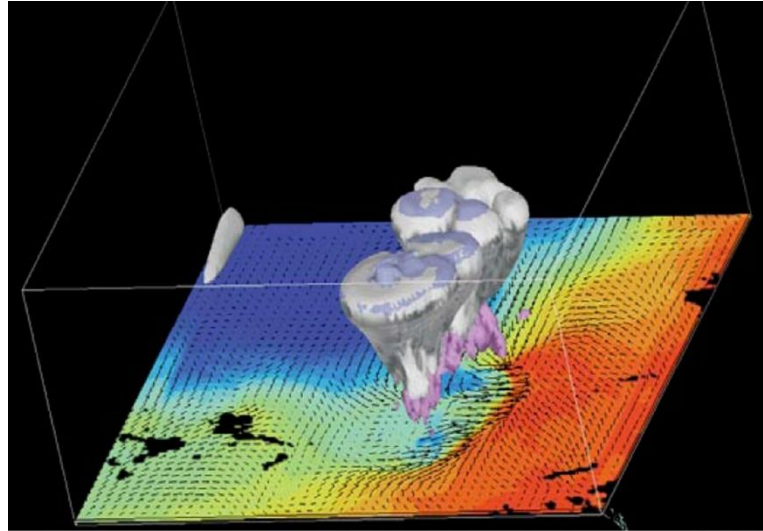


Nagyfelbontású dinamikai modellezés



**Szintai Balázs¹, Szűcs Mihály¹, Roger Randriamampianina²,
Kullmann László¹, Nagy Attila³, Horváth Ákos³,
Weidinger Tamás⁴, Gyöngyösi András Zénó⁴**

¹Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest

²Norvég Meteorológiai Intézet, Oslo, Norvégia

³Országos Meteorológiai Szolgálat, Viharjelző Observatórium, Siófok

⁴Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék

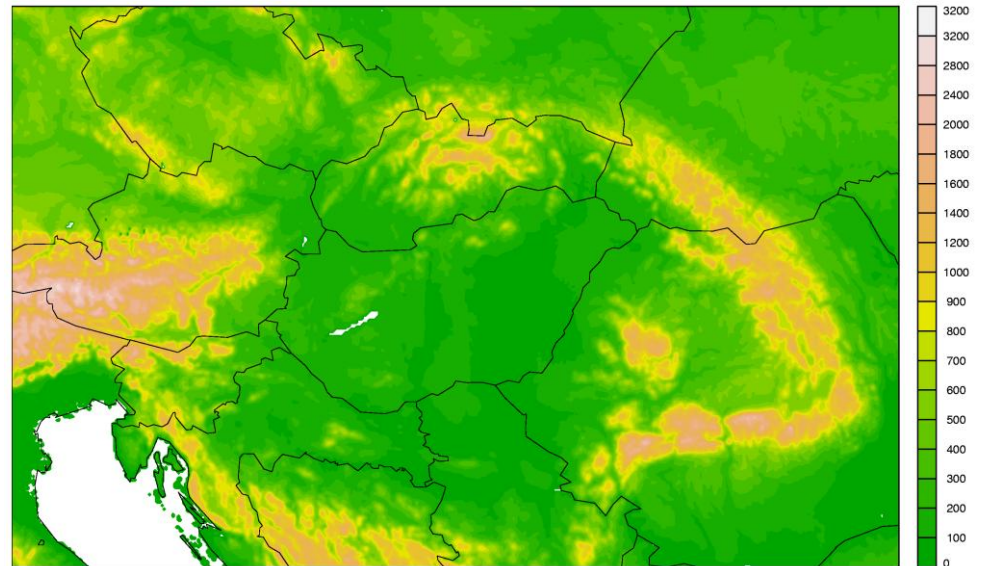
Meteorológiai Tudományos Napok, 2013

Tartalom

- Modellalkalmazások az OMSZ-nál és az ELTE-n
- NH dinamika
 - Horizontális diffúzió
- Fizikai parametrizációk
 - Mikrofizika
 - Turbulencia, sekély konvekció
 - Felszíni folyamatok
- Ensemble előrejelzések

Operatív AROME - OMSZ

- AROME operatív az OMSZ-nál 2010 decembere óta
- $\Delta x = 2,5$ km
- $\Delta t = 60$ s
- 60 vertikális szint
- Futtatás naponta négyszer
- 3DVAR légköri adatasszimiláció
- Csatolás az ECMWF/IFS modellhez



A WRF operatív futtatása – beágyazott modell

ECMWF (0,125°)

(illetve GFS (0,25°))



DX=2,7 km

37 modellszint

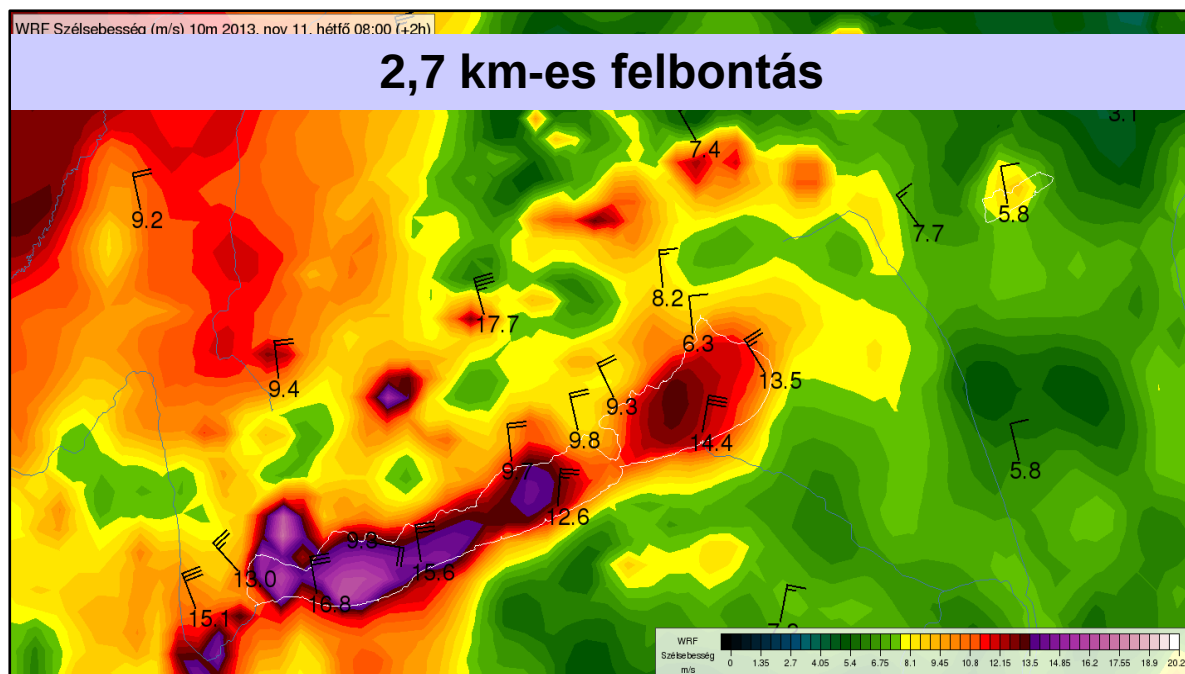
Mezo-béta skálájú kényszerek
(explicit konvekció, felszín-légkör
kölsönhatások)



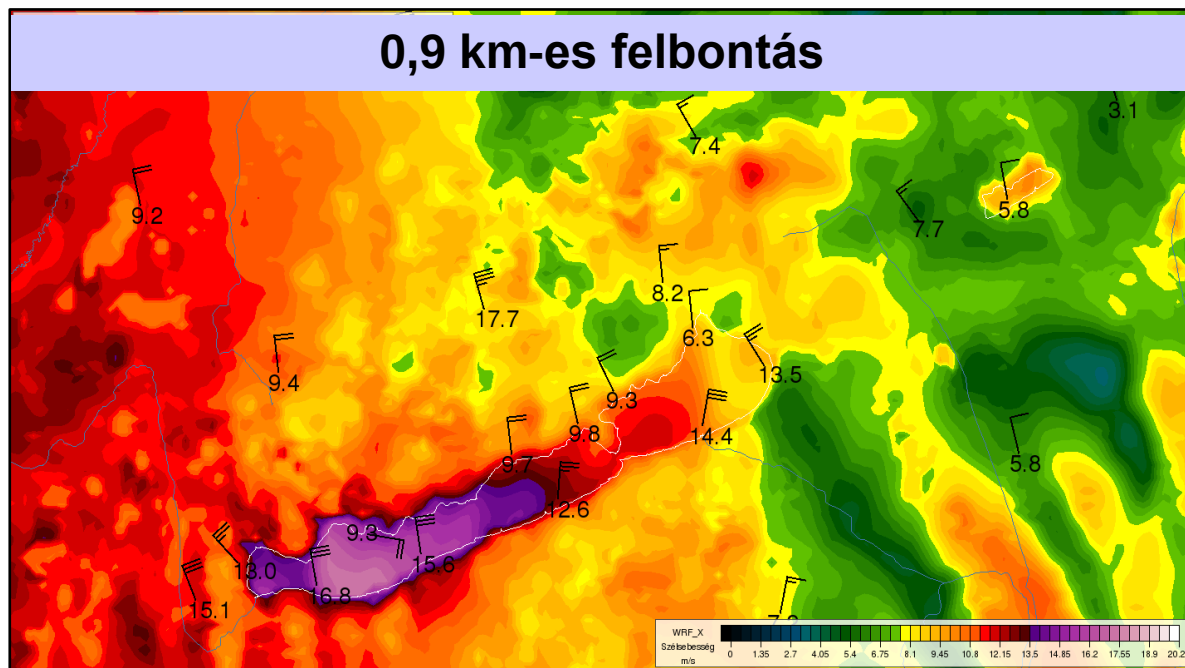
DX=900 m

Mezo-gamma skálájú rendszerek
(városi cirkuláció, hegy-völgyi szél,
egycellás zivatarok, stb.)

Egyirányú nest: a nagyobb modellől
peremfeltételeket kap, azonban nincs
visszacsatolás
(lehetőség van kétirányú nest-re, ahol
van visszacsatolás a nagy modell
felé)



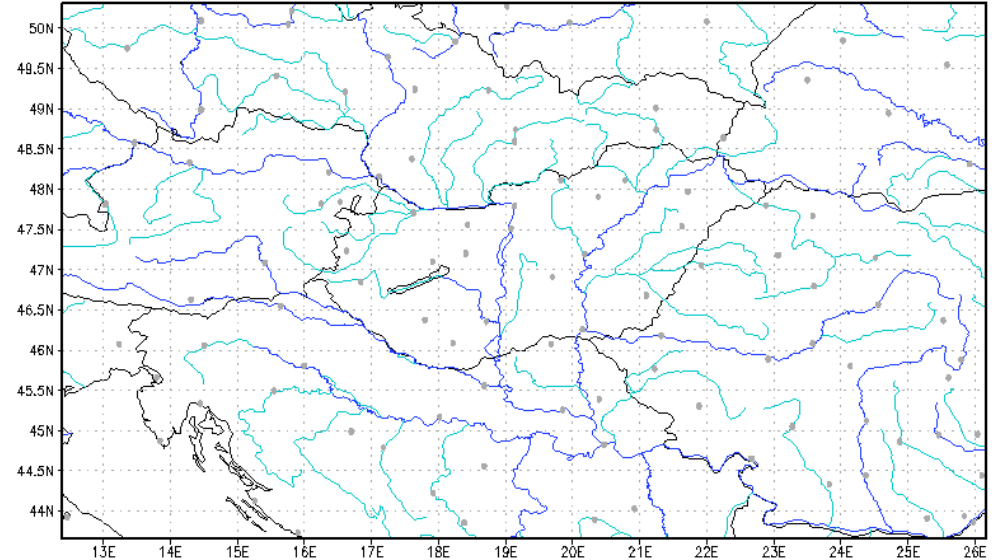
10 m-es szélssebesség (modell és mérés)



WRF modell futtatása az ELTE Meteorológiai Tanszékén

Alkalmazás

- **Oktatás** hallgatói futtatások, napi előrejelzések, dolgozatok, speci.
- **Kutatás**
 - szélenergia becslések, szélklimatológia
 - repülésmeteorológiai felhasználás
- **A jelenleg használt modellváltozat (3.5.1 verzió)**
 - Beágyazott futtatás lehetősége, optimalizált modell parametrizációk, hazai talajtextúra és felszínhasználati adatbázis alkalmazásával
 - 10 km-es horizontális felbontás
 - 27 vertikális modellszint
 - Napi 2x 96 h-s futtatás fél fokos GFS 3 óránként bemenő adatokon
- **Kimenő adatok utófeldolgozása, Web-en keresztül megosztva**
 - *Web előrejelzése, archív adatok*
 - meteorogram, térképes információk, származtatott mennyiségek, repülésmeteorológiai információk

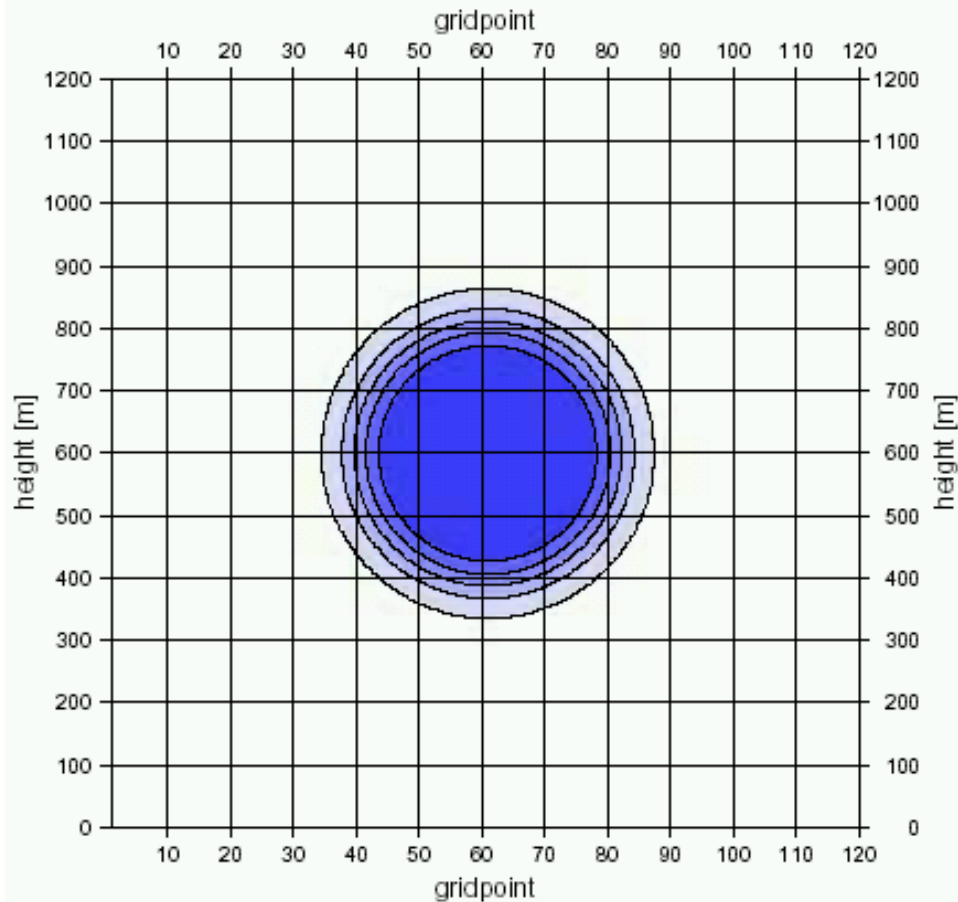


Dinamika

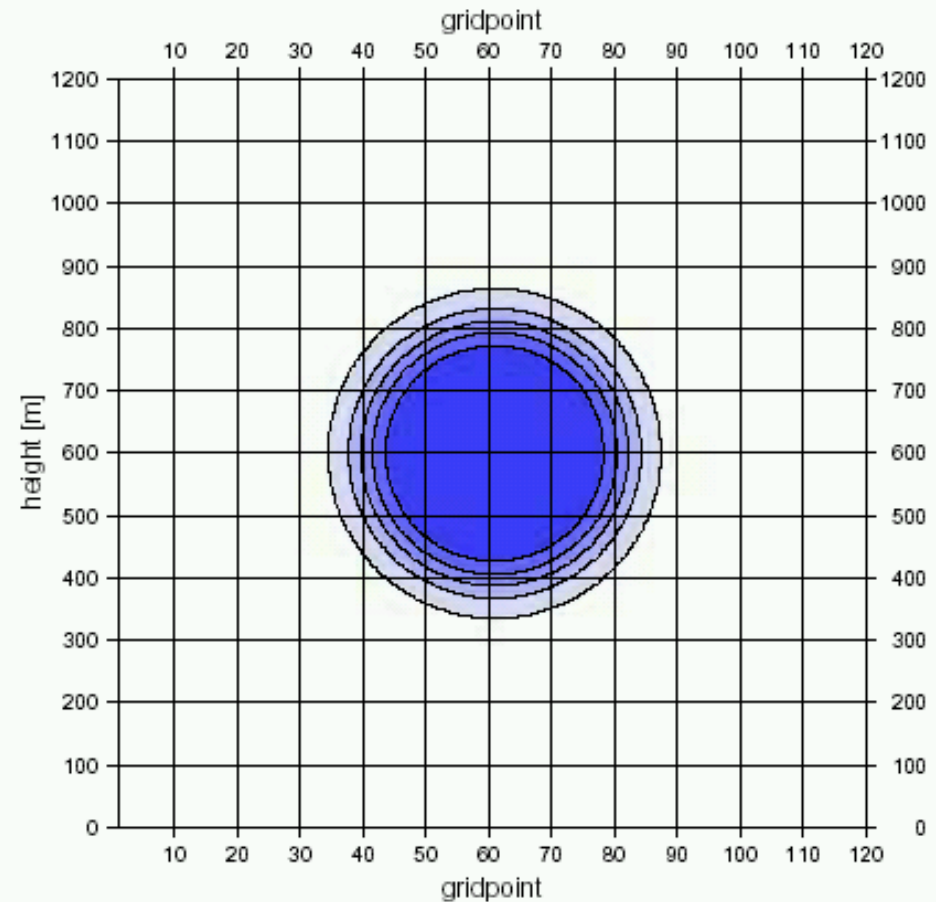
- ~2km horizontális felbontás: vertikális gyorsulás nem hanyagolható el ($dw/dt \sim g$)
→ **nem-hidrosztatikus dinamika**
 - HTD egyenletekben vertikális momentum egyenlet
- Előny: korábban parametrizált folyamatok explicit leírása
 - mély konvekció
 - orografikus áramlás (gravitációs hullámok)
- AROME:
 - spektrális modell
 - hatékony Semi-Implicit (idő) Semi-Lagrange-i (advekció) numerikus séma
 - $dx = 2,5 \text{ km} \rightarrow dt = 60 \text{ s}$
- WRF:
 - rácsponti modell
 - Harmadrendű (explicit) Runge-Kutta séma
 - $dx = 2,7 \text{ km} \rightarrow dt = 12 \text{ s}$; $dx = 0,9 \text{ km} \rightarrow dt = 4 \text{ s}$

Dinamika

non-hydrostatic



hydrostatic



NH modell realisztikus

H modell: túl gyors leáramlás, kis cellákra szakad

Horizontális diffúzió - AROME

- SLHD: Semi Lagrangian Horizontal Diffusion

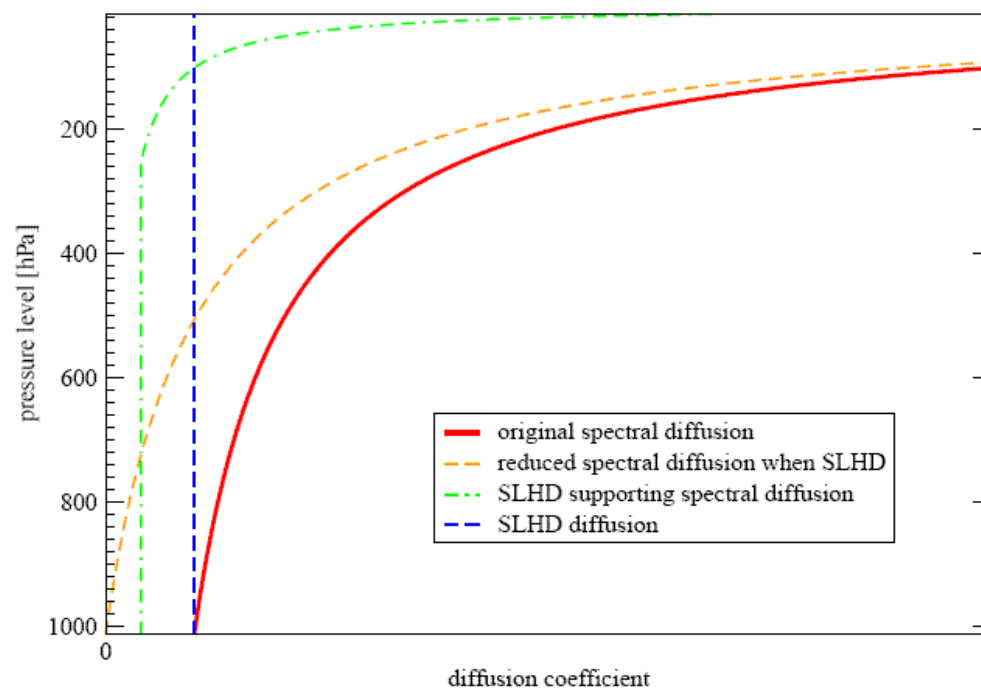
- Nemlineáris diffúzió (erősebb csillapítás)
- Lokális
- A rácsponti térben definiált változókra is (pl. hidrometeorok) alkalmazható
- Fizikailag realisztikusabb parametrizáció
- Diffúzió a horizontális deformáció függvénye

$$\kappa = \kappa_{min} + (\kappa_{max} - \kappa_{min}) \frac{\Delta t F(d)}{1 + \Delta t F(d)}$$

$$F(d) = 2A([s]_{ref})^P d \left(\max \left[1, \frac{|d|}{\frac{D}{2}([s]_{ref})^Q} \right] \right)^B$$

- Horizontális diffúzió az AROME-ban:

- SLHD
- Csökkentett spektráldiffúzió (negyedrendű) → a tartomány tetején hat (durva vertikális felbontás miatt)
- „Supporting” spektráldiffúzió (hatodrendű) → az orográfia következtében fellépő zaj kiszűrése



Horizontális diffúzió - AROME

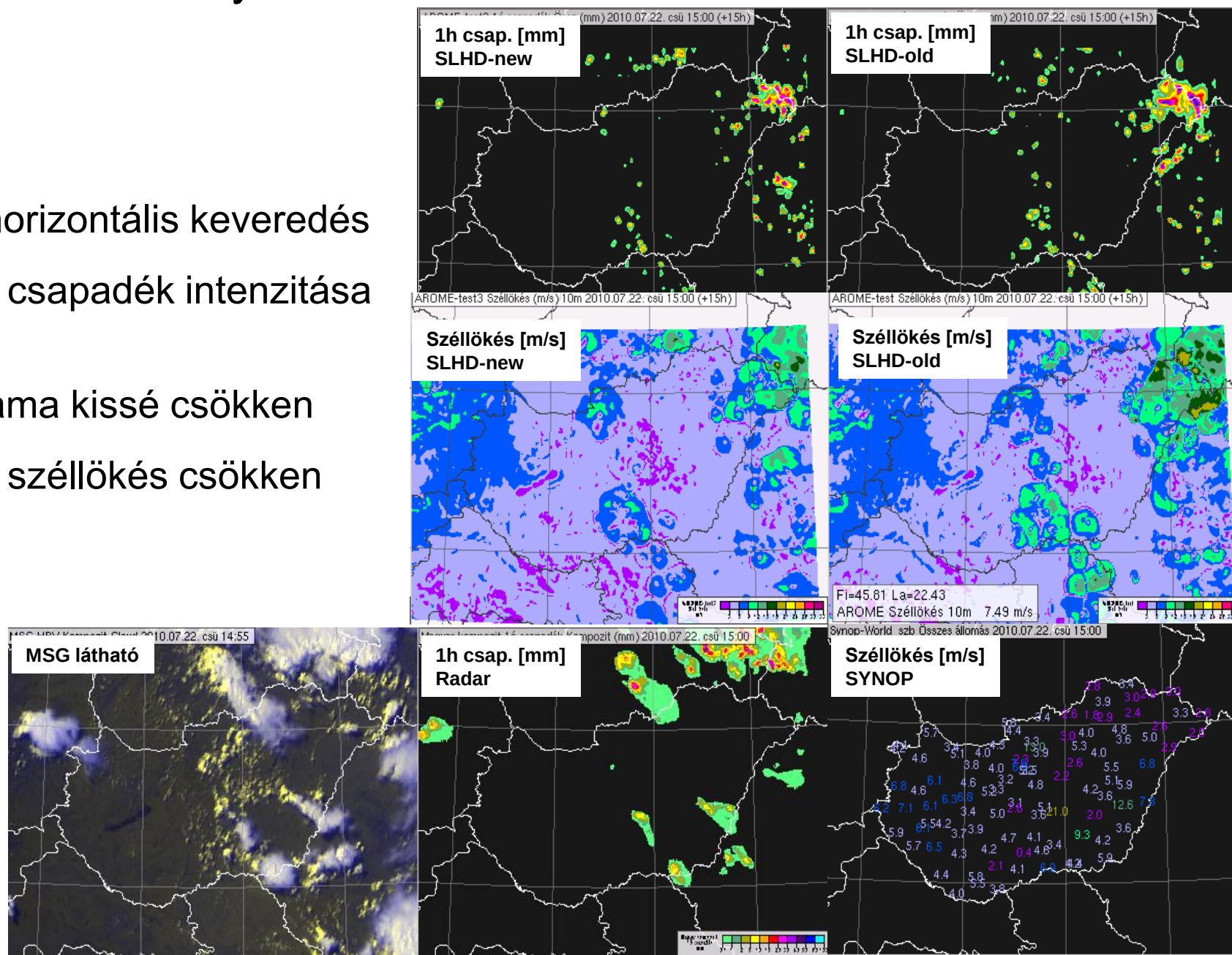
- Eredeti konfiguráció:
 - Gyenge spektrális diffúzió minden vertikális szinten
 - SLHD minden hidrometeorra (felhő- és csapadékelemek)
- Kísérlet:
 - Spektrális diffúzió csak 100 hPa felett
 - SLHD pontosságának növelése
 - SLHD:
 - Felhőelemekre (felhő-víz, felhő-jég)
 - Dinamikai mezőkre (u , v , w , T , q)
 - Turbulens Kinetikus Energiára

Horizontális diffúzió - AROME

Esettanulmány

- Erősebb horizontális keveredés
- Konvektív csapadék intenzitása csökken
- Cellák száma kissé csökken
- Konvektív szellőkés csökken

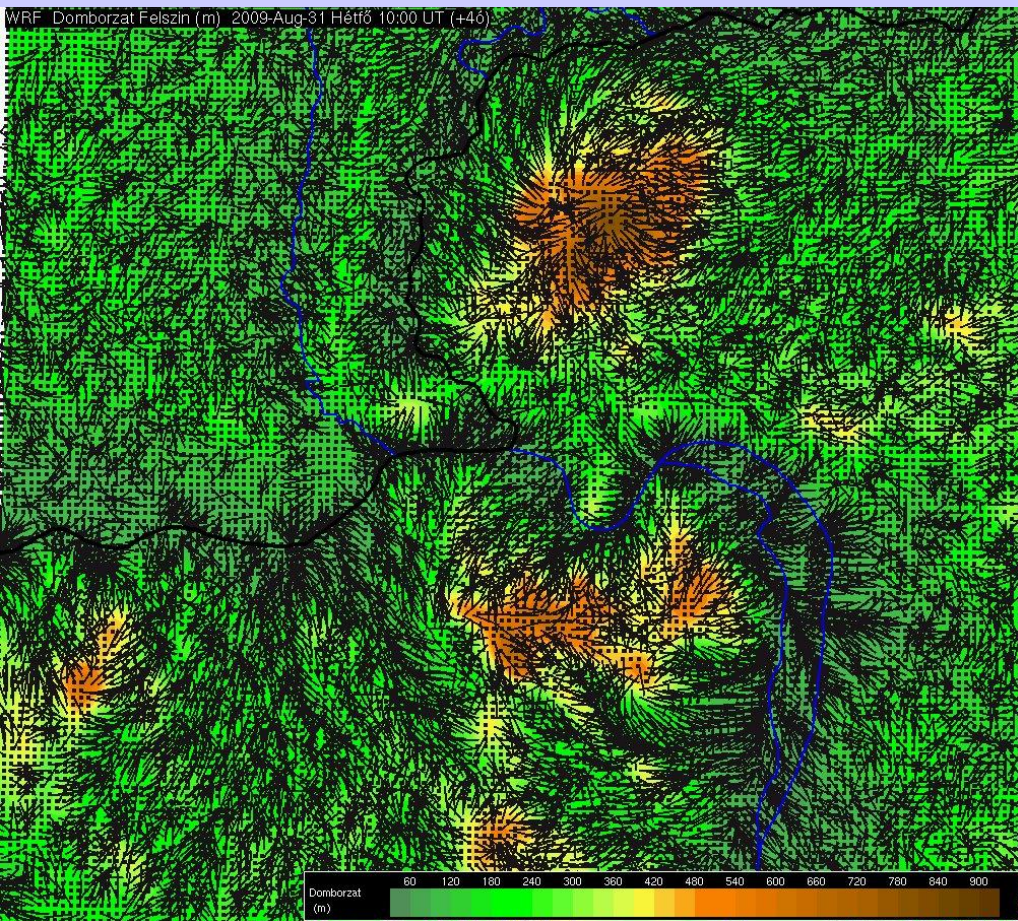
2010-07-22 15 UTC (+15 h)



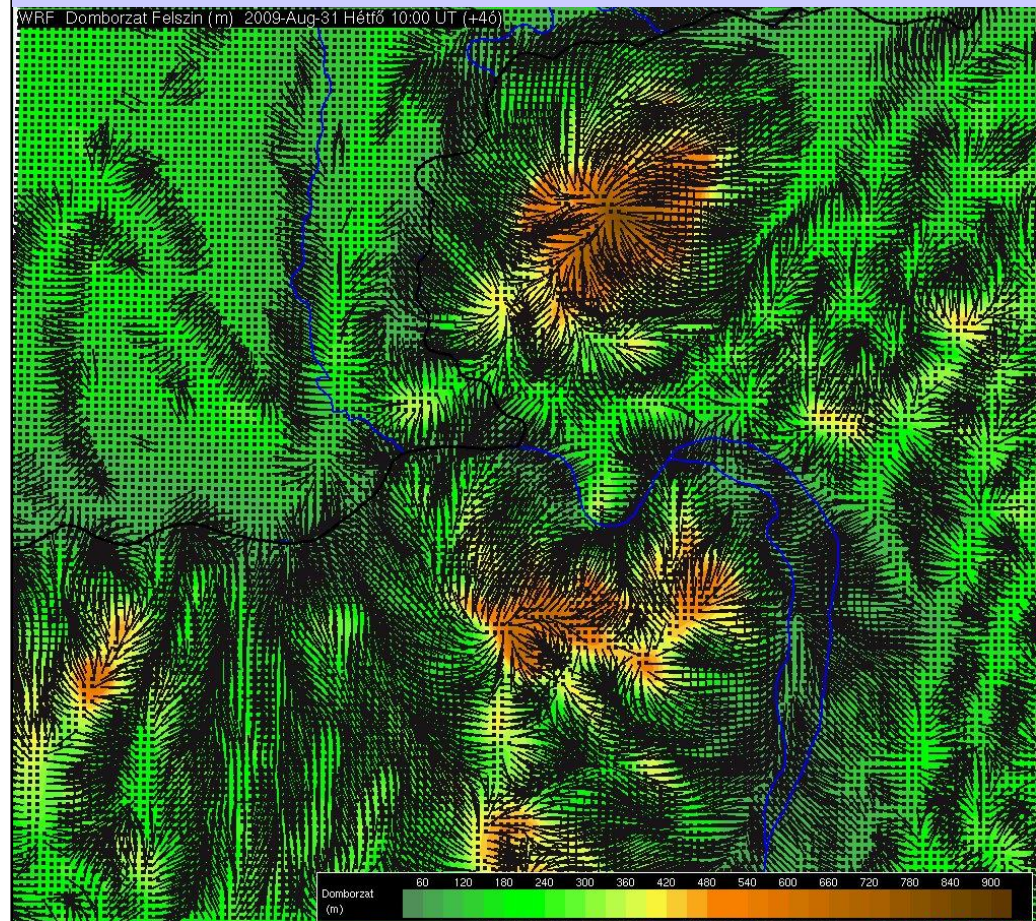
Horizontális diffúzió – WRF (OMSZ)

~100 m-es horizontális felbontás

6-odrendű diffúziós tag nélküli 10 m-es
szélmező és domborzat



6-odrendű diffúziós tag melletti 10 m-es
szélmező és domborzat



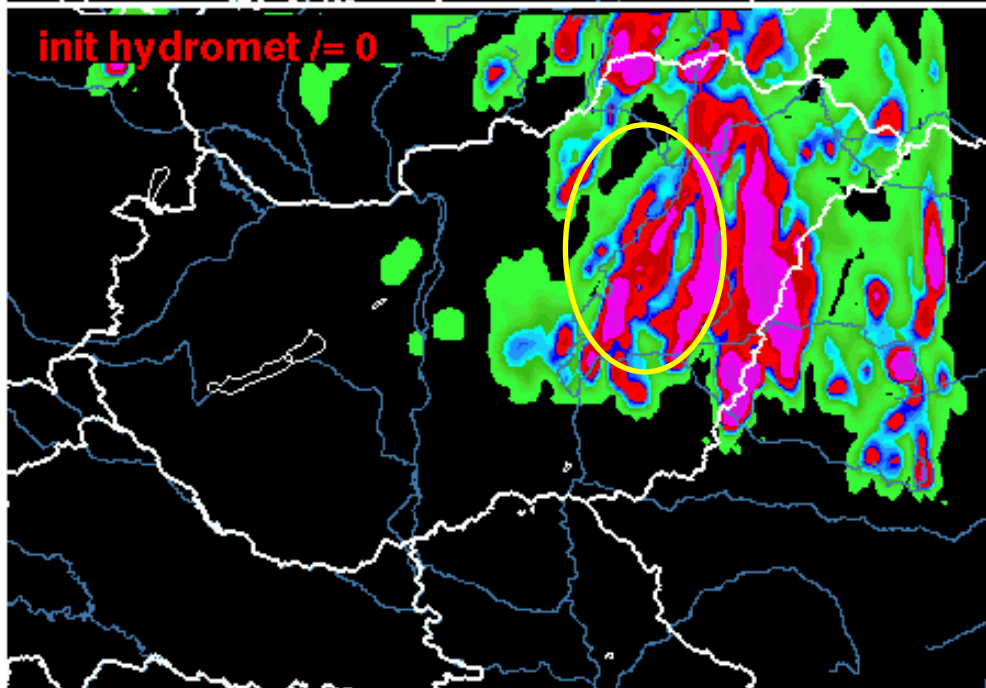
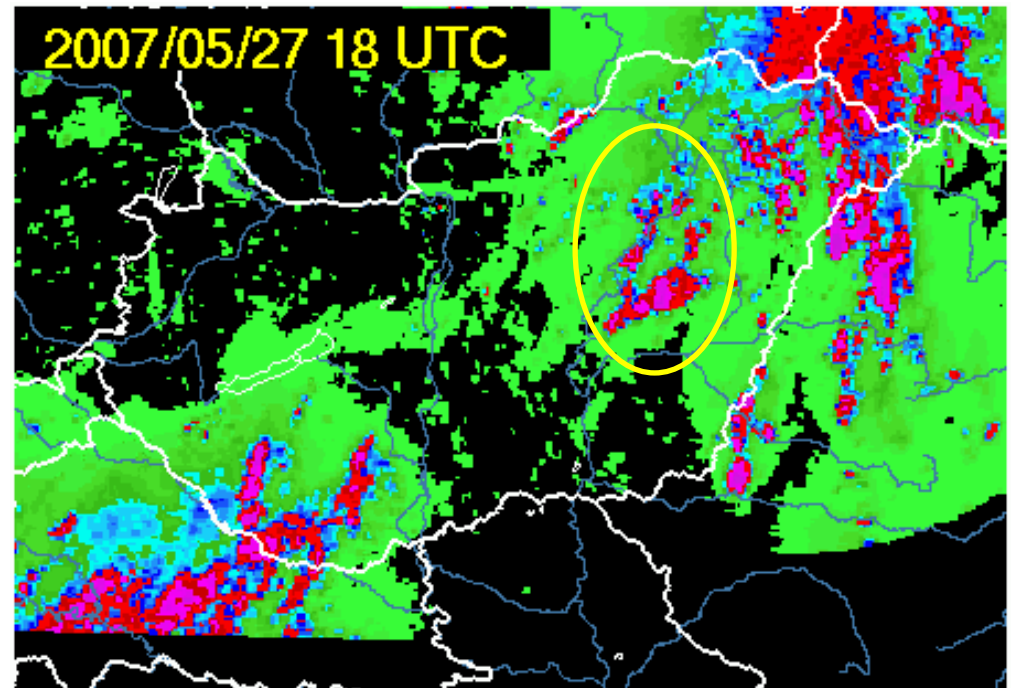
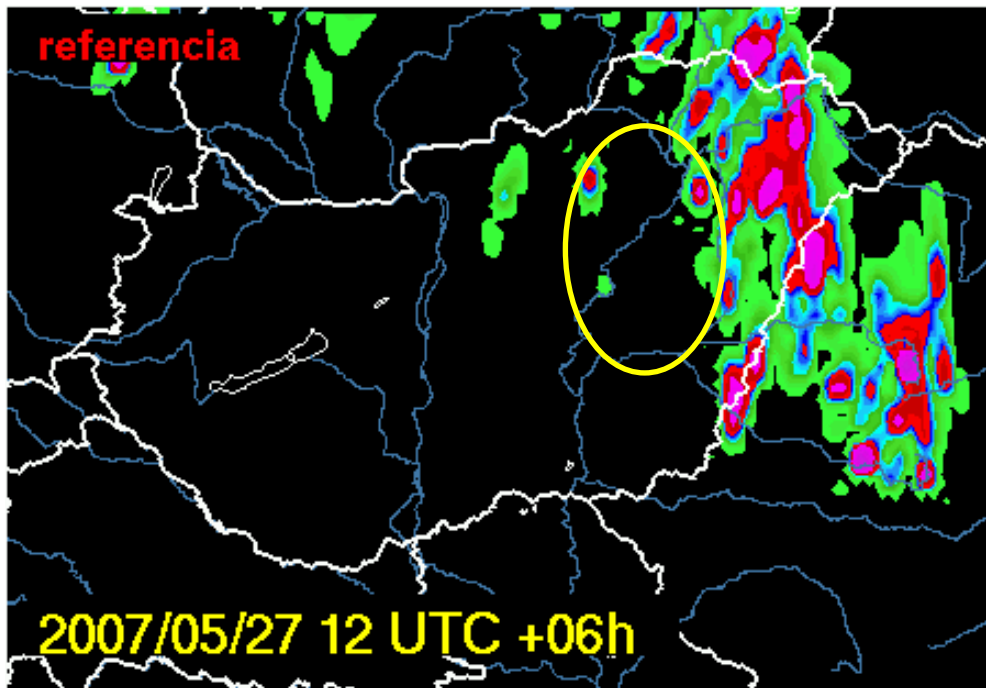
Magasrendű diffúziós tag
bevezetése a turbulens diffúzió
parametrizációjába

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = S + \alpha \nabla_h^6 \phi,$$

Mikrofizika

- ~2km horizontális felbontás → **explicit mélykonvekció**:
 - NH dinamika + mikrofizika
- csapadék, felhőképződés részletes leírása szükséges
- AROME és WRF mikrofizikájának alapkoncepciója hasonló
- sokféle hidrometeor → csoportosítása néhány kategóriába
 - 6 (7) kategória: vízgőz, felhőcsepp, jégkristály, esőcsepp, hó, hódara, (jég)
- prognosztikai egyenletek a hidrometeorok keverési arányaira
- **momentumos közelítés**
 - hidrometeorok méret eloszlása $n_i(D)$, ahol D az átmérő
 - tömeg, esési sebesség a méret fv-e $m(D) = aD^b$, $v(D) = cD^d$ $\rho_0 / \rho_{d,ref}^{0,4}$
 - integrálás az összes méretre
 - keverési arány az eloszlás 3. momentuma $r_i = \frac{1}{\rho_{ref}} \int_0^\infty m(D) n_i(D) dD$
 - mikrofizikai folyamatok (pl. koaguláció, aggregáció) analitikusan integrálható függvények

Hidrometeorok inicializálása - AROME



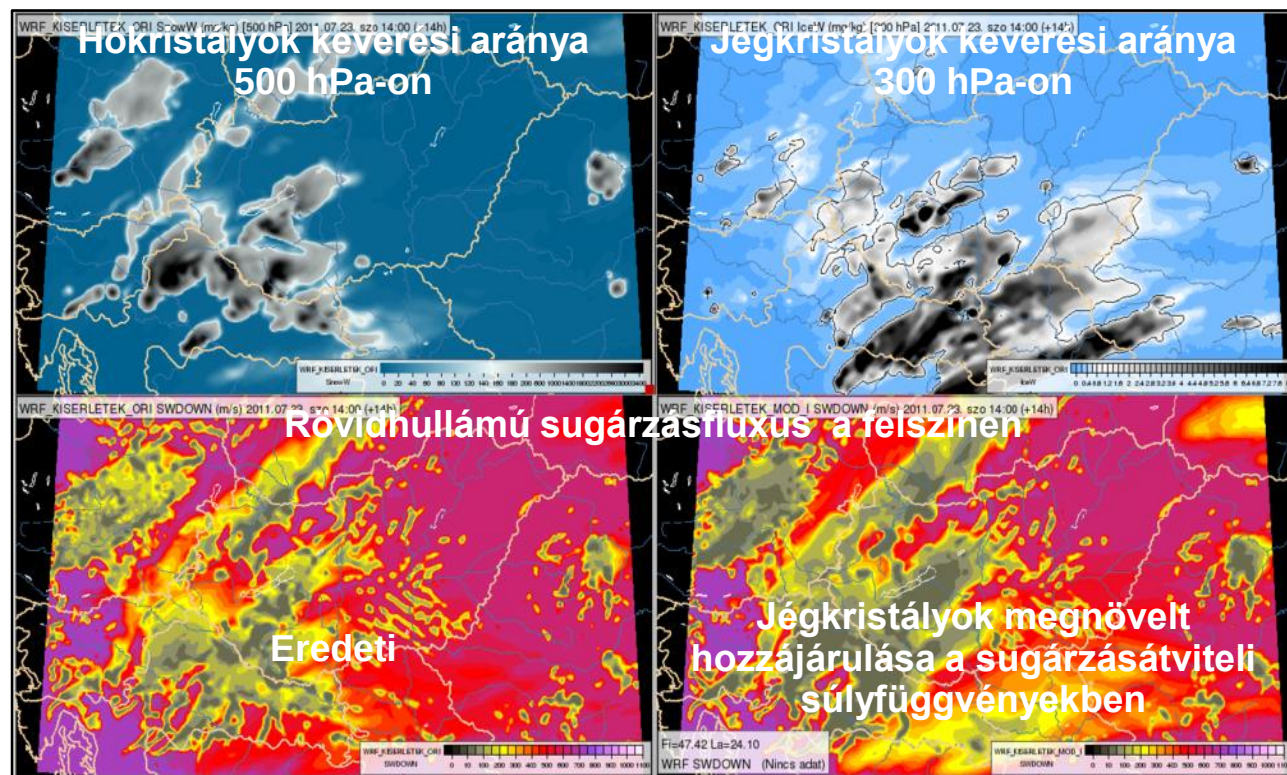
ref: $k_{\text{AROME}}(0)=0$

új: $k_{\text{AROME}}(0)=k_{\text{AROME}}(t) > 0$

(k: „kondenzált” hidrometeor: c, i, r, s, g)

Mikrofizika, Sugárzás – WRF (OMSZ)

- Mikrofizikai és sugárzás parametrizáció kapcsolata
- Az eredeti beállításokkal a felszínre jutó RH sugárzást felülbecsli a modell
- Jégkristályok megnövelt hozzájárulása a sugárzásátviteli súlyfüggvényekben



Turbulencia

- Reynolds felbontás: $\psi = \overline{\psi} + \psi'$
 - Feladat: $\overline{w' \psi'}$ parametrizációja, mivel $\overline{\text{div} w' \psi'}$ adja meg az adott modellváltozó turbulens folyamatokból eredő tendenciáját
-
- WRF modell: elsőrendű nemlokális séma ellengradiens tagokkal (YSU, Hong et al., 2006) + a széldiagnosztika javításával, amely figyelembe veszi a rácsávolságnál kisebb skálájú felszíni érdekesség és inhomogenitás hatását
-
- AROME modell: EDMF (Eddy Diffusivity Mass Flux) koncepció

$$\overline{w' \psi'} = -K \frac{\partial \overline{\psi}}{\partial z} - M_u (\overline{\psi} - \psi_u)$$

Gradiens tag
„CBR” séma
1,5 rendű lezárás,
prognosztikus TKE

Tömegfluxus tag
„Kain-Fritsch” konvekció

ψ : modellváltozó valós értéke
 $\overline{\psi}$: modellváltozó rácsponti értéke
 ψ' : modellváltozó fluktuációja
 w : vertikális sebesség
 K : turbulens diffúziós együttható
 M_u : feláramlási tömegfluxus
 ψ_u : modellváltozó feláramlási értéke

2010-07-22 11 UTC (+11 h)

(mm) 2010.07.22. csü 11:00 (+11h)

AROME - old

AROME - new

AROME - old

AROME - new

AROME - old

AROME - new

MSG Vis.

Radar 1h csap.

SYNOP - Szállókés

- Erősebb keveredés a határrétegben
→ nem alakulnak ki a kis cellák
- Szállókés felülbecslése csökken
- A konvekció időzítése is javul
- Csapadékmaximumot enyhén felülbecsli

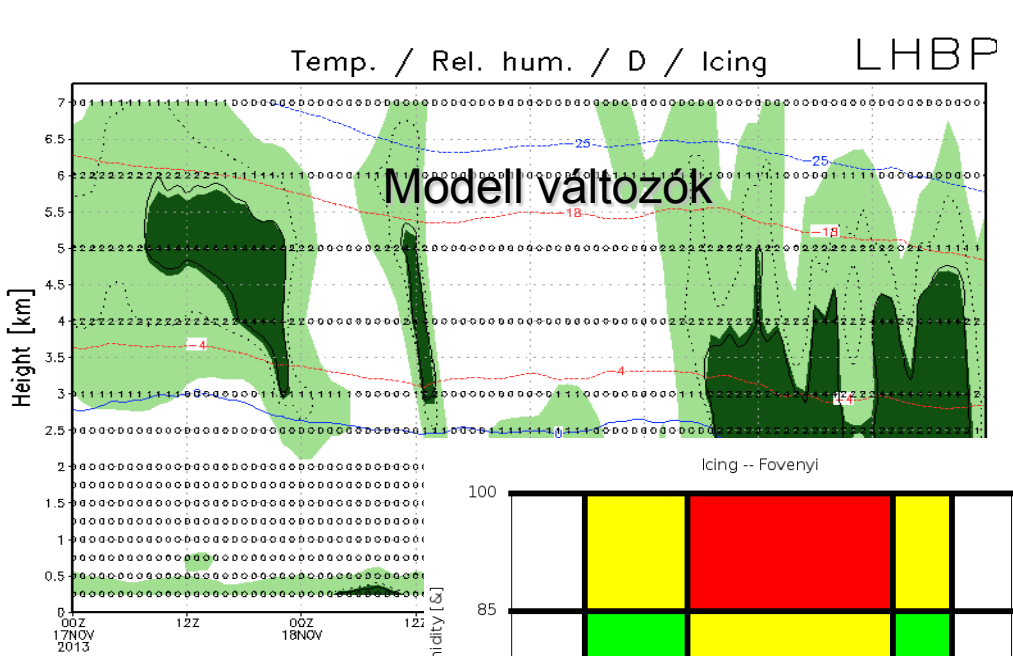
Turbulencia - AROME

1h csapadék

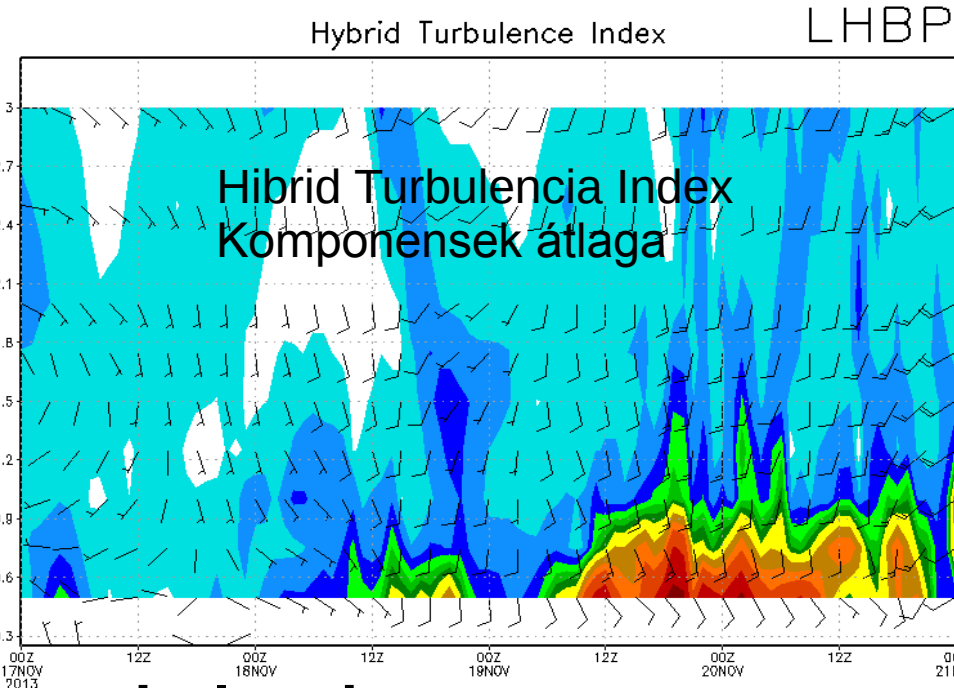
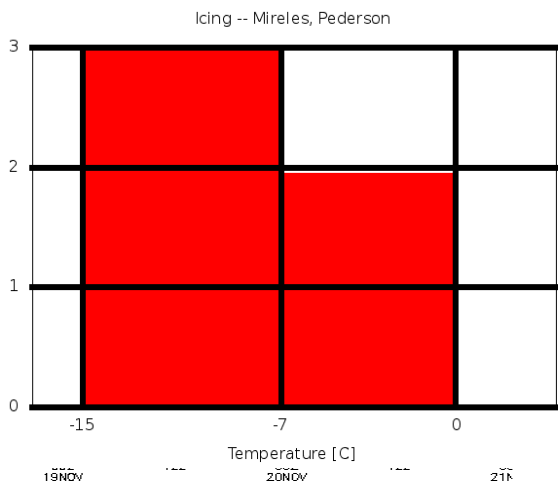
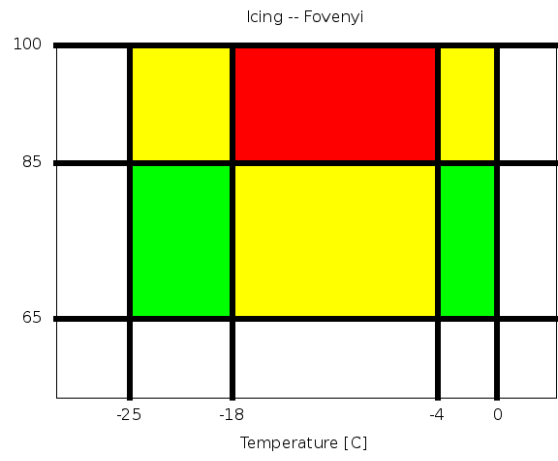
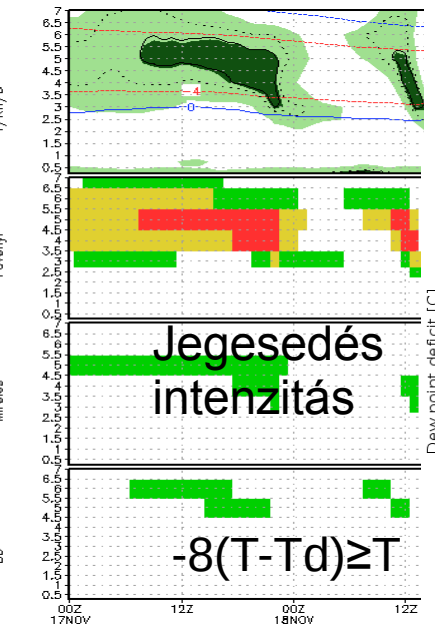
Alacsony szintű felhőzet

Szállókés

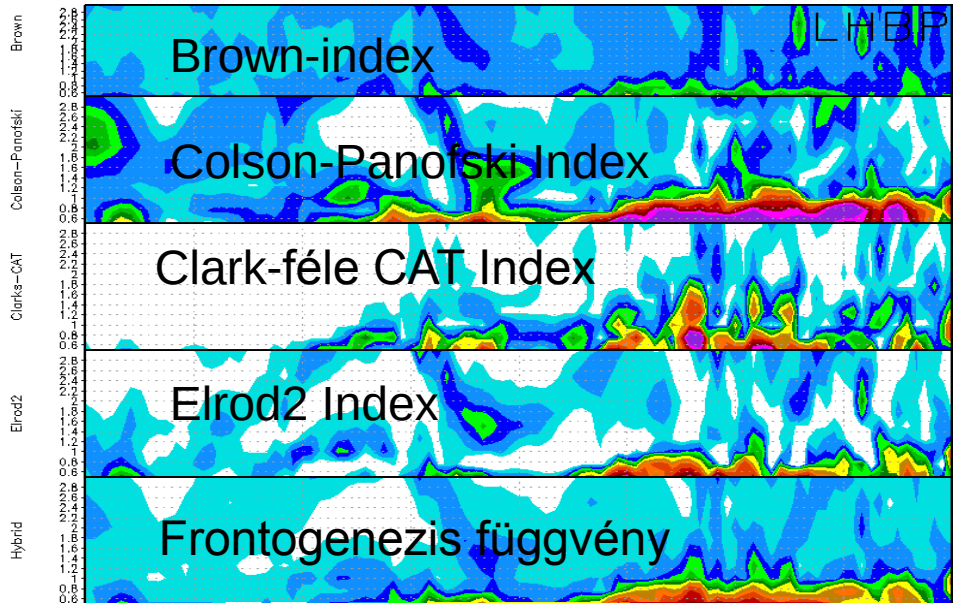
Meteogramm: származtatott paraméterek – WRF (ELTE)



jegesedés



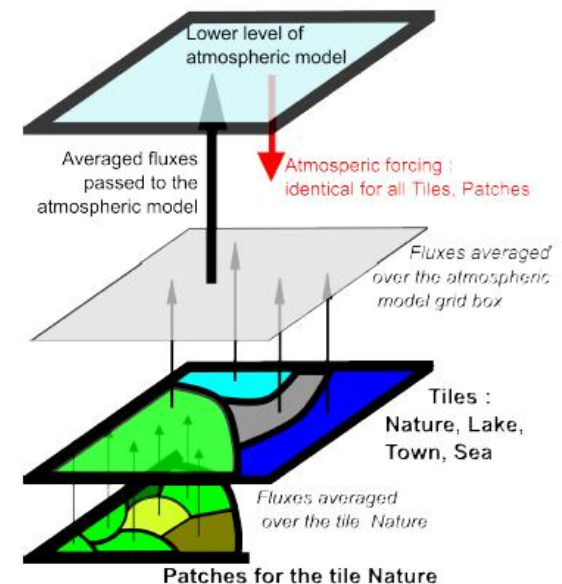
turbulencia



A parametrizációs eljárások a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KHR-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások keretében készültek. Külön köszönet Bottyán Zsolt, Kardos Péter, Kurunczi Rita és Wantuch Ferenc munkájáért.

Felszíni folyamatok

- WRF: NOAH LSM
 - diffúziós talajmodell (4 szint)
 - operatíván önállóan is futtatott
- AROME: Surfex = Surface Externalisée: elvben bármelyik légköri modellhez csatlakozható (interface szükséges)
- „Tiling”: adott rácsponthoz többféle felszíntípus
 - vegetáció, tenger, tó/folyó, város
 - vegetáció további 12 „patchre” osztható (növényzet típusa alapján)
- visszacsatolás légkörhöz: területi arányok alapján átlagolt fluxusok (hő, vízgőz, momentum)
- offline futtatás (csak egy irányú kölcsönhatás)
 - séma validálásához
 - felszíni folyamat vizsgálata (pl. városi hősziget vagy vegetáció fejlődése)

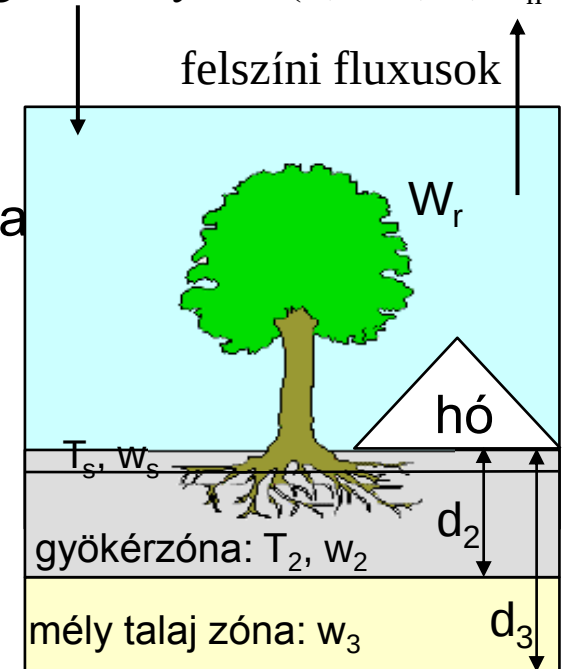


Felszíni folyamatok – AROME modell

ISBA

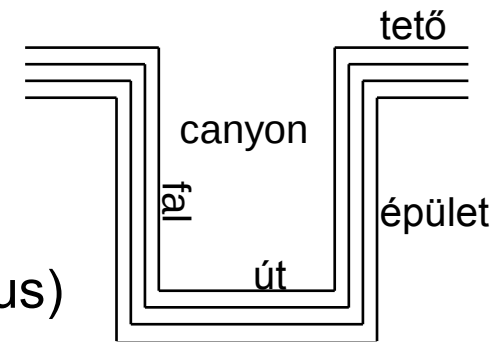
- prognosztikai változók: T_s , T_2 , w_s , w_2 , w_3 , W_r , m_s , a_s , ρ_s
- **3 rétegű Force-Restore séma**
 - force: külső kényszer, restore: visszatérés egyensúlyba
- **1 rétegű hóséma** (prognosztikus sűrűség, albedó)
- ISBA-A-gs fotoszintézis séma
 - vegetáció időbeli fejlődése
 - természetes eredetű CO_2 fluxusok számítása

légköri kényszer (T , RH , V , R_n , P)



TEB

- Kanyon séma:
 - 3 felszín: fal, tető, út (mindegyik 3 rétegű)
 - minden útirány lehetséges, kiintegrál összes irányra
 - diffúziós egyenletek rétegek hőmérsékletére
- sugárzás: árnyékolási effektus, sugárzási csapda
- antropogén hatások figyelembe vétele (hő, nedvességfluxus)

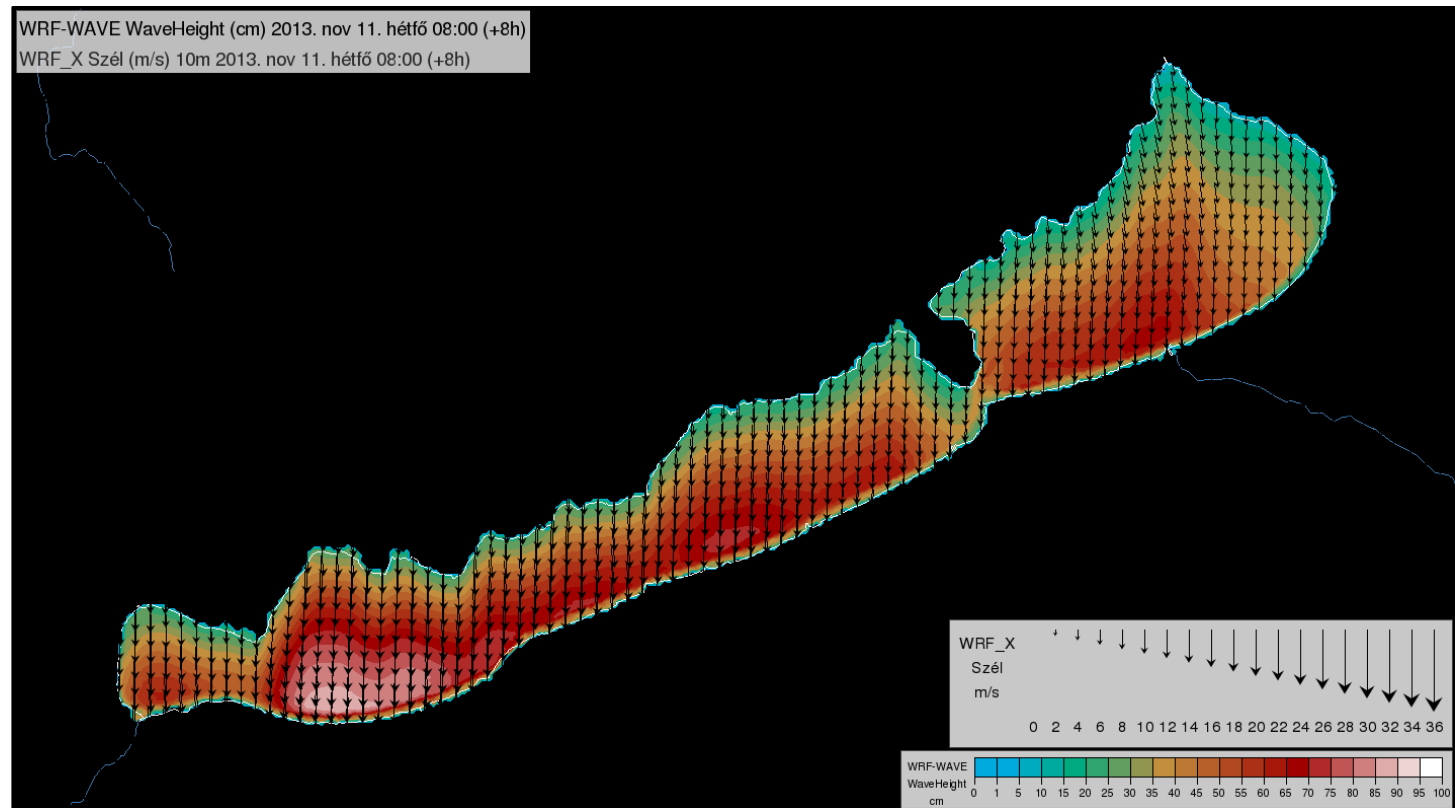


Canopy séma (felszíni határréteg)

- **Hagyományos séma** 2 m-es mezők meghatározására: diagnosztikai úton, stabilitásfüggő vertikális profil
- **Canopy séma**: légkör alsó 10 m-e 6 vertikális szintre
 - 1D (vertikális) turbulencia séma SBL-ben (+város/növényzet okozta akadály)
 - 2 m-es mezők prognosztikai úton számolódnak → pontosabb előrejelzés

Hullámmagasság-előrejelzés – WRF (OMSZ)

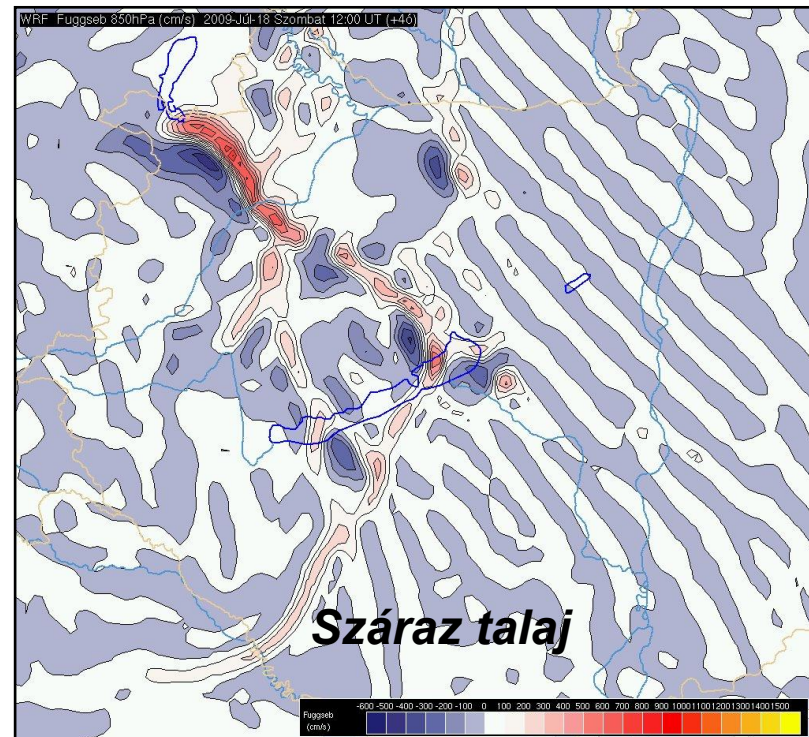
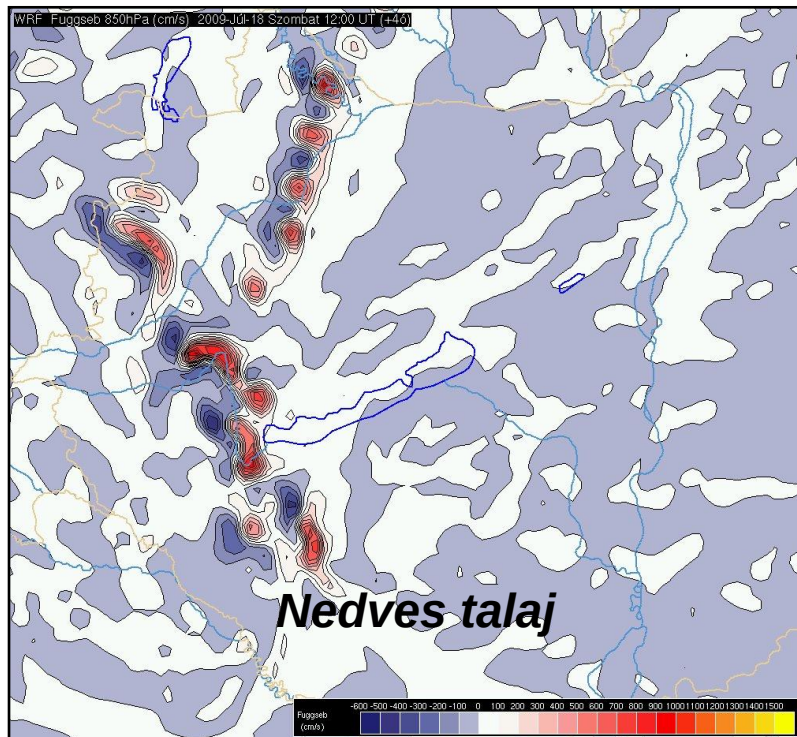
- Balatoni hullámmagasság-előrejelzés a beágyazott (900 m-es) modell szélmezejéből meghajtva
- Operatív bevezetés: 2012 augusztus
- Empirikus formula, bemenő adatai:
 - 10 m szélesebesség
 - vízmélység
 - szélút



Felszín hatása – WRF (OMSZ)

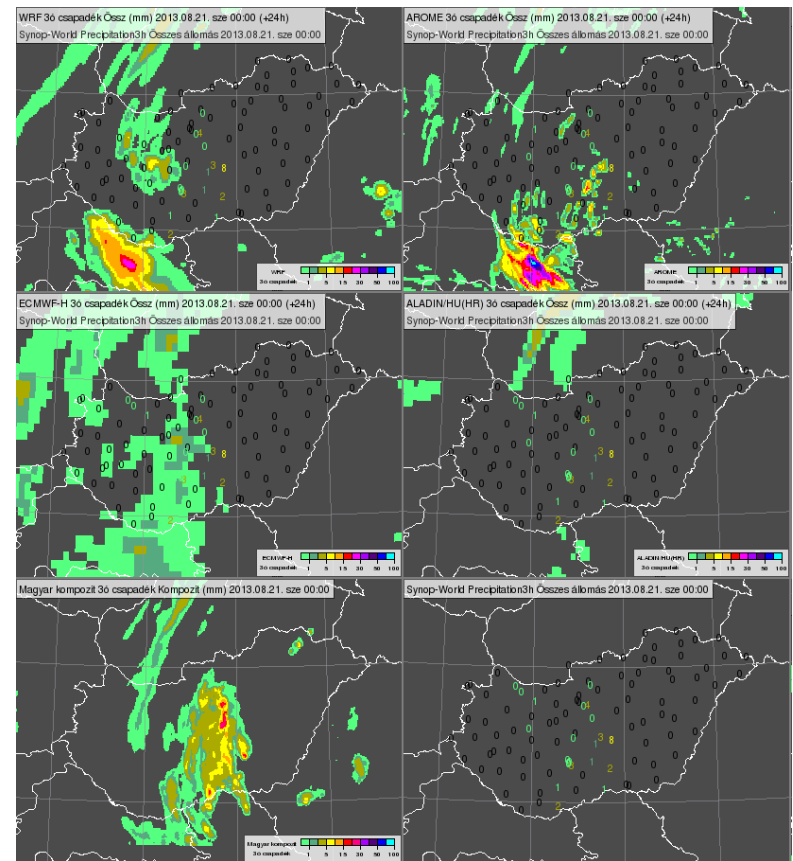
A növekvő felbontással a **felszín állapotára** egyre nagyobb az érzékenység
(amelynek leírása elsősorban adathiány miatt korlátozott)

Vertikális sebesség 700 hPa



Nem-hidrosztatikus EPS - Motiváció

- A nagyfelbontású modellek lehetővé tették időben gyorsan fejlődő, kisskálájú, veszélyes időjárási jelenségek leírását (pl. konvektív események).
- E **kisskálájú folyamatok leírása bizonytalan**. Előrejelzésük hibája gyorsabban nő, mint a nagyobb (pl. szinoptikus) skálájú folyamatoké.
- Példa: **2013. augusztus 20.**

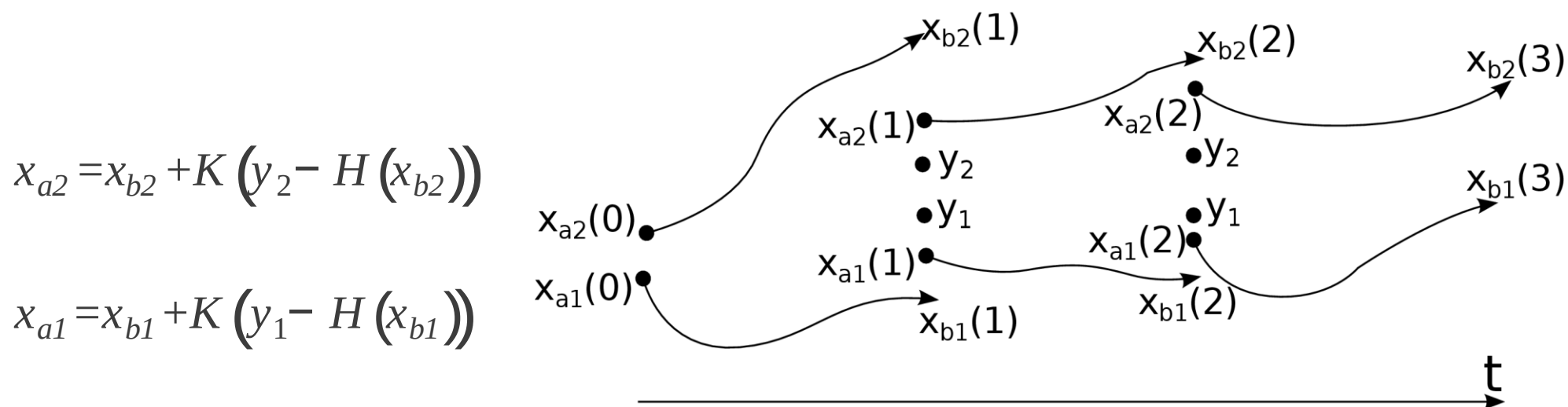


- Egyetlen modell integrálás nem feltétlenül tudja pontosan leírni ezeket a veszélyes időjárási jelenségeket.
- Cél egy olyan **numerikus előrejelzési sokaság (ensemble)** futtatása, mely kijelöli az egyes veszélyes időjárási jelenségek nagyobb **valószínűséggel** való bekövetkezésének területeit.

Nem-hidrosztatikus EPS

Az OMSZ kísérleti AROME-EPS-e

- **11 tagú rendszert futtatunk.** A tagokat csatolhatjuk az ECMWF-EPS-hez illetve a francia PEARP-hoz is. Ezekből a globális rendszerekből érkező perturbációk is leírják a rendszerben rejlő bizonytalanság egy részét.
- Két területen próbáljuk a bizonytalanságok számszerűsítését tovább javítani:
 - A **kezdeti feltételeket** szeretnénk megfigyelésekkel lokálisan tovább pontosítani úgy, hogy a megfigyelések hibáját is figyelembe vegyük. Ezért nem egy analízist készítünk, hanem több asszimilációs ciklust futtatunk (**EDA – ensemble data assimilation**).



Nem-hidrosztatikus EPS

Az OMSZ kísérleti AROME-EPS-e

- **11 tagú rendszert futtatunk.** A tagokat csatolhatjuk az ECMWF-EPS-hez illetve a francia PEARP-hoz is. Ezekből a globális rendszerekből érkező perturbációk is leírják a rendszerben rejlő bizonytalanság egy részét.
- Két területen próbáljuk a bizonytalanságok számszerűsítését tovább javítani:
 - A **modell-hiba** reprezentációjának érdekében az ún. **SPPT (stochastically perturbed parametrized tendencies)** sémát alkalmazzuk, melynek alapelve, hogy a parametrizált folyamatok hordozzák a modellhiba nagyobb részét, így a fizikai paramterizációk hozzájárulását perturbáljuk.

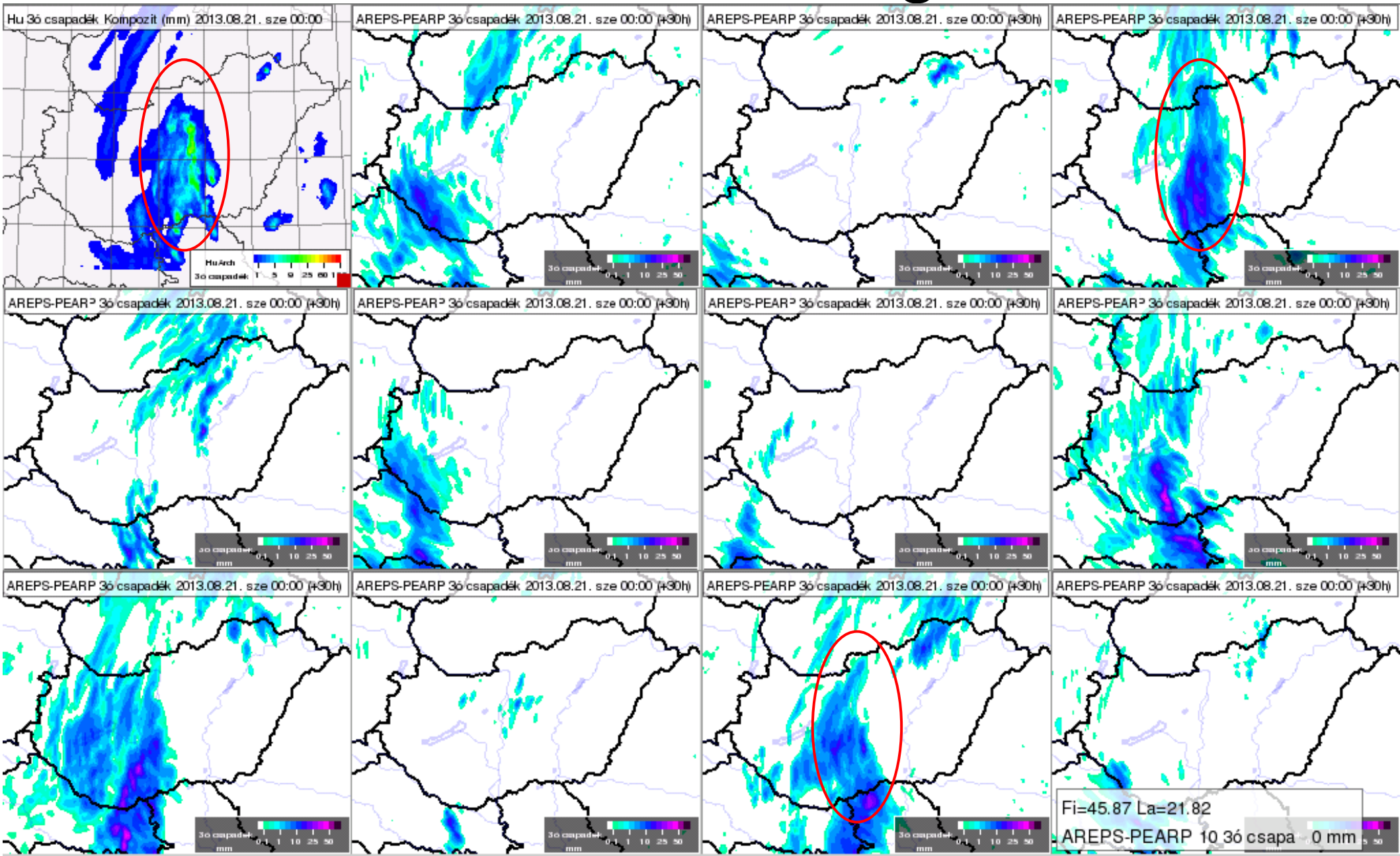
$$e_j(T) = \int \{A(e_j; t) + P'(e_j; t)\} dt$$

$$P'(e_j; t) = (1 + r_j) P_j(e_j; t)$$

Itt r_j egy 0 várható értékű gauss-i eloszlásból származó véletlen szám.

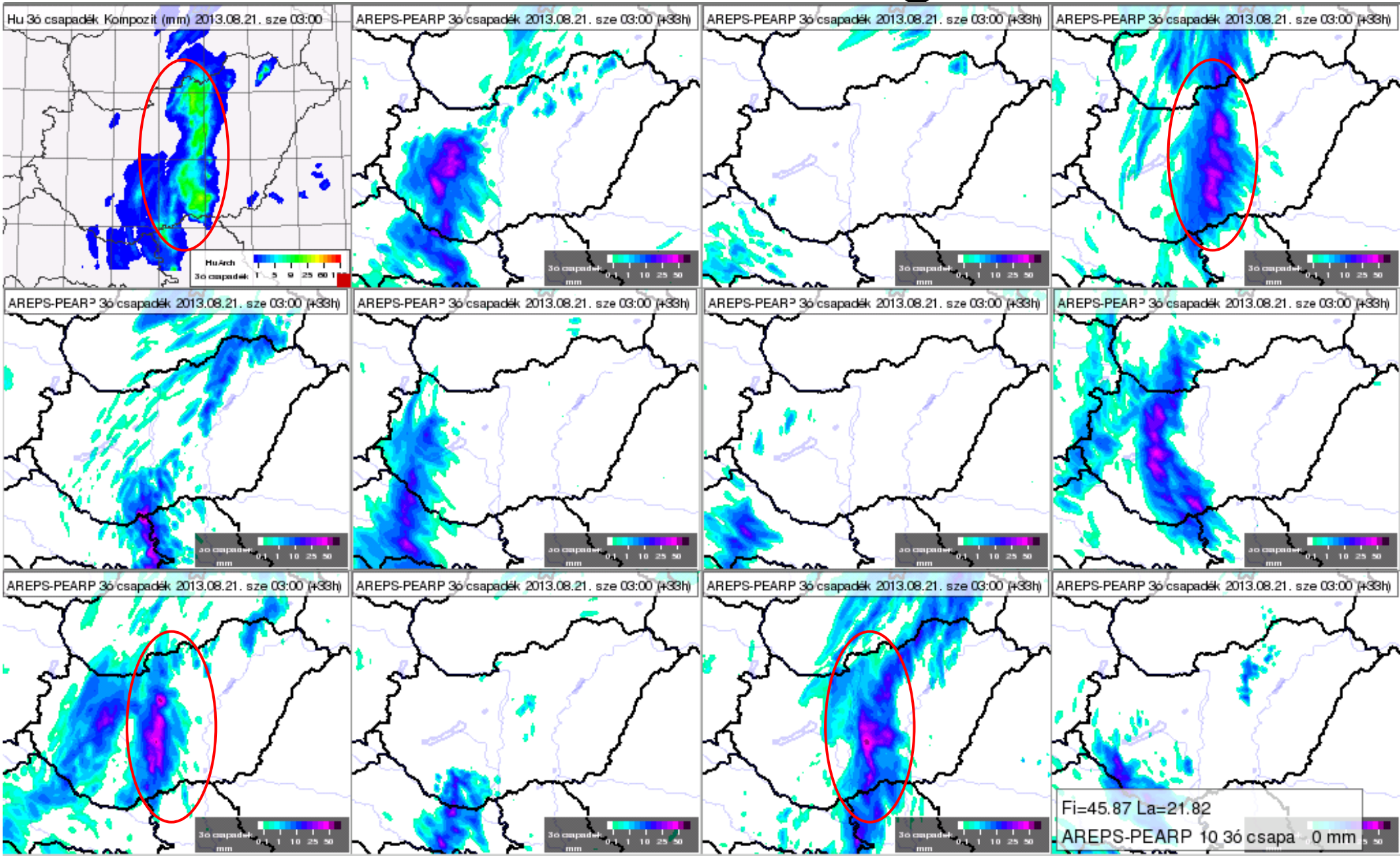
Nem-hidrosztatikus EPS

AROME-EPS 2013. augusztus 20.



Nem-hidrosztatikus EPS

AROME-EPS 2013. augusztus 20.



Összefoglalás

- A veszélyes időjárási jelenségek előrejelzésében manapság már nélkülözhetetlen eszközök a nagyfelbontású, nem-hidrosztatikus időjárás-előrejelző modellek.
- Ezen modellek felbontásuknál fogva képesek a **mély konvekció explicit** leírására. Ehhez az egyenletrendszer **nem-hidrosztatikus** megoldása, valamint fejlett **fizikai parametrizációk** alkalmazása szükséges.
- A kis skálájú folyamatok nagy bizonytalansága miatt fontos a valószínűségi megközelítés.