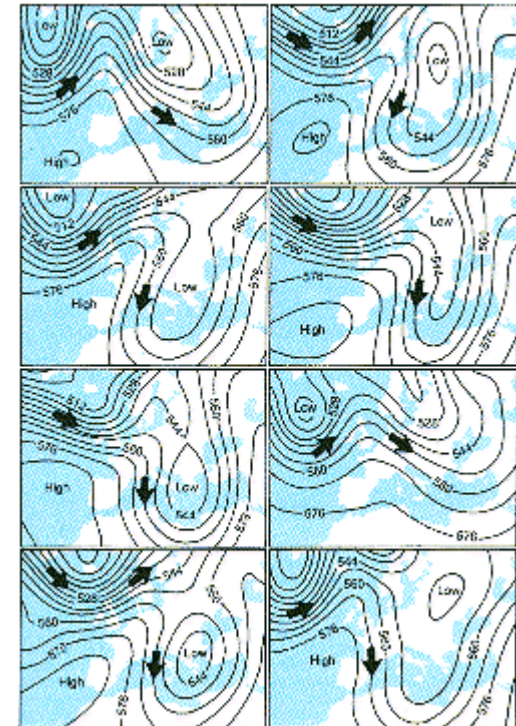


Ansámblové metody

Richard Mládek, ONPP ČHMÚ

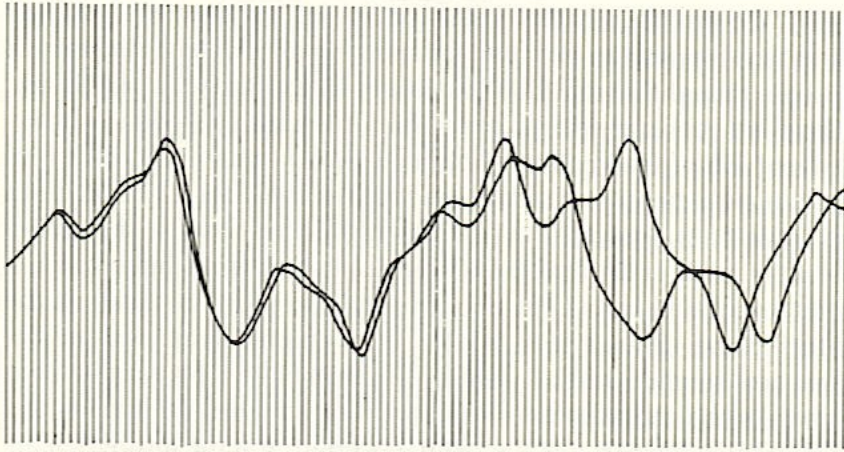
- **Chaos a předpověď počasí**
- **Ansámblové metody**
 - obecný úvod
 - perturbace počátečních podmínek
 - singulární vektory
- **Provozované ansámblové systémy**
 - ECMWF
- **Verifikace pravděpodobnostních systémů**
- **Produkty**
- **Reference**



Chaos a předpověď počasí (1)

- dynamický systém považujeme za chaotický pokud na počátku velmi podobné stavy systému se postupně mohou vyvíjet velmi odlišně
- atmosféra je příkladem chaotického nelineárního dynamického systému s mnoha stupni volnosti (ECMWF $\sim o(10^7)$)
- možné stavy atmosféry (počasí) je proto vhodné předpovídat pomocí pravděpodobnostních metod

Chaos a předpověď počasí (2)

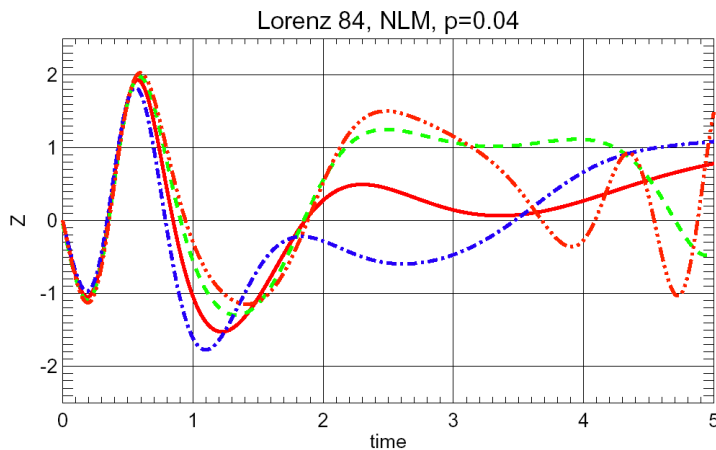


HOW TWO WEATHER PATTERNS DIVERGE. From nearly the same starting point, Edward Lorenz saw his computer weather produce patterns that grew farther and farther apart until all resemblance disappeared. (From Lorenz's 1961 printouts.)

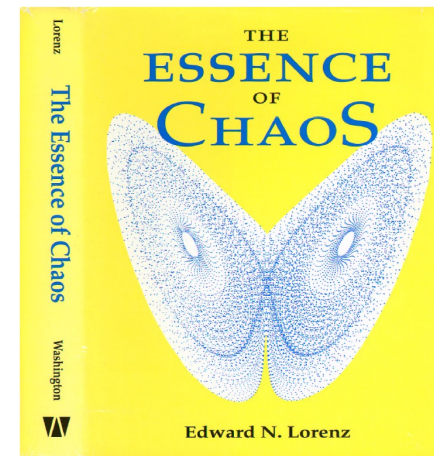
Lorenz 1961



(aus Gleick 1987)



Lorenz 1984



Lorenz 1993

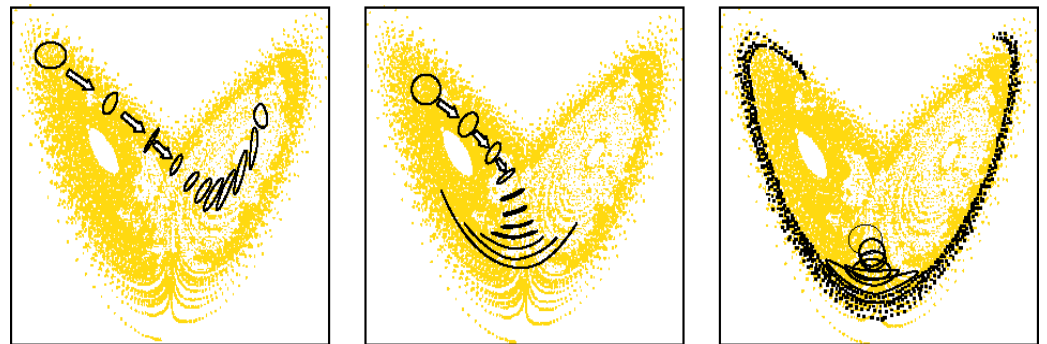
Chaos a předpověď počasí (3)

První studie předvídatelnosti

- Thompson (1957)
 - Lorenz (1963)
 - Lorenz (1965) SVs
 - Charney et al. (1966)
 - Epstein (1969)
 - Leith (1974)
 - ECMWF
 - NMC/NCEP
-
- Liouville rovnice (Ehrendorfer)
 - Stochasticko-dynamické rovnice
 - Monte Carlo metody

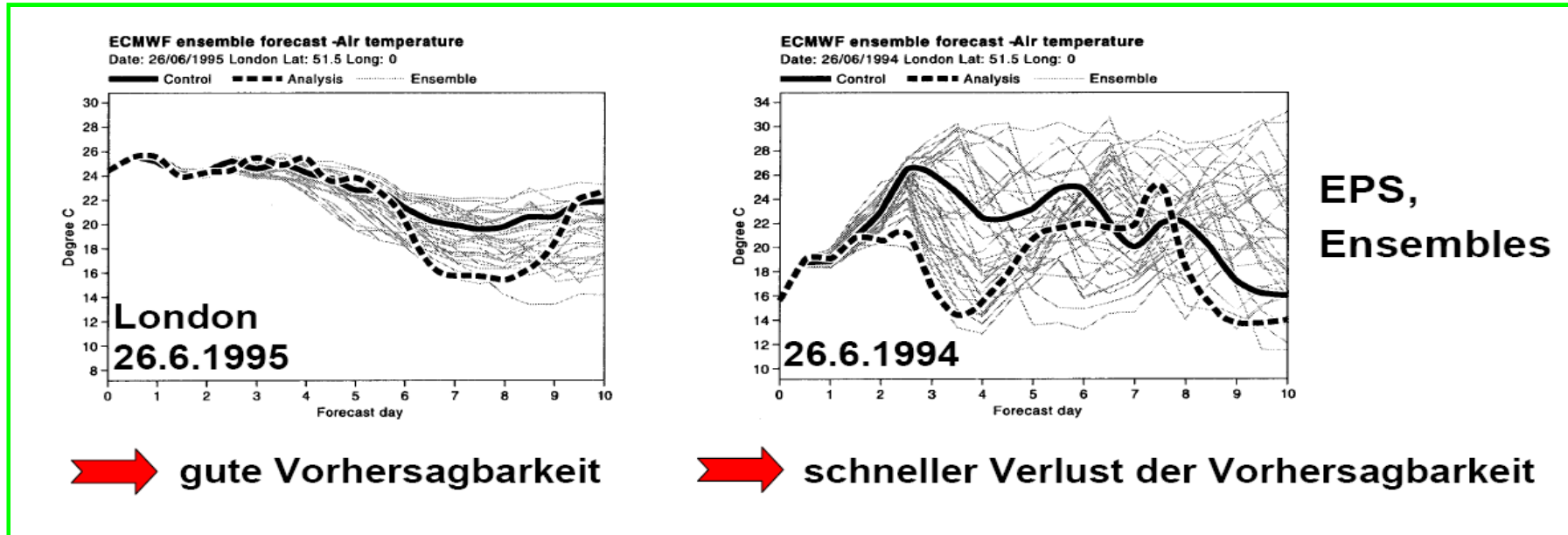
Chaos a předpověď počasí (4)

- schématický příklad z 3-D řešení Lorentzova systému
- 3 různé konečné situace po určité době integrace vycházející z podobných počátečních podmínek, které mohou být všechny pokládány za „skutečný“ stav atmosféry (~ chyba analýzy)
- levé a pravé křídlo Lorentzova atraktoru mohou být zde např. považovány za dvě odlišné varianty počasí v době platnosti předpovědi => např. anticyklonální a cykonální situace



T. Palmer, R. Buizza

Chaos a předpověď počasí (5)



S. Scherrer, ETHZ, 2002

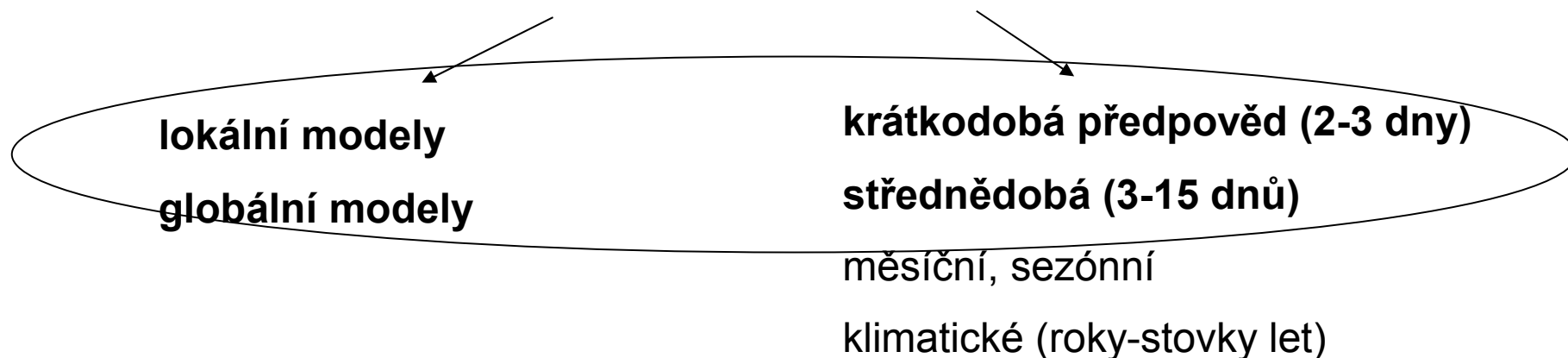
- příklad velké a malé předvídatelnosti počasí
- ansámblové metody umožňují „předpovídat úspěšnost předpovědi“ (malý rozptyl možných scénářů by měl souviset s větší důvěrou v každou jednu předpověď členu ansámblu)

Ansámblová předpověď (1)

účel

- prodloužit dobu předpovědi
- určit možné scénáře vývoje počasí
- podchytit extrémní jevy
- poskytnout uživateli nový zdroj informací vhodně doplňující deterministickou předpověď (cost-lost informace apod.)

ansámby



Ansámblová předpověď (2)

definice

rozptyl (variance) ansámblu: ~ RMSE počítána vůči ansámblovému průměru

kontrolní předpověď: předpověď se stejným rozlišením jaké má ansámblový systém startující z neperturovaných podmínek

základní požadavky:

- chyba ansámblového průměru (případně mediánu) by měla být menší než chyba kontrolního běhu (statisticky za delší období)
- rozptyl ansámblu by měl v průběhu předpovědi sledovat vývoj RMSE kontrolní předpovědi
- vyšší hodnoty rozptylu ansámblu by měly souviset s nižší předvídatelností počasí a naopak

Ansámblová předpověď (3)

Ideální předpoklady

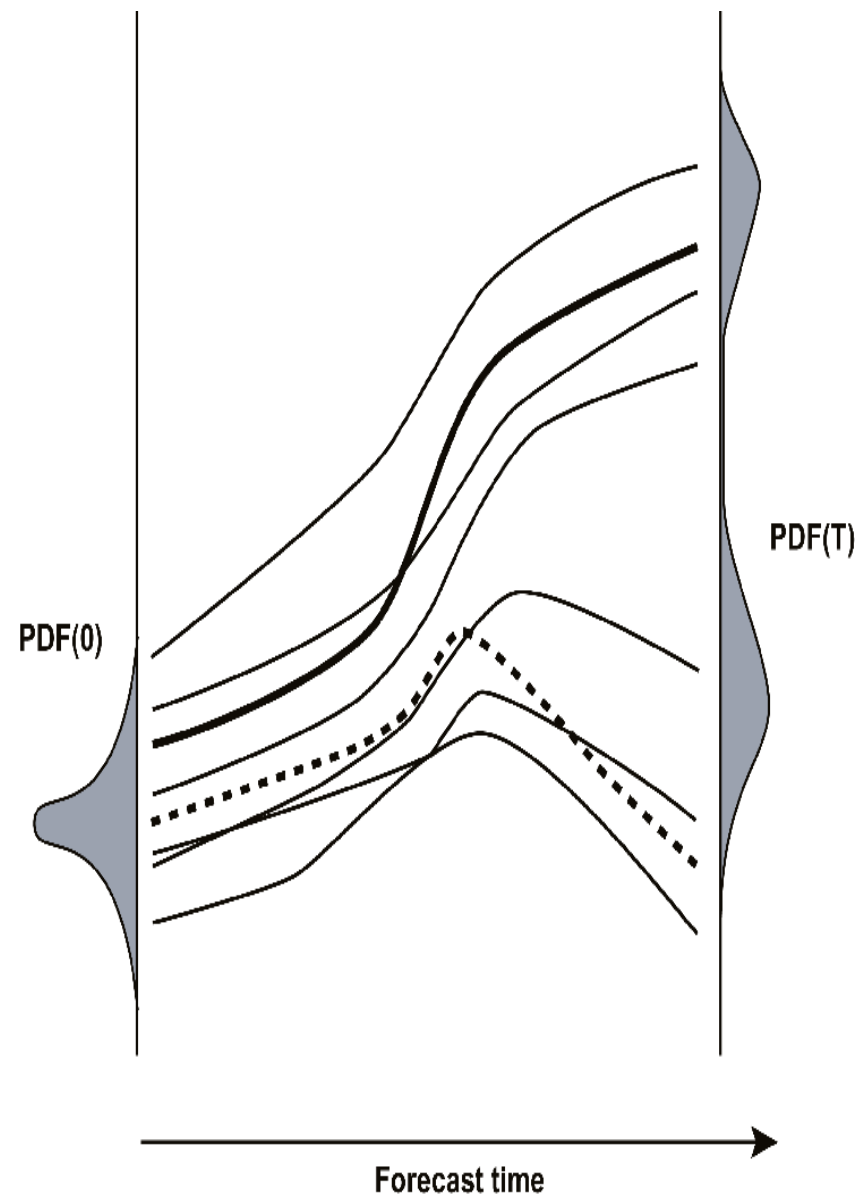
- perturbační metody by měly vycházet z metody Monte Carlo
- časový vývoj funkce hustoty pravděpodobnosti
- podchycení chyb modelu

Realita

- příliš mnoho neznámých => funkce hustoty pravděpodobnosti není plně známa
- je obtížné zajistit dostatečný rozptyl ansámblu odpovídající realitě
- extrémní výpočetní požadavky: **čím více členů a větší rozlišení tím lépe**

Ansámblová předpověď (4)

- hustota pravděpodobnosti předpovědi (PDF) počasí je neznámá => je potřeba ji nějak aproximovat => **ansámblové metody**
- dva hlavní zdroje chyb:
 - **nejistota v počátečních podmínkách** (kvalita pozorování)
 - **chyby související s modelem** (konečné rozlišení, parametrizace, numerické algoritmy)



Ansámblová předpověď (5)

co perturbovat

- počáteční podmínky – největší vliv v prvních fázích předpovědi
- parametrizace modelové fyziky; fyzikální tendence – účelem je simulovat nedostatky modelu => vliv po celou dobu předpovědi
- parametry povrchu (koef.drsnosti, SST, vlhkost půdy, sněhová pokrývka..)
- okrajové podmínky (ansámby na omezené oblasti) – typ perturbací řídicího modelu by měl být v ideálním případě konzistentní s typem perturbací lokálního modelu

Perturbace počátečních podmínek (1)

- zásadní je efektivně zahrnout vliv **nejistoty v počáteční analýze** (matice kovariance chyby analýzy $P^a \Rightarrow$ není zcela známa a je mnohorozměrná)
- velký vliv zejména v prvních dnech platnosti předpovědi (1-5 dnů)

Metody:

- **Singulární vektory** (ECMWF)  **dynamické metody**
- **“Breeding”** (Toth and Kalnay, 1993) (NCEP)  **typ MC**
- **Ansámblová asimilace dat** (CMC, Houtekamer et al, 1996)
- **Multi-model, multi-analýza** (DEMETER, PEPS apod.)  **„poor-man's model ensemble“**
- moderní metody: **ETKF** (Ensemble Transform Kalman Filter), **ET** (Ensemble Transform), **Hessian singulární vektory**

Perturbace počátečních podmínek (2)

„breeding“

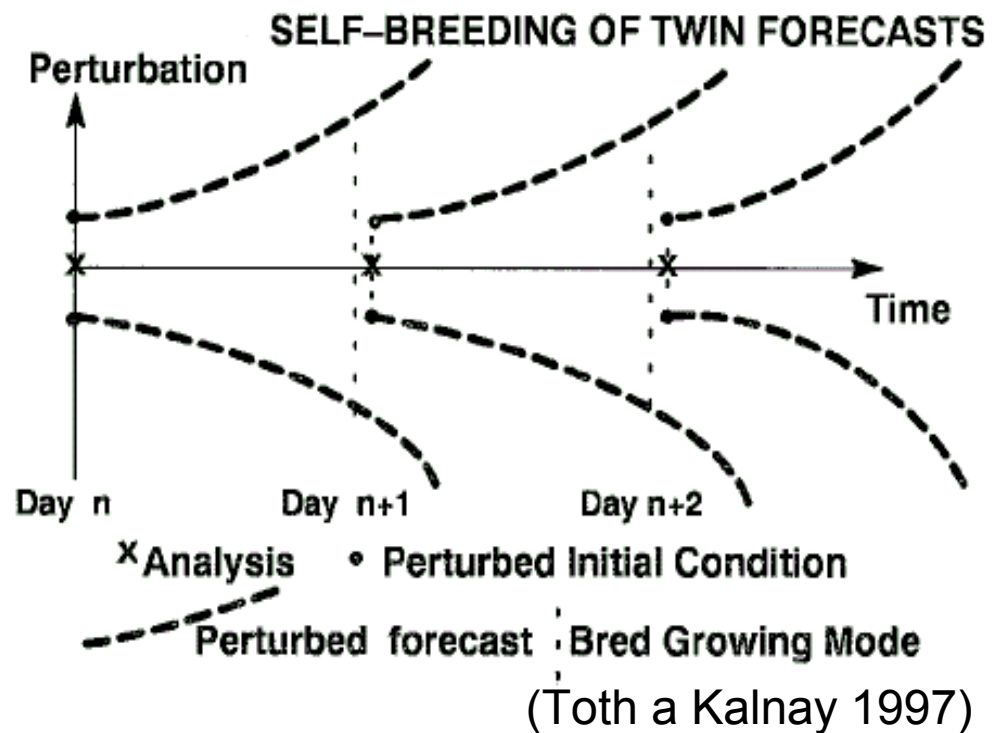
- podobnost s cyklem pro generování analýz
- „pěstujeme“ nelineární perturbace, které rychle rostou

+ výpočetně nenáročné

+ podchycuje nelineární perturbace

- perturbace nejsou optimální

- málo účinné pro předpověď nad 5 dnů



Perturbace počátečních podmínek (3)

Ansámblová asimilace dat

- více nezávislých asimilačních cyklů s náhodně perturbovanými pozorováními => výpočetně náročné
- zahrnuje chyby modelu
- metoda Monte-Carlo => náhodný výběr by měl poskytovat statisticky věrohodné pravděpodobnosti
- v praxi (CMC) nepříliš úspěšné – nedostatečný rozptyl

Perturbace počátečních podmínek (4)

ETKF (Ensemble Transform Kalman Filter)

- existuje více konfigurací
- teoreticky optimální
 - metoda nebyla testována v kompletním NWP
 - problémy s některými typy pozorování
- ETKF může poskytovat nejlepší výsledky pro dlouhodobé předpovědi (Bishop, 2001)
- výpočetně náročné

Perturbace počátečních podmínek (5)

multi-analýzové systémy („poor man's ensemble“)

- relativně jednoduché a výpočetně nenáročné
 - problém různých rozlišení, výpočetních sítí, regionálních bias atd.
- zahrnuje chyby modelu
- nezohledňuje rychle rostoucí módy
- metoda Monte-Carlo => náhodný výběr by měl poskytovat statisticky věrohodné pravděpodobnost
- zkušenosti z projektu PEPS:
 - příliš velký rozptyl ansámblu
 - nutnost korekce systematické chyby (bias)

Singulární vektory (1)

- hledáme perturbace počátečního stavu, které rychle rostou během určitého času předpovědi
- nejrychlejší růst mezi časem 0 a $t \Rightarrow$ perturbace, které maximalizují:

$$(1) \quad \frac{\langle \mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t) \rangle_D}{\langle \mathbf{x}(0), \mathbf{x}(0) \rangle_E}$$

$\langle, \rangle$ je euklidovský vnitřní produkt $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \sum (x_i y_i)$

- pro lineární model a stavový vektor $\mathbf{x}$ v čase t platí: $\mathbf{x}(t) = \mathbf{M}\mathbf{x}(0)$
($\mathbf{M}$ je propagátor „tangent“ modelu)

Singulární vektory (2)

- hlavním předpokladem je, že perturbace rostou **lineárně** v čase
=> použití “tangent-linear” modelu pro integraci směrem dopředu a adjungované verze modelu pro zpětnou integraci
- řešení této maximalizační úlohy vede na problém nalezení vlastních (někdy též singulárních) čísel **a** operátoru **$\mathbf{M}^*\mathbf{M}$** , kde **$\mathbf{M}^*$** je matice adjungovaná k matici **$\mathbf{M}$** a platí:

$$\langle \mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t) \rangle = \langle \mathbf{M}\mathbf{x}(0), \mathbf{M}\mathbf{x}(0) \rangle = \langle \mathbf{M}^*\mathbf{M}\mathbf{x}(0), \mathbf{x}(0) \rangle$$

$$\Rightarrow \mathbf{M}^*\mathbf{M} \mathbf{x}(0) = a \mathbf{x}(t)$$

Singulární vektory (3)

- první (vedoucí) singulární vektor má požadovanou vlastnost, že maximalizuje (1), druhý sing. vektor maximalizuje skalár v prostoru kolmém k prvnímu atd. => výsledkem jsou vzájemně nezávislé, kolmé SV
- je potřeba mít efektivní metodu pro výpočet vlastních čísel => jde o velmi náročný výpočetní problém
- vhodným výběrem prvních **$N/2$** SV, kde **N** je počet členů ansámbly, a jejich přičtením a odečtením k počáteční analýze dostaneme **N** perturbovaných počátečních podmínek ansámbly

Singulární vektory (4)

- **při výpočtu SV máme možnost výběru:**
- jak měřit velikost perturbace (volba **normy** v počátečním a cílovém čase)
- na jaké geografické oblasti se mají perturbace v cílovém čase maximalizovat (optimalizační oblasti)
- za jak dlouho mají být hledané perturbace největší (optimalizační čas)
- mezi kterými modelovými hladinami se mají perturbace nacházet

Singulární vektory (5)

- nejčastější volba normy => totální energie

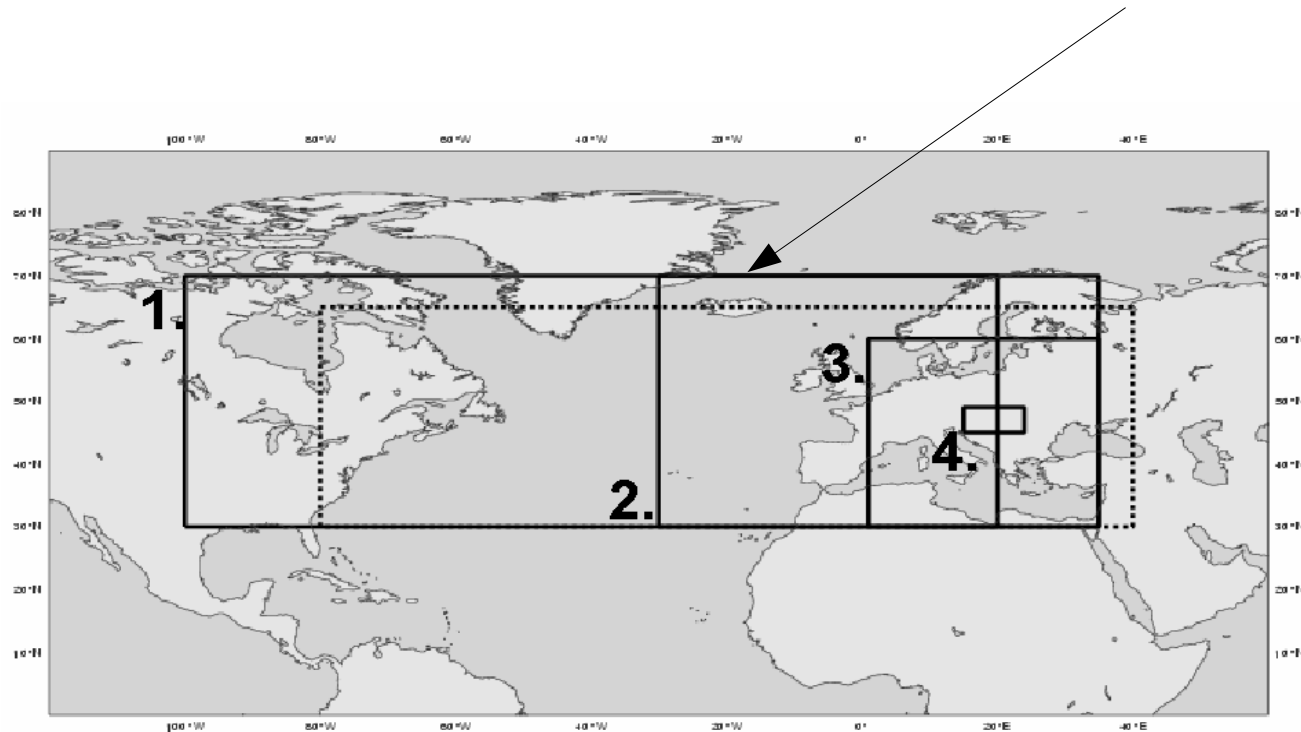
$$\langle x, x \rangle = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_{\Sigma} \left(\Delta^{-1} \zeta_x \cdot \zeta_x + \Delta^{-1} D_x \cdot D_x + \frac{c_p}{T_{ref}} T_x^2 + w_q \frac{L_{cond}^2}{c_p T_{ref}} q_x^2 \right) d\Sigma \frac{\partial p}{\partial \eta} d\eta +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_{\Sigma} R_{dry} T_{ref} P_{ref} \ln \pi^2 d\Sigma$$

Kde ζ_x , D_x , T_x , q_x a $\ln \pi_x$ jsou vorticity, divergence, teplota, měrná vlhkost a logaritmus tlaku při povrchu země stavového vektoru x , c_p je měrné teplo suchého vzduchu za stálého tlaku, L_{cond} je latentní kondenzační teplo při 0°C, R_{dry} je plynová konstanta pro suchý vzduch, $T_{ref} = 300K$ je referenční teplota a $P_{ref} = 800hPa$ je referenční tlak. Parametr w_q definuje relativní váhy pro měrnou vlhkost.

Singulární vektory (6)

- **volba optimalizační oblasti**
- globální model, předp. na 10 dnů: např. severní polokoule
- globální model, předp. na 5 dnů (PEARP): oblast 1.



Singulární vektory (7)

- **volba optimalizačního času**
 - globální model, předp. na 10-15 dnů: 48 h
 - globální model, předp. na 5 dnů (PEARP): 12 nebo 24 h
- **volba modelových hladin**
 - většinou se uvažuje celý vertikální rozsah atmosféry

Singulární vektory (8)

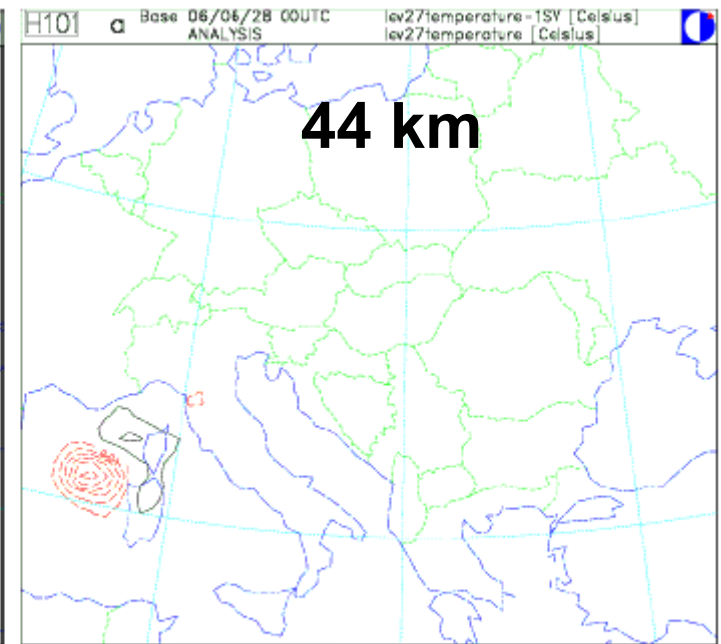
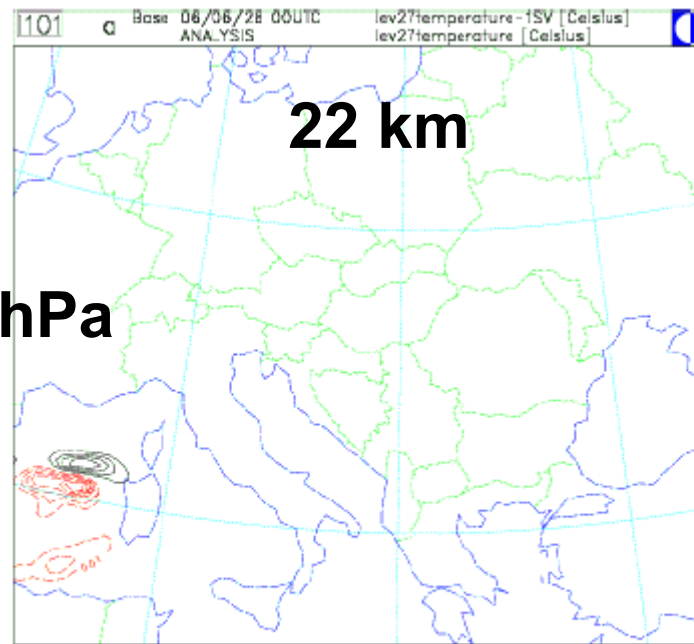
shrnutí

- optimální nejrychleji rostoucí perturbace
- s menším počtem členů ansámblu lepší výsledky než např. systémy typu M-C s velkým počtem členů
- náznaky, že pouze metoda SV statisticky věrohodně podchycuje některé extrémní projevy počasí i dlouho po optimalizační periodě (předpověď na 5 dnů a více)
- dominantní SV jsou nejefektivnějším prostředkem pro předpověď matice kovariance chyb modelu
- umožňují cílené zahušťování pozorování v oblastech zájmu („observation targetting“)

SV modelu ALADIN

- optimalizační i
cílová oblast =
LACE
- opt.doba = 12 H
- 1. SV pro dvě
rozlišení

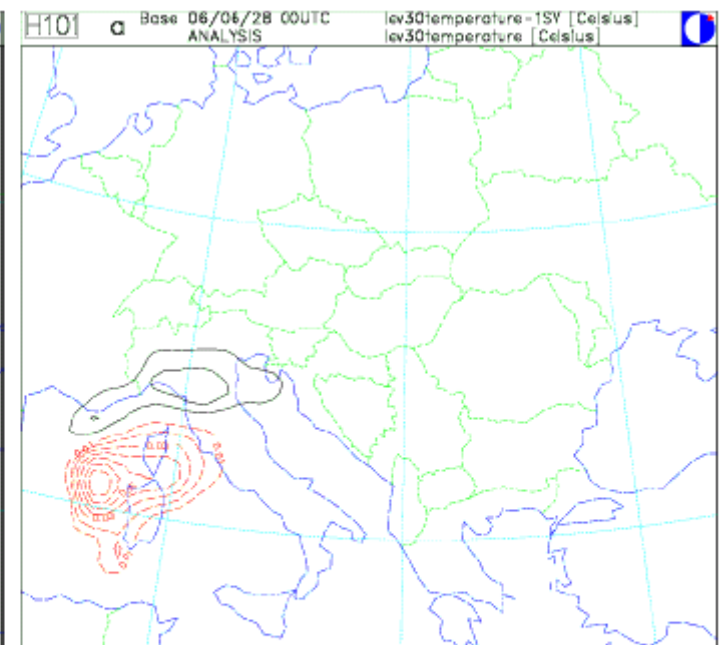
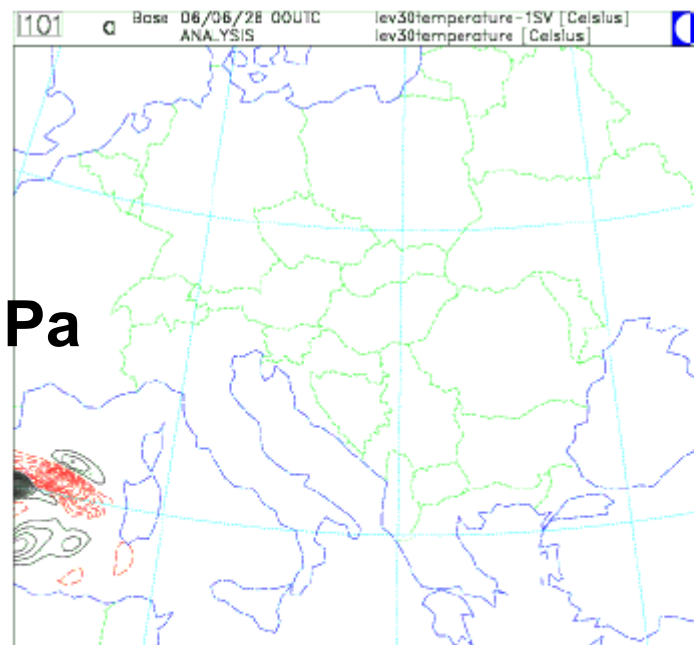
530 hPa



situace v počátečním
okamžiku



640hPa



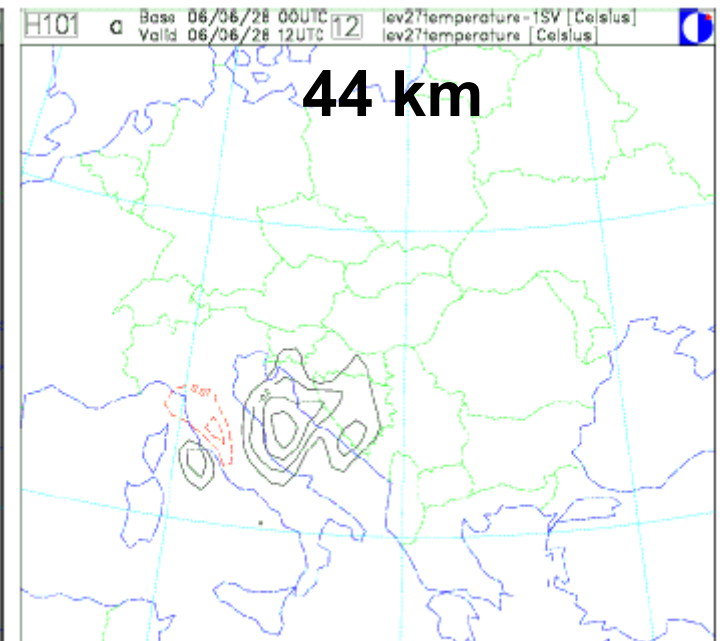
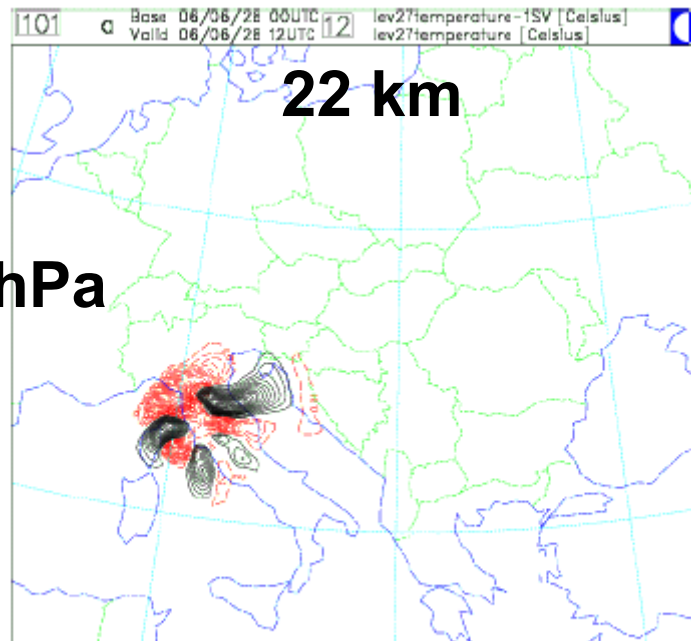
Radostovice 22.-26.10.2007

Figure 6: First singular vectors of exp. I101 (left) and H101 (right) at initial time 28th June, 2006, 12 hour optimization time. Temperature perturbation shown only, contour interval 0.01 K.

SV modelu ALADIN

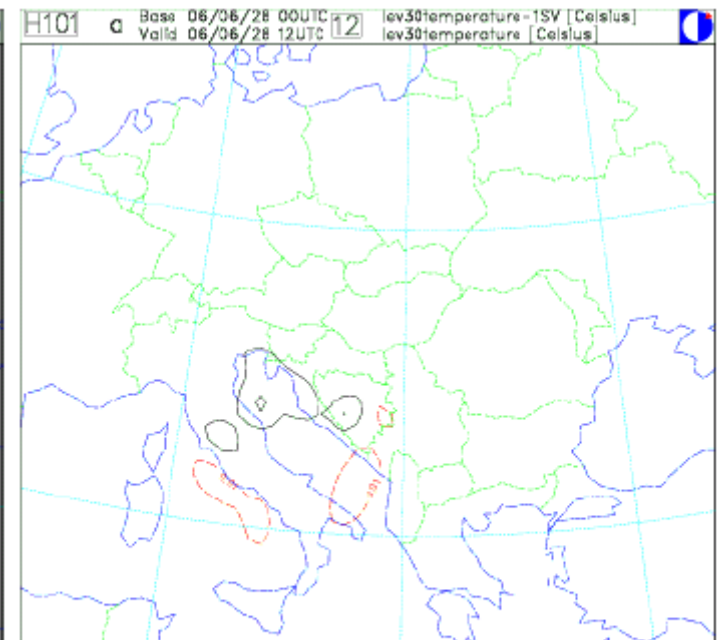
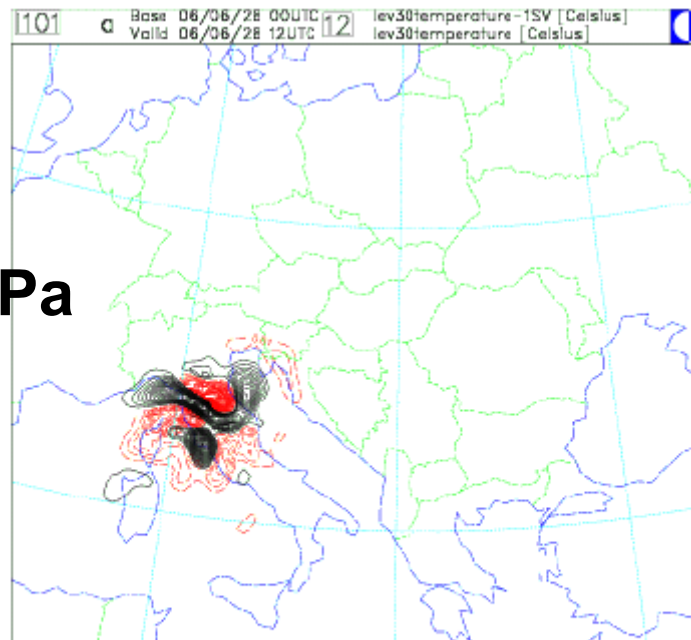
- optimalizační i
cílová oblast =
LACE
- opt.doba = 12 H
- 1. SV pro dvě
rozlišení

530 hPa



situace v **cílovém**
čase (12 H) ➡

640hPa



Radostovice 22.-26.10.2007

Figure 7: As in Fig. 6. but situation at final time +12 hour.

Provozované ansámblové systémy – globální (1)

Updated 2 April 2007	BMRC	CMA	CPTEC	ECMWF	FNMOC	JMA	KMA	MSC	NCEP
	Australia	China	Brazil	Europe	US	Japan	Korea	Canada	US
simul model syst uncert	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES (16 models)	NO
simul model random uncert	NO	NO	NO	YES (stoch ph)	NO	NO	NO	YES (16 models)	NO
simul observation error	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES (rand pert)	NO
initial pert strategy	SVs	SVs & BVs	EOF- based	SVs	BVs	BVs	BVs	analyses cycl	BVs
hor-resol init pert	TL42	?	T126	TL42	T119	T106	T106	TL149	T126
Initial perturbed area	ExTR (<20S, >20N)	?	TR (45S:30N)	ExTR (<30S, >30N) + upto 6 TR-area	Globe	?	NH+TR (>20S)	Globe	Globe
hor-resol forecasts	TL119	T106	T126	TL399(0-10) TL255(10-15)	T119	T106	T106	TL149	T126
top of the model (hPa)	10	?	3	5	1	0.4	10	10	3
forecast length (days)	10	10	15	15	10	9	8	16	16
# runs per day (UTC)	2 (00,12)	1 (12)	2 (00,12)	2 (00,12)	1 (00)	1 (12)	1 (12)	2 (00, 12)	4 (00,06,12,18)
# pert mem per run	32	32	14	50	16	24	16	16	20
# ens mem per day	66	33	30	102	17	25	17	34	84

CMA - China Meteorological Administration

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (Brazilie)

FNMOC - Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (U.S. Navy)

JMA - Japan Meteorological Agency

KMA - Korean Meteorological Agency

MSC - Meteorological Service of Canada

NCEP - The National Centers for Environmental Prediction (USA)

ansámblové systémy ve vývoji:

NCMRWF - The National Centre for Medium range Weather Forecasting
(Indie)

SAWS - South African Weather Service

UK Met Office

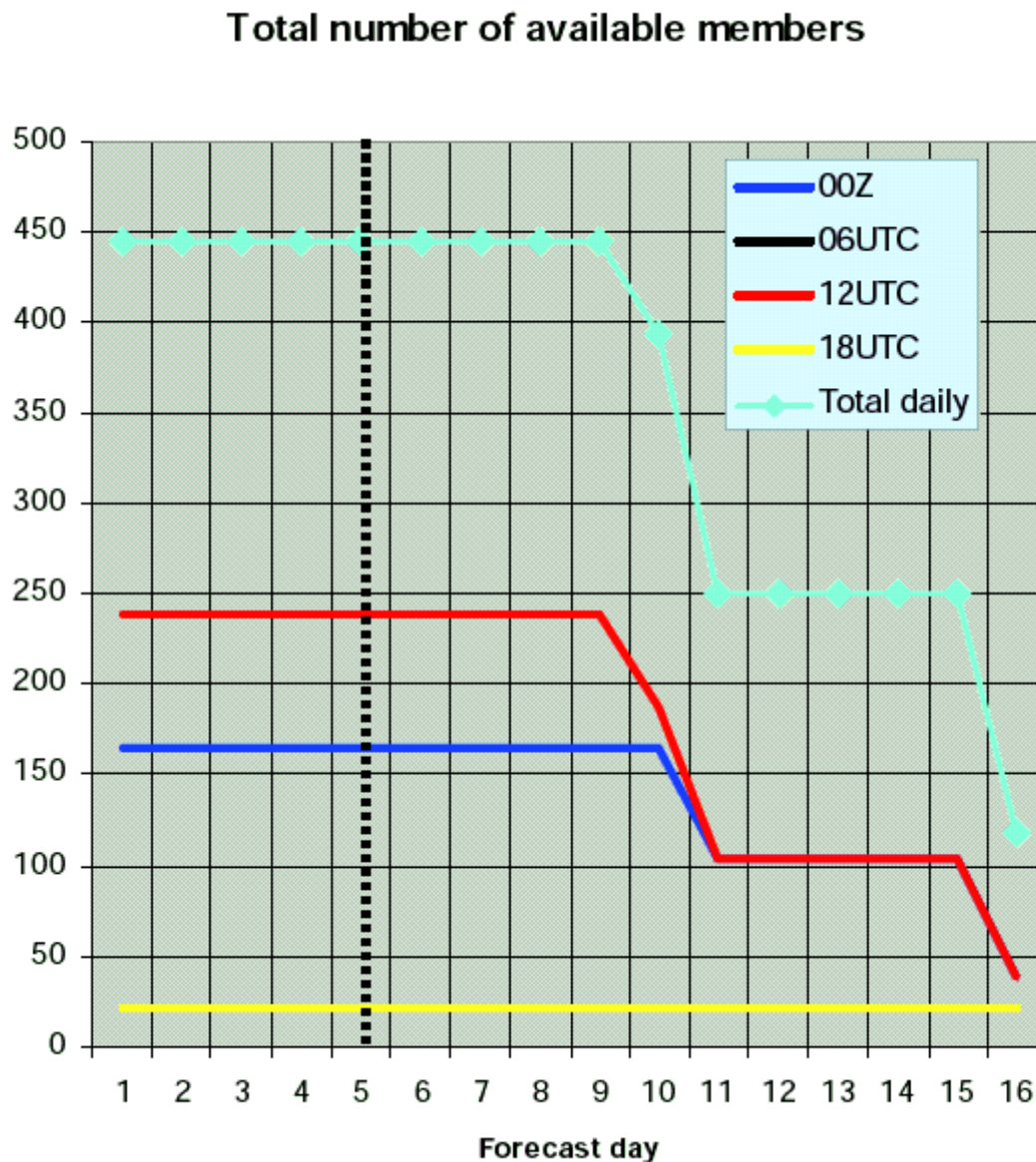
Provozované ansámblové systémy - globální (2)



celkový počet členů globálního ansámblu:

- 00 UTC: 165
- 06 UTC: 21
- 12 UTC: 231
- 18 UTC: 21

=> např. na 5 den: **408**



Provozované ansámblové systémy - lokální (3)

Lokální ansámblové systémy s vysokým rozlišením – rychle se vyvíjející oblast

LAM OPERATIONAL	NCEP-SREF	2	North America	32 km	63	15	2 (ETA, RSM)	NCEP global EPS
	SRNWP-PEPS	4	Europe	7-22 km	30	18	18 European Models	EU global models
	COSMO-LEPS	1	Europe	10 km	120	10	1 (Lokal Modell, COSMO)	Selected ECMWF global EPS members
	PEACE Meteo France	1	Globe	TL358, ST2.4	60	11	1 (ARPEGE)	Targeted SVs
	NOR LAMEPS	1	Europe	20 km	72	41	2 (HIRLAM-TEPs)	TEPS, based on targeted SVs
	UK Met Office	2	Euro-Atlantic	24 km	72	16	1 (UK Unified Model)	UKMO-EPS, using ETKF
	INM-SREPS	4	Euro-Atlantic	0.25 deg	72	64 (lagged system)	4 (Hirlam, HRM, MM5, UM)	4 (ECMWF, UKMO, AVN-NCEP, GME-DWD)

První workshop **TIGGE**, březen 2005, WMO/TD-No. 1273

ALADIN

operativně: součást SRNWP-PEPS

testovací provoz: LAEF (Rakousko, dyn.adap. ECMWF, 22 členů, 18 km, 37 vert.hl.)

v plánu: GLAMEPS (HIRLAM+ALADIN, až 200 členů, cílove rozlišení ~10 km)

Ansámblový systém ECMWF (1)

1994 – začátek operativního provozu

- 32+1 členů ansámblu s T63L19 (~180 km)
- deterministická předpověď T213L31 (~47 km na rovníku) na 10 dní
- singulární vektory T42L19 (~300 km), 48 h optimalizační doba

od 2006

- **VarEPS:** 50+1 členů s T399L62 (50 km) na 7 dnů; T255(80 km) na 8-15 dnů
- deterministická předpověď T799L91 (~25 km) na 10 dní
- ansámblová předp. na 1 měsíc s T159L62 (125 km) – 1x týdně
- sezónní ansámblová předp. na 6 měsíců s T95L40 (210 km) – 1x měsíčně
- od 2007 bude měsíční ans.předpověď spojena s VarEPS na rozlišení T255

Ansámblový systém ECMWF (2)

singulární vektory

- singulární vektory T42L19 (~300 km); jako norma totální energie
- 48 h optimalizační doba
- 2 optimalizační oblasti pro mimotropické území (30S-90S), (30J-90J)
- v trop.oblastech jsou SV počítány pouze pokud je přítomna trop.níže, ale do jejich výpočtu jsou zahrnuty i **diabatické** (vlhké) procesy
- pro mimotropické oblasti jsou SV na 48 h kombinovány se SV počítanými též pro období 48 dozadu, pro podchycení perturbací rostoucích během asimilačního cyklu („evolved SV“)
- je vybráno 25 prvních nejvíce odlišných SV, které jsou dále přepočítány, aby rozptyl ansámblu odpovídal RMSE kontrolního běhu pro předpověď na 2-5 dnů

Ansámblový systém ECMWF (3)

singulární vektory – vývoj

- Kombinace SV a perturbací daných asimilačními metodami (**EDA** – Ensemble Data Assimilation)
 - podobný systém jako v MSC (Houtekamer, 1996)
 - zlepšení hlavně v tropických oblastech, kde se SV počítají pouze lokálně
 - EDA + SV může v budoucnu nahradit SV + „evolved“ SV
- **Vhké SV i pro mimotropické oblasti** (nové T-L schéma pro velkoprostorovou kondenzaci (Tompkins a Janiskova, 2004); nové schéma pro konvekci (Lopez a Moreau, 2005))
- **Hessian SV** – zohledňují chyby pozorování a jsou konsistentní s asimilačním systémem
- **SPBS** (Spectral stochastic kinetic energy BackScatter scheme)

Ansámblový systém ECMWF (4)

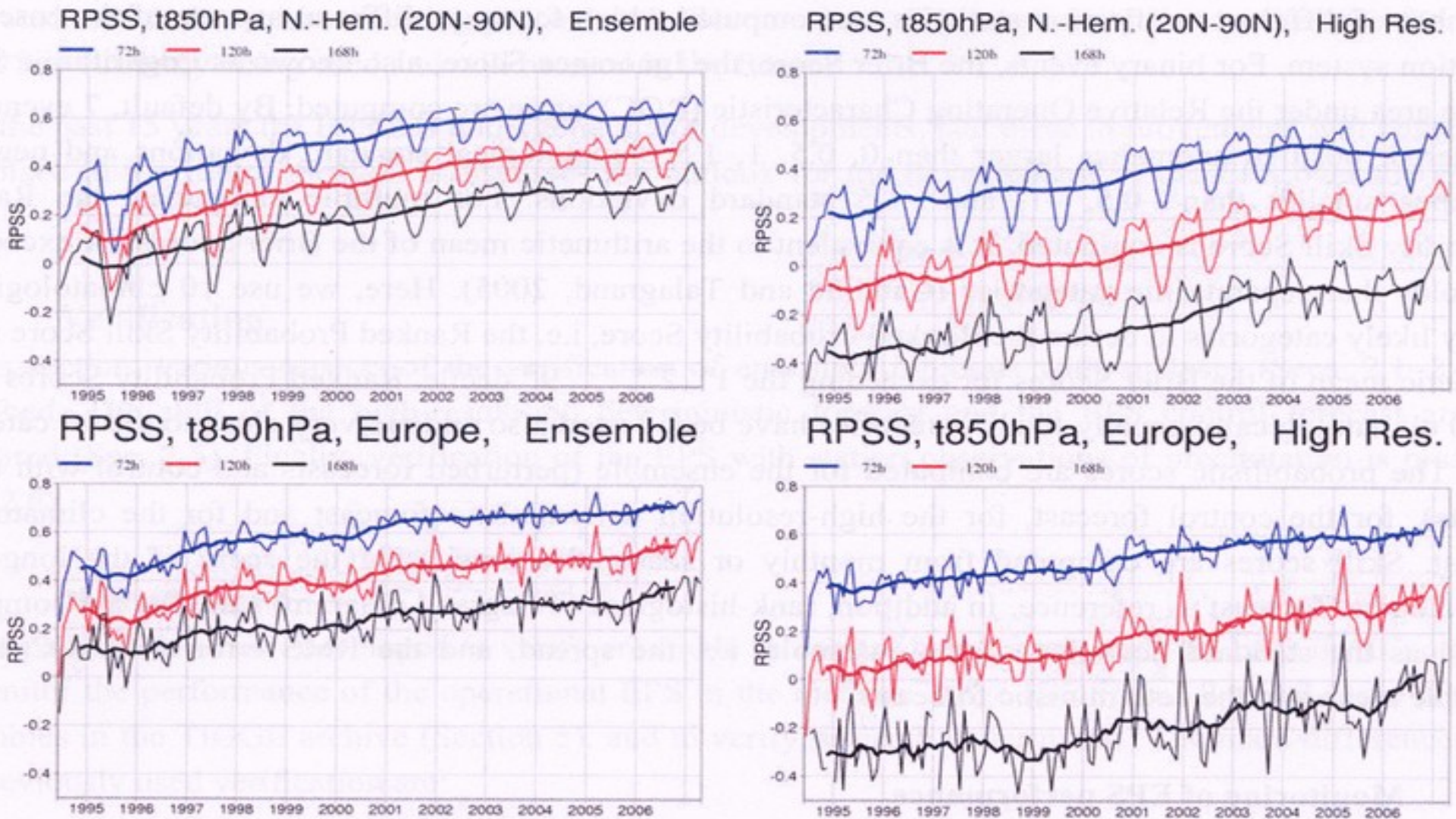


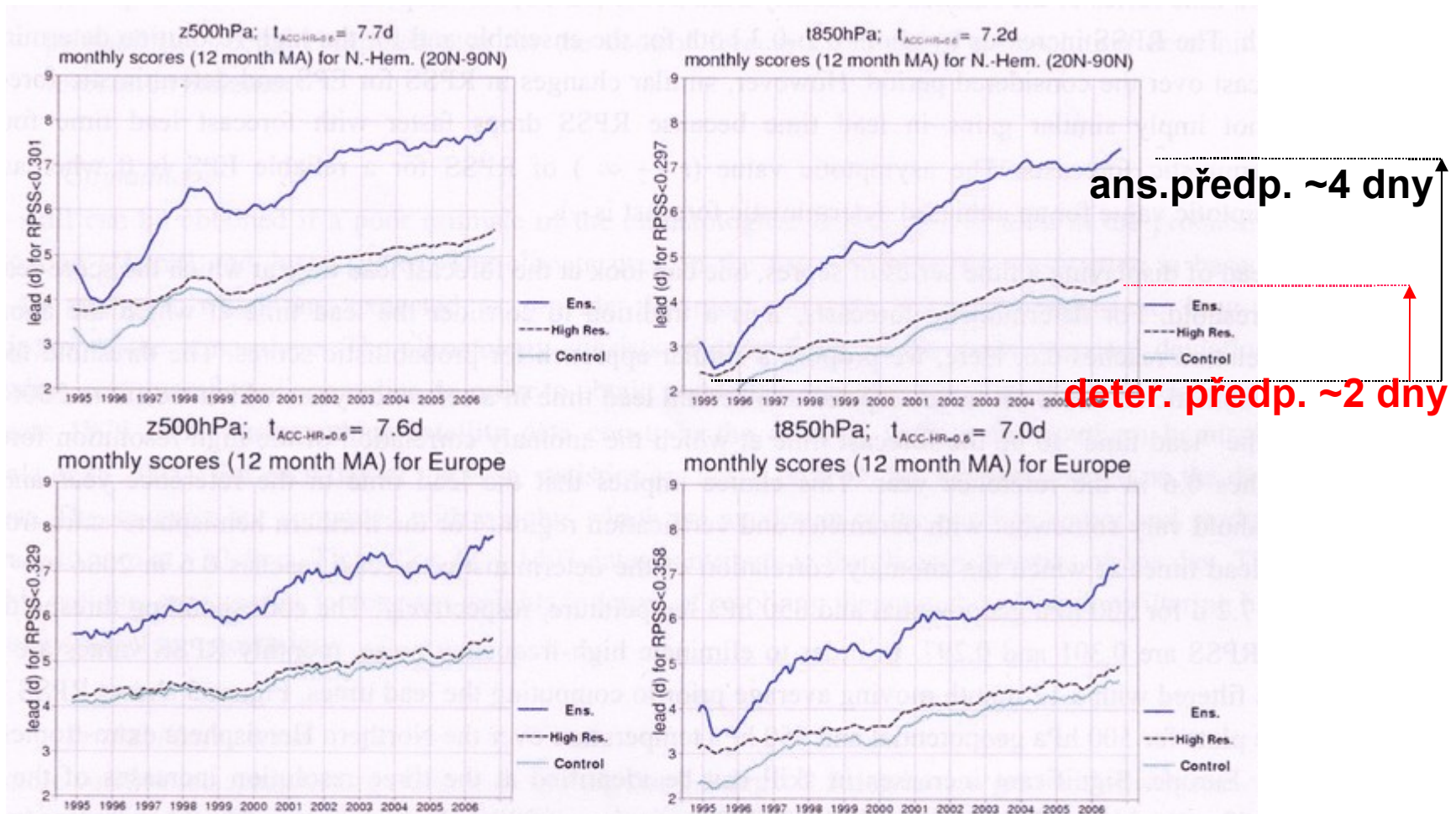
Figure 2: Time series of RPSS for temperature at 850 hPa and forecast lead-times 72, 120, 168 h for the EPS (left panels) and the high-resolution deterministic forecast (right panels). Top row: Northern Hemisphere extra-tropics, bottom row: Europe.

Ansámblový systém ECMWF (5)

z500 hPa

t850 hPa

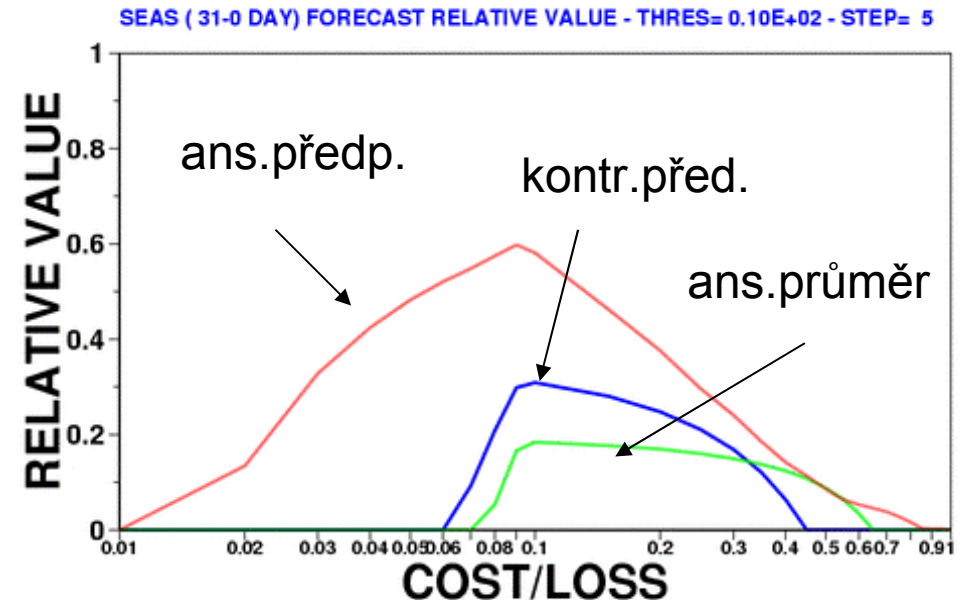
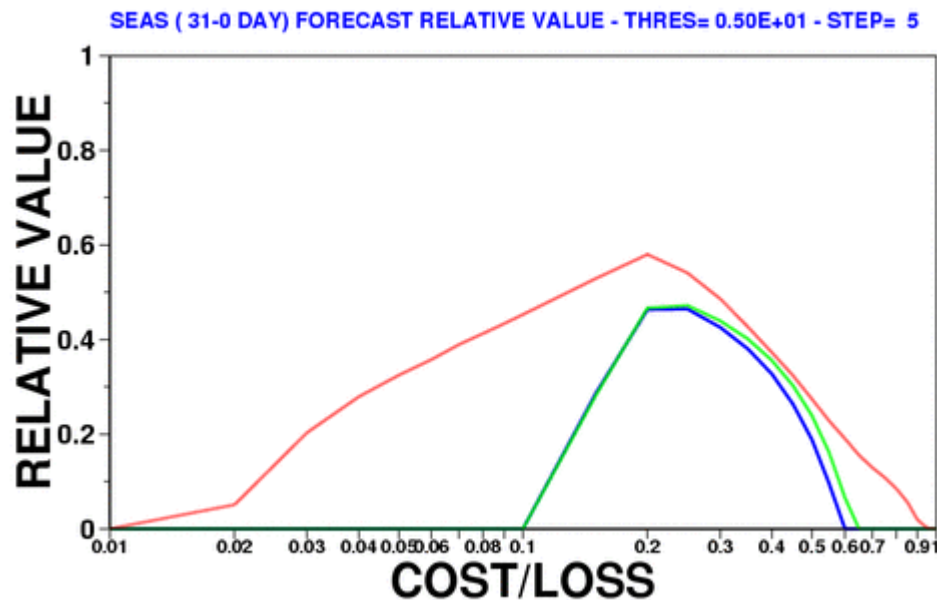
severní
polokoule



Evropa

Figure 3: Lead time (d) at which the RPSS of 500 hPa geopotential (left panels) and 850 hPa temperature (right panels) reaches a reference value r^* which corresponds to lead time t^* in the reference year 2006. The lead time t^* is chosen to be the lead time at which the ACC of the high-resolution deterministic forecast reaches 0.6 in the reference year. Lead times are computed from low-pass filtered monthly scores.

Ansámblový systém ECMWF (6)



Porovnání ekonomické hodnoty předpovědi ECMWF t+120 h: kontrolní př. (modrá), ans. průměr (zelená) a ans.předpověď (červená), průměr za prosinec 1999 na území Evropy pro 24-h srážkový úhrny > 5mm/den (vlevo) a 24-h srážkový úhrny > 10mm/den (vpravo).

ekonomická hodnota předpovědi (Richardson, 2000) ~ funkce FAR(False Alarm Ratio) a HR (Hit Rate), což jsou parametry definované, jak pro deterministické tak pravděpodobnostní předpovědi

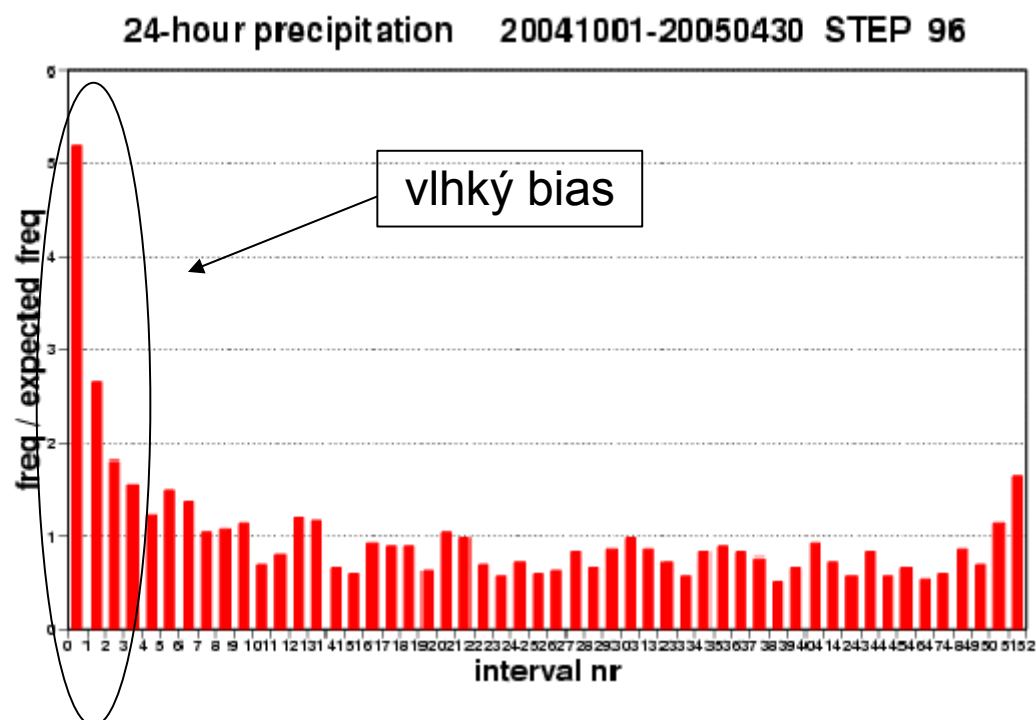
Verifikace (1)

- oproti deterministické předpovědi nejsou pravděpodobnostní předpovědi (PP) nikdy „správné“ nebo „špatné“ (vyjma případů 0 nebo 100%)
- ze své podstaty musí být PP vždy verifikovány na velkém počtu vzorků
- PP musí být jak statisticky věrohodná (reliable) tak nesmí postrádat statistické rozlišení (resolution) => nutnost sledovat více druhů skóre
- „**reliability**“, „**resolution**“, **ROC** (Relative Operating Characteristics) diagramy
- **Talagrand diagram** (někdy též „rank“ histogram)
- **BS** (Brier Score), **RPS** (Ranked Probability Score)
- **BSS** (Brier Skill Score), **RPSS** (Ranked Probability Skill Score)
- „**Relative value**“ (value score) (Wilks, 2001) – ekonomická hodnota před.

Verifikace (2)

Talagrand diagram

- v každém bodě s pozorováním seřadíme členy ansámblu od nejmenšího po největší => dostaneme $N+1$ intervalů
- zjistíme do kterého intervalu připadne hodnota z pozorování v každém bodě
- z velkého počtu pozorování dostaneme Talagrand diagram
- ideální situace – plochá křivka => ans.rozptyl dobře reprezentuje nejistotu předpovědi
- „U-tvar“ => malý rozptyl
- „J/L-tvar“ => ansámbl má bias



Verifikace (3)

ranked probability score

- rozsah 0-1 (0 perfektní skóre)
- pro dvě kategorie jde o Brier skóre
- penalizuje méně, když je předpověď bližší skutečnosti a opačně

$$RPS = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M \left[\left(\sum_{k=1}^m p_k \right) - \left(\sum_{k=1}^m o_k \right) \right]^2$$

ranked probability skill score

- rozsah $-\infty \dots 1$ (1 perfektní skóre)
- nestabilní pro malé vzorky (čím menší výskyt sledovaného jevu, tím je nutný větší vzorek)

$$RPSS = \frac{\overline{RPS} - \overline{RPS}_{reference}}{0 - \overline{RPS}_{reference}} = 1 - \frac{\overline{RPS}}{\overline{RPS}_{reference}}$$

Verifikace (4)

ekonomická hodnota

(„Relative value“)

- $-\infty \dots 1$ (1 perfektní skóre)

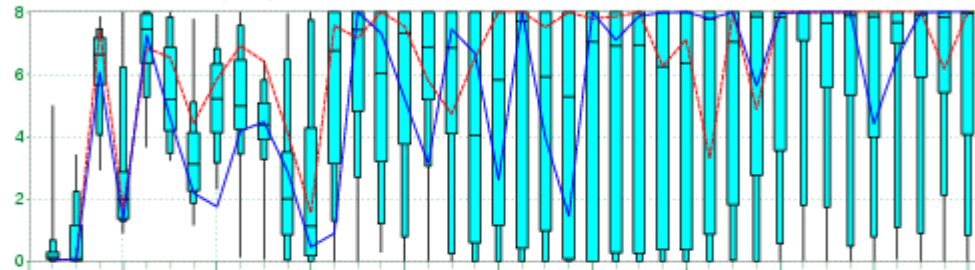
$$VS = \begin{cases} \frac{\frac{C}{L}(hits + false\ alarms - 1) + misses}{\frac{C}{L}(P_{c\lim} - 1)} & \text{if } \frac{C}{L} < P_{c\lim} \\ \frac{\frac{C}{L}(hits + false\ alarms) + misses - P_{c\lim}}{P_{c\lim}\left(\frac{C}{L} - 1\right)} & \text{if } \frac{C}{L} \geq P_{c\lim} \end{cases}$$

- “hits”, “misses” a “false alarm” jsou počítány pomocí klimatologické pravděpodobnosti $P_{c\lim}$ jako mezní hranice pro ano/ne rozhodnutí
- Jedná se o “skill” skóre očekávaných nákladů s klim. předpovědí jako referencí. Protože cost/loss poměr je odlišný pro různé uživatele, výsledek se zobrazuje většinou jako funkce C/L .
- Narozdíl od ROC skóre je citlivé na bias

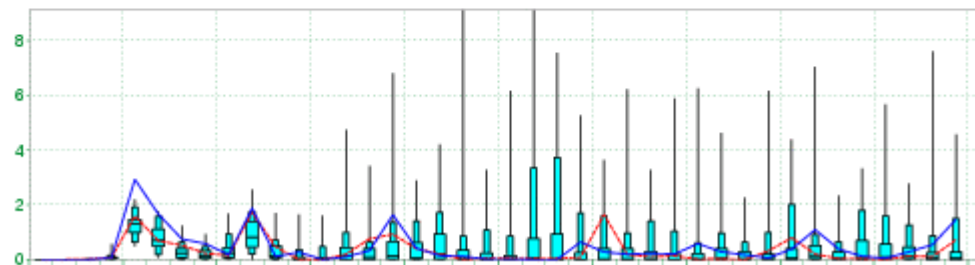
Produkty

- pravděpodobnostní mapy (např. PEPS: rychlost větru (medián, >10, 15, 20, 25 m/s); nárazy větru (medián, >10, 15, 20, 25, 33 m/s); min.teplota(medián, <0, -10 C..)
- vlečkové diagramy
- „stamp“ diagramy
- „epsgram“
- shlukové diagramy („cluster“)
- speciální produkty: např. EFI („extrem forecast index“)

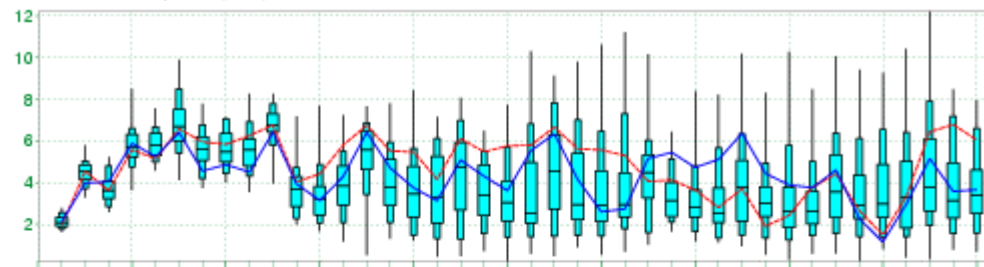
Total Cloud Cover (okta)



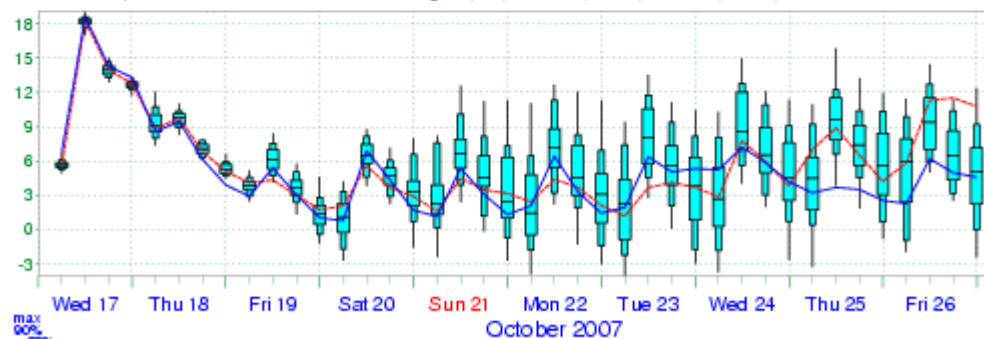
Total Precipitation (mm/6h)



10m Wind Speed (m/s)



2m Temperature reduced to station height (°C) 271m (T799) 301m (T399)



Magics++ 2.3.0

Závěr

- Ansámblové systémy jsou osvědčené v praxi zejména pro globální modely a střednědobou délku předpovědi
 - Nutnost přizpůsobení existujících metod i pro účely krátkodobé předpovědi na omezené oblasti
- Kombinované systémy (deterministická a ansámblová předpověď) jsou budoucností předpovědi počasí jak v globálním tak lokálním měřítku
- Nutnost „vychovat“ uživatele k používání a porozumění produktů pravděpodobnostní předpovědi
 - Použití PP ve varovných systémech pro výskyt extrémních jevů
 - PP jako vstupy do ekonomických „cost/lost“ modelů

Reference (1)

- výborné výukové materiály jsou dostupné na stránkách www.ecmwf.int
- prav. verifikace: <http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/EPsverif/scores/scores.html>

References

- Anderson, J.L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2884–2903.
- Anderson, J.L., 2003: A local least squares framework for ensemble filtering. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 634–642.
- Barkmeijer, J., T. Iversen, and T.N. Palmer, 2003: Forcing singular vectors and other sensitive model structures. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 2401–2423.
- Bishop, C.H., B.J. Etherton, and S.J. Majumdar, 2001: Adaptive sampling with the Ensemble Transform Kalman Filter. Part I: Theoretical aspects. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 420–436.
- Bishop, C.H., C.A. Reynolds, and M.K. Tippett, 2003: Optimization of the fixed global observing network in a simple model. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1471–1489.
- Bishop, C.H., and Z. Toth, 1999: Ensemble transformation and adaptive observations. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1748–1765.
- Bourke, W., R. Buizza, and M. Naughton, 2004: Performance of the ECMWF and the BoM ensemble prediction systems in the southern hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2338–2357.
- Burgers, G., P.J. van Leeuwen, and G. Evensen, 1998: Analysis scheme in the Ensemble Kalman Filter. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1719–1724.
- Charney, J.G., R.G. Fleagle, H. Riehl, V.E. Lally, and D.Q. Wark, 1966: The feasibility of a global observation and analysis experiment. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **47**, 200–220.
- Daley, R., and R. Ménard, 1993: Spectral characteristics of Kalman filter systems for atmospheric data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1554–1565.
- Ehrendorfer, M., 1997: Predicting the uncertainty of numerical weather forecasts: a review. *Meteorol. Z., N.F.*, **6**, 147–183.
- Ehrendorfer, M., 2003: The Liouville Equation in Atmospheric Predictability. In: *Proceedings ECMWF Seminar on Predictability of Weather and Climate, 9 – 13 September 2002*, pp. 47–81.

Reference (2)

- Ehrendorfer, M., and A. Beck, 2003: *Singular vector-based multivariate normal sampling in ensemble prediction*. ECMWF Tech. Memo. No. 416, 21 pp. [Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading RG2 9AX, England].
- Ehrendorfer, M., and J.J. Tribbia, 1997: Optimal prediction of forecast error covariances through singular vectors. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 286–313.
- Epstein, E.S., 1969: Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, **21**, 739–759.
- Errico, R.M., 2000a: Interpretations of the total energy and rotational energy norms applied to determination of singular vectors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1581–1599.
- Errico, R.M., 2000b: The dynamical balance of leading singular vectors in a primitive-equation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1601–1618.
- Errico, R.M., 2003: The workshop on applications of adjoint models in dynamic meteorology. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **84**, 795–798.
- Errico, R.M., M. Ehrendorfer, and K. Raeder, 2001: The spectra of singular values in a regional model. *Tellus*, **53A**, 317–332.
- Errico, R.M., and R. Langland, 1999: Notes on the appropriateness of “bred modes” for generating initial perturbations used in ensemble prediction. *Tellus*, **51A**, 431–441.
- Errico, R.M., K. Raeder, and M. Ehrendorfer, 2004: Singular vectors for moisture-measuring norms. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 963–987.
- Errico, R.M., and K.D. Raeder, 1999: An examination of the accuracy of the linearization of a mesoscale model with moist physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 169–195.
- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte-Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, **99(C5)**, 10143–10162.
- Farrell, B.F., and P.J. Ioannou, 1996a: Generalized stability theory. Part I: autonomous operators. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2025–2040.
- Farrell, B.F., and P.J. Ioannou, 1996b: Generalized stability theory. Part II: nonautonomous operators. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2041–2053.

Reference (3)

- Gauthier, P., P. Courtier, and P. Moll, 1993: Assimilation of simulated wind lidar data with a Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1803–1820.
- Gelaro, R., R. Buizza, T.N. Palmer, and E. Klinker, 1998: Sensitivity analysis of forecast errors and the construction of optimal perturbations using singular vectors. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1012–1037.
- Gelaro, R., R.H. Langland, G.D. Rohaly, and T.E. Rosmond, 1999: An assessment of the singular–vector approach to targeted observing using the FASTEX dataset. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 3299–3327.
- Gelaro, R., C.A. Reynolds, and R.M. Errico, 2002: Transient and asymptotic perturbation growth in a simple model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 205–227.
- Gelaro, R., C.A. Reynolds, R.H. Langland, and G.D. Rohaly, 2000: A predictability study using geostationary satellite wind observations during NORPEX. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3789–3807.
- Gelaro, R., T. Rosmond, and R. Daley, 2002: Singular vector calculations with an analysis error variance metric. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1166–1186.
- Golub, G.H., and C.F. Van Loan, 1989: *Matrix Computations*. The Johns Hopkins University Press, 642 pp.
- Hamill, T.M., S.L. Mullen, C. Snyder, Z. Toth, and D.P. Baumhefner, 2000: Ensemble forecasting in the short to medium range: Report from a workshop. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **81**, 2653–2664.
- Hamill, T.M., and C. Snyder, 2002: Using improved background–error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1552–1572.
- Hamill, T.M., C. Snyder, and R.E. Morss, 2000: A comparison of probabilistic forecasts from bred, singular–vector, and perturbed observation ensembles. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1835–1851.
- Hamill, T.M., C. Snyder, and R.E. Morss, 2002: Analysis–error statistics of a quasigeostrophic model using three-dimensional variational assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2777–2790.
- Hamill, T.M., C. Snyder, and J.S. Whitaker, 2003: Ensemble forecasts and the properties of flow–dependent analysis–error covariance singular vectors. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1741–1758.

Reference (4)

- Hamill, T.M., J.S. Whitaker, and C. Snyder, 2001: Distance-dependent filtering of background error covariance estimates in an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2776–2790.
- Hamill, T.M., J.S. Whitaker, and X. Wei, 2004: Ensemble reforecasting: Improving medium-range forecast skill using retrospective forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1434–1447.
- Hoskins, B.J., I. Draghici, and H.C. Davies, 1978: A new look at the ω -equation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **104**, 31–38.
- Houtekamer, P.L., and H.L. Mitchell, 1998: Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 796–811.
- Houtekamer, P.L., and H.L. Mitchell, 2001: A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 123–137.
- Langland, R.H., M.A. Shapiro, and R. Gelaro, 2002: Initial condition sensitivity and error growth in forecasts of the 25 January 2000 East Coast snowstorm. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 957–974.
- Laprise, R., M.R. Varma, B. Denis, D. Caya, and I. Zawadzki, 2000: Predictability of a nested limited-area model. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4149–4154.
- Leith, C.E., 1974: Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 409–418.
- Lorenz, E.N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130–141.
- Lorenz, E.N., 1965: A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, **17**, 321–333.
- Lorenz, E.N., 1969a: The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, **21**, 289–307.
- Lorenz, E.N., 1969b: Three approaches to atmospheric predictability. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **50**, 345–349.
- Lorenz, E.N., 1984: Irregularity: a fundamental property of the atmosphere. *Tellus*, **36A**, 98–110.
- Lorenz, E.N., 1993: *The Essence of Chaos*. University of Washington Press, 227 pp.
- Majumdar, S.J., C.H. Bishop, R. Buizza, and R. Gelaro, 2002: A comparison of ensemble-transform Kalman-filter targeting guidance with ECMWF and NRL total-energy singular-vector guidance. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 2527–2549.

Reference (5)

- Majumdar, S.J., C.H. Bishop, B.J. Etherton, and Z. Toth, 2002: Adaptive sampling with the Ensemble Transform Kalman Filter. Part II: Field program implementation. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1356–1369.
- Mardia, K.V., J.T. Kent, and J.M. Bibby, 1982: *Multivariate Analysis*. Academic Press, 521 pp.
- Mitchell, H.L., and P.L. Houtekamer, 2000: An adaptive ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 416–433.
- Mitchell, H.L., P.L. Houtekamer, and G. Pellerin, 2002: Ensemble size, balance, and model–error representation in an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2791–2808.
- Molteni, F., R. Buizza, T.N. Palmer, and T. Petroligis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 73–119.
- Molteni, F., and T.N. Palmer, 1992: Predictability and Finite–Time Instability of the Northern Winter Circulation. In: *Proceedings ECMWF Workshop on New Developments in Predictability, 13 – 15 November 1991*, pp. 101–142.
- Noble, B., and J.W. Daniel, 1988: *Applied linear algebra*. Prentice–Hall, 521 pp.
- Palmer, T., F. Molteni, R. Mureau, R. Buizza, P. Chapelet, and J. Tribbia, 1993: Ensemble Prediction. In: *Proceedings ECMWF Seminar on Validation of Models over Europe, Vol. I, 7 – 11 September 1992*, pp. 21–66.
- Palmer, T.N., C. Brankovic, F. Molteni, and R. Mureau, 1990: Predictability in the Medium Range and Beyond. In: *Proceedings ECMWF Seminar on Ten years of medium–range weather forecasting, Vol. I, 4 – 8 September 1989*, pp. 129–158.
- Palmer, T.N., R. Gelaro, J. Barkmeijer, and R. Buizza, 1998: Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 633–653.
- Patil, D.J., B.R. Hunt, E. Kalnay, J.A. Yorke, and E. Ott, 2001: Local low dimensionality of atmospheric dynamics. *Physical Review Letters*, **86**, 5878–5881.
- Rabier, F., E. Klinker, P. Courtier, and A. Hollingsworth, 1996: Sensitivity of forecast errors to initial conditions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 121–150.
- Reynolds, C.A., and R.M. Errico, 1999: Convergence of Singular Vectors toward Lyapunov Vectors. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2309–2323.

Reference (6)

- Reynolds, C.A., R. Gelaro, and J.D. Doyle, 2001: Relationship between singular vectors and transient features in the background flow. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 1731–1760.
- Reynolds, C.A., and T.N. Palmer, 1998: Decaying singular vectors and their impact on analysis and forecast correction. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3005–3023.
- Schmid, P.J., and D.S. Henningson, 2001: *Stability and Transition in Shear Flows*, Volume 142 of *Applied Mathematical Sciences*. Springer, 556 pp.
- Simmons, A.J., and A. Hollingsworth, 2002: Some aspects of the improvement in skill in numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 647–677.
- Thompson, P.D., 1957: Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns. *Tellus*, **9**, 275–295.
- Tippett, M.K., J.L. Anderson, C.H. Bishop, T.M. Hamill, and J.S. Whitaker, 2003: Ensemble square root filters. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1485–1490.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **74**, 2317–2330.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3297–3319.
- Tribbia, J.J., and D.P. Baumhefner, 2004: Scale interactions and atmospheric predictability: An updated perspective. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 703–713.
- van Leeuwen, P.J., 1999: Comment on “Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique”. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1374–1377.
- Verlaan, M., and A.W. Heemink, 1997: Tidal flow forecasting using reduced rank square root filters. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, **11**, 349–368.
- Verlaan, M., and A.W. Heemink, 2001: Nonlinearity in data assimilation applications: A practical method for analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1578–1589.