na složitý terén

Byl proto navržen objektivní odhad výpočtu koncentrace:

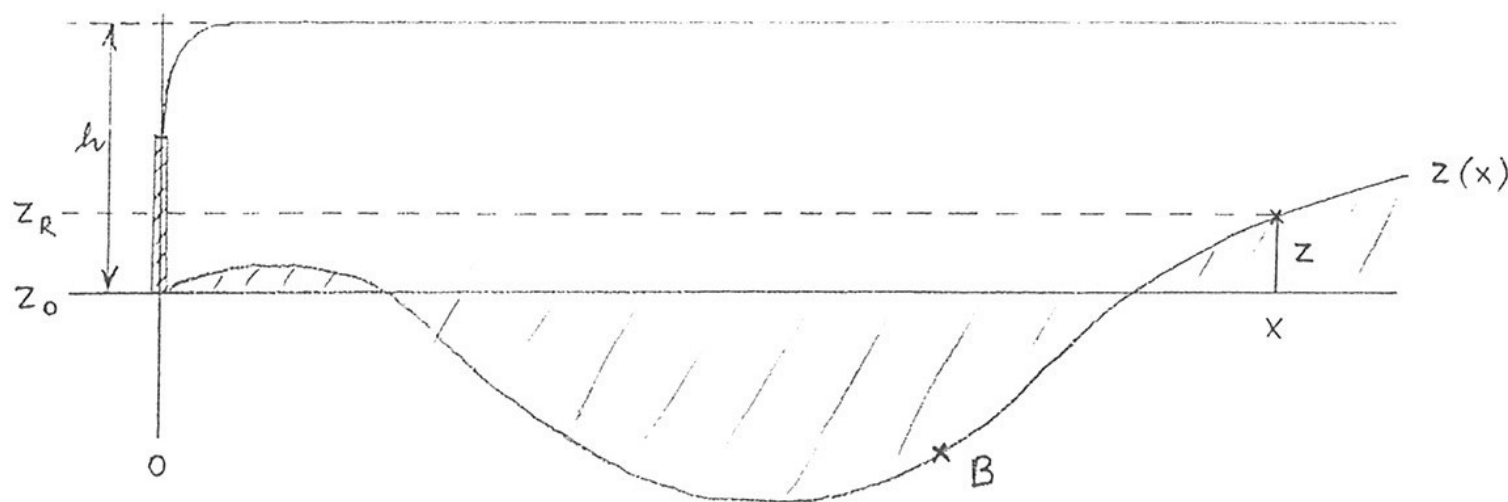
$$c \sim [(1 - \mathcal{G}) \cdot c_D + \mathcal{G} \cdot c_H]$$



$$\mathcal{G} = \frac{1}{x \cdot (z_R - z_0)} \cdot \int_0^x (z(x') - z_0) \cdot dx'$$

Korekce na složitý terén

Aby ϑ nenabývalo záporných hodnot, počítá se integrál pouze z plochy nad rovinou procházející patou komína:

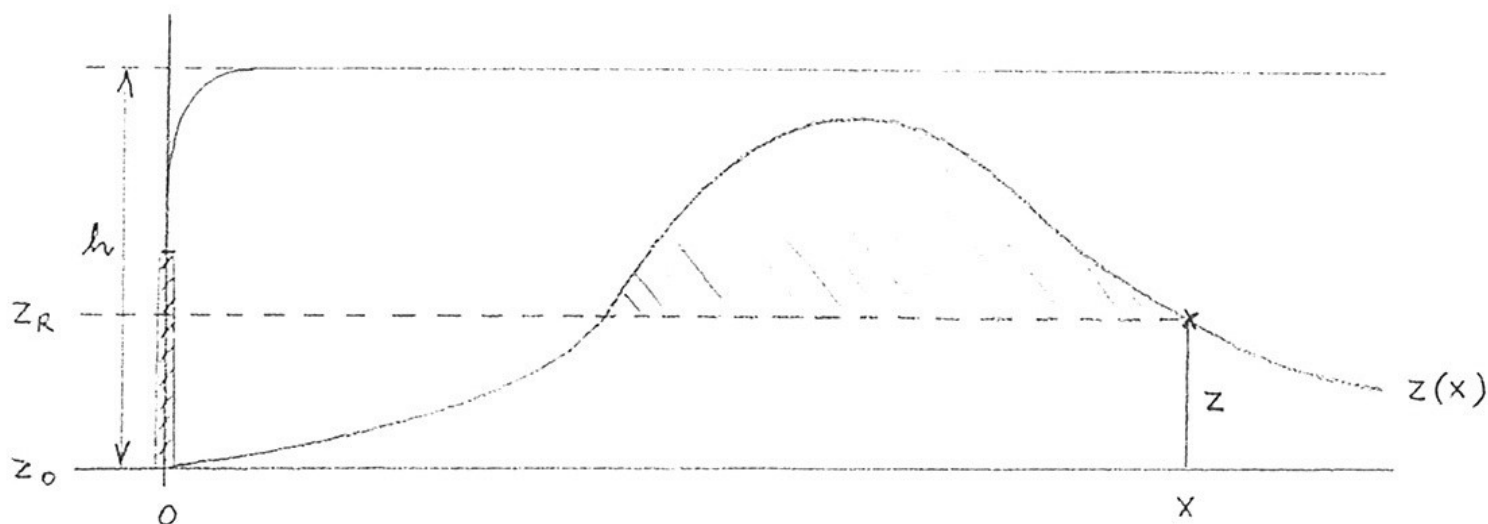


$$\left| \begin{array}{ll} z_1(x') = z(x') - z_z & z(x') > z_z \\ = 0 & z(x') \leq z_z \end{array} \right.$$

$$\vartheta = \frac{1}{x \cdot (z_r - z_z)} \cdot \int_0^x z_1(x') dx'$$

Korekce na složitý terén

Aby se zamezilo, že bude $\vartheta > 1$, a naopak postihlo, že vliv zdroje za kopcem je zeslaben, počítá se do integrálu pouze plocha mezi patou komína a referenčním bodem a ještě se od ní odečte plocha ležící nad rovinou procházející referenčním bodem:



$$\left| \begin{array}{ll} z_2(x') = z(x') - z_r & z(x') > z_r \\ = 0 & z(x') \leq z_r \end{array} \right. \quad \mathcal{G} = \frac{1}{x \cdot (z_r - z_z)} \cdot \int_0^x z_1(x') - 2 \cdot z_2(x') dx'$$

Korekce na složitý terén

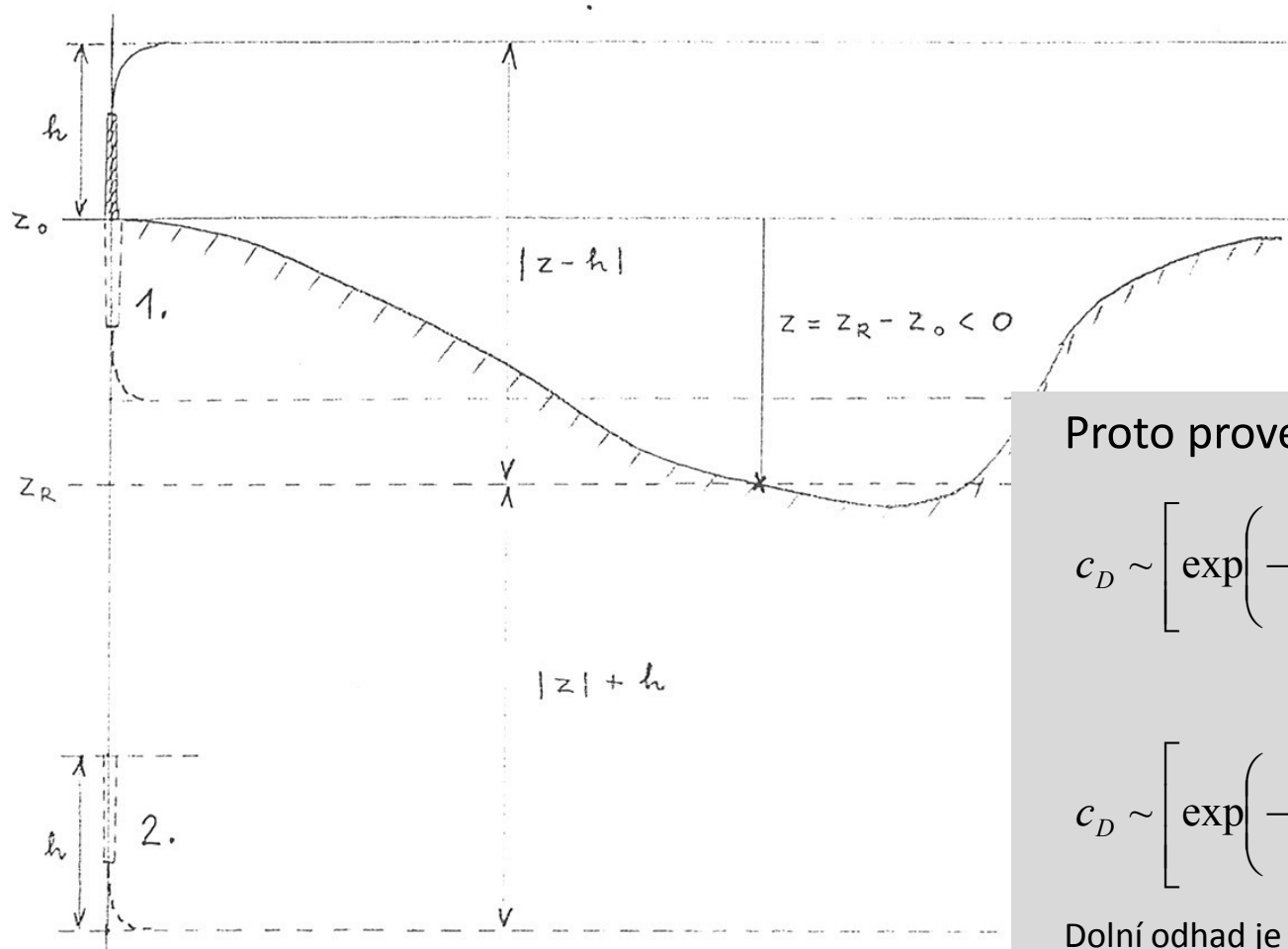
Na ϑ je kladen požadavek, aby bylo nezáporné a pokud leží referenční bod v nižší nadmořské výšce, než zdroj ($z_r \leq z_z$), předpokládá se platnost dolního odhadu ($\vartheta = 0$). Výsledný vztah pro ϑ tedy je:

$$\vartheta = \max \left(0, \frac{1}{x \cdot (z_r - z_z)} \cdot \int_0^x (z_1(x') - 2 \cdot z_2(x')) \cdot dx' \right) \quad \begin{array}{l} z_r > z_z \\ z_r \leq z_z \end{array}$$

$$\left| \begin{array}{ll} z_1(x') = z(x') - z_z & z(x') > z_z \\ = 0 & z(x') \leq z_z \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{ll} z_2(x') = z(x') - z_r & z(x') > z_r \\ = 0 & z(x') \leq z_r \end{array} \right|$$

Úprava dolního odhadu koncentrací

Leží-li referenční bod níže, než pata komína, tj. $z = z_r - z_z < 0$, docházelo by pro $|z| \approx h_1$ k nereálnému ovlivňování referenčního bodu fiktivním zdrojem:



Proto provedeme následující úpravu:

$$c_D \sim \left[\exp\left(-\frac{(z-h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$



$$c_D \sim \left[\exp\left(-\frac{(z-h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(|z|+h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Dolní odhad je v tomto případě roven hornímu.

Korekce na složitý terén

Kombinací upraveného dolního odhadu a horního odhadu koncentrací získáme vztah pro **přízemní imisní koncentraci plynné znečišťující látky** :

$$\begin{aligned} c &\sim (1 - \mathcal{G}) \cdot c_D + \mathcal{G} \cdot c_H = \\ &= (1 - \mathcal{G}) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(|z| + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] + \mathcal{G} \cdot 2 \cdot \exp\left(-\frac{(z - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) = \\ &= (1 + \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(z - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(|z| + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \end{aligned}$$

(rovnice 3.5 v metodice Symos)

Výpočet ve výšce l nad povrchem

Chceme-li počítat koncentraci ve výšce l nad povrchem a referenční bod leží níže, než osa vlečky ($z + l \leq h_1$), pak je třeba u členů představujících **přímý rozptyl** vertikální vzdálenost od osy snížit (bod se k ose přibližuje) a u **odrazových členů** zvětšit (bod se od osy oddaluje):

$$\begin{aligned}
 c \sim & (1 - \mathcal{G}) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z + l - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(|z| + l + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] + \mathcal{G} \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z + l - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z - l - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] = \\
 & = \exp\left(-\frac{(z + l - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(|z| + l + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \mathcal{G} \cdot \exp\left(-\frac{(z - l - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right)
 \end{aligned}$$

Získáváme tak význam korigovaných vertikálních souřadnic z' , z'' , z''' referenčního bodu, jak jsou uvedeny v kapitole 3.2.1.2:

$$z + l \leq h_1$$

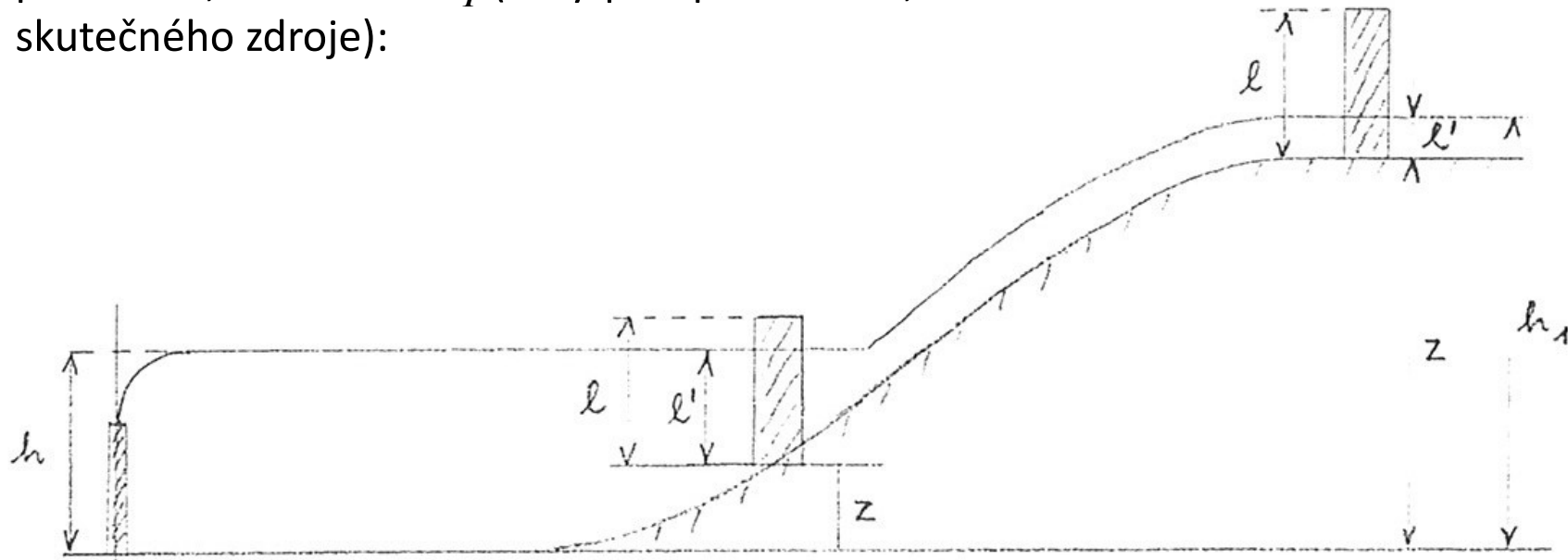
$$z' = z + l \quad \dots \text{přímý rozptyl}$$

$$z'' = |z| + l \quad \dots \text{odraz v dolním odhadu}$$

$$z''' = z - l \quad \dots \text{odraz v horním odhadu}$$

Výpočet ve výšce l nad povrchem

Platí-li $z + l > h_1$, pak **předpokládáme** takovou výšku l' referenčního bodu nad povrchem, že $z + l' = h_1$ (tedy předpokládáme, že referenční bod leží v ose vlečky skutečného zdroje):



$$z + l \leq h_1$$

$$z' = z + l$$

$$z'' = |z| + l$$

$$z''' = z - l$$

$$\xrightarrow{l' = h_1 - z}$$

$$z + l > h_1$$

$$z' = h_1$$

$$z'' = |z| - z + h_1$$

$$z''' = 2 \cdot z - h_1$$

Část rovnice popisující rozptyl plynných látek

$$c \sim \frac{M_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h_1} + V_s} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \mathcal{G} \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

přímý rozptyl odraz v dolním odhadu odraz v horním odhadu

Odstraňování látek z atmosféry

Suchá a mokrá depozice a chemická přeměna je parametrizována následovně:

$$c \sim \frac{M_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h_1} + V_s} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-k_u \frac{x_L}{u_{h_1}}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \mathcal{G} \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Třída látky	Látka	Doba setrvání	k_u [s ⁻¹]
I	sirovodík, chlorovodík peroxid vodíku, dimetyl sulfid	20 hodin	$1,39 \cdot 10^{-5}$
II	oxid siřičitý, oxid dusnatý, oxid dusičitý, amoniak, sirouhlík, formaldehyd PM ₁₀ , PM _{2,5}	6 dní	$1,93 \cdot 10^{-6}$
III	oxid dusný, oxid uhelnatý oxid uhličitý, metan, vyšší uhlovodíky, metyl chlorid, karbonyl sulfid	2 roky	$1,59 \cdot 10^{-8}$

Tj. po uplynutí doby setrvání zůstane v ovzduší $1/e = 37$ % původního množství.

Odstraňování látek z atmosféry

Neboli:

doba setrvání	třídí rychlost [m·s ⁻¹]	kam by docestovaly za dobu setrvání [km]	Kolik % látky zůstane po uražení	
			50 km	100 km
20 hodin	1,7	122	66,4	44,1
	11	792	93,9	88,1
6 dní	1,7	881	94,5	89,3
	11	5 702	99,1	98,3
2 roky	1,7	107 222	100,0	99,9
	11	693 792	100,0	100,0

Zeslabení vlivu nízkých zdrojů na znečištění ovzduší na horách

$$c = \frac{M_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h_1} + V_s} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-k_u \frac{x_L}{u_{h_1}}\right) \cdot K_h \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \mathcal{G} \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

$$K_h = 1 - [F'(z_z + h_1) - F'(z_r)]$$

$F'(z) \sim$ pravděpodobnosti, že se mezi nadmořskou výškou z a hladinou 850 hPa vyskytne inverze

$F'(z_z + h_1) - F'(z_r) \sim$ pravděpodobnosti, že se mezi osou vlečky a referenčním bodem vyskytne inverze

$K_h = 1$ pokud leží referenční bod pod osou vlečky

Výsledná rovnice pro plynné látky

$$c = \frac{M_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h_1} + V_s} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-k_u \cdot \frac{x_L}{u_{h_1}}\right) \cdot K_h \cdot$$
$$\cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \mathcal{G} \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$



Rovnice pro hrubé prachové částice

U velkých prachových částic se uvažuje klesání osy vlečky o h_{gi} v důsledku nezanedbatelné sedimentační rychlosti v_{gi} . Jiný způsob odstraňování metodika neuvažuje:

$$h_{gi} = \frac{x_L \cdot v_{gi}}{u_{h_1}}$$

~~$$\exp\left(-k_u \cdot \frac{x_L}{u_{h_1}}\right)$$~~

Efektivní výšku v členu pro přímý rozptyl je třeba snížit o h_{gi} , u členů popisujících odraz pak naopak o h_{gi} zvýšit. Základní rovnice má pak tvar:

$$c = \frac{10^6 \cdot M}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{h_1} + V_s} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot K_h \cdot$$

$$\cdot \sum_{i=1}^{r_c} \frac{\alpha_{pi}}{100} \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - (h_1 - h_{gi}))^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1 + h_{gi})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \mathcal{G} \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - (h_1 + h_{gi}))^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Index i odpovídá třídě velikosti prachových částic. α_{pi} je pak procentuální zastoupení částic této velikosti.

Rovnice pro hrubé prachové částice

Sedimentační rychlost se určí následovně:

$$v_{gi} = -\frac{3 \cdot \pi \cdot \nu}{2 \cdot C_3 \cdot d_i} + \sqrt{\left(\frac{3 \cdot \pi \cdot \nu}{2 \cdot C_3 \cdot d_i}\right)^2 + \frac{C_2 \cdot \rho_c \cdot g \cdot d_i}{C_3 \cdot \rho}}$$

d_i ... aerodynamický průměr prašné částice v i-té frakci [m]

ρ_c ... hustota prašných částic [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

$\rho = 1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$... hustota vzduchu

$\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$... kinematická viskozita vzduchu

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$... tíhové zrychlení

$C_2 = 0,8$... konstanta určující poměr mezi objemem částice a jejím charakteristickým rozměrem

$C_3 = 0,6$... součinitel odporu tření

Při výpočtu koncentrací PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ však sedimentační rychlost zanedbáváme a postupujeme jako u plynných látek II. třídy.

Efektivní výška zdroje

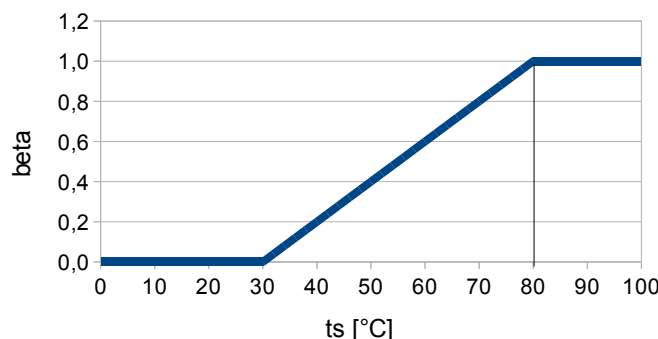
Efektivní výška h je rovna součtu stavební výšky komína H a vznosu vlečky Δh .

- Δh je nepřímo úměrné rychlosti proudění ve výšce koruny komína

$$\Delta h = (1 - \beta) \frac{1.5 \cdot w_o \cdot d}{u_H} + \beta \frac{K_s \cdot A \cdot Q^B}{u_H}$$

Vznos dynamický a tepelný

- Pro zdroje s teplotou t_s pod 30 °C se uvažuje pouze dynamický člen, u zdrojů s teplotou nad 80 °C pouze tepelný vznos. V ostatních případech se oba lineárně kombinují pomocí váhy β :



Efektivní výška zdroje

Předpokládá se, že maximálního vznosu je dosaženo až v určité vzdálenosti od zdroje a do té doby se efektivní výška mění úměrně $x^{2/3}$, kde x je vzdálenost od zdroje:

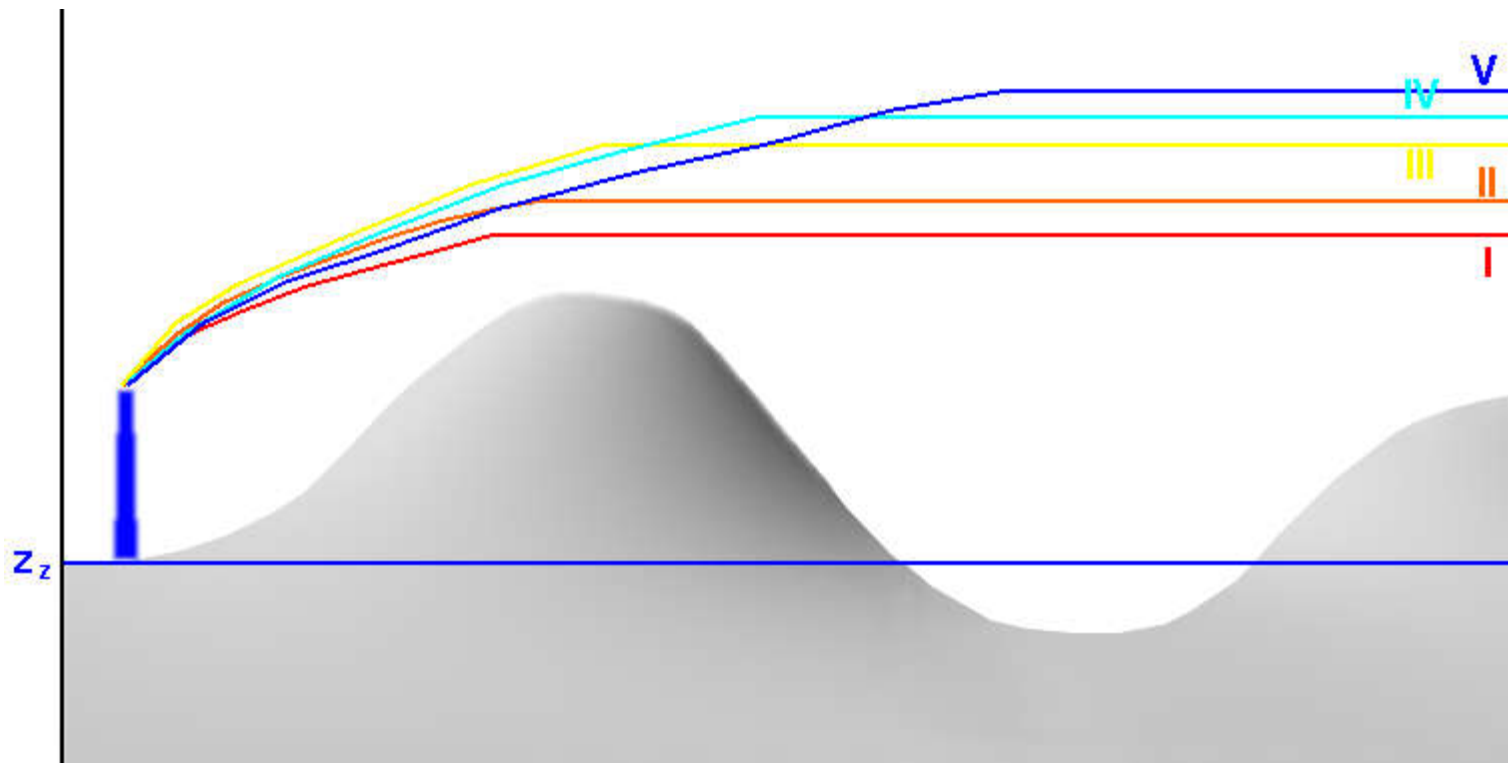
$$\Delta h = \Delta h_{\max} = (1 - \beta) \frac{1.5 \cdot w_o \cdot d}{u_H} + \beta \frac{K_s \cdot A \cdot Q^B}{u_H} \quad x \geq K_m \cdot \sqrt{Q}$$

$$\Delta h = \Delta h(x) = \left((1 - \beta) \frac{1.5 \cdot w_o \cdot d}{u_H} + \beta \frac{K_s \cdot A \cdot Q^B}{u_H} \right) \cdot \left(\frac{x}{K_m \cdot \sqrt{Q}} \right)^{2/3} \quad x < K_m \cdot \sqrt{Q}$$

w_o	je výstupní rychlost exhalací [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
d	je vnitřní průměr koruny komína, resp. výduchu [m],
Q	je tepelná vydatnost [MW]
u_H	je rychlost větru ve výšce koruny komína, resp. výduchu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
K_s	je korekční koeficient a je definován vztahem $K_s = 1 + 0,2 \cdot \gamma$, kde γ je vertikální teplotní gradient
K_m	závisí na stabilitě

Efektivní výška zdroje

Koeficienty K_s a K_m závisí na stabilitě. Čím je zvrstvení méně stabilní, tím je větší výsledné převýšení vlečky a také vzdálenost, ve které je dosaženo:



Efektivní výška zdroje

Korekce na terén: Metodika předpokládá, že u svahů vyšších, než efektivní výška zdroje, kopíruje vlečka terén a na závětrné straně již neklesá (což odpovídá závětrnému útlumu). Výslednou efektivní výšku označíme h_1 :

$$h_1 = z_m + \varepsilon \cdot h \quad z_m + \varepsilon \cdot h > h$$

$$h_1 = h \quad z_m + \varepsilon \cdot h \leq h$$

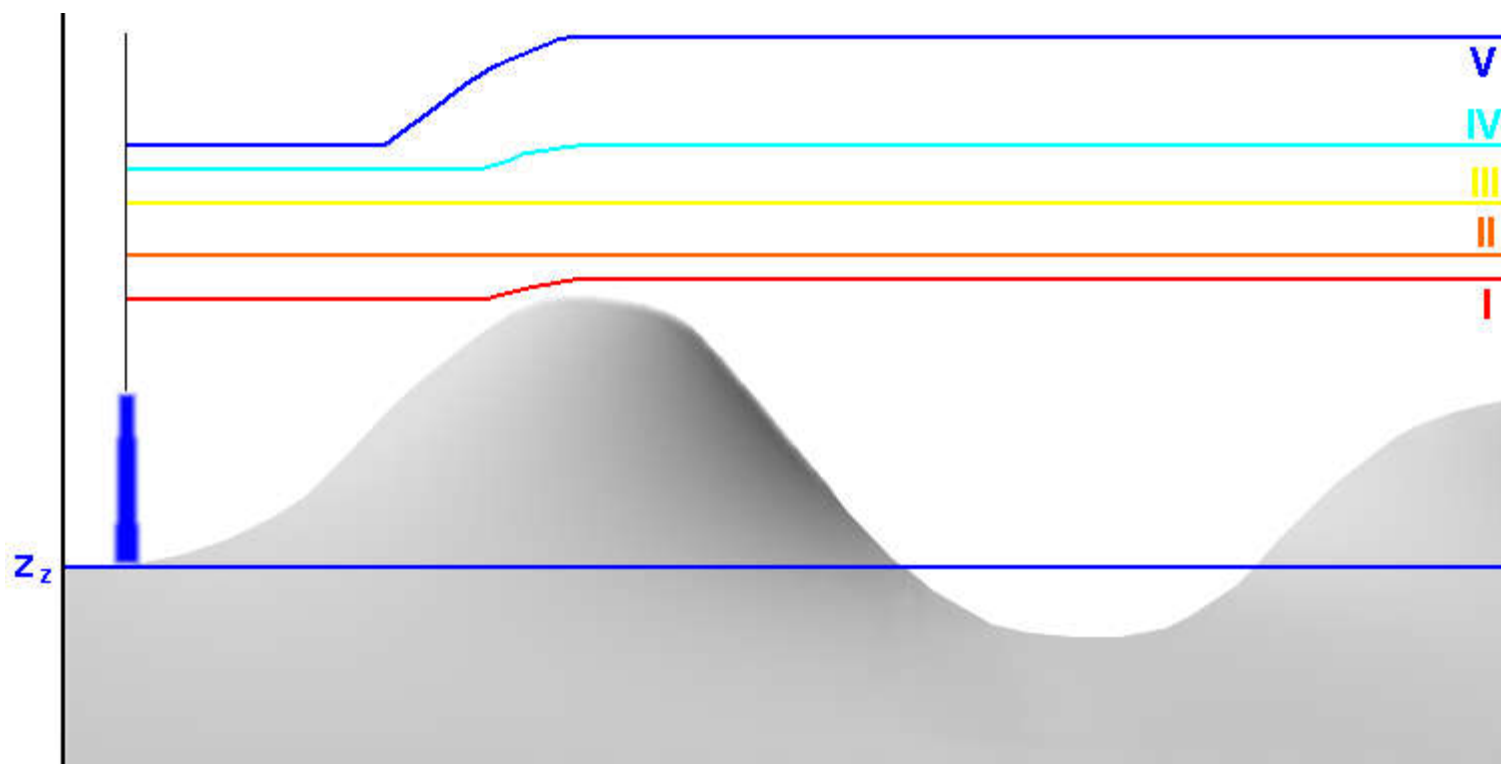
z_m ... je maximální výška terénu nad patou komína mezi zdrojem a referenčním bodem.

ε závisí na stabilitě.



Efektivní výška zdroje

Vlečka kopíruje terén tím těsněji, čím je větší stabilita:



Efektivní výška – více blízkých zdrojů

Metodika zohledňuje případy, kdy se dva nebo více komínů vyskytují blízko sebe tak, že jejich kouřové vlečky se mohou navzájem ovlivňovat a celkové převýšení vleček vzrůstá.

Vlečky z komínů se budou navzájem ovlivňovat za předpokladu současného splnění následujících dvou podmínek:

1. $\Delta x \leq 1.5 \cdot \overline{H}$ nebo $L_g \leq 1.5 \cdot \overline{H}$
2. $0.5 \cdot \overline{H} \leq H_i \leq 1.5 \cdot \overline{H}$

$\overline{H}$... tepelnou vydatností vážený aritmetický průměr stavební výšky

Δx ... průměrná vzdálenost komínů ve skupině

L_g ... maximální vzdálenost komínů ve skupině

Rozptylové koeficienty

Rozptylové parametry $\sigma_y = \sigma_y(x) + \sigma_{y0}$ a $\sigma_z = \sigma_z(x) + \sigma_{z0}$ popisují rozšiřování vlečky v závislosti na vzdálenosti x_L od zdroje ve směru větru:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + a_y \cdot x_L^{b_y}$$

$$\sigma_z = \sigma_{z0} + a_z \cdot x_L^{b_z}$$

Koeficienty ***a*** a ***b*** závisí na stabilitě atmosféry. a_y a a_z pro výpočet 8hodinových koncentrací asi 1,5x větší než pro výpočet hodinových koncentrací.

Pro bodové zdroje uvažujeme počáteční rozptylové parametry σ_{y0} a σ_{z0} za nulové.

Rozptylové koeficienty – plošné zdroje

Pro plošné a liniové zdroje se uvažuje nenulové počáteční rozptylový parametry σ_{y0} a σ_{z0} . U plošných zdrojů souvisí s jejich horizontálním rozměrem y_0 :

$$\sigma_{y0} = \frac{y_0}{\sqrt{2 \cdot \pi}}$$

$$\sigma_{z0} = a_z \cdot \left(\frac{y_0}{2} \right)^{b_z}$$



Rozptylové koeficienty – liniové zdroje

U liniových zdrojů souvisí σ_{y0} a σ_{z0} s šířkou silnice, délkou jejího elementu a výškou, do jaké se exhalace dostanou vlivem turbulence způsobené průjezdem aut:

$$\sigma_{y0} = \frac{y_{\zeta}}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \quad \sigma_{z0} = \frac{z_{\zeta}}{\sqrt{\pi / 2}}$$

$$y_{\zeta} = y_0 \cdot \sin \zeta + x_0 \cdot \cos \zeta$$

$$z_{\zeta} = z_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot a_z \cdot \left(\frac{x_{\zeta}}{2} \right)^{b_z} \quad x_{\zeta} = \min \left(\frac{x_0}{\sin \zeta}, \frac{y_0}{\cos \zeta} \right)$$

y_{ζ} ... průmět délky elementu liniového zdroje ve směru větru,

z_{ζ} ... výška, do které sahá přibližně rovnoměrná koncentrace znečišťující látky nad silnicí.

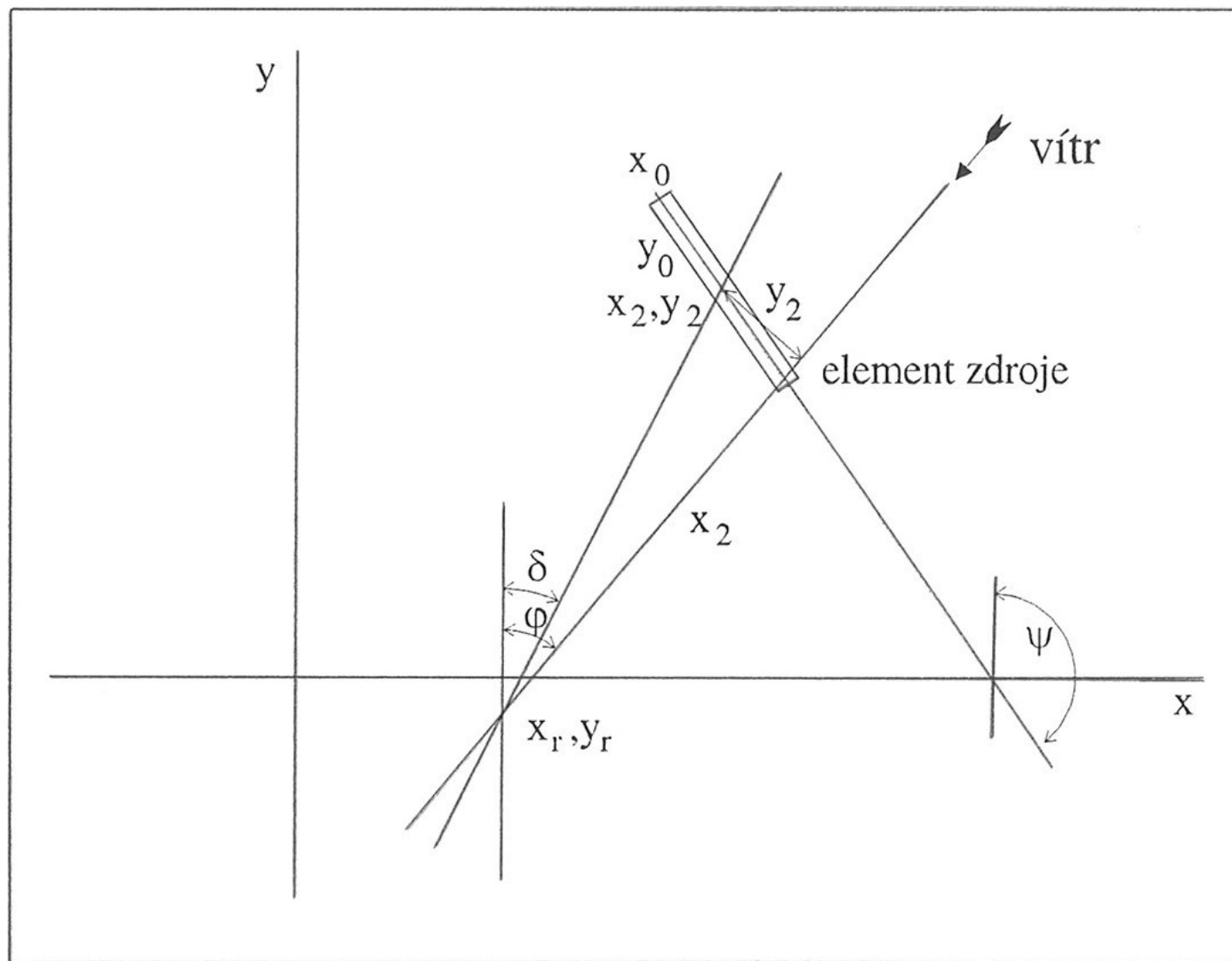
x_0 ... šířka silnice [m],

y_0 ... délka elementu [m],

z_0 ... výška, do které se přízemní exhalace dostanou vlivem turbulence způsobené průjezdem automobilů.

Pro úhel ζ platí vztahy (3.42) uvedené v metodice. Dovysvětlení viz obrázek na následujícím slidu.

Rozptylové koeficienty – liniové zdroje



Rozptylové koeficienty – liniové zdroje

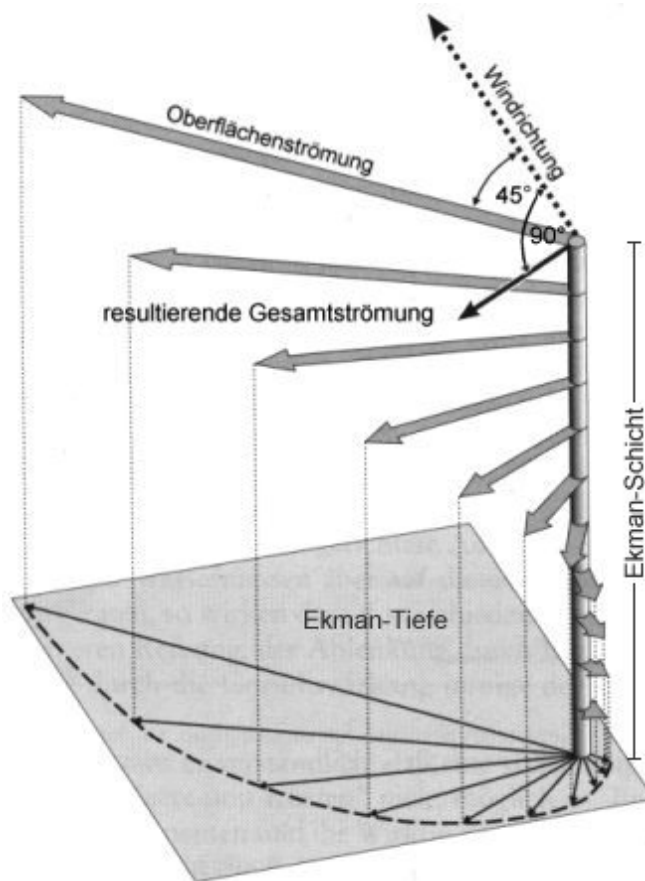
Velikost elementu y_0 nesmí být z důvodu stability výpočtu větší než nejvyšší možná hodnota y_0 uvedená v následující tabulce (tab. 3.6 metodiky Symos):

vzdálenost x_0' [m] nejbližšího referenčního bodu	nejvyšší možná hodnota y_0 [m]
do 100 m	$x_0'/3$
100 - 300 m	$x_0'/4$
300 - 900 m	$x_0'/5$
nad 900 m	$x_0'/6$



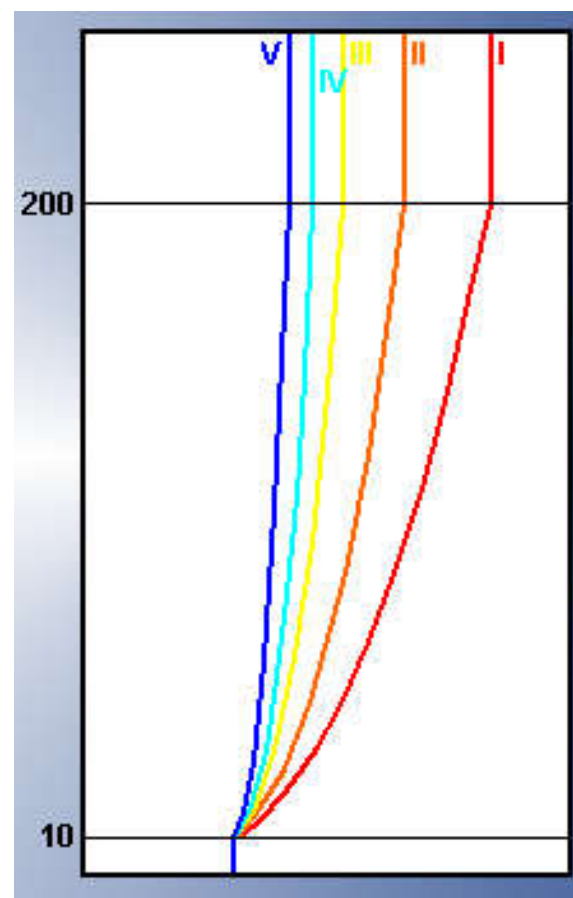
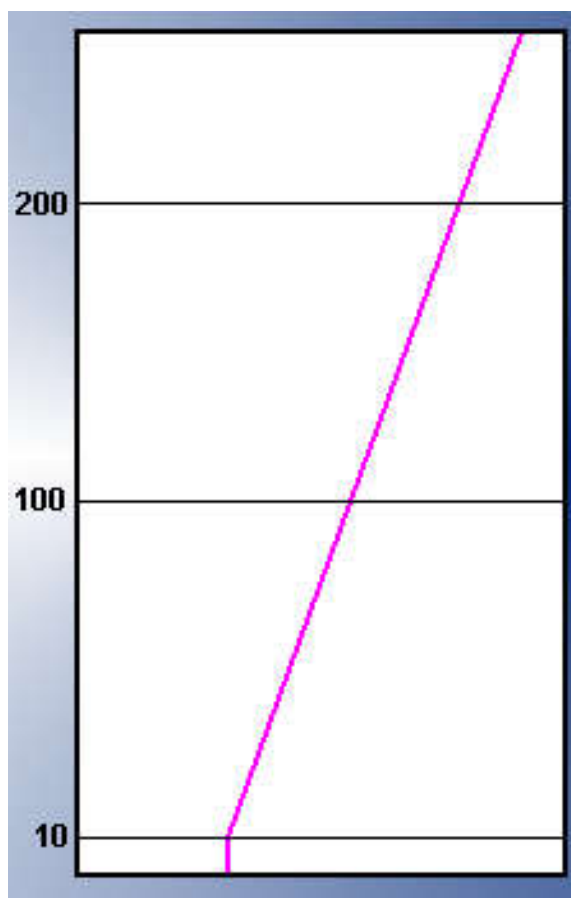
Změna větru s výškou

V důsledku poklesu třecí síly o zemský povrch s rostoucí výškou a vyrovnávání síly tlakového gradientu a Coriolisovy síly dochází k nárůstu rychlosti větru a k jeho stáčení po směru hodinových ručiček. Jev popisuje Ekmanova spirála:



Změna větru s výškou

Metodika Symos předpokládá stáčení větru o 4° na 100 m výšky. U rychlosti se mezi 10 a 200 m nad zemským povrchem předpokládá mocninný profil rychlosti. Přitom vítr roste s výškou výrazněji u stabilnějších tříd:



Vstupní data

Meteorologická data - stabilitně a rychlostně členěná větrná růžice

- Metodika SYMOS rozlišuje následující třídy stability podle Bubníka a Koldovského:

třída stability	vertikální teplotní gradient [°C na 100 m]	popis
I. superstabilní	$\gamma < -1,6$	silné inverze, velmi špatné rozptylové podmínky
II. stabilní	$-1,6 \leq \gamma < -0,7$	běžné inverze, špatné rozptylové podmínky
III. izotermní	$-0,7 \leq \gamma < 0,6$	slabé inverze, izotermie nebo malý kladný teplotní gradient, často se vyskytující mírně zhoršené rozptylové podmínky
IV. normální	$0,6 \leq \gamma \leq 0,8$	indiferentní teplotní zvrstvení, běžný případ dobrých rozptylových podmínek
V. konvektivní	$\gamma > 0,8$	labilní teplotní zvrstvení, rychlý rozptyl znečišťujících látek

Pozn.: vertikální teplotní gradient se definuje jako $-dT/dz \cdot 100$.

Vstupní data

Meteorologická data - stabilitně a rychlostně členěná větrná růžice

- Metodika SYMOS rozlišuje následující třídy rychlosti větru:

třída rychlosti větru	rozmezí rychlosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	třídní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
1. slabý vítr	od 0 do 2,5 včetně	1,7
2. mírný vítr	od 2,5 do 7,5 včetně	5,0
3. silný vítr	nad 7,5	11,0



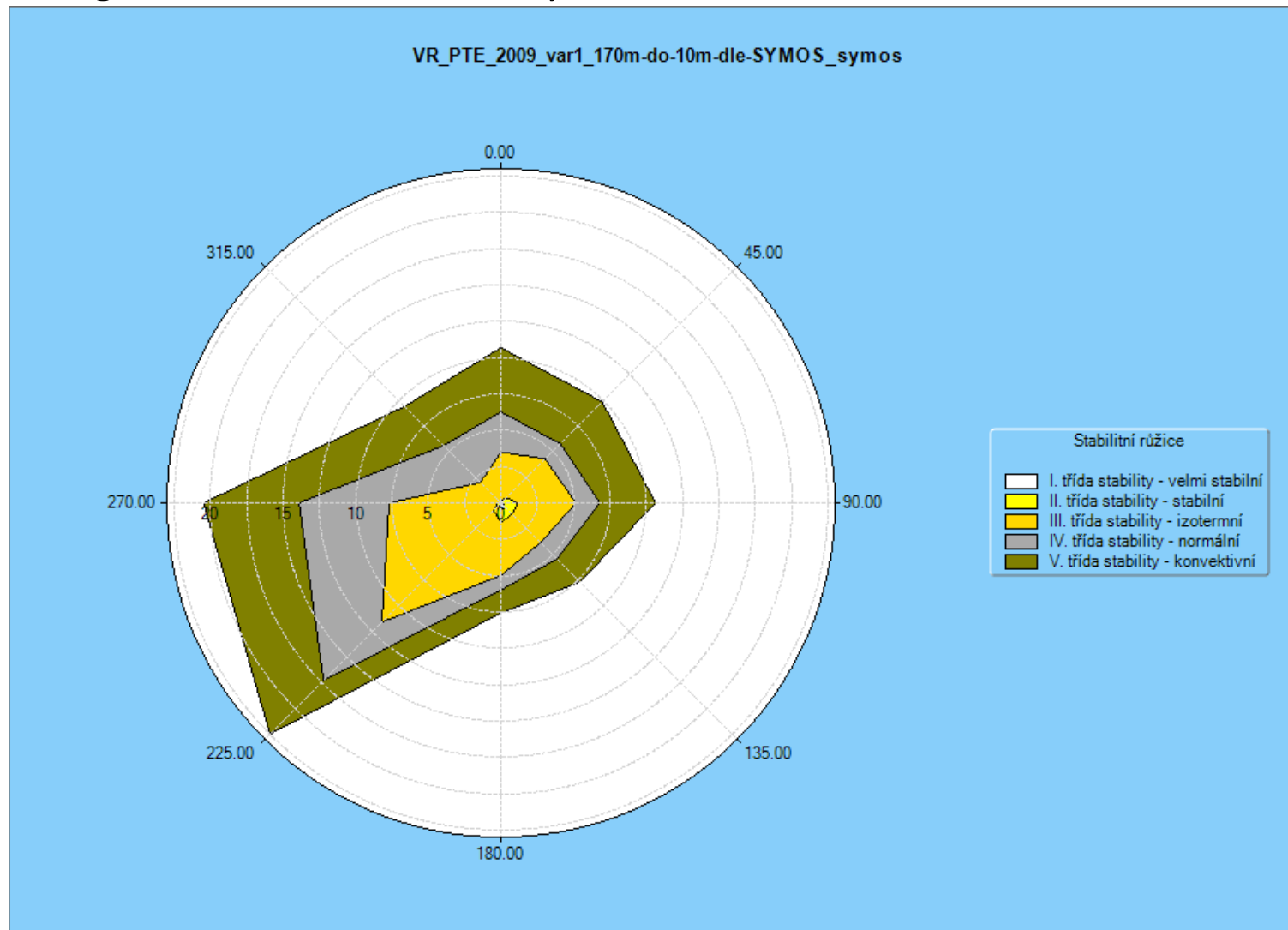
Vstupní data

Meteorologická data - stabilitně a rychlostně členěná větrná růžice

Hodnoty četnosti výskytu větru - větrná růžice [%]										
Směr větru:	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	CALM	Součet
I. třída stability - velmi stabilní										
1.70 m/s	0	0.1	0.11	0.45	0.47	0.16	0	0	0.18	1.47
5.00 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.00 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II. třída stability - stabilní										
1.70 m/s	0.13	0.4	0.95	0.57	0.58	0.25	0.11	0.08	0.13	3.2
5.00 m/s	0	0	0.11	0.06	0.29	0.31	0.09	0	0	0.86
11.00 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
III. třída stability - izotermní										
1.70 m/s	1.25	1.66	1.6	1.34	1.25	2.05	1.51	1.11	0.46	12.23
5.00 m/s	2.03	2.14	2.38	1.38	2.4	8.32	5.94	0.81	0	25.4
11.00 m/s	0.09	0	0	0.05	0	0.5	0.05	0	0	0.69
IV. třída stability - normální										
1.70 m/s	0.61	0.49	0.34	0.37	0.23	0.49	0.65	0.61	0.11	3.9
5.00 m/s	1.86	0.98	1.25	0.82	0.71	2.8	3.78	1.85	0	14.05
11.00 m/s	0.3	0	0.07	0.41	0.05	2.41	1.78	1.13	0	6.15
V. třída stability - konvektivní										
1.70 m/s	1.26	1.18	0.97	0.8	0.65	1.05	0.81	1.05	0.33	8.1
5.00 m/s	3.15	2.9	2.86	1.43	0.94	4.16	5.76	2.75	0	23.95
11.00 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celková růžice										
1.70 m/s	3.25	3.83	3.97	3.53	3.18	4	3.08	2.85	1.21	28.9
5.00 m/s	7.04	6.02	6.6	3.69	4.34	15.59	15.57	5.41	0	64.26
11.00 m/s	0.39	0	0.07	0.46	0.05	2.91	1.83	1.13	0	6.84
součet	10.68	9.85	10.64	7.68	7.57	22.5	20.48	9.39	1.21	100

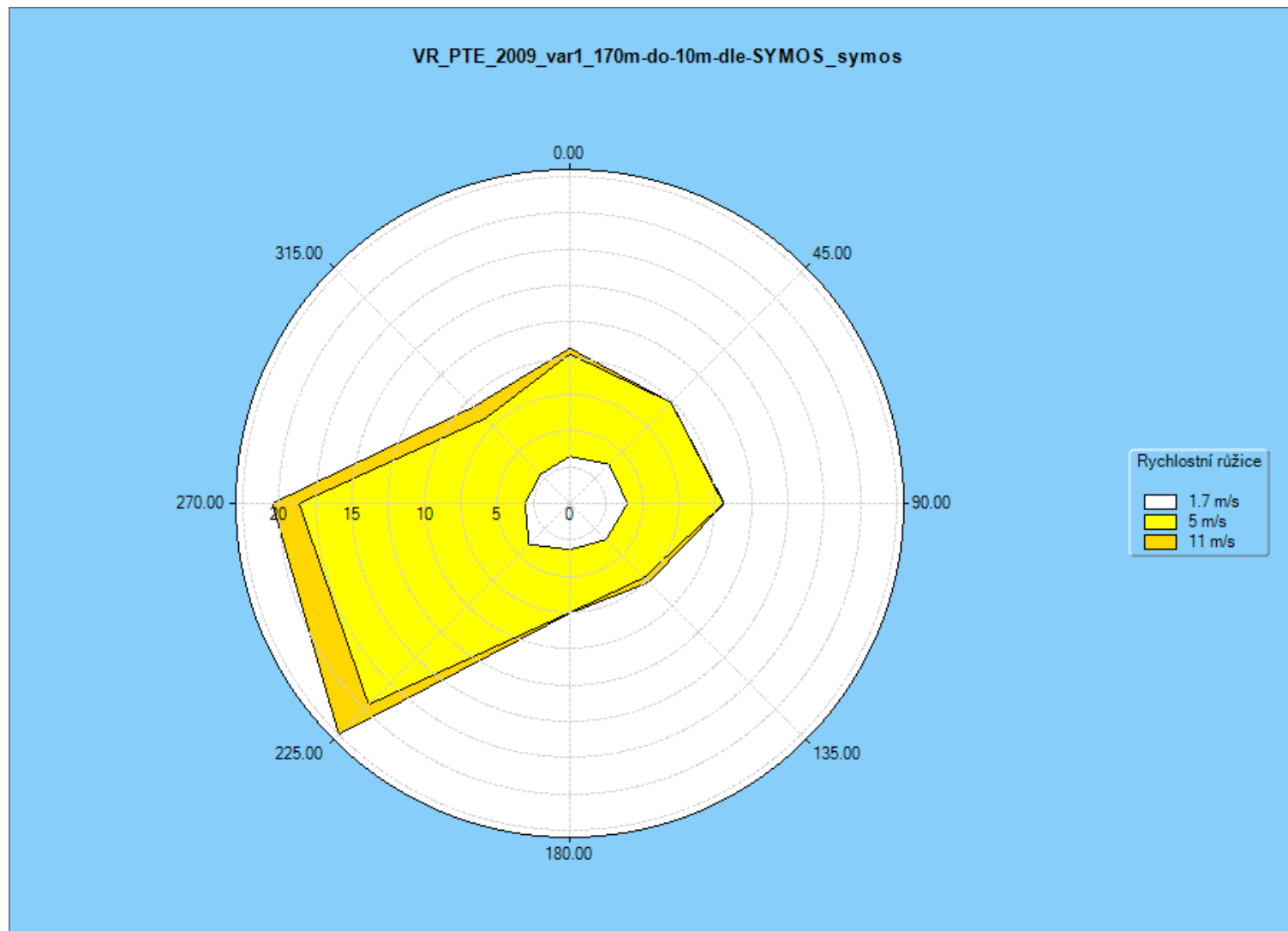
Vstupní data

Meteorologická data - stabilitně a rychlostně členěná větrná růžice



Vstupní data

Meteorologická data - stabilitně a rychlostně členěná větrná růžice



Vstupní data

Výškopis

- **Důležité je, aby údaje o nadmořských výškách všech zdrojů i referenčních bodů byly odečteny ze stejného výškopisu.**

Údaje o zdrojích – bodové zdroje

- Poloha zdroje
- Nadmořská výška terénu v místě zdroje
- Výšku koruny komína nebo konce výduchu nad terénem
- U spalovacích procesů **informace o palivu a jeho spotřebě**:
 - Množství spáleného paliva za hodinu S_h při instalovaném tepelném výkonu
 - Roční množství spáleného paliva S_r
 - Kvalita paliva (výhřevnost, chemické složení apod.)
- U technologií **roční provozní dobu P_r**
- **Objemový tok spalin**
- **Emise znečišťující látky M [$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$]**
- **Teplota t_s spalin nebo vzdušiny** v koruně komína
 - Pokud je $t_s < 80^\circ\text{C}$, je navíc nutno znát **vnitřní průměr komína**
- **Tepelnou vydatnost Q**

Vstupní data

Údaje o zdrojích – liniové zdroje

- **Souřadnice počátku a konce elementu**
- **Nadmořská výška počátku a konce elementu**
- **Šířka komunikace**
- **Emise vycházející z maximální hodinové intenzity dopravy**
 - N_j ... počet projíždějících vozidel z j-té skupiny za den
 - E_{Fj} ... emisní faktor pro j-tou skupinu vozidel [g.km⁻¹]

$$\bar{M}_L = \frac{1}{86,4 \cdot 10^6} \cdot \sum_j N_j \cdot E_{Fj} \quad [\text{g.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$$

- Koeficient K_j pro přepočet 24hodinové intenzity dopravy na denní maximum 1hodinové intenzity, nejsou-li k dispozici přesnější údaje (hodnoty v tabulce vychází ze sčítání dopravy ŘSD 2010):

	Dálnice	Komunikace 1. a 2. třídy
Osobní automobily	0,16	0,14
Lehké nákladní automobily	0,11	0,10
Těžké nákladní automobily	0,14	0,20
Autobusy	0,17	0,14

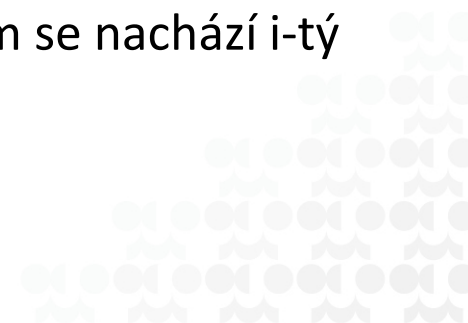


Výpočet charakteristik znečištění

Metodika umožňuje výpočet následujících charakteristik znečištění ovzduší způsobených danými zdroji:

- Maximální krátkodobé koncentrace znečišťující látky pro každou kombinaci třídy stability ovzduší a třídy rychlosti větru.
- Maximální krátkodobá koncentrace bez ohledu na třídu stability a rychlost větru.
- Průměrná roční koncentrace.
- Odhad doby během roku, po kterou jsou v daném referenčním bodě překročené nějaké zvolené hodnoty koncentrace

Před výpočtem je třeba stanovit matici δ_{ik} - azimut, ve kterém se nachází i-tý zdroj při pohledu z k-tého referenčního bodu.



Maximální krátkodobé koncentrace

Při výpočtu maximálních možných koncentrací se počítá s **maximální emisí** od zahrnutých zdrojů. Výpočet se provádí v jednotlivých třídách stability ovzduší pro rychlosti větru podle tabulky:

třída stability	rozmezí u_{10} [m.s ⁻¹]
I	1,5 - 2
II	1,5 - 5
III	1,5 - 15
IV	1,5 - 15
V	1,5 - 5

- v rozmezí u_{10} 1,5 - 3 m.s⁻¹ se postupuje po 0,1 m.s⁻¹,
v rozmezí u_{10} 3 - 7 m.s⁻¹ se postupuje po 0,2 m.s⁻¹,
v rozmezí u_{10} 7 - 15 m.s⁻¹ se postupuje po 0,5 m.s⁻¹.





Maximální krátkodobé koncentrace

- Azimut směru větru φ se volí postupně od $(0^\circ; 360^\circ)$ s krokem 1°
- Směr proudění se poopraví na stáčení větru s výškou. V daném referenčním bodě se pro každý směr větru sčítají koncentrace od těchto
 - bodových zdrojů, ze kterých je referenční bod vidět pod úhlem $\pm 20^\circ$ od opraveného směru proudění
 - plošných a liniových zdrojů, ze kterých je referenční bod vidět pod úhlem $\pm 40^\circ$ od opraveného směru proudění

Výstupem jsou pro každý referenční bod:

- Maximální krátkodobé koncentrace c_j pro 11 kombinací stabilitních tříd a třídních rychlostí
 - Maximální krátkodobá koncentrace c_{max} bez ohledu na třídy stability ovzduší a rychlost větru. Zároveň je uvedeno, při jaké třídě stability ovzduší, jaké rychlosti větru a při jakém směru větru se bude vyskytovat.
- 

Průměrná roční koncentrace

Pro výpočet je nejprve zkonstruována podrobná větrná růžice, tj. stanoveny četnosti výskytu směru větru pro každý azimut od (0° ; 360°) (s krokem 1°) při všech rozptylových podmínkách (11 kombinací tříd stability a rychlosti větru).

Dále je potřeba pro každý zdroj určit relativní roční využití maximálního výkonu α :

- u zdrojů s přibližně stálou emisí (většinou u technologií) vypočteme α z roční provozní doby P_r [hod.] :

$$\alpha = \frac{P_r}{8760}$$

- u zdrojů se sezónními výkyvy výkonu (většinou u spalovacích procesů) se α určí množstvím spáleného paliva S_h za hodinu při jmenovitém výkonu spalovacího zařízení a z ročního množství S_r spáleného paliva:

$$\alpha = \frac{S_r}{8760 \cdot S_h}$$

Průměrná roční koncentrace

- u liniových zdrojů se pro jednotlivé typy dopravy za α považuje podíl průměrné a maximální intenzity provozu.

Příspěvek hodnocených zdrojů k průměrné roční imisní koncentraci v daném referenčním bodě:

$$\bar{c} = \sum_j \sum_{\varphi} \left(f_{\varphi j} \cdot \sum_i \alpha_i \cdot c_{i\varphi j} \right)$$

α_i relativní roční využití max. výkonu i-tého zdroje

$f_{\varphi j}$... relativní četnost směru větru φ při rozptylových podmínkách j (11 kombinací třídy stability a rychlosti větru)

$c_{i\varphi j}$... maximální hodinová imisní koncentrace způsobená i-tým zdrojem při směru větru φ a rozptylových podmínkách j ,

Doba překročení zvolených koncentrací

Nejprve je třeba

- zvolit tuto imisní koncentraci (c_R),
- seřadit všechny zdroje sestupně podle α . V tomto pořadí se budou počítat imisní příspěvky od jednotlivých zdrojů

Během výpočtu hodnoty $c_{\varphi j}$ (imisní koncentrace od všech zdrojů v daném místě při směru větru φ a rozptylových podmínkách j) se postupně sčítají příspěvky jednotlivých zdrojů $c_{i\varphi j}$ a pokaždé se testuje, zda součet již překročil hodnotu c_R . Pokud ano, označíme danému zdroji odpovídající α jako $t_{R\varphi j}$. Doba překročení se pak stanoví jako:

$$T_R = 8760 \cdot \sum_j \sum_{\varphi} t_{R\varphi j} \cdot f_{\varphi j}$$



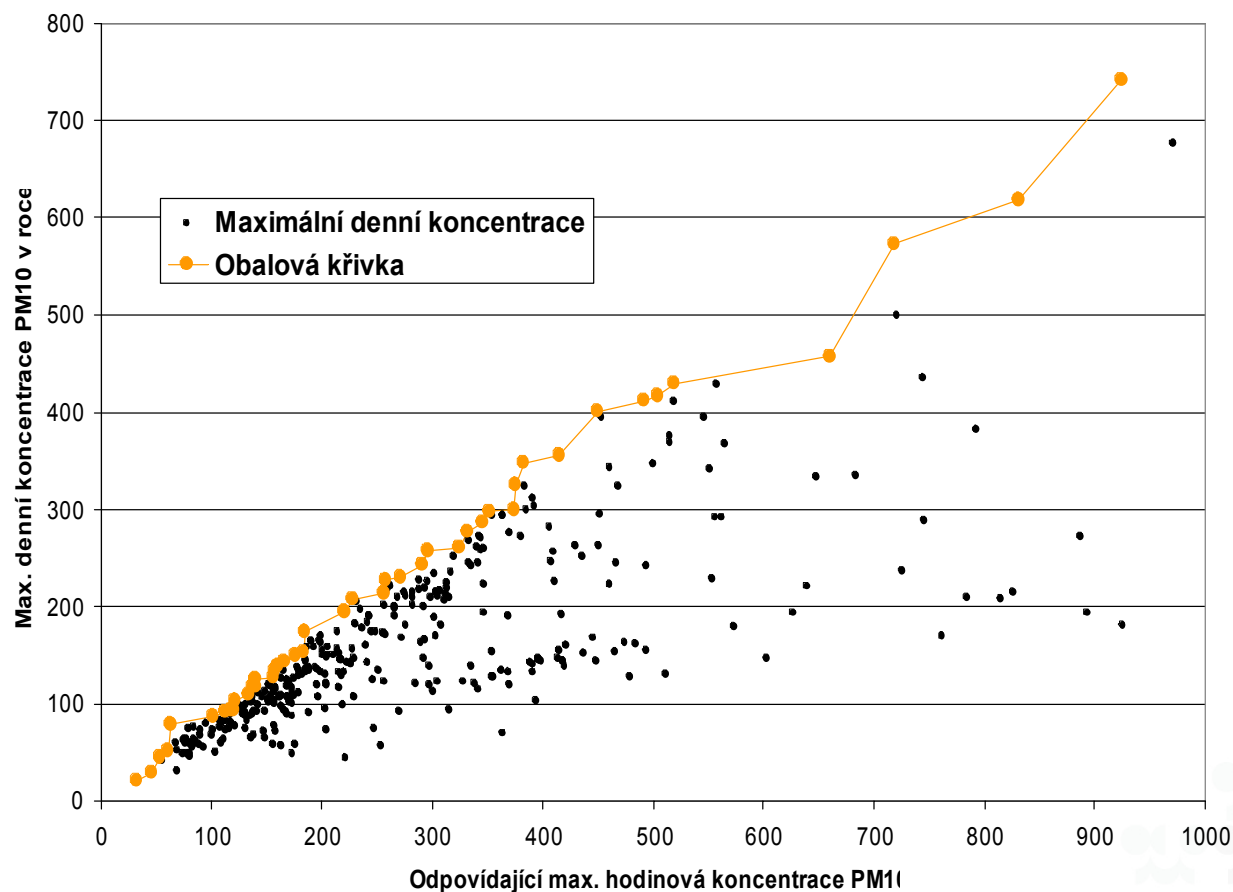
Doba překročení zvolených koncentrací

Čím vyšší je v rozmezí počítaných imisních koncentrací c_j hodnota zvolené imisní koncentrace c_R , tím více znamená T_R horní odhad doby jejího překročení a to ze dvou důvodů:

- Předpokládáme, že po dobu vyjádřenou nejmenším α_j jsou v provozu všechny zdroje najednou. To je sice pravděpodobné (při nízkých teplotách v zimě bývají všechny kotelny v provozu), ale ne vždy to beze zbytku platí.
 - Předpokládáme provoz všech zdrojů na jejich jmenovitý výkon, což rovněž nemusí být vždy splněno.
- 

Maximální denní průměr PM_{10} a SO_2

Příklad jak byly odvozovány vztahy mezi $C_{1h\ max}$ a $C_{D\ max}$ přes obalovou křivku:



Maximální denní průměr PM₁₀ a SO₂

Postup výpočtu je stejný jako při výpočtu maximálních krátkodobých imisních koncentrací až po načítání hodinových hodnot imisních koncentrací od jednotlivých zdrojů pro daný směr větru, třídu stability a rychlost větru. Při tomto načítání se v každém kroku celková získaná hodinová imisní koncentrace přepočte na denní imisní koncentraci podle vztahů uvedených v metodice. Konkrétně pro PM₁₀:

$$C_{d\ max} = 0,8364 \cdot C_{h\ max} \cdot P_d / 24$$

$$C_{d\ max} = [0,03482 \cdot (\ln C_{h\ max})^{5,1144}] \cdot P_d / 24$$

$$\text{pro } C_{h\ max} \leq 360 \mu\text{g.m}^{-3}$$

$$\text{pro } C_{h\ max} > 360 \mu\text{g.m}^{-3} ,$$



Odhad počtu překročení 24h IL pro PM₁₀

a) Pro hodnoty průměrných ročních imisních koncentrací PM₁₀ ≤ 13,3 μg·m⁻³

$$VoL = 0$$

b) Pro hodnoty průměrných ročních imisních koncentrací PM₁₀ > 13,3 μg·m⁻³

$$VoL \doteq a + b (1 - \exp(- (IHr - d \log(1 -) - c) / d))^2$$

IHr ... průměrná roční imisní koncentrace suspendovaných částic PM₁₀ [μg·m⁻³]

Konstanty ***a, b, c, d*** jsou následující:

<i>a</i>	=	0,5155
<i>b</i>	=	348,8097
<i>c</i>	=	63,8863
<i>d</i>	=	41,1309

Výpočet přeměny NO na NO₂

$$c_{NO_2} = c'_{NO_2} + c'_{NO} \cdot \left[1 - \exp\left(-k_p \cdot \frac{x_L}{u_{hl}}\right) \right] \cdot 0,9$$

c'_{NO_2} resp. c'_{NO} je imisní koncentrace NO₂ resp. vypočtená z množství emisí NO₂ resp. NO podle původní metodiky. **NO je vyjádřené jako ekvivalent NO₂.**

x_L vzdálenost referenčního bodu od zdroje ve směru větru,

u_{hl} ... rychlost větru v efektivní výšce

k_p koeficient přírůstku NO₂. k_p závisí na třídě stability (přeměna je rychlejší pro labilnější zvrstvení).



Kontrolní otázky :-)

Na čem závisí ϑ ?

Na čem závisí φ ?

Na čem závisí odhad maximálních koncentrací?

K jakým chybám může vést špatný výpočet efektivní výšky zdroje?

Na výpočet jakých charakteristik má vliv použitá větrná růžice?

