



**Institute of Computer Science**  
**Academy of Sciences of the Czech Republic**

**Pravděpodobnostní modelování  
lokálních povětrnostních podmínek  
s aplikacemi v dopravě**

Pavel Juruš

Technical report No. 1018

January 3, 2008



**Institute of Computer Science**  
**Academy of Sciences of the Czech Republic**

## **Pravděpodobnostní modelování lokálních povětrnostních podmínek s aplikacemi v dopravě <sup>1</sup>**

Pavel Juruš

Technical report No. 1018

January 3, 2008

### Abstract:

Je navrhován systém pro lokální predikci koncentrací chemických látek a pole větru. Systém bude zaměřen na modelování šíření chemické látky po jejím úniku do ovzduší při havárii nebezpečného nákladu. Důležitými plánovanými vlastnostmi jsou regionální měřítko, využití realistického a aktuálního popisu atmosféry a pravděpodobnostní predikce. Model je koncipován tak, aby mohl být spuštěn pro libovolné místo havárie, které je předem neznámé. To umožňuje použití i dalších aplikací, řešících disperzi v regionálním měřítku. Použité metody lze navíc zobecnit pro předpověď dalších veličin popisujících atmosféru, pro které je typický lokální charakter. Těžištěm práce je zkoumání vztahu skutečných a modelových hodnot. K analýze a predikci chyb modelů bude využito nejnovějších poznatků ze stochastického modelování atmosféry, asimilace dat a statistického postprocesingu.

### Keywords:

ensemble models, atmospheric modelling, stochastic forecasts

---

<sup>1</sup>Výzkum reportovaný v této zprávě byl podporován projektem GA AV ČR 1ET 400300414 “Matematické modelování čistoty ovzduší s aplikacemi v krizovém managementu” programu “Informační společnost” a institucionálním výzkumným záměrem AV0Z10300504

## Anotace

Numerické modely počasí jsou už několik desetiletí neodmyslitelnou součástí predikčních systémů v národních meteorologických centrech. Díky rozvoji počítačů a výraznému zvýšení a zároveň zlevnění výpočetních kapacit dochází ke zdokonalování modelů a ke zvyšování jejich prostorového rozlišení. Zároveň se zvětšuje počet institucí, které tyto modely provozují, ať už pro výzkumné, vzdělávací, nebo komerční účely. Pro aplikace v různých oborech jsou často potřeba speciální předpovědi a klasická předpověď je svým rozlišením nevyhovující.

Cílem návrhu je systém pro predikci veličin s výrazně lokálním charakterem. Systém bude zaměřen na modelování šíření chemické látky, po jejím úniku do ovzduší při havárii nebezpečného nákladu. Důležitými plánovanými vlastnostmi jsou regionální měřítko, využití realistického a aktuálního popisu atmosféry a pravděpodobnostní predikce.

Model je koncipován tak, aby mohl být spuštěn pro libovolné místo havárie, které je předem neznámé. To umožňuje použití i dalších aplikací, řešících disperzi v regionálním měřítku. Použité metody lze navíc zobecnit pro předpověď dalších veličin popisujících atmosféru, pro které je typický lokální charakter. Těžištěm práce je zkoumání vztahu skutečných a modelových hodnot. K analýze a predikci chyb modelů bude využito nejnovějších poznatků ze stochastického modelování atmosféry, asimilace dat a statistického postprocesingu.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Numerické modelování atmosféry a aplikace v silniční dopravě</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Statistika výstupů z modelu a asimilace dat</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Pravděpodobnostní předpovědi</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Grantová podpora</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Reference</b>	<b>16</b>

# 1 Úvod

Počasí hraje důležitou úlohu v řadě lidských činností. Z hlediska letecké, námořní a pozemní dopravy je počasí důležitým faktorem ovlivňujícím její bezpečnost a plynulost. Pro pozemní dopravu je především důležitý stav vozovky – vozovka může být v závislosti na počasí například suchá, mokrá, popřípadě pokrytá sněhem či ledovkou. Silný vítr a další atmosférické jevy, které ovlivňují viditelnost, jako mlha nebo déšť, mohou rovněž podstatně zhoršit podmínky pro pozemní dopravu. Typickou vlastností mnohých důležitých jevů je jejich lokální charakter. Například sjízdnost vozovky se může diametrálně lišit v měřítku stovek nebo dokonce desítek metrů.

Současný stav dynamické meteorologie umožňuje pomocí numerických modelů atmosféry modelovat a předpovídat počasí v horizontu několika dnů. Typické horizontální rozlišení těchto modelů je 10-100 km. Numerické modely atmosféry jsou výpočetně velmi náročné a výkon počítačů je limitujícím faktorem, který často neumožňuje použití jemnějšího rozlišení, sofistikovanějších matematických modelů a většího objemu vstupních dat. S rozvojem výpočetní techniky dochází ke zdokonalování modelů a od numerické přepovědi se očekávají stále přesnější predikce ve stále vyšším prostorovém a časovém rozlišení.

Lokální predikce atmosféry je užitečná v řadě případů. Zde je několik typických příkladů:

1. Rychlost a směr větru u farmy větrných elektráren, nebo dokonce v místě lopatek konkrétní větrné turbíny.
2. Predikce ledovky v určitém místě vozovky.
3. Koncentrace škodlivých látek v ovzduší v daném místě v hustě osídlené oblasti.
4. Krátkodobá předpověď pole větru a modelování šíření unikajících chemikálií v blízkosti místa havárie, ke které může dojít při převozu nebezpečné látky.

Všechny čtyři příklady jsou velmi užitečné aplikace environmentálního modelování, které mají několik společných charakteristik. Zajímají nás lokální vlastnosti atmosféry a lokálnost je zde podstatnou vlastností. Používané numerické modely počasí a kvality ovzduší jsou sice nejlepším dostupným zdrojem informací, ale postrádají jemné prostorové rozlišení. Je proto potřeba použít další postup, jak výstupy těchto modelů zpracovat na predikci veličin v požadovaném místě a



Obrázek 1: Příklady, kdy je výhodná lokální predikce počasí.

**Vlevo:** Díky nepříznivému počasí a vzniklé ledovce a sněhu na vozovce dochází každoročně na dálnici D1 k řadě dopravních nehod. *Dálnice D1 u Rousínova*. Autor: Radek Miča, MAFA Zdroj: idnes.cz.

**Vpravo:** Množství vyrobené elektrické energie závisí na lokálním poli větru, které se může výrazně odlišovat od předpovědi v hrubším měřítku. *Palm Springs, California*. Autor: Zbyněk Šlajchrt, Zdroj: osobní archiv.

rozlišení. Protože se jedná o přeškálování výstupů s hrubším rozlišením na jemnější, používá se termín *downscaling*.

Modely používané pro *downscaling* závisí na konkrétní aplikaci a dostupných datech. Takovéto modely využívají kromě výstupů v hrubém rozlišení například aktuální a historická pozorování, údaje z jiných podobných lokalit, nebo podrobnou lokální orografii terénu. Možná nejčastěji zkoumaný problém z výše uvedených příkladů je problém predikce pole větru u větrných elektráren. V literatuře se pro *downscaling* používají například statistické regresní modely, neuronové sítě, nebo modely proudění v jemném rozlišení. Přehled tematiky předpovídání výkonu větrných elektráren lze najít i s odkazy na další literaturu např. v (Giebel et al., 2003), nebo v (Landberg et al., 2003).

Důležitým aspektem zmiňovaných příkladů je, že čím jemnější je měřítko předpovědi, tím větší smysl má zároveň s hodnotou předpovídat i konfidenční intervaly nebo dokonce pro negaussovské veličiny (např. námrazu) předpovídat pravděpodobnostní rozdělení. Některé predikované veličiny jsou velmi citlivé na stav atmosféry (např. v chemii atmosféry) a při vysokém rozlišení chybí prostorové průměrování, které pomáhá vyhlazovat pole v hrubším měřítku. To může vést k velkým chybám predikce a často bývá informace o chybě predikce stejně důležitá, nebo dokonce důležitější, než predikce samotná.

Čtvrtý z příkladů je svým způsobem nejobtížnější. Rozbor této problematiky a návrh řešení bude hlavním tématem výzkumu. Není zde dostatek informací pro tvorbu modelu *downscalingu*, ať už deterministického, nebo statistického. Díky tomu, že není dopředu známo místo havárie, nejsou k dispozici podrobná data pro model proudění v jemném rozlišení. Rovněž díky jedinečnosti

havárie, nejsou k dispozici historická data z modelu nebo z pozorování. To znamená, že nelze využít většinu tradičních postupů statistického modelování.

## **2 Numerické modelování atmosféry a aplikace v silniční dopravě**

První návrhy řešit problém předpovědi počasí pomocí systému parciálních diferenciálních rovnic pocházejí z počátku 20. století (Bjerknes, 1904). Bjerknes vyslovil tyto nutné a postačující podmínky pro možnost matematického modelování počasí:

1. Stav atmosféry v daném čase musí být znám s dostatečnou přesností.
2. Musí být známy fyzikální zákony, které dostatečně přesně popisují časový vývoj atmosféry.

První proveditelný postup, jak počasí při splnění výše uvedených podmínek predikovat, uvedl L. F. Richardson v roce 1922 (Richardson, 1922). Navrhl numerické řešení metodou konečných diferencí a provedl i experiment, kdy se pokusil ručně předpověď spočítat. První užitečné předpovědi přišly ovšem až s nástupem počítačů v 50. letech (Charney et al., 1950; Staff Members of the Institute of Meteorology, University of Stockholm, 1954). Od té doby dochází k postupnému zpřesňování počátečních podmínek (především díky zvyšování počtu a kvality pozorování a díky sofistikovanějším metodám asimilace dat) a k vylepšování modelů (numerické modely atmosféry využívají stále komplexnější a realističtější matematický popis dějů v atmosféře).

S rostoucí přesností a užitečností numerických předpovědí přichází obrovské množství aplikací v řadě oborů. Pro dopravu jsou informace o počasí velice důležité. Především u letecké a námořní dopravy je v současnosti téměř nemyslitelný provoz bez podrobných informací o stavu a očekávaném vývoji počasí.

V pozemní dopravě je v souvislosti s počasím v centru zájmu především využití informací numerických modelů atmosféry ke zvýšení bezpečnosti. V České Republice došlo podle informací Policie ČR (Ředitelství služby dopravní policie Policejního prezidia ČR, 2007) v roce 2006 k celkem 187 965 nehodám, při nichž bylo usmrceno 956 lidí. Tyto statistiky patří k nejpříznivějším za poslední roky. Přesto to znamená, že v roce 2006 zemřel v průměru každých 9,2 hodin na silnici člověk. Každou hodinu pak byla způsobena hmotná škoda přesahující 1 milión Kč.

Například sněžení výrazně zvyšuje nehodovost, podle statistik na silnici I-90 v USA až pětinásobně (Goodwin, 2003). Podrobnější představu o vlivu počasí na dopravní nehody si lze potom udělat například z evropských statistik projektu European Road Safety Observatory (SafetyNet, 2006) (viz tabulka 1). Obširná analýza vlivu počasí na dopravu, která se zabývá stavem v USA v období 1995–2001 je v Goodwin (2002). Z této analýzy vyplývá, že v daném období 7 let bylo 22% z celkového počtu dopravních nehod způsobeno během nepříznivého počasí. Lze očekávat, že význam vlivu počasí na počet nehod bude v ČR obdobný.

	sucho	mlha	jiné	děšť	sníh kroupy	silný vítr	celkem
Belgie	833	5	6	86	7	9	1.096
Dánsko	274	4	0	55	2	1	341
Řecko	1.278	11	33	151	5	6	1.484
Španělsko	3.049	60	52	437	17	28	3.643
Francie	3.973	100	64	573	24	32	4.766
Irsko <sup>1</sup>	234	9	0	43	4	2	301
Itálie	3.683	49	730	590	22	8	5.082
Lucembursko <sup>2</sup>	21	0	0	14	0	0	52
Nizozemsko <sup>1</sup>	835	15	0	67	7	3	940
Rakousko	674	10	0	97	34	3	818
Portugalsko	861	26	0	124	1	1	1.024
Finsko	268	6	0	22	14	0	323
Švédsko	343	15	0	54	3	0	430
Velká Británie	2.570	21	48	396	19	0	3.106
EU-14	18.896	331	933	2.709	159	93	23.406
% podle počasí	80,7%	1,4%	4,0%	11,6%	0,7%	0,4%	100,0%

Tabulka 1: Počet smrtelných nehod podle povětrnostních podmínek a státu, rok 2004

Údržba cest v zimě stojí nemalé finanční prostředky a poškozuje půdu, vegetaci, spodní vody, vozovku i automobily. Proto je výhodnější aplikovat protinámrazové ošetření vozovky před vznikem ledovky, náklady pak bývají mnohem menší než chemické odmrazování až poté, co ledovka vznikla. Při neošetření mohou být ovšem ztráty mnohem vyšší, zejména díky zvýšené nehodovosti nebo případné neprůjezdnosti. Řada článků se zabývá odhadem těchto rizik (Norrman et al., 2000; Eriksson and Norrman, 2001; Ramakrishna and Viraraghavan, 2005) a popřípadě analýzou scénářů typu náklady-ztráta (cost-loss scenarios, Berrocal et al. (2007); Roulston et al. (2006)). Další práce se pak snaží vylepšit samotnou predikci ledovky, a to jak deterministickými modely, které popi-

<sup>1</sup>Data z roku 2003

<sup>2</sup>Data z roku 2002



sují fyzikální mechanismy vzniku ledovky, tak různými statistickými metodami (Chapman et al., 2001a,b; Shao, 1998; Sass, 1992).

Další důležitou oblastí pozemní dopravy, kde je výhodné využívat numerické modely atmosféry, je doprava nebezpečných nákladů. Problematika dopravy nebezpečných nákladů je velice komplexní a široká a zahrnuje řešení legislativních, administrativních, telematických i technických problémů. Prvořadým úkolem je zajistit maximální bezpečnost a kontrolu během přepravy a rychlé a efektivní zásah v případě nehody (Svítek and Pelikán, 2004; Transportation Research Board, 1983; Erkut and Verter, 1995; Kara and Verter, 2004). Pro plánování a případnou operativní volbu cesty je aktuální předpověď počasí důležitým prvkem pro podporu rozhodování. Další studie se zabývají modelováním šíření látek v případě havárie. Existují práce zabývající se přímo havarijními úniky při transportu nebezpečných nákladů (Scenna and Santa Cruz, 2005), dále celá řada prací zabývajících se havarijními úniky a disperzním modelováním obecně, například Brandt et al. (1996); Vincze et al. (2006); Albritton et al. (1997).

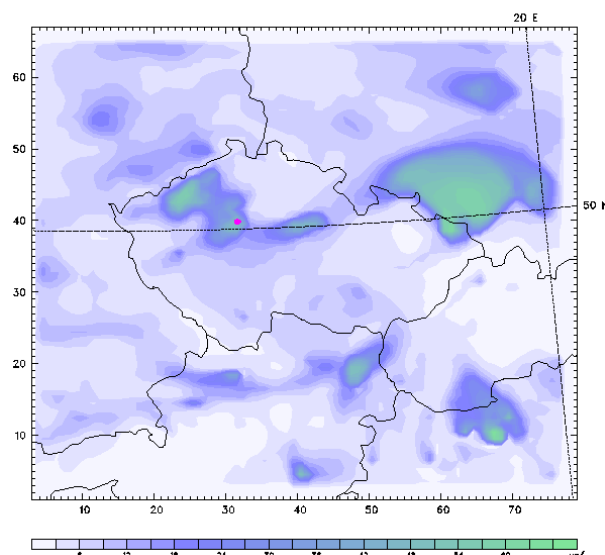
Většinu používaných modelů lze velmi zjednodušeně zařadit do jedné ze dvou kategorií:

- Idealizované modely, které se často zaměřují na výzkum jednoho aspektu modelování a používají značně zjednodušující předpoklady v ostatních oblastech (modelování ve dvou dimenzích, konstantní a homogenní pole větru, konstantní gaussovská disperze apod.).
- Modely snažící se o co nejvěrnější zachycení reality. Tyto modely zpravidla používají informace o stavu atmosféry z numerických předpovědních modelů počasí, mohou obsahovat nejrůznější moduly, kupříkladu pro modelování chemických a fotochemických procesů v atmosféře, nebo pro výpočet teploty a šíření kouře při spalování. Tyto modely jsou užitečné především pro modelování v měřítku cca 10km a hrubším, často jsou používány pro výpočet transportu látek v rámci kontinentu.

### **3 Statistika výstupů z modelu a asimilace dat**

Pro vyhodnocování numerických modelů atmosféry je nejpřirozenější porovnat výstupy modelu s naměřenými hodnotami. Pokud zjistíme rozdíl mezi pozorováním a odpovídající modelovou hodnotou, můžeme zvolit dva základní postupy, jak tento rozdíl pro další modelování zohlednit. Jeden

Dataset: CURRENT 2 RIP: NO22  
NO2 conc.



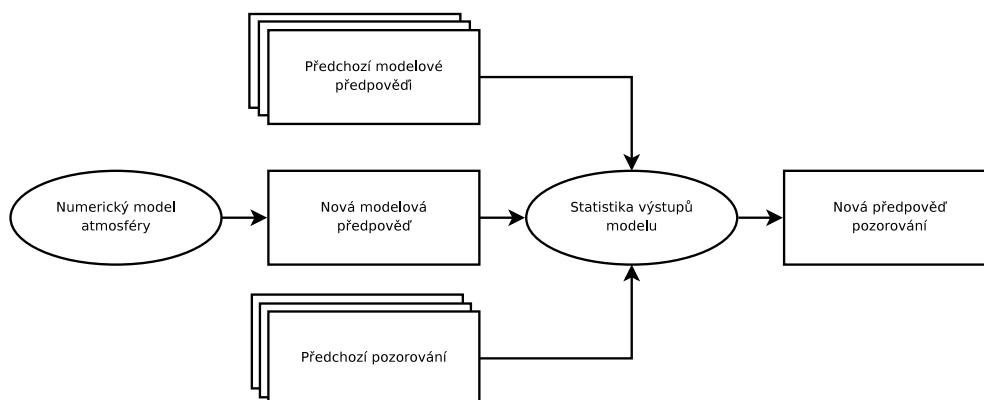
Obrázek 2: Příklad výstupu z mezoměřítkového modelu CAMx. Na obrázku je koncentrace oxidu dusičitého (NO<sub>2</sub>) pro oblast České republiky a okolí. Systém MEDARD, [www.medard-online.cz](http://www.medard-online.cz)

z nich vede k takzvané statistice výstupů z modelu (model output statistics), druhý k asimilaci dat do modelu.

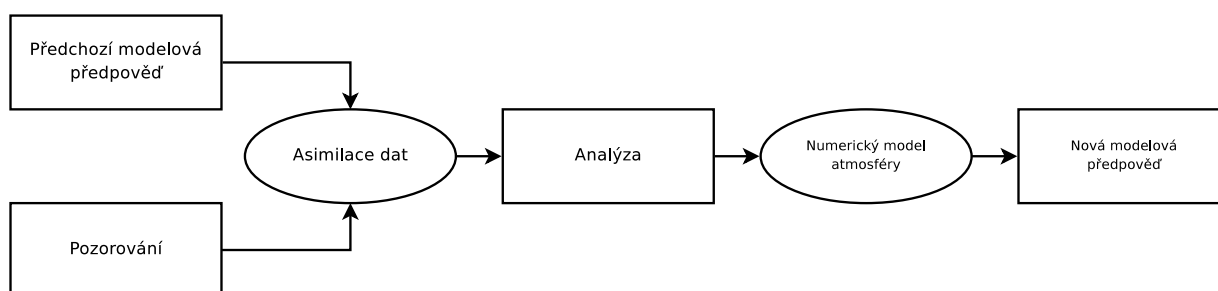
Při statistice výstupů z modelu se výstupy z numerického modelu atmosféry nepoužívají přímo, ale dále se zpracovávají a slouží jako vstupy pro další, zpravidla statistický model. Takovýto model na základě předchozích modelových výstupů a pozorování koriguje aktuální modelový výstup tak, aby byl co nejbližší předpokládanému pozorování. Pokud jsou pozorování tvořena bodovými měřeními, jsou vlastně metody pro statistiku výstupů modelu podmožinou metod pro downscaling, protože také transformují výstupy z modelu s hrubým rozlišením na lokální předpověď. Základním znakem těchto metod je, že numerický model atmosféry používají pouze jako zdroj *signálů*, které se nemusí nutně blížit k realitě, ale pouze s ní nějakým statisticky významným způsobem korespondují. Centrálním pojmem jsou zde pozorování a cílem je, aby bylo možno predikovat hodnoty, které budou co nejbližší těm pozorovaným.

Pro asimilaci dat se používá poněkud odlišný úhel pohledu. Rozdíl mezi pozorováním a odpovídající modelovou hodnotou se využije k opravě modelového stavu. Takto opravený stav, v numerické předpovědi počasí nazývaný *analýza*, potom slouží jako počáteční podmínka pro novou předpověď. Tím se vlastně zajišťuje co nejlepší přesnost u Bjerknesevy podmínky 1 ze začátku kapitoly 2. Centrálním pojmem asimilace dat je tzv. *skutečný stav*, který je ve skutečnosti diskreti-

zován stejně jako numerický model. Moderní metody asimilace dat se snaží vytvořit analýzu tak, aby byla nejlepším aktuálně dostupným odhadem tohoto skutečného stavu. Pozorování může být z hlediska asimilace dat zatíženo jak chybou měření, tak chybou reprezentativity, protože nemusí odpovídat prostorově průměrovaným hodnotám v rozlišení modelu.



Obrázek 3: Schéma predikce se statistikou výstupu modelu. Pro statistické postprocesování se obvykle kromě výstupů numerického modelu atmosféry ještě používají historická měření a jejich modelové protějšky.



Obrázek 4: Schéma typické predikce se sekvenciální asimilací dat a následnou integrací numerickým modelem.

Existuje řada přístupů a variant pro asimilaci dat a mnohé z nich mají tu výhodu, že při nich lze získat kromě odhadu skutečného stavu i kovarianční strukturu chyby tohoto odhadu. Jedním z plánovaných cílů je využití této informace pro pravděpodobnostní předpovědi v jemném rozlišení a zároveň i jako další vstup pro případný model downscalingu. První výsledky takového propojení asimilace dat a statistiky výstupů modelu jsou v Juruš (2006) a Eben et al. (2006).

## 4 Pravděpodobnostní předpovědi

Uvažování o chybě predikce v numerických modelech atmosféry vede ke stochastickému modelování. Předpokládejme na chvíli, že stav atmosféry se v numerickém modelu vyvíjí spojitě v čase.

Stavový vektor  $x$ , který v modelu popisuje stav atmosféry, se vyvíjí podle evoluční rovnice (Miller, 2007):

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \mathcal{F}(x, t) \\ x(0) &= x_0\end{aligned}$$

Model, jehož působení je zde vyjádřeno operátorem  $\mathcal{F}$ , je konstruován tak, aby co nejlépe aproximoval skutečný vývoj, ve skutečnosti se však stav v přírodě vždy vyvíjí směrem poněkud odlišným od modelového. O skutečném vyvoji atmosféry proto předpokládáme, že vypadá takto:

$$\begin{aligned}\dot{x}^t &= \mathcal{F}(x^t, t) + g(x^t, t)\dot{W}(t) \\ x^t(0) &= x_0 + e_0\end{aligned}$$

$x^t$  je v tomto případě označení stavového vektoru skutečného stavu atmosféry,  $\dot{W}(t)$  je bílý šum (značený podle zvyklostí literatury zabývající se stochastickým kalkulem jako derivace Wienerova procesu), který vyjadřuje chybu modelu  $\mathcal{F}$ , a  $g(x^t, t)$  umožňuje zachytit kovarianci této chyby,  $e_0$  je chyba počátečního stavu a předpokládáme u ní gaussovské rozdělení a nulovou střední hodnotu. Znamená to, že na evoluci stavu atmosféry se kromě deterministického operátoru  $\mathcal{F}$  podílí ještě náhodný šum. Stav atmosféry tudíž chápeme jako realizaci náhodného procesu  $X_t$ . Její stochastický vývoj lze vyjádřit také ve tvaru:

$$dX_t = \mathcal{F}(X^t, t)dt + g(X^t, t)dW(t)$$

Hustota pravděpodobnosti  $p(x, t)$  náhodného procesu  $X_t$  potom musí splňovat takzvanou Fokker-Planckovu diferenciální rovnici:

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial^2 p(x, t) (gg^T)_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \sum_i \frac{\partial (\mathcal{F}_i p(x, t))}{\partial x_i}$$

Vyřešením této rovnice bychom získali časovou evoluci hustoty pravděpodobnosti pro stav atmosféry a tím i pravděpodobnostní předpověď. V reálných aplikacích má ovšem stavový prostor dimenzi  $10^5$ – $10^7$  a přímé řešení této rovnice není možné. Proto se používají nejrůznější ensemblové aproximace.

Při ensemblové předpovědi se vytvoří namísto jedné predikce celý soubor, typicky 5 až 100, předpovědí. Tyto predikce by měly být ideálně náhodným výběrem z rozdělení, které odpovídá

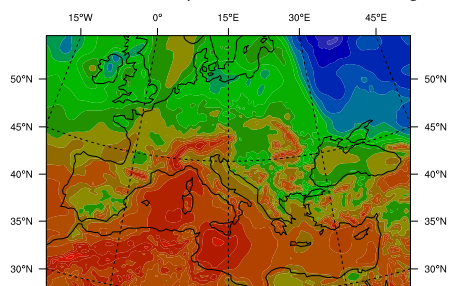
pravděpodobnostní předpovědi. Takovýto ensemble má mimo jiné tu vlastnost, že když jeho členy zprůměrujeme, získáme zpravidla menší chybu predikce než mají jednotlivé členy (Leith, 1974; Murphy, 1988; Whitaker and Lough, 1998).

Existuje několik základních způsobů jak ensemblové předpovědi konstruovat. Nejjednodušší je použít několik simulací pomocí různých numerických modelů, které obecně používají různá numerická schémata a různé parametrizace fyzikálních dějů v atmosféře. Tento přístup je v literatuře často označován jako *poor man's ensemble* díky tomu, že je poměrně nenáročný a může být použit v podstatě ad-hoc. Postačí například, když se několik institucí, vydávajících deterministickou předpověď pro společnou oblast, domluví, že své předpovědi budou vydávat společně jako ensemble. Nevýhodou tohoto přístupu je prakticky nulová kontrola nad statistickými vlastnostmi ensemblu.

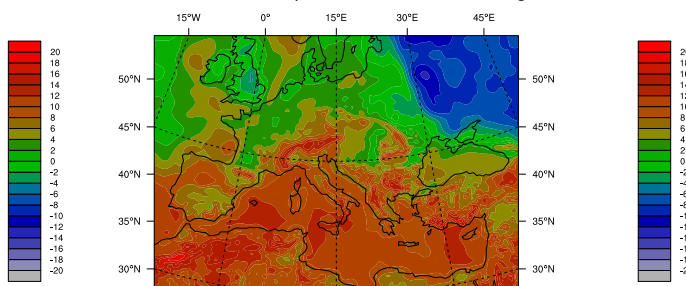
Dalším a asi nejpoužívanějším přístupem je perturbace počátečních podmínek. Vytvoří se celá sada počátečních podmínek, které se od sebe navzájem mírně odlišuje a k nim se numerickým modelem vypočte odpovídající sada predikcí. Tento způsob je díky velké náročnosti na výpočetní čas využíván především v největších meteorologických organizacích. Nejčastějším a nejvyzrálejší oborem, kde se tento způsob využívá, je ensemblová predikce pro celosvětovou doménu na střednědobý horizont (do 10 dnů), viz Gneiting and Raftery (2005). Srovnání evropského, amerického a kanadského systému, které používají rozdílné způsoby generování počátečních perturbací, lze nalézt v Buizza et al. (2005).

Další přístupy se snaží zkrátit nebo obejít výpočetně náročnou integraci jednotlivých členů ensemblu. K nim patří například zahrnutí stochastického přístupu přímo do rovnic numerického modelu (Buizza et al., 1999), nebo perturbování výstupu numerického modelu pomocí geostatistického modelu (Gel et al., 2004).

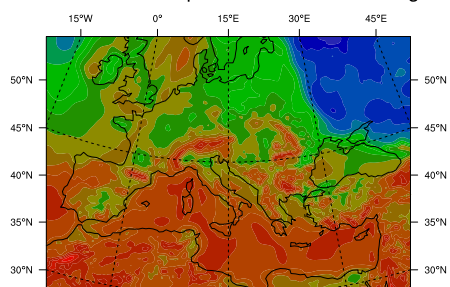
Member 1: Potential temperature at the lowest sigma level



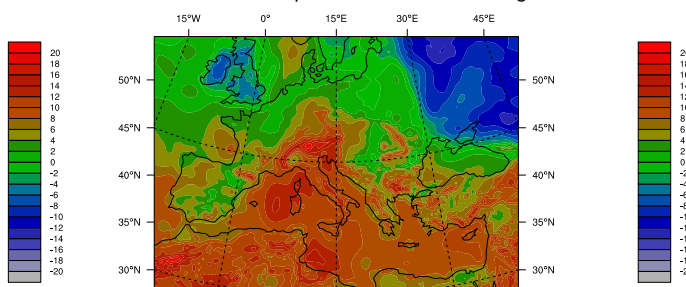
Member 2: Potential temperature at the lowest sigma level



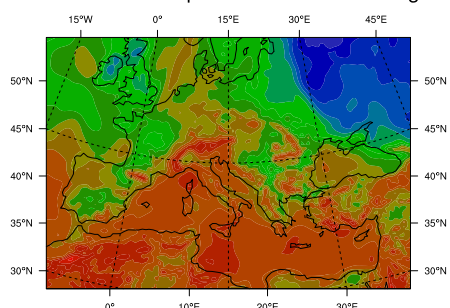
Member 3: Potential temperature at the lowest sigma level



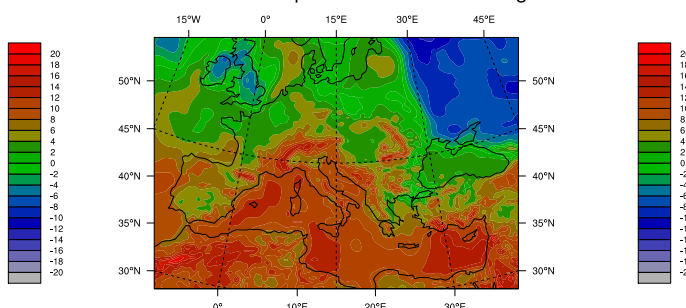
Member 4: Potential temperature at the lowest sigma level



Member 5: Potential temperature at the lowest sigma level



Member 6: Potential temperature at the lowest sigma level



Obrázek 5: Potenciální teplota v nejnižší sigma hladině modelu WRF – prvních šest členů ensmbly. Počáteční perturbace byly vytvořeny na základě kovarianční struktury pro asimilaci dat metodou 3DVAR (Juruš, 2007a).

Neopomenutelným aspektem je využití pravděpodobnostních předpovědí v praxi. Již bylo zmíněno, že průměr ensmbly má obvykle menší chybu predikce než jednotlivé členy. Zásadní otázkou však je, zda a jakým způsobem jsou uživatelé pravděpodobnostní předpovědi schopni využít informace o nejistotě predikce k lepšímu rozhodování. Častým argumentem je, že uživatelé předpovědi počasí, především v dopravě, průmyslu a energetice, vyžadují především včasnou a jasnou a srozumitelnou informaci o počasí a pravděpodobnostní předpověď by pro ně znamenala naopak zbytečnou zátěž a ztížení rozhodování. Existuje ovšem celá řada studií, která ukazuje, že při správném využití mohou pravděpodobnostní předpovědi vést k lepšímu rozhodování a mnohdy lze odhadnout ekonomický přínost, který může být i značný (Murphy, 1977, 1985; Katz and Murphy, 1997; Wilks and Hamill, 1995).

Pravděpodobnostní předpověď je užitečná zejména v případech, kde je poměr potenciálních

ztrát a vynaložených nákladů na prevenci těchto ztrát silně asymetrický. Například v Berrocal et al. (2007) byla v případě solení americké silnice I-90 odhadnuta úspora 11,25 miliónů dolarů ročně při použití pravděpodobnostní předpovědi oproti deterministické. Přitom byl použit vcelku konzervativní odhad poměru nákladů na solení a případných ztrát při ledovce 1:10.

Pro modelování úniku látky při havárii nebezpečného nákladu je vyčíslení případných rizik komplikované. Mimo jiné je potřeba brát v úvahu časovou a organizační stránku případné evakuace, či jiných opatření. Přesto je výhodnější využít například 95% kvantil odhadované koncentrace namísto jedné hodnoty s neznámou přesností. Ensemble předpovědí lze navíc chápat i jako různé scénáře budoucího vývoje a může sloužit k proaktivnímu plánování různých možností protiopatření.

## 5 Závěr

Cílem této práce je shrnutí současného stavu problematiky a návrh systému pro stochastické modelování atmosféry v regionálním měřítku. Toto je navrhovaný postup prací:

1. Návrh systému pro pravděpodobnostní předpověď koncentrací uniklé látky do ovzduší při havárii nebezpečného nákladu. Systém je plánován pro regionální modelování v rozlišení 2–10 km. Součástí tohoto systému bude:
  - (a) Regionální numerický model pro předpověď počasí.
  - (b) Regionální disperzní model — je možná i varianta použití modelu, který počítá počasí i disperzi látek zároveň (WRF-Chem).
  - (c) Metoda pro vytváření perturbací pole větru. Zatím je testováno využití infrastruktury pro asimilaci dat metodou 3D-Var. Možné jsou i další metody vytváření perturbací, nebo jejich kombinace.
2. Verifikace chování tohoto systému pro různá rozlišení a různé meteorologické situace. Nelze jednoduše provádět experimenty s vypouštěním látek a jejich měřením v potřebném měřítku. Proto bude pro testování využito postupu analogického s metodikou OSSE (Observing System Simulation Experiment), která se používá při asimilaci dat. To znamená, že bude využito

syntetických pozorování. Nejdůležitějším bodem verifikace bude zkoumání poměru chyby modelu a chyby reprezentativity.

3. Prozkoumání možnosti rozšíření tohoto systému o úpravu okamžitého stavu na základě přicházejících měření. Takovýto adaptivní systém by upřesňoval okamžitý modelový stav a sloužil především při predikci na velmi krátký horizont (nowcasting).
4. Zobecnění přístupu použitého v tomto systému pro predikci dalších lokálních veličin. Z dopravních aplikací lze uvažovat zejména o predikci ledovky. Navrhovaná metoda řešení je aplikovatelná pro další veličiny, kde jsou důležité lokální hodnoty. Proto by neměl být problém nalézt aplikace v dalších oblastech.
5. Návrh popisující způsob, jak využít informace o nejistotě v krizovém managementu při případné nehodě. Používání pravděpodobnostních předpovědí není stále příliš obvyklé. Proto je dobré ukázat příklad jak takovou předpověď využít a jaké přináší výhody oproti jednoduché deterministické předpovědi.

Splnění těchto cílů bude mít následující přínos:

1. Vznikne návrh systému pro modelování úniků do ovzduší. Takovýto systém je použitelný pro podporu rozhodování při havárii nebezpečného nákladu, ale i v dalších případech havárie, defektu, nebo například teroristického útoku. Důležitými vlastnostmi tohoto návrhu, které jej odlišují od stávajících systémů ve světě jsou regionální měřítko, využití realistického a aktuálního popisu atmosféry a pravděpodobnostní predikce.
2. Bude demonstrováno, jak lze využít pravděpodobnostní předpovědi v krizovém managementu a jaké má takováto předpověď výhody oproti tradiční deterministické. Tato demonstrace může sloužit jako základ pro vytvoření reálného systému pro podporu rozhodování.
3. Tato práce přispěje k lepšímu pochopení role chyby reprezentativity v numerických modelech atmosféry. To vede k širšímu okruhu aplikací numerických modelů, především v oblastech, kde je zásadní lokální stav atmosféry.
4. Bude ukázáno, jakým způsobem lze propojit přístupy asimilace dat a statistiky výstupů modelu. Vzniklý společný rámec má velmi široké uplatnění a to jak při rozvoji samotných



metod asimilace dat, tak při aplikacích v dopravě, průmyslu, energetice a dalších oblastech.

## **6 Grantová podpora**

Tato práce je podporována těmito projekty:

- Projekt GA AV ČR 1ET 400300414 “Matematické modelování kvality ovzduší s aplikacemi v krizovém managementu” programu “Informační společnost”.
- Institucionální výzkumný záměr AV OZ10300504

## 7 Reference

- Albritton, J. R., R. L. Lee, R. L. Mobley, J. C. Pace, R. M. Hodur, and C.-S. Liou, 1997: Modeling the wind-fields of accidental releases by mesoscale forecasting. *6th Topical Meeting on Emergency Preparedness and Response Proceedings*, Lawrence Livermore National Laboratory, 359–363.
- Berrocal, V. J., A. E. Raftery, T. Gneiting, and R. C. Steed, 2007: Probabilistic weather forecasting for winter road maintenance. Technical report, Department of Statistics, University of Washington.
- Bjerknes, V., 1904: Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteorologische Zeitschrift*, **21**, 1–7.
- Brandt, J., T. Mikkelsen, S. Thykier-Nielsen, and Z. Zlatev, 1996: The Danish Rimpuff and Eulerian Accidental release Model (The DREAM). *Physics and Chemistry of the Earth*, **21**, 441–444.
- Buizza, R., P. L. Houtekamer, G. Pellerin, Z. Toth, J. Zhu, and M. Wei, 2005: A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction systems. *Monthly Weather Review*, **133**, 1076–1097.
- Buizza, R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **125**, 2887–2908.
- Chapman, L., J. E. Thornes, and A. V. Bradley, 2001a: Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database. part 1: Statistical. *Meteorological Applications*, **8**, 409–419.
- 2001b: Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database. part 2: Numerical. *Meteorological Applications*, **8**, 421–436.
- Charney, J. G., R. Faørtoft, and J. von Neumann, 1950: Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, **2**, 237–254.
- Eben, K., J. Resler, and P. Juruš, 2006: Accounting for representativity of ground-level air pollution monitoring stations in data assimilation systems. *Geophysical Research Abstracts*, **8**, 10015.

- Eriksson, M. and J. Norrman, 2001: Analysis of station locations in a road weather information system. *Meteorological Applications*, **8**, 437–448.
- Erkut, E. and V. Verter, 1995: A framework for hazardous materials transport risk assessment. *Risk Analysis*, **15**, 589–601.
- Gel, Y., A. E. Raftery, and T. Gneiting, 2004: Calibrated probabilistic mesoscale weather field forecasting: The geostatistical output perturbation (GOP) method. *Journal of the American Statistical Association*, **99**, 575–590.
- Giebel, G., R. Brownsword, and G. Kariniotakis, 2003: The state-of-the-art in short-term prediction of wind power a literature overview. Technical report, ANEMOS Project.
- Gneiting, T. and A. E. Raftery, 2005: Weather forecasting with ensemble methods. *Science*, **310**, 248–249.
- Goodwin, L. C., 2002: Analysis of weather-related crashes on u.s. highways. Technical report, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- 2003: Best practices for road weather management. Technical report, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Juruš, P., 2006: Downscaling in the context of data assimilation. *Doktorandský den '06*, F. Hakl, ed., Institute of Computer Science/MatfyzPress, Prague, 35–43.
- 2007a: Ensemble based prediction for coupled models of weather and air quality. *Dimensions of Environmental Informatics*, A. Swayne, ed., IFIP, volume 7 of *Environmental Software Systems*.
- Kara, B. Y. and V. Verter, 2004: Designing a road network for hazardous materials transportation. *Transportation Science*, **38**, 188–196.
- Katz, R. W. and A. H. Murphy, eds., 1997: *Economic Value of Weather and Climate Forecasts*, Cambridge University Press, chapter Forecast value: Prototype decision-making models. 183–217.
- Landberg, L., G. Giebel, H. A. Nielsen, T. Nielsen, and H. Madsen, 2003: Short-term prediction – an overview. *Wind Energy*, **6**, 273–280.

- Leith, C. E., 1974: Theoretical skill of monte carlo forecasts. *Monthly Weather Review*, **102**, 409–418.
- Miller, R. N., 2007: Topics in data assimilation: Stochastic processes. *Physica D*, **230**, 17–26.
- Murphy, A. H., 1977: The value of climatological, categorical and probabilistic forecasts in the cost–loss ration situation. *Monthly Weather Review*, **105**, 803–816.
- 1985: Decision making and the value of forecasts in a generalized model of the cost-loss ratio situation. *Monthly Weather Review*, **113**, 362–369.
- Murphy, J. M., 1988: The impact of ensemble forecasts on predictability. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **114**, 463–493.
- Norrman, J., M. Eriksson, and S. Lindqvist, 2000: Relationships between road slipperiness, traffic accident risk and winter road maintenance activity. *Climate Research*, **15**, 185–193.
- Ramakrishna, D. M. and T. Viraraghavan, 2005: Environmental impact of chemical deicers — a review. *Water, Air, and Soil Pollution*, **166**, 49–63.
- Ředitelství služby dopravní policie Policejního prezidia ČR, 2007: Informace o nehodovosti na pozemních komunikacích České republiky za rok 2006. Technical report, Ministerstvo vnitra ČR.
- Richardson, L. F., 1922: *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press.
- Roulston, M., G. E. Bolton, A. N. Kleit, and A. L. Sears-Collins, 2006: A laboratory study of the benefits of including uncertainty information in weather forecasts. *Weather and Forecasting*, **21**, 116–122.
- SafetyNet, E. R. S. O., 2006: Annual Statistical Report 2006 – Based on the data from CARE/EC. Technical report, KfV Austria, NTUA Greece, SWOV The Netherlands, TRL United Kingdom.
- Sass, B. H., 1992: A numerical model for prediction of road temperature and ice. *Journal of Applied Meteorology*, **31**, 1499–1506.

- Scenna, N. J. and A. S. M. Santa Cruz, 2005: Road risk analysis due to the transportation of chlorine in Rosario city. *Reliability Engineering and System Safety*, **90**, 83–90.
- Shao, J., 1998: Improving nowcasts of road surface temperature by a backpropagation neural network. *Weather and Forecasting*, **13**, 164–171.
- Staff Members of the Institute of Meteorology, University of Stockholm, 1954: Results of forecasting with the barotropic model on an electronic computer (BESK). *Tellus*, **6**, 139–149.
- Svítek, M. and E. Pelikán, 2004: Monitoring and control of dangerous goods transport. *Neural Network World*, **14**, 303–312.
- Transportation Research Board, ed., 1983: *Risk Assessment Processes for Hazardous Materials Transportation*. NCHRP Synthesis Report, Transportation Research Board of the National Academies.
- Vincze, C., I. Lagzi, R. Mészáros, L. Kullmann, G. Radnóti, and A. Horányi, 2006: An operational model for the accidental release in Hungary. *Geophysical Research Abstracts*, **8**, 625.
- Whitaker, J. S. and A. F. Loughe, 1998: The relationship between ensemble spread and ensemble mean skill. *Monthly Weather Review*, **126**, 3292–3302.
- Wilks, D. S. and T. S. Hamill, 1995: Potential economic value of ensemble-based surface weather forecasts. *Monthly Weather Review*, **123**, 3565–3575.