

Bevezetés az időjárás és az éghajlat numerikus (számszerű) előrejelzésébe

Szépszó Gabriella
szepszo.g@met.hu

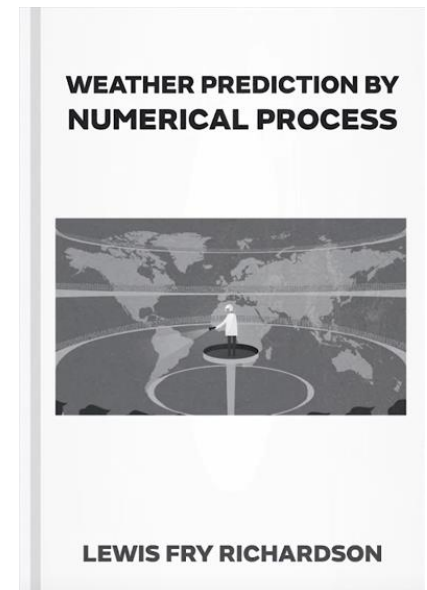
Letölthető előadások: <http://nimbus.elte.hu/~numelo>

Az előadás vázlata

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

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 légköri 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)

Légköri egyenletek

Mozgásegyenletek

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{g} - 2\bar{\Omega} \times \bar{v} + \bar{F} + \bar{S}$$

Kontinuitási egyenlet

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \cdot \operatorname{div} \bar{v}$$

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

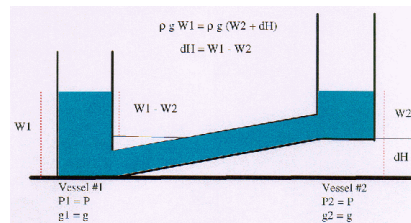


- A légkör vastagságának elhanyagolása



Továbbiak
a későbbi
órákon

- Hidrosztatikus közelítés



ANALITIKUSAN TOVÁBBRA SEM OLDHATÓ MEG!

→ Analitikus megoldás hiányában numerikus módszerek

Numerikus közelítések → diszkrét egyenletek

A numerikus előrejelzés lépései

ADATASSZIMILÁCIÓ

Kezdeti feltétel meghatározása:
mérési információk gyűjtése,
ellenőrzése, modellrácsra
előállítása (objektív analízis)

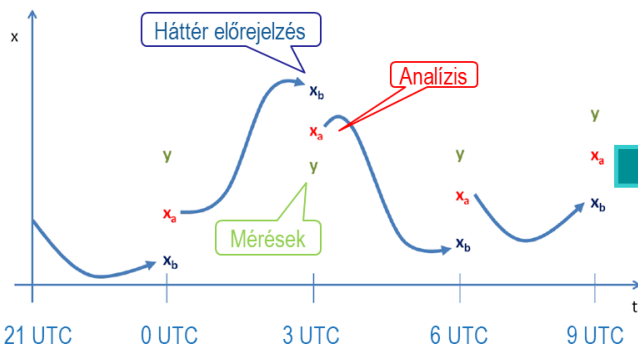
MODELL-INTEGRÁLÁS

**A hidro-termodinamikai
egyenletrendszer
közelítő megoldása**

UTÓFELDOLGOZÁS

**Megjelenítés, speciális
paraméterek származtatása,
bizonytalanság becslése,
verifikáció**

Az adatasszimilációs ciklus



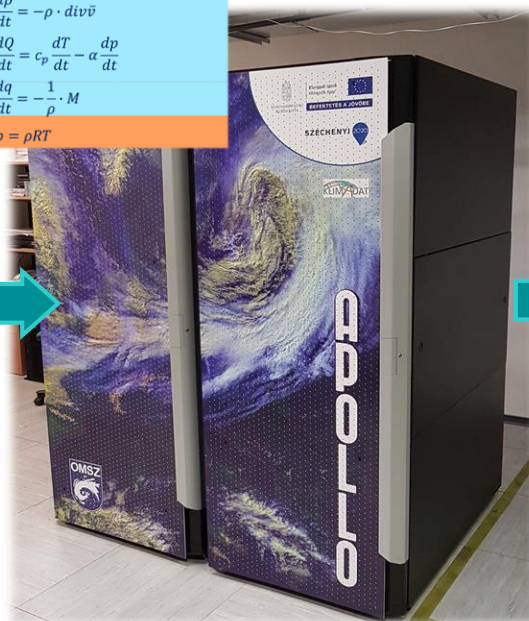
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{F} + \vec{S}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \cdot \text{div} \vec{v}$$

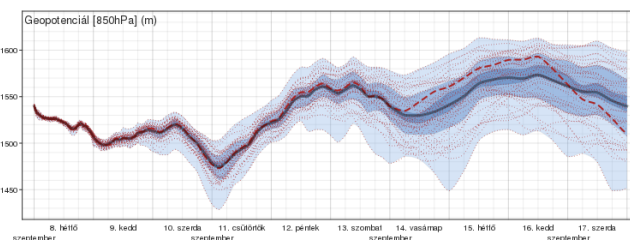
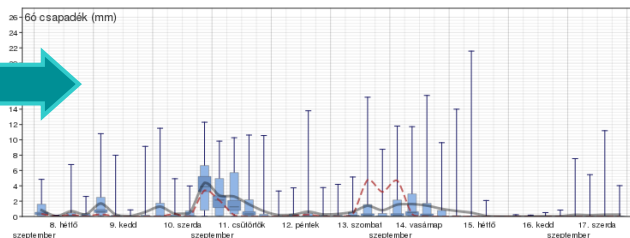
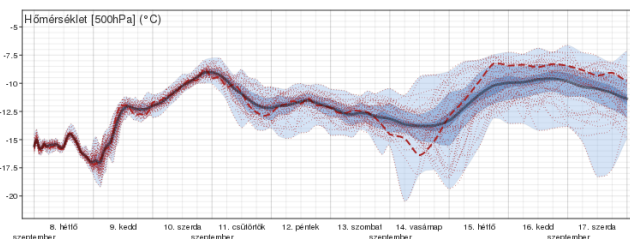
$$\frac{dQ}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt}$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot M$$

$$p = \rho R T$$



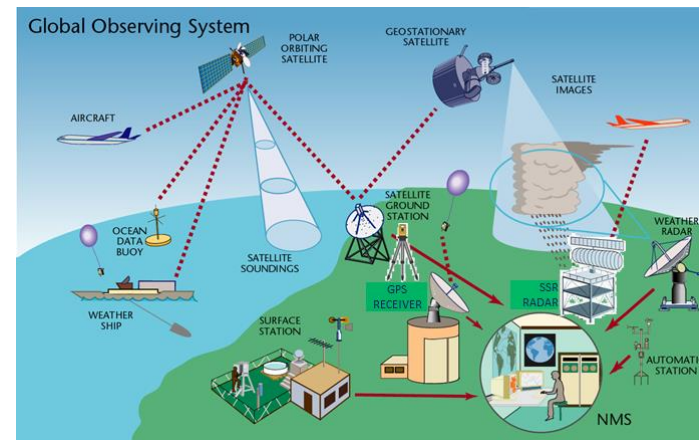
ECMWF Ensemble előrejelzés Budapest
2025.09.08 00:00 UTC



Kezdeti feltételek meghatározása

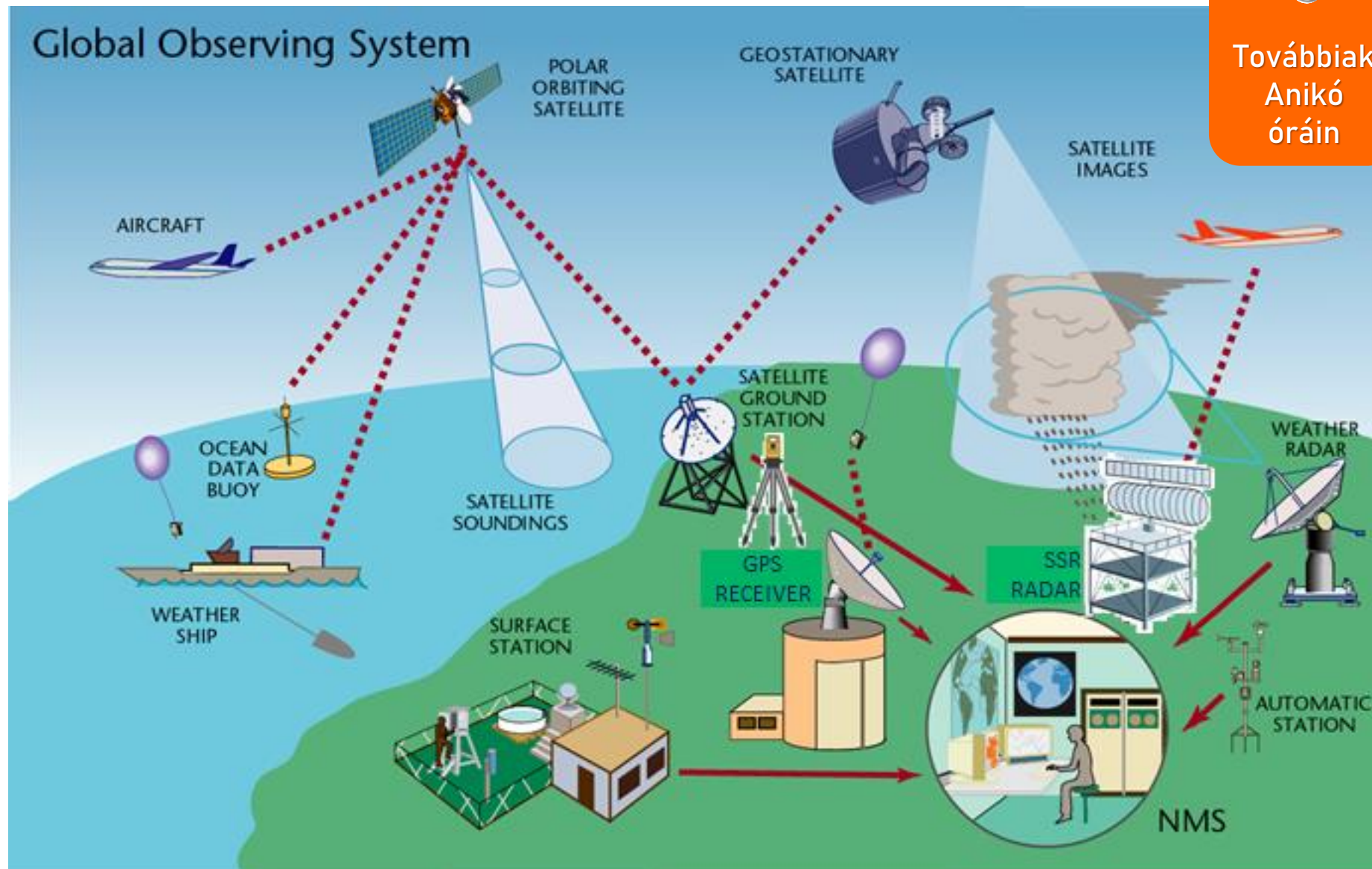
- Előrejelzés érzékenysége a kezdeti feltételre
- Cél: a numerikus modellek számára minél pontosabb kezdeti feltétel (analízis) meghatározása (pontosság és konzisztencia)
- Rendelkezésre álló információk:
 - Megfigyelések
 - A modell korábbi futtatásainak eredményei
 - Egyéb dinamikai és fizikai törvényszerűségek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

Továbbiak
Anikó
óráin



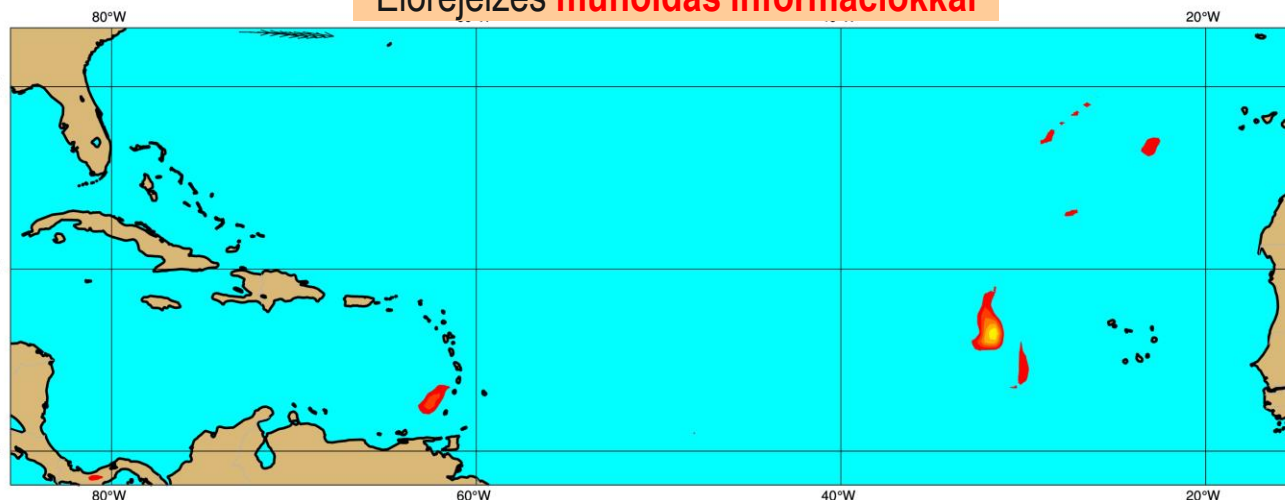
Kezdeti feltételek meghatározása

Továbbiak
Anikó
órán



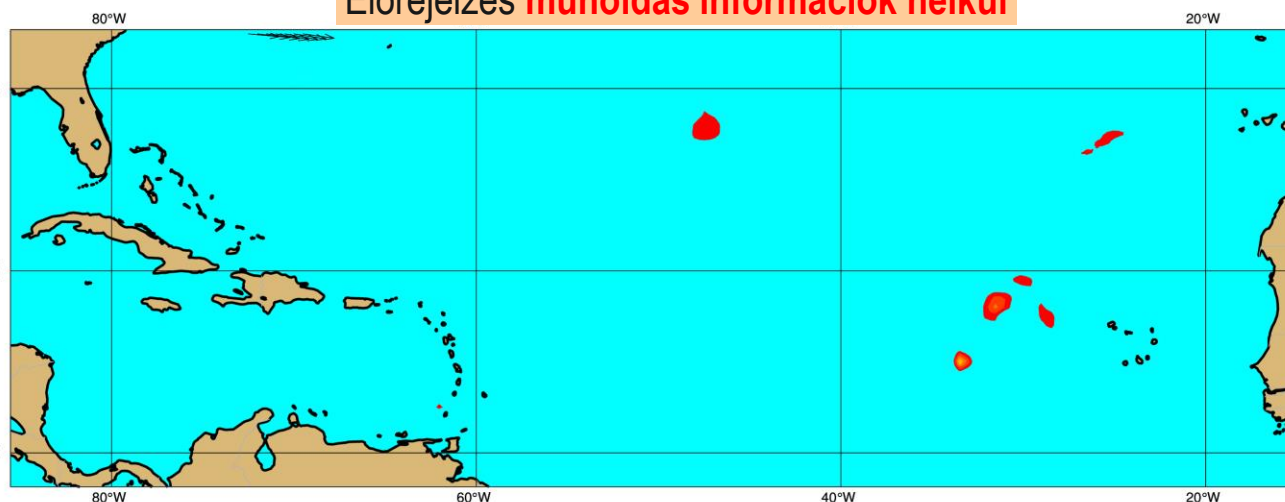
Az adatasszimiláció jelentősége

Előrejelzés műholdas információkkal

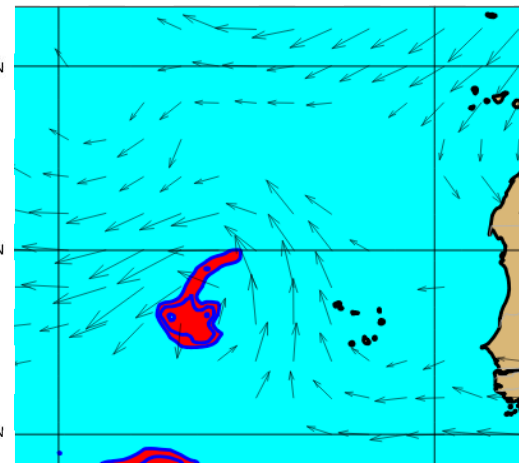


Thursday 31 August 2017 00 UTC ecmf 500 hPa Vorticity (relative)
Thursday 31 August 2017 00 UTC ecmf 500 hPa U component of wind/V component of wind

Előrejelzés műholdas információk nélkül

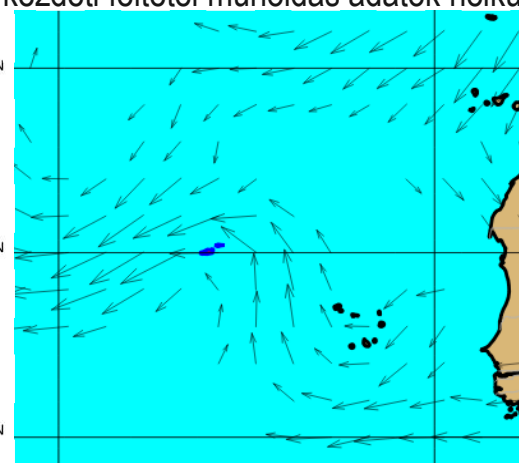


700 hPa relatív nedvesség & szél
kezdeti feltétel műholdas adatokkal



Nedvesség > 95%

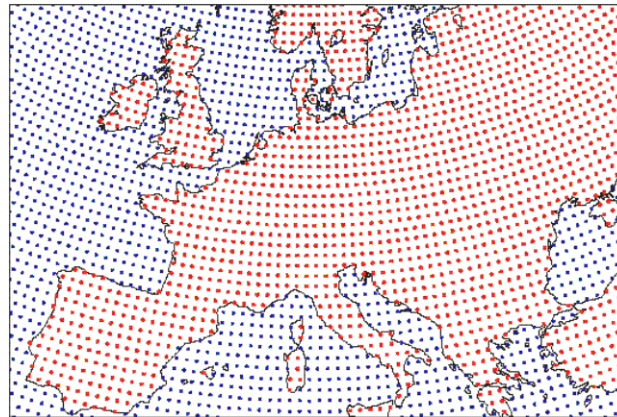
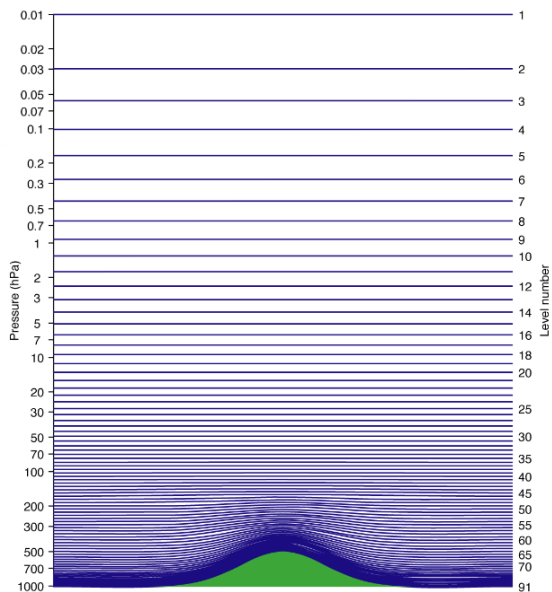
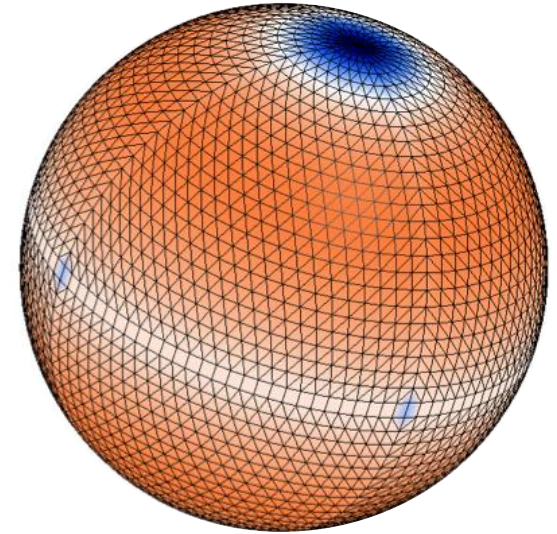
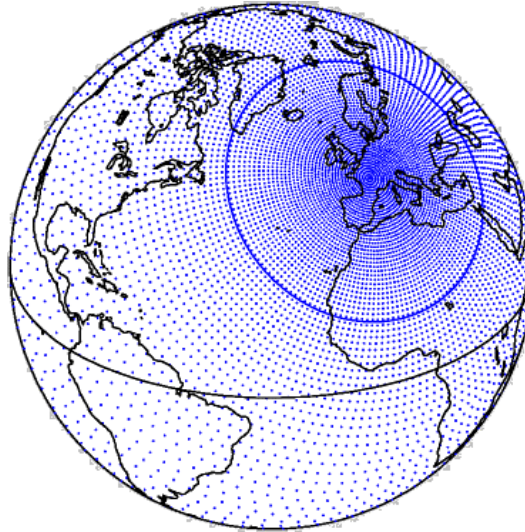
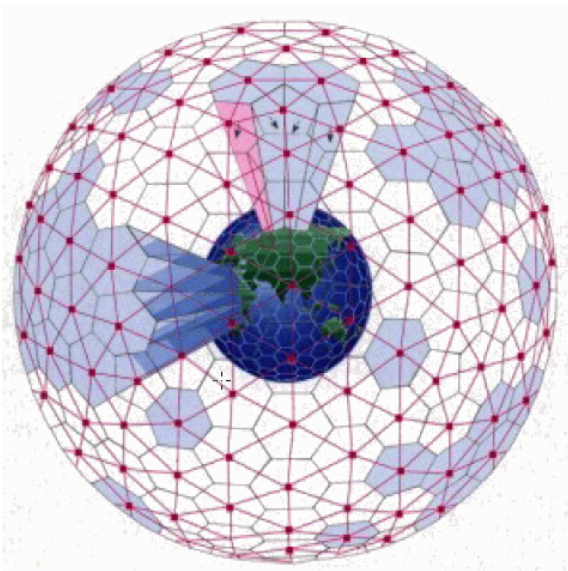
700 hPa relatív nedvesség & szél
kezdeti feltétel műholdas adatok nélkül



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 advekciós séma)

Térbeli és időbeli diszkretizáció



Fizikai parametrizáció

- Adott rácsfelbontáson explicit módon leírható folyamatok – rácestávolságnál 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.

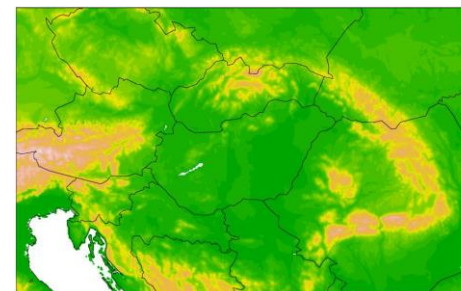
Továbbiak
Gabi
óráin



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
leskálázás korlátos
tartományú (regionális)
modellekkel: relaxációs
technika

Regionális modell (LAM)



Rövidtávú előrejelzések

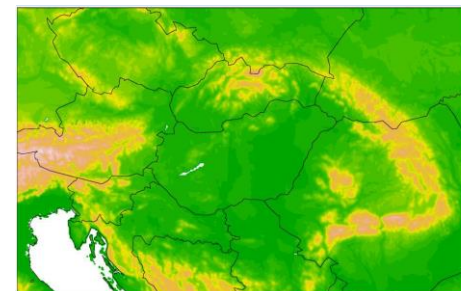
Korlátos tartományú modellek

- 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

HungaroMetben készülő előrejelzések

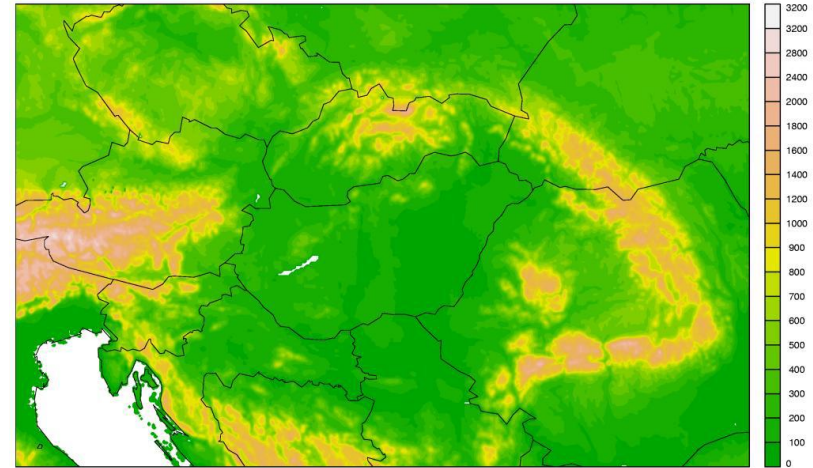
- ALADIN, ALARO, AROME modellek közös fejlesztése 1991-től az ACCORD (ALADIN) és LACE konzorciumokban, kutatási együttműködések, adatcsere
- Regionális előrejelzések a Kárpát-medencét lefedő területen 2 napra
- A tartományon kívül zajló folyamatok figyelembevétele az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF) által futtatott globális modellből

Regionális modell



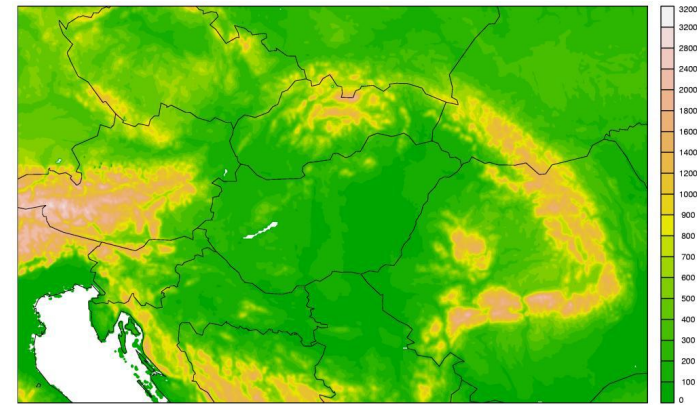
Példa a rövidtávú előrejelzésben operatíván alkalmazott modellre: AROME

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



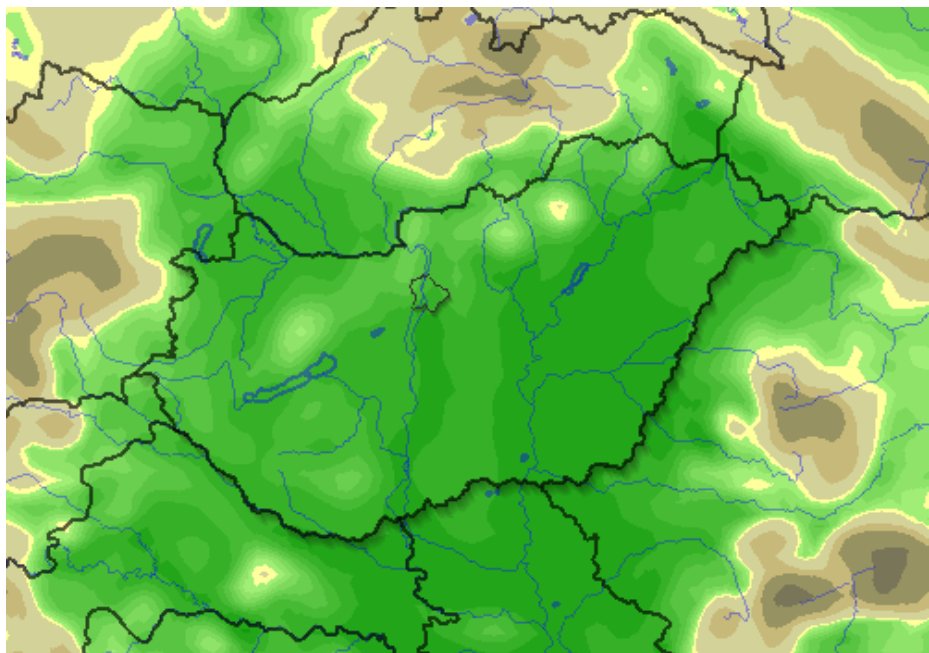
Számítási igény

- Korlátos tartományú modell
 - Kárpát-medencét lefedő tartomány
 - 2,5 km-es felbontás (500x320 pont)
 - 60 függőleges szint
 - 6 prognosztikai változó (hőmérséklet, nedvesség, 3 szélkomponens, légnyomás)
 - 1-perces időlépcső
 - 48 órás előrejelzés (2 880 lépés)



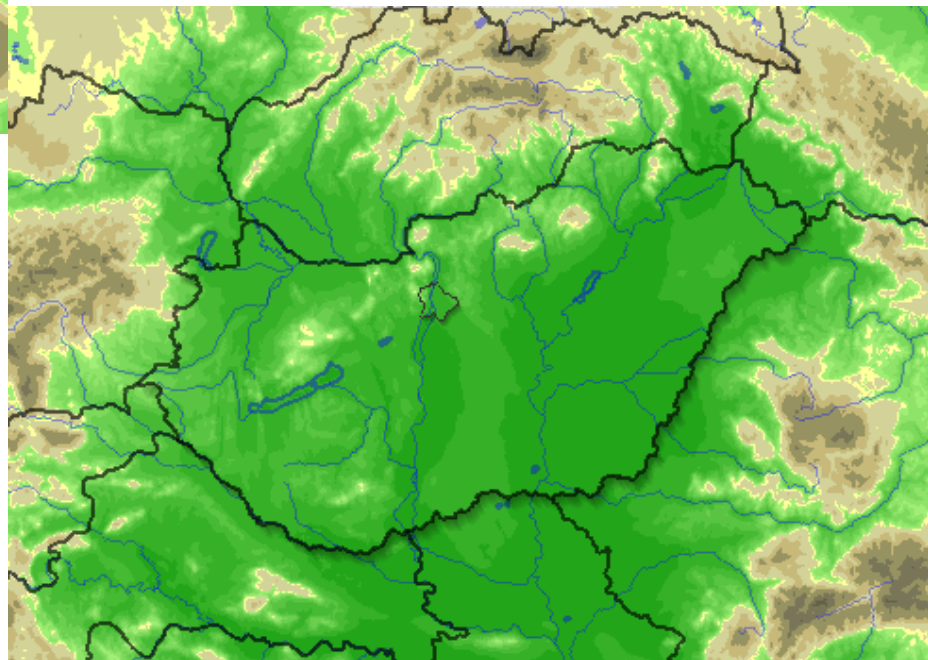
Összesen $\sim 10^{11}$ adat előrejelzésenként

Domborzat a felbontás függvényében

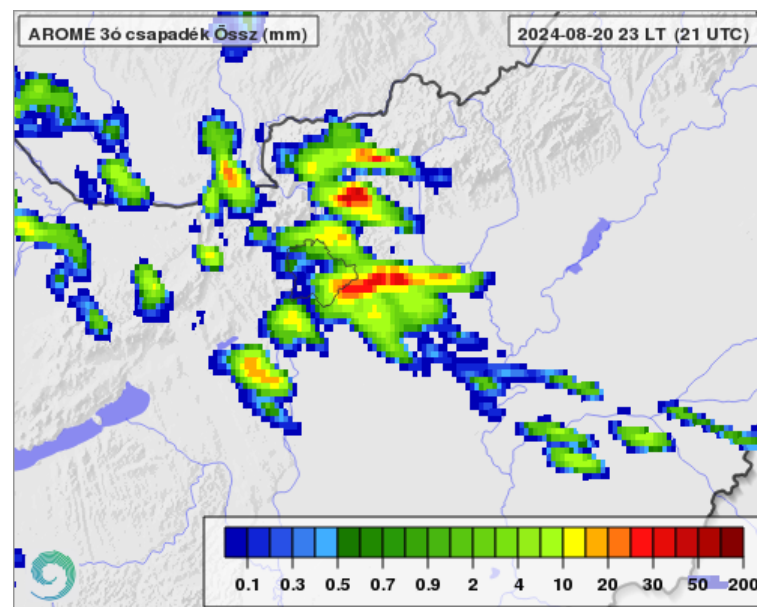
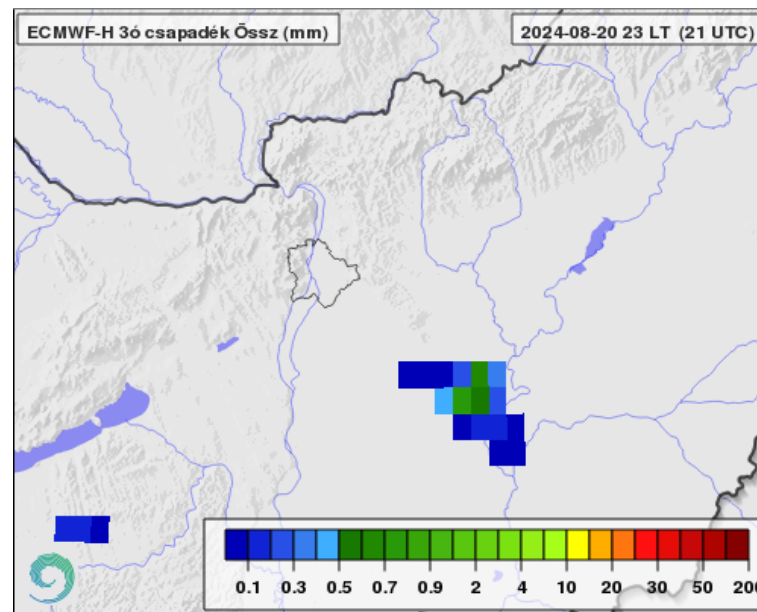
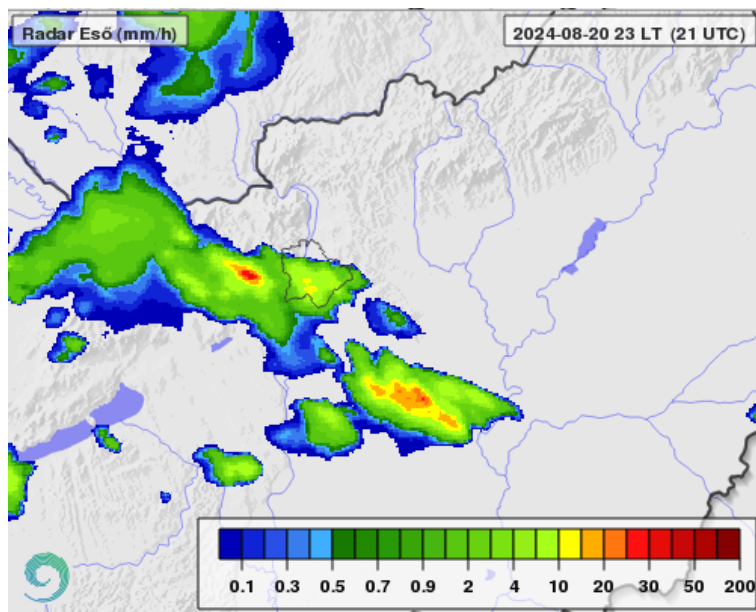


ECMWF: 9 km

AROME: 2,5 km



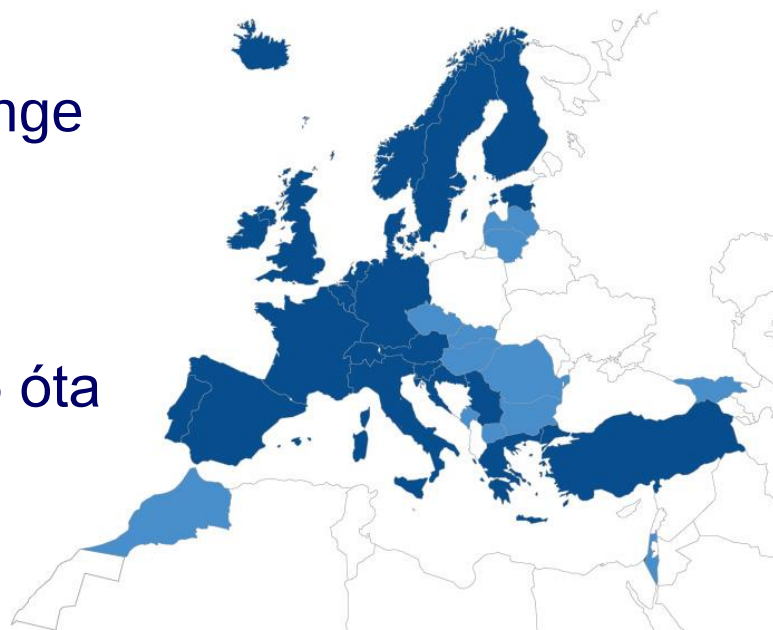
2024. augusztus 20.



Középtávú és szezonális előrejelzések (ECMWF)

ECMWF

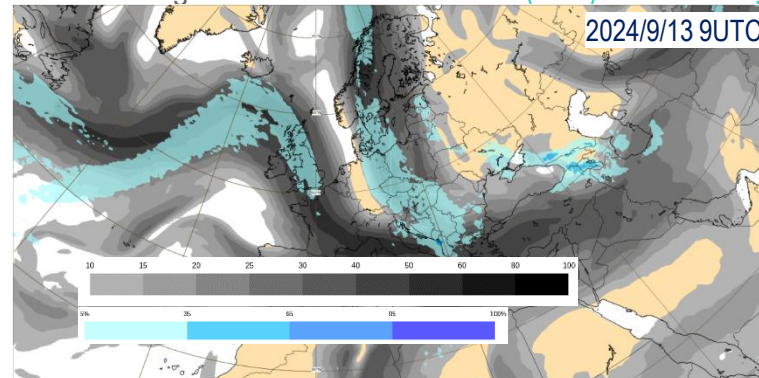
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
(Reading, Bologna, Bonn)
- Nemzetközi együttműködés 1975 óta
- 35 ország részvételével
(23 tag és 12 társult tag,
Magyarország 1994-től társult tag)
- Legfontosabb cél: globális középtávú számszerű előrejelzési modell operatív futtatása, fejlesztése és kutatása



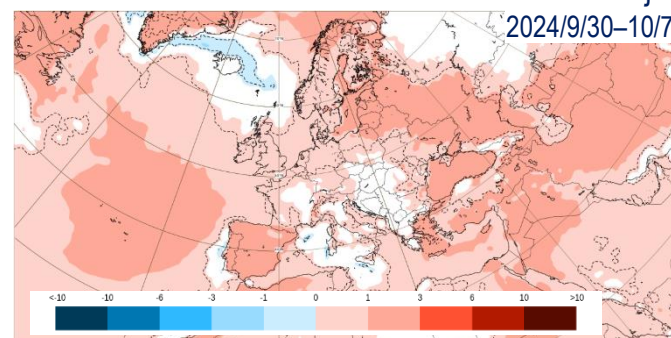
ECMWF „előrejelzések”

- Föld-rendszer (Earth system) modell: Integrated Forecasting System (IFS)
- **Középtávú előrejelzés:** 15 napig, 9 km-es felbontás, 137 szint, 50+1 ensemble tag (ensemble prediction system, ECMWF-ENS és ECMWF-HRES)
- 46-napos előrejelzés (36 km, ensemble)
- Szezonális előrejelzések (7-13 hónapra, 36 km, ensemble)
- Re-analízisek (ERA-40 → ERA5)

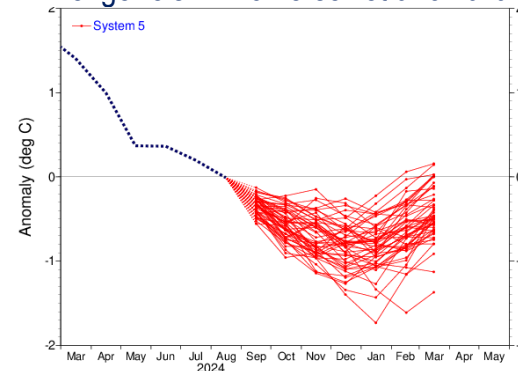
Szélsőbesség 250 hPa-on & turbulencia (CAT) valószínűség



2 m-es hőmérséklet heti anomáliája



Tengerfelszín-hőmérséklet anomália

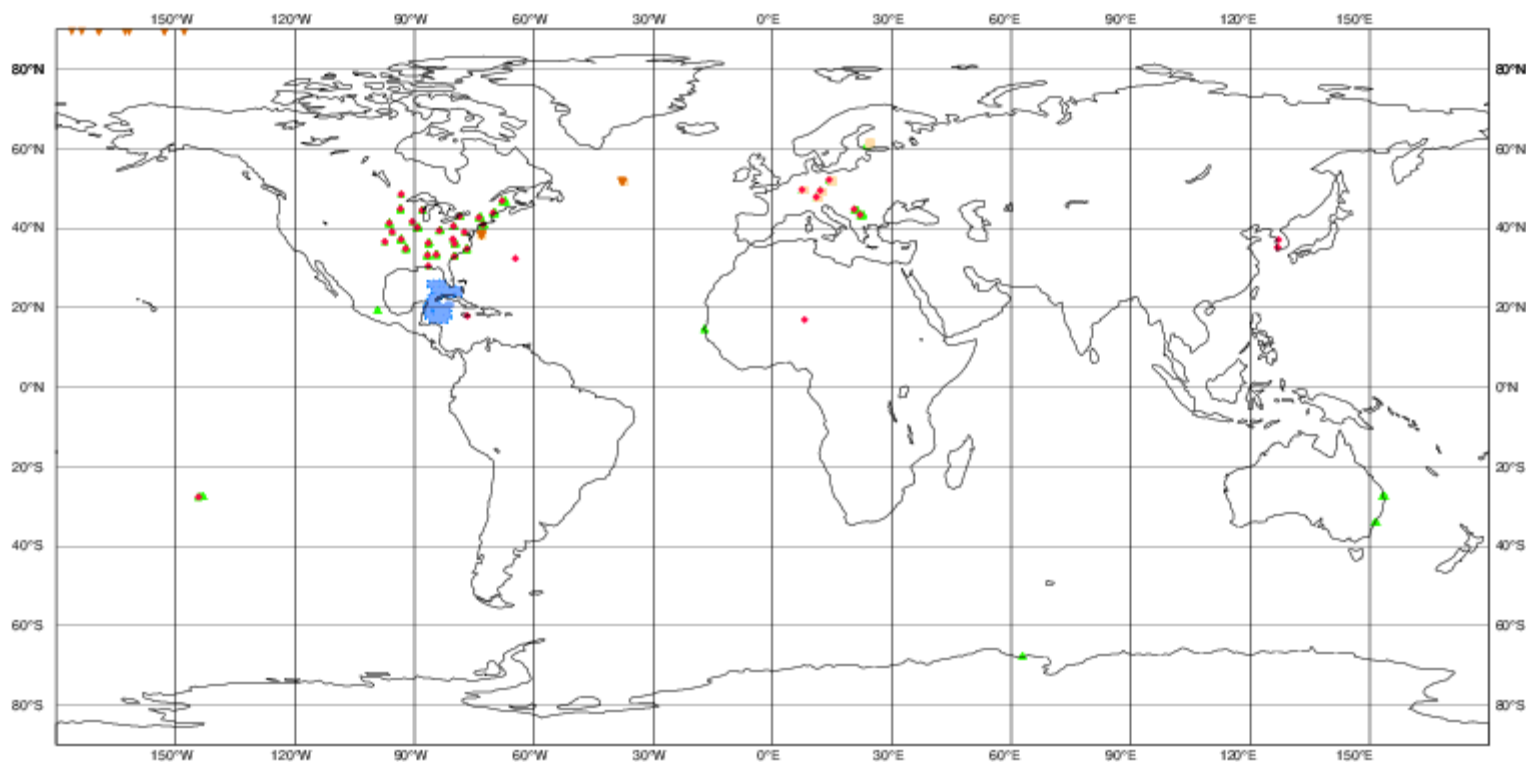


Felhasznált megfigyelések monitorozása

ECMWF data coverage (all observations) - RADIOSONDE

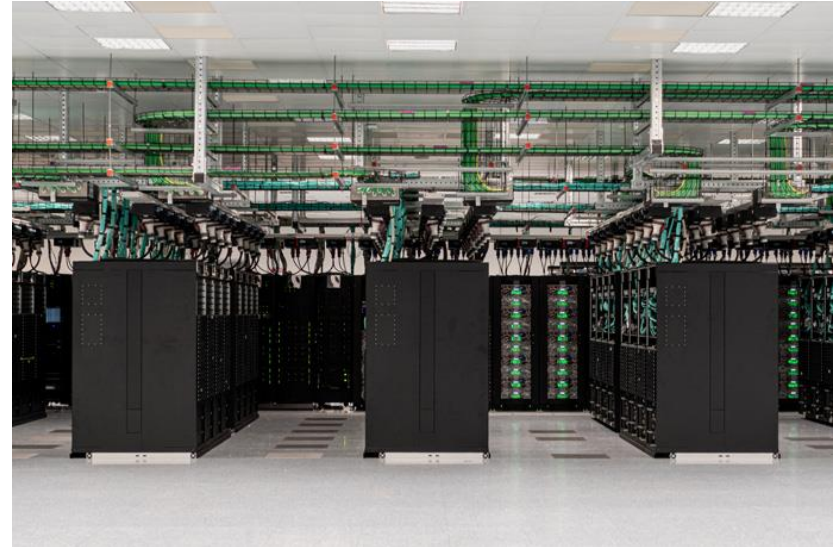
2021081815 to 2021081821

Total number of obs = 127



Számítógép-park

- Számító- és adatközpont: Bologna
- Atos BullSequana XH2000 clusters 2022 óta
- 1 millió AMD CPU, 30 petaflops (10^{15} számítás másodpercenként)
- Felosztás:
 - Operatív futtatások, határfeltételkészítés, tagországok operatív futtatásai
 - Kutatás, fejlesztés, új modellváltozat tesztelése

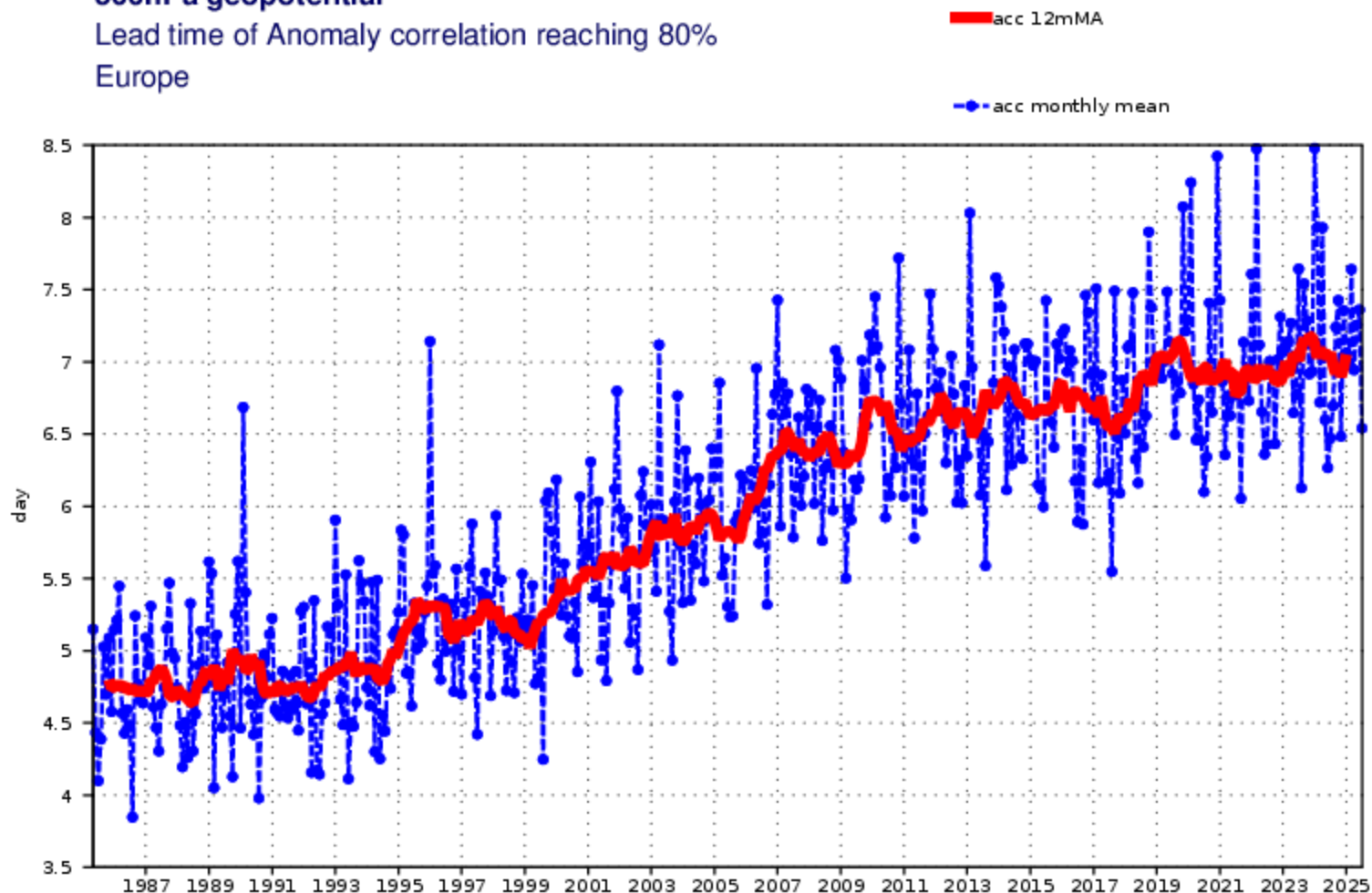


Az előrejelzések beválásának javulása

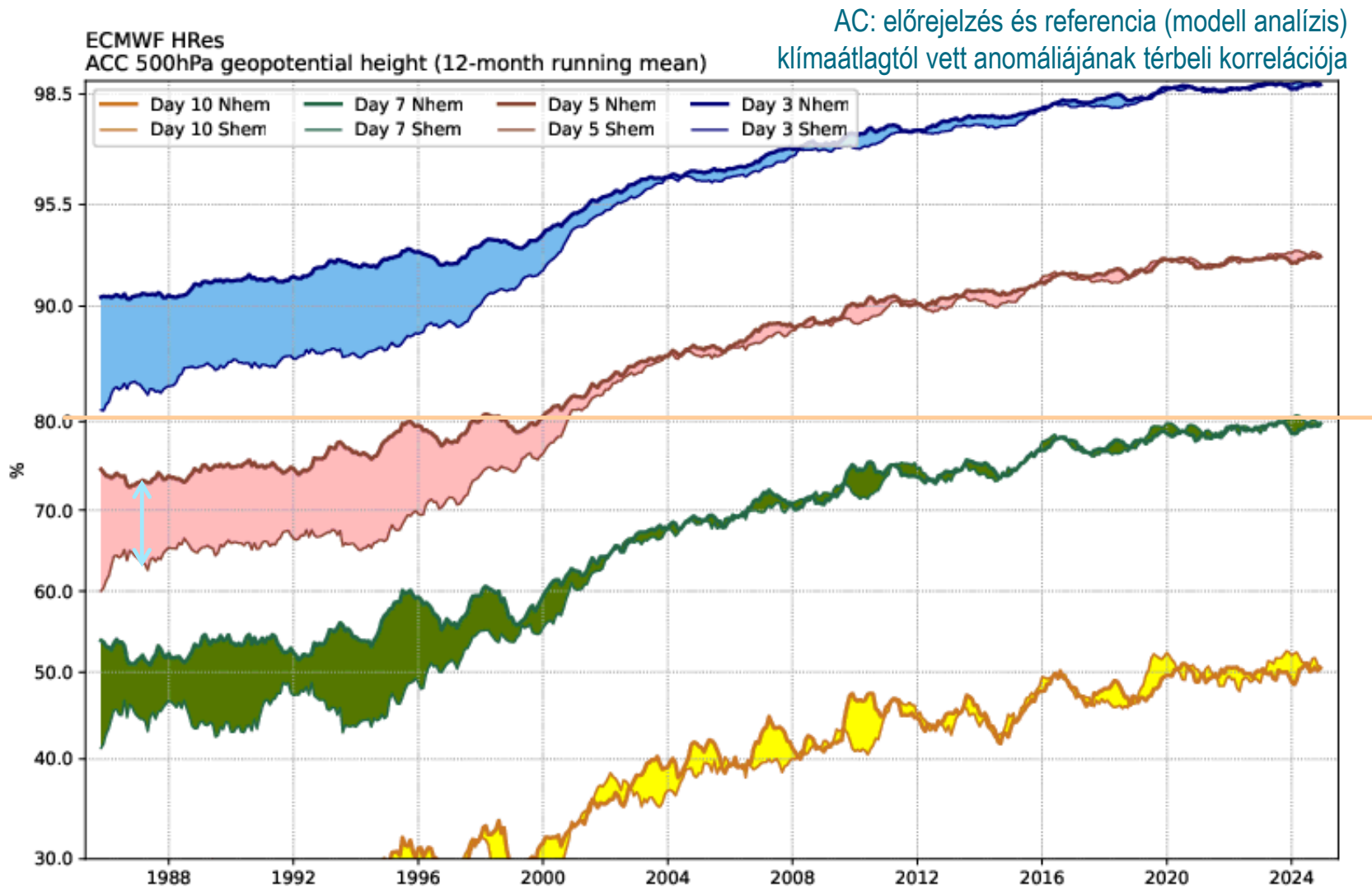
AC: előrejelzés és referencia (modell analízis)
klímaátlagtól vett anomáliájának térbeli korrelációja

500hPa geopotential

Lead time of Anomaly correlation reaching 80%
Europe



Az előrejelzések beválásának javulása



Az előrejelzések beválásának javulása

Továbbiak
Bogi
óráin

CRPS: előrejelzés valószínűségi eloszlása és megfigyelés
Skill score: összevetés egy referencia-előrejelzéssel (klíma)

Stable Equitable Error in Probability Space | total precipitation
Extratropics

■ score 12m MA reaches 0.450



Valószínűségi előrejelzések

Két videó

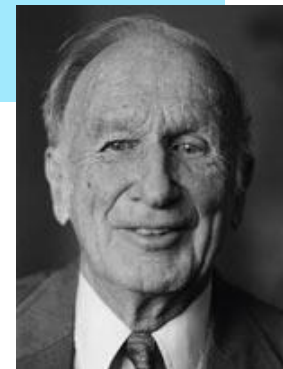
- „Okozhat-e egy braziliai pillangó szárnycsapása tornádót Texasban?”

<https://vimeo.com/287523707>

- Az ensemble előrejelzések 25 éve:

<https://www.youtube.com/watch?v=NLhRUun2iso>

Probléma-felvetés

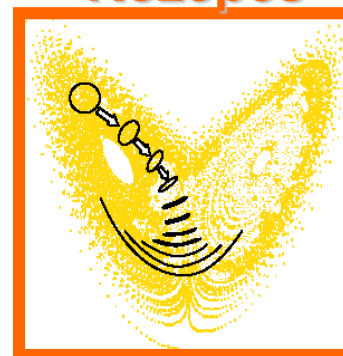


- Edward Lorenz (1972): „Okozhat-e egy braziliai pillangó szárnycsapása tornádót Texasban?”
- A légkör bonyolult turbulens rendszer, nagyfokú érzékenységet mutat a kiindulási állapotára (akárcsak a **kaotikus** rendszerek)
- Lorenz egy egyszerűsített modellel igazolta, hogy egy meteorológiai folyamat **előrejelezhetősége** nagyban függ annak kiindulási feltételeitől
- Egy előrejelzés csak akkor teljes, ha hozzá tudunk rendelni megbízhatósági mutatókat (a beválás valószínűségét)

Magas



Közepes

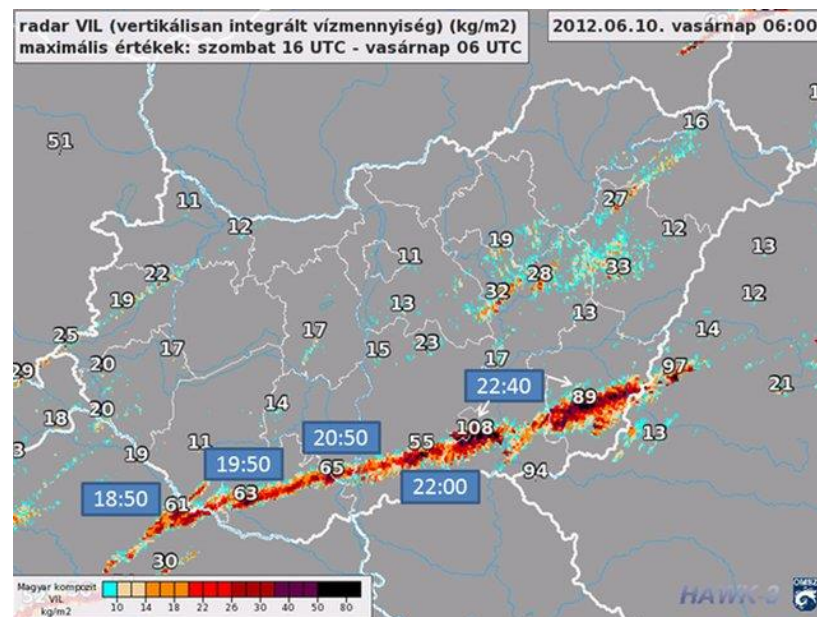


Alacsony



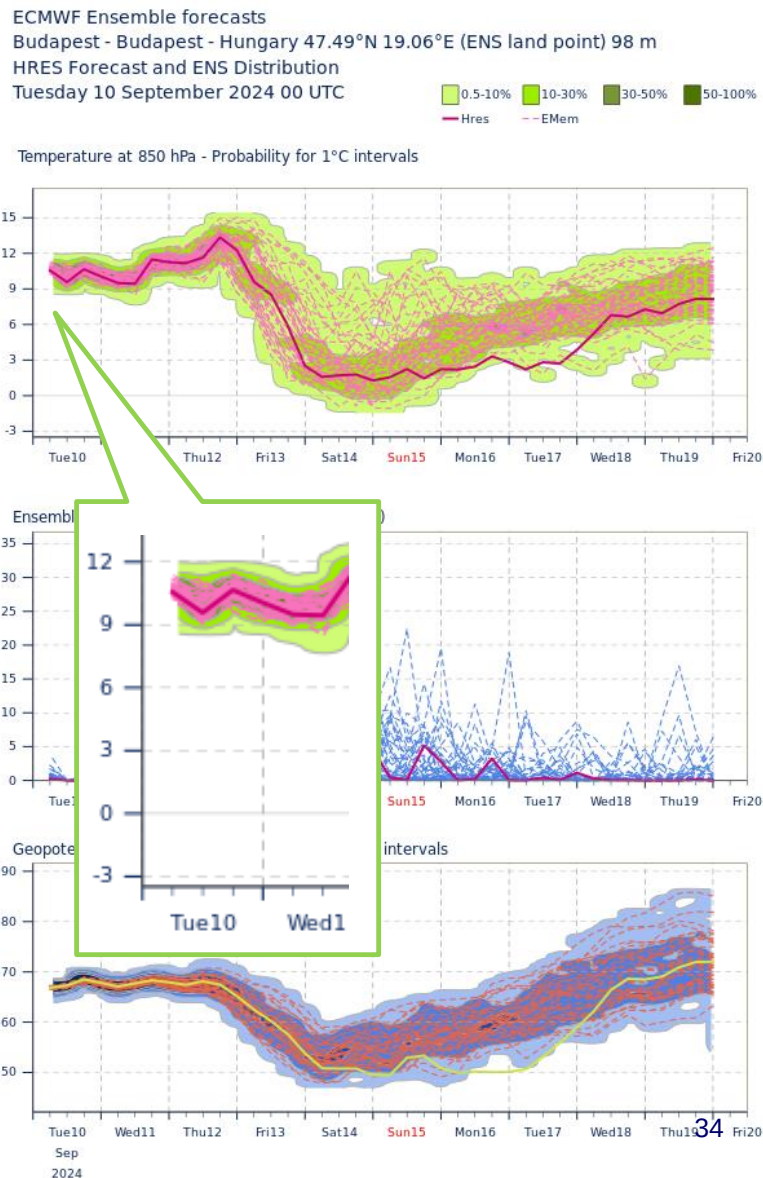
Időjárás-előrejelzések bizonytalanságai

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)
- 9-25 km-es felbontás
- Nagy hangsúly a kezdeti feltételek bizonytalanságán és modellhibák számszerűsítésén
- Középtávú előrejelzések

Korlátozott tartományú EPS-ek

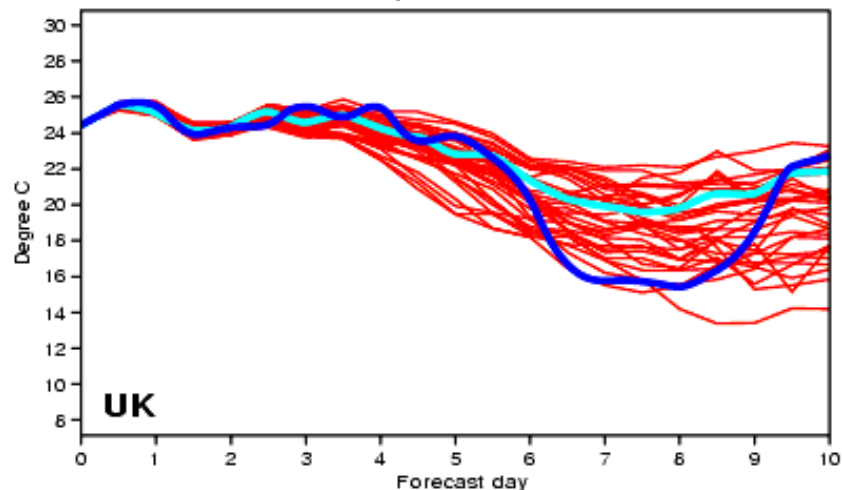
- Kisebb elemszámú rendszerek (HungaroMet: 10+1 tag)
- (1-)2-5 km-es felbontás
- A kezdeti **és** határfeltételekből **és** a modellhibákból származó bizonytalanság leírása – gyorsabb hibanövekedés
- Rövidtávú előrejelzések

Előrejelezhetőség

ECMWF ensemble forecast - Air temperature

Date: 26/06/1995 London Lat: 51.5 Long: 0

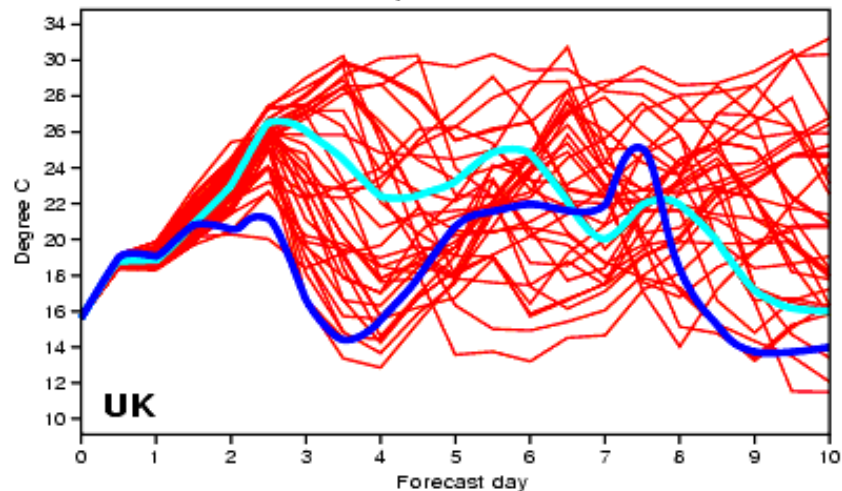
Control Analysis Ensemble



ECMWF ensemble forecast - Air temperature

Date: 26/06/1994 London Lat: 51.5 Long: 0

Control Analysis Ensemble

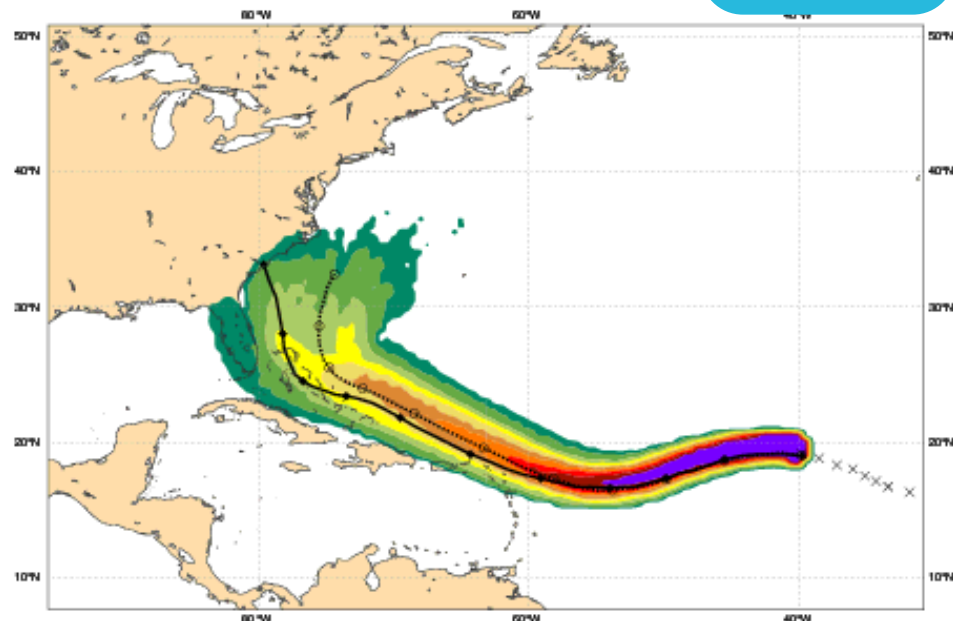


Date 20170902 00 UTC @ECMWF

Probability that IRMA will pass within 120 km radius during the

tracks: solid=HRES; dot=Ens Mean [reported minimum centra

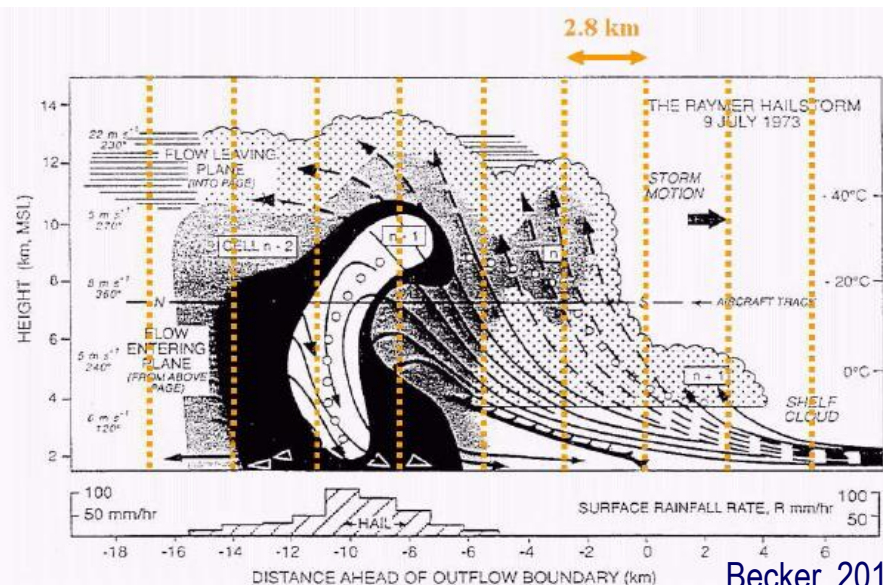
5-10 10-20 20-30 30-40 40-50 50-60 60-70 70-80



Továbbiak
Kati
óráin

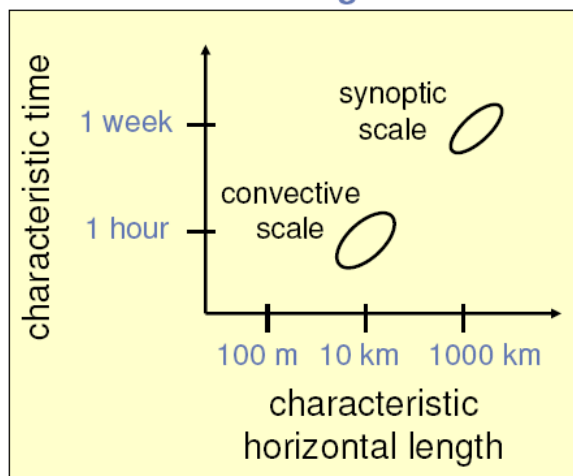
Konvektív skála

- Intenzívebb hiba-növekedés
- Korlátozott előrejelezhetőség
- „Csak” a modellfejlesztés és a felbontás növelése nem feltétlenül növeli az előrejelzés pontosságát

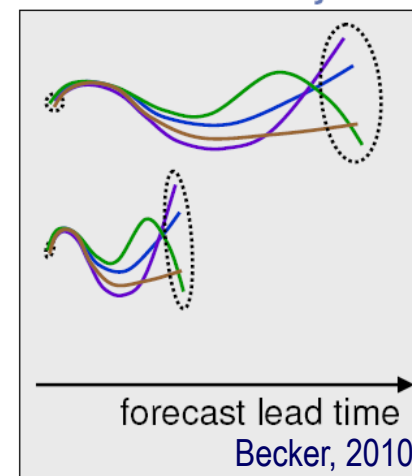


Becker, 2010

Scale Diagram



Predictability

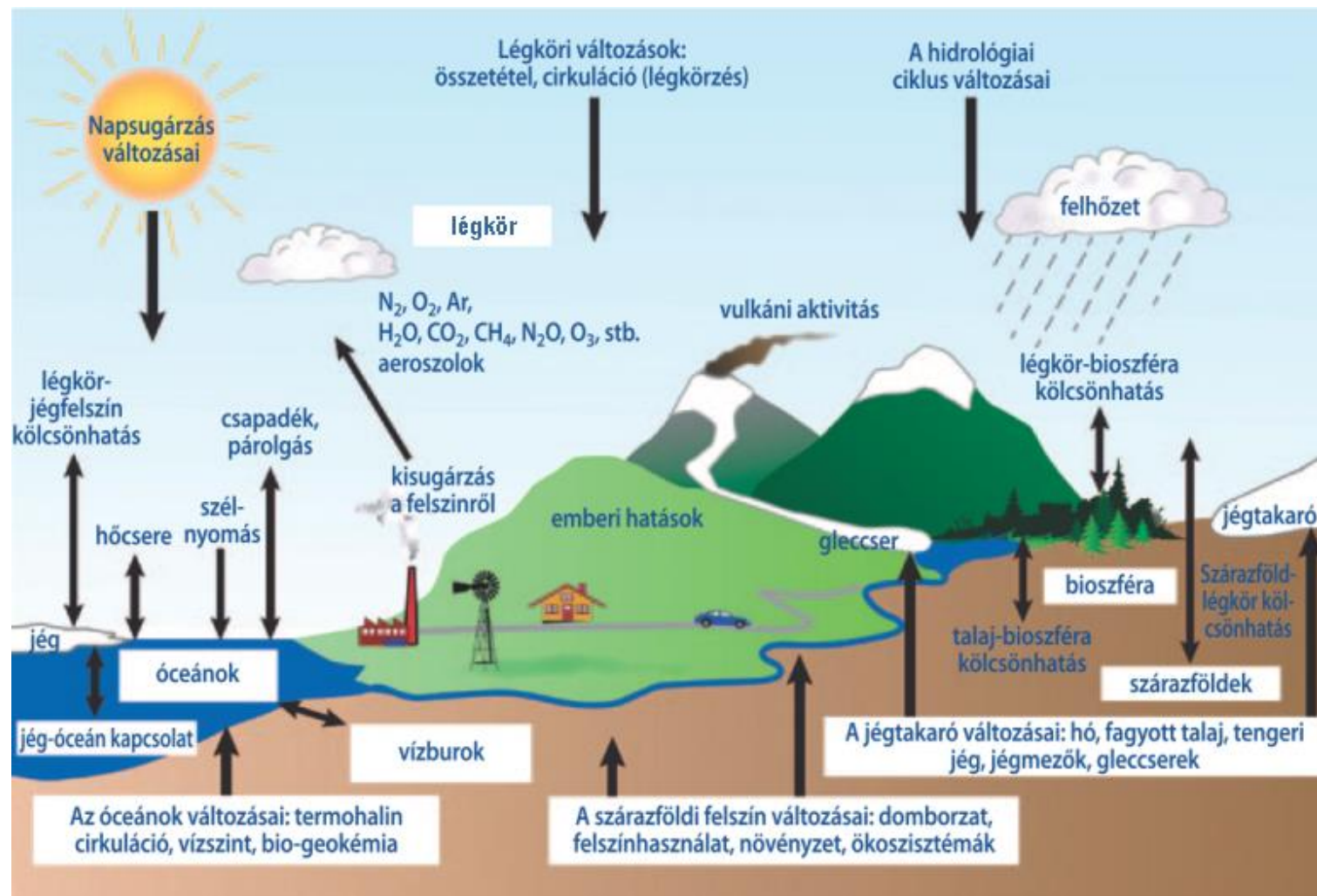


Becker, 2010

- 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

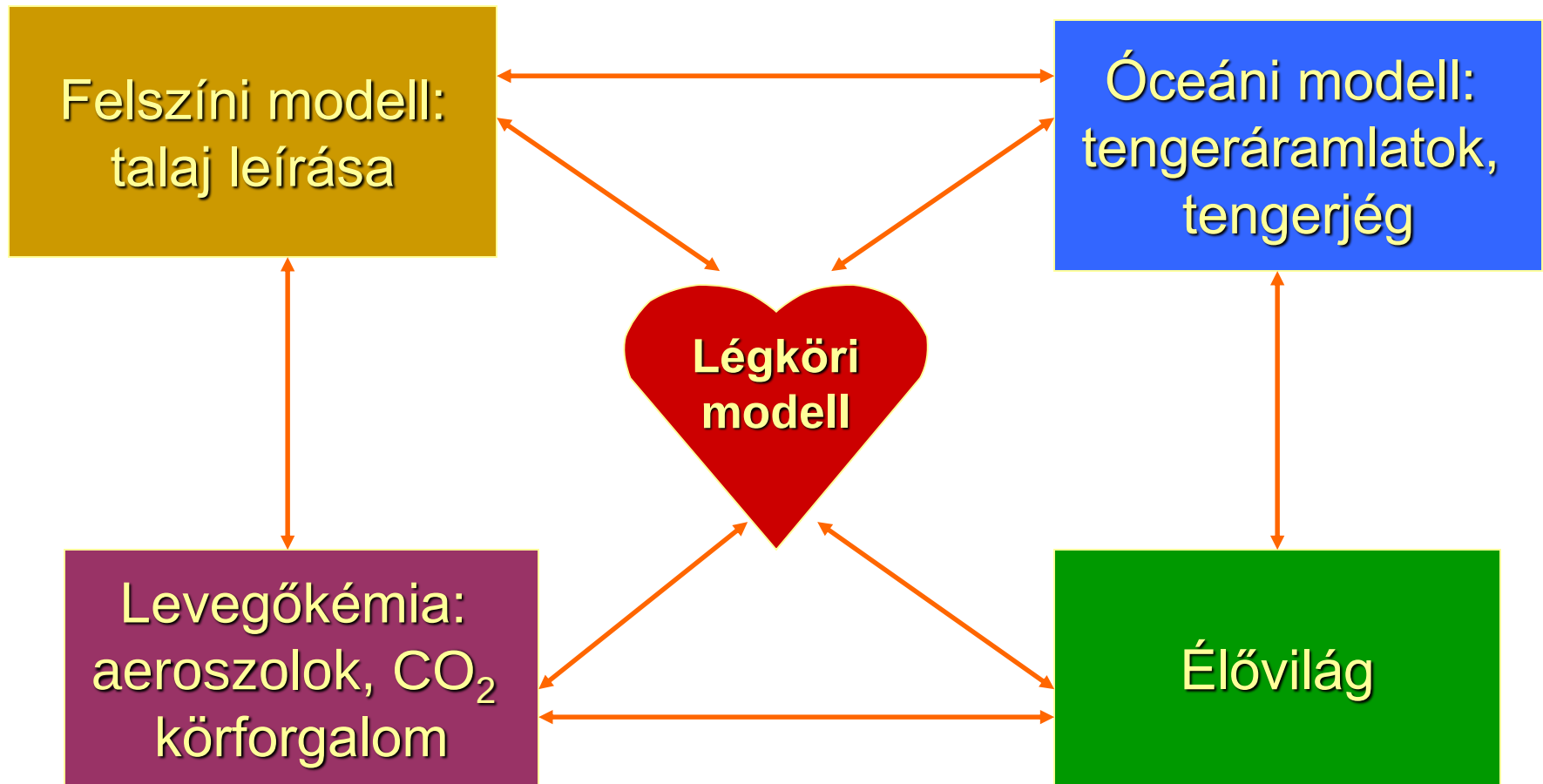
Éghajlati modellezés

- 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

Sajátosságok

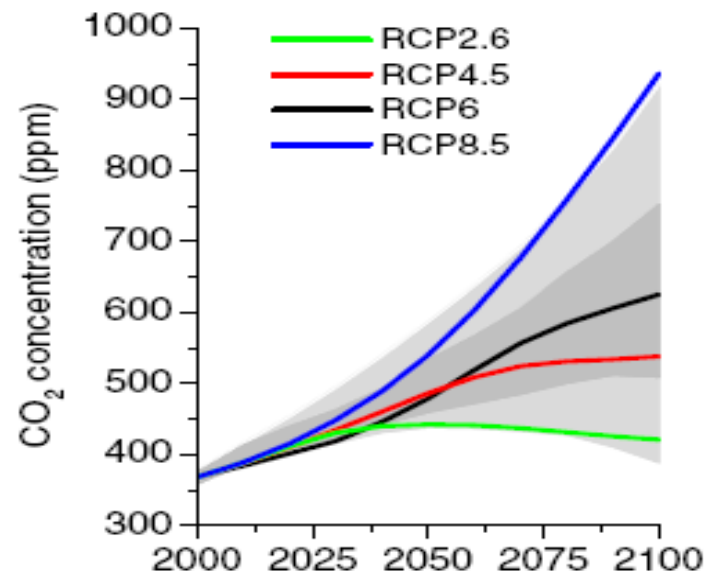
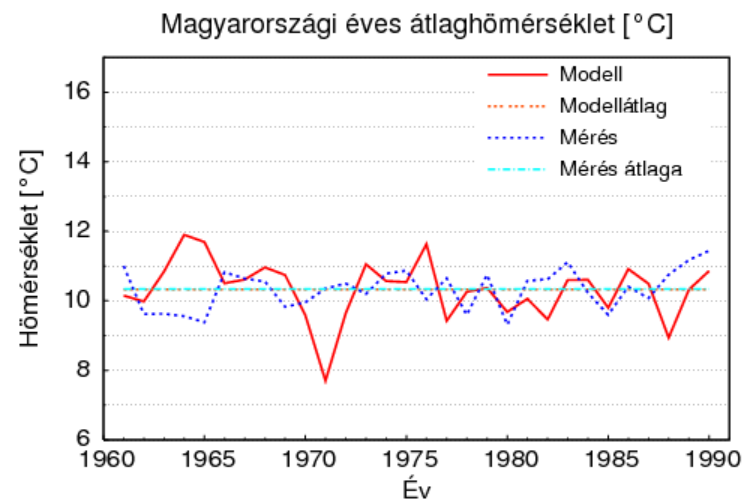
- Nem csupán a légkör, hanem a teljes éghajlati rendszer folyamatainak leírása
- A kezdeti feltételek hamar elveszítik hatásukat és a külső kényszerek kormányozzák a rendszert
- Nem pillanatnyi, hanem állandósult viselkedés leírása a cél
- Az éghajlati modellek nem a HTER egyszerű kiterjesztései a hosszabb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

A globális éghajlati modellek összetevői



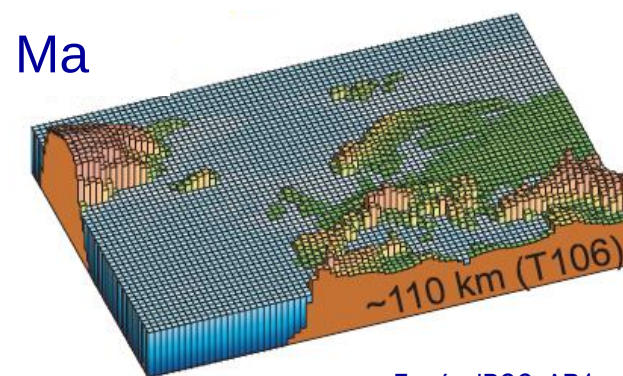
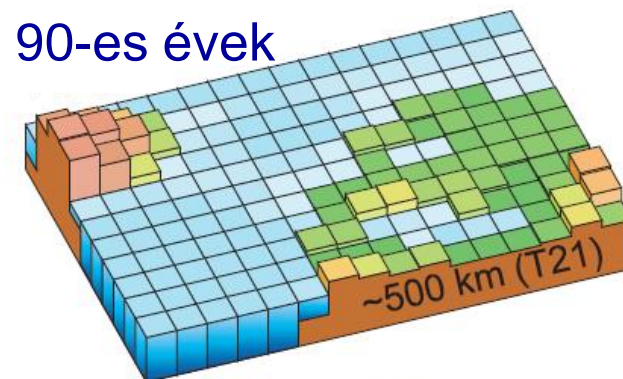
Az éghajlati modellek alkalmazása

- **Tesztelés** a múltra – eredmények összehasonlítása megfigyelésekkel
- Elvárt **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

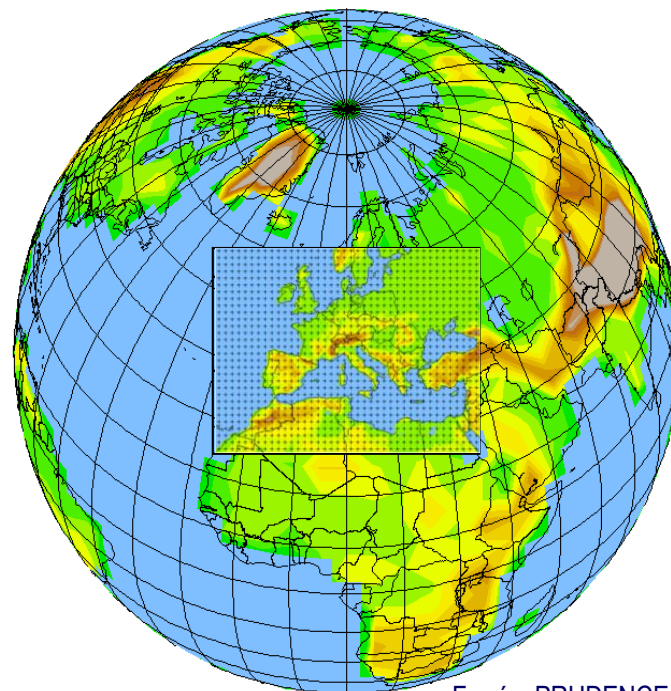
- Globális modellek: 250-100 km-es vízszintes és 1 km-es függőleges rácssűrűség – Magyarország fölé ebből néhány (2-10) pont esik
- A regionális éghajlatváltozás iránya ellentétes lehet a globális tendenciákkal
- A globális információ finomítása szükséges
 - Statisztikai leskálázás
 - Regionális éghajlati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



Forrás: IPCC, AR4

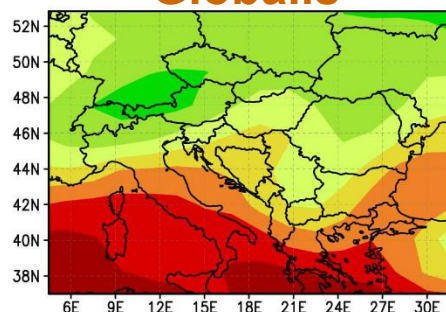
Regionális éghajlati modellek

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

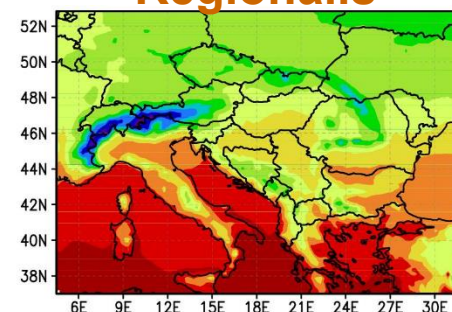


Forrás: PRUDENCE

Globális



Regionális



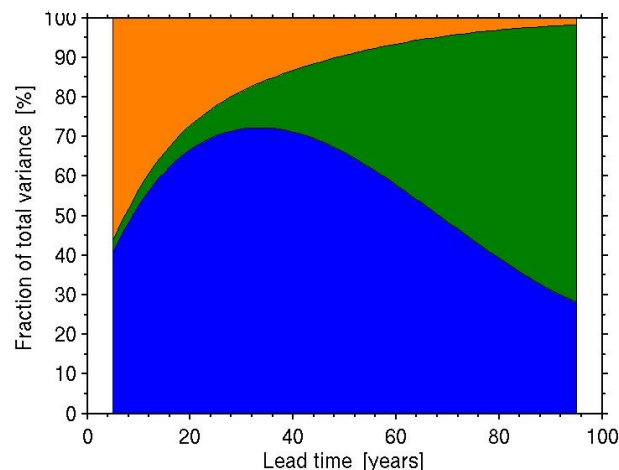
Átlaghőmérséklet (°C)



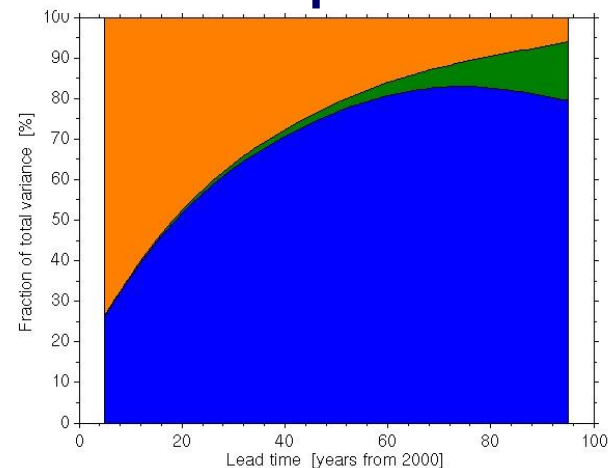
Bizonytalanságok és számszerűsítésük

- 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

Hőmérséklet



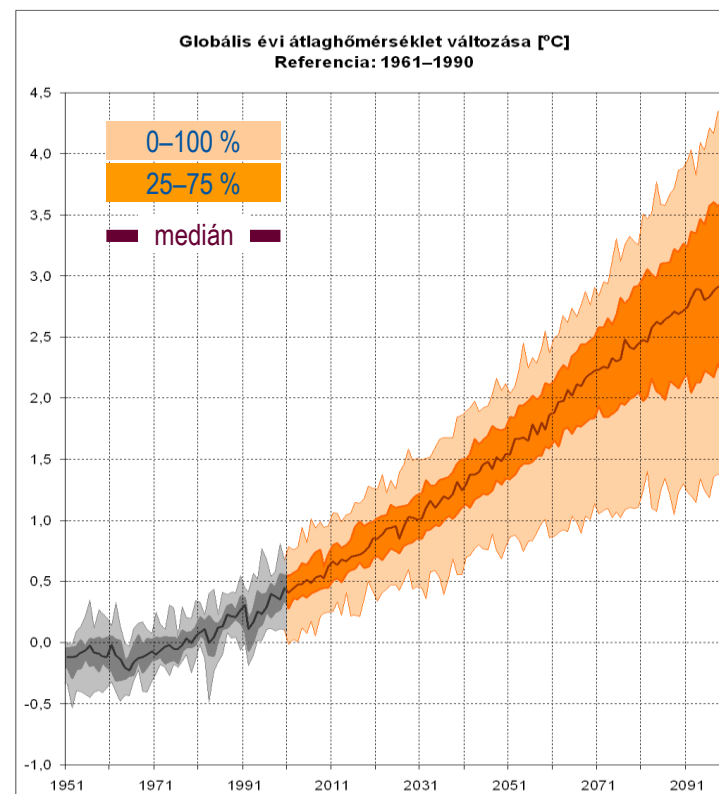
Csapadék



Modellfuttatások a HungaroMetben

Modell	Határfeltétel	Felbontás	Forgatókönyv
ALADIN-Climate	CNRM-CM5, ERA-Interim	10 km	RCP8.5, RCP4.5
REMO	MPI-ESM, ERA-Interim	10 km	

- Kiértékelés: együttesen
- Több-évtizedes időszakok vizsgálata (pl. 2071–2100)
- 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