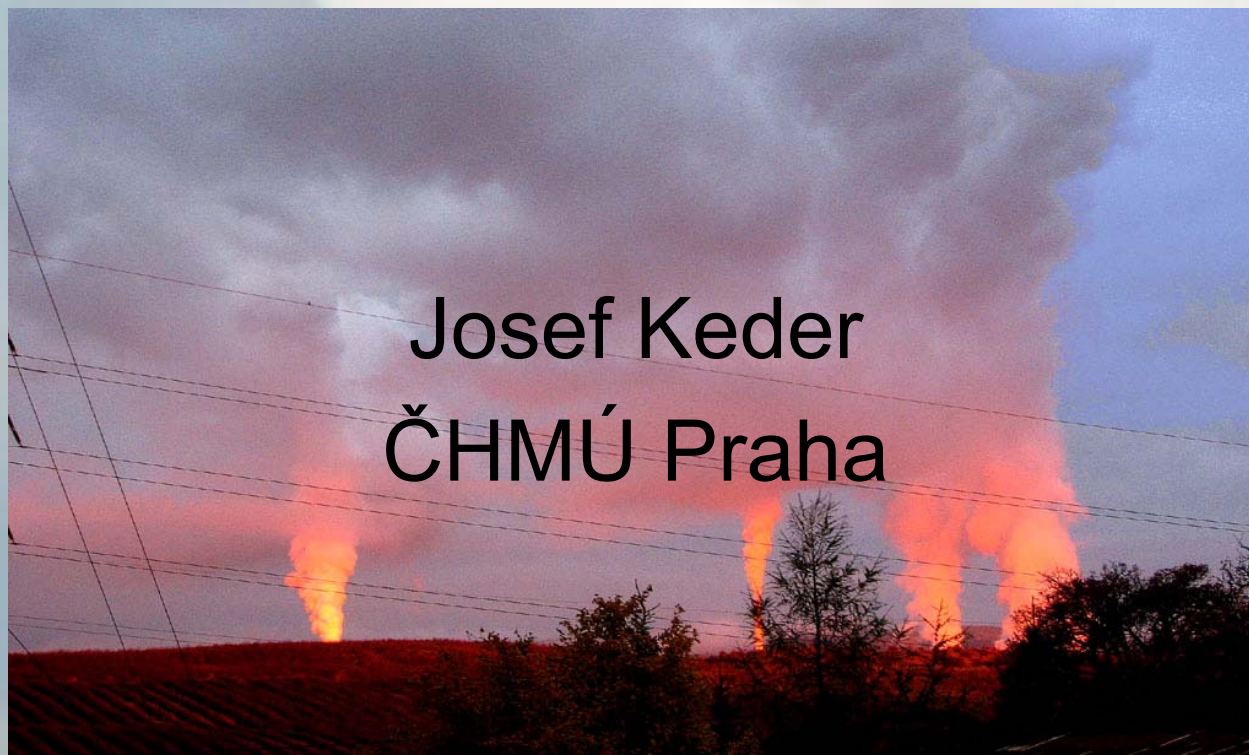
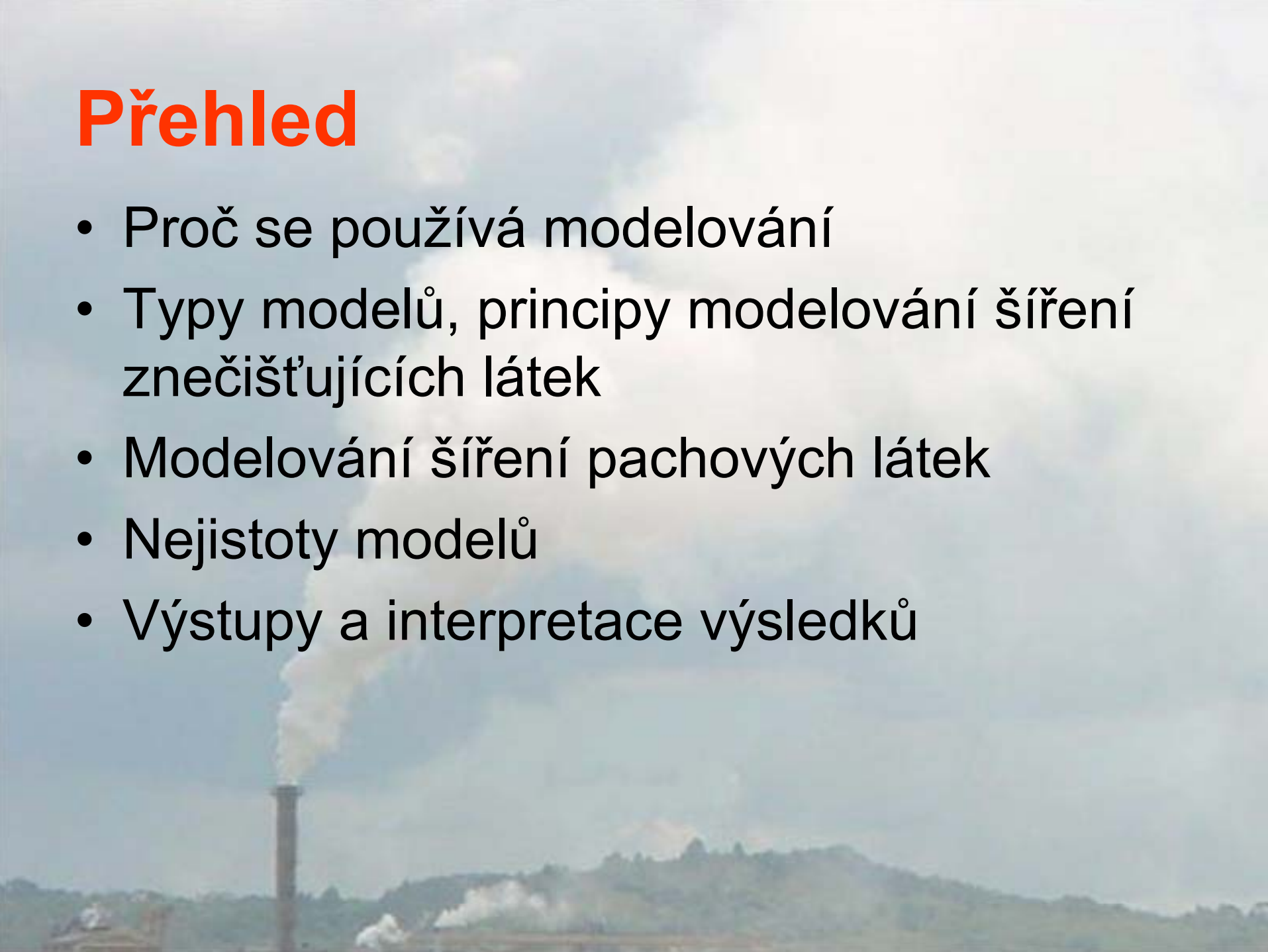


# Modelování znečištění ovzduší



# Přehled

- Proč se používá modelování
- Typy modelů, principy modelování šíření znečišťujících látek
- Modelování šíření pachových látek
- Nejistoty modelů
- Výstupy a interpretace výsledků



# Směrnice EU

- **definují** několik metod (jejich kombinací) pro stanovení prostorového rozložení koncentrací znečišťujících látek
- **účel** - zajištění sledování a řízení kvality ovzduší, zjištění případného překročení imisních limitů
- **automatická měření** – preferována, obecně uznávaná za nejlépe vyhovující metodu

# **Další použitelné metody hodnocení imisní situace podle směrnice**

- **kombinace měření a modelování znečištění ovzduší**
- **modelování znečištění ovzduší**
- **odborný odhad**



# Co je model?

- nástroj
  - nedokonalý a neúplný popis stavu modelovaného objektu
  - řada zjednodušujících předpokladů – nedokonalý popis dějů
- přiblížení k realitě - od modelu nelze očekávat přesný popis reality





# Co jsou modely rozptylu

- Nástroje k **odhadu** stupně ovlivnění kvality ovzduší jedním nebo více zdroji znečišťujících látek
- Procesy transportu, rozptylu a chemických přeměn látek v ovzduší reprezentovány rovnicemi a výpočetními algoritmy
- Realizovány celou řadou počítačových programů

# Co (ne)jsou modely rozptylu

- Po zadání potřebných vstupních údajů o emisích, meteorologii a terénu poskytují tyto programy celou řadu numerických a grafických výstupů
- Kvalifikovanému pracovníku umožňují objektivně posoudit vliv zdrojů
- Modelové výstupy samy o sobě **nelze považovat za absolutně přesnou predikci skutečného stavu ovzduší**

# Srovnání, výhody, nevýhody

- **měření** – přesnější, ale drahá, problém s reprezentativností a prostorovým zobecněním měření v bodě
- **modelování** – méně přesné, ale poskytuje lepší přehled o pokrytí zájmového území
- na rozdíl od měření, modelování umožňuje **predikovat** vývoj imisní zátěže a studovat různé scénáře

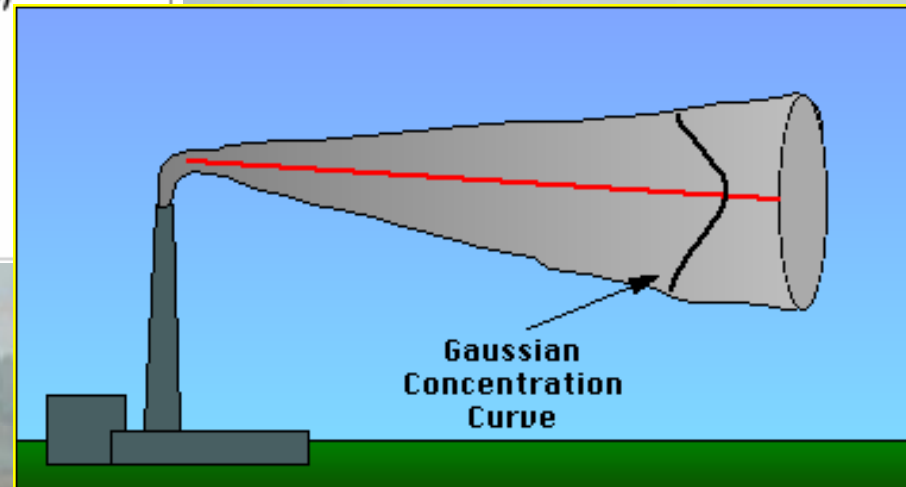
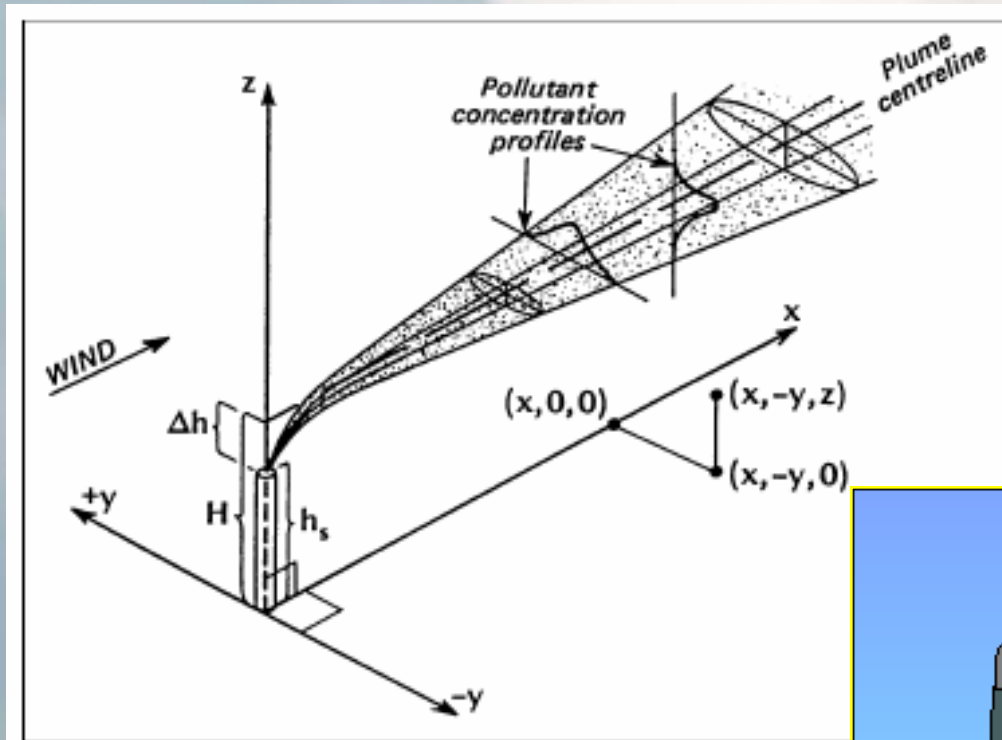


# Typy modelů

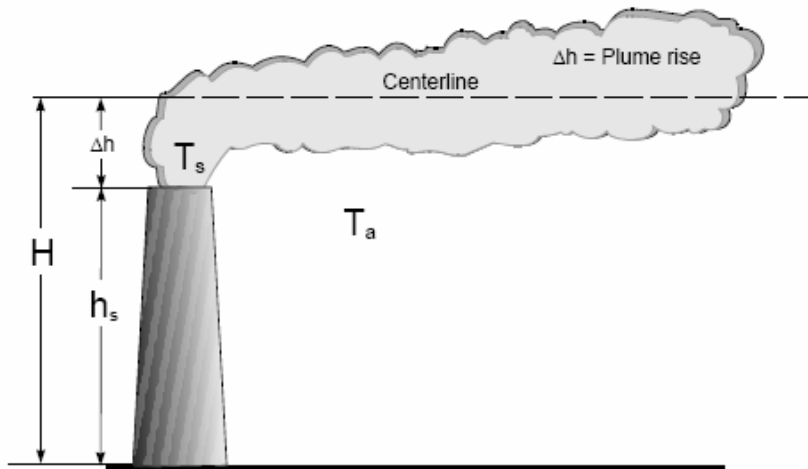
- **Gaussovské vlečkové modely**
- **Lagrangeovské modely**
- **Eulerovské modely**
- **Statistické modely**
- **Modely fyzikální – větrný tunel, vodní nádrž**

# Gaussovské modely (1)

- Vycházejí ze **stacionárního** řešení rovnice turbulentní difúze (emise a proudění konstantní během určitého časového úseku)

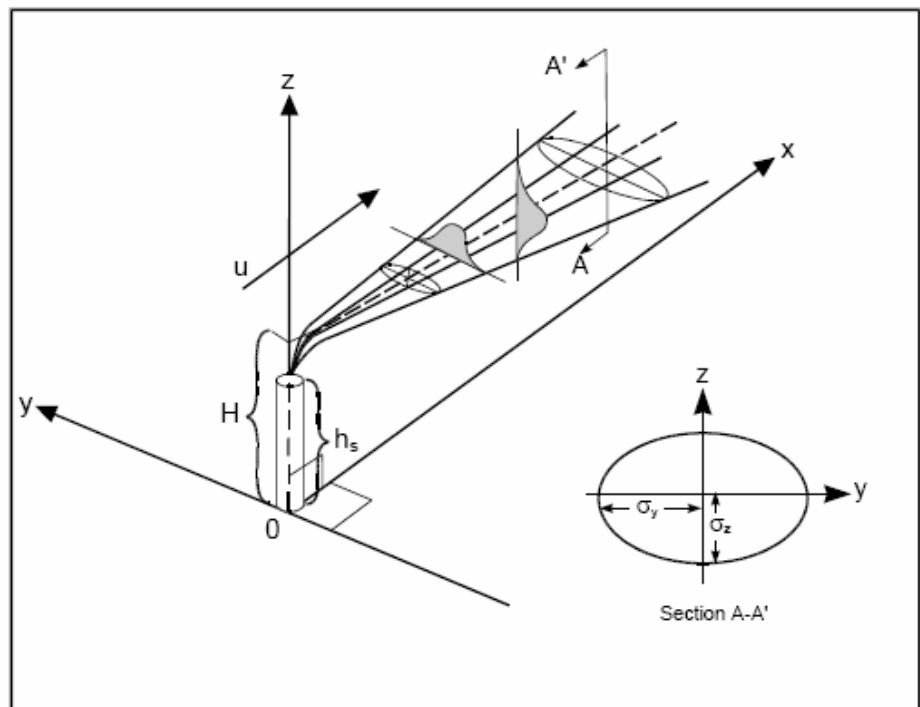


# Gaussovské modely (2)

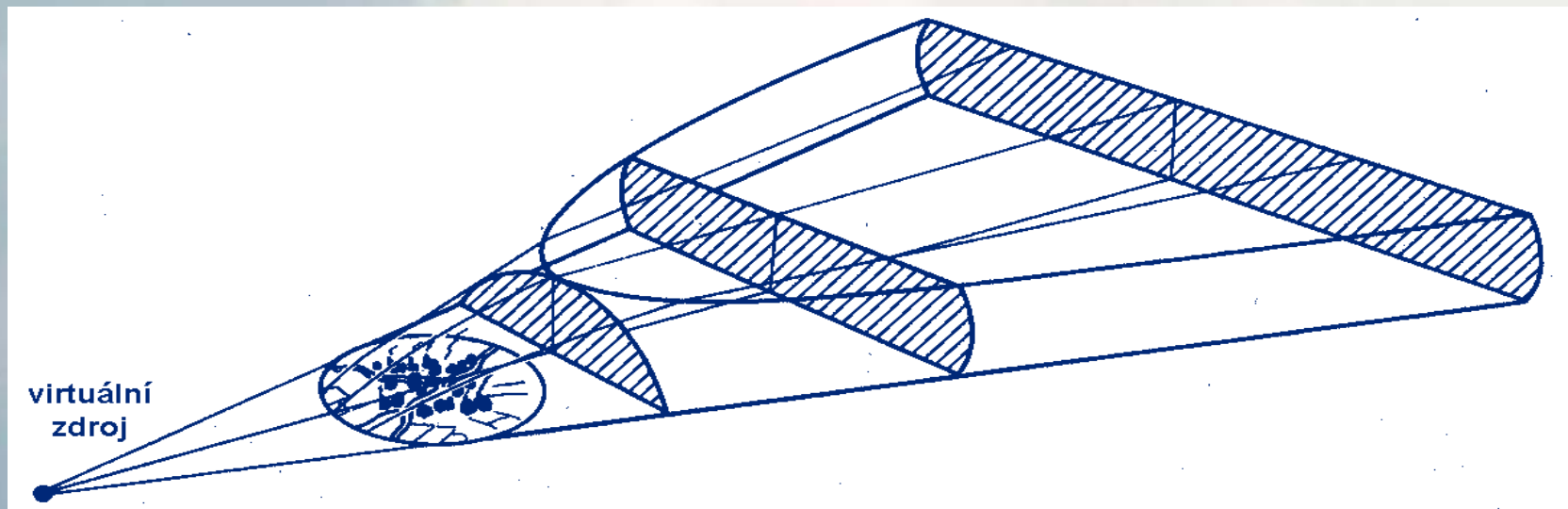


$$\chi = \frac{Q}{2 \pi \sigma_y \sigma_z u} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2} \right\}$$

**Rozptylové parametry („sigmy“) jsou funkcí vzdálenosti a stability**



# Gaussovské modely parametrizace plošných zdrojů



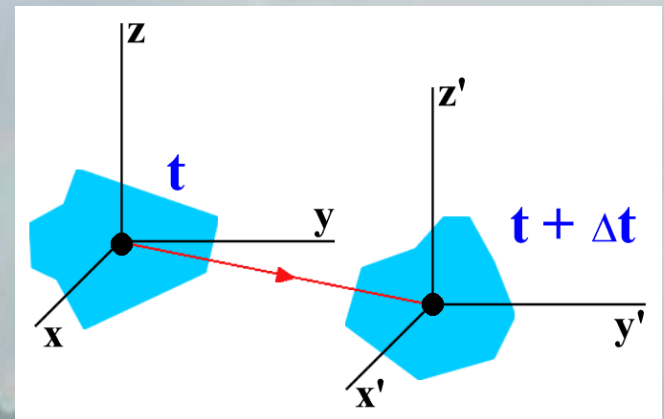
# Gaussovské modely – výhody a nevýhody

- **V praxi často využívány pro svoji jednoduchost, především pro hodnocení imisní zátěže z klimatologického pohledu, screening, „hot-spots“**
- **Obtížná adaptovatelnost na nehomogenní podklad a složitý terén**
- **Problémy spojené se zahrnutím změn v emisích a v meteorologických podmínkách během času**



# Lagrangeovské modely

- Popisují šíření polutantů v atmosféře tak, že „sledují“ individuální vzduchové částice nebo oblaky, které jsou transportovány v poli proudění
- Současně s přenosem dochází k rozptylu

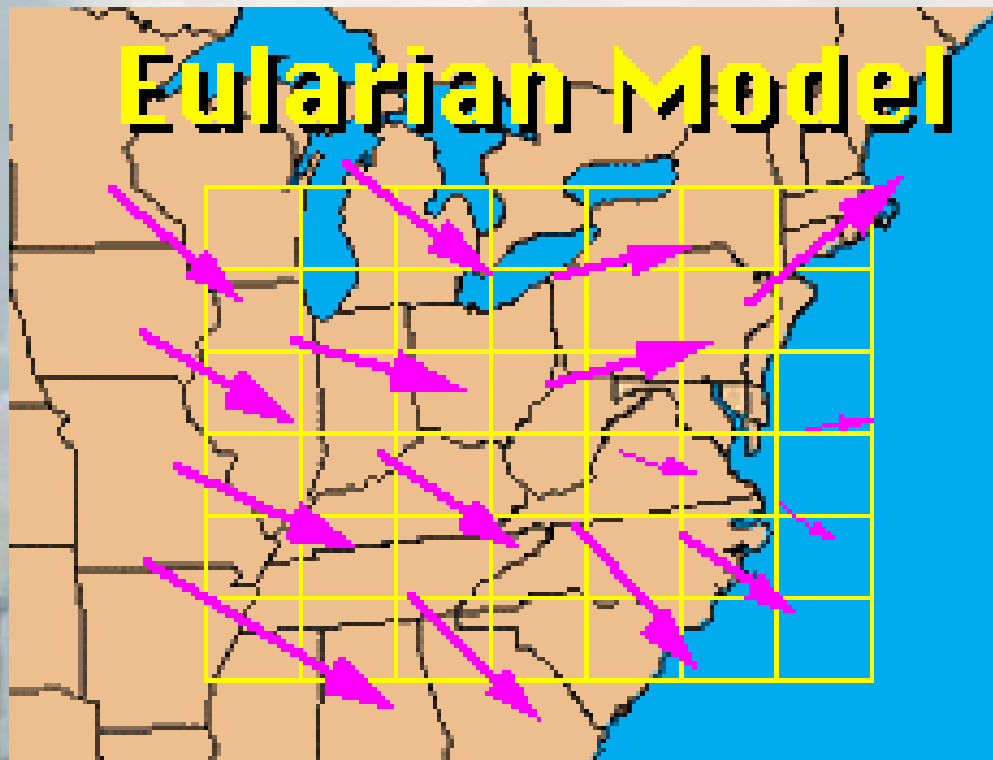


# Lagrangeovské modely – výhody a nevýhody

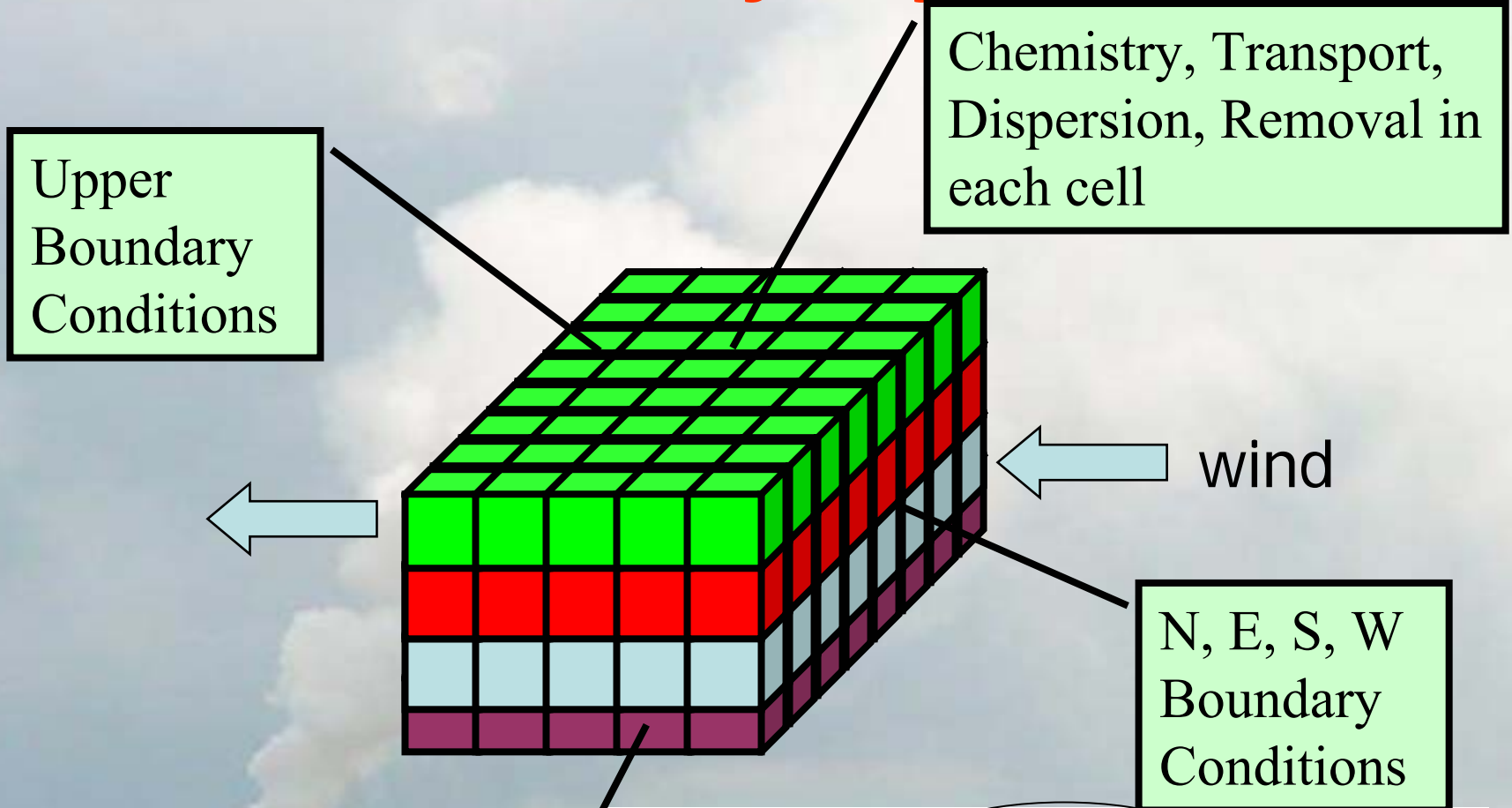
- Dobře použitelné pro popis nestacionárních situací, pro složitý terén a nehomogenní podklad
- Při větším počtu zdrojů (případ městských aglomerací) jsou náročné na operační paměť počítače a strojový čas
- Nejčastěji proto využívány pro vyhodnocení různých havarijních úniků, kdy na vstupu figuruje pouze omezený počet zdrojů
- Plný popis chemizmu atmosféry jen obtížně implementovatelný

# Eulerovské modely

- Založeny na numerickém řešení soustav diferenciálních rovnic (obecně **nestacionárním**)
- Nesledují individuální vzduchové částice při transportu, ale vyšetřují změny koncentrace v **uzlových bodech** souřadnicové sítě



# Eulerovské modely - výpočet



Emissions

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = \underbrace{-\nabla_H \cdot v_H c_l}_{\text{horizontální advekce}} + \underbrace{\left[ \frac{\partial(c_l \eta)}{\partial z} - c_l \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) \right]}_{\text{celkový vertikální transport}} + \underbrace{\nabla \cdot \rho K \nabla (c_l / \rho)}_{\text{turbulentní difuze v subgridovém měřítku}}$$

$$+ \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{\text{chemie}} + \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{\text{emise}} + \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{\text{removal}}$$

# Chemické submodely Eulerovských modelů

- požadavky:
  - podrobné informace o meteorologických podmínkách
  - podrobné informace o podkladu (landuse)
  - podrobné emisní vstupy (včetně biogenních emisí)
  - zahrnutí částicového modelu včetně tvorby sekundárních částic
- nejčastěji používané:
  - CBM-IV (1989)
  - SAPRC99 (2000)
  - různé modifikace

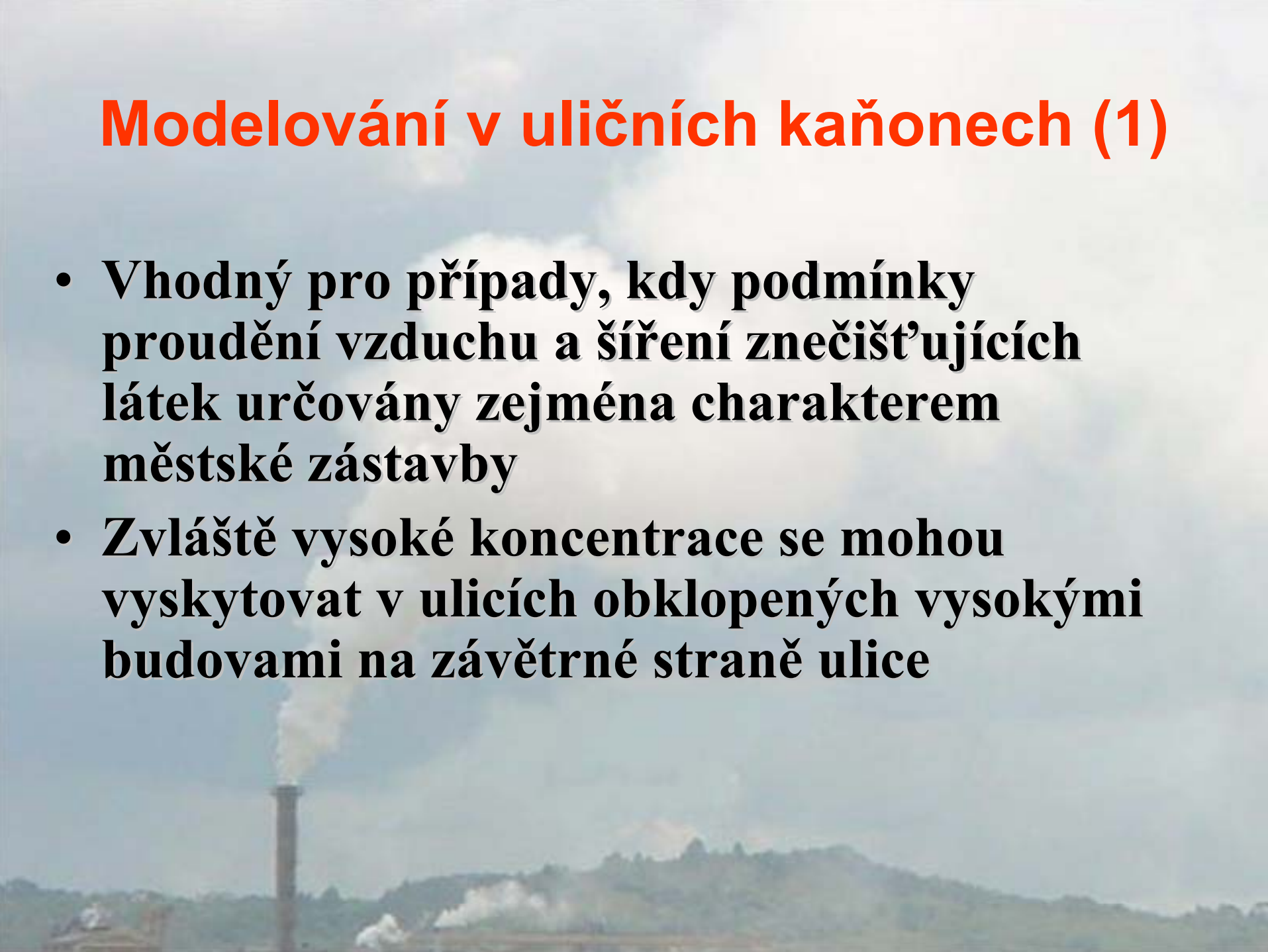


# Statistické modely

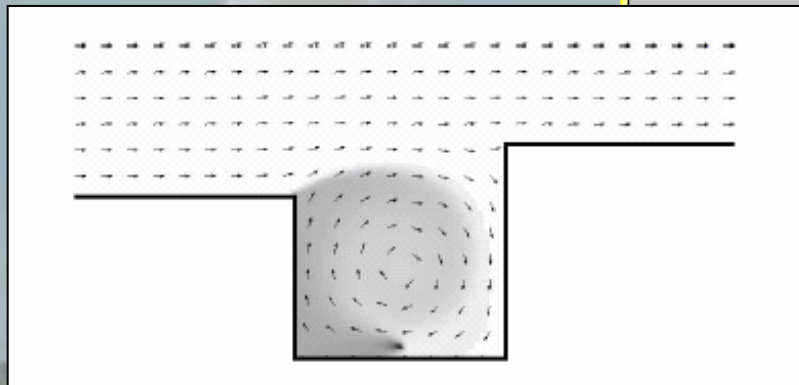
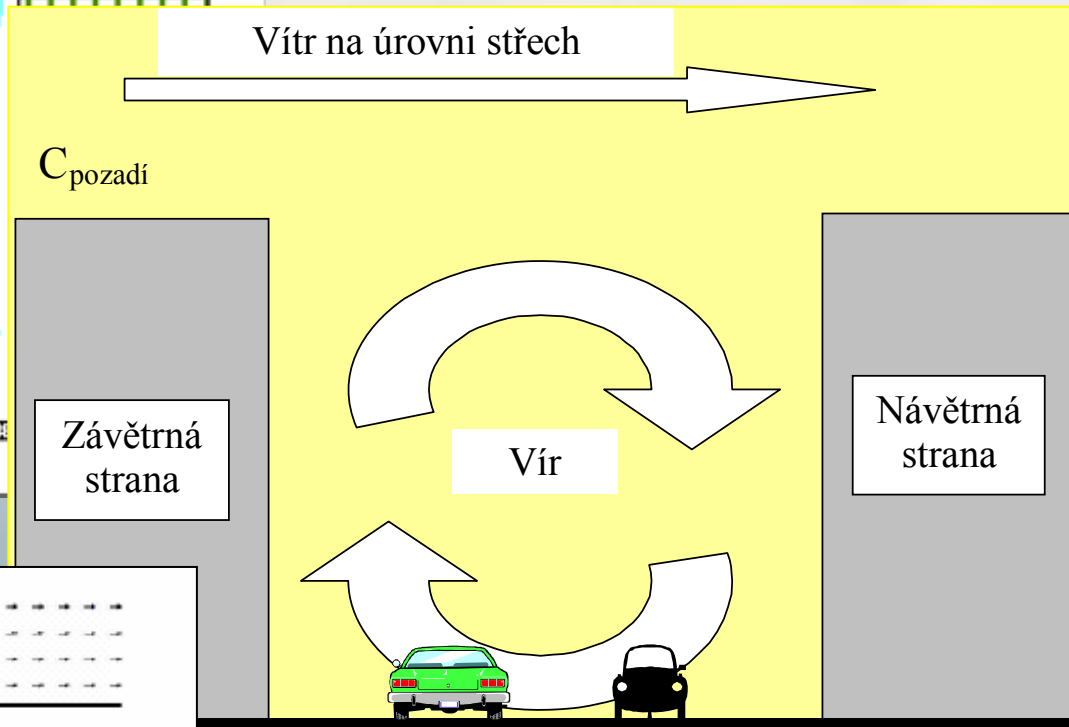
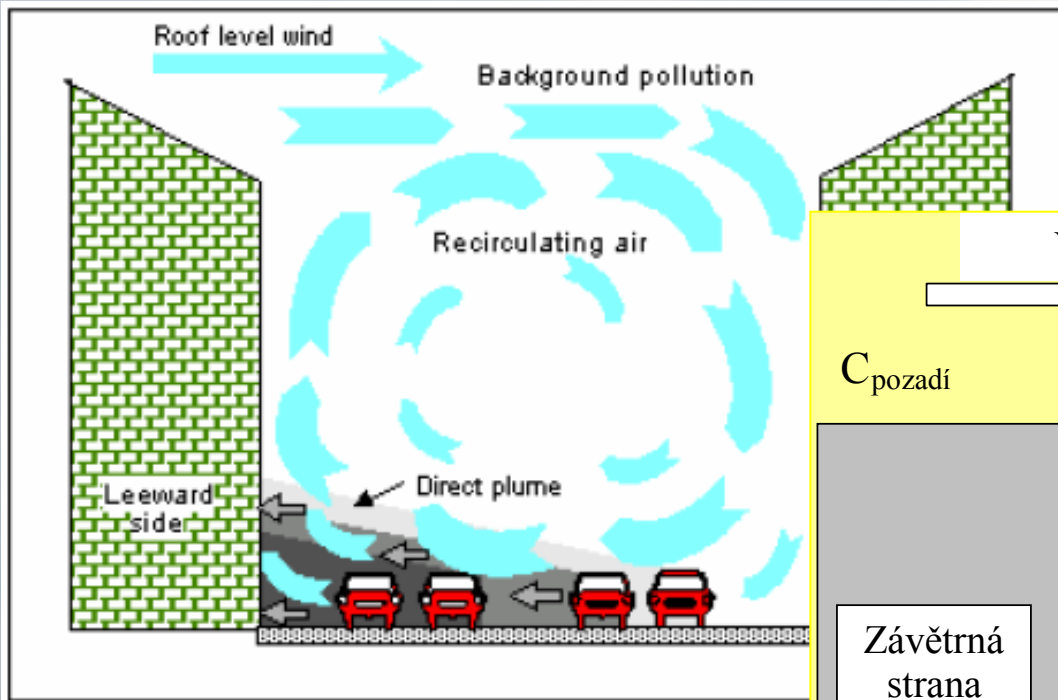
- Nevycházejí z rovnice difúze, založeny na statistických metodách (v současné době nejčastěji na **neuronových sítích** či **Kalmanově filtru**)
- Využívány pro řadu aplikací, jejichž řešení numerickými postupy by bylo příliš náročné (např. pro předpověď vzniku smogových situací)
- **Nevýhoda** - často svázaný s místem, pro něž byly vytvořeny, tudíž obtížně přenositelné jinam

# Modelování v uličních kaňonech (1)

- **Vhodný pro případy, kdy podmínky proudění vzduchu a šíření znečišťujících látek určovány zejména charakterem městské zástavby**
- **Zvláště vysoké koncentrace se mohou vyskytovat v ulicích obklopených vysokými budovami na závětrné straně ulice**



# Modelování v uličních kaňonech (2)



# Fyzikální modely -větrný tunel



Figures 1+2: Inside view of the Peutz wind tunnel; detail of wooden scale model

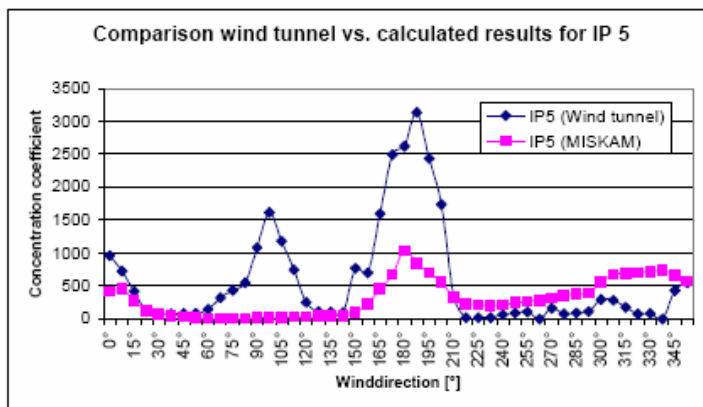


Figure 6: Comparison of wind tunnel and calculated results for immission point 5

# Přehled některých modelů pro využití v ČR

Oblast využití	Znečišťující látky	Model dostupný v ČR
městské území (regionální měřítko)	málo reaktivní – reaktivnější látky, prašný aerosol	ATEM
venkovská území	málo reaktivní – reaktivnější látky, prašný aerosol	SYMOS'97
uliční kaňony	málo reaktivní – reaktivnější látky	AEOLIUS



# Proč modelovat pachové látky – vážný sociálně společenský problém



# Proč modelovat pachové látky

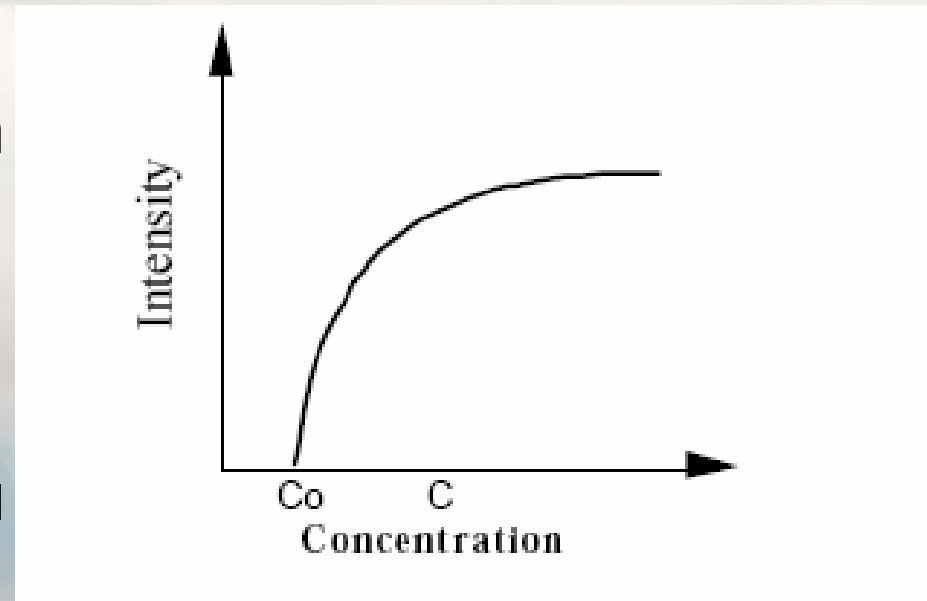
- Přítomnost pachových látek v ovzduší obvykle nevyvolává přímé účinky na lidské zdraví.
- Zápach způsobuje především obtěžování, nicméně ve vážnějších případech se mohou projevit i přímé zdravotní potíže, (nausea, bolesti hlavy nebo dýchací potíže, pocity nepohody)
- Delší expozice pachovým látkám vyvolává psychické potíže jako pocit stísněnosti, podrážděnost, nechutenství a nespavost
- Pachové látky se po odstranění řady akutních problémů, způsobovaných na území ČR „klasickými“ znečišťujícími látkami, dostaly do centra pozornosti veřejnosti a zákonodárců.
- Kromě přímého měření pachové zátěže rovněž požadováno modelování transportu a rozptylu pachových látek v ovzduší, nezastupitelné při oceňování vlivu nově plánovaných zdrojů.

# Fyziologické základy

- Většina vnímaných zápachů vyvolána působením složitých směsí pachových látek
- Lidské vnímání zápachu a emocionální odezva na něj syntetizovány v mozku.
- Vnímání pachu a vzbuzené emoce výrazně ovlivněno životnímu zkušenostmi jednotlivých individuí nebo kulturním prostředím a zvyklostmi lidské skupiny.

# Aspekty vnímání zápachu (1)

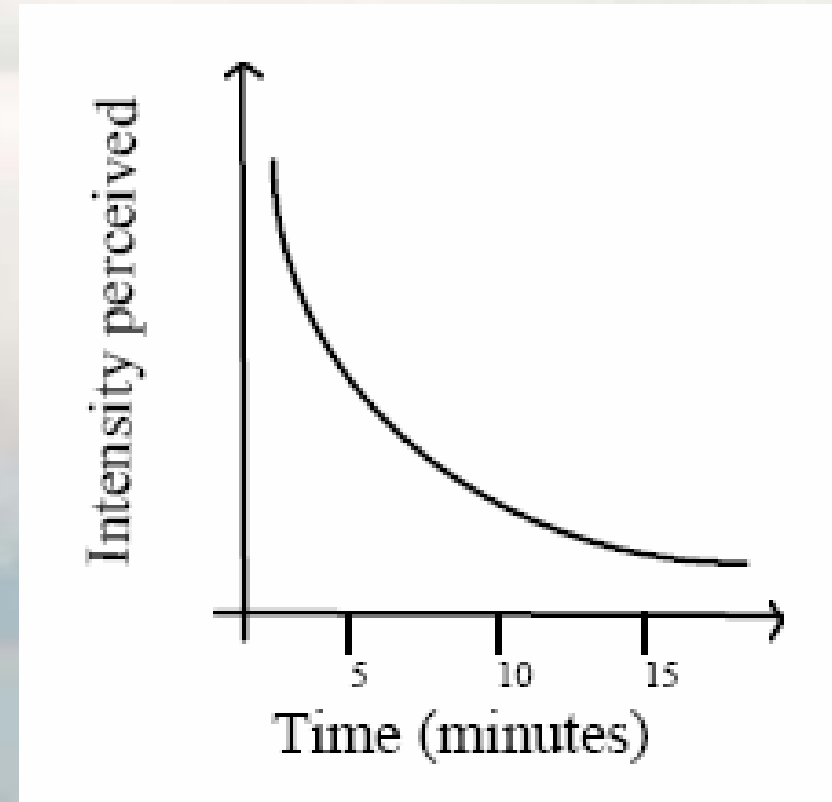
- Intenzita vjemu závisí na logaritmu koncentrace pachové látky
- Při malých koncentracích nos velmi citlivý
- U vysokých koncentrací saturace
- Každý má svoji prahovou koncentraci, mění se např. podle kondice a nálady





# Aspekty vnímání zápachu (2)

- Odezva nosu na pachu velmi rychlá, téměř okamžitá
- Maximální excitace dosažena při krátké expozici
- S rostoucím časem expozice odezva slábne, adaptace





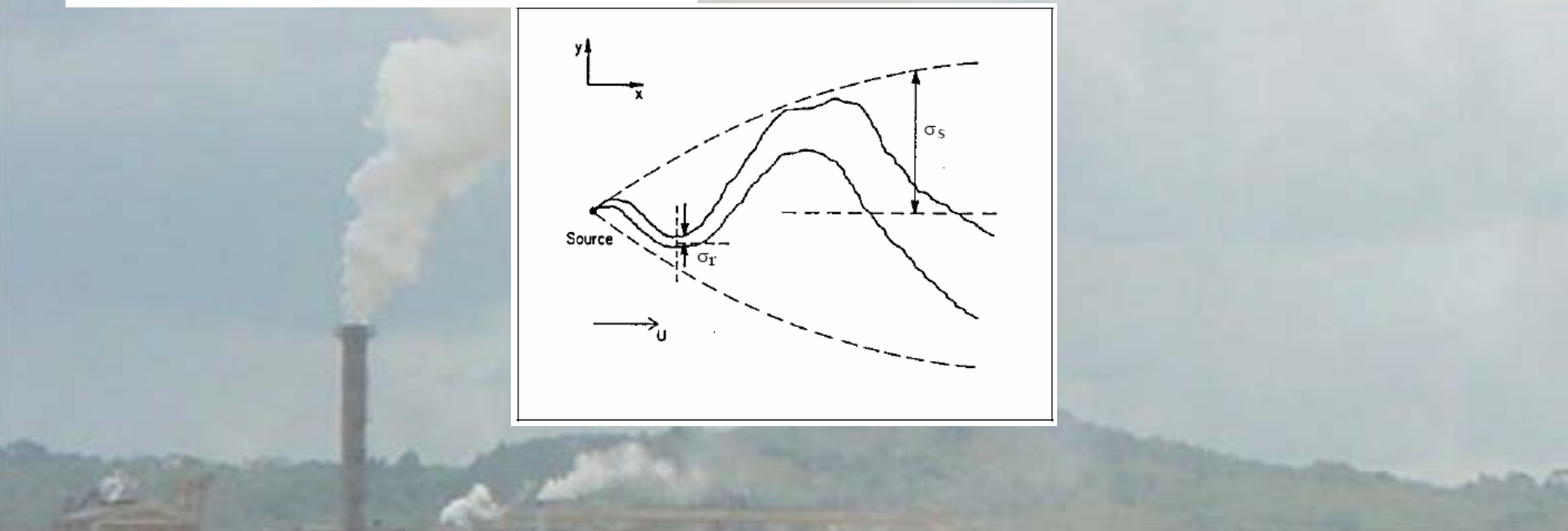
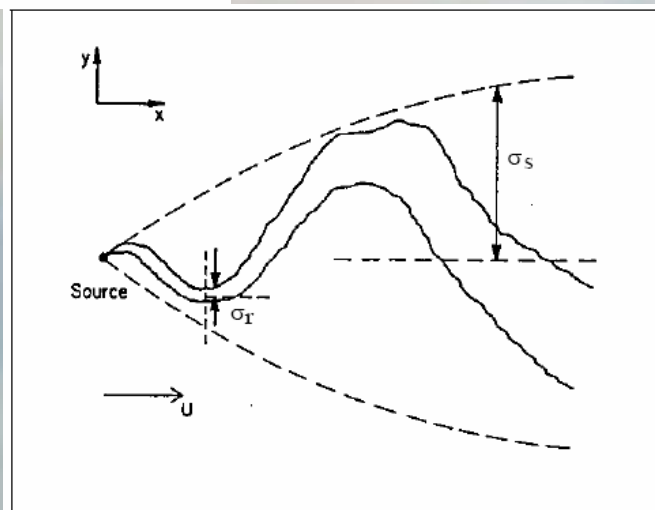
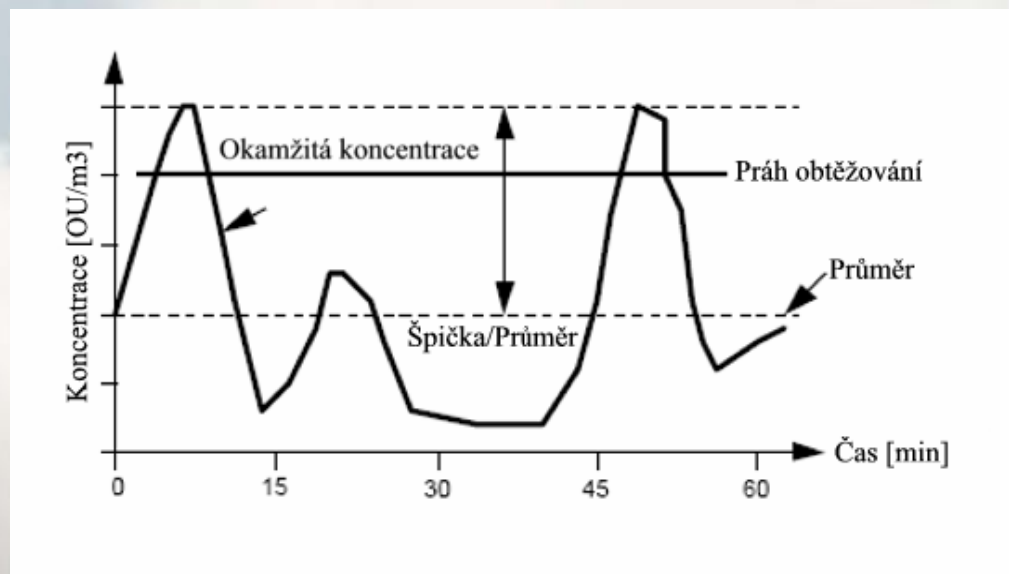
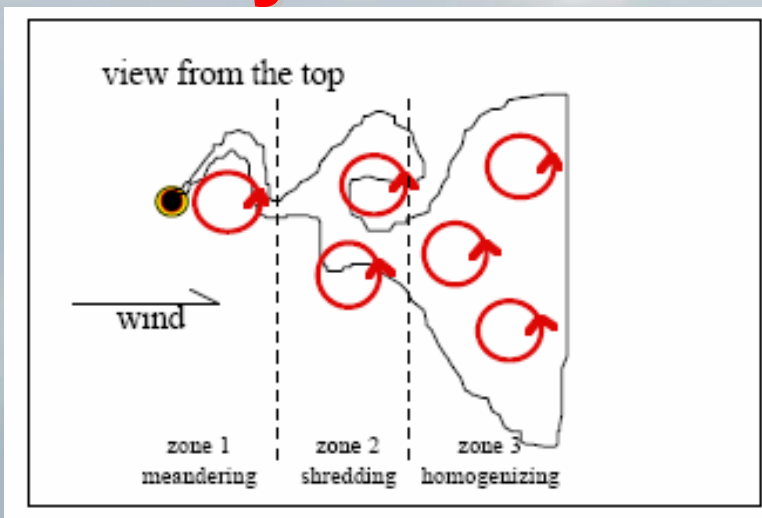
# Specifika a odlišnosti modelování pachových látek (1)

- ✓ Působení pachových látek není obvykle kumulativní a nelze tudíž přistupovat k jejich modelování stejným způsobem jako u znečišťujících látek
- ✓ Účinky pachových látek z různých zdrojů se mohou vzájemně ovlivňovat, např. jedna látka maskuje druhou nebo naopak zesiluje její účinek.
- ✓ Pachové látky se mohou v ovzduší transformovat v důsledku změn teploty, vzdušné vlhkosti a slunečního záření způsobem, který dosud není uspokojivým způsobem popsán.
- ✓ Nejkratší časový interval, pro který rozptylové modely predikují průměrné koncentrace, je obvykle 1 hodina.

# Specifika a odlišnosti modelování pachových látek (2)

- ✓ Během tohoto intervalu může koncentrace pachové látky fluktuovat kolem této průměrné hodnoty v širokém rozmezí
- ✓ Smyslová reakce člověka na pach je velmi rychlá, obvykle v řádu milisekund, nejdéle v řádu trvání jednoho nádechu
- ✓ Intenzita vjemu je určena **špičkovými hodnotami** koncentrace, nikoliv průměrnou hodnotou
- ✓ Úvahy založené na průměrné koncentraci by vedly k podcenění účinků koncentrací pachových látek, do modelu musí být proto zabudována možnost výpočtu **okamžitých koncentrací** nebo **korekce** na poměr Špička/Průměr (Peak-to-Mean, P/M ratio)

# Fluktuace koncentrace pachové látky ve vlečce



# Postup navržený pro modely v ČR

- Pro přepočet průměrných koncentrací na špičkové se používá sada převodních faktorů, stanovených na základě rozsáhlé studie společnosti Katestone Scientific
- Špičková koncentrace je definována jako maximální koncentrace, pro kterou je pravděpodobnost překročení v průběhu sledovaného časového intervalu rovna  $10^{-3}$
- Na základě teoretických úvah, statistické analýzy dostupných měření, numerických simulací a měření v aerodynamickém tunelu byla navržena sada poměrů P/M, vztažená na hodinový průměr koncentrace, získaný rozptylovým modelem.
- Hodnota poměru závisí na **typu zdroje, stabilitě atmosféry a vzdálenosti od zdroje.**

# Zdroje nejistot v modelech (1)

- Ze statistického hlediska je predikce koncentrací pomocí rozptylových modelů založena na tzv. ansámblovém průměru velkého množství opakování stejných událostí
- Tyto události popsány a vzájemně odlišeny hodnotami určité sady parametrů, například
  - směr a rychlost větru
  - teplotní zvrstvení
  - výška směšovací vrstvy
  - emisní charakteristiky



## Zdroje nejistot v modelech (2)

- Na základě znalosti frekvence výskytu takovýchto „typických“ situací odvozeny hodnoty koncentrací
- V rámci každého takto popsaného typu situace však mohou existovat nerozlišitelné rozdíly v detailech atmosférického proudění a turbulence
- Důsledek - odchylky jednotlivých realizací koncentračního pole od ansámblového průměru
- Tudíž - i kdyby model perfektně predikoval ansámblový průměr, může tento zdroj nejistoty způsobit kolísání koncentrace v rozpětí **cca 50%**
- Tento zdroj nejistot je vlastní modelovanému systému, **není jej možné odstranit**



# Další zdroje nejistot

Mají původ

- v kvalitě měření meteorologických prvků a koncentrací
- v odhadu emisí zdrojů
- ve způsobu popisu fyzikálních a chemických procesů, na nichž je model založen
- Tyto zdroje nejistot jsou redukovatelné a kvalitu modelů je možno zlepšovat cestou minimalizace jejich vlivu

# Statistická kritéria pro hodnocení rozptylových modelů

- Základní idea hodnocení kvality modelů
  - porovnání modelem predikovaných koncentrací  $C_{pr}$  s reálně naměřenými hodnotami  $C_{ob}$
  - lze konstruovat dva základní typy charakteristik úspěšnosti modelů
    - Míru difference
    - Míru korelace

# Kritéria pro hodnocení modelů (1)

- Míra difference reprezentuje kvantitativní odhad velikosti rozdílu mezi modelem předpovídanými a naměřenými hodnotami
- Míra korelace kvantifikuje těsnost statistické vazby mezi pozorovanými a modelovanými hodnotami

# Kritéria pro hodnocení modelů (2)

- Nejčastěji používané charakteristiky
  - *Vychýlení (Bias)*, charakterizující střední chybu modelu
  - *Standardizované vychýlení (fractional bias)*, normalizovaná bezrozměrná charakteristika, nabývající hodnot mezi +2 (extrémní nadhodnocení) a -2 (extrémní podhodnocení), přičemž pro dokonalý model je rovna nule. Hodnoty +0.67 a -0.67 po řadě odpovídají dvojnásobnému nadhodnocení (podhodnocení) skutečnosti modelem

# Kritéria pro hodnocení modelů (3)

- Nejčastěji používané charakteristiky
  - *Normalizovaná střední kvadratická chyba*, postihuje rozptyl celého datového souboru. Malé hodnoty této statistiky odpovídají kvalitnějšímu modelu
  - *Korelační koeficient* je známou a široce používanou charakteristikou těsnosti lineární vazby mezi dvěma náhodnými veličinami. Hodnota blízká 1 ukazuje na dobrou kvalitu modelu
  - *Násobek 2* (factor of two) vystihuje procentuální podíl modelem predikovaných hodnot, které jsou větší než polovina a menší než dvojnásobek odpovídající měřené koncentrace. Ideální hodnota  $FA2=100\%$

# Limitní hodnoty kritérií

- **Vychýlení (bias) blízké 0**
- **Standardizované vychýlení v intervalu**  
 $-0.5 < FB < +0.5$
- **Faktor 2 v intervalu**  
 $FA2 > 0.80$





# Hodnocení modelu SYMOS – roční data z ČR

- Použity výsledky modelových výpočtů ročních průměrů koncentrace oxidu siřičitého a sumy oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) na území ČR v pro roky 1999 a 2000
- Celkem použito více než 300 měřicích bodů pro oxid siřičitý a 170 stanic pro oxidy dusíku

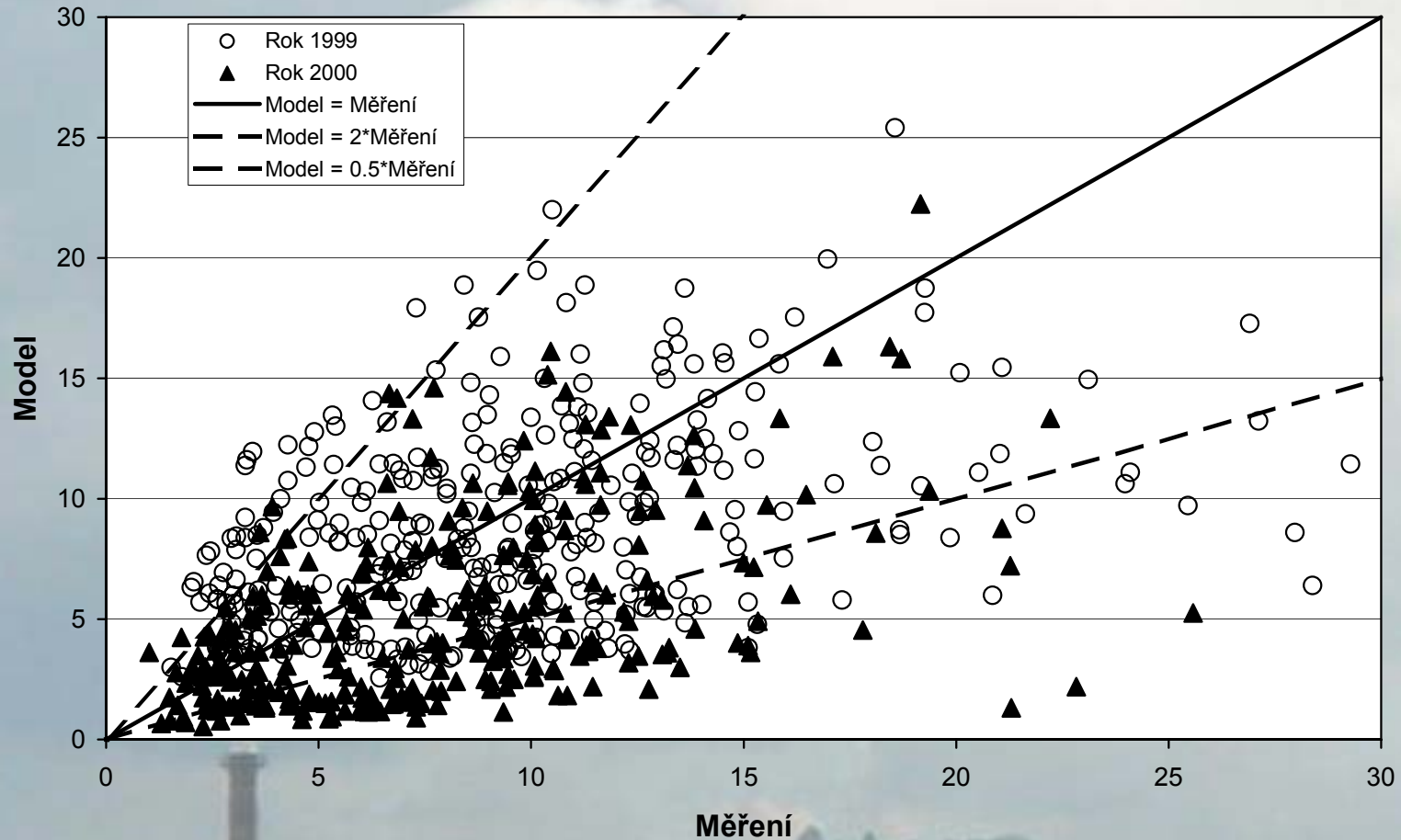
# Příklad - hodnocení SYMOS pro oxid siřičitý

- Vychýlení a standardizované vychýlení ukazuje na mírné podcenění ročních koncentrací modelem
- Rozdíl velmi malý pro všechny typy stanic v obou letech
- Hodnota faktoru 2 nepřesáhla ani v jenom z případů navrženou limitní hodnotu 80%, nejlepší hodnota tohoto parametru byla dosažena v roce 1999 pro venkovské stanice

# Hodnocení SYMOS, SO<sub>2</sub>

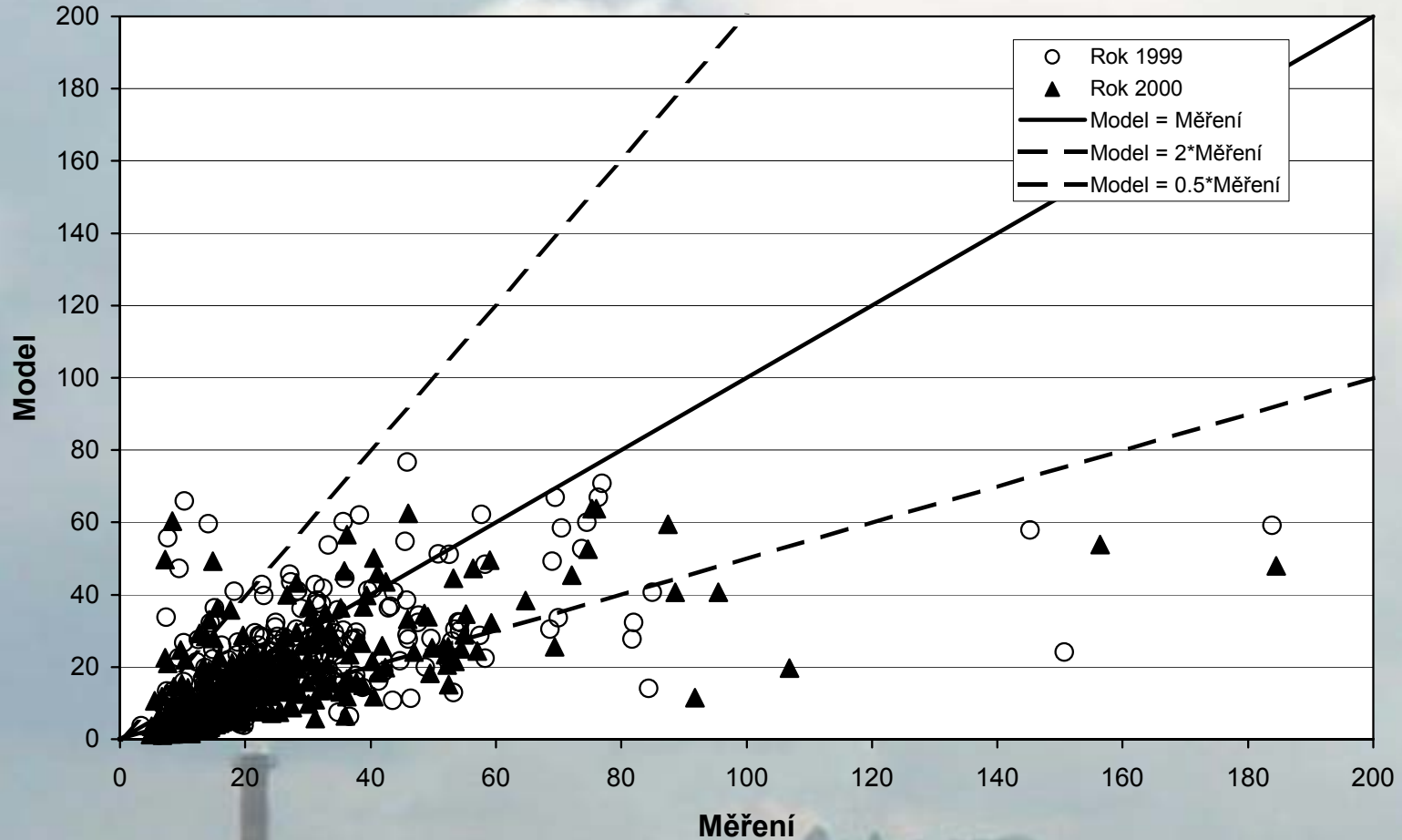
Porovnání naměřených hodnot s výsledky modelu SYMOS pro roky 1999 a 2000

Oxid siřičitý, průměrné roční koncentrace



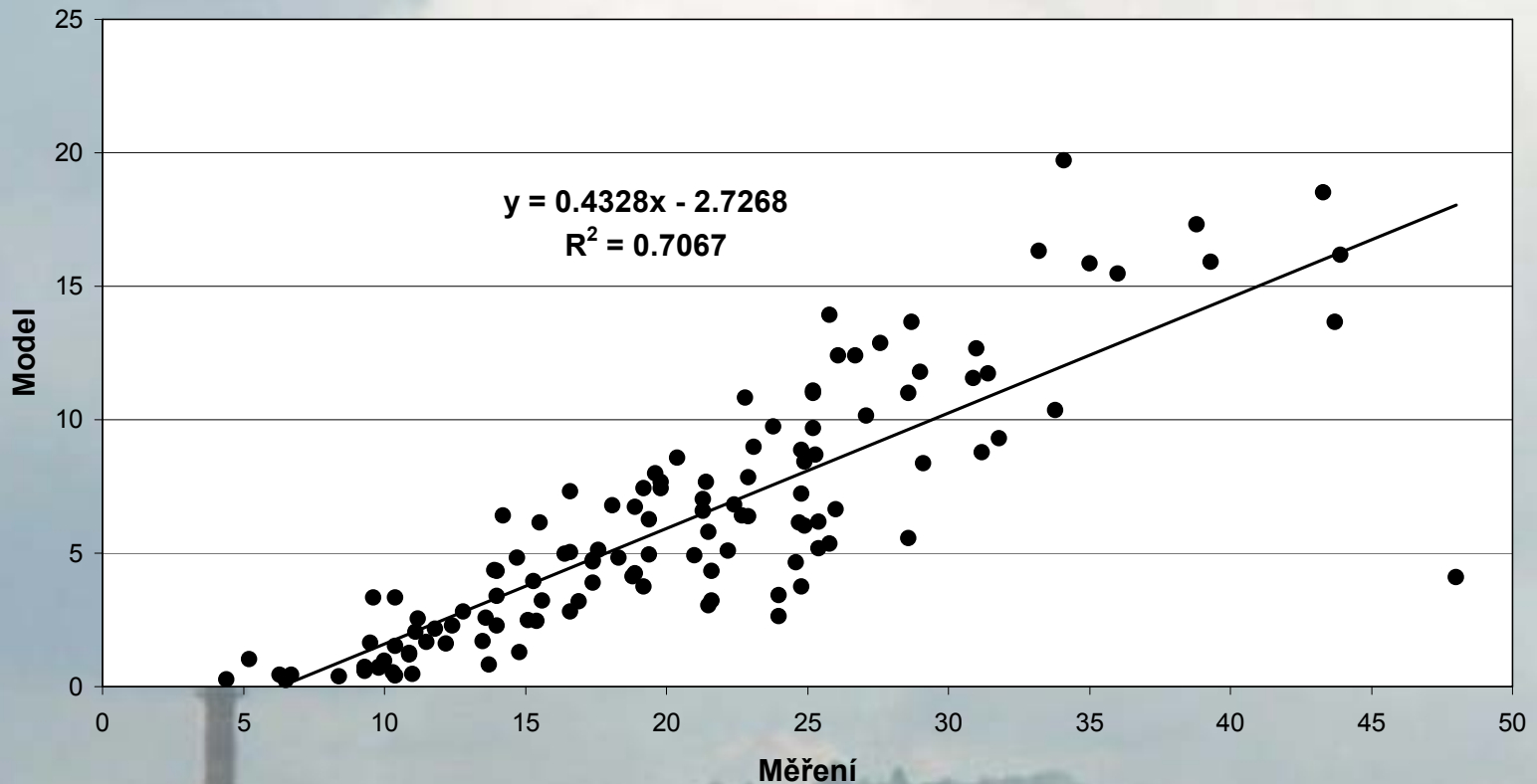
# Hodnocení SYMOS, NO<sub>x</sub>

Porovnání naměřených hodnot s výsledky modelu SYMOS pro rok 1999 a 2000  
Oxidy dusíku, průměrné roční koncentrace

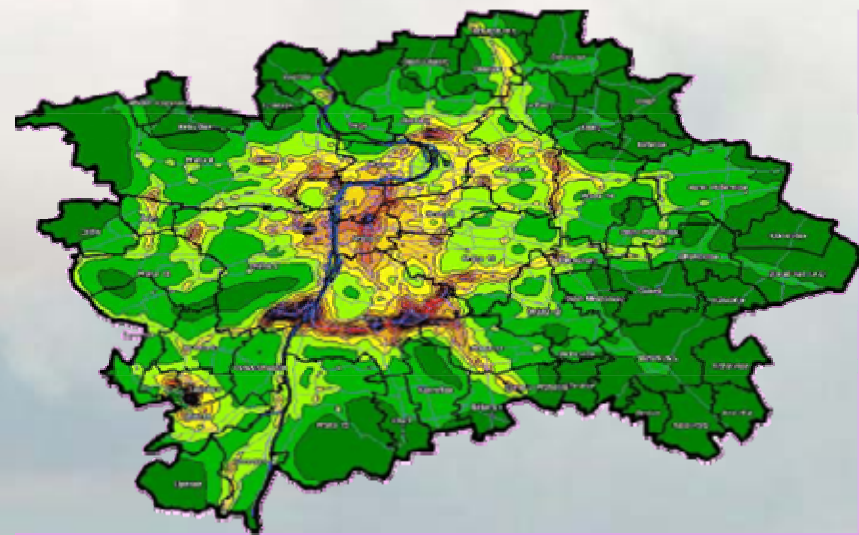
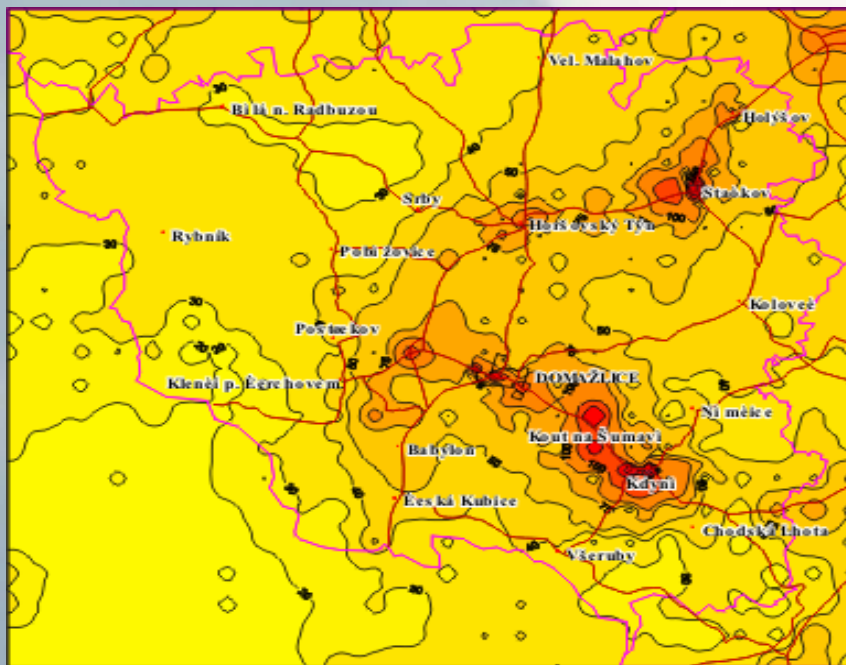


# Hodnocení SYMOS, NO<sub>2</sub>

Porovnání naměřených hodnot s výsledky modelu SYMOS pro rok 2002  
Oxid dusičitý, průměrné roční koncentrace

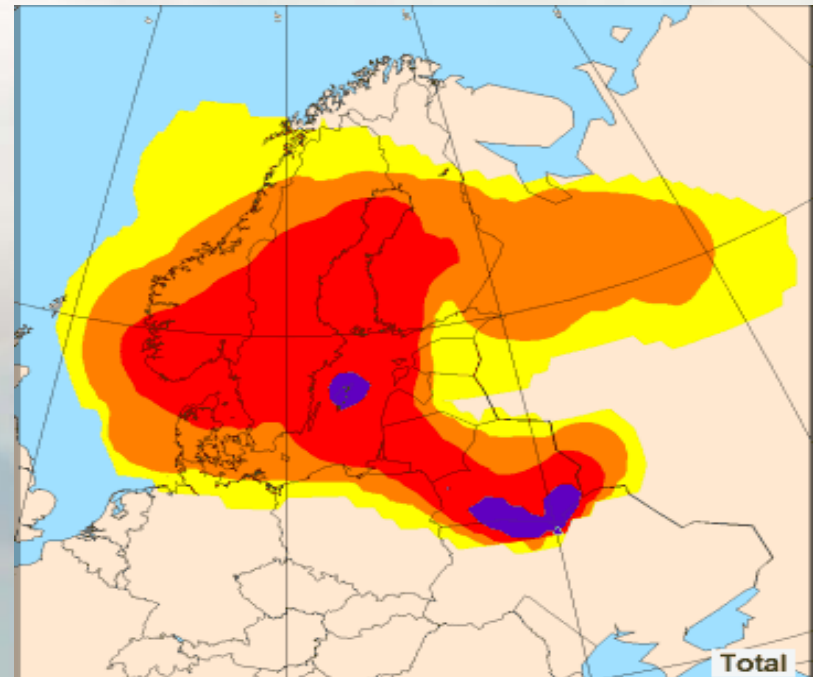


# Příklady výstupů Gaussovské modely

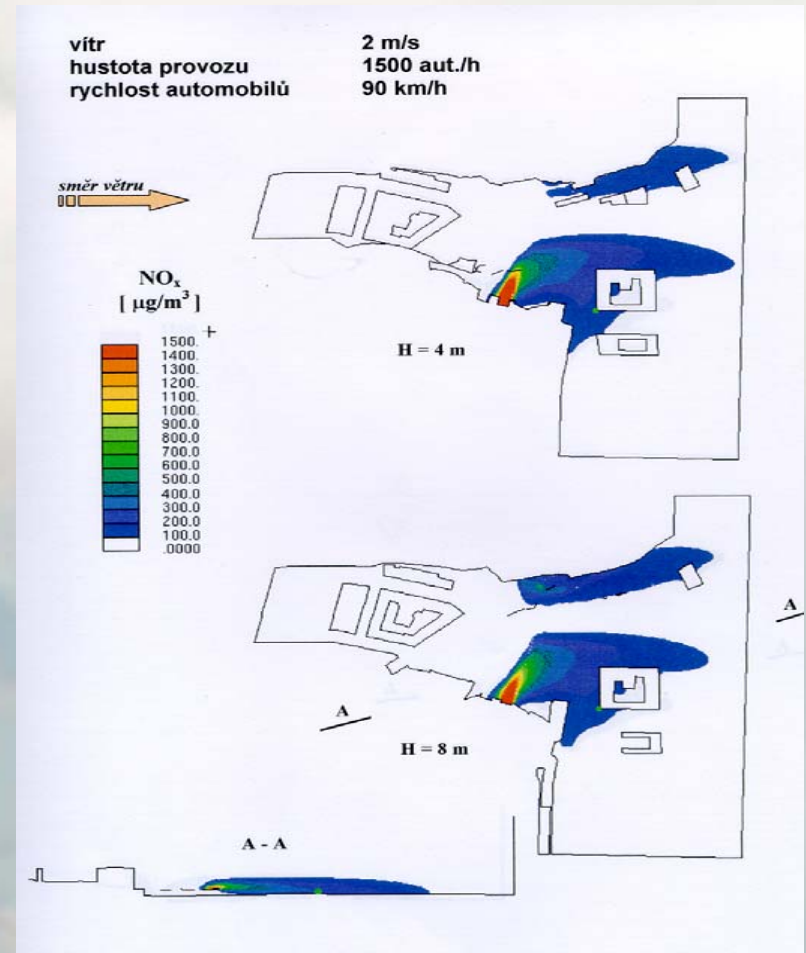
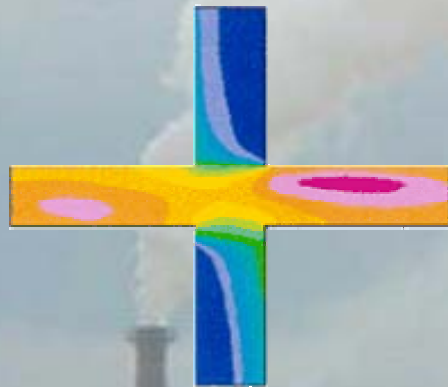
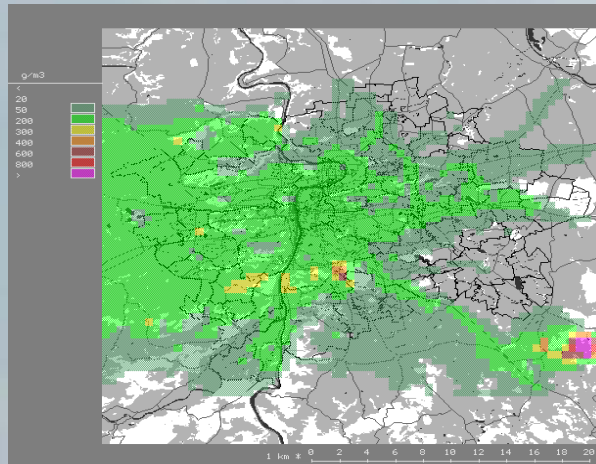




# Příklady výstupů Lagrangeovské modely

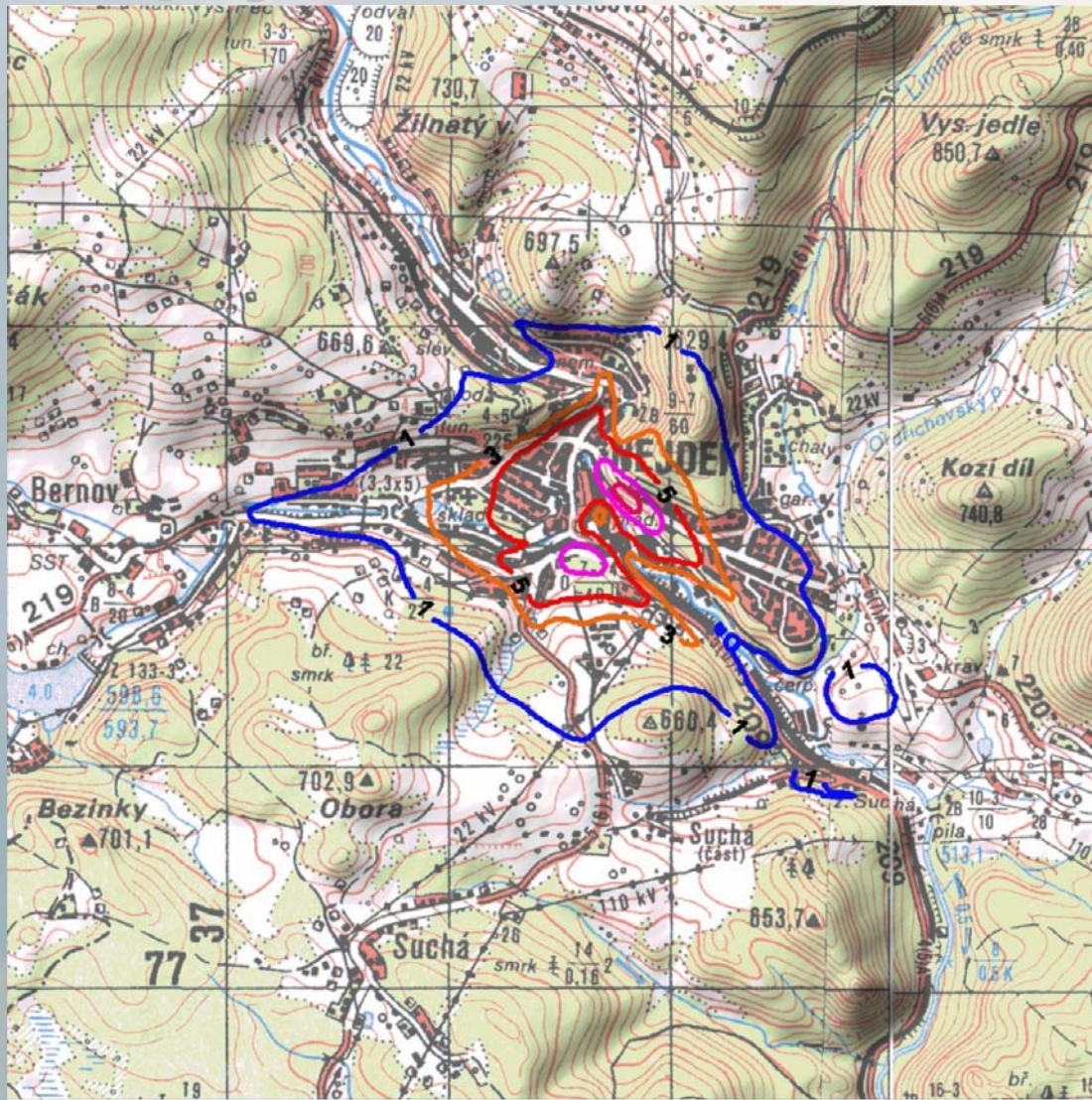


# Příklady výstupů Eulerovské modely





# Příklad výstupu pachového modelu Rozptyl v hornatém terénu



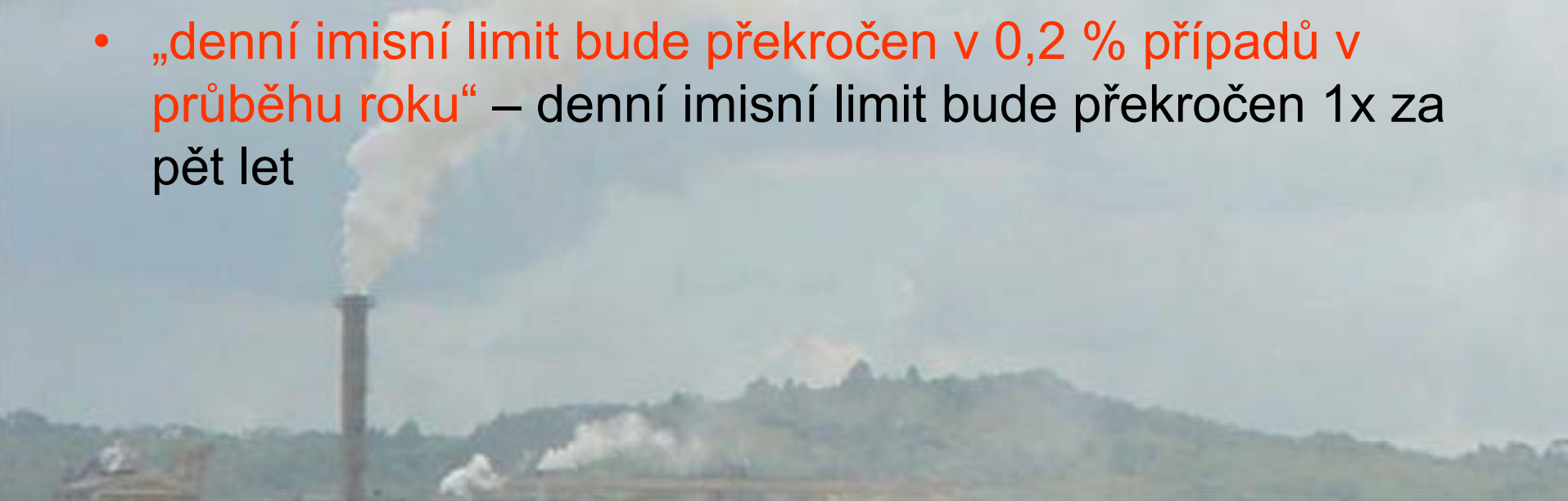
# Interpretace výsledků hodnocení pole koncentrací





# Příklady závěrů v RS

- „vypočtená koncentrace  $\text{NO}_2$  je  $199,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  – imisní limit je splněn“ – indikace oblastí s možnými problémy
- „zdroj působí koncentrace  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  – v oblasti nejsou žádné problémy“ – není zohledněno imisní pozadí
- „modelové koncentrace  $\text{PM}_{10}$  od zdrojů jsou  $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  – imisní limit splněn“ – nejsou zohledněny sekundární částice a resuspenze
- „denní imisní limit bude překročen v 0,2 % případů v průběhu roku“ – denní imisní limit bude překročen 1x za pět let





# Závěr

- šíření znečišťujících látek ovlivňuje řada faktorů lokálního i regionálního měřítka
- vstupní data nejsou přesná ani úplná ke komplexnímu popisu podmínek v ovzduší
- modelové výpočty slouží jako přiblížení k realitě
- výsledky nelze používat jako **přesná** čísla
- interpretace výsledků vyžaduje zkušenosti a znalost lokality

# Poselství

při použití modelů a jejich výsledků je nutné



**MYSLET !!!**