

# Bevezetés az időjárás és az éghajlat numerikus (számszerű) előrejelzésébe

Szépszó Gabriella  
[szepszo.g@met.hu](mailto:szepszo.g@met.hu)

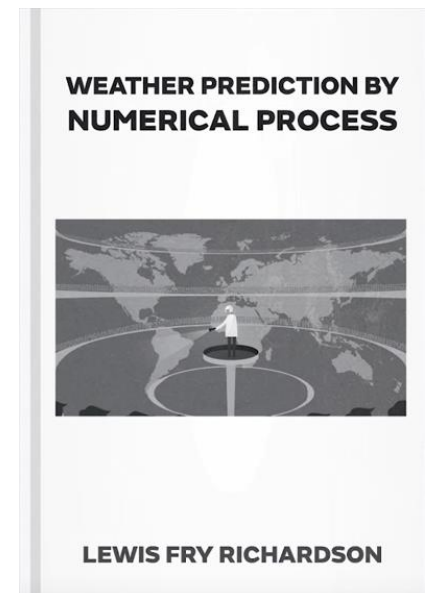
Letölthető előadások: <http://nimbus.elte.hu/~numelo>

# Az előadás vázlatja

- 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)

# Légeköri egyenletek

Mozgásegyszerűek

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

Kontinuitási egyenlet

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

Termodinamikai egyenlet

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

Nedvesség kontinuitási egyenlete

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

Állapotegyszerűek

$$p = \rho RT$$

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

7 egyenlet – 7 változó: (u,v,w), T, p, ρ, ρ<sub>v</sub>

Vegyes feladat: kezdeti- és peremfeltétel probléma

# A folytonos egyenletek közelítései

- Gömbi közelítés

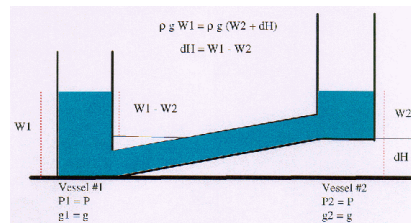


- A légkör vastagságának elhanyagolása



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  
előállítás (objektív analízis)

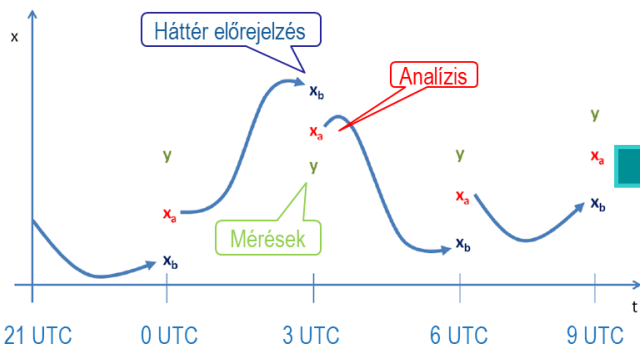
## MODELL-INTEGRÁLÁS

**A hidro-termodinamikai  
egyenletrendszer  
közelítő megoldása**

## UTÓFELDOLGOZÁS

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

### Az adatasszimilációs ciklus



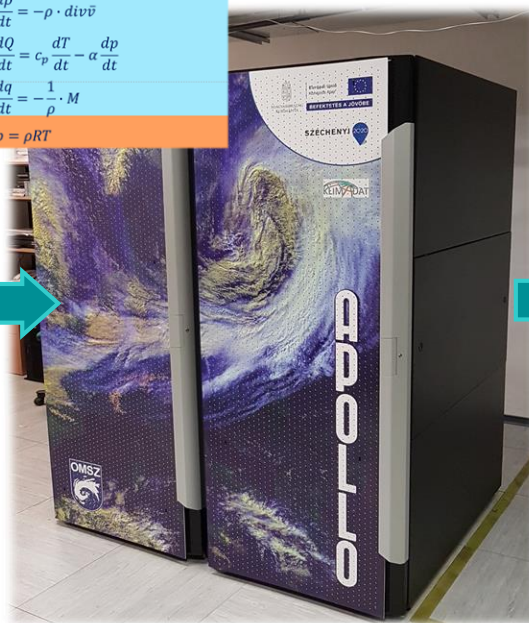
$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{g} - 2\bar{\Omega} \times \bar{v} + \bar{F} + \bar{S}$$

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

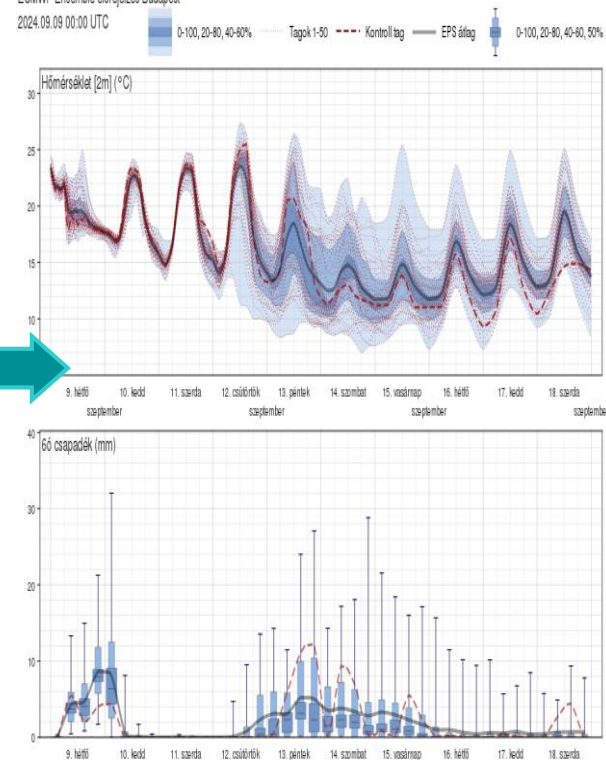
$$\frac{dQ}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt}$$

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

$$p = \rho RT$$

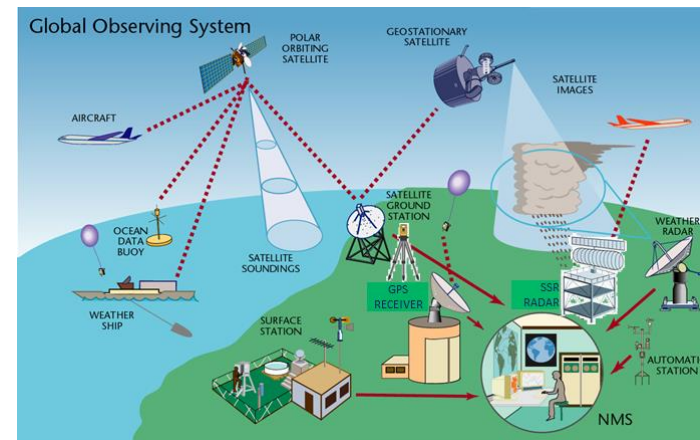


ECMWF Ensemble előrejelzés Budapest  
2024.09.09 00:00 UTC



# Kezdeti feltételek meghatározása

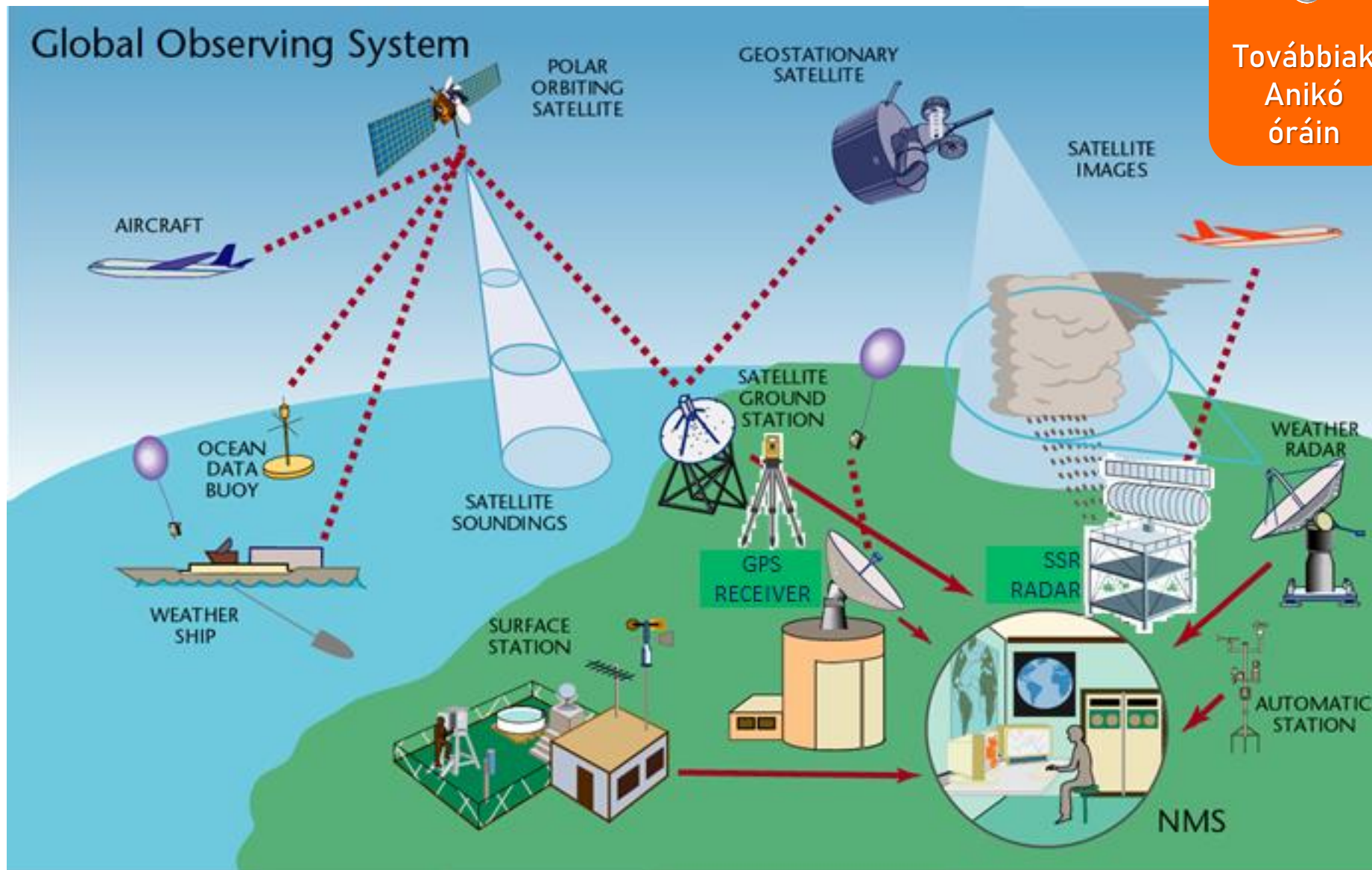
- Előrejelzés érzékenysége a kezdeti feltételre
- Cél: a numerikus modellek számára minél pontosabb kezdeti feltétel (analízis) meghatározása (pontosság és konzisztencia)
- Rendelkezésre álló információk:
  - Megfigyelések
  - A modell korábbi futtatásainak eredményei
  - Egyéb dinamikai és fizikai törvényszerűségek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





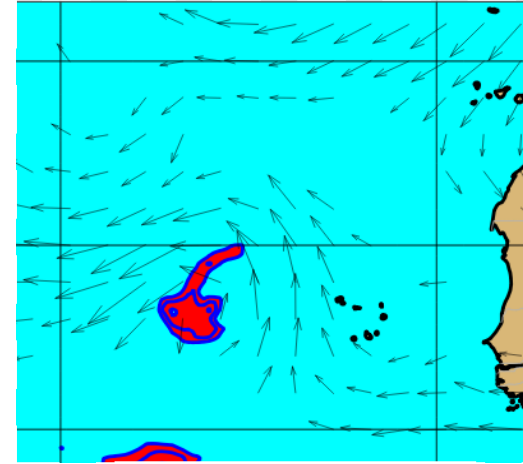
# Kezdeti feltételek meghatározása

Továbbiak  
Anikó  
órán



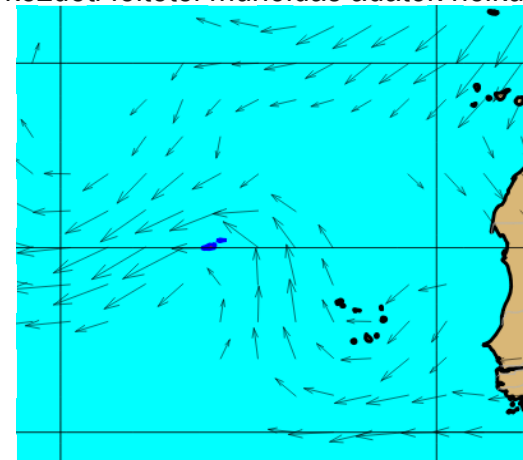
# Az adatasszimiláció jelentősége

700 hPa relatív nedvesség & szél  
kezdeti feltétel műholdas adatokkal



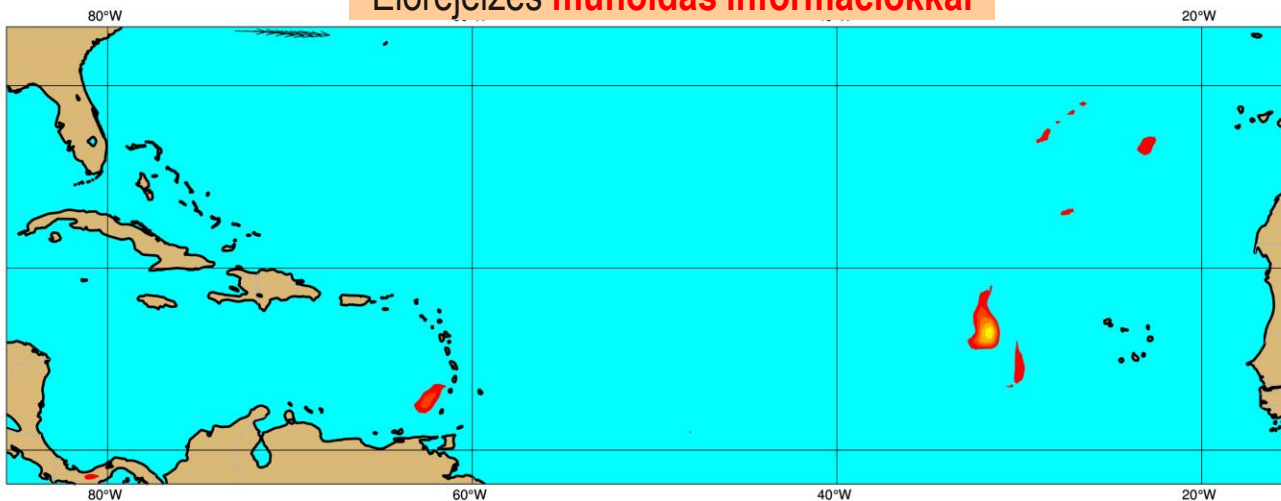
**Nedvesség > 95%**

700 hPa relatív nedvesség & szél  
kezdeti feltétel műholdas adatok nélkül



# Az adatasszimiláció jelentősége

## Előrejelzés **műholdas információkkal**

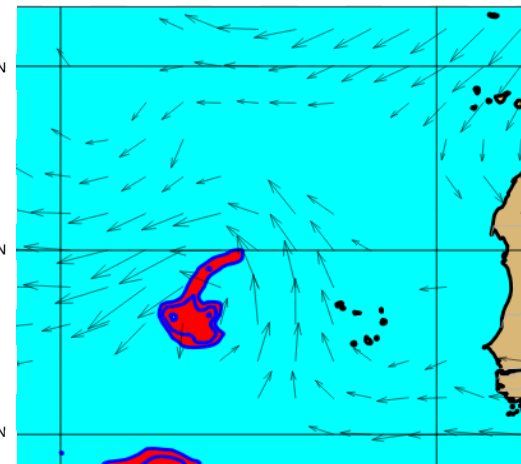


Thursday 31 August 2017 00 UTC ecmf 500 hPa Vorticity (relative)  
Thursday 31 August 2017 00 UTC ecmf 500 hPa U component of wind/V component of wind

## Előrejelzés **műholdas információk nélkül**

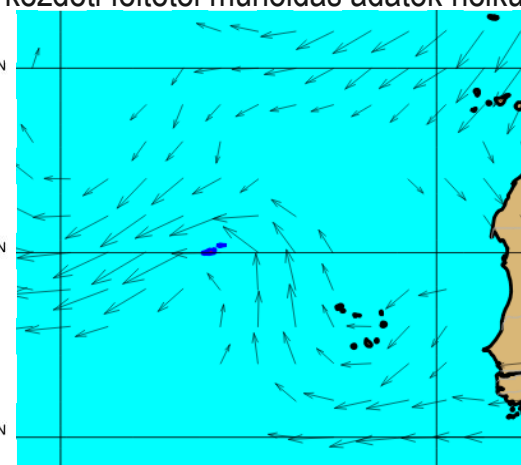


700 hPa relatív nedvesség & szél  
kezdeti feltétel műholdas adatokkal



**Nedvesség > 95%**

700 hPa relatív nedvesség & szél  
kezdeti feltétel műholdas adatok nélkül

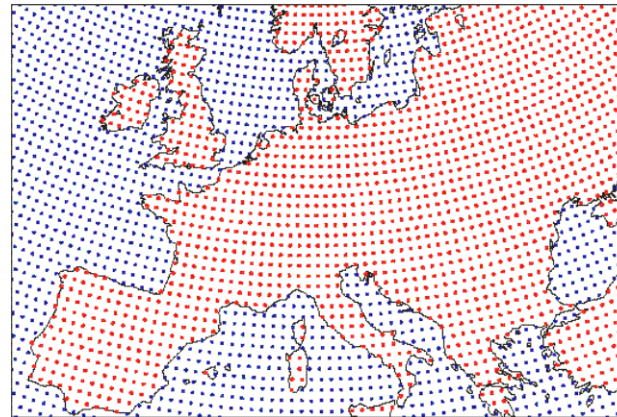
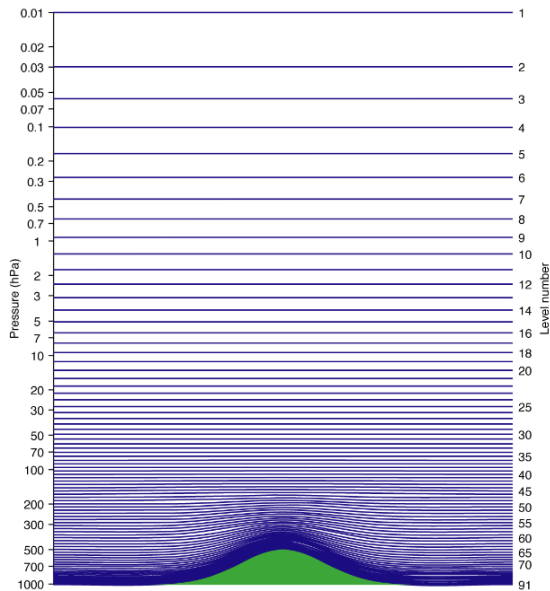
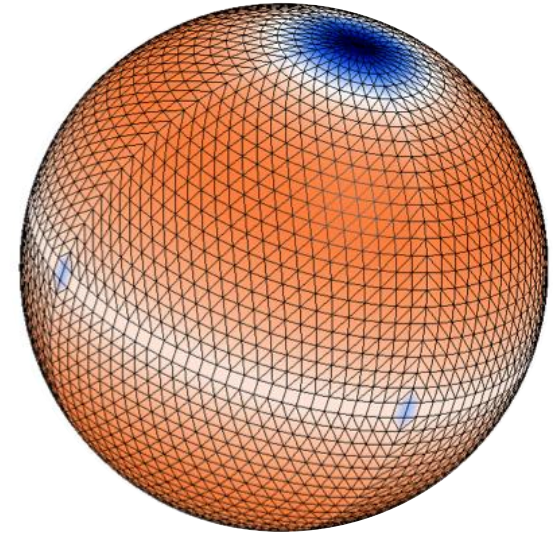
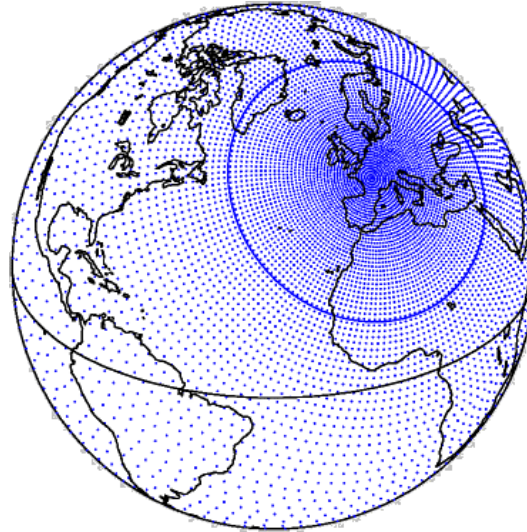
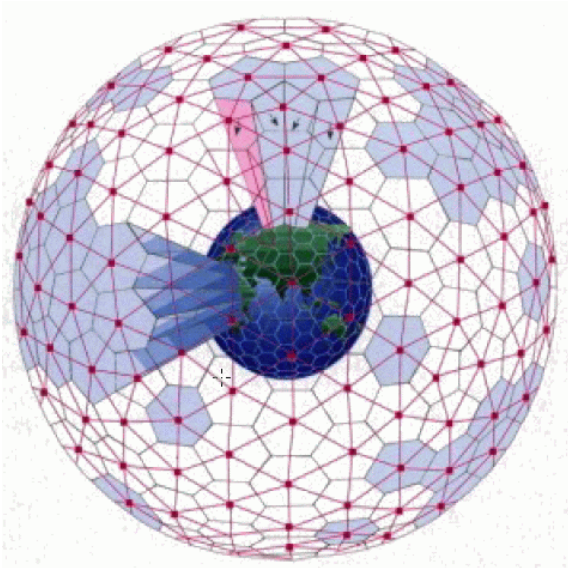


# Numerikus közelítések

- 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 – 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.

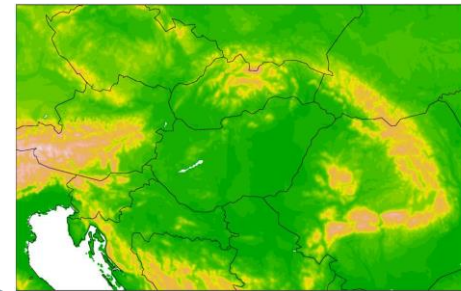
Továbbiak  
Gabi  
óráin



# 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) modellel: relaxációs technika

Regionális modell (LAM)



# Rövidtávú előrejelzések



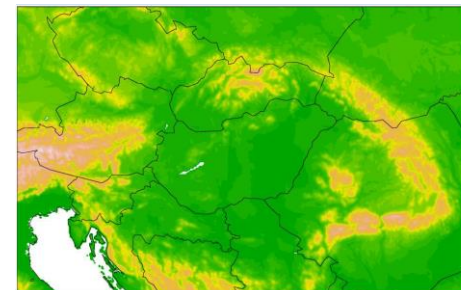
# Korlátos tartományú modellek

- 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

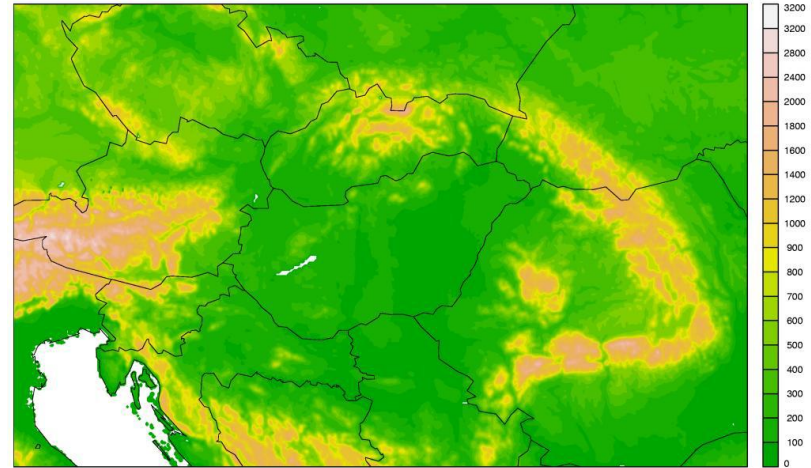
- ALADIN, ALARO, AROME modellek közös fejlesztése 1991-től az ACCORD (ALADIN) és LACE konzorciumokban, kutatási együttműködések, adatcsere
- Regionális előrejelzések a Kárpát-medencét lefedő területen 2 napra
- A tartományon kívül zajló folyamatok figyelembevétele az Európai Középtávú Előrejelző Központ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

Regionális modell



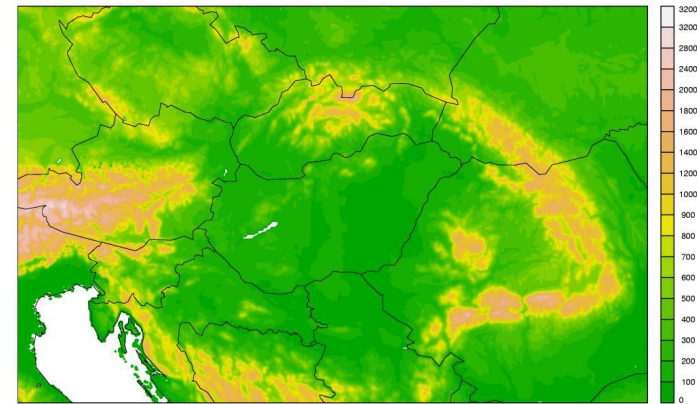
# Példa a rövidtávú előrejelzésben operatíván alkalmazott modellekre: AROME

- 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



# Számításigény

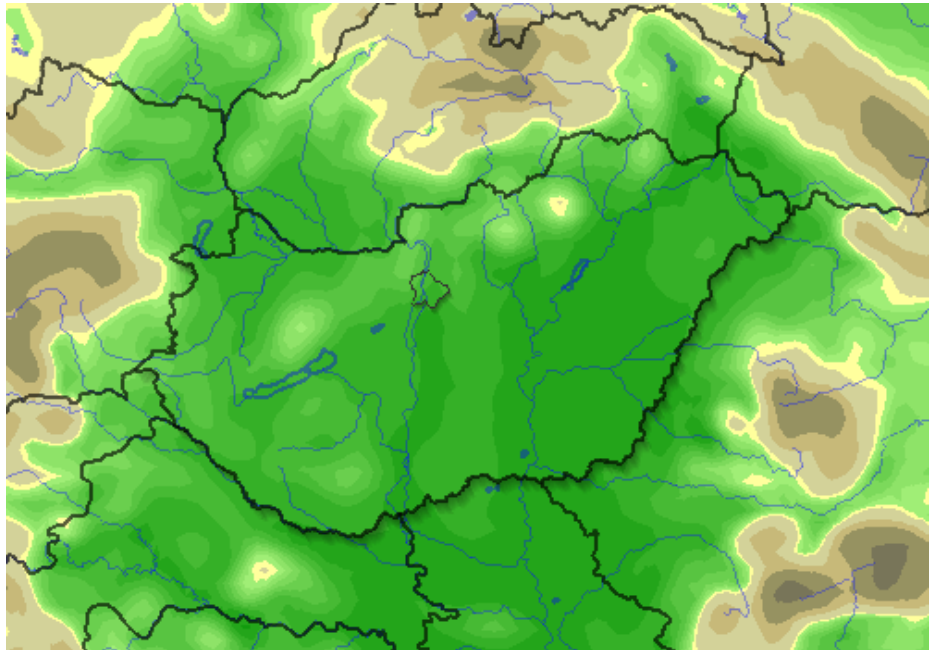
- Korlátos tartományú modell
  - Kárpát-medencét lefedő tartomány
  - 2,5 km-es felbontás (500x320 pont)
  - 60 függőleges szint
  - 6 prognosztikai változó (hőmérséklet, nedvesség, 3 szélkomponens, légnyomás)
  - 1-perces időlépcső
  - 48 órás előrejelzés (2 880 lépés)



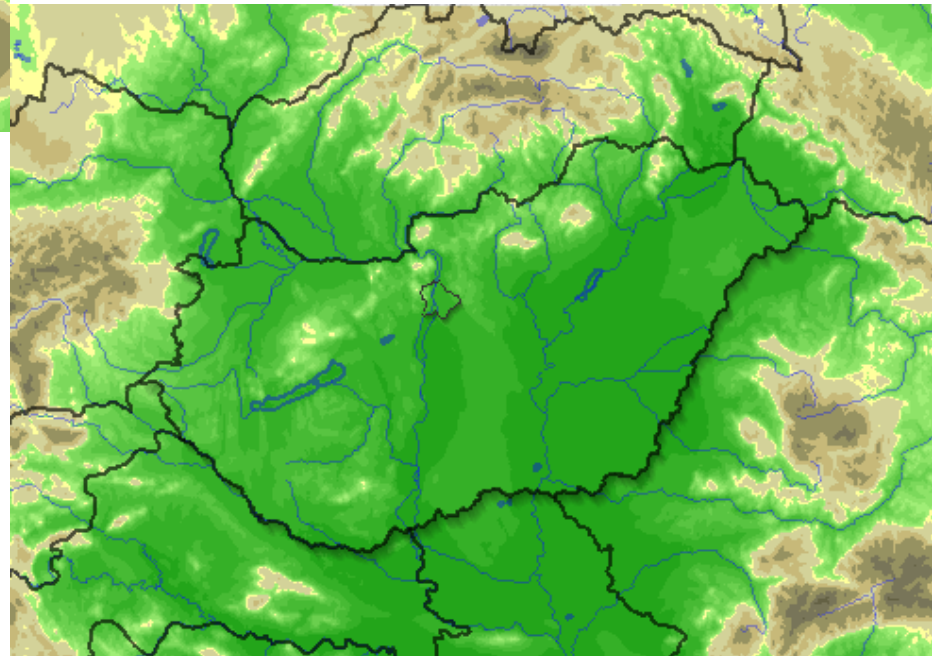
**Összesen  $\sim 10^{11}$  adat előrejelzésenként**



# Domborzat a felbontás függvényében

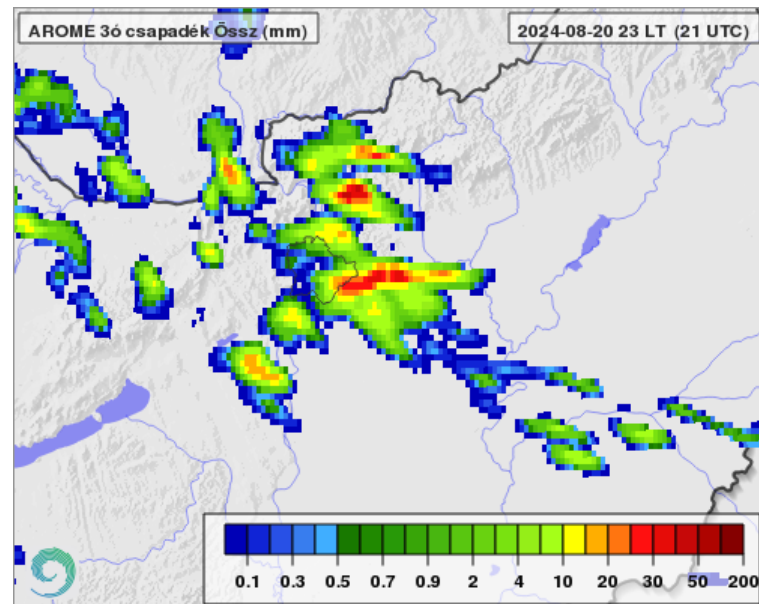
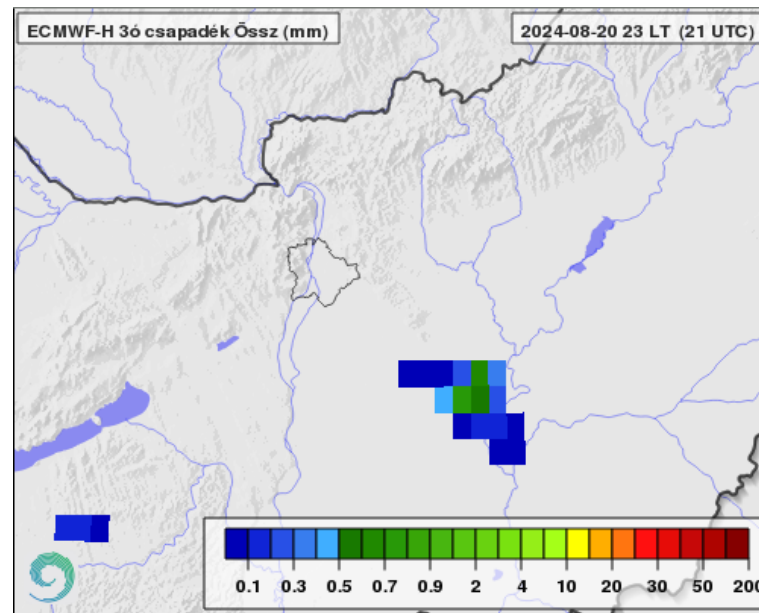
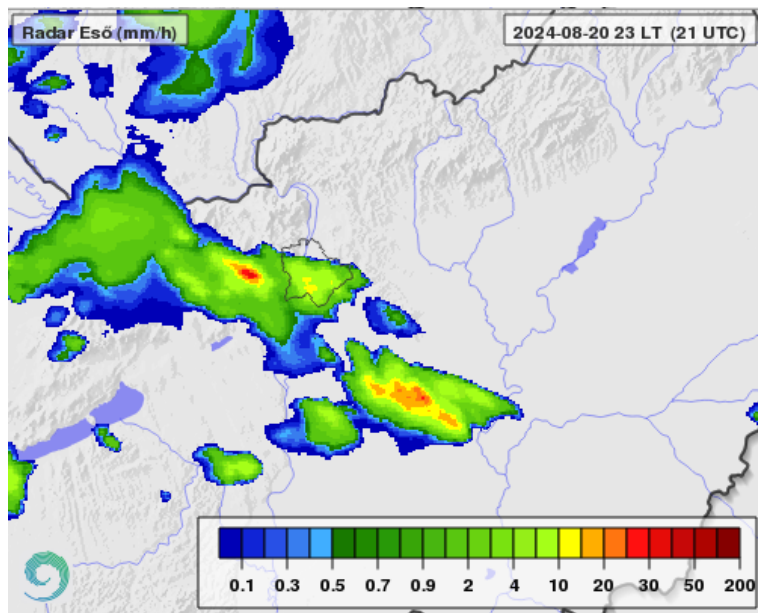


ECMWF: 9 km



AROME: 2,5 km

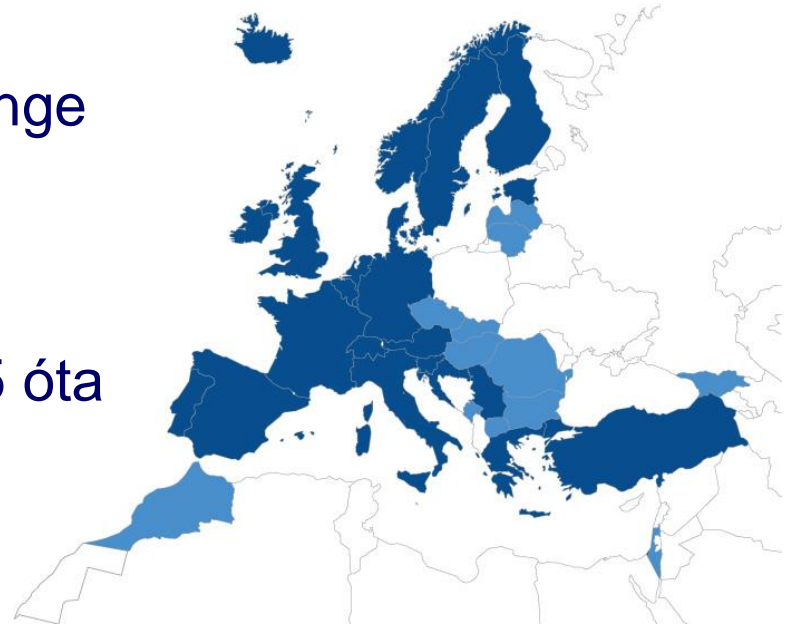
# 2024. augusztus 20.



# **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

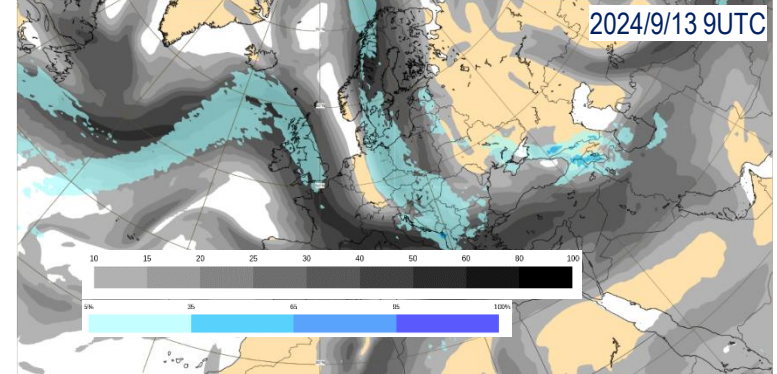




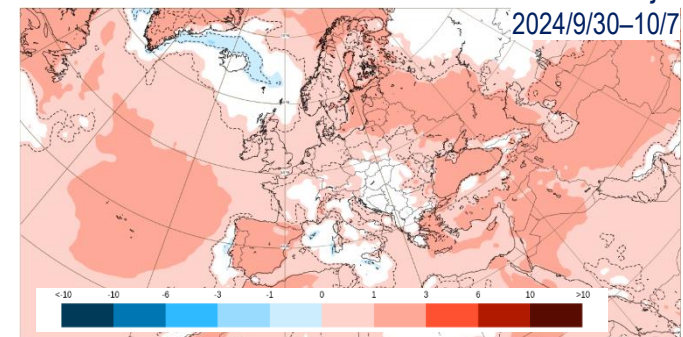
# ECMWF „előrejelzések”

- 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)

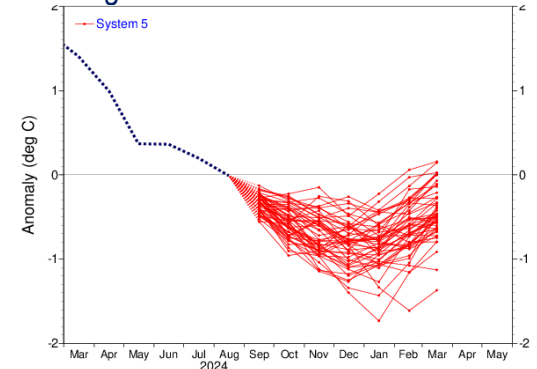
Szélesség 250 hPa-on & turbulencia (CAT) valószínűség



2 m-es hőmérséklet heti anomáliája

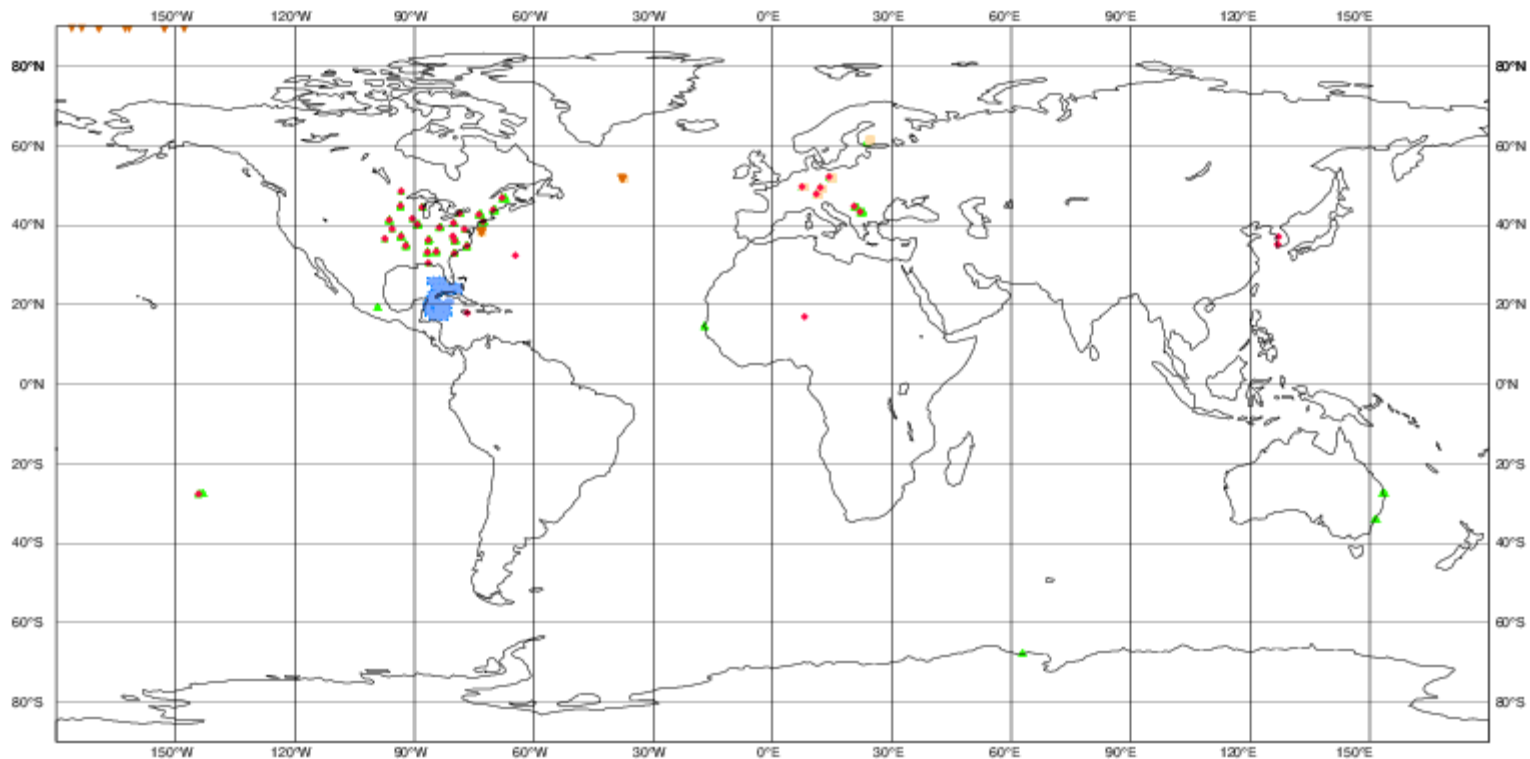


Tengerfelszín-hőmérséklet anomália



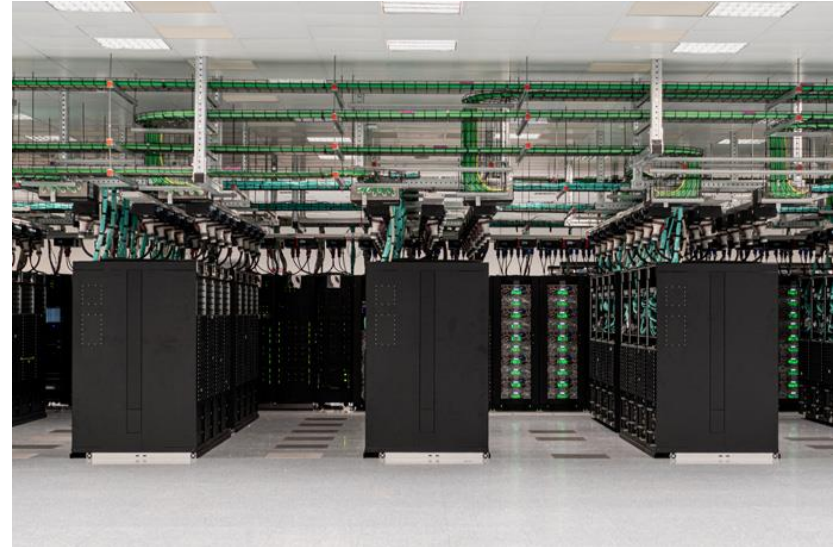
# Felhasznált megfigyelések monitorozása

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

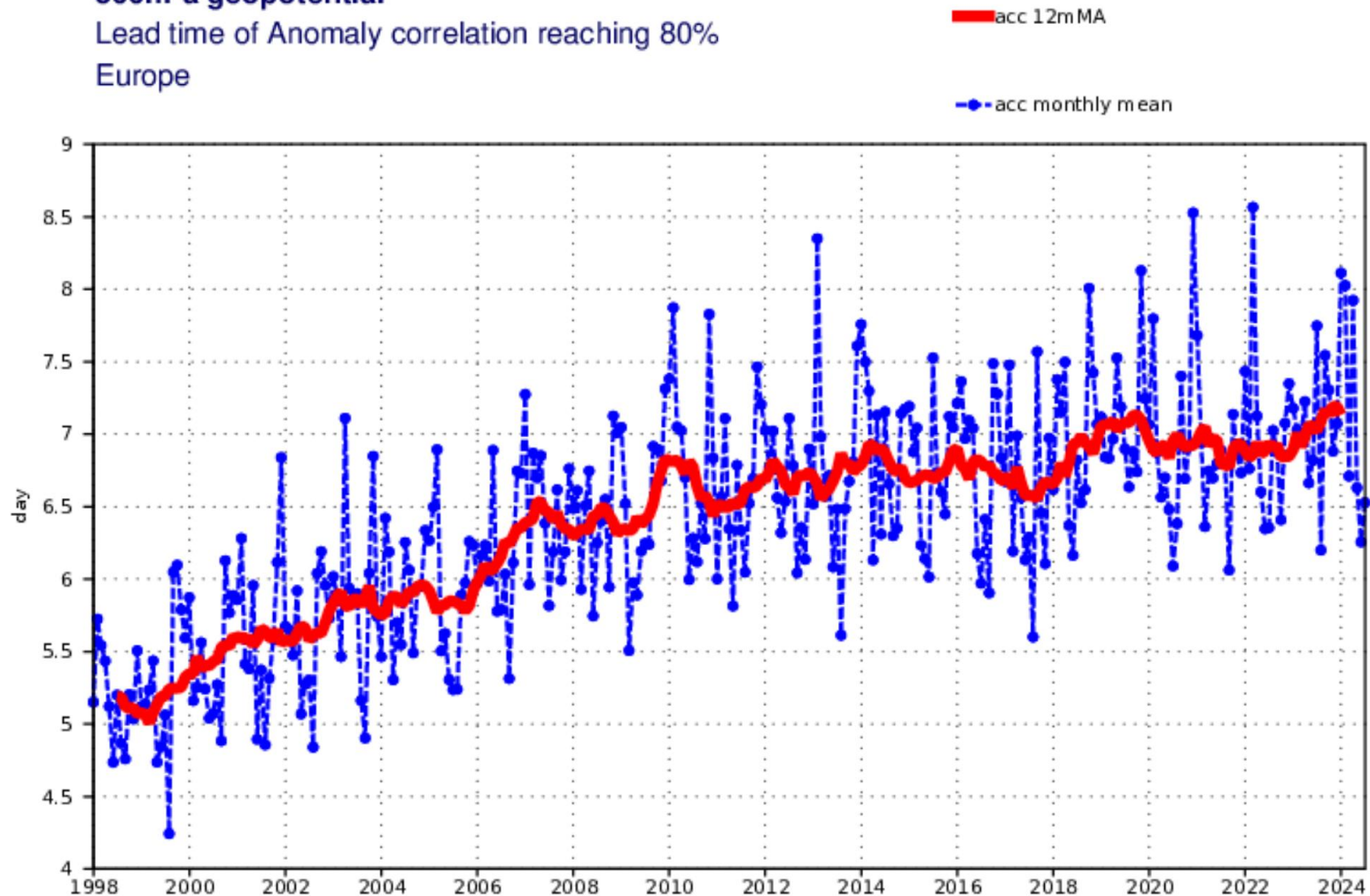


# Az előrejelzések beválásának javulása

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

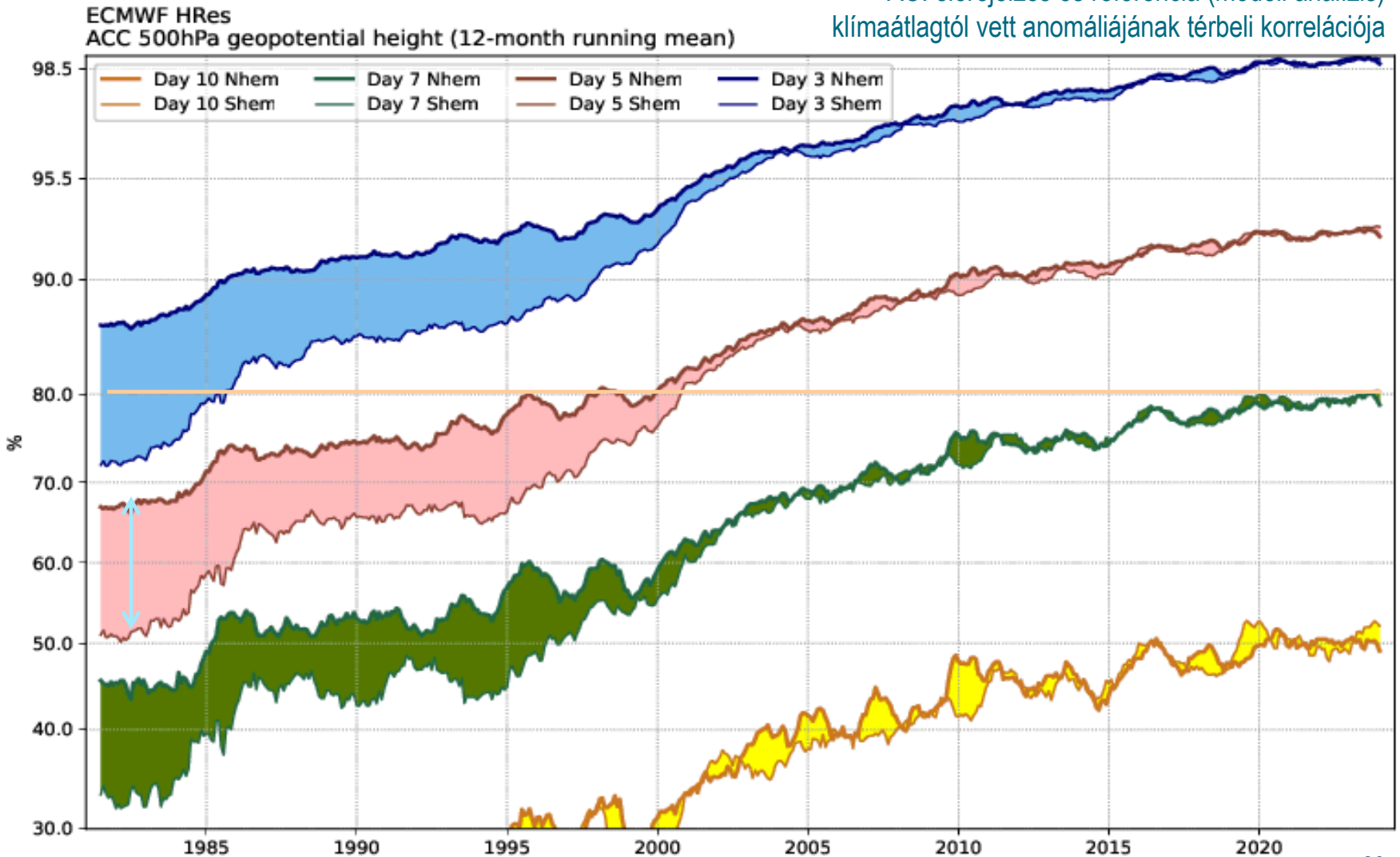
## 500hPa geopotential

Lead time of Anomaly correlation reaching 80%  
Europe



# Az előrejelzések beválásának javulása

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





# Az előrejelzések beválásának javulása

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

Continuous ranked probability skill score | total precipitation  
Extratropics

— 12mMA of CRPSS reaches 0.1



Továbbiak  
Bogi  
óráin

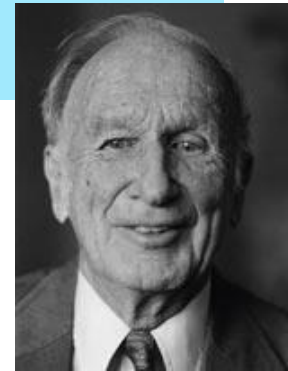
# Valószínűségi előrejelzések

## Két videó

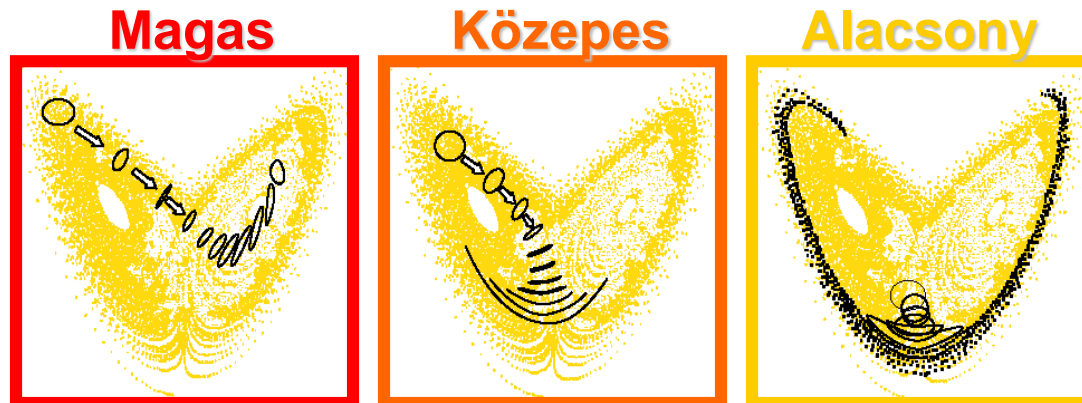
- „Okozhat-e egy brazíliai pillangó szárnycsapása tornádót Texasban?”  
<https://vimeo.com/287523707>
- Az ensemble előrejelzések 25 éve:  
<https://www.youtube.com/watch?v=NlhRUun2iso>



# Probléma-felvetés

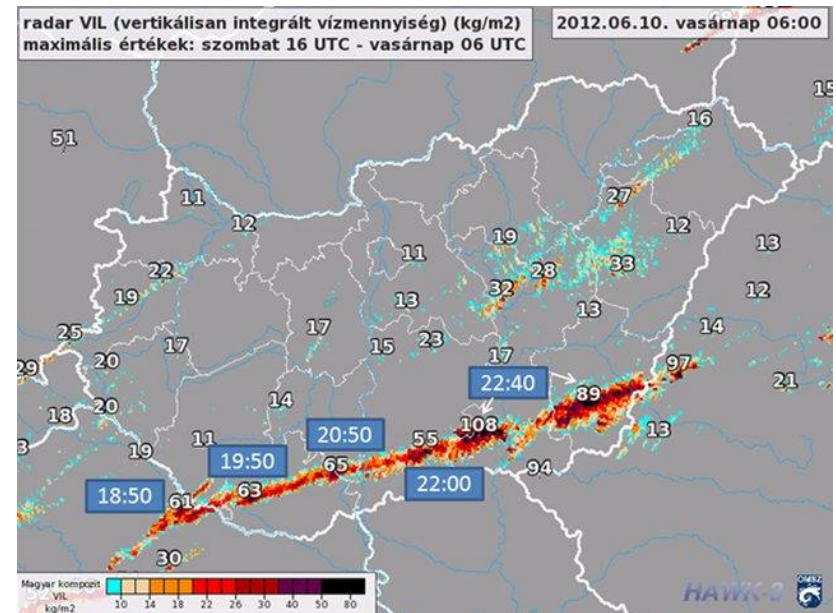


- Edward Lorenz (1972): „Okozhat-e egy brazíliai pillangó szárnycsapása tornádót Texasban?”
- A légkör bonyolult turbulens rendszer, nagyfokú érzékenységet mutat a kiindulási állapotára (akárcsak a **kaotikus** rendszerek)
- Lorenz egy egyszerűsített modellel igazolta, hogy egy meteorológiai folyamat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





- 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

### Korlátos tartományú EPS-ek

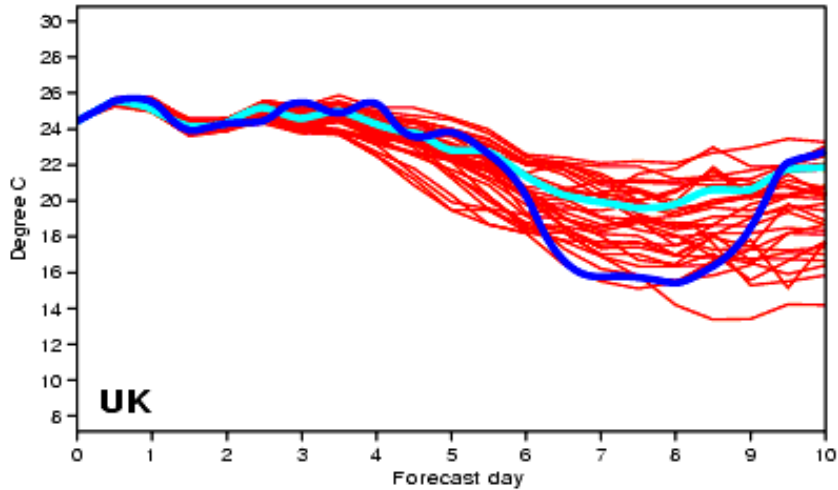
- Kisebb elemszámú rendszerek (HungaroMet: 10+1 tag)
- (1-)2-5 km-es felbontás
- A kezdeti **és** határfeltételekből **és** a modellhibákból származó bizonytalanság leírása – gyorsabb hibanövekedés
- Rövidtávú előrejelzések

# Előrejelezhetőség

## ECMWF ensemble forecast - Air temperature

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

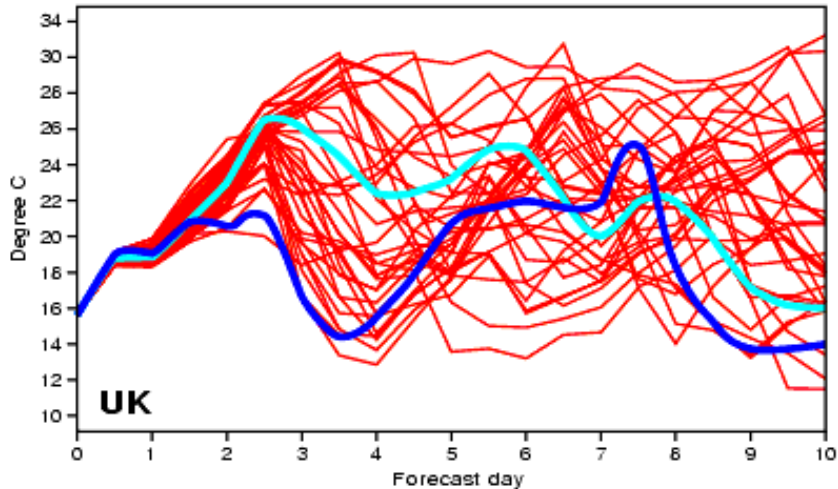
Control Analysis Ensemble



## ECMWF ensemble forecast - Air temperature

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

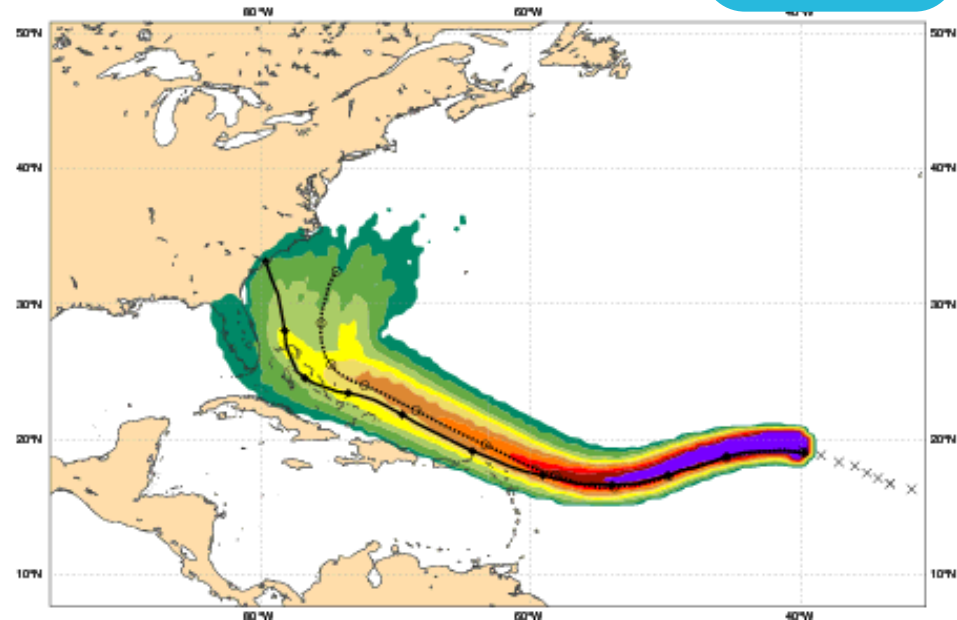
Control Analysis Ensemble



Date 20170902 00 UTC @ECMWF

Probability that IRMA will pass within 120 km radius during the tracks: solid=HRES; dot=Ens Mean [reported minimum centre]

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

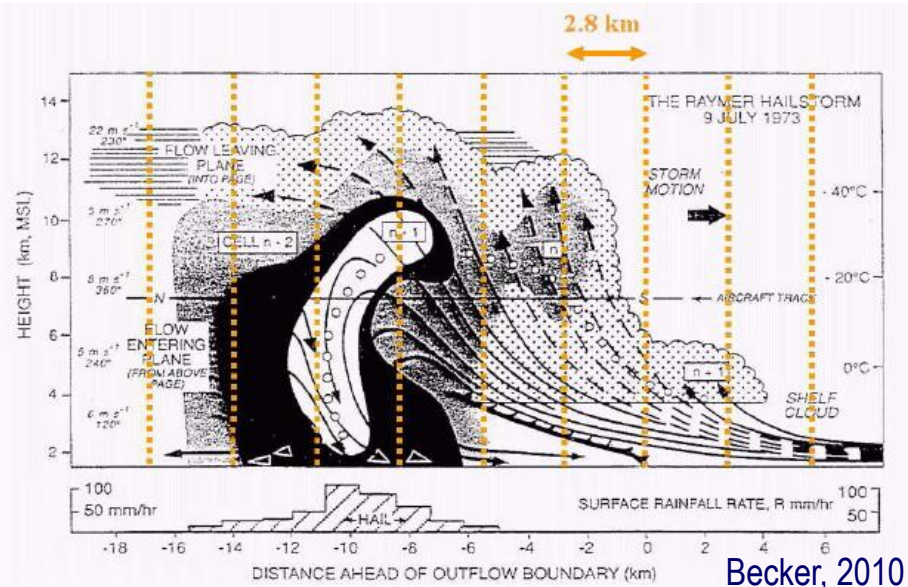


Továbbiak  
Kati  
órán

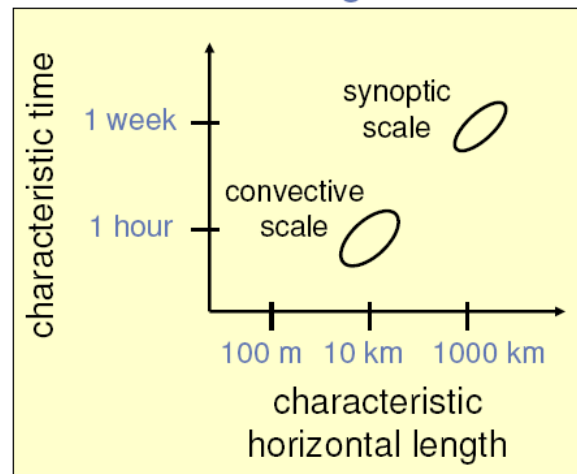


# Konvektív skála

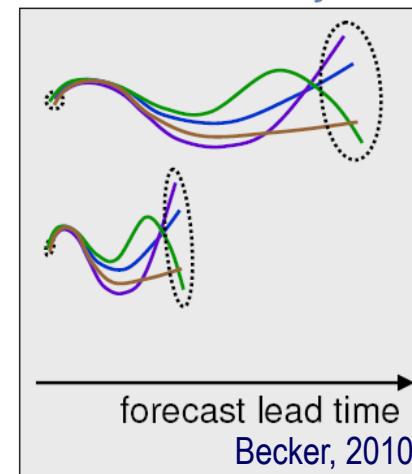
- Intenzívebb hiba-növekedés
- Korlátozott előrejelezhetőség
- „Csak” a modellfejlesztés és a felbontás növelése nem feltétlenül növeli az előrejelzés pontosságát
- Különösen indokolt a bizonytalanságok számszerűsítése
- Igényli a felhasználók (előrejelzők) felkészítését



Scale Diagram

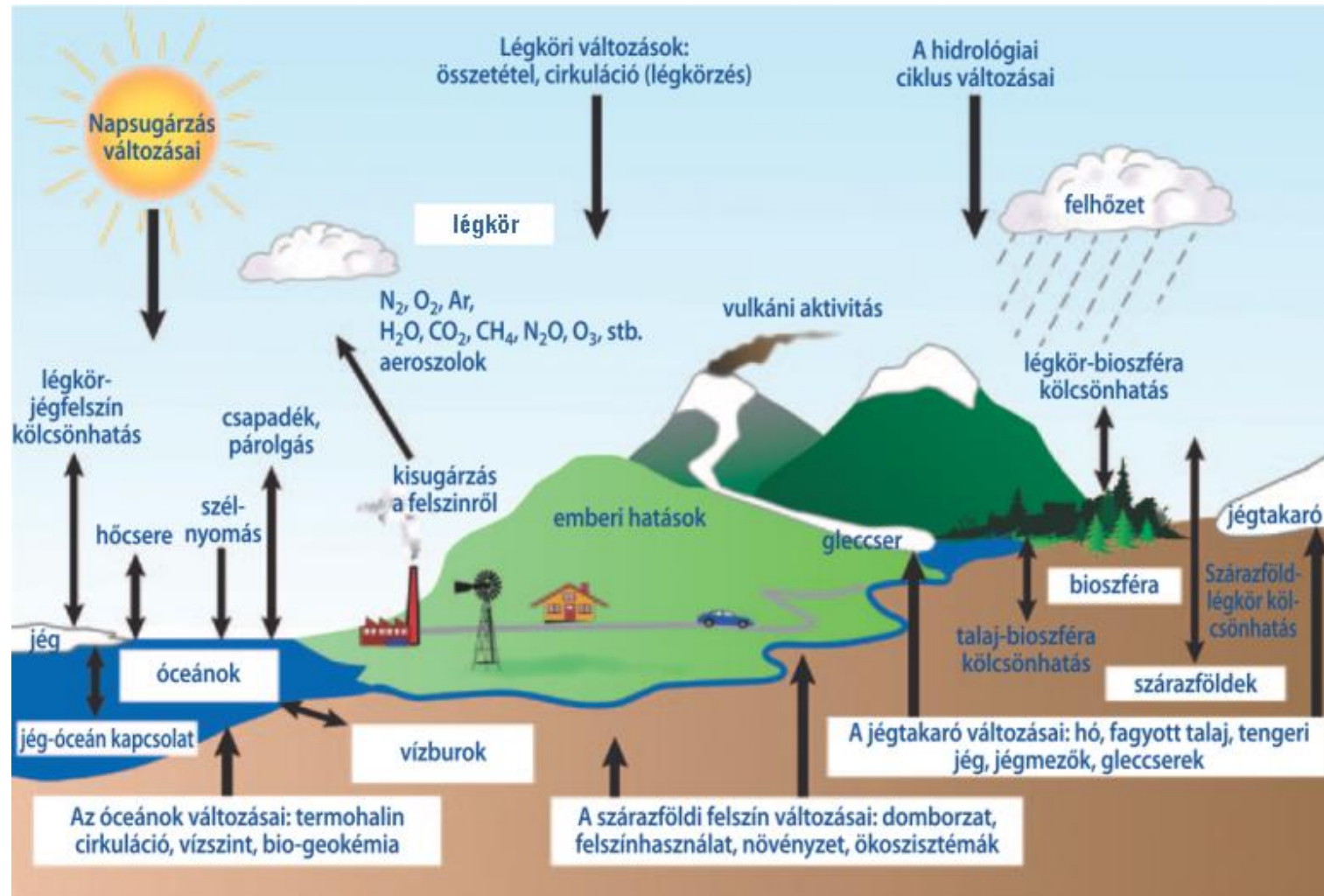


Predictability



# Az éghajlat modellezése

# Az éghajlati rendszer elemei



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



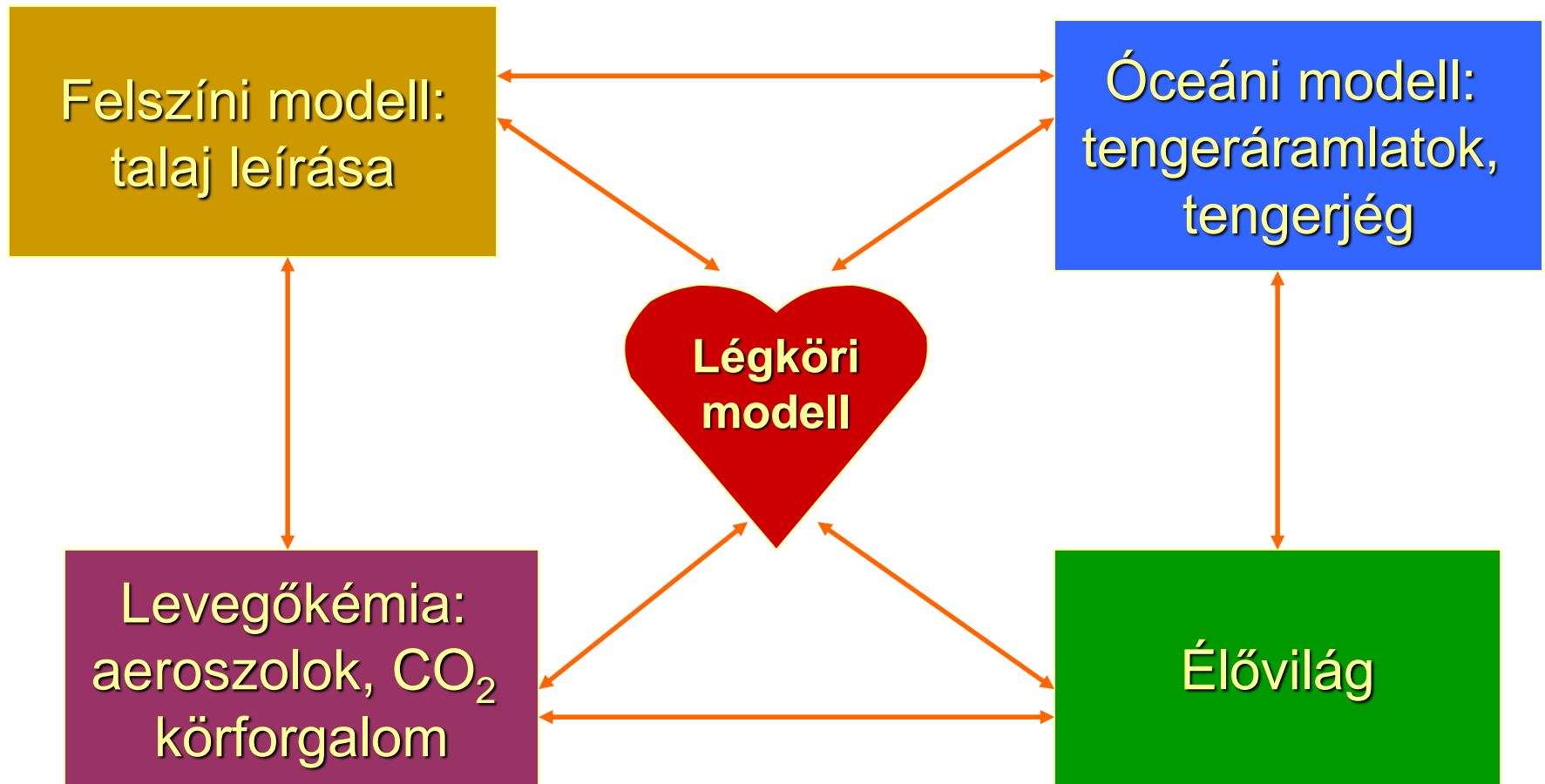
# Éghajlati modellezés

- 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

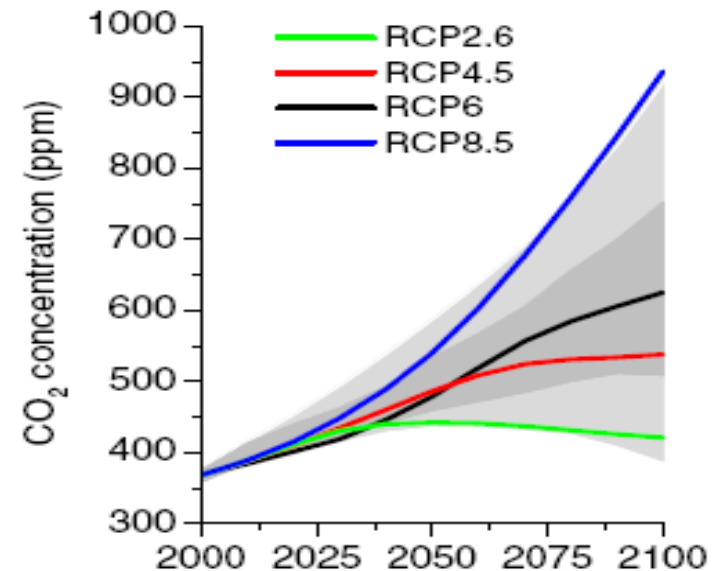
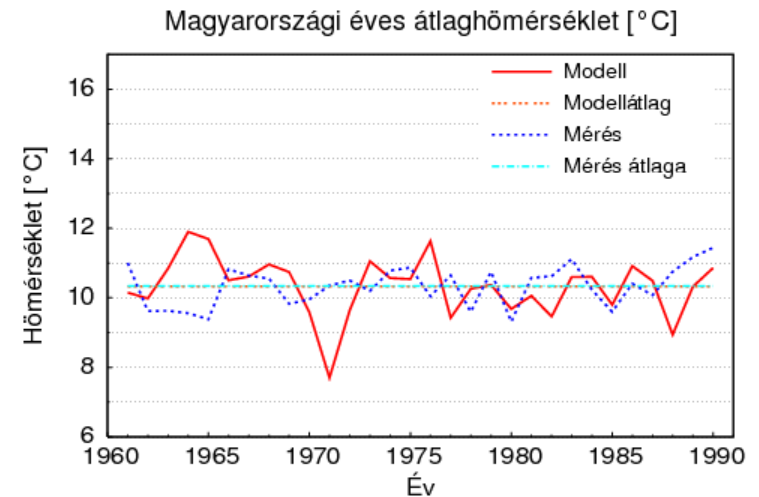
- Nem csupán a légkör, hanem a teljes éghajlati rendszer folyamatainak leírása
- A kezdeti feltételek hamar elveszítik hatásukat és a külső kényszerek kormányozzák a rendszert
- Nem pillanatnyi, hanem állandósult viselkedés leírása a cél
- Az éghajlati modellek nem a HTER egyszerű kiterjesztései a hosszabb 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



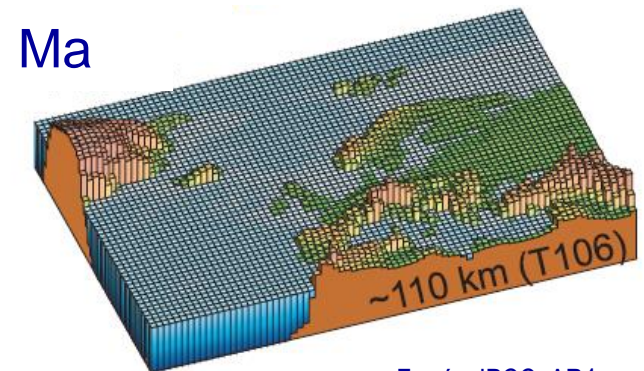
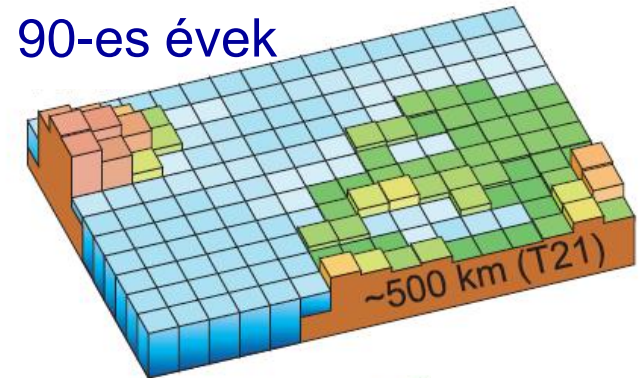
# Az éghajlati modellek alkalmazása

- **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

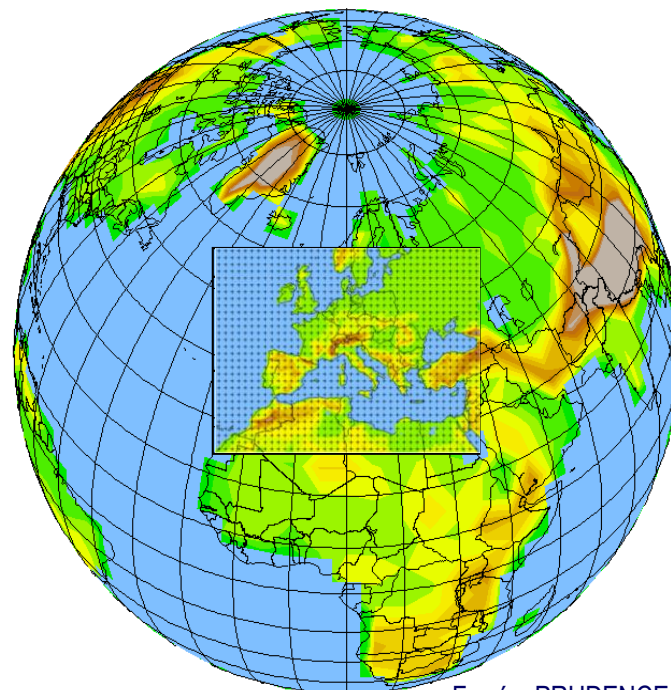
- Globális modellek: 250-100 km-es vízszintes és 1 km-es függőleges rácssűrűség – Magyarország fölé ebből néhány (2-10) pont esik
- A regionális éghajlatváltozás iránya ellentétes lehet a globális tendenciákkal
- A globális információ finomítása szükséges
  - Statisztikai leskálázás
  - Regionális éghajlati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



Forrás: IPCC, AR4

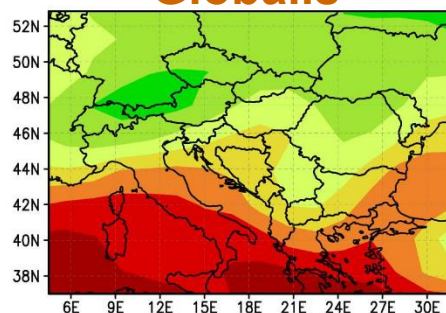
# Regionális éghajlati modellek

- 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

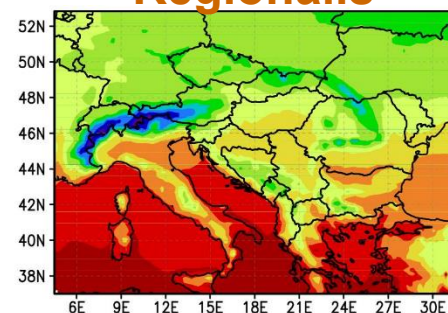


Forrás: PRUDENCE

**Globális**



**Regionális**



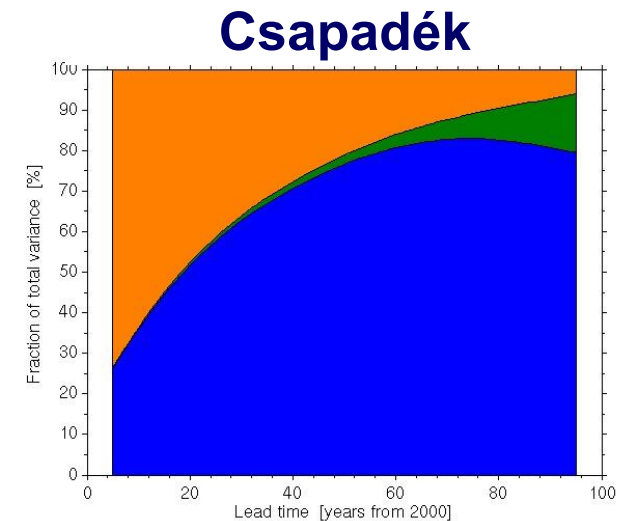
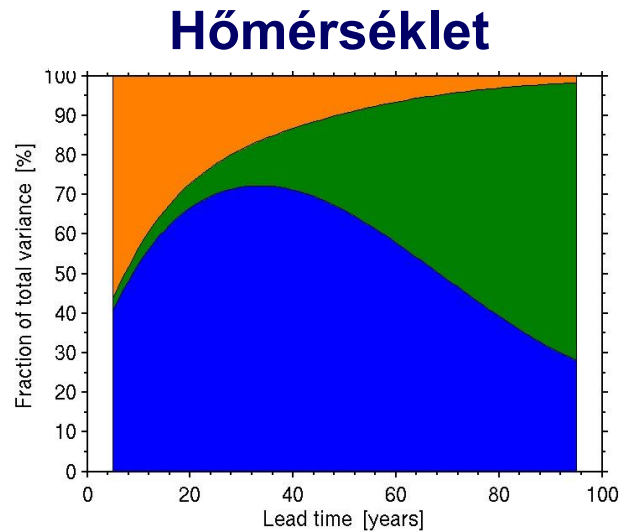
Átlaghőmérséklet (°C)





# Bizonytalanságok és számszerűsítésük

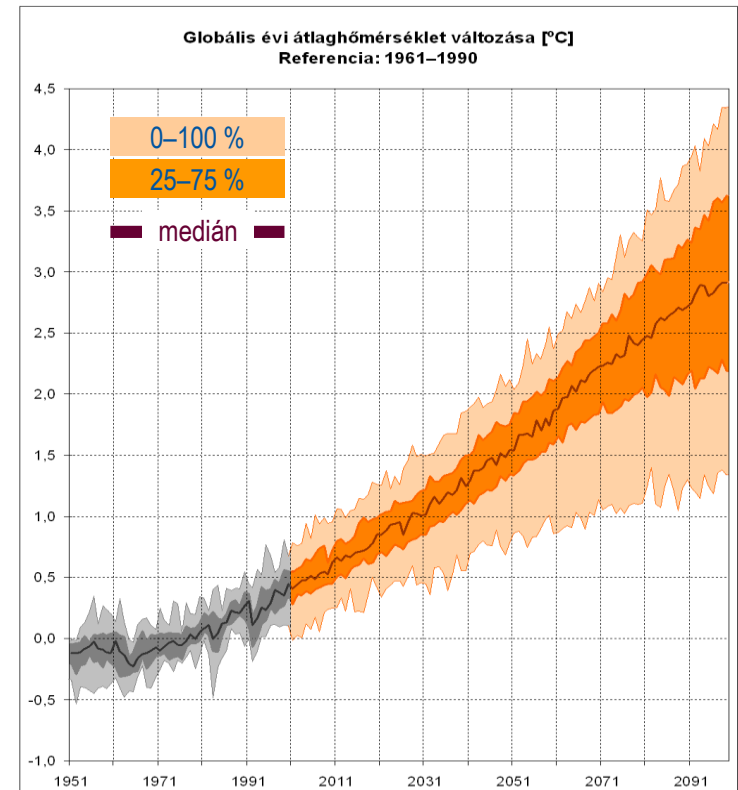
- Rövidtávon (legelterjedtebb): kezdeti feltételek hibái – multi-analízis technika
- Éghajlati skálán – multi-modell szimulációk:
  1. Természetes változékonyság
  2. Modellek eltéréseiből eredő bizonytalanság
  3. Emberi tevékenység bizonytalansága



# 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