



Meteorológiai előrejelzések

Balogh Miklós

Meteorológus

BME Áramlástan Tanszék

baloghm@ara.bme.hu

Tartalom

- Az előrejelzés története
- Az ember és a meteorológia
- Dinamikus meteorológia
- Az előrejelzés elmélete
- Számszerű előrejelzések
- Áramlástani alkalmazások

Az időjárás és az ember

- Kölcsönhatás a természettel
 - Kezdetekben passzív résztvevő
 - Később a környezet tudatos átalakítása
 - Napjainkban aktív beavatkozás
- Az előrejelzések fontossága
 - A jövő megtervezése
 - A katasztrófák és károk megelőzése
 - A termelés optimalizálása

Empirikus előrejelzések

- Népi megfigyelések
 - Állatok viselkedésének megfigyelése (alacsonyan repülnek a fecskék)
 - Események közötti összefüggések („Vörös az ég alja, aligha szél nem lesz”)
 - Éghajlati tapasztalatok (Medárd nap, Katalin nap, Vénasszonyok nyara)
- Egy öreg juhász lokális, háromnapos előrejelzésének nagy a beválási valószínűsége

Az elméleti meteorológia

- Reneszánsz korban instrumentális meteorológia
- Általános cirkuláció:
 - 1686 – Edmund Halley – a három óceán monszun és passzát szelei
 - 1735 – George Hadley – egycellás cirkuláció
 - Immanuel Kant
- Fizika és matematika:
 - D'Alembert – pontrendszer mechanikája
 - Leonhard Euler – folytonos közeg mozgásegyenletei
 - Lagrange – mozgásegyenlet részecskékhez kötött koordináta-rendszerben

Az elméleti meteorológia

- Termodinamika:
 - John Dalton – parciális nyomás fogalma
 - Louis Joseph Gay-Lussac – légkör szerkezetének vizsgálata
 - Nicolas Leonhard Sadi Carnot – Carnot körfolyamat
 - Rudolf Julius Emanuel Clausius, Benoit Paul Emil Clapeyron – Clausius-Clapeyron egyenlet, a légkörben lejátszódó fázisátalakulási folyamatok vizsgálatának alapösszefüggése
 - Dmitrij Ivanovics Mengyelejev – univerzális gázegyenlet

A számszerű előrejelzések

- 1904, Vilhelm Bjerknes előrejelzés elmélete
- 1910, Lewis Fry Richardson első kísérlete
- 1948, Jule Charney szűrt egyenletei
- 1951, Neumann János, Jule Charney, Ragnar Fjortoft barotróp örvényességi modellje az ENIAC-on



2007/5/7

Meteorológiai előrejelzések

8

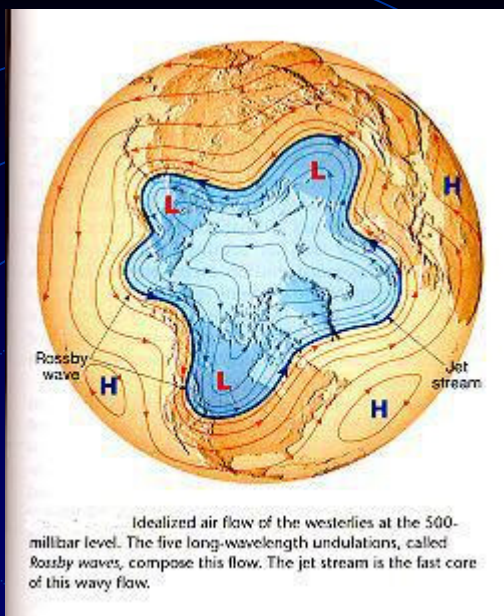
Az előrejelzések elmélete

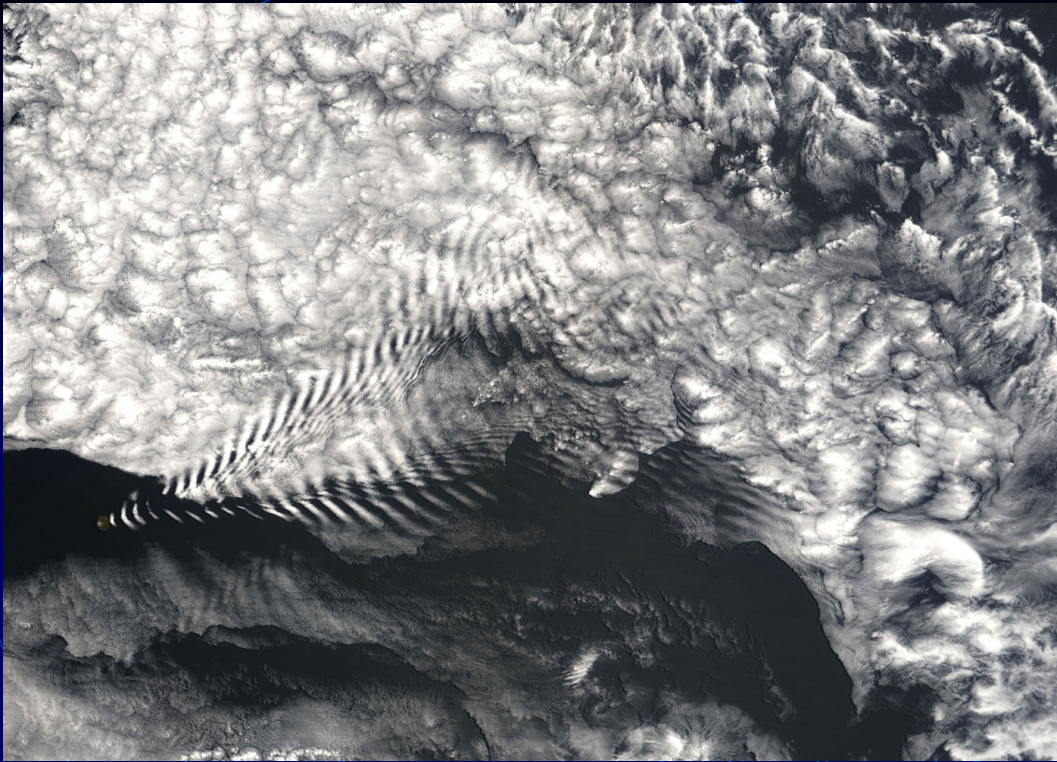
- Prognosztikai egyenletrendszer = hidro-termo-dinamikai egyenletrendszer adott koordinátarendszer szerinti, szelektív alakja
- Diszkretizálás = egyenletek értelmezése egy diszkrét rácson
- Adatasszimiláció = kezdeti és peremfeltételek megadása
- Inicializáció = nyomási és áramlási tér konzisztenciájának biztosítása
- Modellintegrálás = egyenletek numerikus megoldása
- Utófeldolgozás = számszerű eredmények kiértékelése



Nagyságrendi analízis

- Globális skála (makro-a):
 - $L=10^7$ m, $D=10^4$ m, $T=10^6 - 10^9$ s
- Szinoptikus skála (makro-b):
 - $L = 10^6$ m, $D = 10^4$ m, $T = 10^5 - 10^6$ s
- Mezo skála:
 - $L = 10^2 - 10^5$ m, $D = 10^4$ m, $T = 10^3 - 10^5$ s
- Mikro skála:
 - $L = 10^{-2} - 10^2$ m, $D = 10^{-2} - 10^2$ m, $T = 10^{-1} - 10^2$ s





2007/5/7

Meteorológiai előrejelzések

12

Közelítések makro skálán

- Kvázi-hidrosztatikus közelítés:
 - $L \gg D$ és $U \gg W \Rightarrow dw/dt \sim 0$
- Kvázi-stacionárius közelítés:
 - Horizontális erőegyensúly, azaz geosztrófikus, gradiens ill. ciklosztrófikus áramlások
- Adiabatikus közelítés
 - Légtömegek határán nincs hőcsere
- Gömbi közelítés
 - A Föld egyszerűsített geometriája

Közelítések mezo skálán

- A konvektív folyamatokra alkalmazhatjuk:
 - Mély konvekciós (anelasztikus) közelítés:

$$\rho = \rho(z), \text{ ekkor } \frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial z} w \rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial z} w = -\rho \operatorname{div} \vec{V}$$

- Sekély konvekciós közelítés ($D < H_{\text{troposzféra}}$):

$$\rho = \rho_0, \operatorname{div} \vec{V} = 0$$

Közelítések mikro skálán

- Mivel a nem-viszkózus közegekre felírt HTE nem használható a planetáris határrétegben, ezért:
 - A HTE-t a turbulens átlagokra írjuk fel, ahol az átlagok:

$$\bar{\vec{V}} = \frac{1}{V_c} \frac{1}{T_c} \int \int_{T_c V_c} \vec{V}(x, y, z, t) dx dy dz dt$$

$$\bar{T} = \frac{1}{V_c} \frac{1}{T_c} \int \int_{T_c V_c} T(x, y, z, t) dx dy dz dt$$

$$\bar{q} = \frac{1}{V_c} \frac{1}{T_c} \int \int_{T_c V_c} q(x, y, z, t) dx dy dz dt$$

Ahol V_c a modell térbeli felbontóképességének jellemző térfogata, T_c pedig a modell időbeli felbontóképességének intervalluma

A HTE lezárása

- HTE-be az átlagok és az átlagok körüli eltérések összegét helyettesítjük
- Átlagoljuk az egyenleteket
- Az átlagolt egyenletben szereplő Reynolds feszültségeket az átlagos mennyiségekkel fejezzük ki
- Feltesszük, hogy a turbulens áramok a tulajdonság átlagos gradienseivel arányosak, és az arányossági tényező a turbulens kicserélődési együttható
- A turbulens áramokra vonatkozó prognosztikai egyenletekben 3-ad rendű korrelációs tagok is fellépnek, ezeket parametrizáljuk
- Egy n -ed rendű egyenletben $n+1$ -ed rendű momentumok lépnek fel (n -ed rendű lezárás: $n+1$ tag parametrizálása)

A turbulens áramok

- Momentum: $\tau = \rho \cdot K_m \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = \rho \cdot u_*^2$
- Hő: $Q = -\rho \cdot c_p \cdot K_H \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial z} = -\rho \cdot c_p \cdot k \cdot u_* \cdot T_*$
- Nedvesség: $M = -\rho \cdot K_q \cdot \frac{\partial q}{\partial z} = -\rho \cdot k \cdot u_* \cdot q_*$
- Monin-Obukhov-féle hasonlósági elmélet:

$$L_{mon} = \frac{u_*^2}{k^2 (g/T) T_*}, \quad \xi = \frac{z}{L_{mon}}$$

Numerikus közelítések

- Térbeli diszkretizáció:
 - Horizontális koordináták: gömbi koordináták, síkbeli leképezések
 - Véges differencia modellek (rácstípusok)
 - Galjorkin módszerek, spektrális és véges elem módszerek (függvény rendszerek alkalmazása)
 - Vertikális koordináták (felszínkövető, szigma, hibrid)
- Időbeli diszkretizáció
 - explicit rész („leap-frog”)
 - implicit rész
 - szemi-implicit séma
 - szemi-Lagrange advekciós séma

Koordináta rendszerek

- Szférikus koordinátarendszer:

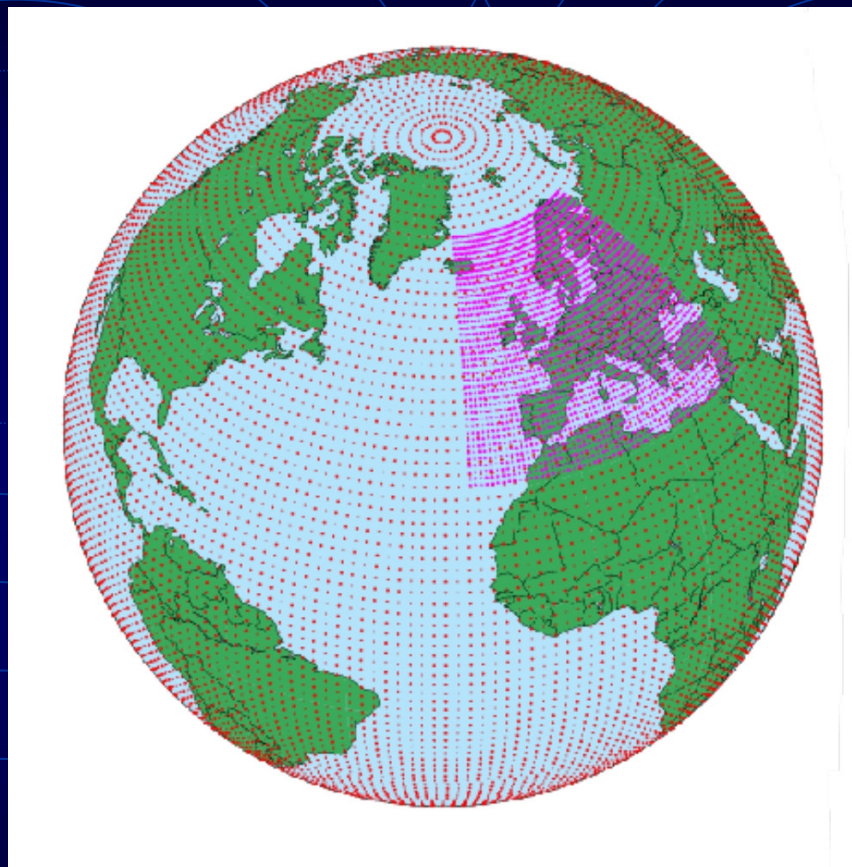
$$\frac{du_s}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_s} + f v_s - l w_s + \frac{u_s v_s}{r} \operatorname{tg} \varphi - \frac{u_s w_s}{r} + F_{sx}$$

$$\frac{dv_s}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y_s} - f u_s - \frac{u_s u_s}{r} \operatorname{tg} \varphi - \frac{v_s w_s}{r} + F_{sy}$$

$$\frac{dw_s}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z_s} - g + l u_s + \frac{u_s u_s}{r} + \frac{v_s v_s}{r} + F_{sz}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \left(\frac{\partial u_s}{\partial x_s} + \frac{\partial v_s}{\partial y_s} + \frac{\partial w_s}{\partial z_s} - \frac{v_s}{r} \operatorname{tg} \varphi + \frac{2w_s}{r} \right)$$

Rácshálózat



Koordináta rendszerek

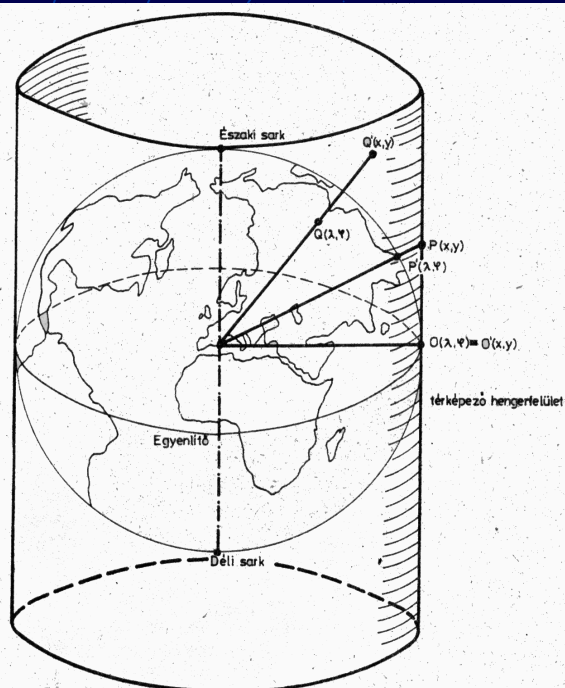
- Descartes-i koordinátarendszer:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + lw - fv + \frac{1}{\rho} F_{sx}$$

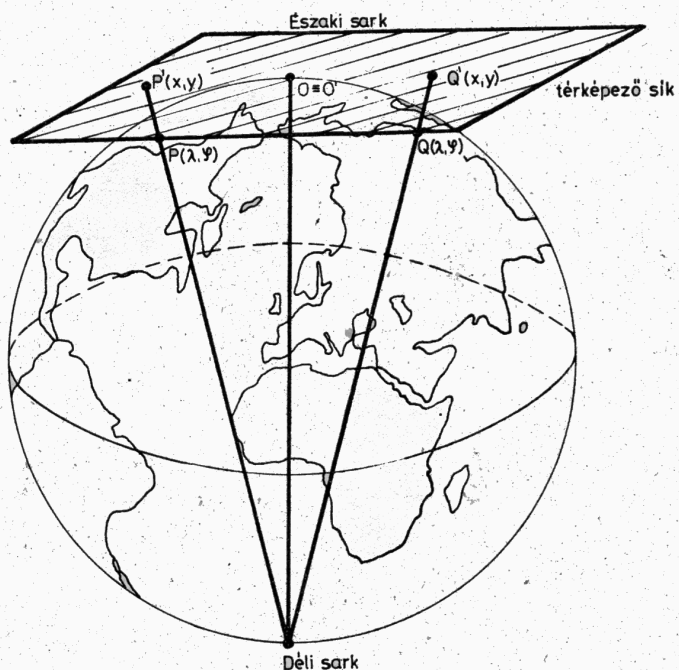
$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + \frac{1}{\rho} F_{sy}$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + lu + \frac{1}{\rho} F_{sz}$$

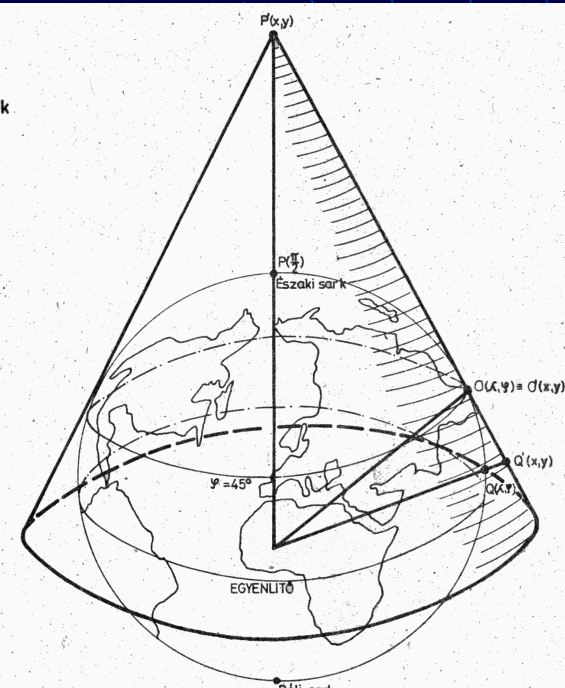
$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} \vec{V}$$



2.2 ábra. A Mercator-féle hengervetület készítése.



2.1 ábra. A polársztereografikus vetület készítése.

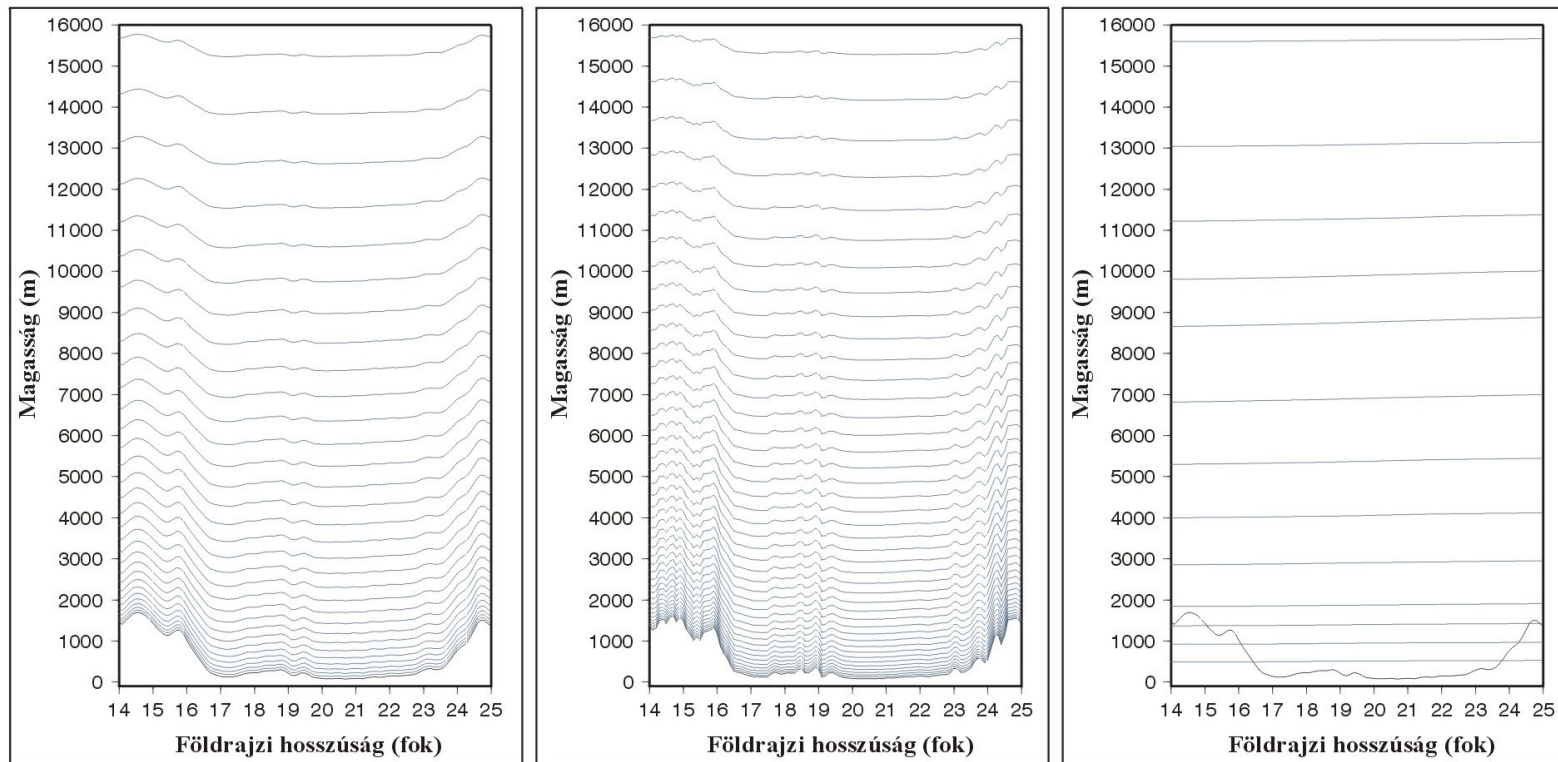


2.3 ábra. A 45°-os Lambert-féle kupvetület készítése.

A vertikális koordinátázás

- Problémák a vertikális koordinátákkal (r, z):
 - 1. Az előrejelzési tartomány kiterjedése függőleges irányban nem egyértelműen meghatározható, mivel ρ és p a z növekedésével csak aszimptotikusan tart 0-hoz
 - 2. A földfelszín domborzatának szintkülönbségei a légkör függőleges kiterjedésével összehasonlítva nem elhanyagolhatók

A modellszintek, illetve a nyomási szintek és a modelldomborzat metszetei 47,5 fokos szélesség mentén



Matematikai egyszerűsítések

- Dinamikai leírás explicit egzakt módon
- Fizikai paraméterezés:
 - Rácstávolságnál kisebb skálájú folyamatok
 - „Túl” bonyolult folyamatok
 - Pl. sugárzás, konvekció, felhőfizika, planetáris határréteg leírása, turbulencia, diffúzió, gravitációs hullám ellenállás, talaj hidrológia, stb.

Peremfeltételek

Cél: A gravitációs hullámok visszaverődésének megakadályozása

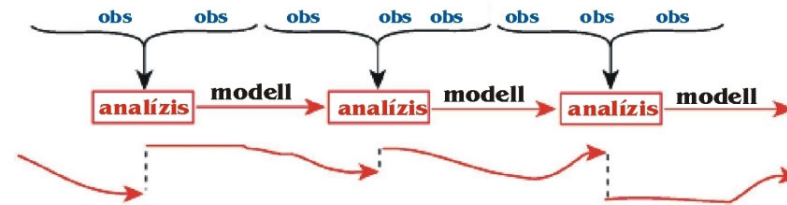
- Alsó peremen: a tökéletes körüláramlás feltétele a szélsősebességre
- Felső peremen: pl. „szivacs” réteg, vagy „sugárzó” felső határfeltétel
- Oldalsó peremeken:
 - Globális modellek (változó felbontásnál)
 - Korlátos tartományú modellek (relaxációs technika)

Az adatasszimiláció

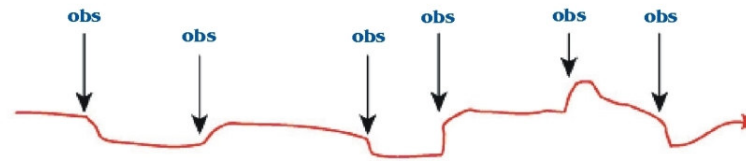
- Adatasszimiláció = kezdeti feltételek megadása
- A légkör állapotának pontos leírása, figyelembe véve
 - a lehető legtöbb mérési adatot, és megfigyelést,
 - a korábbi modelleredményeket
 - a légkörre vonatkozó törvényszerűségeket
- A térben szabálytalanul elhelyezkedő adatok rácsra illesztése, interpolálása (objektív analízis)

szekvenciális, ciklikus asszimiláció

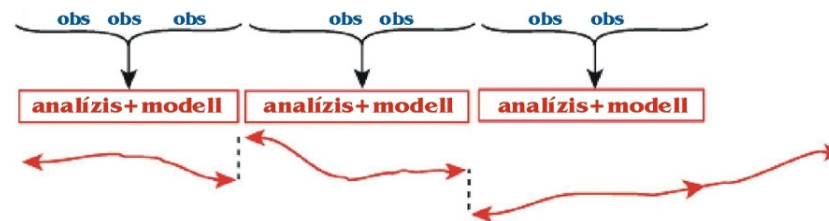
obs: megfigyelés



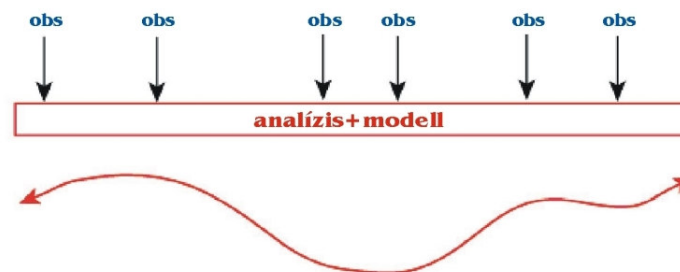
szekvenciális, folytonos asszimiláció



nem-szekvenciális, ciklikus asszimiláció

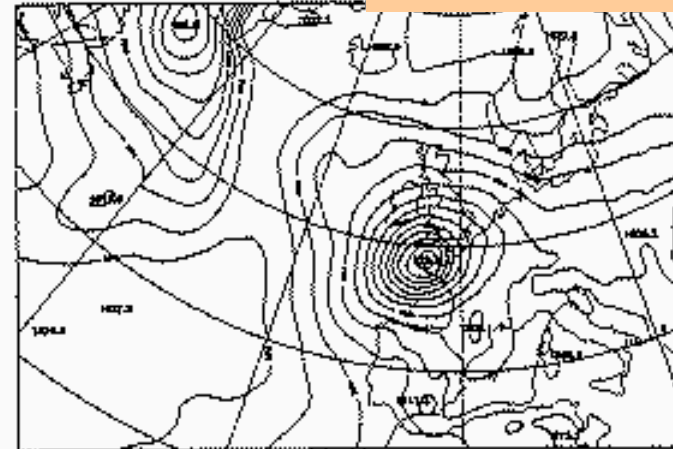


nem-szekvenciális, folytonos asszimiláció

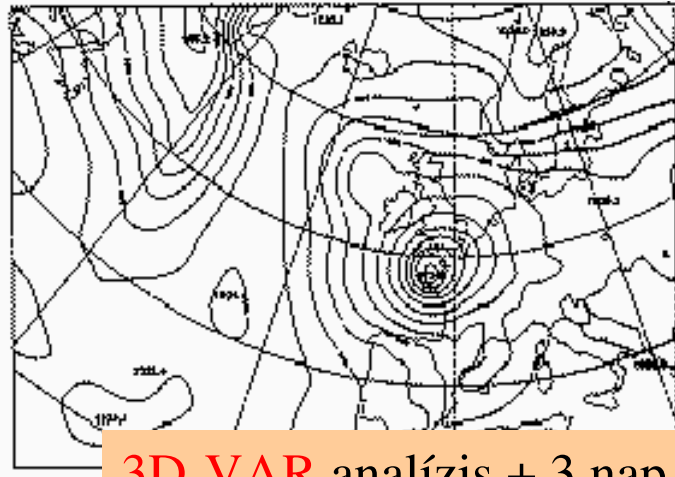


Az adatasszimiláció fontossága

Msl Par2 13/9/ Verifikációs analízis

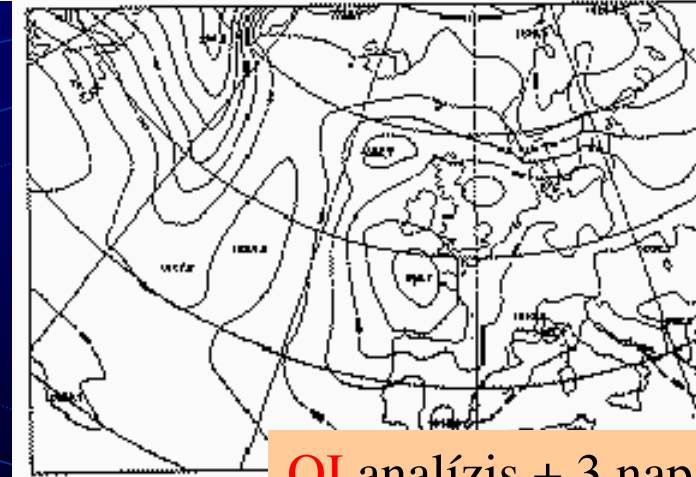


Msl Par2 10/9/93 0h fc t+72 V



3D-VAR analízis + 3 nap

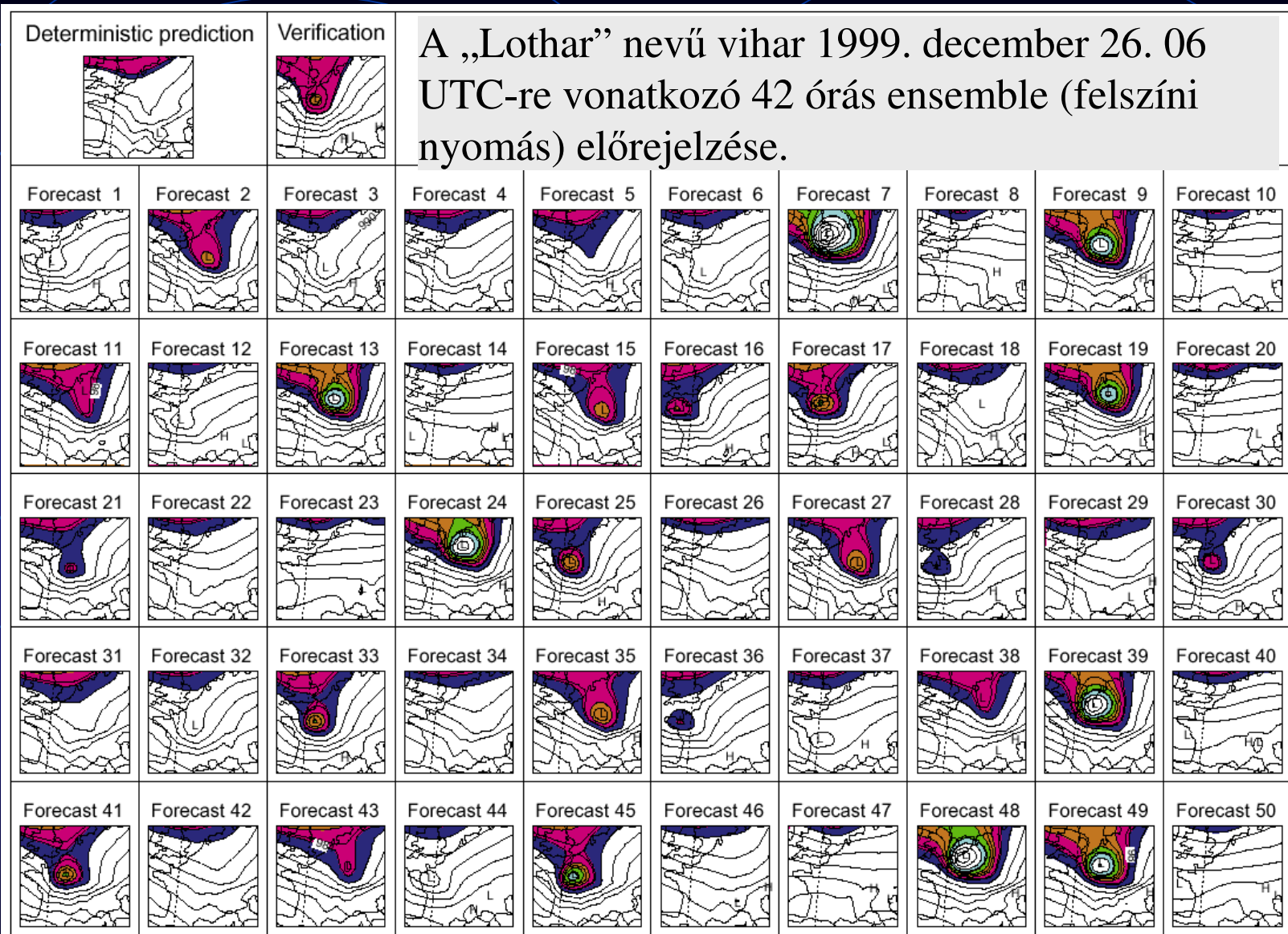
3 0h fc t+72 VT:13/9/93 0h can



OI analízis + 3 nap

Az ensemble előrejelzések

- Az kezdeti feltételek bizonytalanságára épül
- Perturbált kezdeti mezőkből számított sokaság
- Ezen sokaság vizsgálata statisztikai információkat eredményez
- Egyes események bekövetkezési valószínűségére következtethetünk
- Hatalmas számítási kapacitást igényel





2007/5/7

Meteorológiai előrejelzések

32

Az előrejelzések felhasználása



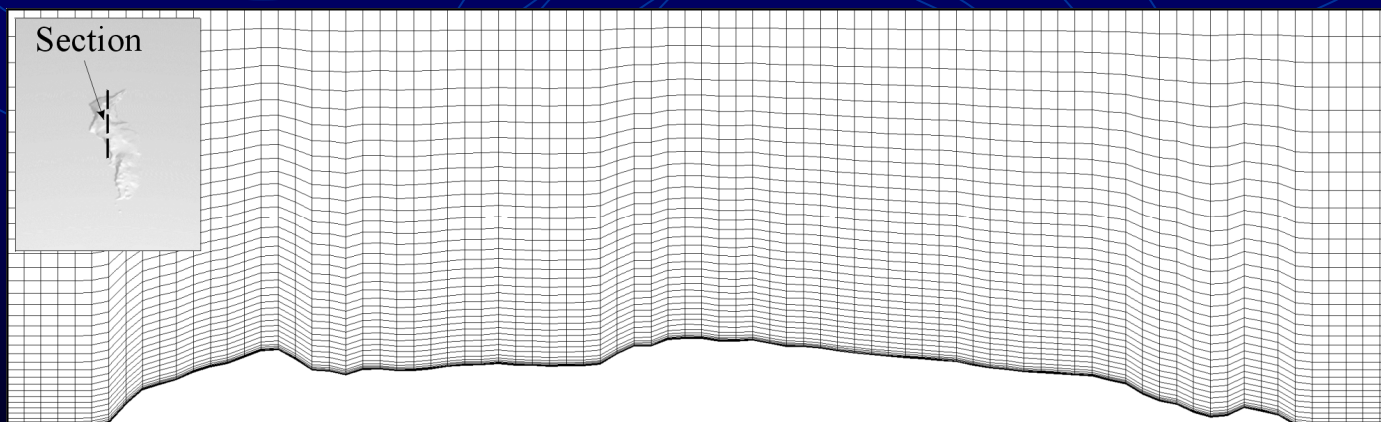
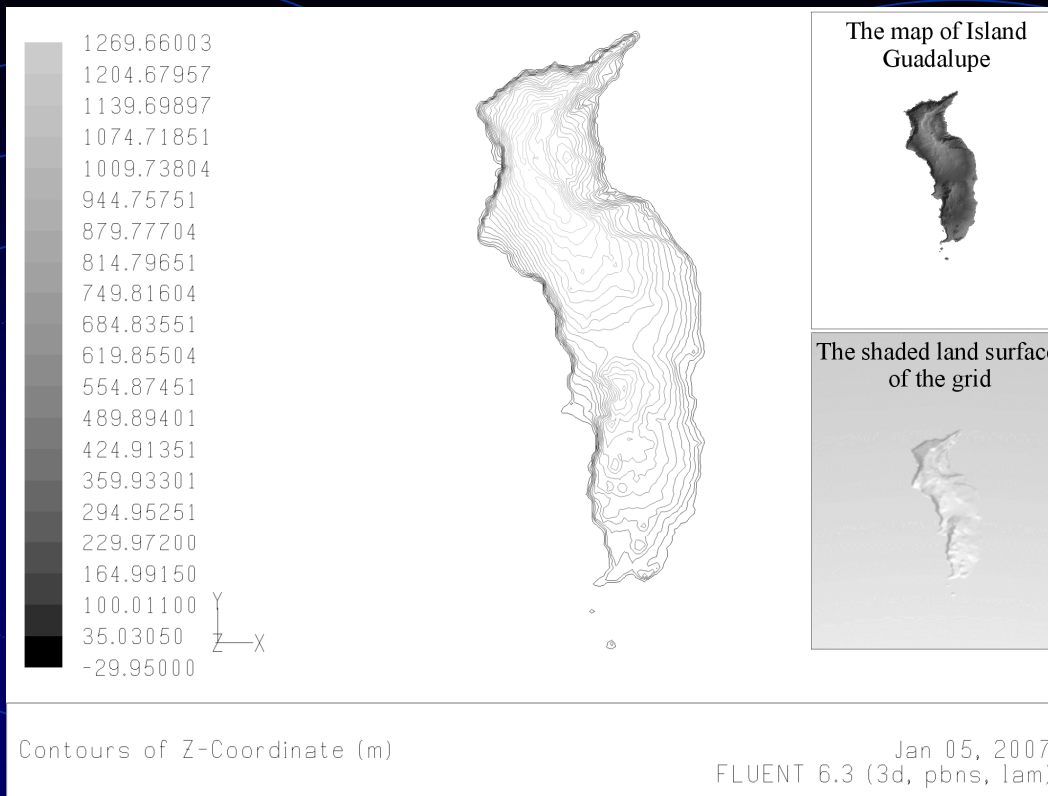
2007/5/7

Meteorológiai előrejelzések

33

Áramlástan alkalmazások

- Kis számú rácspont ($\sim 10^6$)
- Korlátos tartomány
- Descartes-i koordinátarendszer
- Turbulencia modellek alkalmazása
- Magas numerikus költség
- Speciális háló





2007/5/7

Meteorológiai előrejelzések

36

An aerial photograph showing a vast, dense, and highly textured cloud formation, likely a large-scale weather system or a massive fire plume, extending over a dark blue body of water. The clouds are illuminated from below, giving them a bright, almost white appearance with some yellowish-orange highlights. The sky above the clouds is a deep, clear blue. The text 'Köszönöm a figyelmet!' is overlaid in the center of the image in a white, serif font.

Köszönöm a figyelmet!