

Rozptyl emisí

Ochrana ovzduší

LS 2014/2015

Úvod

emise → přenos → imise

- Závažné zdroje znečišťování → posudek EIA → rozptylová studie
- Šíření znečišťujících látek v přízemní vrstvě atmosféry

Přenos znečišťujících látek

- Zředování emisí ve vertikálním i horizontálním směru
- Suchá depozice tuhých látek (sedimentace)
- Suchá depozice plynných látek (difúze a adsorpce)
- Mokrý depozice tuhých i plynných látek (odstraňování deštěm)
- Fyzikální změny
- Chemické změny

Přenos znečišťujících látek

Prostorové měřítko

- Přenos na krátké vzdálenosti
- Přenos na střední vzdálenosti
- Přenos na dlouhé vzdálenosti

Přenos znečišťujících látek

Přenos na krátké vzdálenosti

- Vliv zdrojů
- Časové působení
- Šíření kouřové vlečky
- Vliv depozice a chemických změn

Přenos znečišťujících látek

Přenos na střední vzdálenosti

- Vliv zdrojů
- Časové působení
- Vliv depozice a chemických změn

Přenos znečišťujících látek

Přenos na dlouhé vzdálenosti

- Vliv zdrojů
- Časové působení
- Vliv depozice a chemických změn

Přenos znečišťujících látek

	Měřítko územní	Měřítko časové	Vliv zdrojů na imisní situaci	Vliv depozičních a transformačních procesů
Přenos na krátké vzdálenosti	lokální jednotky až desítky km	minuty až hodiny	jeden zdroj nebo skupina nepříliš vzdálených zdrojů (kouřové vlečky se rozšiřují horizontálně i vertikálně)	nedůležitý
Přenos na střední vzdálenosti	regionální stovky km	desítky hodin	lze rozlišit vliv jednotlivých velkých zdrojů nebo skupin, ale nemusí být dominantní, může být převážen lokálním působením menších zdrojů	začínají se uplatňovat
Přenos na dlouhé vzdálenosti	globální kontinenty a Země	dny	nelze rozlišit příspěvky jednotlivých zdrojů	dominantní uplatnění

Přenos znečišťujících látek

- Složitý děj

užší význam – zřetřování emisí

širší význam – zřetřování emisí + další děje

- Různé modely znečišťování – podle měřítka

Přenos Z.L. na krátké vzdálenosti

- Lokální měřítko
- Emise plynů a tuhých příměsí ze **zdroje**
 - charakteristika zdroje: výška, \emptyset komína, T_{plynu} , tok emisí
- Působení **vnějších atmosférických podmínek**: p , T , φ , vítr
 - časově a prostorově nestálé
- Šíření je ovlivněno:
 - zdrojem
 - teplotním zvrstvením atmosféry
 - větrem
 - terénem
- Zjednodušené modely

Vertikální teplotní zvrstvení atmosféry

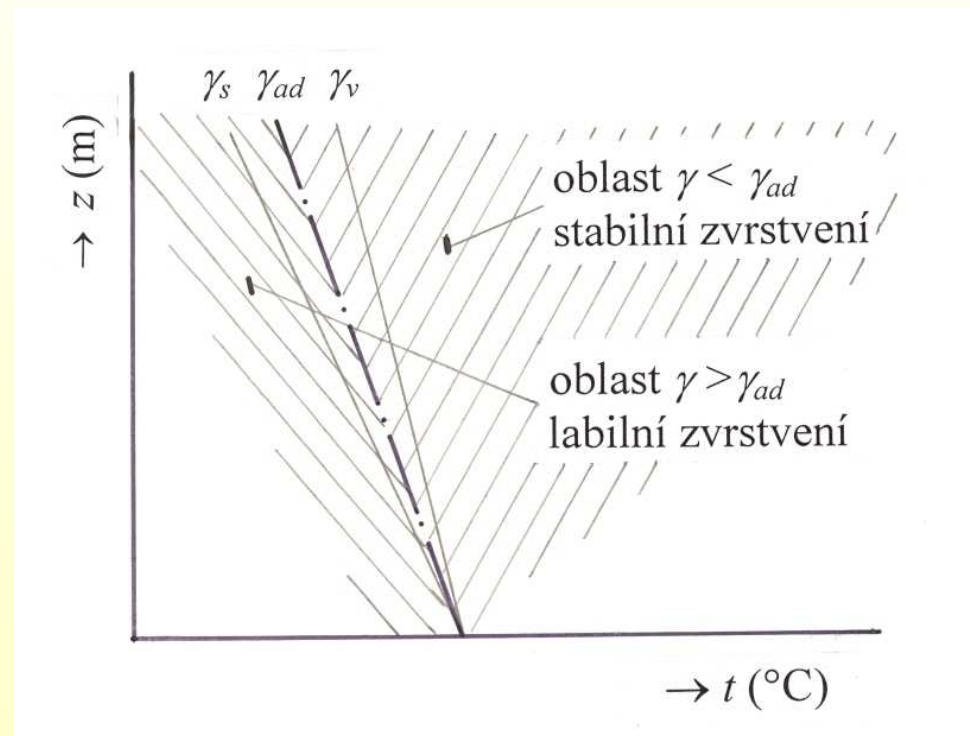
- Největší vliv na rozptyl z bodových zdrojů
- Zpravidla pokles teploty s výškou
- **Vertikální gradient teploty**
 - Δt na 100 m výšky
- → **stabilita atmosféry**
- **Adiabatická změna** teploty s výškou
 - přemístění elementu vzduchu vzhůru → ... → pokles t

$$\gamma = - \frac{dt}{dz}$$

Vertikální teplotní zvrstvení atmosféry

- Suchoadiabatický teplotní gradient $\gamma_s = 0,98 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$
- Vlhkoadiabatický teplotní gradient $\gamma_v = 0,65 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$
- Vzduch s reálnou vlhkostí $\gamma_{ad} = 0,65 - 1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$

- $\gamma = \gamma_{ad}$ – neutrální rovnováha
- $\gamma > \gamma_{ad}$ – labilní teplotní zvrstvení
- $\gamma < \gamma_{ad}$ – stabilní teplotní zvrstvení



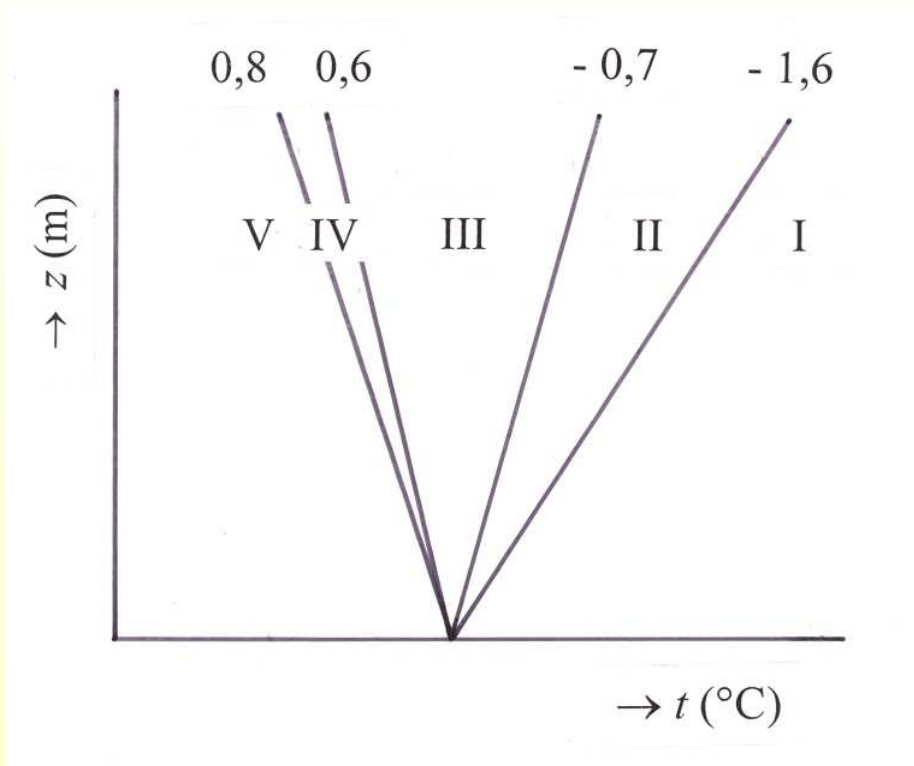
Vertikální teplotní zvrstvení atmosféry

- Roztřídění atmosféry na **třídy stability** podle γ

Třída stability	Název	Rozsah γ	Význam	P
I	superstabilní	$\gamma < -1,6$	Silná inverze - velmi špatné rozptylové podmínky	0,33
II	stabilní	$-1,6 \leq \gamma < -0,7$	Běžná inverze - špatné rozptylové podmínky	0,25
III	izotermní	$-0,7 \leq \gamma < 0,6$	Izotermie až slabá inverze – mírně zhoršené rozptylové podmínky	0,18
IV	normální	$0,6 \leq \gamma \leq 0,8$	Indiferentní (adiabatické) teplotní zvrstvení – dobré rozptylové podmínky	0,14
V	konvektivní	$\gamma > 0,8$	Labilní teplotní zvrstvení – rychlý rozptyl	0,10

Vertikální teplotní zvrstvení atmosféry

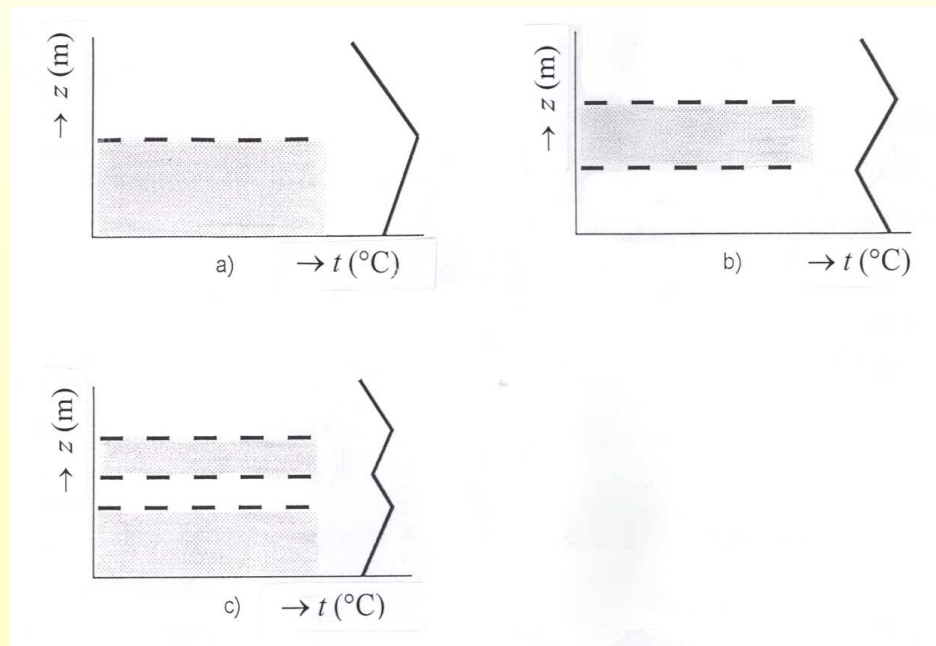
- Grafické vyjádření tříd stability podle γ



Vertikální teplotní zvrstvení atmosféry

Teplotní inverze

- Teplota vzduchu se s výškou zvyšuje
- Inverze – přízemní (a)
 - výšková (b)
 - přízemní i výšková (c)



- Příčiny
 - radiace
 - advekční inverze
 - frontální inverze
 - subsidenční inverze

Vertikální teplotní zvrstvení atmosféry

Teplotní inverze

- Radiace – přízemní inverze hlavně v zimě
 - noční vychlazování povrchu není dostatečně nahrazeno slunečním zářením
 - vliv reliéfu ve tvaru kotlin – stékání chladnějšího vzduchu
 - i výšková inverze
- Advekční inverze – příliv teplého vzduchu prouděním
- Frontální inverze
 - teplá fronta – teplejší vzduch se nasouvá nad studenější
 - studená fronta – studenější vzduch se podsouvá pod teplejší
- Subsidenční inverze – vznik výškové inverze v oblastech vysokého tlaku
 - sestupný proud vzduchu se adiabaticky ohřívá → výšková inverze nad chladnějším vzduchem

Rychlost a směr větru

- Vliv na rozptyl
- Měří se v **referenční výšce 10 m**
- Třídy rychlosti větru

Třída	Název třídy	Rozsah rychlostí u_{10} (m/s)	„Třídní“ rychlost (m/s)
1.	slabý vítr	$0 < u_{10} \leq 2,5$	1,7
2.	mírný vítr	$2,5 < u_{10} \leq 7,5$	5,0
3.	silný vítr	$u_{10} > 7,5$	11,0

- Meteorologie – Beaufortova stupnice

Rychlost a směr větru

Beaufortova stupnice

Stupeň	Vítr	Uzly	km.h ⁻¹	Na souši	Hladina moře	Výška vln v metrech
0	bezvětrí	< 1	< 1	kouř stoupá kolmo vzhůru	zrcadlo	< 0,03
1	vánek	1 - 3	1 - 5	směr větru lze poznat podle pohybu kouře	vlnky	asi 0,03
2	větrík	4 - 6	6 - 11	listí stromů šelestí	světlejší hřbety vln	asi 0,13
3	slabý vítr	7 - 10	12 - 19	listy stromů a větvičky jsou v trvalém pohybu	lom vln	0,3 - 0,7
4	mírný vítr	11 - 16	20 - 28	vítr zvedá prach a útržky papíru	místa bílé hřebeny	0,6 - 1,2
5	čerstvý vítr	17 - 21	29 - 39	listnaté keře se začínají hýbat	nad vlnami vodní tříšť	1,2 - 2,4
6	silný vítr	22 - 27	40 - 49	telegrafní dráty sviští, používání deštníků je nesnadné	silná vodní tříšť	2,4 - 4
7	mírný vichr	28 - 33	50 - 61	chůze proti větru je obtížná, celé stromy se pohybují	bílá pěna na vlnách	4 - 6
8	čerstvý vichr	34 - 40	62 - 74	ulamují se se větve, chůze proti větru je normálně nemožná	bílá pěna na vlnách	4 - 6
9	silný vichr	41 - 47	75 - 88	vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech	vysoké rolující vlny	asi 6
10	plný vichr	48 - 55	89 - 102	vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech	přepadající hřebenatky	6 - 9
11	vichřice	56 - 62	103 - 114	vítr působí rozsáhlá pustošení	vlny pokryté pěnou	> 14
12 - 17	orkán	> 62	> 117	ničivé účinky (vítr odnáší střechy, hýbe těžkými hmotami)	vlnobití, pěna ve vzduchu	> 14

Rychlost a směr větru

- Změna rychlosti větru s výškou
P = f (třída stability)

$$u_h = u_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^P$$

- Kombinace tříd stability a tříd rychlosti větru
- Skutečnost – pouze 11 kombinací

Třída stability atmosféry	Rozmezí výskytu rychlostí větru u_{10} (m/s)	Výskyt tříd rychlostí větru
I - superstabilní	0 – 2,5	1.
II – stabilní	0 – 5,0	1., 2.
III – izotermní	rychlost není omezena	1., 2., 3.
IV – normální	rychlost není omezena	1., 2., 3.
V - konvektivní	0 – 5,0	1., 2.

Rychlost a směr větru

Směr větru

- 8 základních směrů + bezvětří

Větrná růžice

- Rozdělení rychlostí větru podle:
 - četnosti
 - síly větru
 - směru větru
 - třídy stability atmosféry

Rychlost a směr větru

Větrná růžice

- Detailní
– tabulková forma

Relativní četnosti větru pro 8 směrů větru a bezvětrí u 11 kombinací třídy stability a tř. rychlosti větru

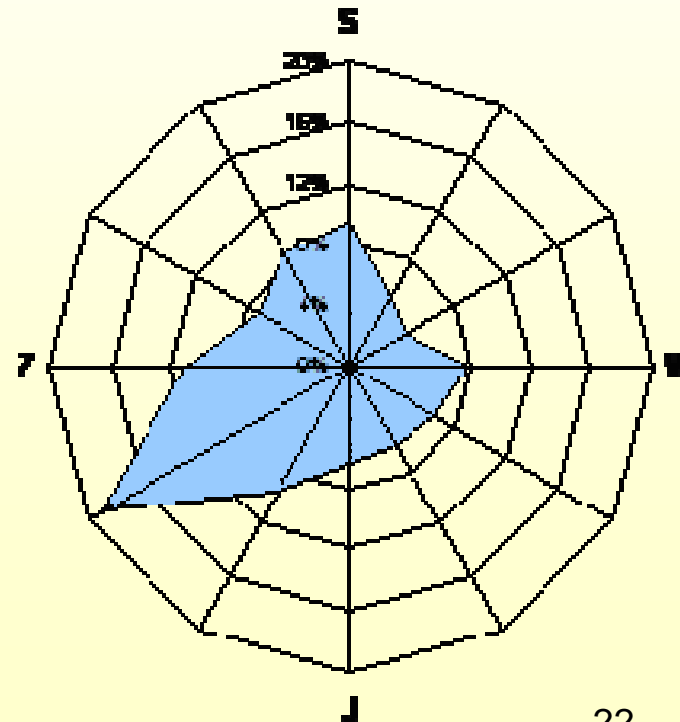
Odborný odhad větrné růžice pro lokalitu platný ve výšce 10 m nad zemí v % (podklad pro metodiku výpočtu znečištění ovzduší)

rychlostní třída větru [m·s ⁻¹]	četnost výskytu v daném směru [% z celkové roční doby]									součet
	S	SV	V	JV	J	JZ	Z	SZ	CALM	
I. třída stability - velmi stabilní										
1,7	0,49	0,22	0,49	0,22	0,38	0,25	0,90	0,26	5,52	
5,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
11,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
součet	0,49	0,22	0,49	0,22	0,38	0,25	0,90	0,26	5,52	8,73
II. třída stability - stabilní										
1,7	1,57	0,71	1,44	0,56	0,76	0,42	1,31	0,78	6,34	
5,0	0,13	0,05	0,21	0,09	0,16	0,09	0,38	0,1		
11,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
součet	1,70	0,76	1,65	0,65	0,92	0,51	1,69	0,88	6,34	15,10
III. třída stability - izotermní										
1,7	1,63	0,85	1,87	0,66	0,81	0,55	1,64	0,98	2,91	
5,0	3,15	1,36	4,7	1,66	1,5	0,98	3,13	2,01		
11,0	0,05	0,0	0,03	0,03	0,05	0,0	0,2	0,05		
součet	4,83	2,21	6,60	2,35	2,36	1,53	4,97	3,04	2,91	30,80
IV. třída stability - normální										
1,7	0,59	0,24	0,67	0,36	0,6	0,4	1,24	0,25	1,92	
5,0	3,53	1,24	3,55	2,18	2,47	1,45	6,6	2,52		
11,0	0,77	0	0,77	0,37	0,7	0,00	1,95	0,47		
součet	4,89	1,48	4,99	2,91	3,77	1,85	9,79	3,24	1,92	34,84
V. třída stability - konvektivní										
1,7	0,46	0,2	0,64	0,47	0,77	0,38	0,97	0,22	1,3	
5,0	0,63	0,13	0,62	0,41	0,81	0,47	1,69	0,36		
11,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
součet	1,09	0,33	1,26	0,88	1,58	0,85	2,66	0,58	1,30	10,53
celková růžice										
1,7	4,74	2,22	5,11	2,27	3,32	2,00	6,06	2,49	17,99	
5,0	7,44	2,78	9,08	4,34	4,94	2,99	11,80	4,99		
11,0	0,82	0,00	0,80	0,40	0,75	0,00	2,15	0,52		
součet	13,00	5,00	14,99	7,01	9,01	4,99	20,01	8,00	17,99	100,00

Rychlost a směr větru

Větrná růžice

- Zjednodušené formy
- Celková větrná růžice
 - tabulka
 - četnost, síla, směr, bez ohledu na tř. stability
- Grafická forma, např.
 - střední rychlost větru pro 8 směrů
 - četnost v daném směru za rok
 - rychlost pro 5 tříd stability



Převýšení kouřové vlečky u bodového zdroje

- Výška osy kouřové vlečky h (m) $h = H + \Delta h$
 H – stavební výška komína
 Δh – převýšení kouřové vlečky

Převýšení kouřové vlečky Δh je funkcí (dle SYMOS '97):

- tepelné vydatnosti zdroje Q (MW)
- teploty spalin v koruně komína t_s (°C)
- vnitřního průměru koruny komína d (m)
- výstupní rychlosti exhalací w_0 (m/s)
- rychlosti větru v koruně komína u_H (m/s)
- třídy stability atmosféry
- vlastní vzdálenosti x (m) od zdroje

Převýšení kouřové vlečky u bodového zdroje

Tepelná vydatnost zdroje u spalovacích procesů

- dle SYMOS '97

- $Q = 10^{-3} \dot{V}_N C_{s,N} (t_s - t_o)$ (MW)

\dot{V}_N obj. průtok spalin za norm. podm. (m³/s)

$C_{s,N}$ měrná tep. kapacita spalin za N podm. (kJ/m³K)

$t_o = 0$ °C teplota okolí

- Empirický vztah $Q = K_1 S (q + K_2)$

q výhřevnost paliva (kJ/kg, kJ/m³)

S hodinová spotřeba paliva (t/h, 10³ m³/h)

K_1, K_2 konstanty dle topeniště a výkonu

Převýšení kouřové vlečky u bodového zdroje

- dle SYMOS '97
- Různé vztahy dle hodnot Q a x

Příklad

- Zdroje s tepelnou vydatností $Q < 20$ MW a pro vzdálenost od zdroje x (m) $> 300 \cdot Q^{1/2}$

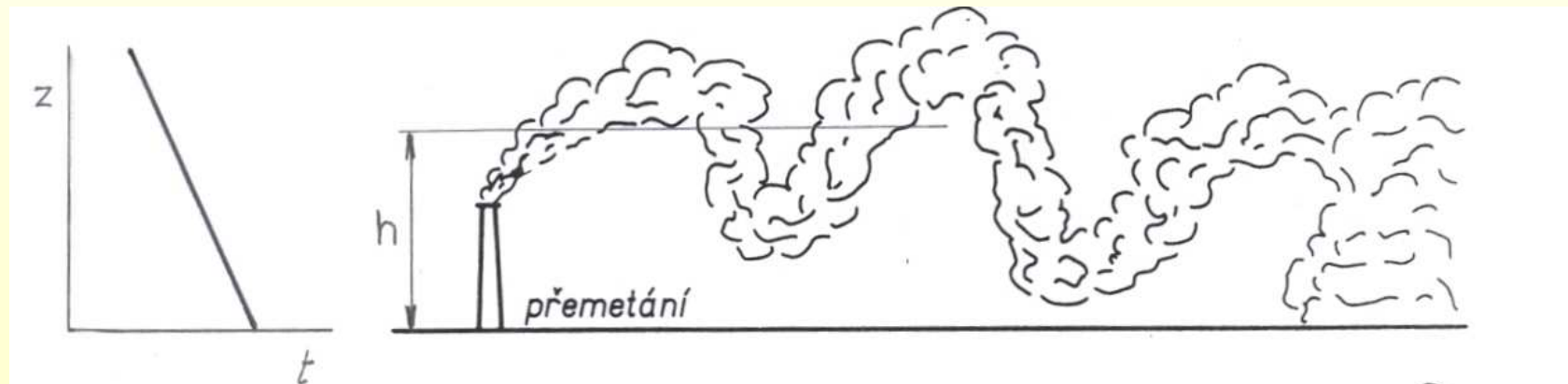
$$\Delta h = (1 - \beta) \frac{1,5 w_0 d}{u_H} + \beta \frac{K_s 90 Q^{1/3}}{u_H}$$

- $K_s = f$ (tř. stability)
- $\beta = f$ (t_s)
 - $\beta = 1$ pro $t_s \geq 80^\circ\text{C}$
 - $\beta = (t_s - 30)/50$ pro $30^\circ\text{C} < t_s < 80^\circ\text{C}$
 - $\beta = 0$ pro $t_s \leq 30^\circ\text{C}$

Typy kouřových vleček

Přemetání

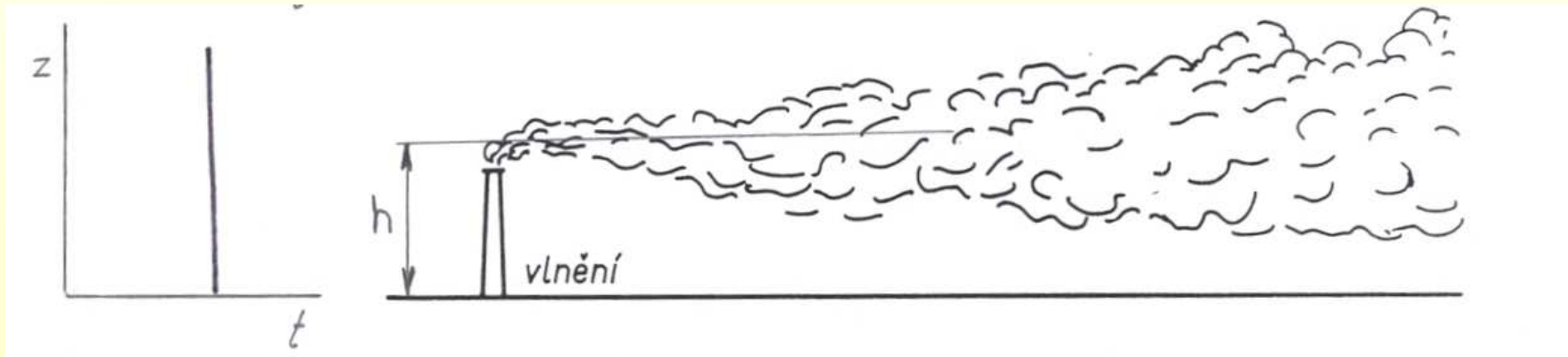
- Při labilním teplotním zvrstvení a slabším větru
- V denních hodinách za slunných horkých dnů
- Vlečka může být strhávána až k zemi (\rightarrow vysoké C)
- Hlavně u nižších zdrojů s chladnějšími emisemi



Typy kouřových vleček

Vlnění

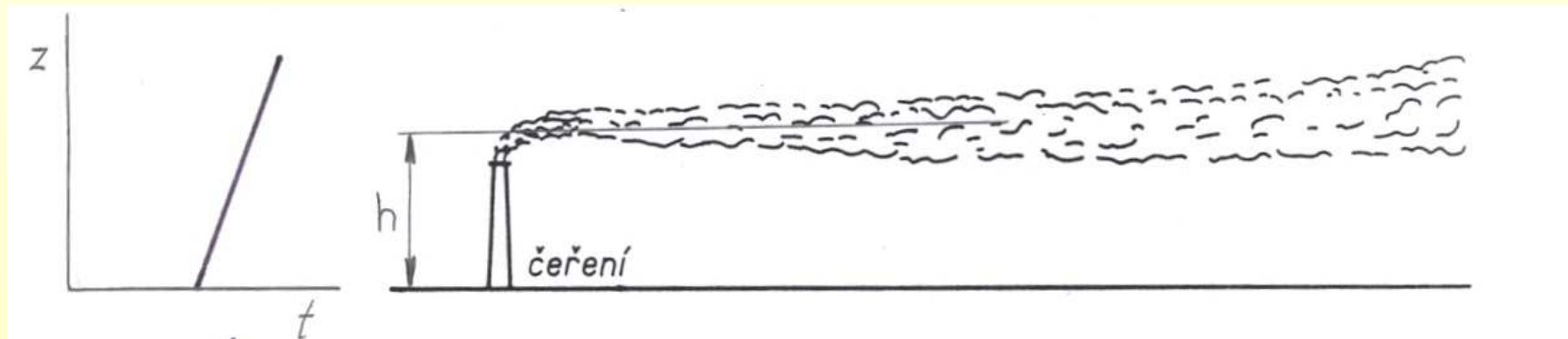
- Při adiabatickém až izotermním teplotním zvrstvení
- „Ideální“ rozptyl
- Při mírném až čerstvém větru
- Nízké koncentrace u země



Typy kouřových vleček

Čeření

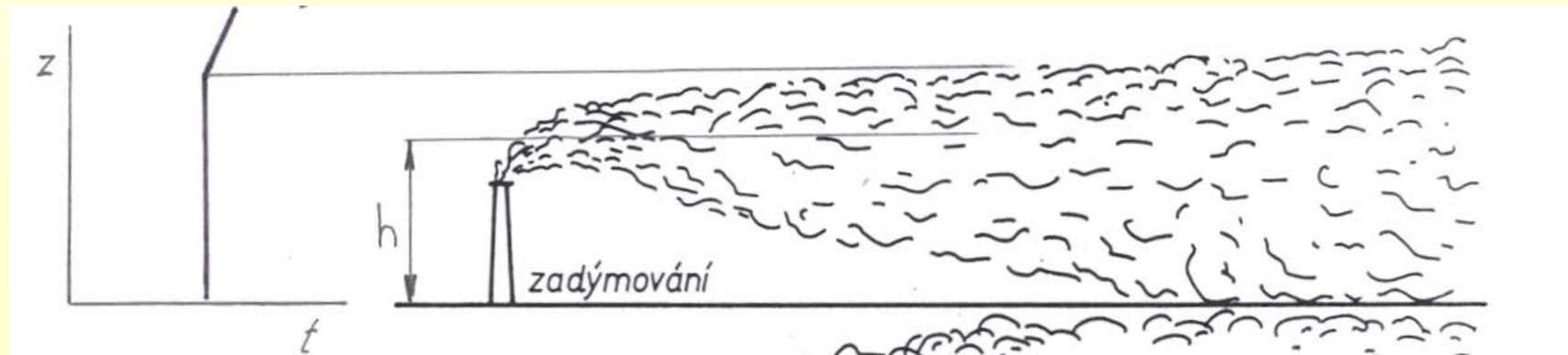
- Při stabilním teplotním zvrstvení sahajícím do výšky nad horizontální osu kouřové vlečky
- Večer, v noci, časně ráno, v zimě někdy po celý den
- Vertikálně malý rozptyl, horizontálně na dlouhé vzdálenosti
- Příznivé pro exhalace z vysokých komínů



Typy kouřových vleček

Zadýmování

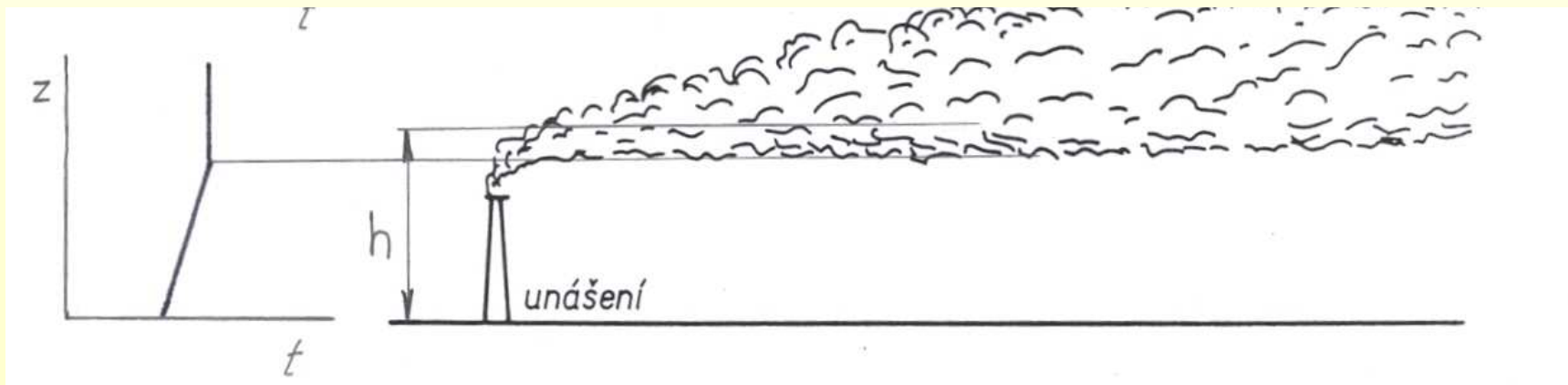
- Výška osy vlečky pod hranicí výškové inverze
- Při změně noční inverze u země v dopoledních hodinách prohříváním na izotermní, normální až labilní zvrstvení
- Inverze brání vertikálnímu rozptylu
- Nebezpečné hlavně pro nízké zdroje (→ dopolední špičky znečištění)



Typy kouřových vleček

Unášení

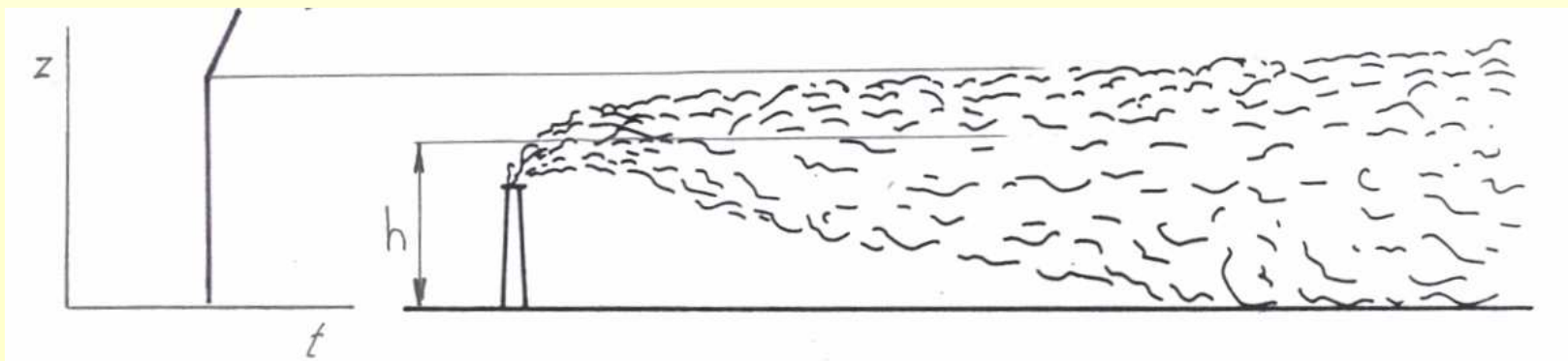
- Osa kouřové vlečky nad oblastí inverzního teplotního zvrstvení
- Vertikální rozptyl pouze nad oblastí inverzní teploty
- Nebezpečí na návětrné straně kopců



Typy kouřových vleček

Odrážení

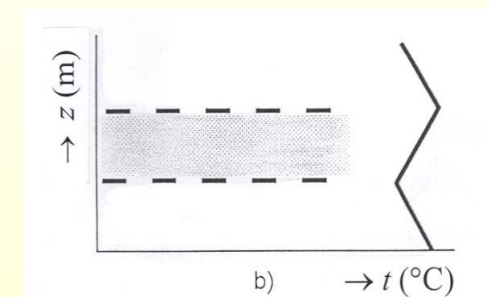
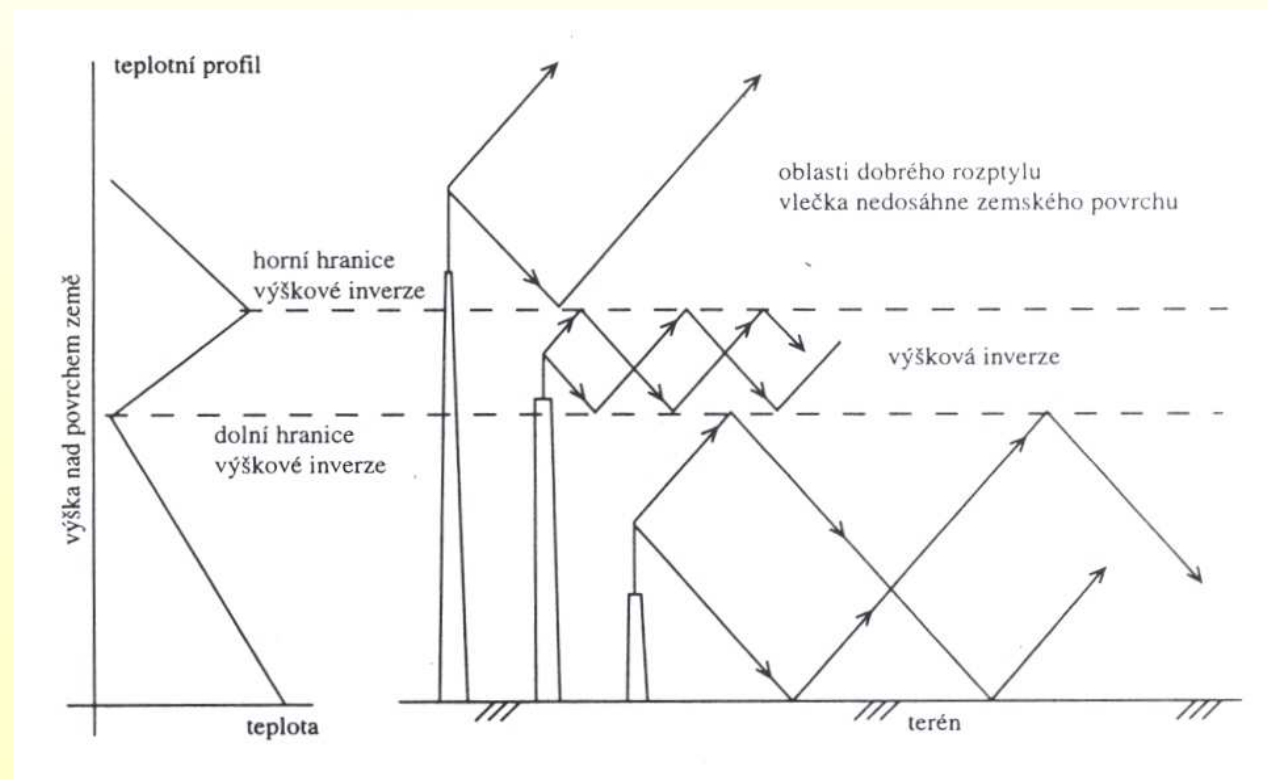
- Podobné jako u zadýmování
- Výška hranice inverze vysoko nad zdrojem, brání vertikálnímu rozptylu
- Při přenosu teplejšího vzduchu do oblasti
- V oblastech vysokého tlaku – dochází k sestupným pohybům vzduchu a adiabatickému ohřevu
- Hlavní příčina nebezpečných smogových situací ve městech a průmyslových aglomeracích
- Trvání i několik dní (hlavně v zimě), u všech zdrojů



Typy kouřových vleček

Situace při výškové teplotní inverzi

- Tři případy rozptylu podle výšky osy kouřové vlečky a výšky dolní a horní hranice kouřové vlečky
- Pro blízké okolí je nejhorší zadýmování – h níže než dolní hranice inverze



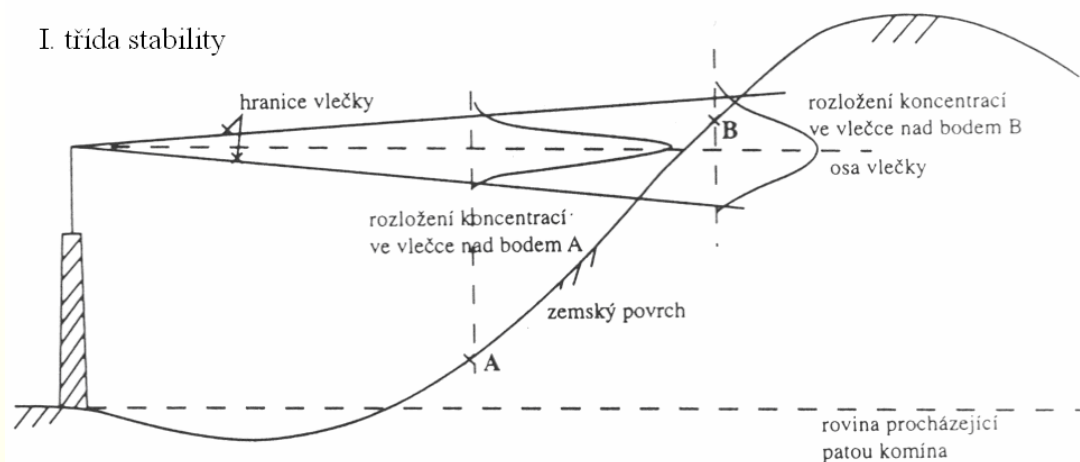
Vliv terénu

- drsnost povrchu
- členitost terénu
- Vliv na výškový profil větru i na turbulenci proudu → značné odlišnosti od teor. profilu
- Složité, značný vliv topografie terénu na rozptyl

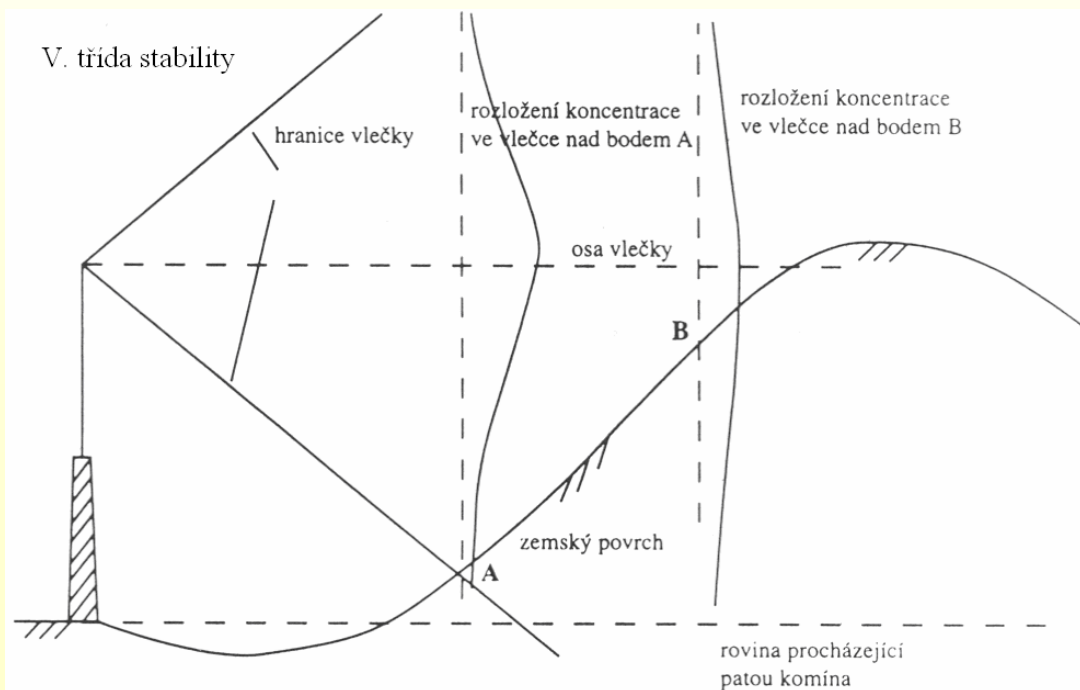
Vliv terénu

Nebezpečí na návětrné straně kopců

- Pro I. třídu stability extrémní rozdíl mezi body A a B



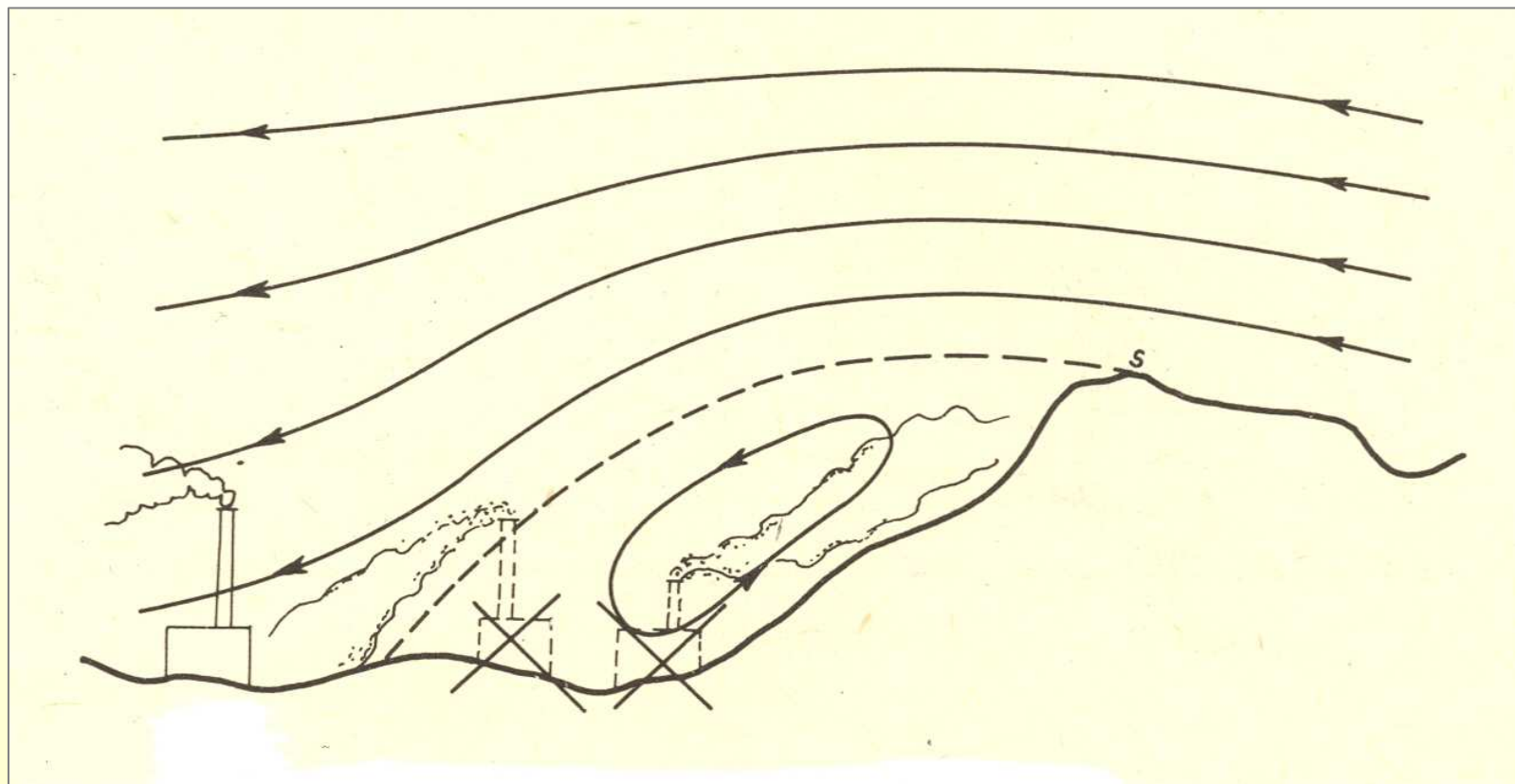
- Pro V. třídu stability nevýrazný rozdíl



Vliv terénu

Nebezpečí na závětrné straně kopců

- Zdroj bezprostředně na závětrné straně kopce



Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

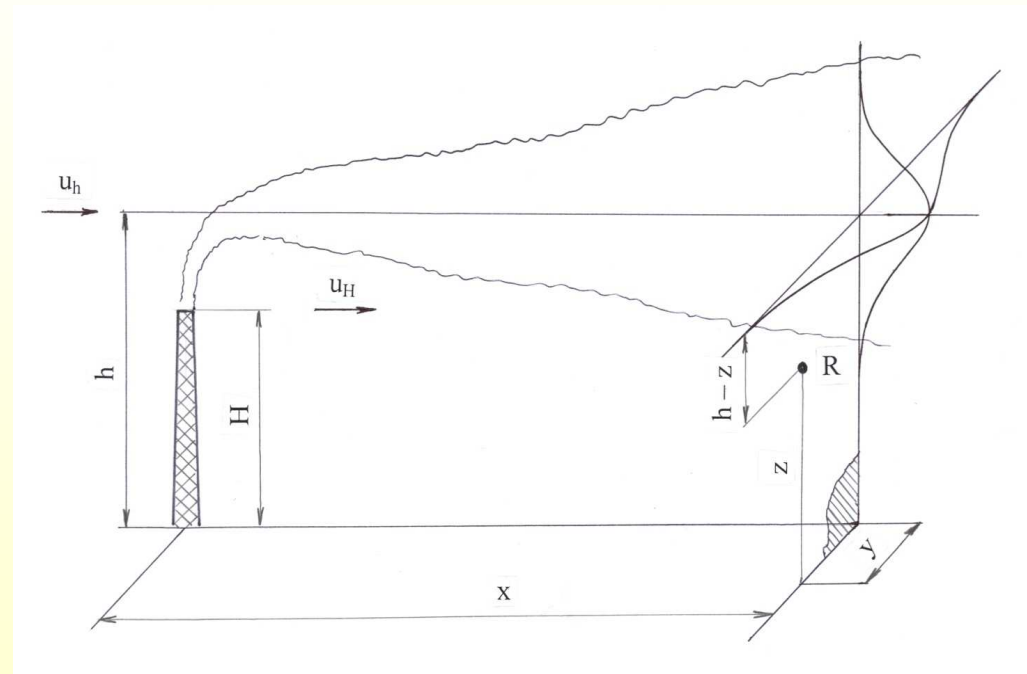
- Aplikace statistické teorie turbulentní difúze znečišťujících látek v atmosféře
- V lokálním měřítku

SYMOS '97 – **System modelování stacionárních zdrojů**

- ČHMÚ
- Referenční metoda pro výpočty znečištění z bodových, plošných a mobilních (liniových) zdrojů do vzdálenosti 100 km od zdroje

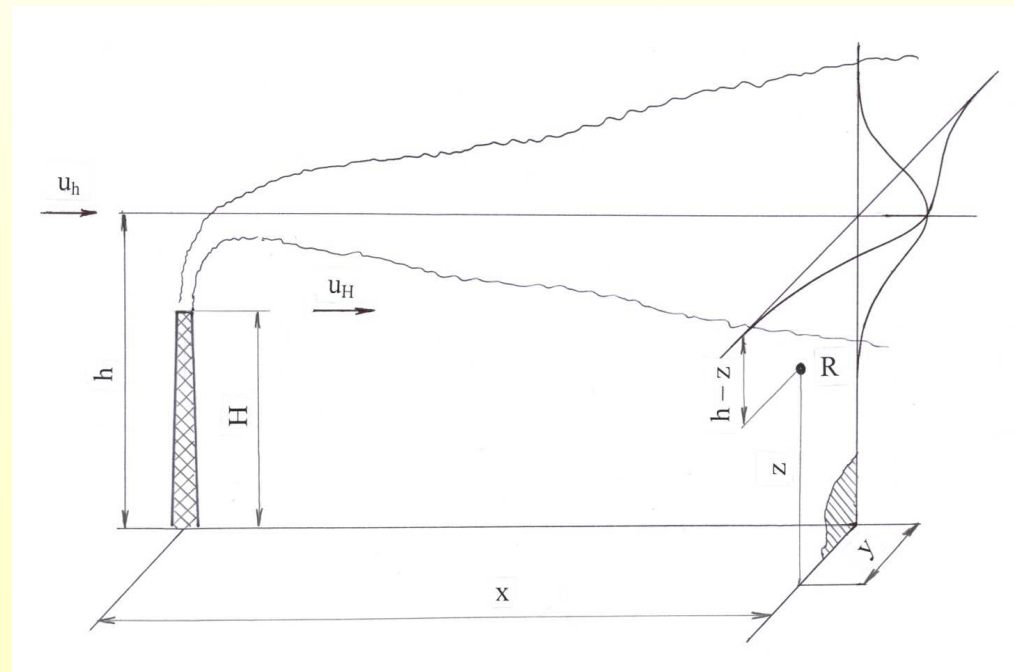
Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

- Kontinuální bodový zdroj
- H
- h
- Δh
- M – hm. tok Z.L. (g/s)
- V_N – obj. průtok spalin za norm. podm (m^3/s)
- pravoúhlý souřadný syst.
- x, y, z
- C – koncentrace Z.L. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

- Statistické rozložení koncentrace v horizontální a vertikální rovině
- Dvojnásobné Gaussovo rozdělení
- Směrodatné odchylky σ_y , σ_z
- Zanedbávají se chemické transformace a suchá a mokrá depozice



Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

- Koncentrace znečišťující látky C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) v bodě R

$$C(x, y, z) = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_h + V_N} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{(h-z)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

- Směrodatné odchylky σ_y , σ_z

$$\sigma_y = a_y x^{b_y} \quad \sigma_z = a_z x^{b_z}$$

- Příklad konstant pro výpočet σ_y a σ_z pro hodinové koncentrace

Třída stability	a_y	b_y	a_z	b_z
I	0,1197	0,8844	0,6273	0,5076
II	0,1373	0,8930	0,5721	0,5797
III	0,1608	0,8986	0,4849	0,6563
IV	0,1934	0,9018	0,3628	0,7549
V	0,3329	0,8831	0,1999	0,9729

Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

- Hodnoty σ_y a σ_z pro hodinové koncentrace ve vzdálenosti 1000 m od zdroje

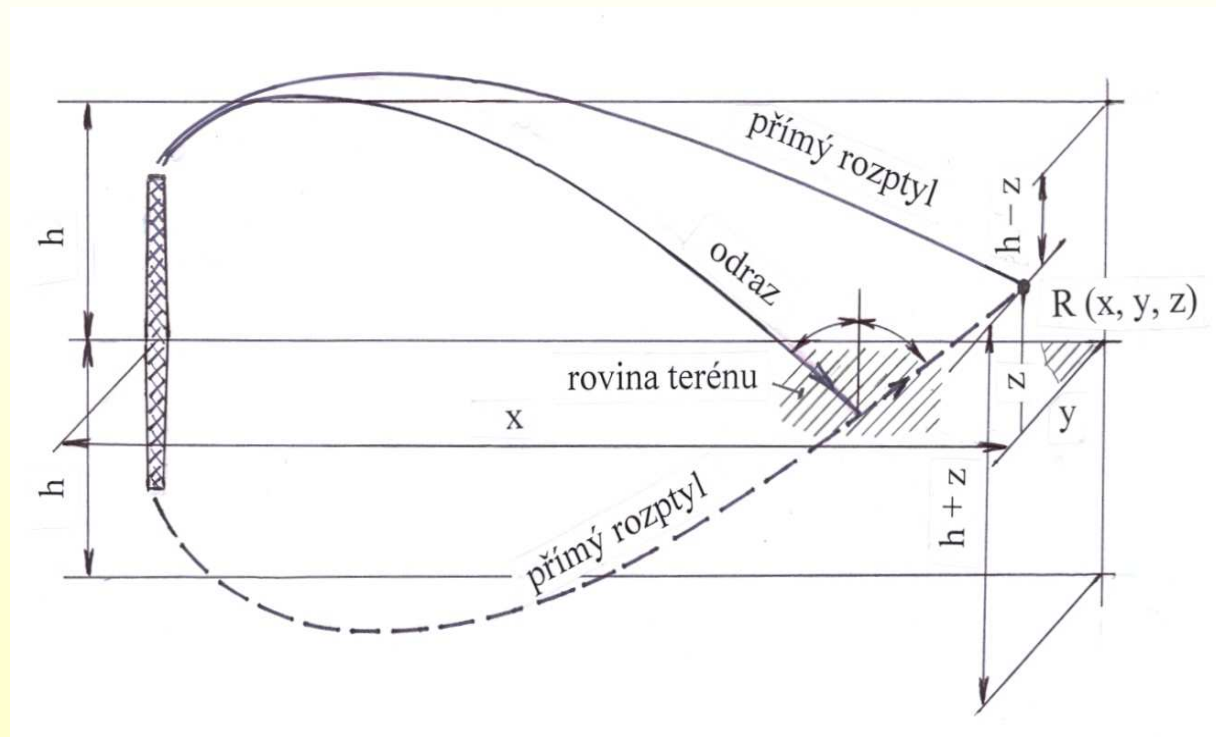
Třída stability	I	II	III	IV	V
σ_y (m)	53,9	65,6	79,8	98,1	148,5
σ_z (m)	20,1	31,8	45,2	66,7	165,8
poměr σ_y/σ_z	2,7	2,1	1,8	1,5	0,90

- Hranice kouřové vlečky $\pm 3\sigma_y$ a $\pm 3\sigma_z$
- Hranice kouřové vlečky se výrazně zvětšuje s třídou stability

Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

Odraz

- Nesedimentující, nereagující nebo nedifundující příměsi
- Fiktivní zrcadlový zdroj



Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

Odraz od terénu

- Výsledná koncentrace v bodě R

$$\begin{aligned} C(x, y, z) &= \frac{10^6 M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_h + V_N} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{(h-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \\ &+ \frac{10^6 M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_h + V_N} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{(h+z)^2}{2\sigma_z^2}\right) = \\ &= \frac{10^6 M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_h + V_N} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(h-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(h+z)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \end{aligned}$$

Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

Alternativy výpočetních vztahů pro:

- zvlněný terén
- náhorní plošinu
- vliv suché a mokré depozice
- výpočet koncentrace tuhých znečišťujících látek
- výpočet z bodových, plošných a liniových zdrojů
- větší vzdálenosti od zdroje (odraz)

Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

Omezení metodiky SYMOS '97

- do 100 km
- uvnitř městské zástavby pod úrovní střech

- Speciální postup pro výpočet při inverzích a bezvětří

Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

Možnosti metodiky SYMOS '97

- Maximální hodnoty krátkodobých (1h) koncentrací
- Roční průměrné koncentrace $\bar{C}_{R,r} = \left(\sum_{i=1}^{180} C_{R,i} \cdot p_i \right)$
 p_i – pravděpodobnost výskytu větru v daném směru pro danou tř. stability a tř. rychlosti větru
- Doba trvání koncentrací překračujících zvolenou míru
- Výška komína
- Spad prachu v okolí zdroje

Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

Plošný zdroj

- Např. zástavba rodinnými domy s lokálním vytápěním nebo skládka odpadů uvolňující znečišťující látky
- Rozdělení na **čtvercové elementy** dle velikosti
- Emise na jednotku plochy → emise na čtvercový element
- Náhrada elementů fiktivními bodovými zdroji
- Koncentrace v referenčním bodě jako součet příspěvků od všech plošných elementů

Základní koncepce Gaussovského rozptylového modelu

Liniový zdroj

- Komunikace s automobilovým provozem
- Rozdělení na **délkové elementy**
- Koncentrace v referenčním bodě jako součet příspěvků od všech elementů
- Emise elementu – ze známých emisních faktorů pro různé typy vozidel a z hustoty jejich provozu