

# A RePLaT modell és alkalmazása légköri szennyeződések terjedésének vizsgálatára

*Haszpra Tímea*

Környezettudományi Doktori Iskola, Környezetfizika program  
MTA–ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport

Témavezetők: Tél Tamás, ELTE Elméleti Fizikai Tanszék  
Horányi András, OMSZ, ECMWF

Konzulens: Tasnádi Péter, ELTE Meteorológiai Tanszék

2014. február 26. ELTE házivédés

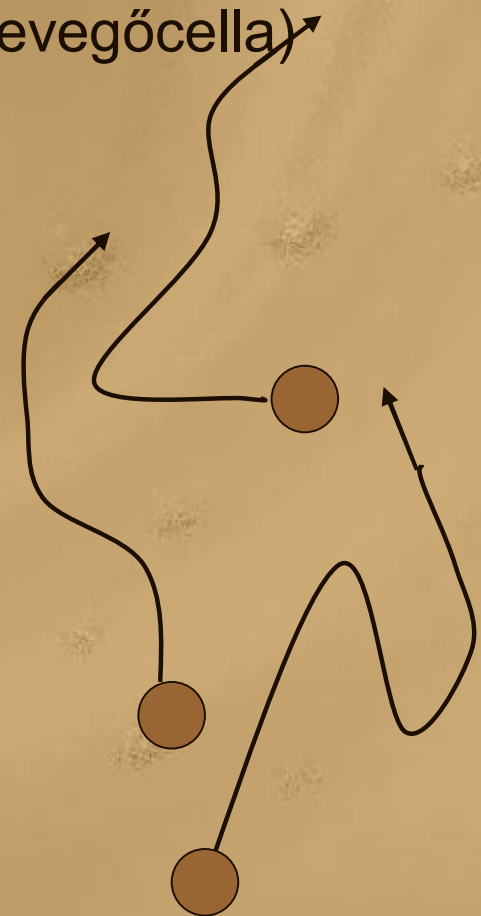
# Légköri szennyeződések

- vulkánkitörések, légszennyezés → légköri áramlások → sodródás, keveredés, ülepedés
- *Eyjafjallajökull* (Izland) 2010. tavasz
- *Fukushima* (Japán) 2011. tavasz
- ... stb.
  
- a szennyeződések a forrástól távolabbra is eljuthatnak



# Terjedési modellek

- *euleri modellek*: Földhöz rögzített koordinátarendszerben, rácshálózaton
- *lagrange-i modellek*: trajektóriák (részecskék/pöff/levegőcella)
  - „álrészecskék” (számítási részecskék)
    - a pontszerű részecskék a szélmezővel sodródnak
    - a részecskékhez mesterséges tömeg tartozik (pl. 1 kg), időben változik → a tömeg az ülepedéssel exponenciálisan csökken:  $\Delta m/\Delta t = -C \cdot m$
    - gravitációs ülepedés?
    - pl.: FLEXPART, HYSPLIT, NAME, SNAP, GEARN, MLDP0



# Terjedési modellek

- *lagrange-i modellek*: trajektóriák (részecskék/pöff/levegőcella)

- valódi részecskék

- a részecskéknek valóságnak megfelelő méret és sűrűség (tömeg) tartozik  
pl.  $r = 1 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$
- a részecskék mozgását a légköri áramlások és a határsebesség adja meg
- pl.: PUFF, VAFTAD
- vulkáni hamu terjedésének gyors előrejelzésére
- nincs csapadék általi kimosódás és esetleg turbulens diffúzió sem



# RePLaT modell

(Real Particle Lagrangian Trajectory modell)

- valódi részecskéket követő lagrange-i terjedési modell
  - valóságnak megfelelő  $\rho$  sűrűségű és  $r$  sugarú aeroszol részecskék
  - + csapadék általi kimosódás és turbulens diffúzió

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}_{\text{air}} + w_{\text{term}} \mathbf{n} + \xi \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r})$$

határsebesség:  $F_{\text{drag}} + mg = 0$

$\xi$  fehérzaj

$\mathbf{D}(\mathbf{r})$  turbulens diffúzió

$\mathbf{n}$  függőleges egységvektor

$Re = \frac{2r |\mathbf{v} - \mathbf{v}_{\text{air}}|}{\nu}$  Reynolds-szám

$$w_{\text{term}} = \begin{cases} -\frac{2}{9} \frac{\rho r^2 g}{\rho_{\text{air}} \nu}, & \text{ha } Re \ll 1 \\ -\sqrt{\frac{8}{3}} \frac{\rho r g}{\rho_{\text{air}} C_d}, & \text{ha } Re \gg 1 \end{cases}$$

← Stokes-törvényből  
(aeroszol részecskék,  $r = 1-10 \mu\text{m}$ )

← négyzetes közegellenállás  
(esőcseppek)

# RePLaT modell

(Real Particle Lagrangian Trajectory modell)

- nedves ülepedés

euleri szemléletben:

$$\frac{dn}{dt} = -k_w n$$

$$\frac{n(\Delta t)}{n(0)} = \exp(-k_w \Delta t) \leftarrow \text{bent}$$

$$1 - \frac{n(\Delta t)}{n(0)} = 1 - \exp(-k_w \Delta t) \leftarrow \text{kiesik}$$

$k_w, r_{\text{rain}}$ :  $P$  csapadékintenzitástól függ

$$\rho_{\text{rain}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

csapadék szerepe: 850 hPa alatt

$n$  koncentráció

$k_w$  nedves ülepedési együttható,  
kimosódási együttható

egy részecske  
 $p = 1 - \exp(-k_w \Delta t)$   
valószínűséggel  
esőcseppbe kerül

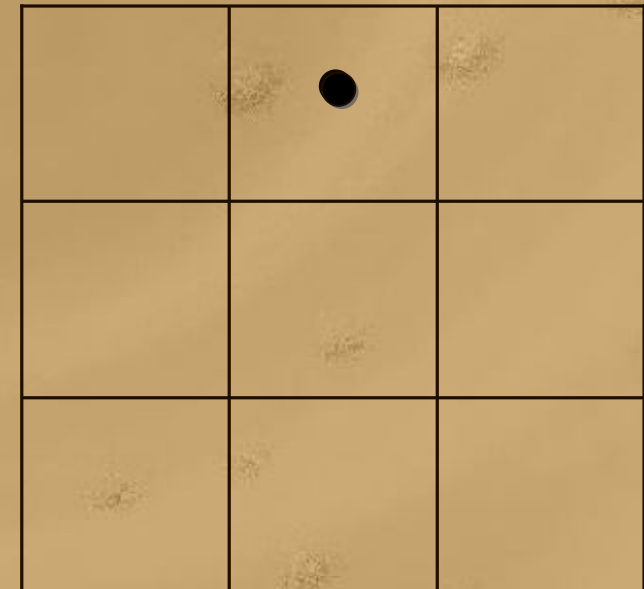
$\rightarrow r = r_{\text{rain}}, \rho = \rho_{\text{rain}}$   
 $\rightarrow w'_{\text{term}} \gg w_{\text{term}}$

# Adatok, módszerek

- szélmező és egyéb adatok:
    - ERA Interim adatbázis (ECMWF\*):  $0,5^\circ \times 0,5^\circ / 1,5^\circ \times 1,5^\circ$ , 6 óra
    - ECMWF előrejelzések:  $0,125^\circ \times 0,125^\circ / 0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , 3 óra
- \* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts



- mozgásegyenletek  $\lambda, \varphi, p$  változókkal
- interpoláció a részecskék helyére
  - vízszintesen: biköbös spline
  - függőlegesen és időben: lineáris
- differenciálegyenletek numerikus megoldása Euler-módszerrel



# Mozgásegyenletek

[Visser (1997)]

$$\lambda(t + \Delta t) = \lambda(t) + \frac{u_{\text{air}}}{R_E \cos \varphi} \Delta t + \xi \sqrt{24K_\lambda \Delta t}$$

$$\varphi(t + \Delta t) = \varphi(t) + \frac{v_{\text{air}}}{R_E} \Delta t + \xi \sqrt{24K_\varphi \Delta t}$$

$$p(t + \Delta t) = p(t) + (\omega_{\text{air}} + \omega_{\text{term}}) \Delta t + \xi \sqrt{24K_p \Delta t} + \frac{\partial K_p}{\partial p} \Delta t$$

$$K_\lambda = \frac{K_x}{(R_E \cos \varphi_p)^2}$$

$$K_\varphi = \frac{K_y}{(R_E)^2}$$

$\xi$ :  $[-0,5; 0,5]$  egyenletes eloszlás

$K_x, K_y$ : állandó vízszintes turb. diff. együtthatók

$K_p \leftarrow K_z$ : Monin–Obukhov-féle hasonlósági elmélet



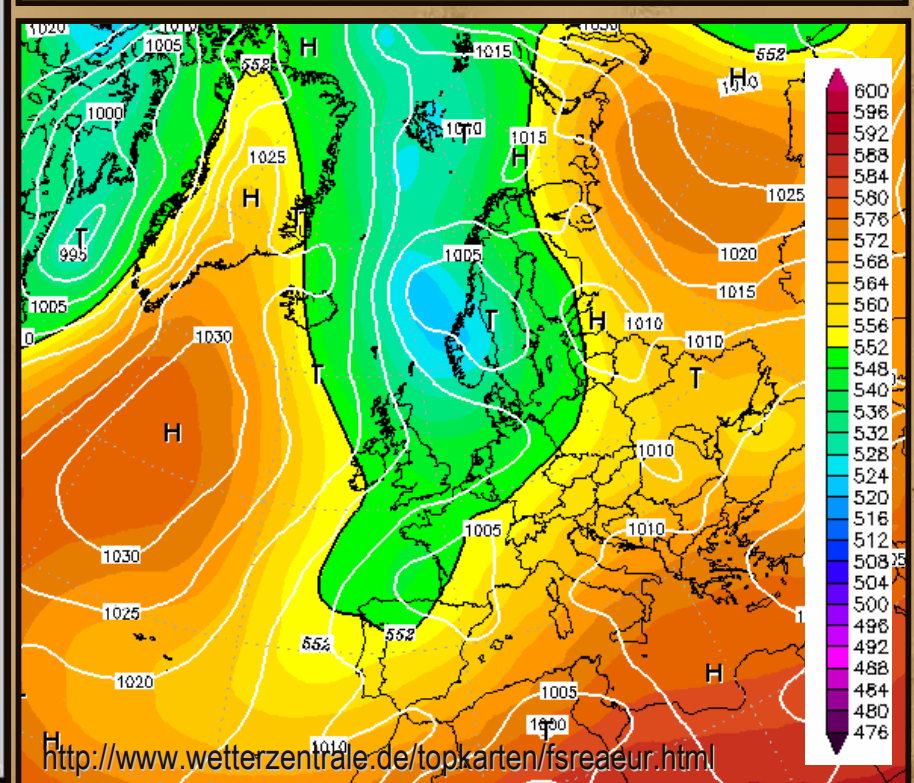
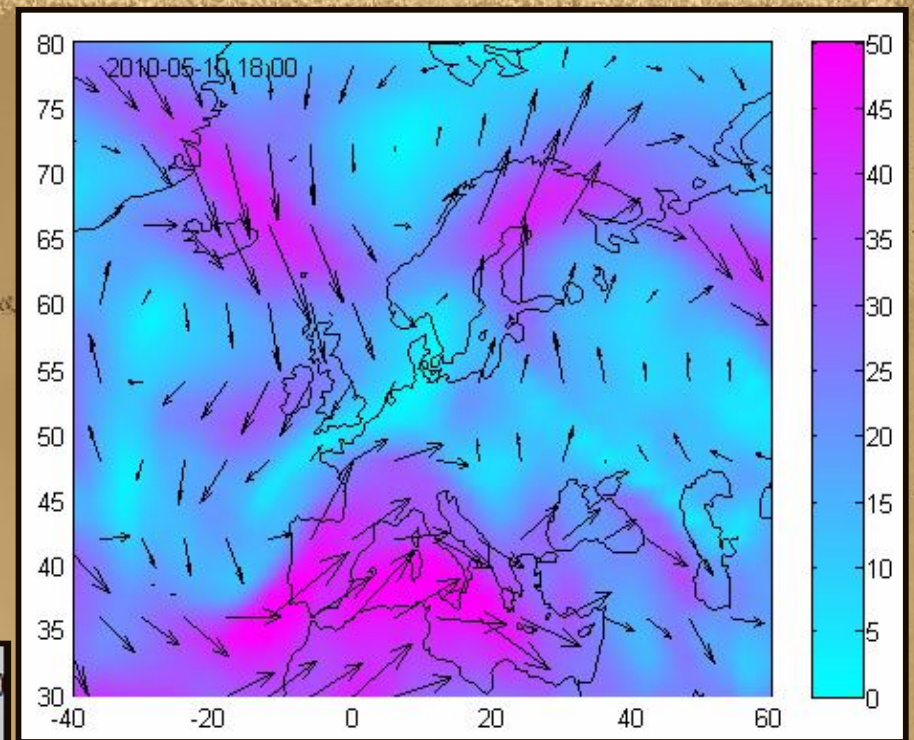
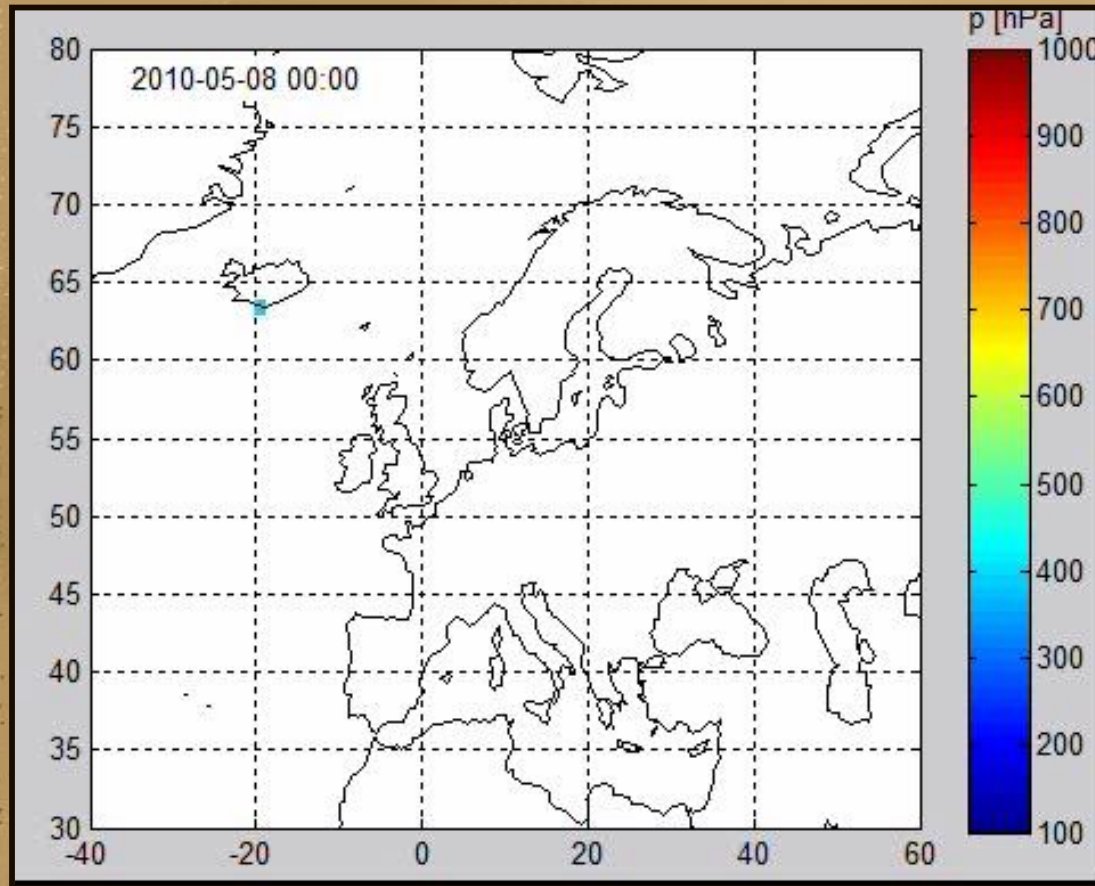
# Esettanulmányok

T2

# Eyjafjallajökull- szimuláció (2010. május 8–19.)

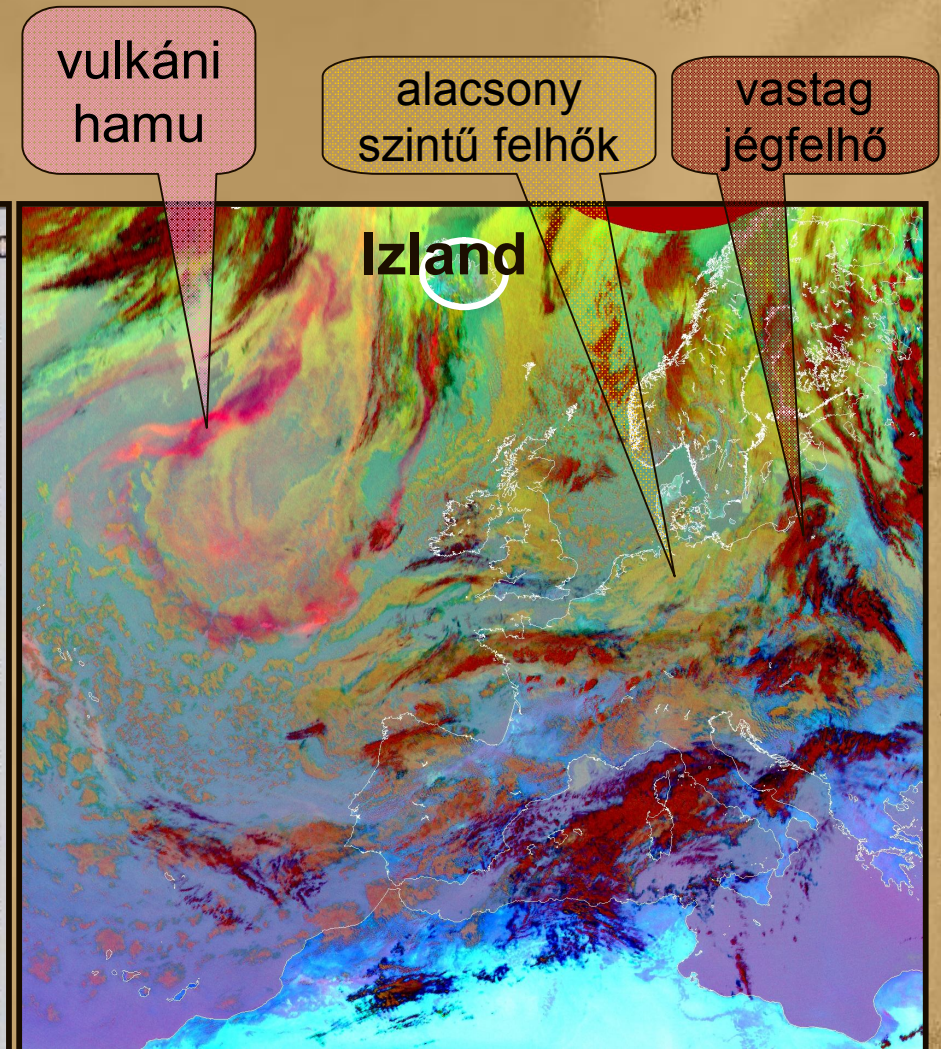
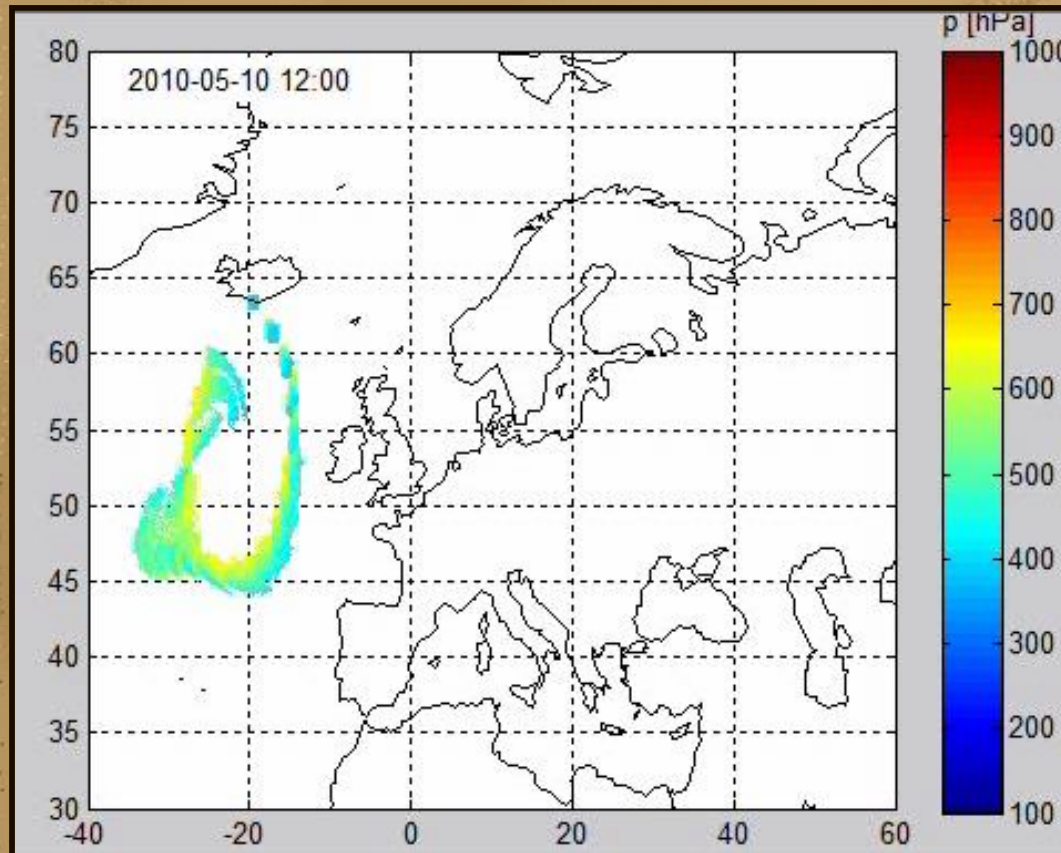
$r = 1 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$

$n = 70 \cdot 1000 \text{ db}$



# Eyjafjallajökull-szimuláció (2010. május 8–19.)

- összehasonlítás műholdas megfigyelésekkel

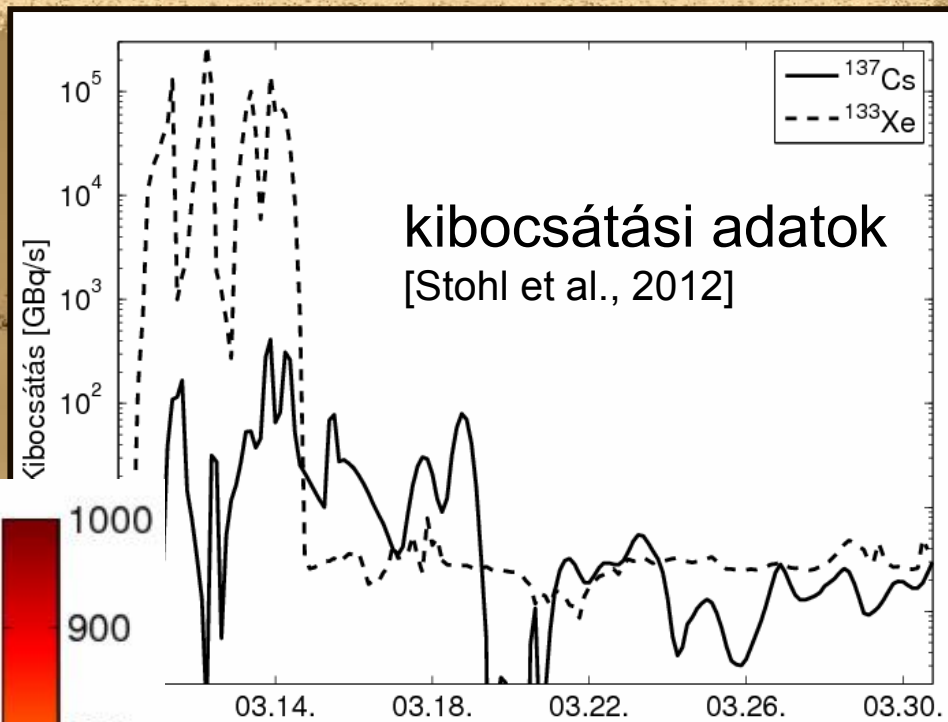
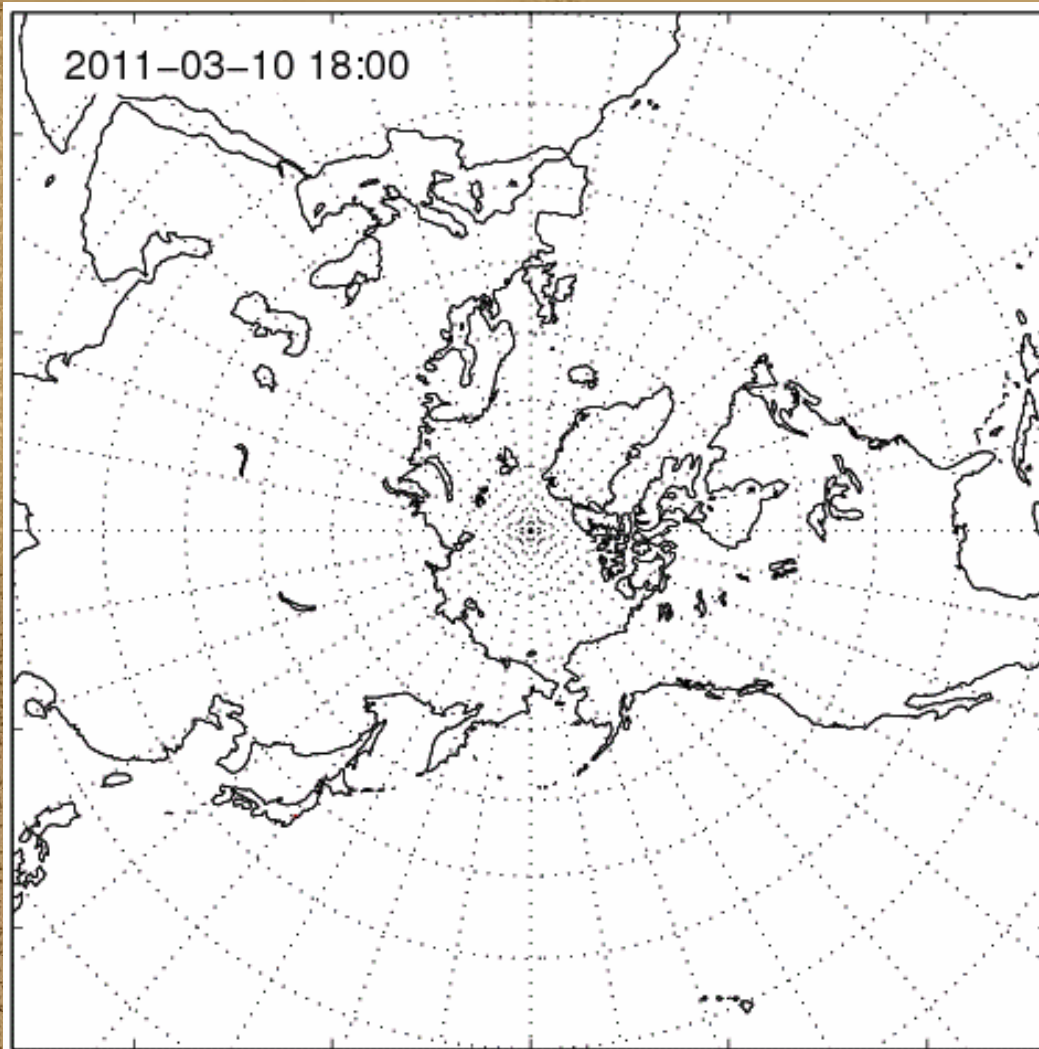


[[http://www.eumetsat.int/Home/Main/Image\\_Gallery/Topical\\_Images/index.htm?l=en](http://www.eumetsat.int/Home/Main/Image_Gallery/Topical_Images/index.htm?l=en)]

T2

# Fukushima-szimuláció

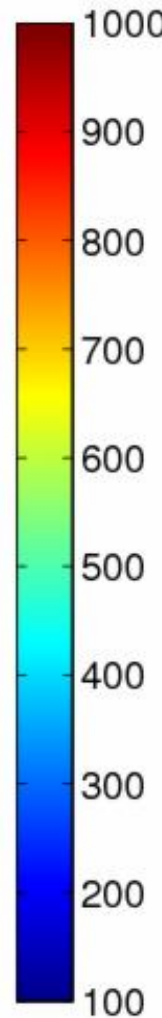
(2011. márc. 10–30.)



$^{137}\text{Cs}$  izotóp ( $\tau = 30$  év)

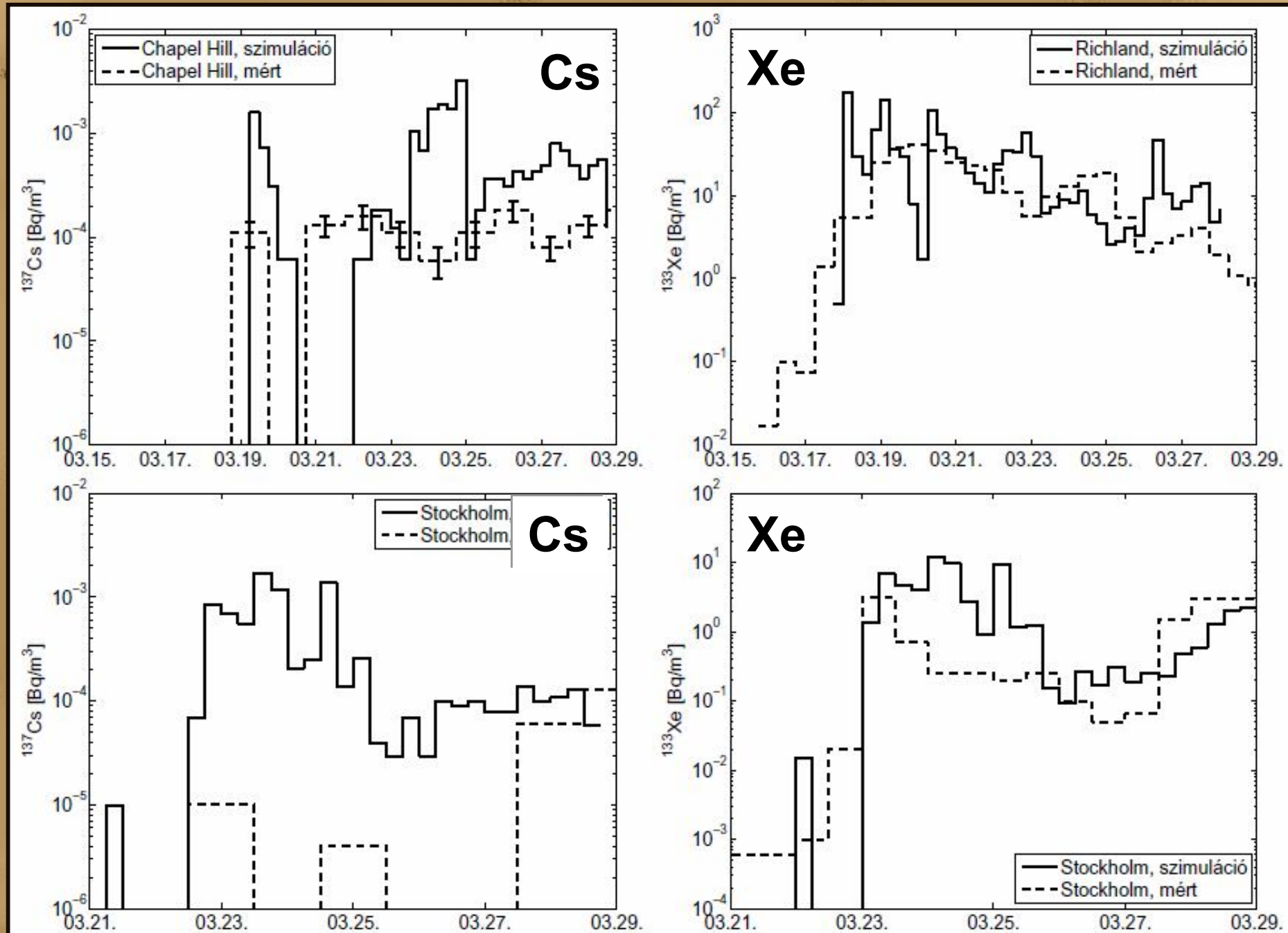
$r = 0,2 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$

$n = 10^6$  db



# Fukushima-szimuláció

Az eredmények összevetése  
mérési adatokkal



# **A meteorológiai mezők bizonytalanságának hatása**

# Ensemble előrejelzések

- *meteorológiai adatok* (a terjedési modell bemenő adatai)
  - ← légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszer numerikus mego.
    - kezdeti feltételek: mérések pontossága, adathiány, hibás adatok, ritka és nem egyenletes eloszlású mérési hálózat
    - meteorológiai modell által figyelembe vett folyamatok, fizikai parametrizációk
    - numerikus közelítések
  - *bizonytalanságok*

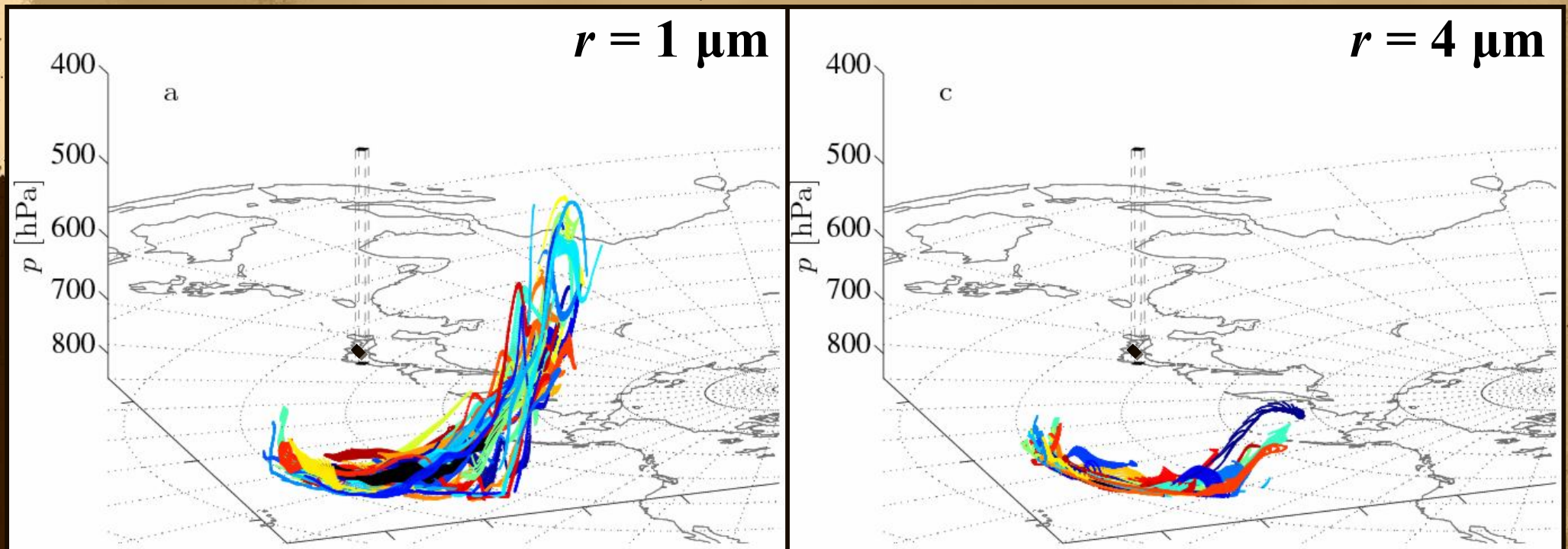


- kis perturbációk → *ensemble (sokasági, valószínűségi) előrejelzés*
  - ECMWF: 50 perturbált tag + 1 kontroll tag
  - nagyfelbontású (determinisztikus) előrejelzés felbontása 2x akkora, mint az ensemble tagoké

# A meteorológiai bizonytalanság szerepe

**fekete:** nagyfelbontású  
**színes:** ensemble tagok

- térbeli eloszlás 2,5 nap elteltével
- 2011. márc. 12. 0 UTC +2,5 nap szélmező
- kezdeti feltételek:
  - $n_0 = 300^2$  db,  $\rho_p = 2000$  kg/m<sup>3</sup>,  $r = 0-10$   $\mu$ m  
**aeroszol részecske**
  - $1^\circ \times 1^\circ$  területen,  $p_0 = 500$  hPa ( $z \approx 5,5$  km)
  - Fukushima fölött:  $\lambda = 141^\circ$ ,  $\varphi = 37,5^\circ$
- **szimulációk:**  
nincs turb. diff.  
nincs csapadék

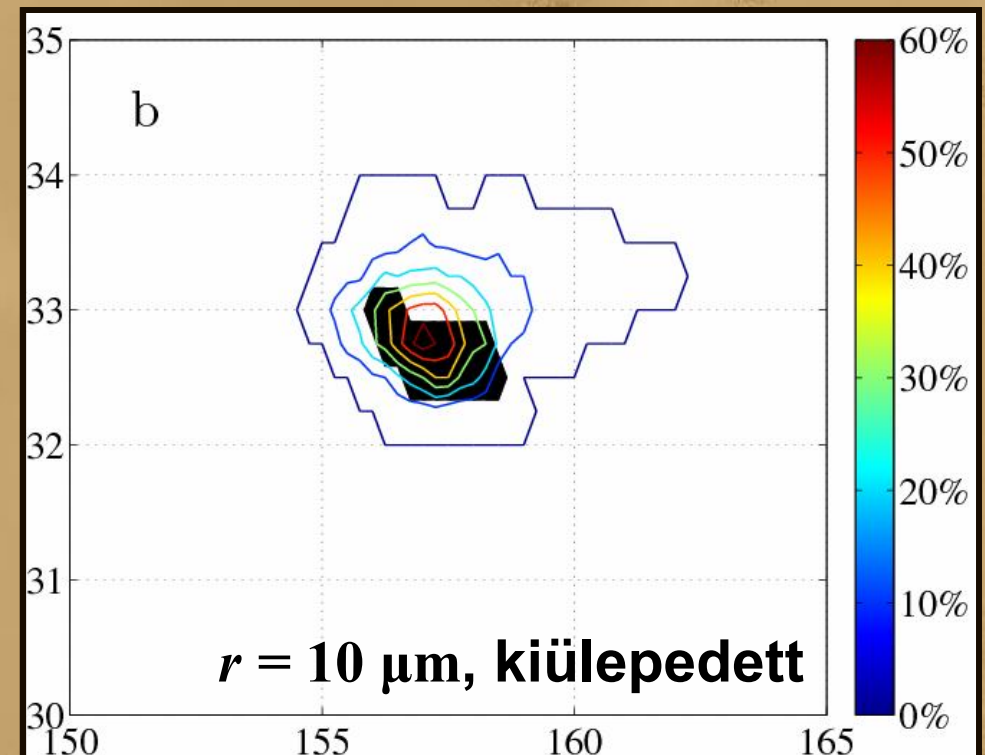
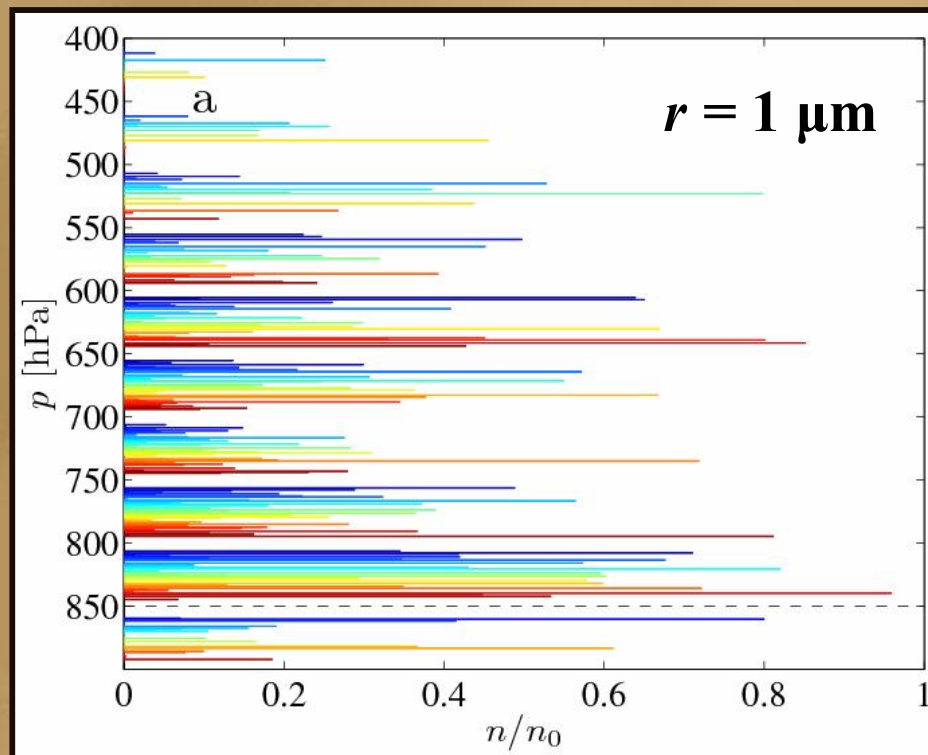




# A meteorológiai bizonytalanság szerepe

**fekete:** nagyfelbontású  
**színes:** ensemble tagok

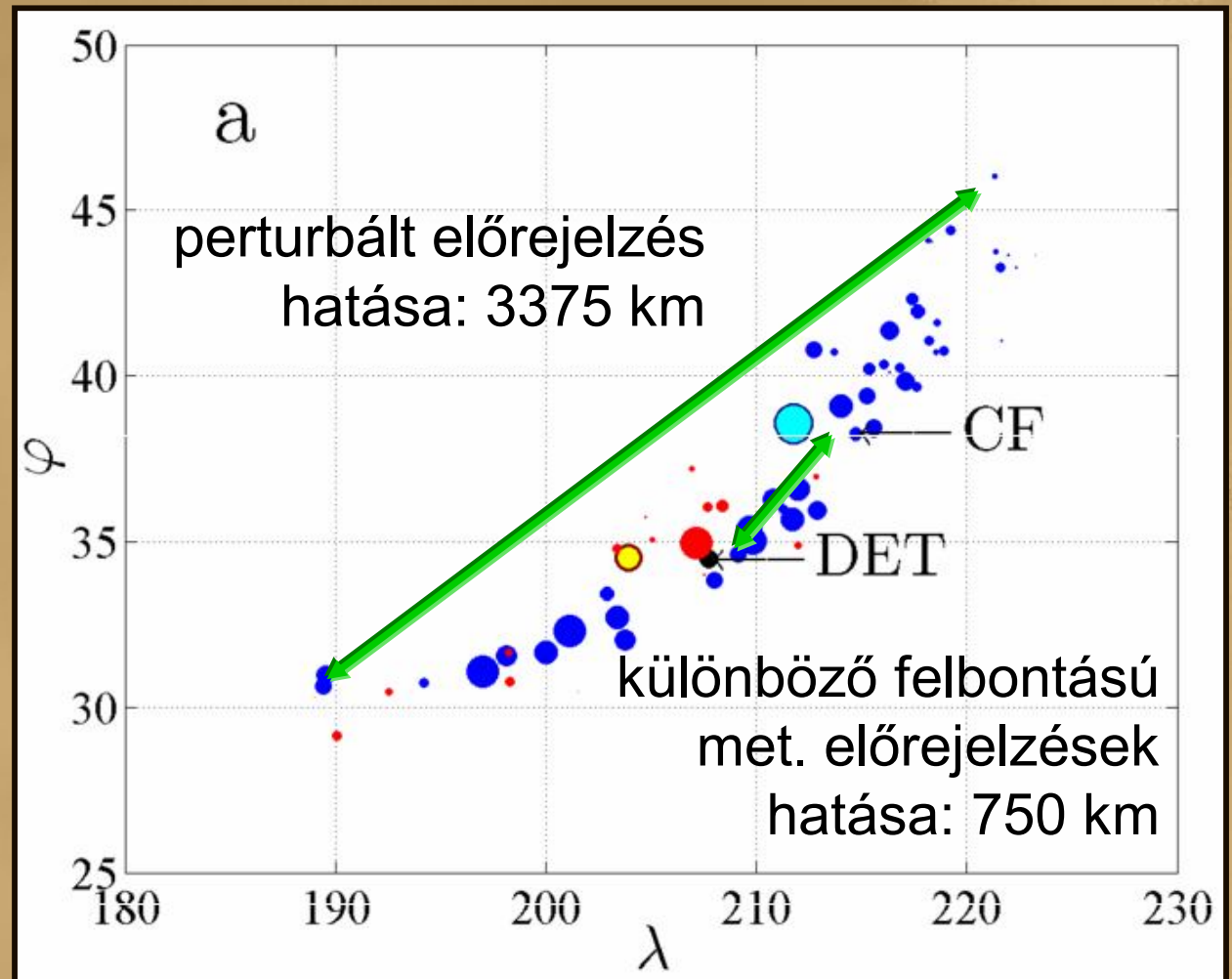
- az ensemble előrejelzés felhői között jelentős függőleges és vízszintes különbségek
- szennyeződésh felhők függőleges eloszlása:
- az ensemble előrejelzés felhői 5–10-szer akkora terület felett terülnek el, mint a nagyfelbontású előrejelzés felhője
- szennyeződésh felhők vízszintes eloszlása:



# A meteorológiai bizonytalanság szerepe: statisztikai jellemzők

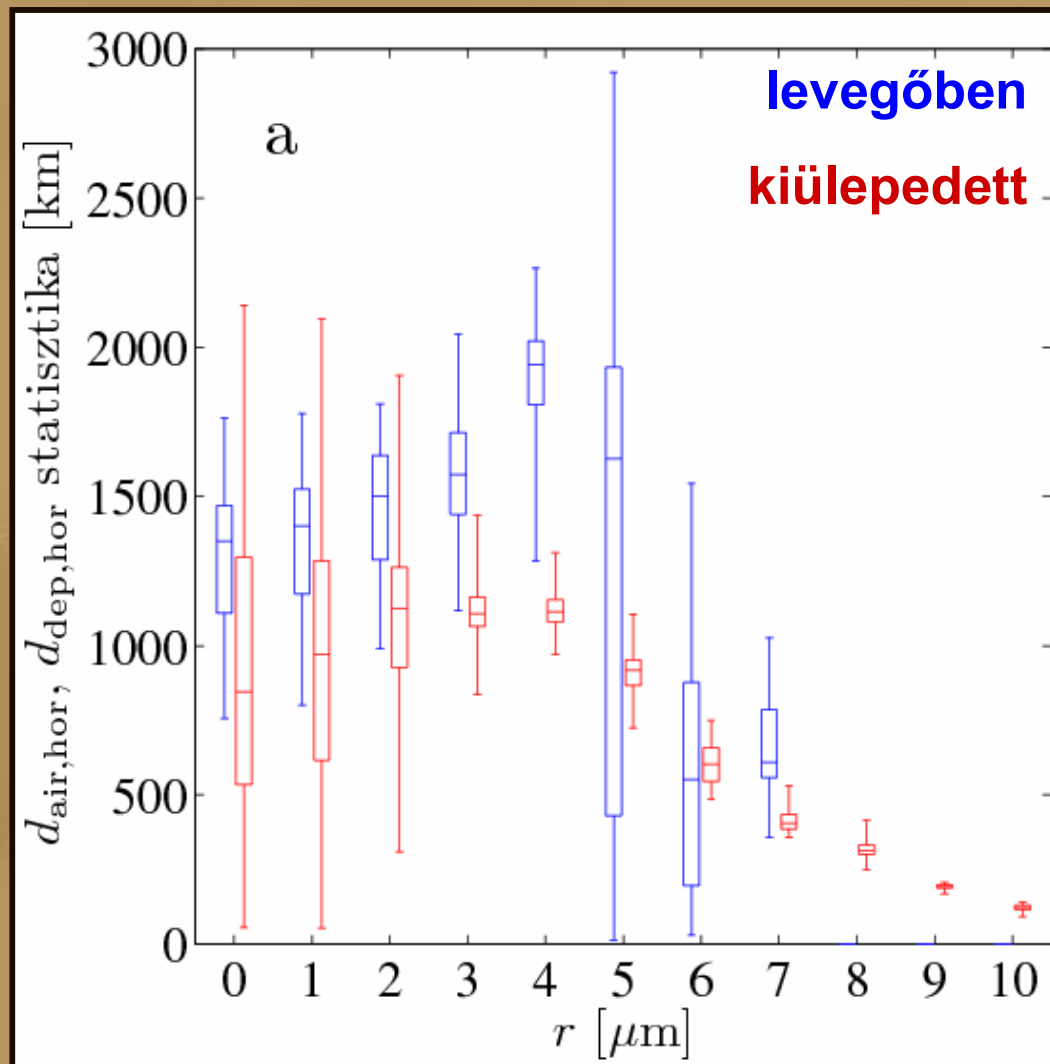
## tömegközéppont, szórás

- az egyes ensemble felhők tömegközéppontja:  
**kék:** levegőben  
**piros:** kiülepedett
- a teljes ensemble előrejelzésre:  
**cián:** levegőben  
**sárga:** kiülepedett
- sugár: arányos (1/70) a részecskék tkp. körüli szórásával  
**35–960 km**



$$r = 1 \mu\text{m}$$

# A meteorológiai bizonytalanság szerepe: statisztikai jellemzők



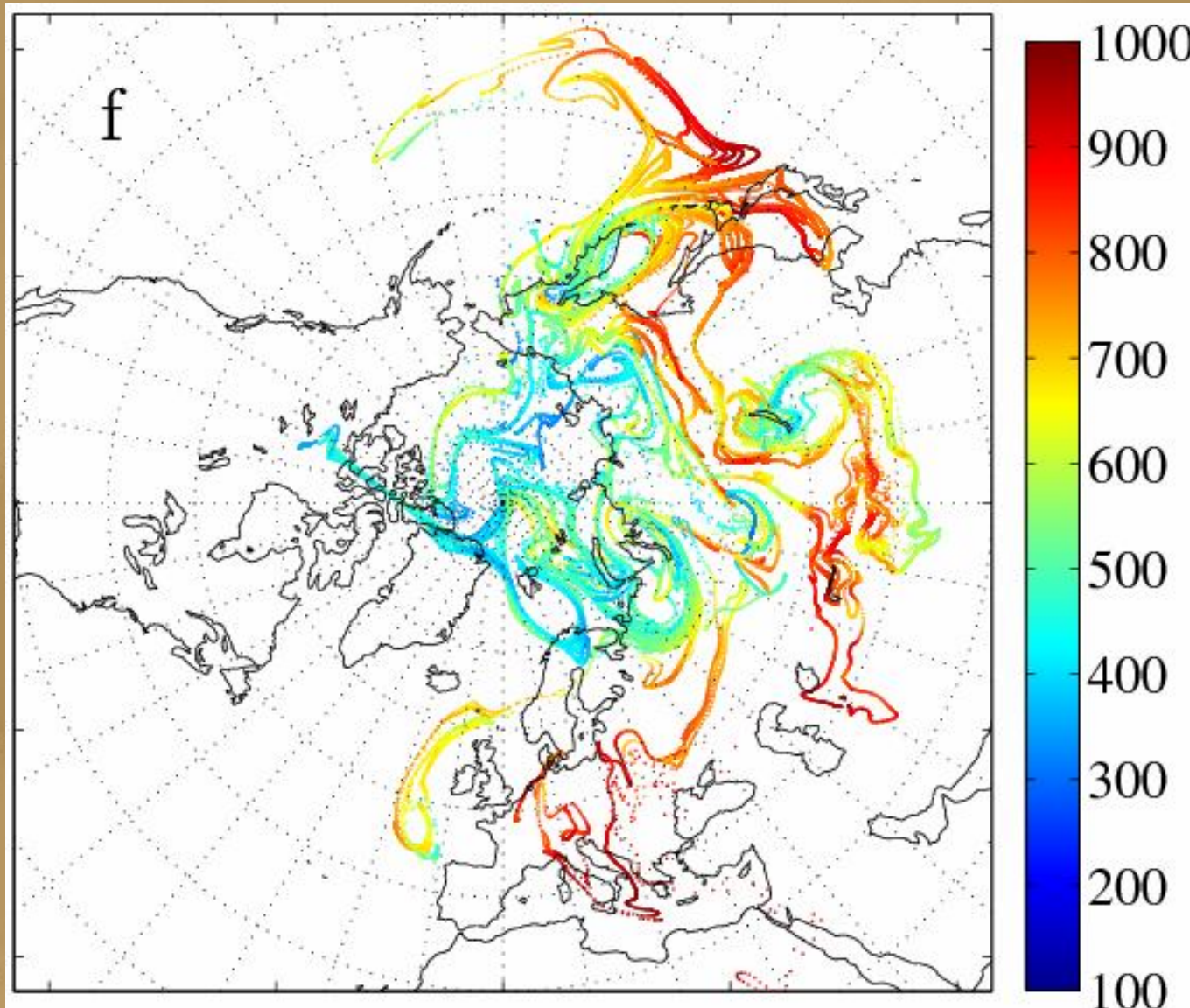
## részecske-hasonmások átlagos négyzetes távolsága

- részecskék saját, a többi ensemble tagban lévő  $\leq 50$  hasonmásától vett átlagos négyzetes távolsága ( $n = 90\,000$  részecskére)
- az eltérés annál nagyobb, minél kisebbek  $r$
- ensemble tagok közötti lagrange-i változékonyság 2–3-szor  $>$  met. előrejelzések változékonyságánál

# **A kaotikus sodródás jellemzői a légkörben**

# A szennyeződésfelhők nyúlása

Esettanulmány (0, 2, 4, 6, 8, 10 nap)



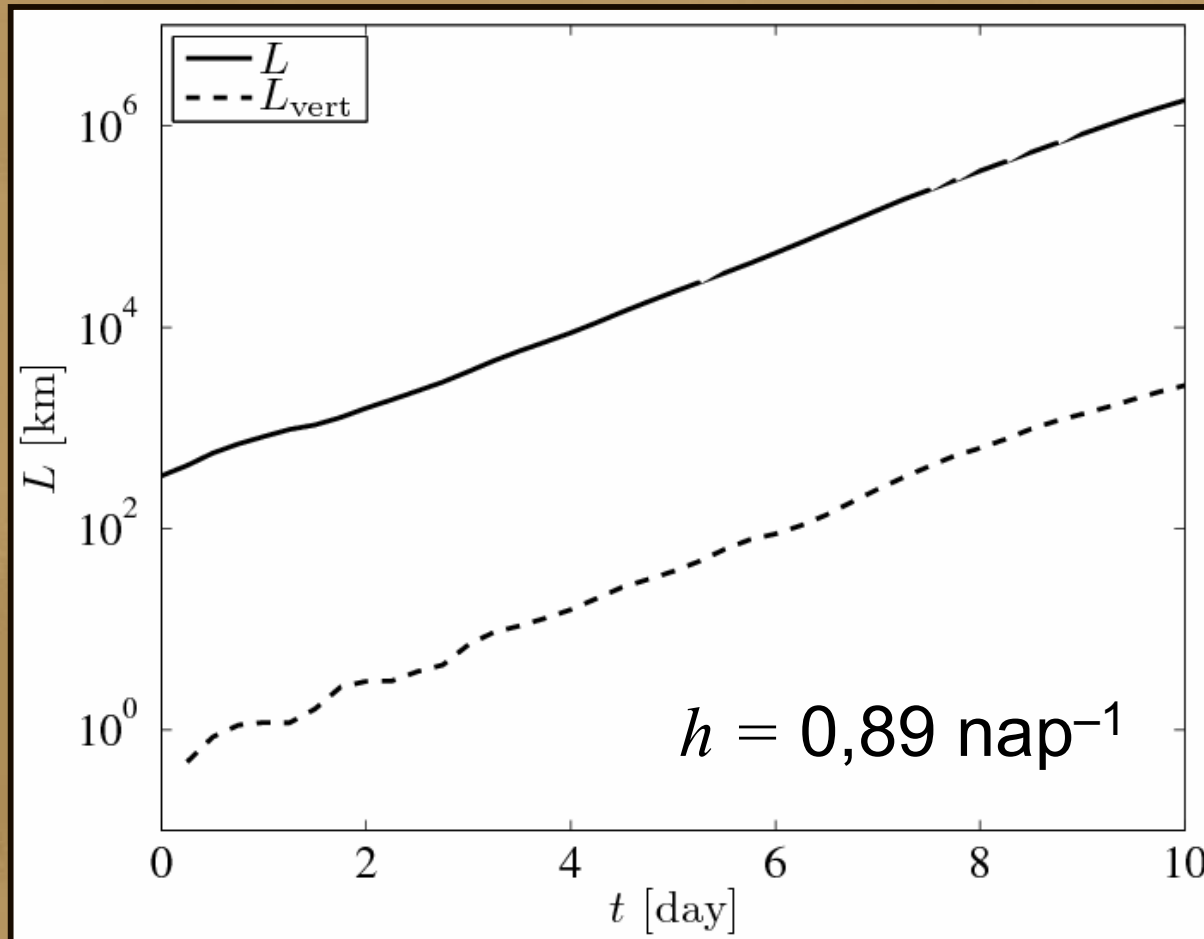
$L_0 = 3^\circ \approx 333$  km  
meridionális vonal-  
darab

$n_0 = 2 \cdot 10^5$  részecske  
 $r = 0$  (gáz, kicsiny  
részecskék)

**szimulációk:**

- nincs turb. diff.
- nincs csapadék

# Topologikus entrópia ( $h$ )



- erősen nyúlik, összegyűrődik

- vonaldarab hossza:

$$L(t) \sim \exp(ht)$$

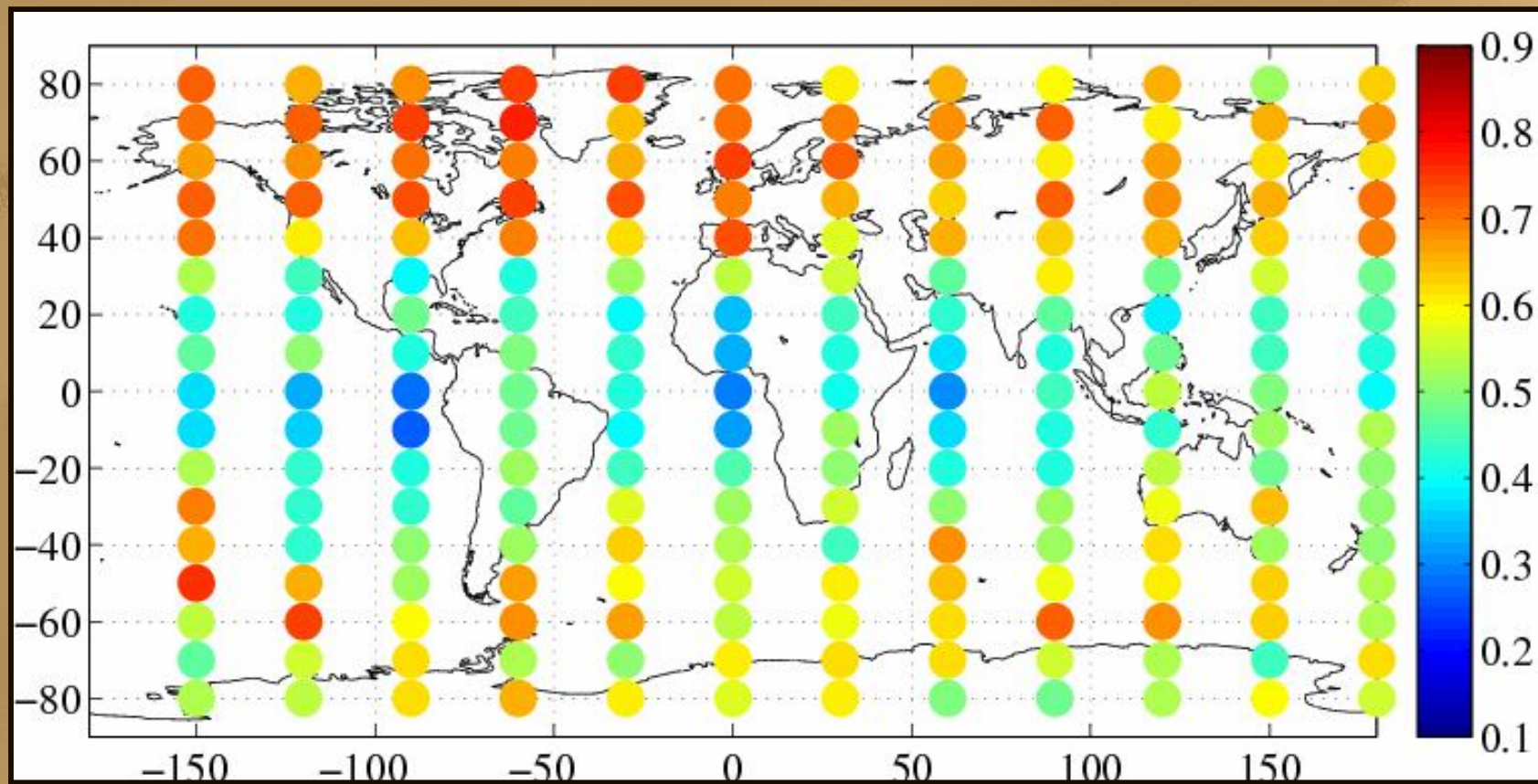
- $h$ : topologikus entrópia

- a kaotikus viselkedés mérőszáma: a bonyolultság, szabálytalanság mértéke

- óceánban [Thiffeault, 2010]

# Topologikus entrópia ( $h$ )

## Földrajzi és évszakos eloszlás



**DECEMBER-FEBRUÁR**

$h$  [nap<sup>-1</sup>] átlag

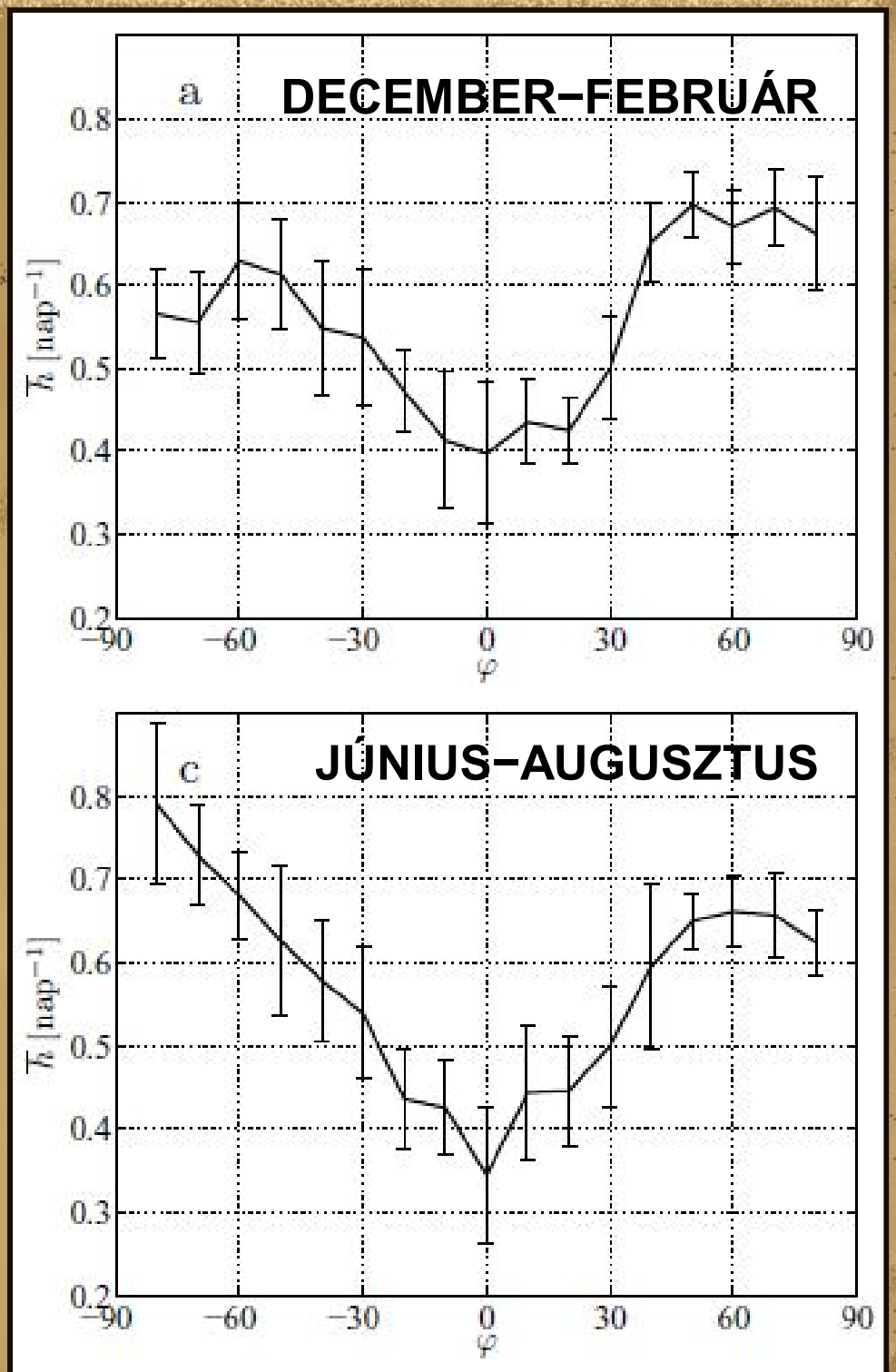
$p = 500$  hPa,  $r = 0$   $\mu$ m,  $L_0 = 3^\circ$

**T5**

# Topologikus entrópia ( $h$ )

## Földrajzi és évszakos eloszlás

- *Legnagyobb* ( $0,6\text{--}0,9 \text{ nap}^{-1}$ )  
közepes szélességeken (főként télen)  
↑  
ciklonok erős keverési és nyírási hatása  
a részecskékre
- *Legkisebb* ( $0,2\text{--}0,5 \text{ nap}^{-1}$ )  
trópusok
- $t = 10 \text{ nap}$   
 $h = 0,65 \text{ nap}^{-1} \rightarrow 670 L_0$   
 $\Delta h = 0,7 \text{ nap}^{-1} \rightarrow 1100 L_{\max}/L_{\min}$

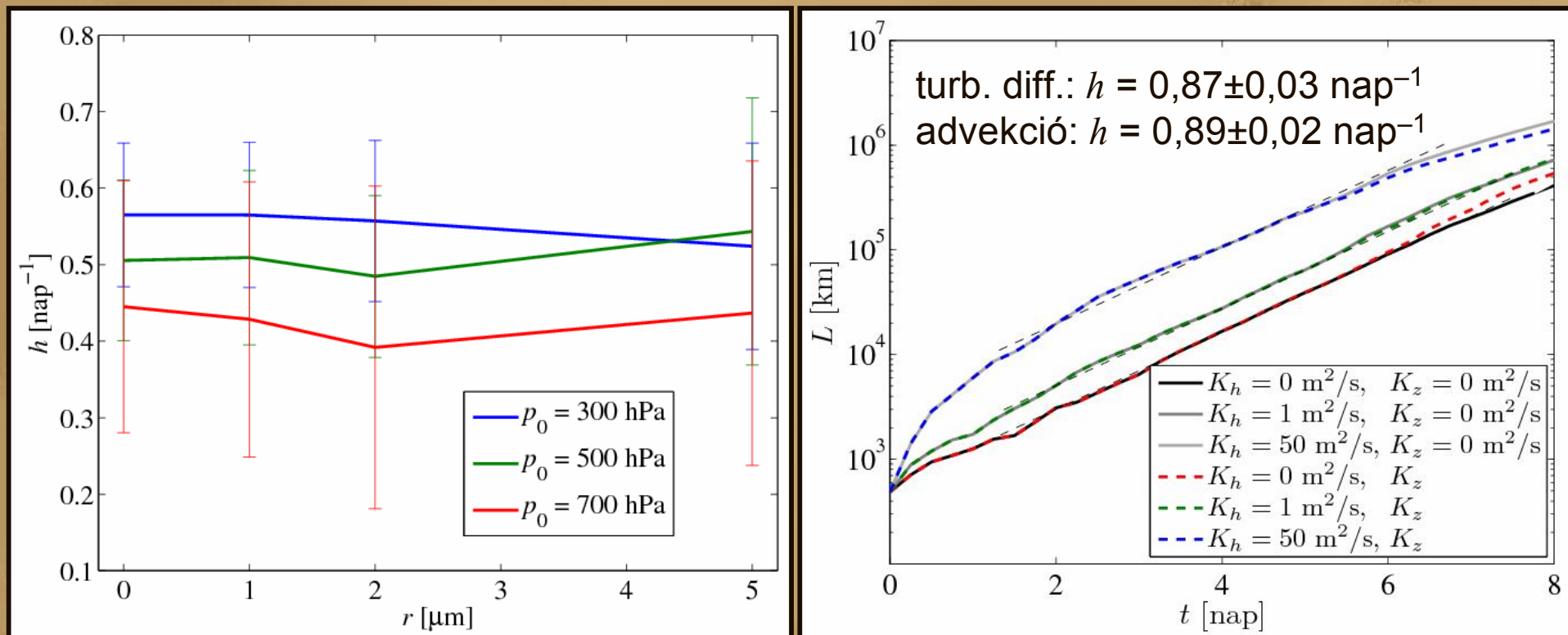




# Topologikus entrópia

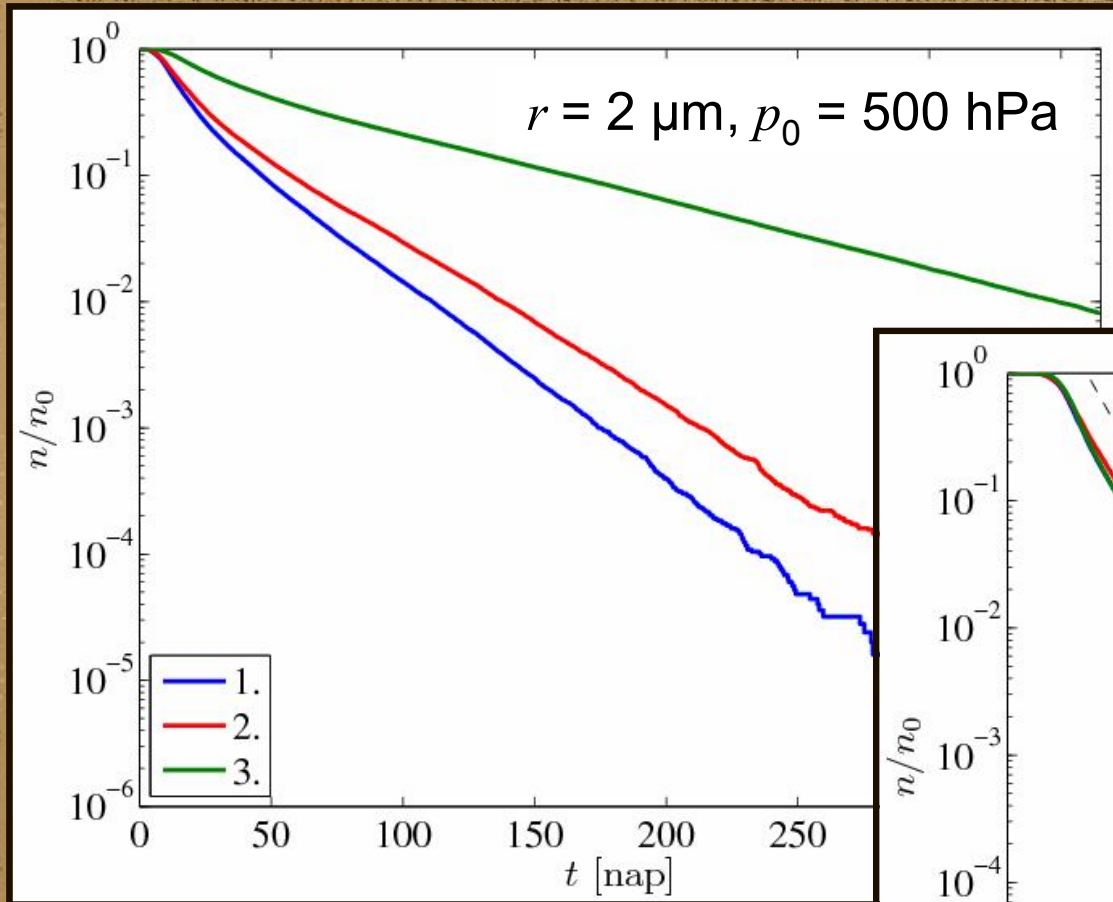
## $h$ függése $r$ -től, $p_0$ -tól, a turbulens diffúzió szerepe

- átlagos  $h$  az  $r$ -től nem függ jelentősen,  $p_0$ -tól kis mértékben függ
- vulkáni hamu terjedésének, szerkezetének jellemzésére
- turbulens diffúzió figyelembevétele nem befolyásolja jelentősen a  $h$  értékét

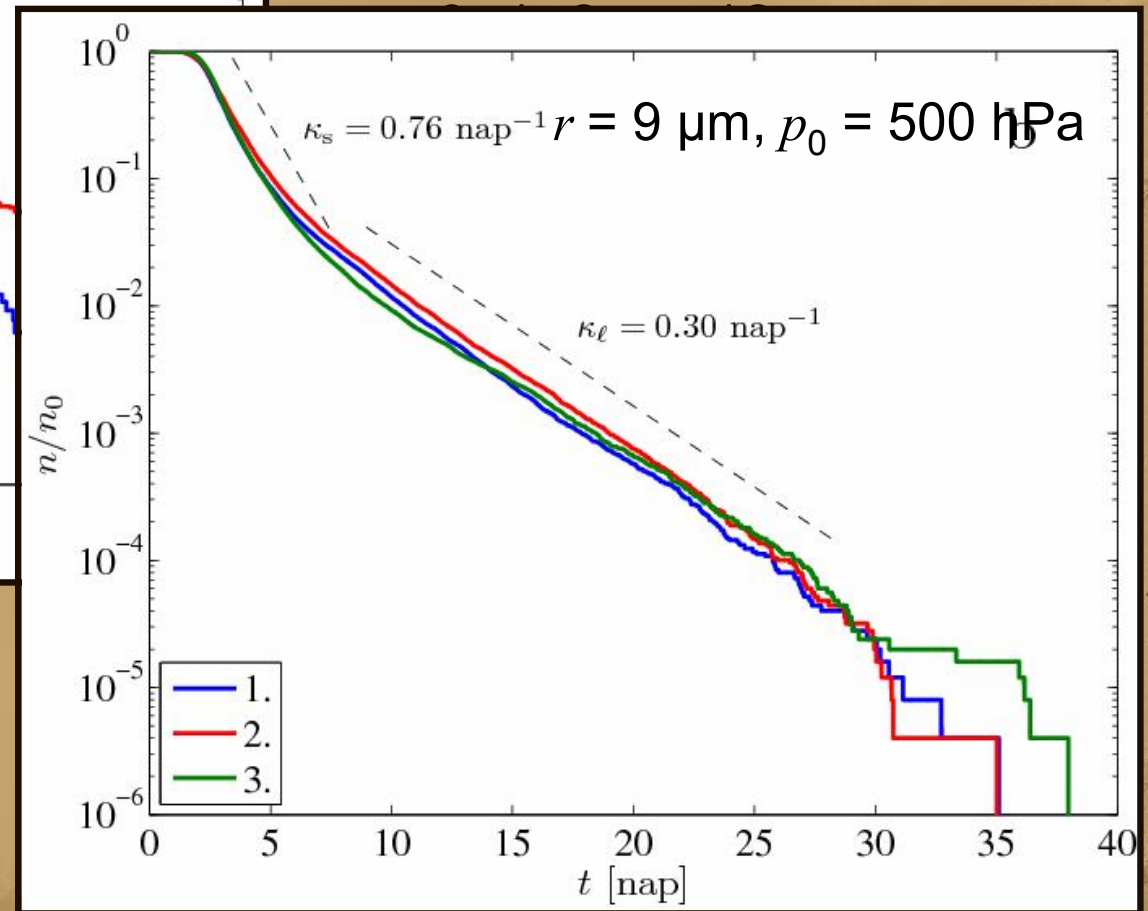


# A részecskék kiülepedésnek üteme

## Szökési ráta ( $\kappa$ )



- $n_0 = 2,5 \cdot 10^5$  részecske
- egyenletes elosztva adott  $p_0$  szinten a légkörben
- $p_0 = 500, 700, 850, 900 \text{ hPa}$



$$\frac{n(t)}{n_0} \sim \exp(-\kappa_s t), \exp(-\kappa_l t)$$

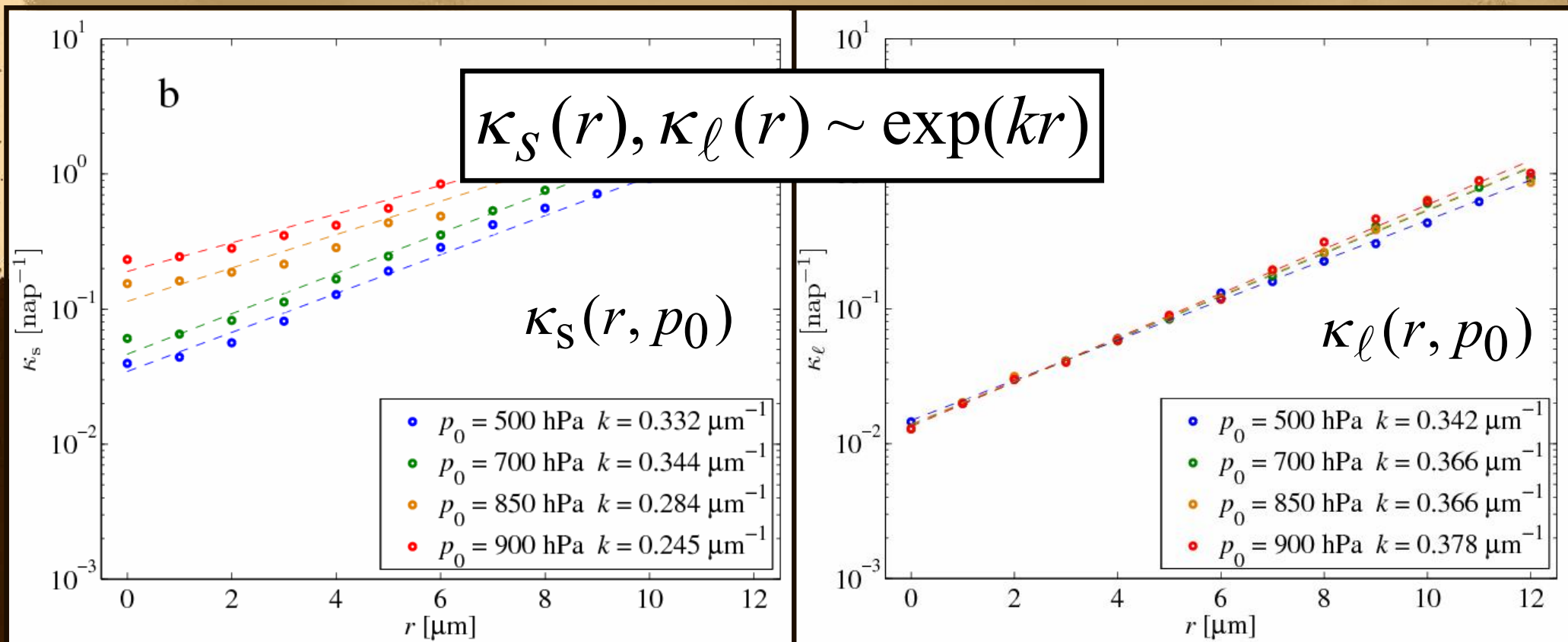
# Szökési ráta ( $\kappa$ )

$\kappa$  függése  $r$ -től és  $p_0$ -tól

$\kappa_S$ : rövidtávú szökési ráta  
a részecskék többségét jellemzi

$$\frac{n(t)}{n_0} \sim \exp(-\kappa_S t), \exp(-\kappa_\ell t)$$

$\kappa_\ell$ : hosszútávú szökési ráta  
a sokáig légkörben maradó  
részecskéket jellemzi  $\rightarrow$  jól  
elkeveredtek már



# Szökési ráta ( $\kappa$ )

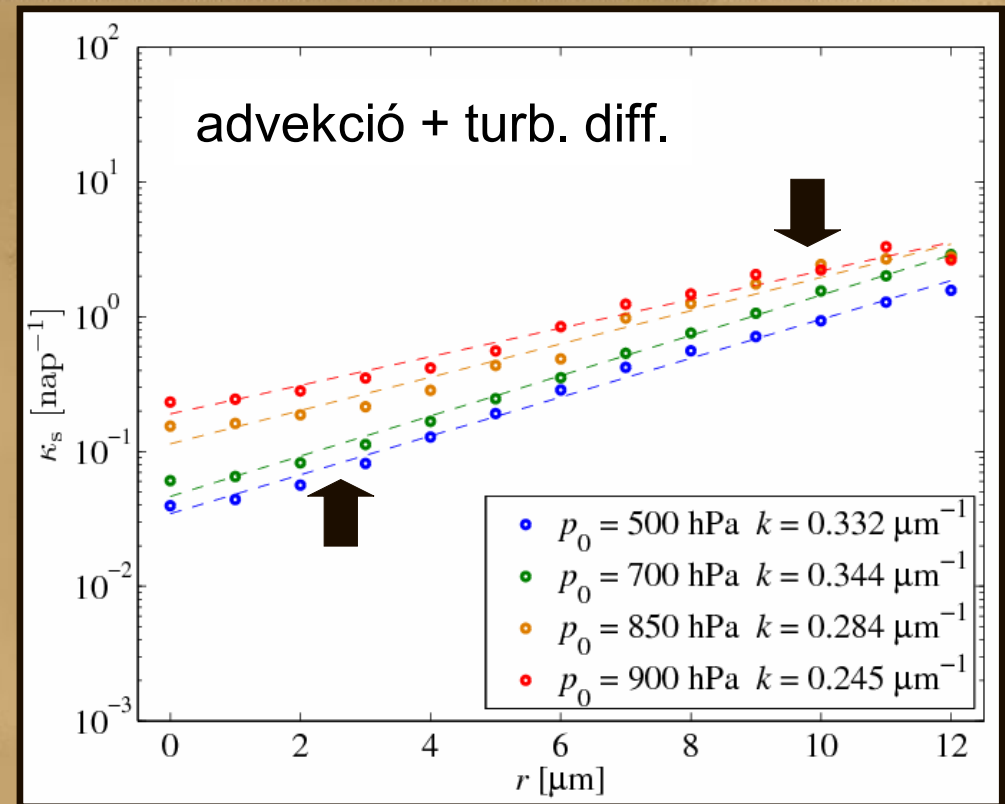
## $\kappa$ függése $r$ -től

- *legnagyobb:*  
ha se csap., se turb. diff.
- *legkisebb:*  
ha van csap., turb. diff.
- **csapadék**  $\rightarrow \kappa(r)$  nő minden  $r$ -re
- **turbulens diffúzió:**  
 $r < 5 \mu\text{m} \rightarrow \kappa(r)$  nő  
 $r \approx 5\text{--}10 \mu\text{m} \rightarrow \kappa(r)$  csökken



$\partial K_z / \partial z$  (turbulens advekció)  
előjele és nagysága

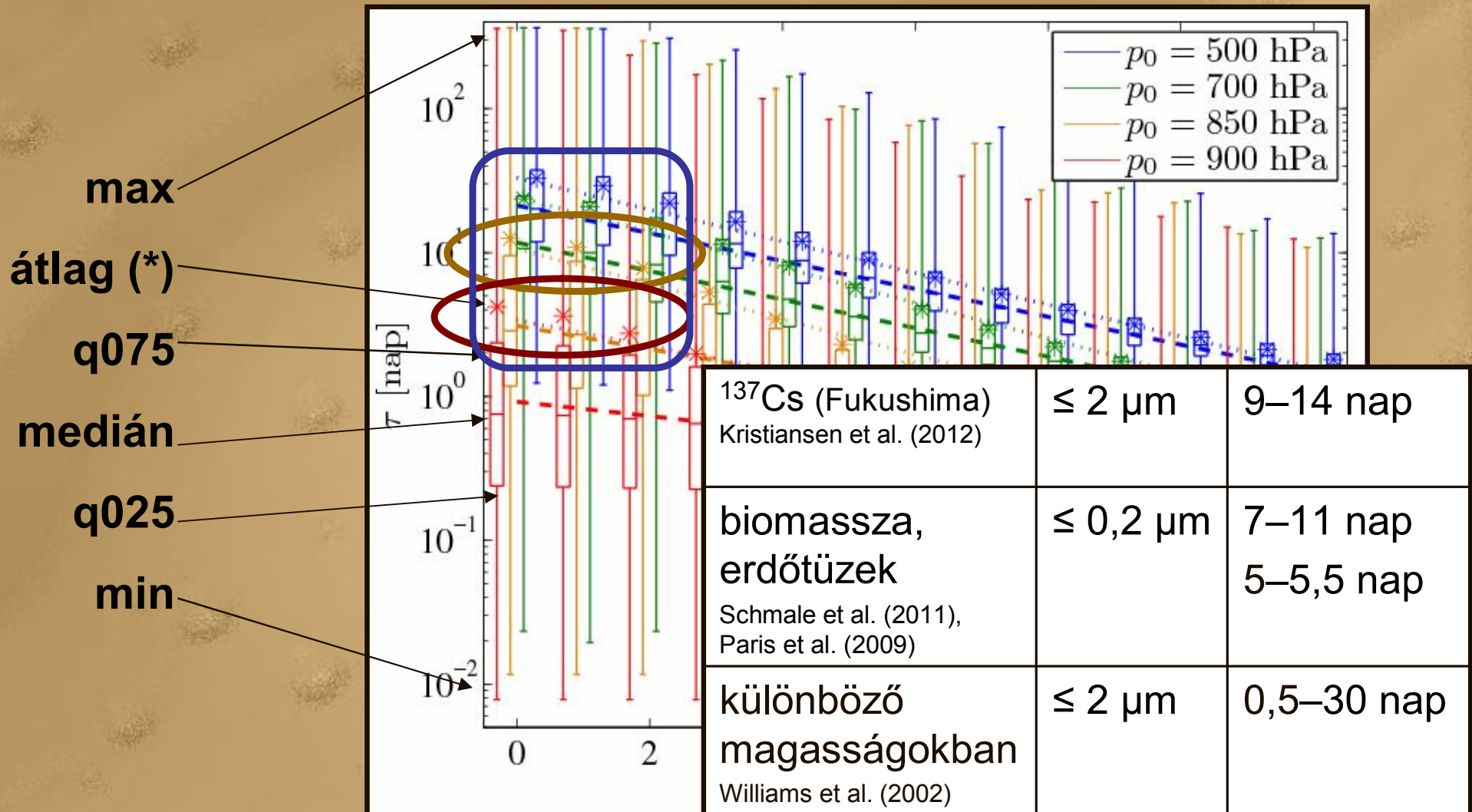
$$\frac{n(t)}{n_0} \sim \exp(-\kappa_S t), \exp(-\kappa_\ell t)$$



$$\kappa_S(r), \kappa_\ell(r) \sim \exp(kr)$$

# Tartózkodási idő ( $\tau$ ) a káosz átlagos élettartama

$\tau$  a magassággal nő  
 $\tau \sim \exp(-kr)$  és  $\tau \approx 1/\kappa_s$



# Összefoglalás

1. a RePLaT lagrange-i terjedési modell kidolgozása  
a RePLaT egyedi részecskék mozgását határozza meg →  
alkalmas a sodródás dinamikai rendszerek szemléletében, a  
**kaotikus viselkedés** szempontjából való tanulmányozására is
2. a modell tesztelése az Eyjafjallajökull vulkán és a fukushimai  
baleset esetén
  - *Haszpra, T., Tél, T. (2011): Volcanic ash in the free atmosphere: A dynamical systems approach. Journal of Physics: Conference Series, 333, 012008.*
  - *Haszpra T. (2013): Világjáró részecskék a légkörben – Az Eyjafjallajökull vulkán kitörésének és a fukushimai balesetnek a tanulságai. Természet Világa, 144, Káosz, környezet, komplexitás különszám, 67–72.*

# Összefoglalás

3. a felhasznált meteorológiai mezőkben rejlő bizonytalanságok hatása a terjedési számításra (ensemble előrejelzés)


- Haszpra, T., Lagzi, I., Tél, T. (2013): Dispersion of aerosol particles in the free atmosphere using ensemble forecasts. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **20**, 5, 759–770.

4–5. a szennyeződéshők nyúlását jellemző **topologikus entrópia**

- Haszpra, T., Tél, T. (2013): Topological entropy: a Lagrangian measure of the state of the free atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **70**, 12, 4030–4040.

6–7. a részecskék kiülepedésének ütemét leíró **szökési ráta**

- Haszpra, T., Tél, T. (2013): Escape rate: a Lagrangian measure of particle deposition from the atmosphere. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **20**, 5, 867–881.

A satellite image of the Iberian Peninsula, showing the landmass in shades of green and brown against the dark blue of the surrounding ocean. A small red dot is visible on the southwestern coast of the peninsula. The text 'Köszönöm a figyelmet!' is overlaid in the bottom left corner.

**Köszönöm  
a figyelmet!**