

Bevezetés az időjárás és az éghajlat numerikus (számszerű) előrejelzésébe

Szépszó Gabriella
szepszo.g@met.hu

Letölthető előadások: <http://nimbus.elte.hu/~numelo>

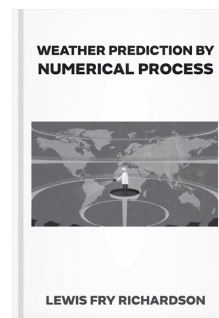
Az előadás vázlata

- A számszerű előrejelzés (numerikus prognosztika) alapjai
- Néhány konkrét illusztráció a különböző tér- és időskálájú előrejelzésekre
 - Ultra-rövidtávú és rövidtávú előrejelzések
 - Középtávú és szezonális előrejelzések (ECMWF)
 - Az éghajlat modellezése
 - Valószínűségi előrejelzések
- Összefoglalás

2

Numerikus prognosztika alapjai

<https://www.youtube.com/watch?v=GOjbPqWfka0>



A numerikus időjárás-előrejelzés alapjai

- A numerikus prognosztika a kormányzó fizikai egyenletek megoldására alkotott matematikai modellek megoldása
- A léggöri egyenletek:
 - Mozgásegyenletek (Navier-Stokes egyenletek: kapcsolat a sebesség megváltozása, valamint a nyomási gradiens, a Coriolis- és a súrlódási erők között)
 - Kontinuitási egyenlet (a tömeg-megmaradás törvénye)
 - Termodinamikai egyenlet (az energia-megmaradás törvénye)
 - Nedvesség kontinuitási egyenlet (a nedvesség tömeg-megmaradása: folyékony, szilárd és gáz halmazállapotban)
 - Gáztörvény (kapcsolat a nyomás, a hőmérséklet és a nedvesség között)

4

Légköri egyenletek

Mozgásegyszerűsítések	$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{F} + \vec{S}$
Kontinuitási egyenlet	$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \cdot \text{div} \vec{v}$
Termodinamikai egyenlet	$\frac{dQ}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt}$
Nedvesség kontinuitási egyenlete	$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot M$
Állapotegyenlet	$p = \rho RT$

Prognosztikai és diagnosztikai egyenletek → nem-lineáris parciális differenciálegyenlet-rendszer

7 egyenlet – 7 változó: (u,v,w), T, p, ρ, ρ_v

Vegyes feladat: kezdeti- és peremfeltétel probléma

A folytonos egyenletek közelítései

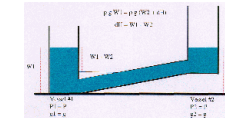
- Gömbi közelítés



- A légkör vastagságának elhanyagolása



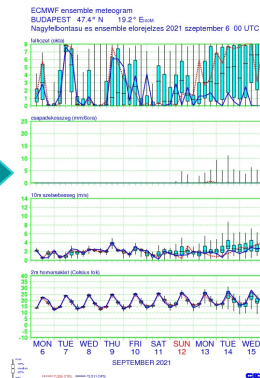
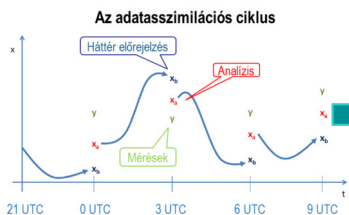
- Hidrosztatikus közelítés



ANALITIKUSAN TOVÁBBRA SEM OLDHATÓ MEG!
 → **Analitikus megoldás hiányában numerikus módszerek**
Numerikus közelítések → diszkrét egyenletek

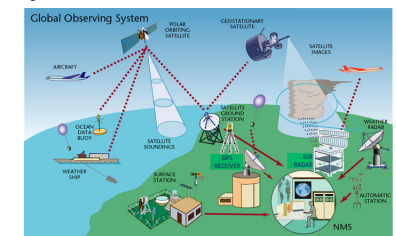
A numerikus előrejelzés lépései

ADATASSZIMILÁCIÓ	MODELL-INTEGRÁLÁS	UTÓFELDOLGOZÁS
Kezdeti feltétel meghatározása: mérési információk gyűjtése, ellenőrzése, modellsíncra előállítás (objektív analízis)	A hidro-termodinamikai egyenletrendszer közelítő megoldása	Megjelenítés, speciális paraméterek származtatása

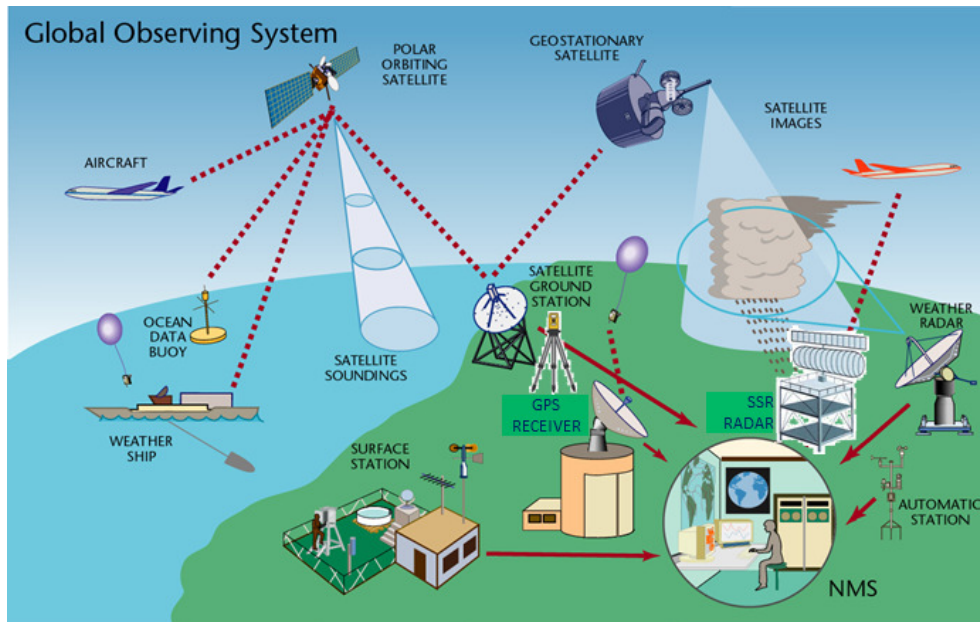


Kezdeti feltételek meghatározása

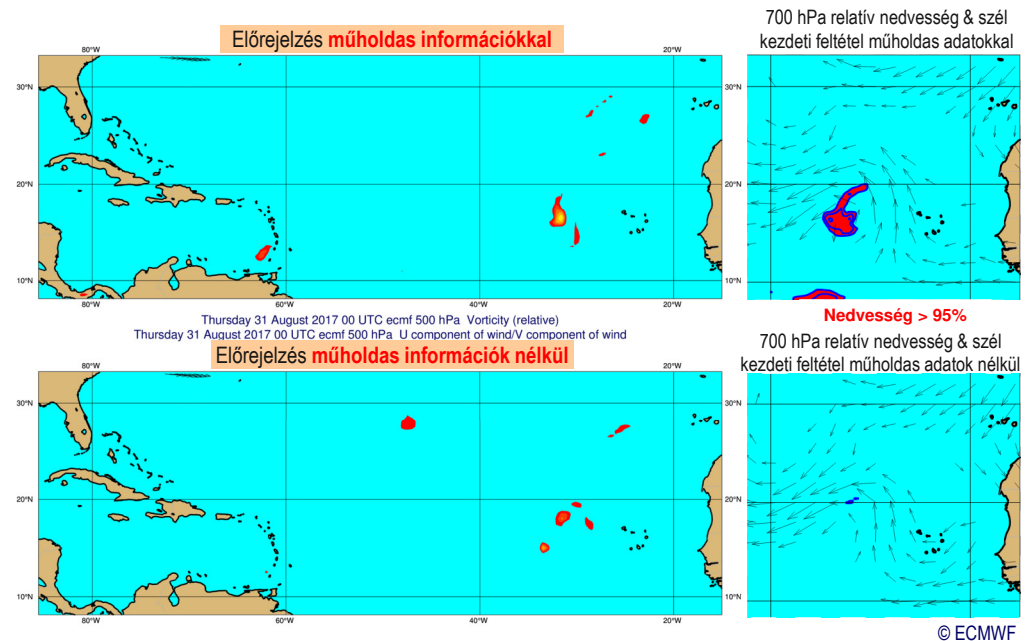
- Előrejelzés érzékenysége a kezdeti feltételre
- Cél: a numerikus modellek számára minél pontosabb kezdeti feltétel meghatározása (pontosság és konzisztencia)
- Rendelkezésre álló információk:
 - Megfigyelések
 - A modell korábbi futtatásainak eredményei
 - Egyéb dinamikai és fizikai törvényszerűségek
- A fenti információk optimális kombinációja – különböző módszerek:
 - Optimális interpoláció
 - Variációs analízis (3D-var, 4D-var)
 - Kalman filter
 - Ensemble adatasszimiláció



Kezdeti feltételek meghatározása



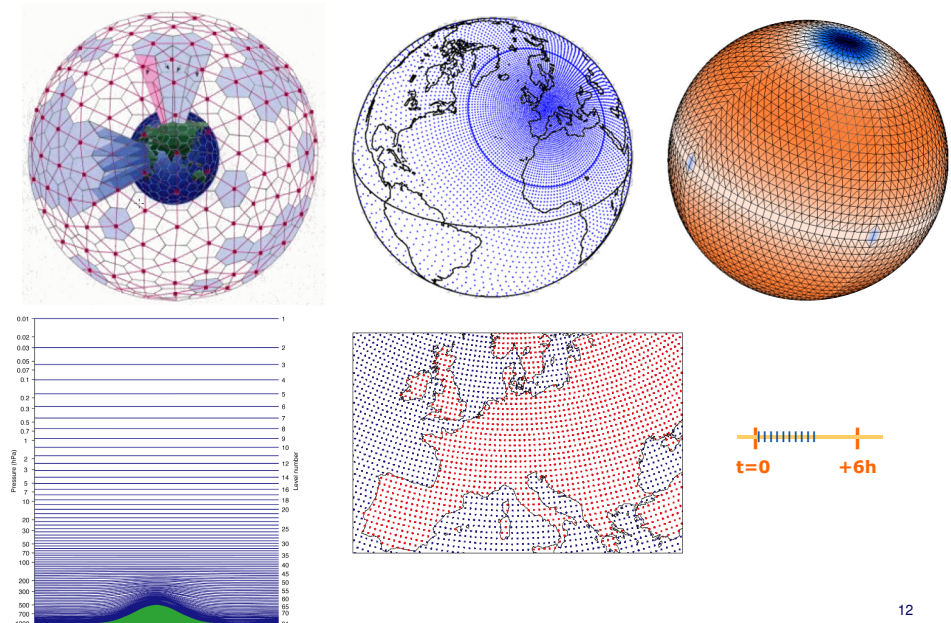
Az adatasszimiláció jelentősége



Numerikus közelítések

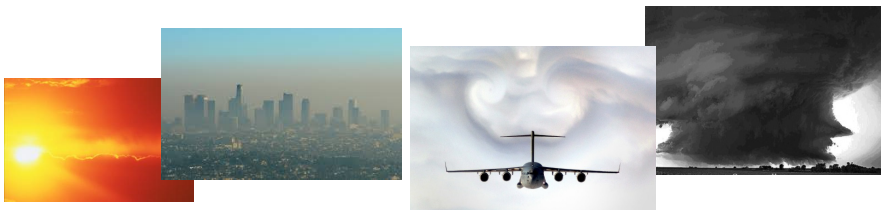
- Térbeli diszkretizáció:
 - Horizontális koordináták: gömbi koordináták, síkbeli leképezések
 - Véges differencia modellek (rácstípusok)
 - Spektrális modellek (függvény-rendszer szerinti sorfejtés)
 - Vertikális koordináták (felszínkövető, szigma, hibrid)
- Időbeli diszkretizáció: explicit, implicit és egyéb sémák (szemi-Lagrange advekcións séma)

Térbeli és időbeli diszkretizáció



Fizikai parametrizáció

- Adott rácsfelbontáson explicit módon leírható folyamatok – rácsávolságnál kisebb méretskálájú folyamatok → dinamika – fizikai parametrizáció
- + Túl komplex folyamatok
- Leírás: statisztikus-empirikus módszerekkel, a rácsponti értékek felhasználásával
- Példa parametrizált folyamatokra:
sugárzás, felhőfizika, diffúzió, turbulencia, planetáris határréteg, stb.



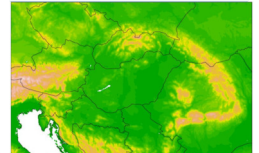
13

Rövidtávú és ultra-rövidtávú előrejelzések

Határfeltételek

- Probléma: a határ néha nem egy fizikai határ – cél: a gravitációs hullámok „visszaverődésének” megakadályozása
- Alsó: tökéletes körüláramlás
- Felső: „szivacs” réteg, vagy „sugárzó” felső perem
- Oldalsó – dinamikai leskalázás korlátos tartományú (regionális) modellekkel: relaxációs technika

Regionális modell



14

Korlátos tartományú modellek

- Cél: regionális és lokális (mezo-) skálájú jelenségek rövidtávú (2-3 napra szóló) előrejelzésének pontosítása
- Eszköz: rövidtávú korlátos tartományú számszerű előrejelzési modell operatív futtatása, fejlesztése és kutatása
- Oldalsó határfeltételeket igényel – globális vagy más korlátos tartományú modellből
- A helyi modellfuttatás elengedhetetlen, mert az igények csak így elégíthetők ki teljeskörűen
- Ugyanakkor az sem árt, ha az alkalmazott modellt jól ismerjük, fejlesztésében részt veszünk

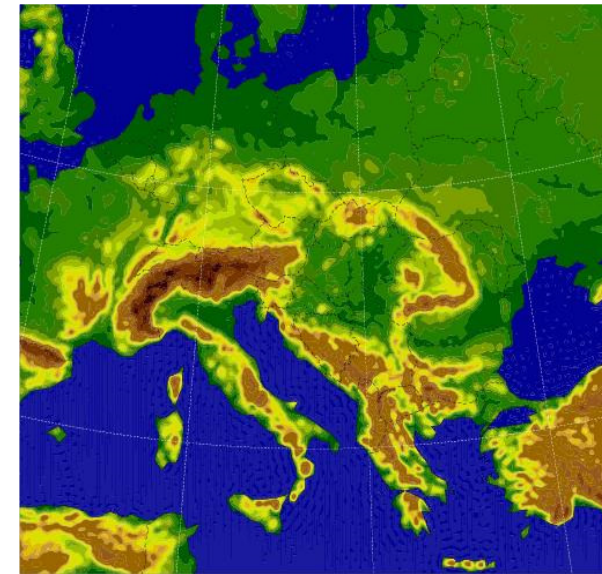
16

Példa az OMSZ-ban operatívan alkalmazott rövidtávú modellre: ALADIN/HU

- 8 km-es horizontális felbontás
- 49 vertikális modellszint
- Kezdeti feltételek: lokális adatasszimiláció (felszíni optimális interpoláció és légköri 3-dimenziós variációs módszer)
- Határfeltételek az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF) globális modelljéből
- Modellfuttatás naponta négyszer két napra
- Utófeldolgozás óránként (vagy igény szerint sűrűbben)

17

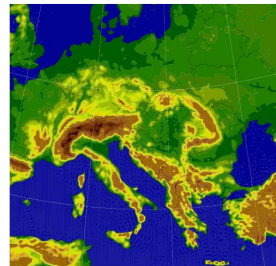
Az ALADIN/HU modell tartománya és domborzata



18

Számításigény

- Korlátos tartományú modell
 - Európai tartomány (3000 km x 2500 km)
 - 8 km-es felbontás (360x320 pont)
 - 49 függőleges szint
 - 5 prognosztikai változó (hőmérséklet, nedvesség, zonális és meridionális szélkomponensek, felszíni nyomás)
 - 5 perces időlépcső
 - 48 órás előrejelzés (576 lépés)

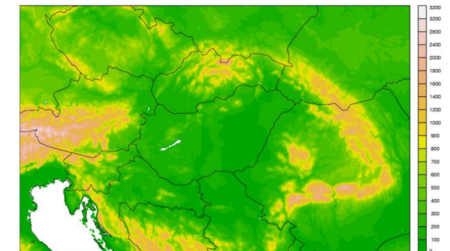


Összesen $\sim 10^{10}$ adat előrejelzésenként

19

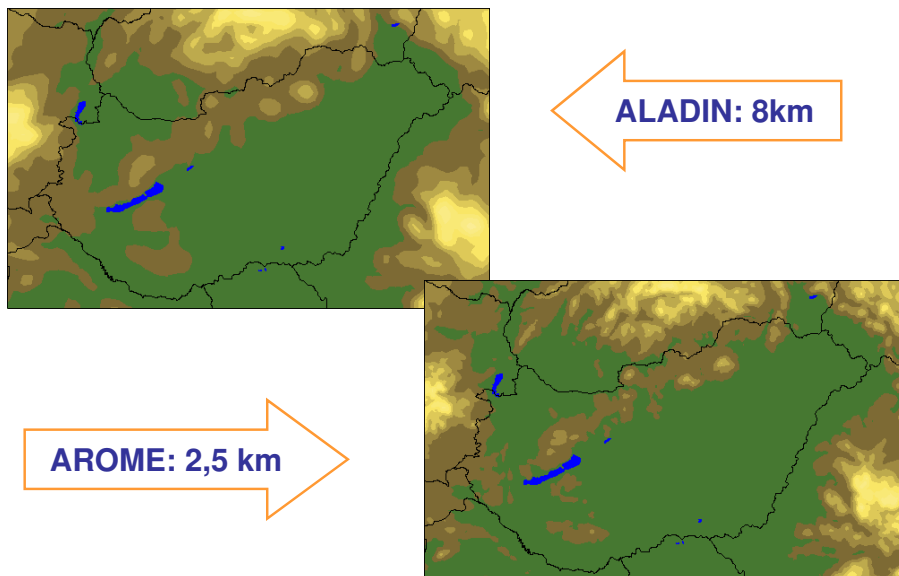
Példa az OMSZ ultra-rövidtávú előrejelzésében operatívan alkalmazott modellre: AROME

- 2,5 km-es horizontális felbontás
- 60 vertikális modellszint
- Korlátos tartományú modell – határfeltételek az ECMWF-től
- Lokális (3D-var) adatasszimiláció (napi 8 analízis)
- Modellfuttatás naponta nyolcszor 2 napra
- Nem-hidrosztatikus modell (hidrosztatikus közelítés elhagyása)
 - Új prognosztikai változók
 - Mélykonvekció explicit leírása



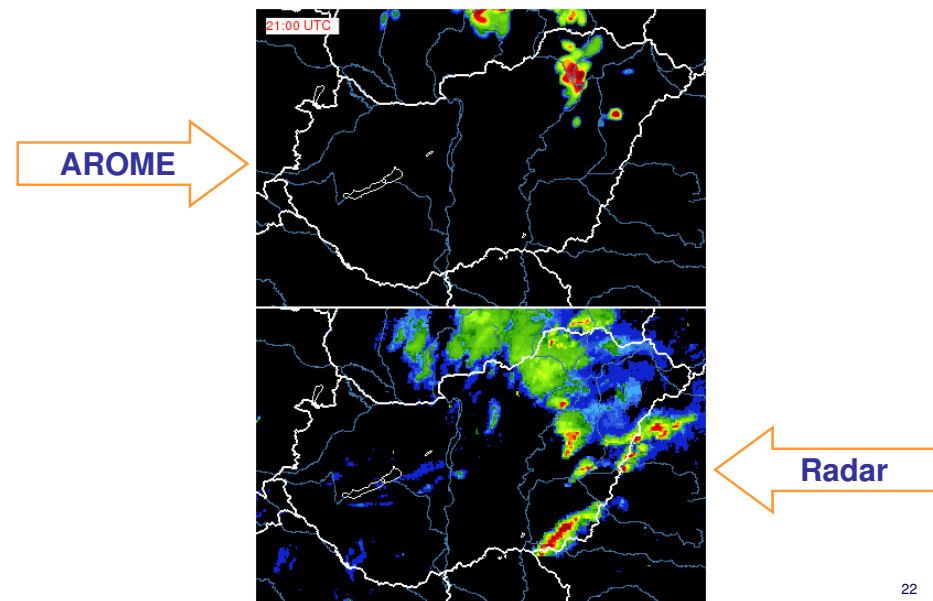
20

Domborzat a felbontás függvényében



21

2006. augusztus 20.

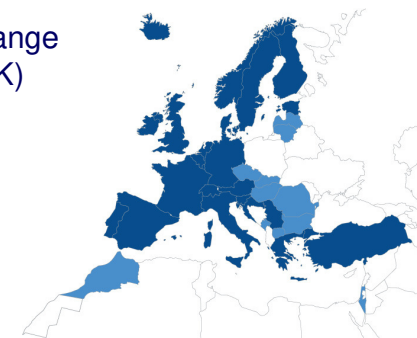


22

Középtávú és szezonális előrejelzések (ECMWF)

ECMWF

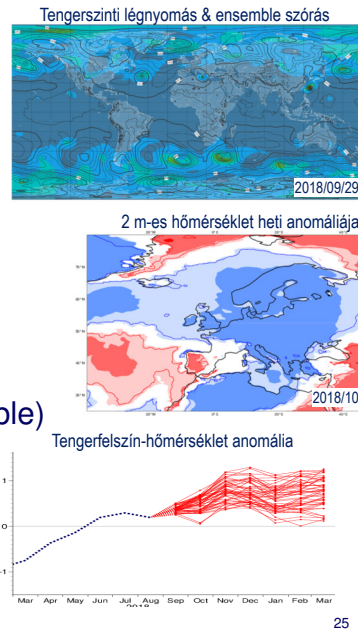
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Reading, UK)
- Nemzetközi együttműködés 1975 óta
- 34 ország részvételével (23 tag és 11 társult tag)
- Legfontosabb cél: globális középtávú számszerű előrejelzési modell operatív futtatása, valamint fejlesztése és kutatása
- Magyarország társult tag: a produktumok széles skálájához hozzájutunk



24

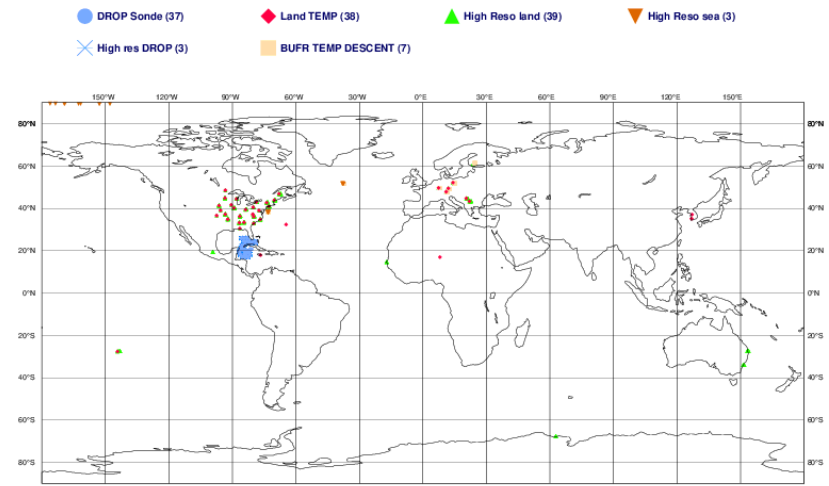
ECMWF „előrejelzések”

- Kapcsolt óceán-légkör modell: Integrated Forecasting System (IFS)
- 10 napos előrejelzések (HRES): 9 km-es horizontális felbontás, 137 vertikális szint
- **Ensemble Prediction System** (15 napig, 18 km-es felbontás)
- 46 napos előrejelzés (36 km, ensemble)
- Szezonális előrejelzések (7-13 hónapra, 36 km, ensemble)
- Re-analízisek (ERA-40 → ERA5)



Felhasznált megfigyelések monitorozása

ECMWF data coverage (all observations) - RADIOSONDE
2021081815 to 2021081821
Total number of obs = 127



Forrás: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts/monitoring>

Számítógép-park

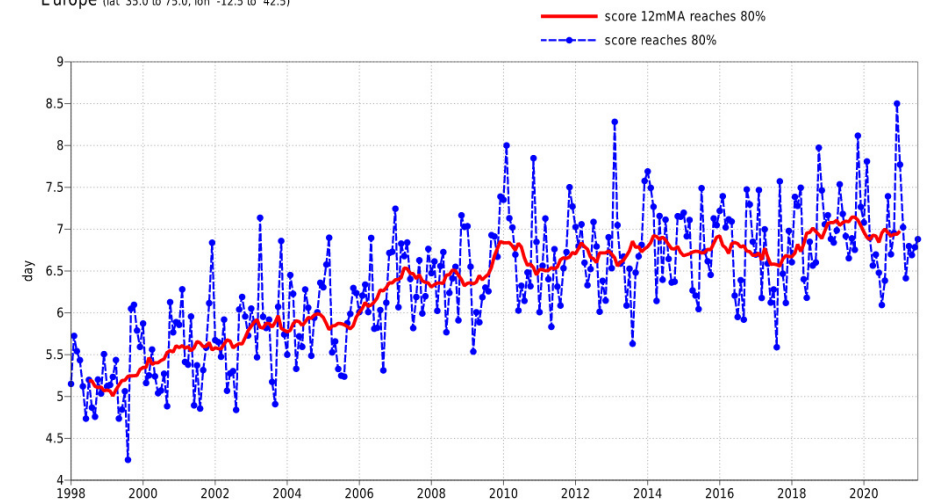


27

Az előrejelzések beválásának javulása

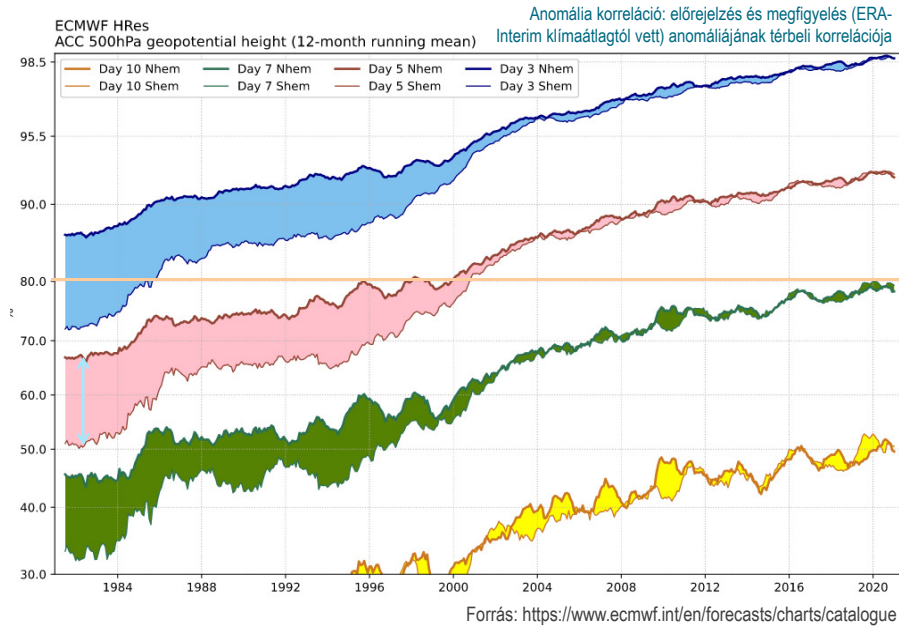
500hPa geopotential
Lead time of Anomaly correlation reaching 80%
Europe (lat: 35.0 to 75.0, lon: -12.5 to 42.5)

AC: előrejelzés és megfigyelés (ERA-Interim klímaátlagtól vett) anomáliájának térbeli korrelációja

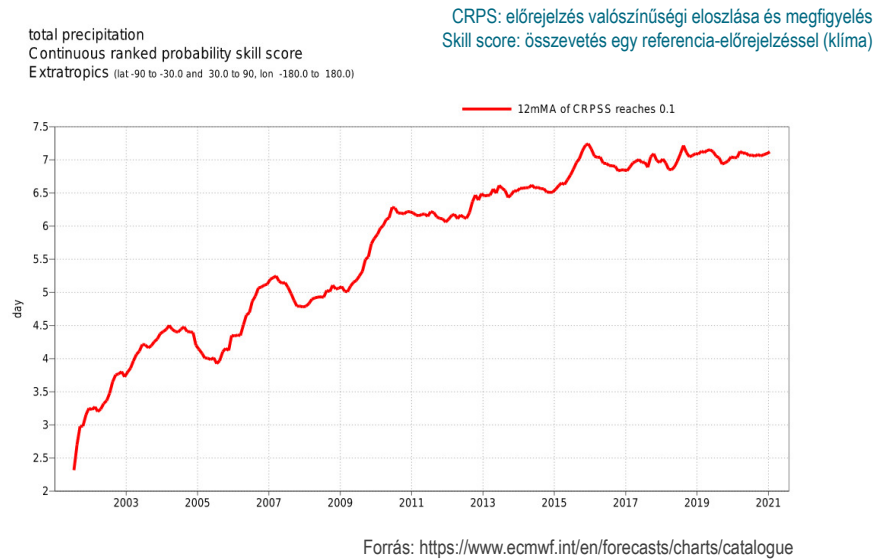


Forrás: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts/catalogue>

Az előrejelzések beválásának javulása



Az előrejelzések beválásának javulása



30

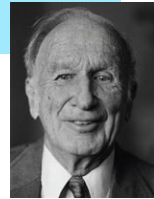
Valószínűségi előrejelzések

Két videó

- „Okozhat-e egy braziliai pillangó szárnycsapása tornádót Texasban?”
<https://vimeo.com/287523707>
- Az ensemble előrejelzések 25 éve:
<https://www.youtube.com/watch?v=NLhRUun2iso>

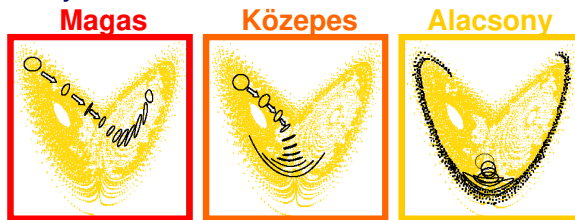
32

Probléma-felvetés



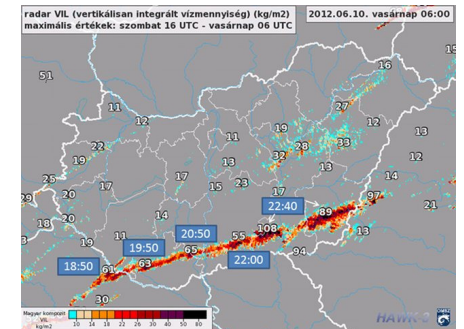
- Edward Lorenz (1972): „Okozhat-e egy brazíliai pillangó szárnycsapása tornádót Texasban?”
- A légkör bonyolult turbulens rendszer, nagyfokú érzékenységet mutat a kiindulási állapotára (akárcsak a **kaotikus** rendszerek)
- Lorenz egy egyszerűsített modellel igazolta, hogy egy meteorológiai folyamat **előrejelezhetősége** nagyban függ annak kiindulási feltételeitől

- Egy előrejelzés csak akkor teljes, ha hozzá tudunk rendelni megbízhatósági mutatókat (a beválás valószínűségét)



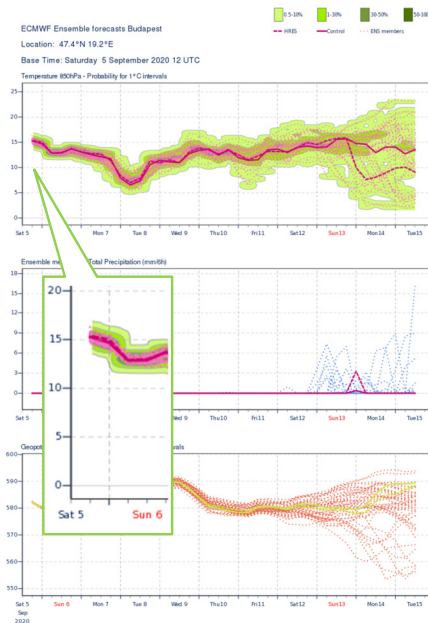
Időjárás-előrejelzések bizonytalanságai

1. **Kezdeti feltételek bizonytalansága:** a kiindulási feltétel nem határozható meg pontosan (a jelen állapot mérése is hibával terhelt)
 2. **Modellekből eredő bizonytalanság:** eltérő numerikus módszerek, parametrizációk a modellekben, ami az eredményekben is különbségekhez vezet
 3. LAM: határfeltételek
- + A légkör **kaotikus** tulajdonságokkal bír: a fenti hibák növekedése erősen függ az időjárási helyzettől



A bizonytalanságok számszerűsítése

- Egy helyett több előrejelzés → **ensemble előrejelzés**
- Különböző bizonytalanságok figyelembevétele: kezdeti feltételek perturbációja, modellhiba reprezentációja stb.
- Az egyes előrejelzések egyformán lehetségesek (?), így valószínűségeket társíthatunk az egyes kimenetek mellé az alapján, hogy a sokaságból hány tag adta



- Az így kapott eredmények együttes vizsgálata
 - Ha az előrejelzések hasonlóak → nagyobb megbízhatóság
 - Ha az előrejelzések nagyon eltérnek egymástól → nagyobb bizonytalanság (kisebb előrejelezhetőség)

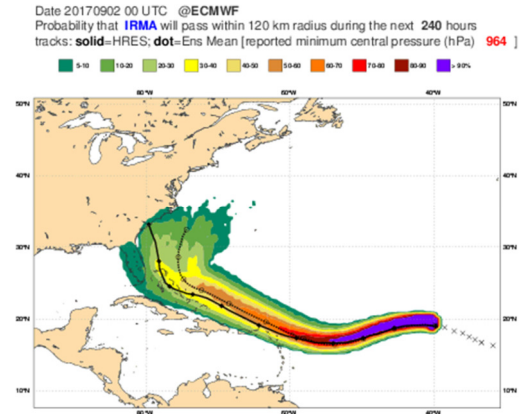
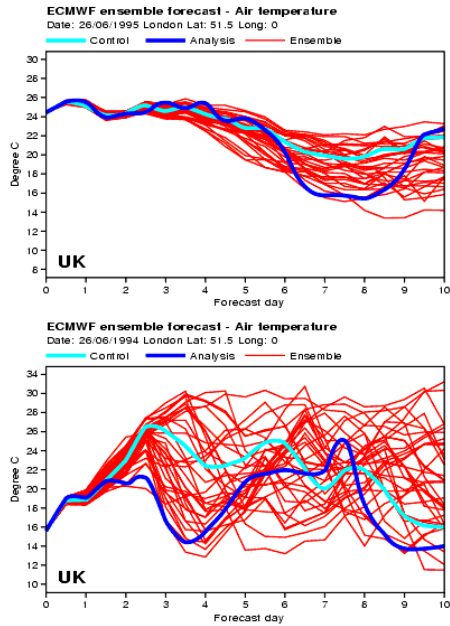
Globális EPS-ek

- Általában nagy elemszámú rendszerek (ECMWF: 50+1 tag)
- 18-30 km-es felbontás
- Nagy hangsúly a kezdeti feltételek bizonytalanságának számszerűsítésén, de modellhibák figyelembevétele is
- Középtávú előrejelzések

Korlátos tartományú EPS-ek

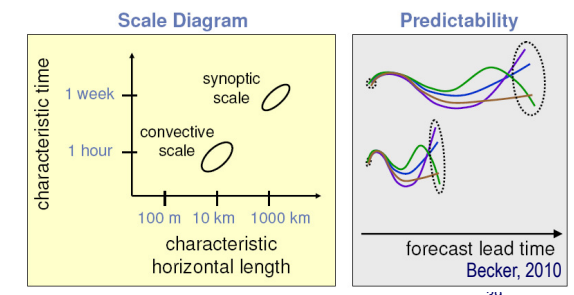
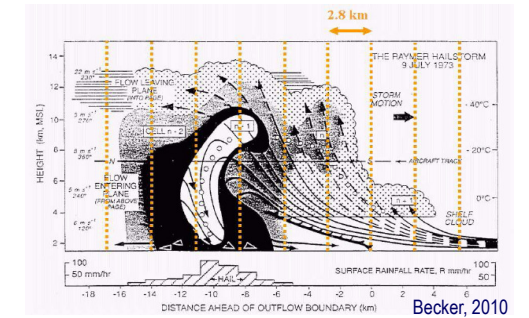
- Kisebb elemszámú rendszerek (OMSZ: 10+1 tag)
- Finomabb, <10 km-es felbontás
- A kezdeti **és** határfeltételekből **és** a modellhibákból származó bizonytalanság leírása – gyorsabb hibanövekedés
- Rövidtávú vagy ultra-rövidtávú előrejelzések

Előrejelezhetőség



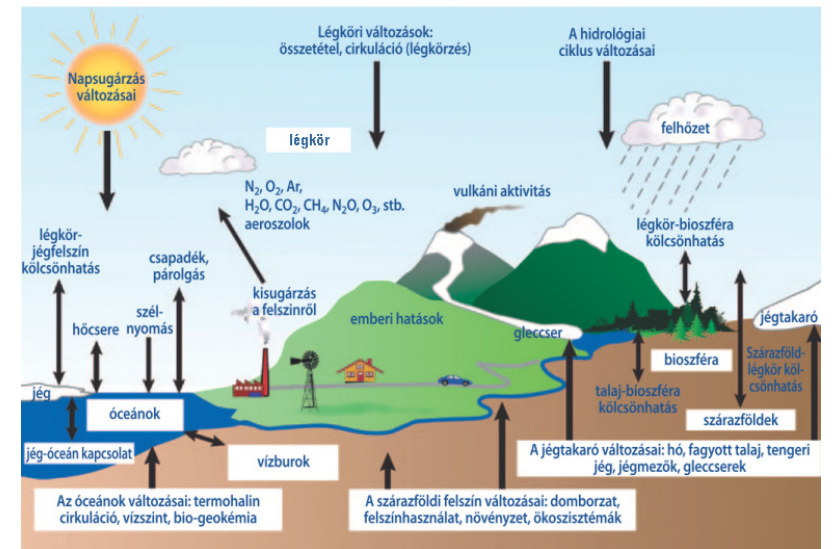
Konvektív skála

- Intenzívebb hiba-növekedés
- Korlátozott előrejelezhetőség
- „Csak” a modellfejlesztés és a felbontás növelése nem növeli az előrejelzés értékét
- Különösen indokolt a bizonytalanságok számszerűsítése
- Igényli a felhasználók (előrejelzők) felkészítését



Az éghajlat modellezése

Az éghajlati rendszer elemei



Éghajlati rendszer: a légkör és a vele érintkezésben levő négy geoszféra kölcsönhatásban álló együttese

Éghajlati modellezés

- Az éghajlati rendszer, illetve a rendszer összetevőinek tanulmányozására, s az összetevők közötti kölcsönhatások elemzésére
- Egyetlen válaszadási lehetőség arra, miként reagál az éghajlat egy feltételezett kényszerre
- Fizikai törvények minden összetevő és kölcsönhatás esetében
- Matematikai egyenletrendszer: nem-lineáris parciális differenciálegyenlet-rendszer + kezdeti és peremfeltételek – numerikus megoldás:
 - Adatasszimiláció: re-analízisek
 - Parametrizáció, diszkretizáció
 - Ensemble technika

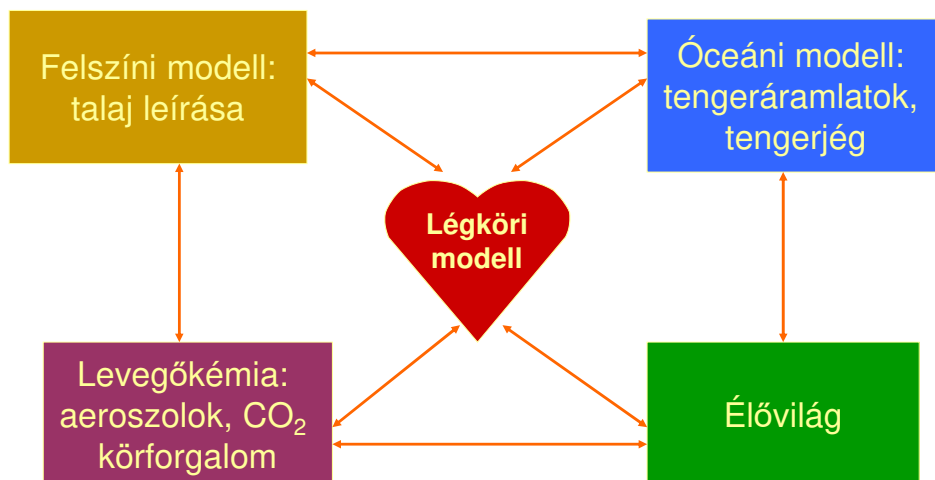
42

Sajátosságok

- Nem csupán a légkör, hanem a teljes **éghajlati rendszer** folyamatainak leírása
- A kezdeti feltételek hamar elveszítik hatásukat és a **külső kényszerek** kormányozzák a rendszert
- Nem pillanatnyi, hanem **állandósult viselkedés** leírása a cél
- Az éghajlati modellek nem a HTER egyszerű kiterjesztései a hosszabb időtávok irányába
- Fizikai **parametrizációs** eljárások fontossága: sugárzás, felszíni folyamatok, nagyskálájú csapadék, konvekció (általában hidrosztatikus modellekről van szó)
- Kapcsolt modellrendszerek – **csatolás** jelentősége

43

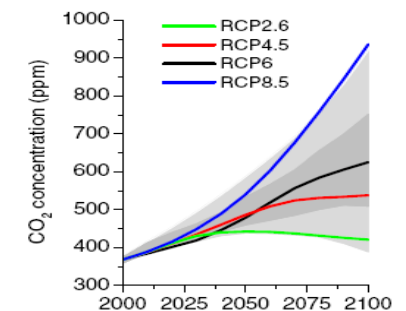
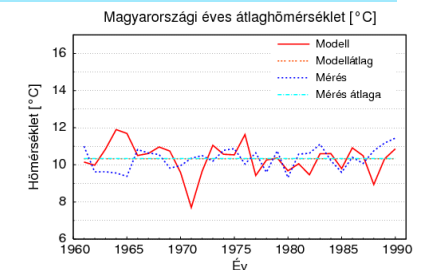
A globális éghajlati modellek összetevői



44

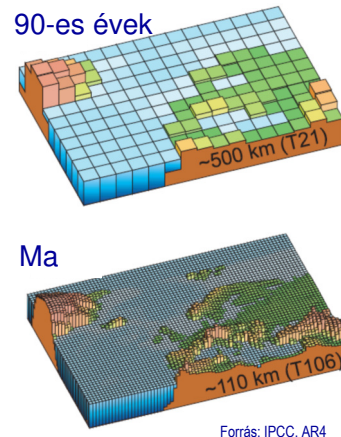
Az éghajlati modellek alkalmazása

- **Tesztelés** a múltra – eredmények összehasonlítása megfigyelésekkel
- Elvart **pontosság**: az éghajlat átlagos jellemzői több évtizedes skálán (Egy éghajlati szimuláció akkor is lehet „tökéletes”, ha egy időjárási eseményt sem jelzett előre)
- **Modellfejlesztés**
- Jövőre vonatkozó **projekciók** – feltételes prognózisok



Regionális sajátosságok

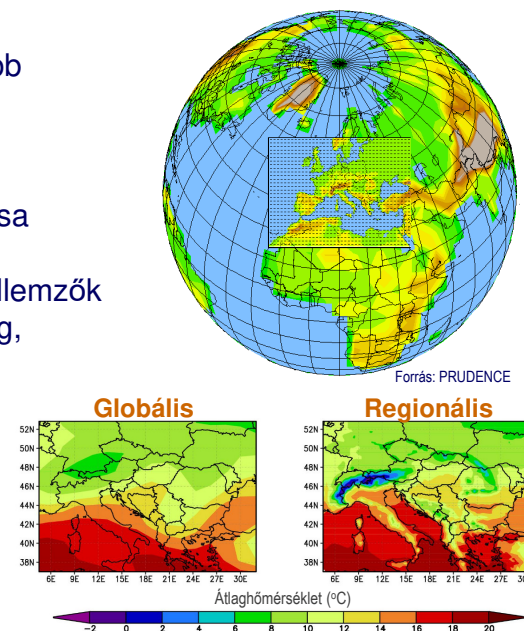
- Globális modellek: 250-100 km-es vízszintes és 1 km-es függőleges rácssűrűség – Magyarország fölé ebből néhány (2-10) pont esik
- A regionális éghajlatváltozás iránya ellentétes lehet a globális tendenciákkal
- A globális információ finomítása szükséges
 - Statisztikai leskálázás
 - Regionális éghajlati modellek



46

Regionális éghajlati modellek

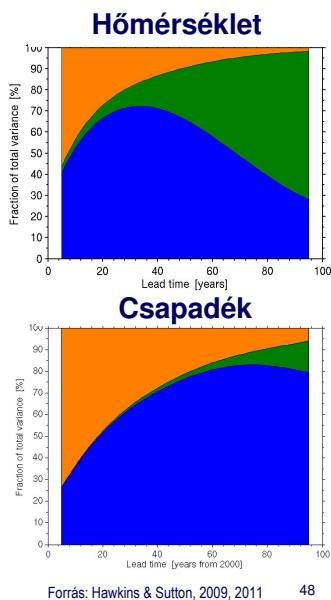
- Kiseb terület – finomabb felbontás: 10-25 km
- Néhány fizikai folyamat pontosabb, explicit leírása
- Részletesebb felszíni jellemzők (pl. domborzat, érdesség, albedó)
- Külső kényszerek a peremfeltételeken keresztül



Bizonytalanságok és számszerűsítésük

- Rövidtávon (legelterjedtebb): kezdeti feltételek hibái – multi-analízis technika
- Éghajlati skálán – multi-modell szimulációk:

1. Természetes változékonyság
2. Modellek eltéréseiből eredő bizonytalanság
3. Emberi tevékenység bizonytalansága

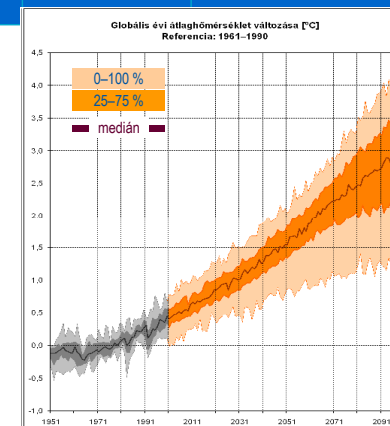


48

Modellfuttatások az OMSZ-ban

Modell	Határfeltétel	Felbontás	Forgatókönyv
ALADIN-Climate	ARPEGE-Climate, ERA-Interim	10, 50 km	A1B, RCP8.5, RCP4.5
REMO	ECHAM5/MPI-OM, MPI-ESM, ERA-Interim	10, 25 km	

- Kiértékelés: együttesen
- Több-évtizedes időszakok vizsgálata (pl. 2021–2050)
- A jövőre a **változást** adjuk meg – referencia-időszak (pl. 1971–2000)



Összefoglalás

Összefoglalás

- Az időjárási és éghajlati folyamatok „előrejelzése” **modellekkel** lehetséges (a gondolati úthoz a rendszer túl komplex)
- Az előrejelzések elengedhetetlenek az élet- és vagyonvédelem (pl. viharjelzés), a gazdasági élet számos területén (közlekedés, energiaszektor stb.), s az éghajlatváltozás hatásaira való felkészülés során
- A modellszimulációk bizonytalanságai **valószínűségi információk** formájában számszerűsíthetők – egy előrejelzés ezekkel együtt teljes
- A valószínűségi előrejelzések segítik a felhasználói döntéshozatalt, mivel a meteorológiai helyzettel összefüggő döntését így a felhasználó személyre szabottan maga tudja meghozni az esélyek mérlegelésével