

A szinoptikus és numerikus időjárás-előrejelzés elméleti háttérének fejlődéséről

Betekintés a a korszerű szinoptika (konceptuális előrejelzés) és számítógépes (számszerű, numerikus) előrejelzés egységes elméleti alapja, a **légkördinamika elmúlt 100 éves fejlődésébe**

Alapok 1.

A szinoptikus és a számszerű előrejelzések háttere:

- A légkör „időjárás működésének” megértése – elméleti oldal
 - A légköri mozgásrendszerek és méretskálák – a **0. kulcs**
 - A nagyságrendi analízis – az **1. kulcs**
 - A légköri hullámok dinamikája – a **2. kulcs**
 - A légköri energetika – a **3. kulcs**
 - A légkör rendezetlen rendezettsége – a **4. kulcs**
- A modellalkotás és előrejelzés módszerei – gyakorlati oldal

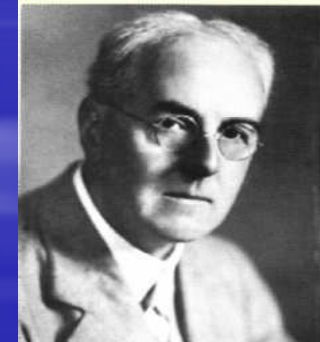
Alapok 2.

A szinoptikus és a számszerű előrejelzés módszertanának összehasonlító áttekintése:

MODELLEZÉS	SZINOPTIKA
adatasszimiláció	analízis
modell dinamika (HTER)	helyzet dinamikai elemzése
modell fizika (parametrizációk)	kisebb skálájú hatások, képződmények elemzése
számszerű előrejelzés előállítása (numerikus módszer)	az általános szinoptikai helyzet konceptuális előrejelzése
modell eredmények „megfelelő” interpretációja (MOS, stb.)	adott területre vonatkozó adott tartalmú előrejelzés készítése

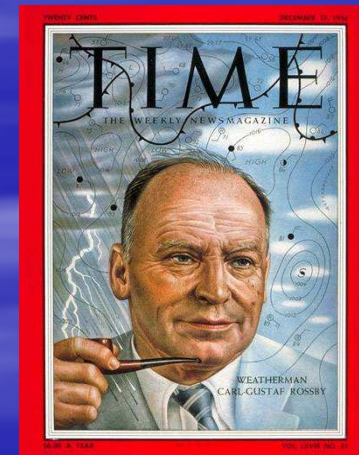
A történet 1.

- 1904 - **Vilhelm Bjerknes** felveti és elméletileg igazolja a számszerű előrejelzés lehetőségét az összenyomható közeg hidro-termodinamikai egyenletrendszerére alapján,
- 1922 – **Lewis Fry Richardson** gyakorlati kísérletet tesz számszerű előrejelzésre, ami azonban teljes kudarccal végződik,
- 1922-1948: a kudarc tanulságai elemzésének és a kudarcot okozó hibák kijavításának időszaka, **Jule G. Charney** „On the scale of atmospheric motions” c. cikkéig



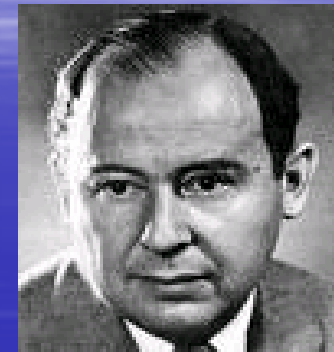
A történet 2.

- 1921-1948: a tanulságok elemzésének és a kudarcot okozó hibák kijavításának időszaka:
 - 1928: a **Courant-Friedrichs-Lewy** féle stabilitási feltétel
➡ lehetőség stabil numerikus megoldás előállítására
 - 1936-39: **Carl-Gustaf Rossby**: a légköri hosszúhullámok természetének felderítése
➡ lehetőség a kis számításigényű előrejelzésre
 - 1942: **Ilja Afanaszjevics Kibel**: az ún. perturbációs sorfejtés módszere
➡ az alapvető mozgásformáktól való eltérések bevezetése termodinamikai változókra is, a kis perturbációs módszer előfutára



A történet 3.

- 1950: **Charney, Fjortoft és Neumann** modelljével megkezdődik a számszerű előrejelzés korszaka
- 1950-1965: **a baroklin szűrt - kvázigeosztrofikus ill. egyensúlyi (balanszált) modellek** időszaka: **A. Eliassen, E.T. Eady, Ph. Thompson, N. Phillips**, stb.
- 1955-1970: a dinamikus szinoptika kezdetei: **H. Ertel, S. Pettersen, E. Palmén, C.W. Newton**, stb.
- 1953-1963: **Edward N. Lorenz** korszakos felfedezései a légköri energetika és a kaotikus dinamika területén
- 1960-1975: „visszatérés” a kvázisztatikus közelítést tartalmazó eredeti euleri egyenleteken: **a primitív egyenletrendszeren** alapuló modellekhez („visszatérés”: Bjerknes és Richardson is ezeket próbálta megoldani) Charney kezdeményezése



A történet 4.

- Az 1960-1970 es évek: a **véges különbséges módszerek** gyors fejlődése, a Gangyin-féle OI, a rács-teleszkopizáció módszerének megjelenése, a parametrizációk fejlődése
- 1978 – a **spektrális modellek** elterjedésének kezdete a FFT-n alapuló ún. transzformációs változat alapján
- 1978-tól: a (nem modellezésre irányuló) elméleti dinamikus meteorológia „megújulása”: B. Hoskins, J. Mc Intyre
- 1990 – az **adjungált módszerek** elterjedésének kezdete:
 - érzékenységvizsgálatok,
 - variációs adatasszimiláció,
 - célzott észlelések.
- 1980 – operatív globális modellek kifejlesztése a meteorológiai világközpontokban
- 1990 – operatív globális és beágyazott regionális modellekből álló számszerű előrejelző rendszerek kialakulása
- 2000 – a **nem-hidrosztatikus modellezés** megindulása



A fejlődés sarokpontjai 1.

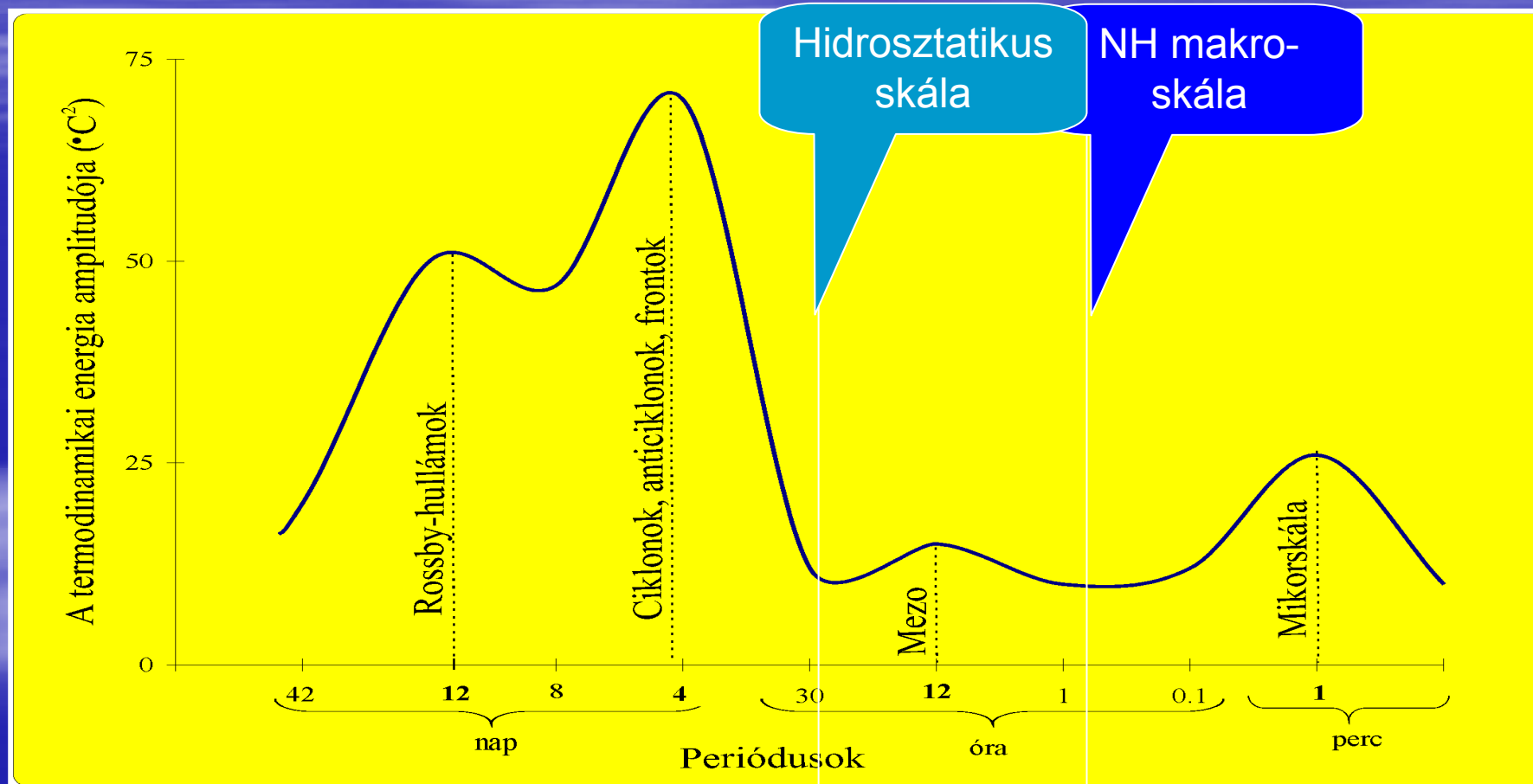
A légköri mozgásrendszerek és méretskálák (1900-1976)

- A meteorológiai folyamatok fizikai szempontból egymással kölcsönható áramlástan és hőtan folyamatok, **a meteorológia a légkör hidro-termodinamikája**
- A légköri folyamatok egyaránt mutatnak **rendezettségre** és **rendezetlenségre** utaló vonásokat (dinamikájuk **nem-lineáris**)
- A légkör képes az **önszervezésre**, azaz különböző karakterisztikus skálájú, fizikailag kvázi-zárt, permanens és tranziens áramlási-hőtan rendszerek, ún. **légköri mozgásrendszerek (LMR-ek)** létrehozására
- A légköri mozgásrendszerek **méretskálái** egyaránt **geometriaiak, kinematikaiak és termodinamikaiak**

A fejlődés sarokpontjai 1.

A légköri mozgásrendszerek és méretskálák (1900-1976)

A légköri mozgásrendszerek (termikus) energiaspektruma



Meteorológiai Tudományos Napok
2008

A fejlődés sarokpontjai 1.

A légköri mozgásrendszerek és méretskálák (1900-1976)

- Mivel a légköri mozgásrendszerek áramlási-hőtani képződmények, méreteik is ennek megfelelők:

- vízszintes kiterjedés: l (m), $l \sim L, l = O(L)$
- függőleges kiterjedés: d (m), $d \sim D, d = O(D)$
- létidő: t (s) \rightarrow helyett: $t \sim T, t = O(T)$
- vízszintes sebesség u (ms^{-1}), $u \sim U, u = O(U)$
- függőleges sebesség w (ms^{-1}), $w \sim W, w = O(W)$
- légnyomási anomália δp (hPa), $\delta p \sim \Delta p, \delta p = O(\Delta p)$
- hőmérsékleti anomália δt ($^{\circ}\text{C}$), $\delta t \sim \Delta t, \delta t = O(\Delta t)$

Az O jelölés nagyságrendet (ordo, lat.) jelent, amely 10 azon hatványa, mely legjobban közelíti az adott mennyiség átlagos értékeit: pl. $U = 10 \text{ ms}^{-1}$. Ezen köztöltő értékeket skála-paramétereknek nevezik.

A fejlődés sarokpontjai 2.

A nagyságrendi analízis (1921-1948)

- A fizikából (a 19. sz. végétől) jól ismert **hasonlósági elméletek(ek)** meteorológiai folyamatokra való **általánosításával** olyan eljárást lehet nyerni, amely alkalmas az LMR-ek **méretskáláiból** a HTER-eken keresztül e rendszerek **dinamikájára** való következtetésre:
 - LMR geometriai méretei \longrightarrow geometriai kényszerek, „falak”
 - kiterjesztés a termodinamikai változókra \longleftarrow összenyomhatóság
 - a mozdulatlan légkör termodinamikai szerkezetének „leválasztása”
- A módszer különböző fokozatai:
 - HTER tagjainak összehasonlító megbecslése: **becslő fázis**
 - HTER **dimenziótlanítása** a skála-mennyiségek „kiemelésével”
 - különböző méretskálájú LMR-eket jellemző minimális számú **dimenziótlan paraméter** bevezetése a HTER-be (pl. Ro, F, Ri)

A fejlődés sarokpontjai 2.

A nagyságrendi analízis (1921-1948)

- A módszerben rejlő lehetőségek:
 - méretspecifikus közelítések és egyszerűsített HTER-ek létrehozása a különböző skálájú LMR-ekre (kvázi-, ill. szemi-geosztrofikus, primitív, anelasztikus, stb.) → **skála-specifikus dinamikai légkörmodellek megalkotása**
 - az LMR-ek termodinamikai méreteire és egyéb dinamikai sajátosságaira való deduktív következtetés lehetősége → **„újjaépített” elméleti alapok**



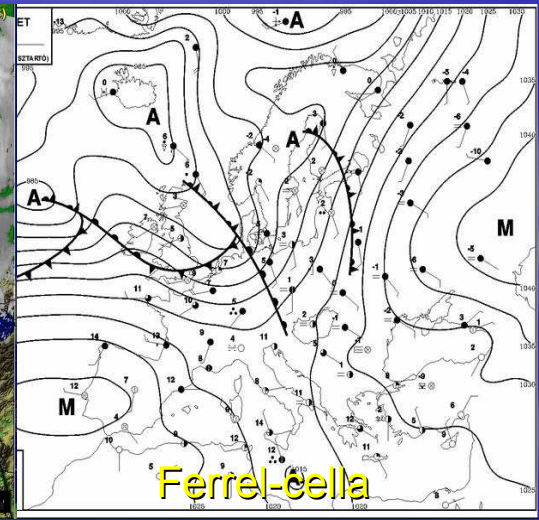
Szupercella



Hurrikán



Ciklon



Ferrel-cella

A fejlődés sarokpontjai 3.

A légköri hullámdinamika (1939-1956)

- A légkör **nem-lineáris MR-eit legjobban a légköri hullámokkal lehet közelíteni**, mivel advekció hiányában az LMR-ek hullámszerűek lennének (számos MR ténylegesen hullám)
 - a HTER hullámszerű, periodikus megoldásait a nem-linearitás eltávolításával (**linearizációval**) kaphatjuk meg,
 - több különböző linearizációs eljárás közül az ún. **kis perturbációs módszer** bizonyult a meteorológiában a legsikeresebbnek
- A kis perturbációs módszer lépései:
 - ismert, és a HTER-t kielégítő alapáramlás felvétele
 - állapotváltozók felbontása: teljes = alapáramlás + eltérés (pert.)
 - HTER egyenleteinek szétbontása: teljes = 0.rend + 1.rend + 2.rend + (3-ad rend) ~ 1. rend
 - perturbációs lineáris HTER
 - karakterisztikus ER (amplitúdók)
 - frekvencia-egyenlet (fázissebességek)

A fejlődés sarokpontjai 3.

A légköri hullámdinamika (1939-1956)

- A légköri hullámdinamika fő következtetései
 - a légkörben mindössze három alapvető hullámmódus van a három ható erőnek megfelelően: **HANG+GRAVITÁCIÓS+INERCIÁLIS**,
 - az LMR-ek negyságrendi és dinamikai osztályozása lényegében egybeesik (mikroskálát kivéve?) **MÁS MÉRET = MÁS DINAMIKA**
- A módszerben rejlő lehetőségek:
 - a légköri hullámmozgások **explicit minőségi elemzése** az ismert alakú analitikus megoldáson keresztül
 - A hullámmozgásokra kapott eredmények **átvitele a nem-lineáris LMR-ekre**: szinoptikus analízis, instabilitás- és fejlődéselmélet
 - a meteorológiailag fontos hullámmozgások tulajdonságaihoz igazodó **dinamika-specifikus egyszerűsített modellek** megalkotása

A fejlődés sarokpontjai 3.

A légköri hullámdinamika (1939-1956)

- A légköri hullámdinamika fő eredményei szemléletesen



hanghullámok!

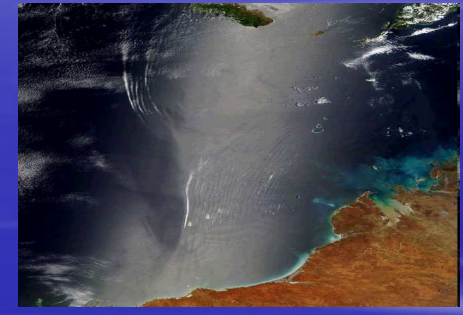
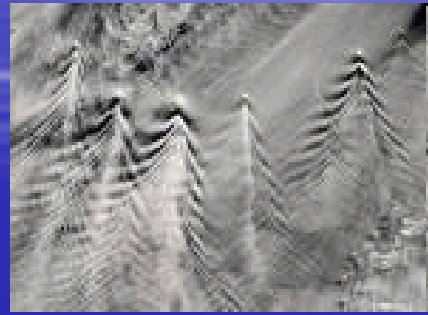
belső gravitációs hullámok



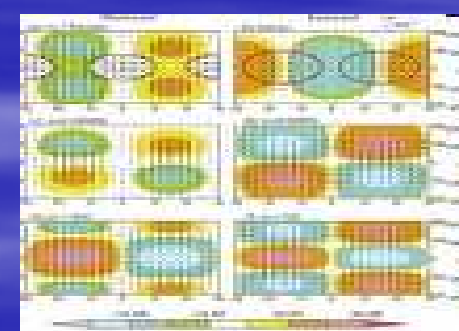
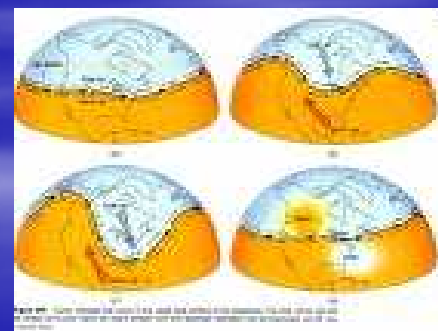
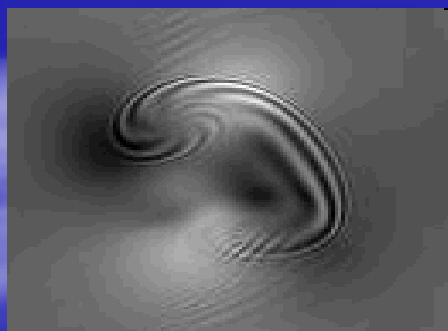
A fejlődés sarokpontjai 3.

A légköri hullámdinamika (1939-1956)

- A légköri hullámdinamika fő eredményei szemléletesen



külső gravitációs hullámok
inerciális (és Rossby) hullámok



A fejlődés sarokpontjai 4.

Az energetika és az invariánsok (1940-)

- A légkör „időjárasi működését” a megmaradási törvények irányítják, sőt a Hamilton-elv (funkcionál-minimumra való törekvés) is alkalmazható:
 - a HTER is megmaradási törvények (mérleg-egyenletek) együttese
 - a legfontosabb transzformáció-független **Hamilton-invariánsok** (megmaradó mennyiségek): a tömeg, a teljes energia és (turbulencia- és viszkozitásmentes áramlásban) az entrópia
 - a legfontosabb kinematikai, transzformáció-függő invariánsok a **Casimir-típusú invariánsok**, ill. ezek leszármaztatott változatai (abszolút örvényesség, Charney-féle potenciális örvényesség, **Ertel-féle izentropikus potenciális örvényesség**)
- A legfontosabb „új” eredmények:
 - a légkörben a mozgási, a potenciális és a belső energia összege marad meg, tehát tényleg **thermo-mechanikai rendszer, amely hőerőgépként is működik (ld. Instabilitások) mintegy 0,1%-os hatásokkal**
 - bevezetésre kerültek az **elméleti határfok felső küszöbét** jellemző mennyiségek mind a nagytérségű LMR-ek (**APE**), mind a konvektív LMR-ek (**CAPE**) esetében

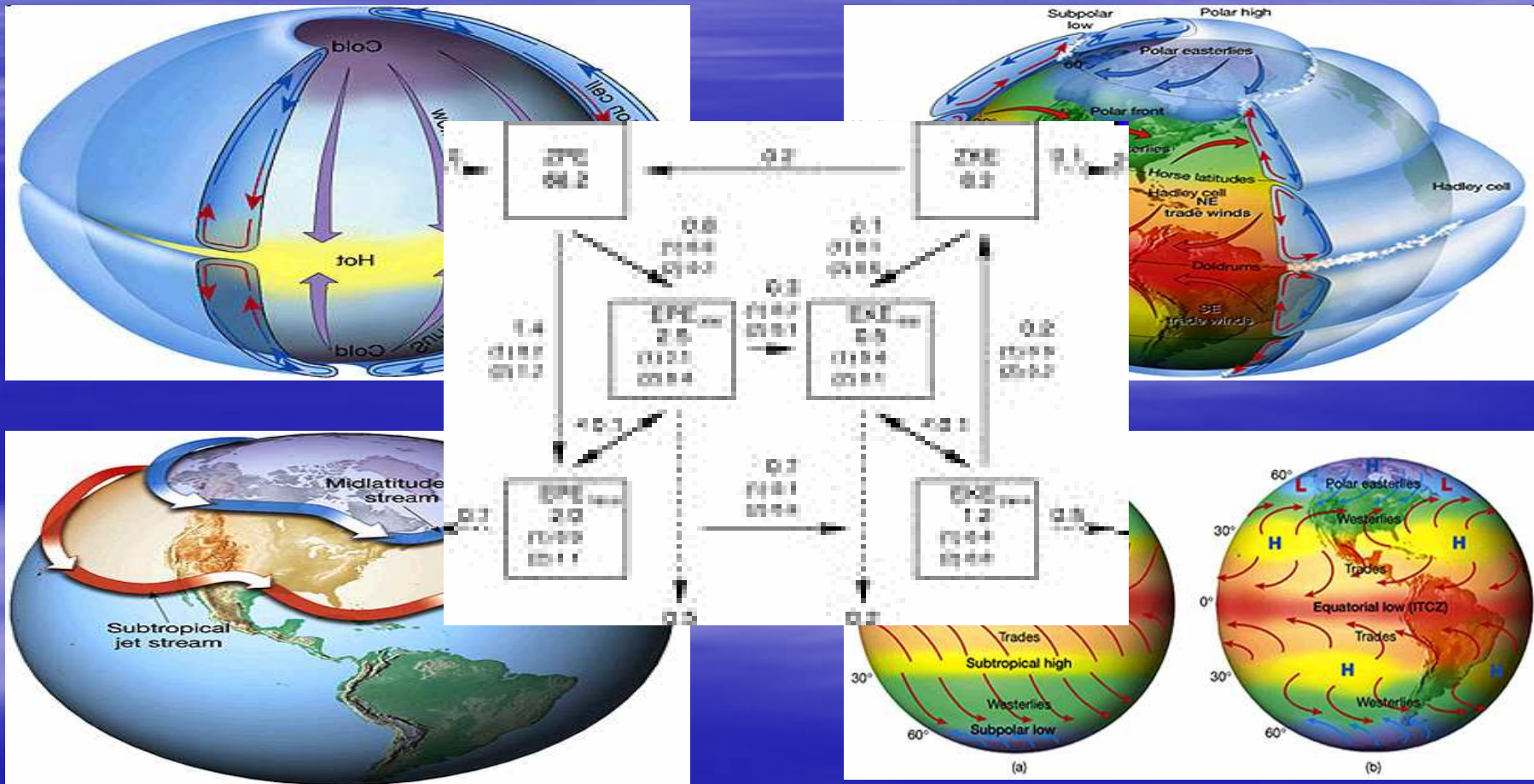
A fejlődés sarokpontjai 4.

Az energetika és az invariánsok (1940-)

- A módszer(ek)ben rejlő lehetőségek:
 - energetikailag **konzisztens** (azaz változatlan invariánsokkal rendelkező) egyszerűsített HTER-ek konstrukciója (MÉRET + DINAMIKA + ENERGETIKA szinergiája),
 - az APE ill. a CAPE révén **másodlagos, a termodinamika II. főtételével ekvivalens kontroll** bevezetése,
 - a földi általános cirkuláció alapvető összetevői (MZC, SV-s, TV-s) **energia és szögsebesség momentum-szállító szerepének** tisztázása,
 - a polárfront-elmélet dinamikai megalapozása,
 - az energiaátalakulások nagyságrendi viszonyainak tisztázása a trópusi és a mérsékelt övekben (az általános cirkuláció dinamikai magyarázata),
 - teljes előrejelzés a potenciális örvényesség alapján és PV inverzió (visszaállítás: híd a dinamikus-szinoptikus és a matematikai-fizikai megközelítés között)

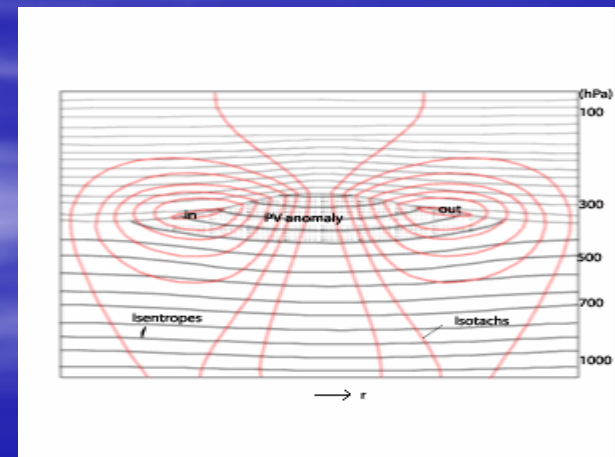
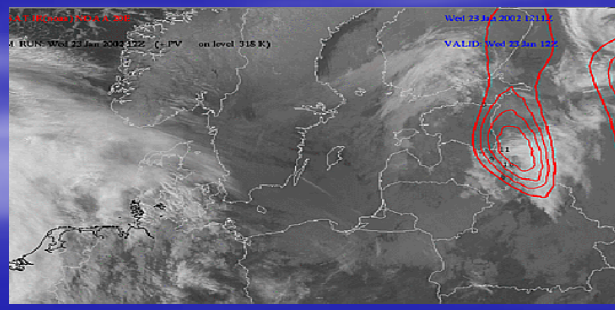
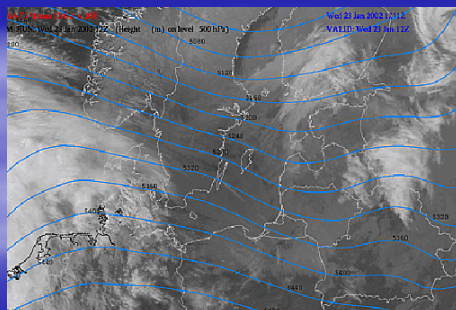
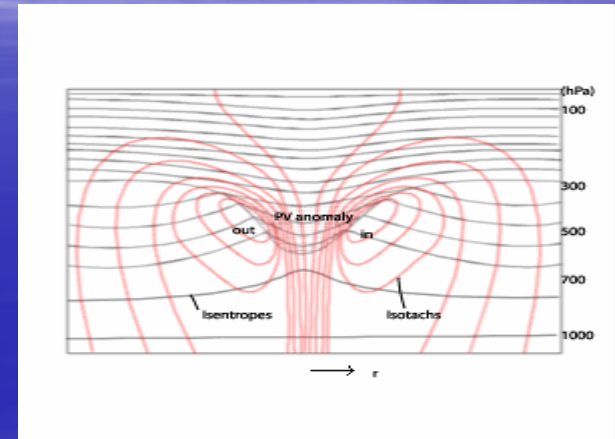
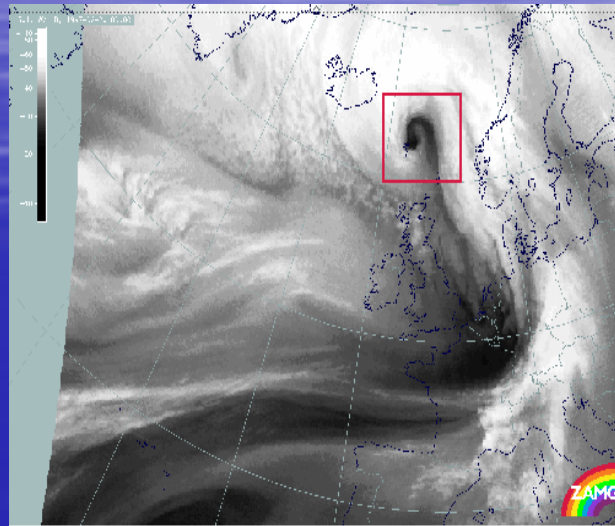
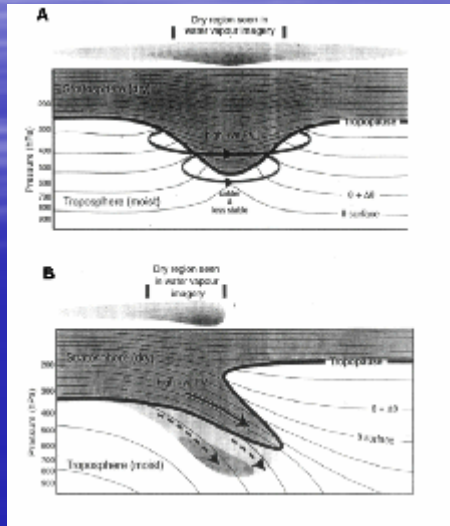
A fejlődés sarokpontjai 4.

Az energetika és az invariánsok (1940-)



A fejlődés sarokpontjai 4.

Az energetika és az invariánsok (1940-)



A fejlődés sarokpontjai 5.

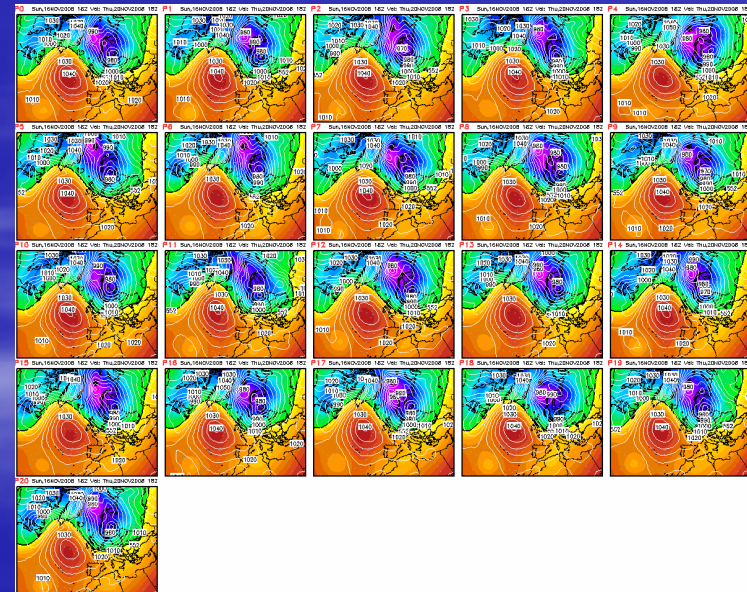
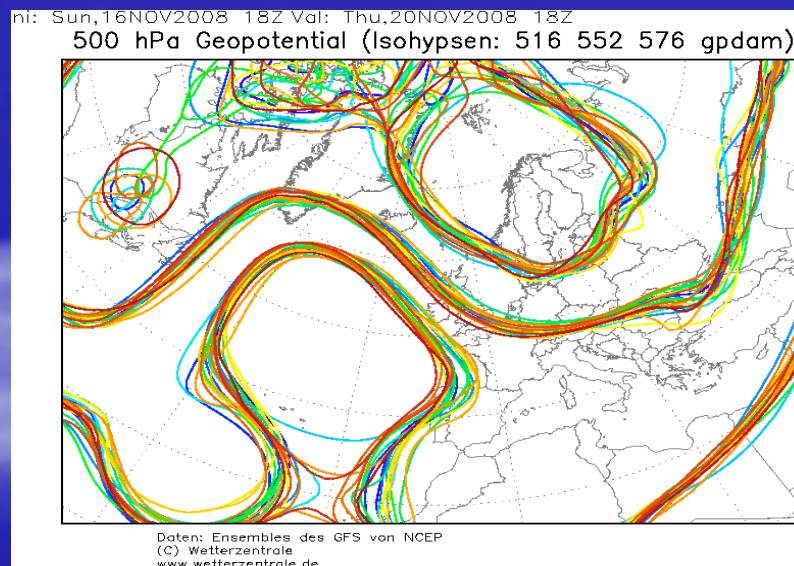
A kaotikusság és „hasznosítása” (1963-)

- A **légkör kaotikus viselkedése és egyben a „klasszikus” fizikai káosz** felfedezése E. N. Lorenz által kis szabadsági fokú légkör-modellben – 1963 (valójában a ~28 000 értékű légköri Reynolds-szám ezt már mutatja)
- A légköri káoszban (rendezetlen rendezettség, méretskálákon ismétlődő önhasonlóság, stb.) és a vele kapcsolatos fraktál-struktúrákban való **elméleti elmélyedés és „gyönyörködés”** korszaka – 1963-1990
- Az **adjungált módszerek** megjelenése és hasznosságuk felismerése -1985-től
 - érzékenységi vizsgálatok a kaotikusság figyelembevételével (többszörösen bifurkálódó érzékenységi tartományok)
 - **variációs adatasszimiláció** az adjungált HTER-ekben rejlő lehetőségek figyelembevételével
 - a káoszt jellemző 1-2 közötti fraktáldimenziójú „trajektóriák” **előrejelzési módszereinek kialakulása** → az **ensemble előrejelzések** készítésének kezdetei

A fejlődés sarokpontjai 5.

A kaotikuság és „hasznosítása” (1963-)

- Az **ensemble előrejelzések és a célzott megfigyelések** korszaka
 - valódi ensemble előrejelzések (breeding és szinguláris vektorok módszerével generált kezdeti feltételek)
 - determinisztikus előrejelzésekből összeállított „szimulált” ensemble-k („poor man’s ensembles)
 - Érzékenységvizsgálatokon alapuló célzott észlelési kampányok (THORPEX, FASTEX, stb.)



A fejlődés sarokpontjai 6.

A kölcsönhatások és a parametrizációk (1960-)

- A fenti felfedezések világossá tették a meteorológiai előrejelzés **rendszerelméleti háttérét**: csak a „makro- skálájú” hidro-termodinamikai folyamatokkal foglalkozunk explicit módon. **De mi legyen a kölcsönhatásokkal?**



A fejlődés sarokpontjai 6.

A kölcsönhatások és a parametrizációk (1960-)

- A mikroskálájú HT folyamatokkal, valamint a további légköri és felszíni fizikai folyamatokkal való kölcsönhatásokat parametrizációk formájában lehet figyelembevenni:
 - a parametrizáció a kölcsönhatás egyszerűsítése a „ható” irányban, a „visszaható” irány részleges v. teljes mellőzésével,
 - a parametrizációk fő fajtái:
 - a rövid- és hosszúhullámú sugárzási folyamatok,
 - a nagytérségű csapadékképződés,
 - a „szub-grid” skálájú HT folyamatok , elsősorban a konvekció,
 - a felszín-légkör kölcsönhatások, elsősorban a turbulens kicserélődés (mint szub-grid skálájú HT folyamat),
 - a talajban zajló hő- és nedvességszállítási folyamatok,
 - a nem felszíni légköri határrétegekben zajló turbulens kicserélődés (gravity wave drag).

A fejlődés sarokpontjai 7.

A számítási módszerek (1950-)

- A **félig (gyengén) analitikus (Green-függvényes) megoldások korszaka** (1950-1960)
 - szinoptikus elemzésre alkalmas megoldások
- A **véges különbséges módszerek korszaka** (1960-1975)
 - tisztázódnak a véges különbséges módszerekkel kapcsolatos elméleti (matematikai) kérdések (közelítés+stabilitás=konvergencia, Lax-tétel),
 - empirikus technikák (mesterséges viszkozitás)
 - megjelenik a rács-teleszkopizáció (1975), a későbbi LAM-ok előfutára
- A **spektrális (Galerkin-féle) módszerek korszaka** (1975-1990)
 - az FFT megjelenésével lehetővé válik az általánosított Fourier-módszer közelítő alkalmazása (trunkált trigonometrikus és Legendre függvényterek alkalmazása = optimális közelítés)
- A **optimális időszámítás és advekciós sémák korszaka** (1990-2000)
 - a szemi-implicit időszámítás optimalizálja az időlépcsőt,
 - a szemi-lagrangei advekciós séma optimalizálja az advekció közelítésének stabilitását és pontosságát
- A **nem négyzetes rácsok és a transzformációs kinagyítás (zoomolás) korszaka** (1995-)

A fejlődés sarokpontjai 8.

Az analízis és az adat-asszimiláció (1900-)

- Mind a szinoptikus előrejelzéshez, mind pedig a szám-szerű előrejelzéshez (kezdeti feltételek) szükség van a kezdeti állapot méréseken alapuló analízisére, amely 3D folytonos állapotthatározó mezőket szolgáltat
 - A **szubjektív mező-analízis** időszaka (1890-1950)
 - Az **objektív analízis megjelenése** (Bo Döös, 1950-es évek vége)
 - A Gangyin-féle **optimális interpoláció „forradalma”** (1960-)
 - A Sasaki-féle kísérlet variációs optimalizálásra (1965)
 - A **normál módus inicializáció „korszaka”** (1970-es évek)
 - **A digitális szűrés megjelenése** (1980-as évek)
 - Az adjungált módszereken alapuló variációs adat-asszimilációs eljárások megjelenése és elterjedése (**3D VAR és 4D VAR**, 1990-es évek)
 - Az automatikus szinoptikus térképkészítés elterjedése (1970-es évektől)
 - Automatikus frontanalízis (1980-as évektől)
 - **Mezőszerkesztés** (1990-es évektől)

Meteorológiai Tudományos Napok

A fejlődés sarokpontjai 9.

A felhasználói prognózis-készítés: „prognózis-leskálázás” ill. a modelleredmények konvertálása (1900-)

- **A prognóziskészítés „leskálázás” jellegének felismerése és alkalmazása - 1920-1960**
 - a kisebb térségek, így Magyarország időjárását is a nagyobb térségekben uralkodó meteorológiai viszonyok, jelen esetben az euro-atlanti térség LMR-jei határozzák meg,
 - a „leskálázás” történhet nagytérségű tipizálások (Péczy- ill. Hess-Brezovsky típusok) felhasználásával, vagy egyszerűen „tapasztalati anti-parametrizációval”
- **A modell-outputok alapján történő prognóziskészítésre való áttéréssel egy időben felmerül a felszín közelében nem, vagy nehezen alkalmazható modell adatok interpretálása -1960 -**
 - modell output interpretáló (MOS, PP, Kalman-szűrő) eljárások kialakulása
 - továbbra is empirikus eljárások alkalmazása
 - klimatológiai és távérzékelési adatok figyelembevétele az empirikus eljárásokban (1975-től)
 - Mind a mai napig hiányos a dinamikai interpretáció a leskálázásnál (dinamikai alapú algoritmizált konceptuális előrejelzés), elsősorban makroskálán

A DINAMIKUS METEOROLÓGIA 100 ÉVES FEJLŐDÉSÉRŐL (Eugenia Kalnay, 2003)

1. L. F. Richardson 1922-es monográfiája arról akarta meggyőzni a szakmai közösséget, hogy a hidrodinamikai alapú előrejelzés lehetetlen,
2. Az utódok ennek ellenére a lehetetlenre vállalkoztak és sikert arattak,
3. A CFN modell sikere után mégis 3-5 évig kellett várni az operatív alkalmazásra (Svédország, csak utána USA),
4. „Sötét korszak jött”, amikor a „black box” valószínűségi előrejelzések lehetősége látszott az egyetlen járható útnak (Norbert Wiener),
5. A kiút annak felismerésében rejlett, hogy az időjárás nem véletlenszerű, és a kaotikus dinamika inkább determinisztikus (E.N. Lorenz).
6. A LÉGKÖR DINAMIKÁJA AZ ALAPJA MINDEN MÚLTBELI, JELENLEGI ÉS JÖVŐBELI ELŐREJELZÉSI ERŐFESZÍTÉSNEK!

AZ ELŐADÁSRÓL:

AKI EGY MTN ELŐADÁSBAN A LEHETETLENRE VÁLLALKOZIK,
NYILVÁNVALÓAN MAGA IS ELLEHETETLENÜL

(Práger Tamás, 2008)

■ **Köszönöm a figyelmet!**