A légköri távkapcsolatok nyomában sokasági éghajlati szimulációkkal

Haszpra Tímea

ELTE Elméleti Fizikai Tanszék
[MTA–ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport]

Herein Mátyás, Drótos Gábor, Márfy János, Tél Tamás (NAO)

Herein Mátyás, Topál Dániel (AO)

Készült a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, az NKFIH PD-121305, PD-124272 és FK-124256 pályázatok és az Emberi Erőforrások Minisztériuma NTP-NFTÖ-18 és ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával.

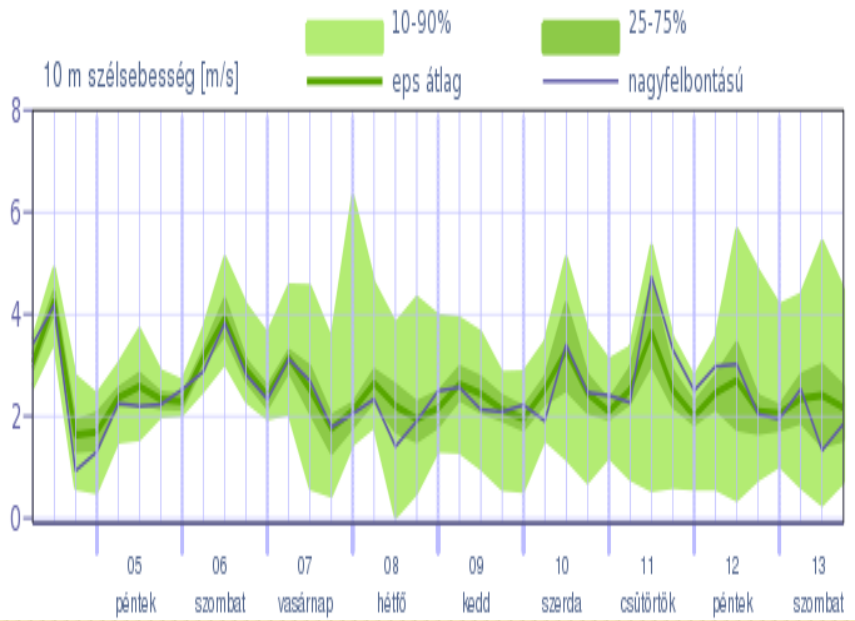
2018. október 11. MMT LDSZO

Sokasági éghajlati szimulációk

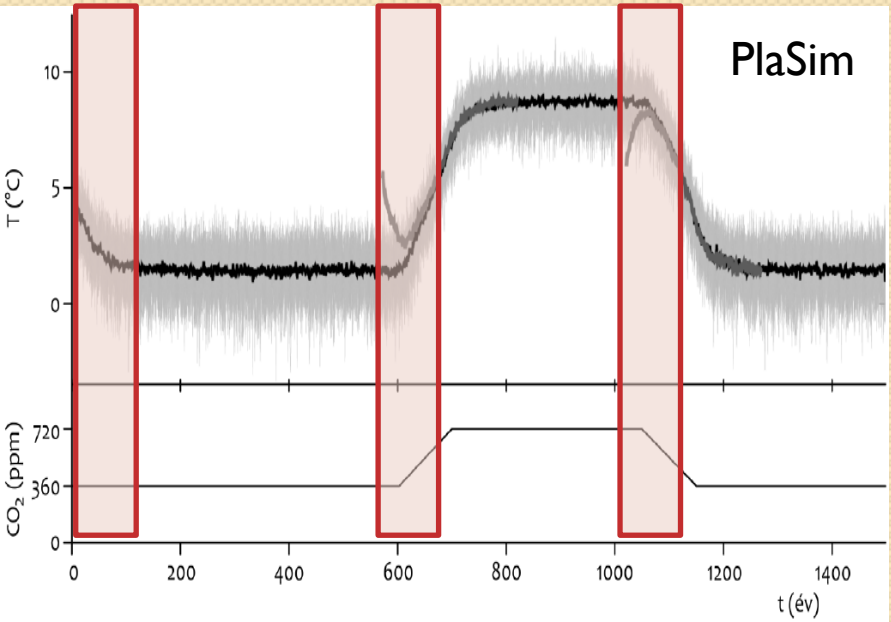
- másképp: ***párhuzamosan éghajlati realizációk /párhuzamos klímatörténetek/***
- egyre szélesebb körben alkalmazzák az éghajlatváltozás vizsgálatára

- a sokaság egyes tagjai ***különböző kezdeti feltételekből*** indulnak
- ugyanazon fizikai törvények és kényszerek hatnak rájuk
- ~ az időjárás-előrejelzésben használt valószínűségi előrejelzések, de itt azt az időszakot vizsgáljuk, amikorra a tagok már „elfelejtették" a kezdőfeltételeiket (***konvergenciaidő***)

Valószínűségi előrejelzés



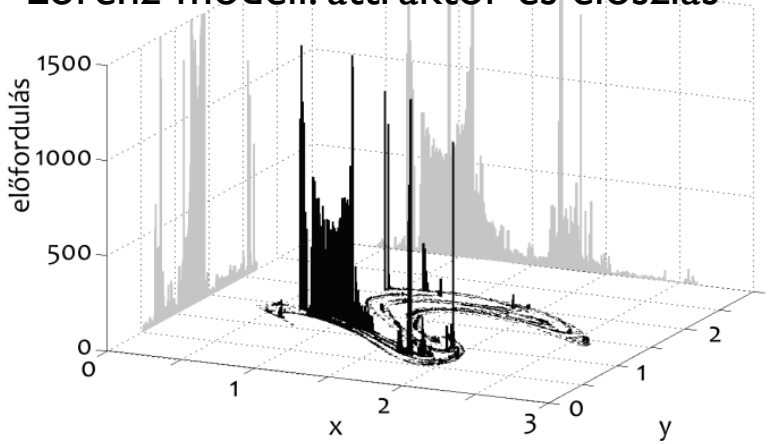
Sokasági éghajlati szimulációk



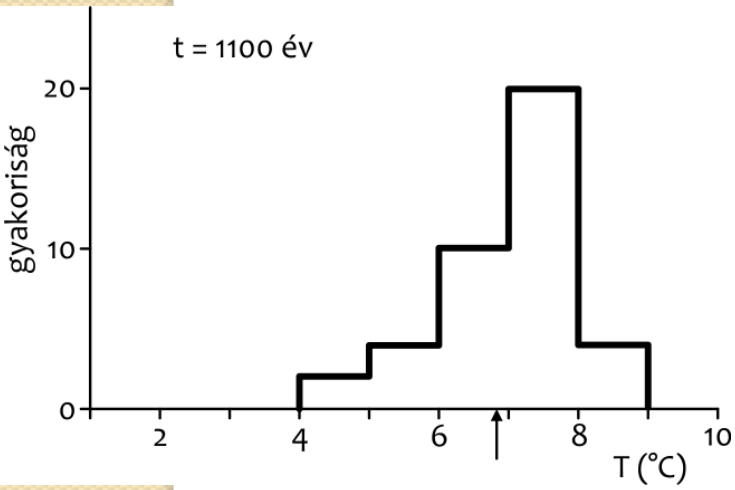
a megfigyelthez közeliek	**kezdeti feltételek**	„tetszőlegesek”
kezdőpillanattól számított napok/hetek	**időskála**	kezdőpillanat után eltelt évek/ évtizedek utáni évek/évtizedek
egyre szélesebb sáv [növekvő bizonytalanság, szórás]	**tagok eloszlása**	a konvergenciaidő után a tagok jól jellemzik a lehetséges **éghajlati állapotok összességét** [a szélesedés nem tart örökké, a szórás véges, a szélesedés bekonvergál]

Sokasági éghajlati szimulációk

Lorenz-modell: attraktor és eloszlás



PlaSim: lokális hőmérsékleteloszlás



- a konvergenciaidő elteltével a sokaság tagjai egy valószínűségi eloszlást definiálnak: jól jellemzik a lehetséges **éghajlati állapotok összességét**: ezeket az éghajlati adatokat használjuk csak fel
- konvergencia a lehetséges éghajlati állapotokhoz → **attraktor (időfüggő)**
  - az éghajlat belső változékonyságának kifejeződése
  - mérete **véges** → egyik mennyiség sem eshet véges intervallumon kívülre
  - attraktoron való **valószínűségi eloszlás**: milyen valószínűséggel fordulnak elő a párhuzamos realizációk, mi tekinthető jellemzőnek, mekkora eltérések várhatók
  - precíz matematikai igazolása: **pillanatkép-attraktorok** elmélete (snapshot/pullback attractors) [Ghil 2008]

Sokasági éghajlati szimulációk vs. egyedi idősorok

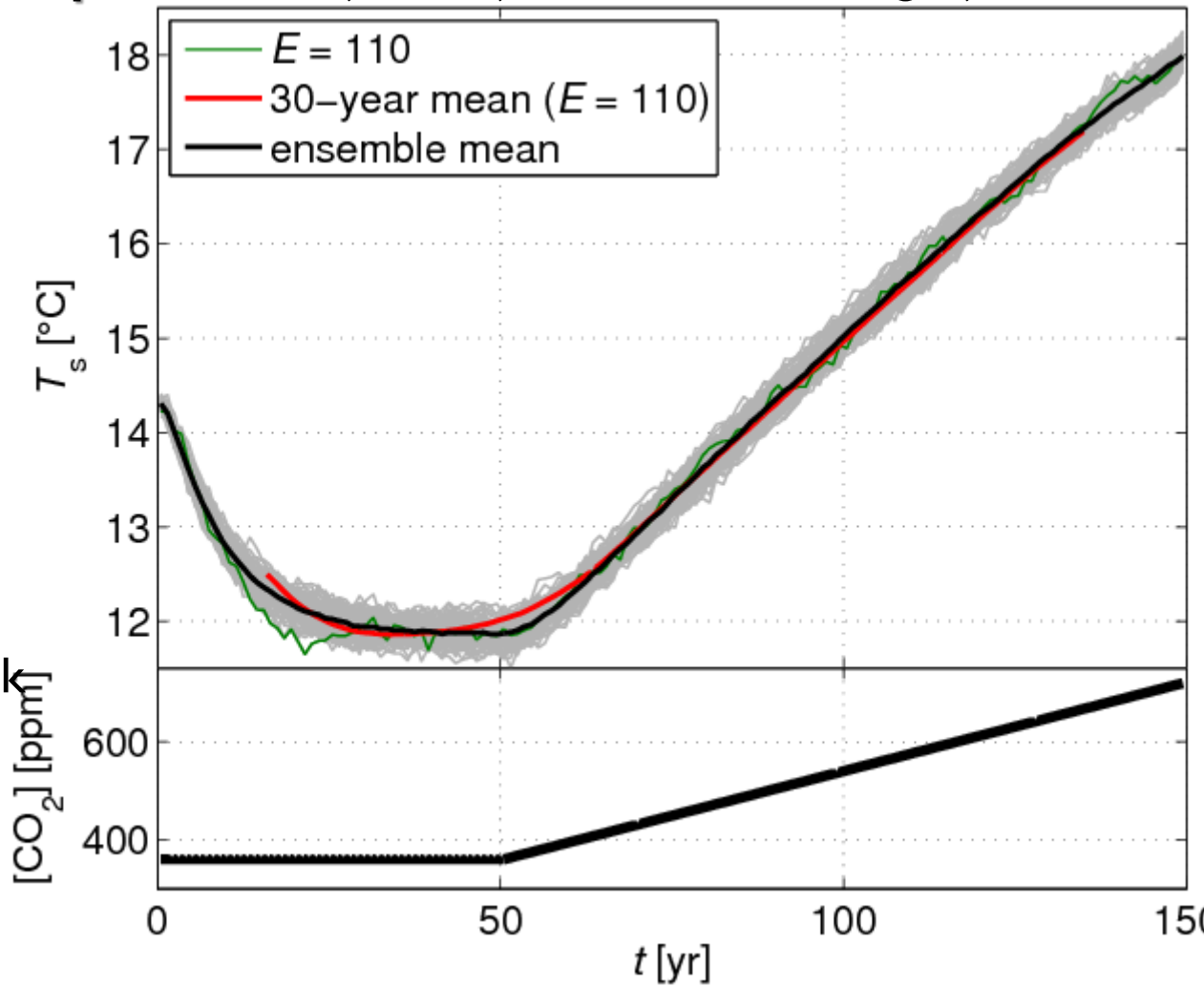
a statisztikák pontosíthatók az elemszám növelésével

a statisztikák függnek a választásoktól

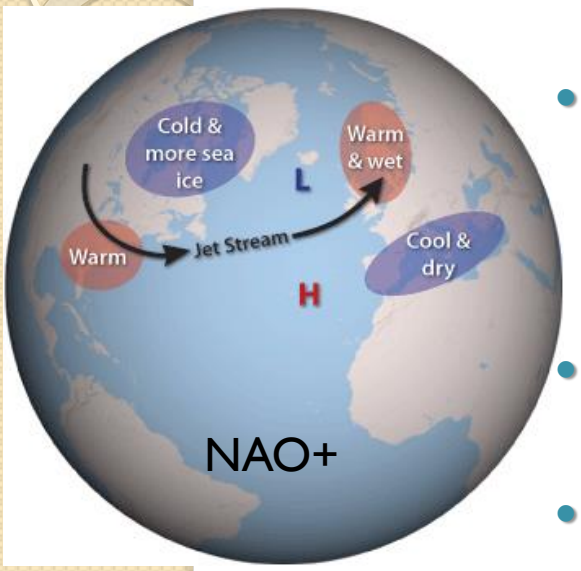
Sokasági szimulációk		Egyedi idősorok
adott **időpontban** sokaságátlag és a sokasági szórás segítségével, **a szórás mindig véges!**	**trend és belső változékonyság**	trendfüggvény? (pl. lineáris, másodrendű, stb.) mozgóátlaghoz időablak? referenciaidőszak?
adott időpontban sokaságátlag és a sokasági szórás segítségével **(egyértelmű, objektív)**	**detrendálás**	detrendálási módszer? (pl. lineáris, másodrendű, stb.) szezonalitás, stb. kiszűrése **(szubjektív)**
minden egyes időpontban számítható → időfüggés megadható	**korreláció 2 változó között**	időintervallumra számítható → időfüggés csak kisebb időintervallumokra osztással adható

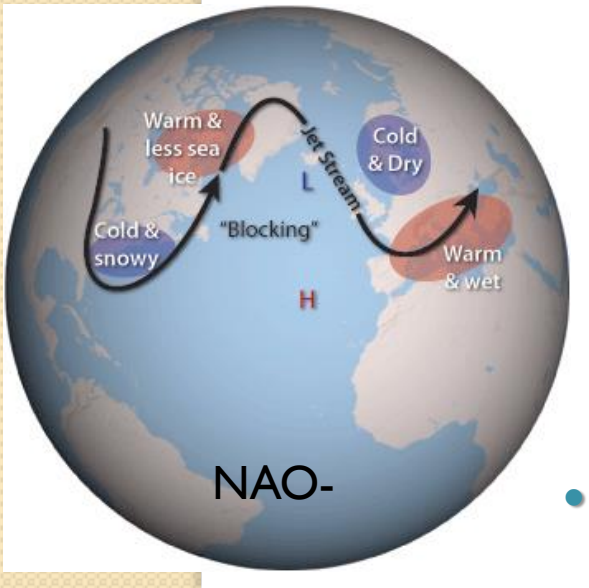
Sokasági éghajlati szimulációk vs. egyedi idősorok

- **sokaság adott időpillanatban** jobban jellemzi a várható éghajlatot, mint bármelyik egyedi realizáció értéke
- időbeli átlag ≠ sokaságátlag
- ***szórás: nem*** a szimulációk ***hibáját*** jellemzi, hanem a lehetséges éghajlati állapotok ***eloszlását***



Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)





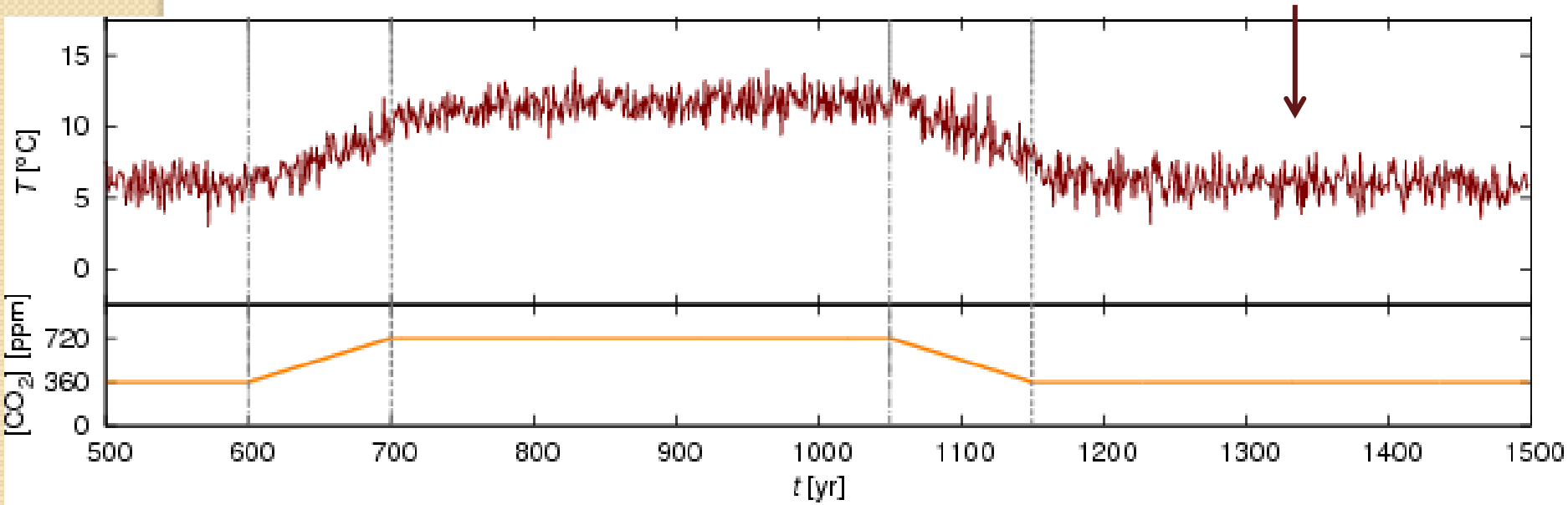
- **North Atlantic Oscillation**: az izlandi alacsony nyomású és az azori magas nyomású rendszer közötti **nyomáskülönbség ingadozása** (kapcsolat az égh. belső változékonyságával) [Hurrell 1995]
- **NAO-index**: a NAO fázisait írja le, több definíció, a nyomáskülönbség fluktuációin alapul
- **NAO+**: (a jelenlegi tapasztalatok alapján)
  - az átlagosnál erősebb szubtrópusi magas nyomású kp. és az átlagosnál mélyebb izlandi minimum
  - magasabb hőmérséklet Skandináviában és az USA keleti részén
  - alacsonyabb hőmérséklet a Mediterrán térségben és Grönlandon
  - több csapadék Skandináviában
  - kevesebb csapadék a Mediterrán térségben
- **NAO-**: ellenkezőleg

Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

- modell: Planet Simulator (**PlaSim**, [Fraedrich et al. 2005])
  - közepes összetettségű globális éghajlati modell
  - T21 felbontás (~5.625°), 10 σ-szint
  - CO_2 időfüggése előírható: 1500 év 360 → 720 → 360 ppm
  - sokaság: 192 tag

[Herein et al. 2017]

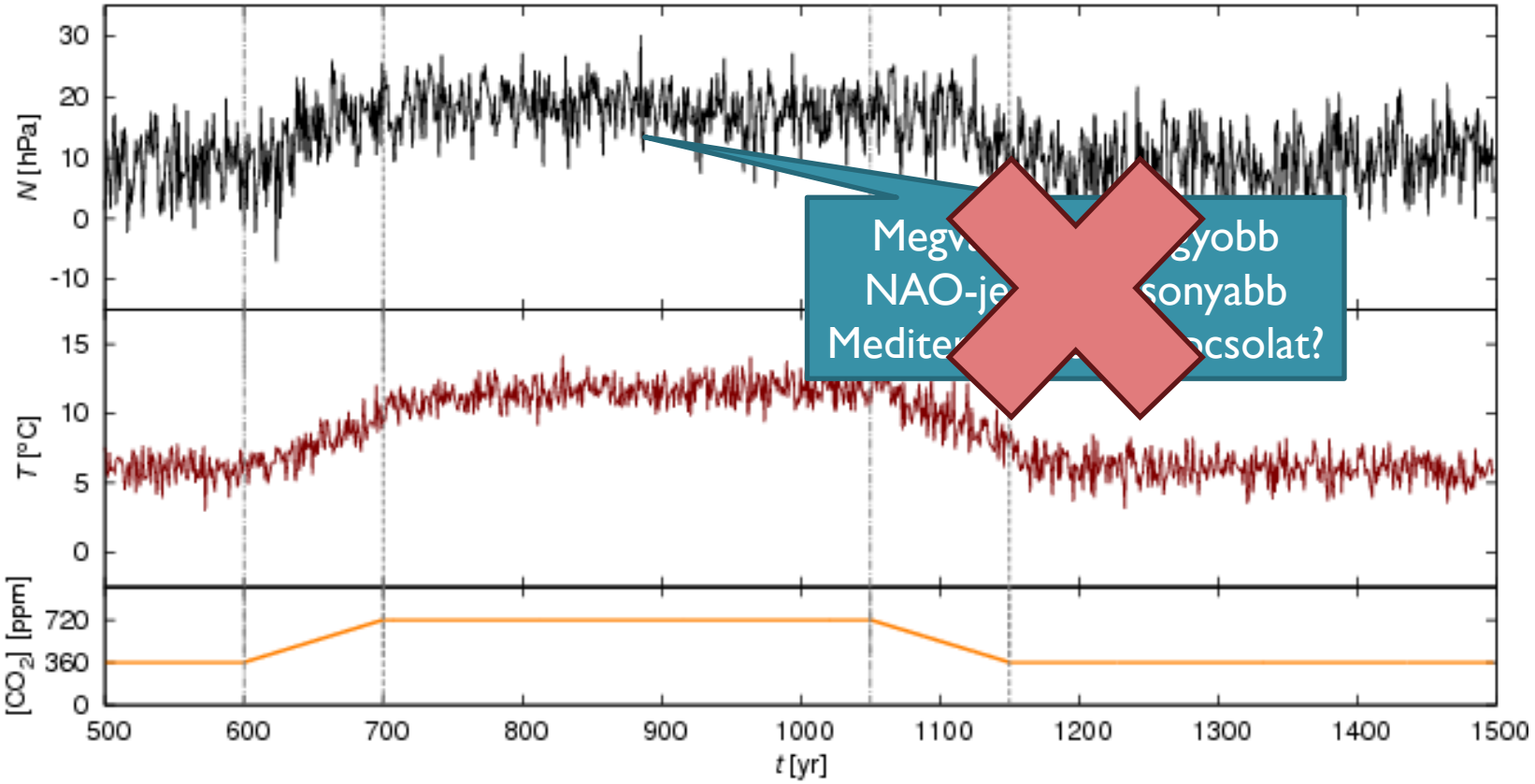
i = 7 Mediterrán DJF felszínhőmérséklet



Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

- **használt NAO-jel**: $N(t) = \mathrm{SLP}_{\mathrm{Azori}}(t) - \mathrm{SLP}_{\mathrm{Izland}}(t)$
- [nem a hagyományos definíció: nem normalizált! ← „hosszú idejű” átlag és szórás lenne hozzá szükséges, de közben változik az éghajlat… éppen ezt a szubjektivitást szeretnénk kiküszöbölni]

i = 7 Mediterrán DJF felszínhőm. (*T*) és NAO-jel (*N*)



Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

A detrendálás szükségessége

- naiv következtetés: **változik** az N-T kapcsolat égh. vált. esetén: nagyobb N – magasabb T (r > 0)
  [←→ égh. vált. előtt: magasabb N – alacsonyabb T (r < 0)]

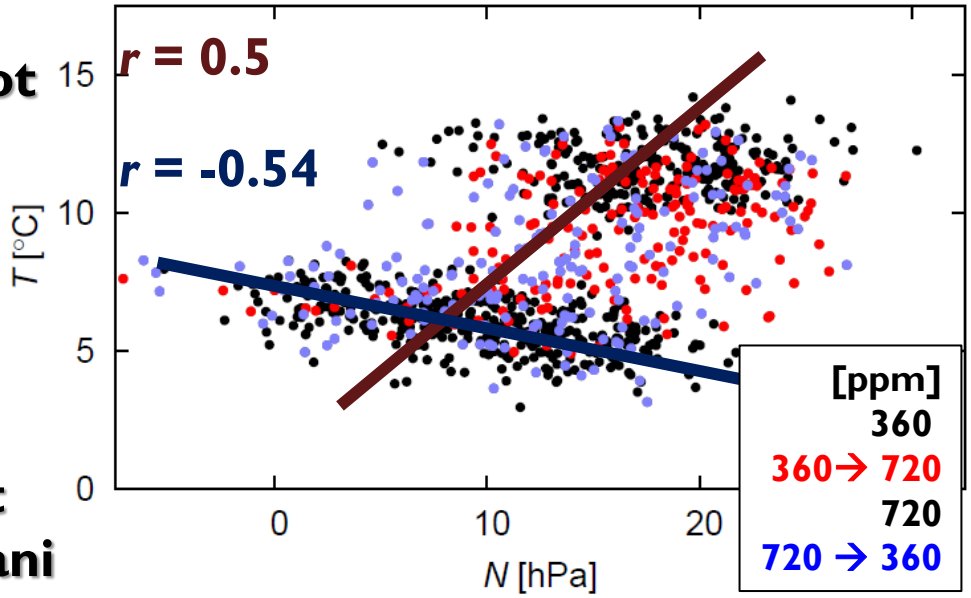
☞ a mennyiségek **detrendálása nélkül** kapott eredmény: több cikk ez alapján dolgozik [pl. Geng & Sugi 2001, Burningham & French 2013]

☞ **de!** a **pozitív korreláció** (a negatív helyett) csak az égh. vált. hatására mindkét mennyiségben bekövetkező növekedés eredménye (**nem a belső változékonyságot** fejezi ki)

- elejére rövidebb időszakra (ha feltehető a **stacionaritás**): **r < 0** ☑

⇩

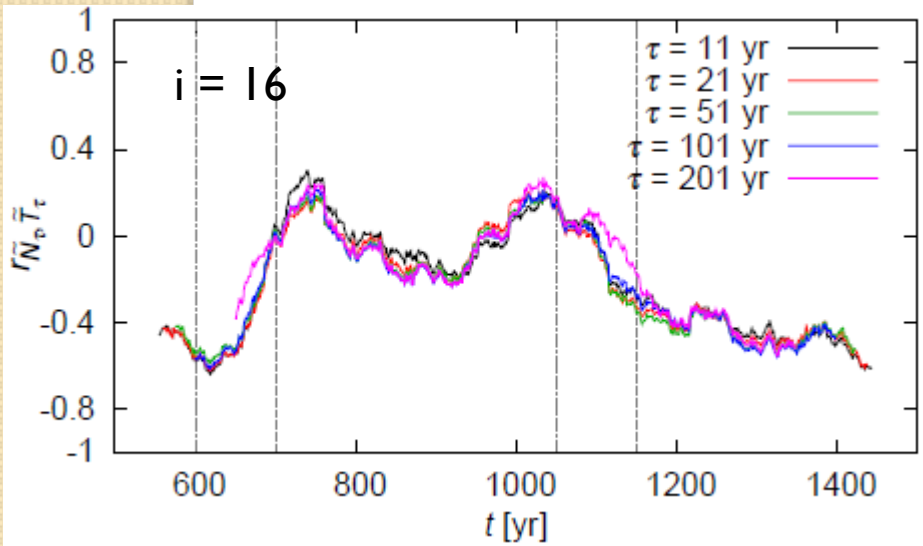
- **égh. vált. által okozott trendet el kell távolítani**

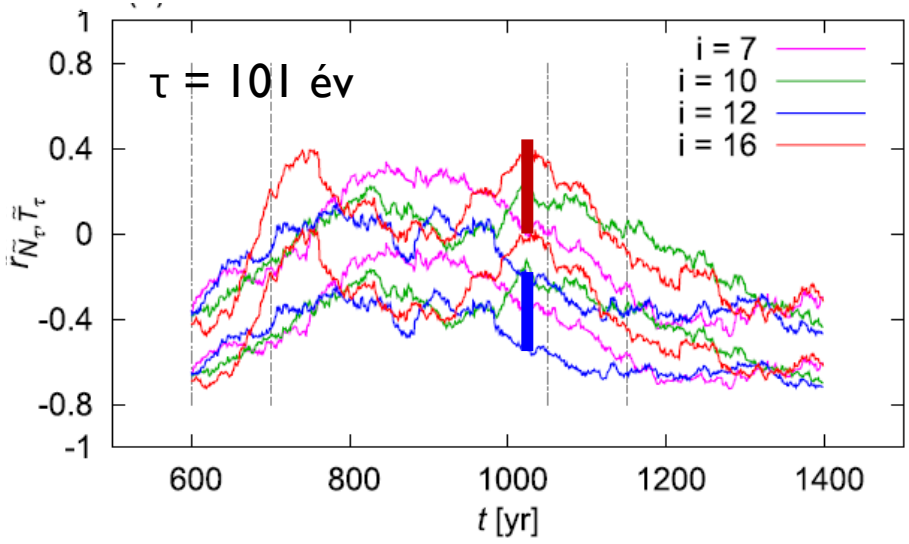


Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

r(*t*) egyedi éghajlati szimulációban

- **trend eltávolítása**: pl. mozgóátlaggal → *r*(teljes időszak) = -0.24
- égh. vált. esetén egyetlen *r* „nem mond semmit” → *r*(*t*)?
- mozgó időablakokkal előállítható:
  időablakon belül a két mennyiség **időbeli korrelációja**
  kis időablakok (τ < 101 év) esetén kis *r*(*t*) eltérés
- különböző tagokban **erősen eltérhet** egymástól
- **egyik sem reprezentatív** a várható éghajlatra nézve!
  - kisebb τ → erősebb elkülönülés / nagyobb τ → égh. vált. hatása is





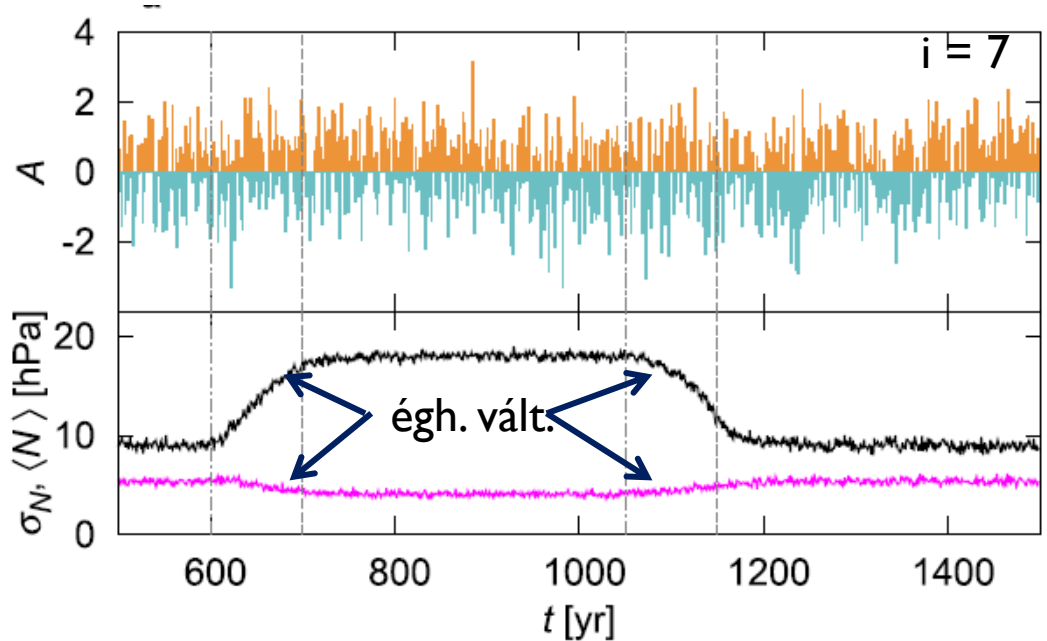
Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

r(*t*) sokasági éghajlati szimulációban

- egyetlen τ ≠ 0 időablak sem reprezentatív, mert az éghajlat változhat ezalatt → minden időpillanatot a saját, aktuális korrelációs együtthatójával kellene leírni, amit nem az előtte-utána kialakuló égh. időfejlődése alapján számítunk
- adott pillanatban (τ = 0) kellene *r*(*t*) → **sokasági éghajlati szimulációk** segítségével számolható**!**
- **szubjektivitástól mentes** (pl. nincs szükség időablak hosszára detrendáláshoz, korrelációhoz)

$$A(t) = \frac{N(t) - \langle N(t) \rangle}{\sqrt{\langle N(t)^2 \rangle - \langle N(t) \rangle^2}}$$

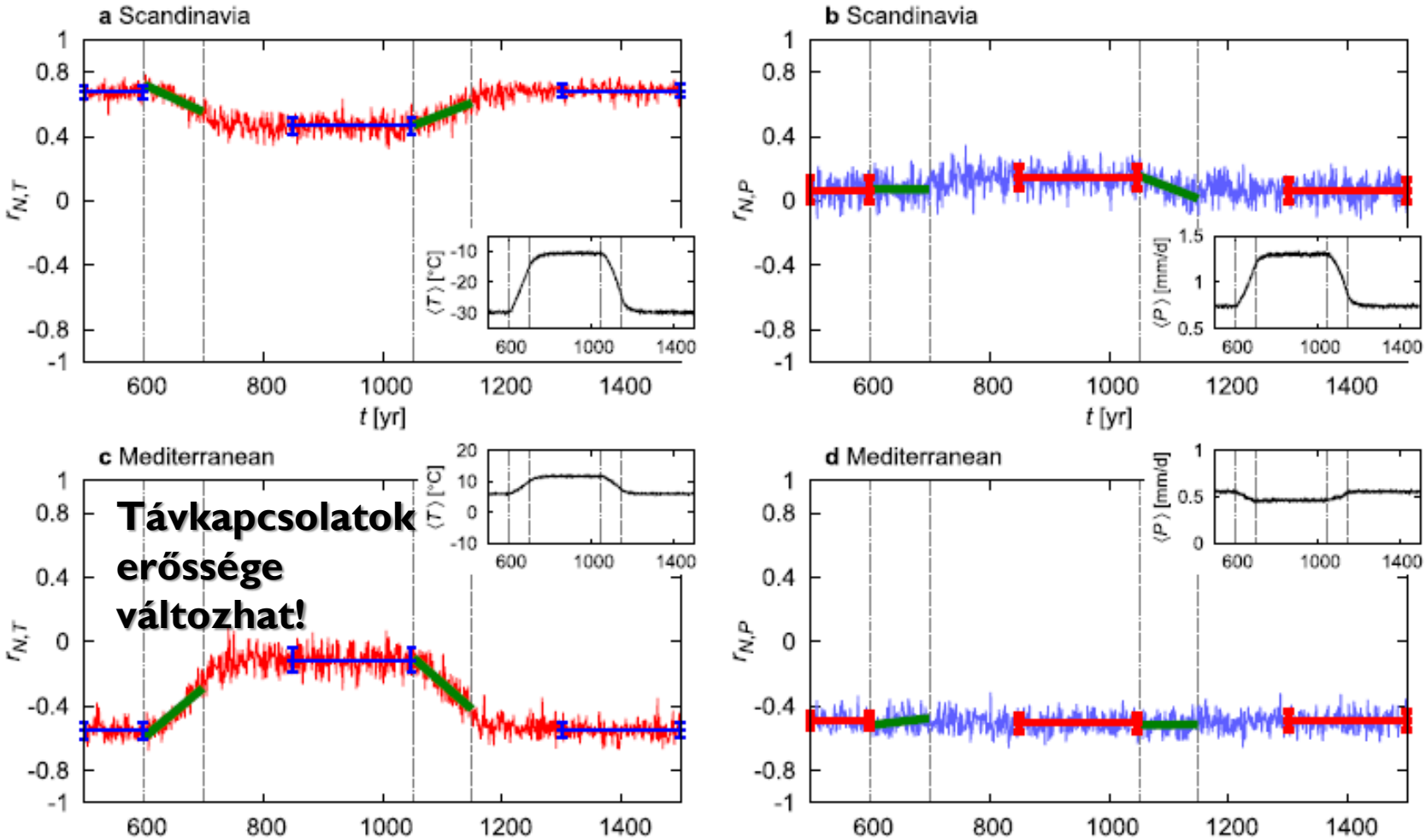
- <*N*(*t*)>: ensemble-átlag a *t* időpillanatban
- nevező (σ_N): szórás *t*-ben



Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

r(*t*) sokasági éghajlati szimulációban

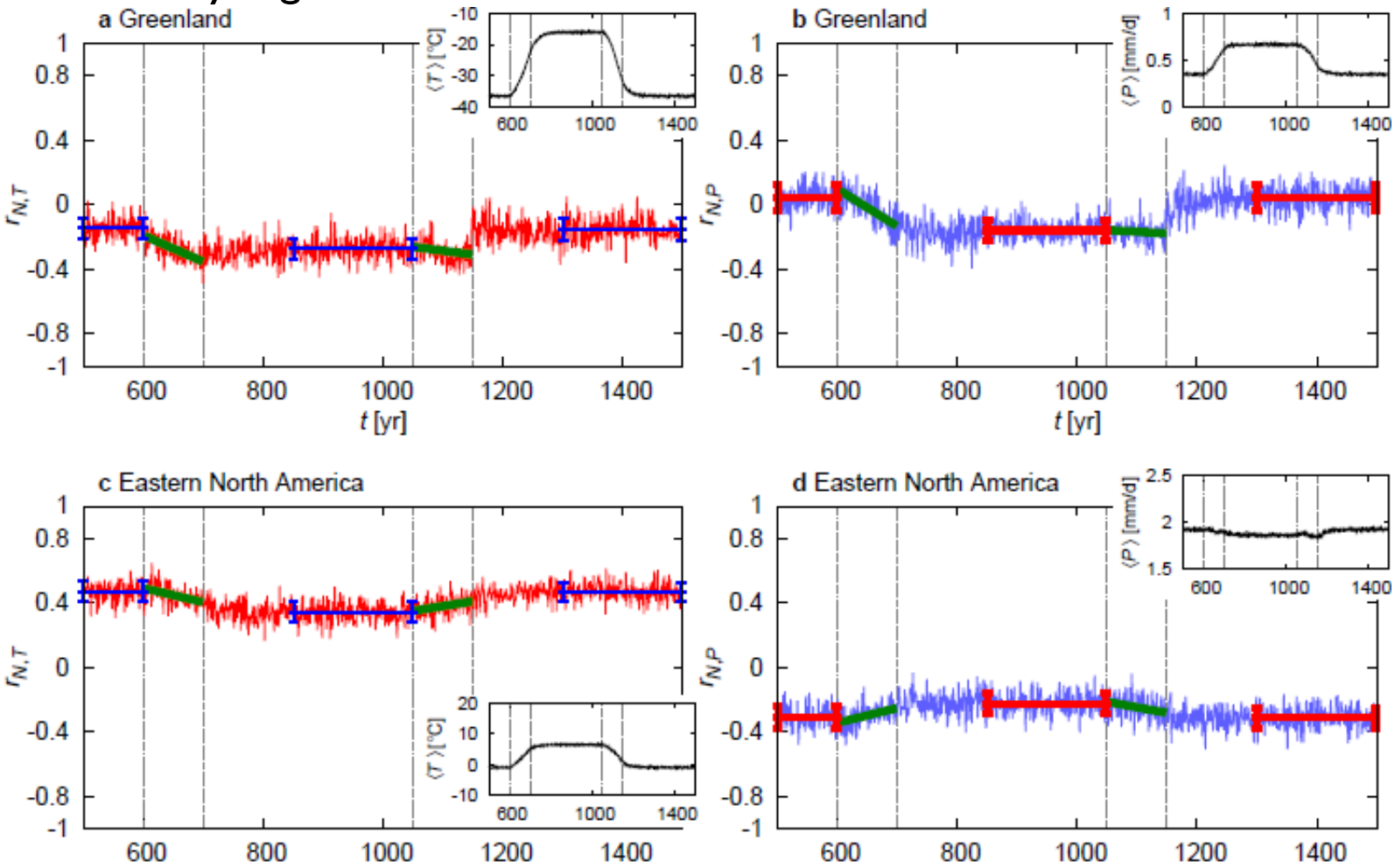
- *r*(*t*): a két mennyiségnek a sokaság tagjai által felvett *t*-beli értékpárjai alapján → valóban az időpillanatot jellemzi



Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

r(*t*) sokasági éghajlati szimulációban

- *r*(*t*) változásának mértéke függ a vizsgált földrajzi területtől és a mennyiségtől is



Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)
Hagyományos definíció sokaságképben

- **a használt NAO-index**: $N(t) = SLP_{Azori}(t) - SLP_{Izland}(t)$
- hagyományosan [Hurrell 1995]:
  a fluktuációk magnitúdója Izlandon >> Azori-szk.-en →
  a **hagyományos NAO-index**: a **normalizált** SLP-k különbsége:

sokaságátlag adott *t*-ben

$$N(t) = \frac{p_{sl,\mathcal{A}}(t) - \langle p_{sl,\mathcal{A}}(t)\rangle}{\sqrt{\langle p_{sl,\mathcal{A}}(t)^2\rangle - \langle p_{sl,\mathcal{A}}(t)\rangle^2}} - \frac{p_{sl,\mathcal{I}}(t) - \langle p_{sl,\mathcal{I}}(t)\rangle}{\sqrt{\langle p_{sl,\mathcal{I}}(t)^2\rangle - \langle p_{sl,\mathcal{I}}(t)\rangle^2}}$$

sokasági szórás adott *t*-ben

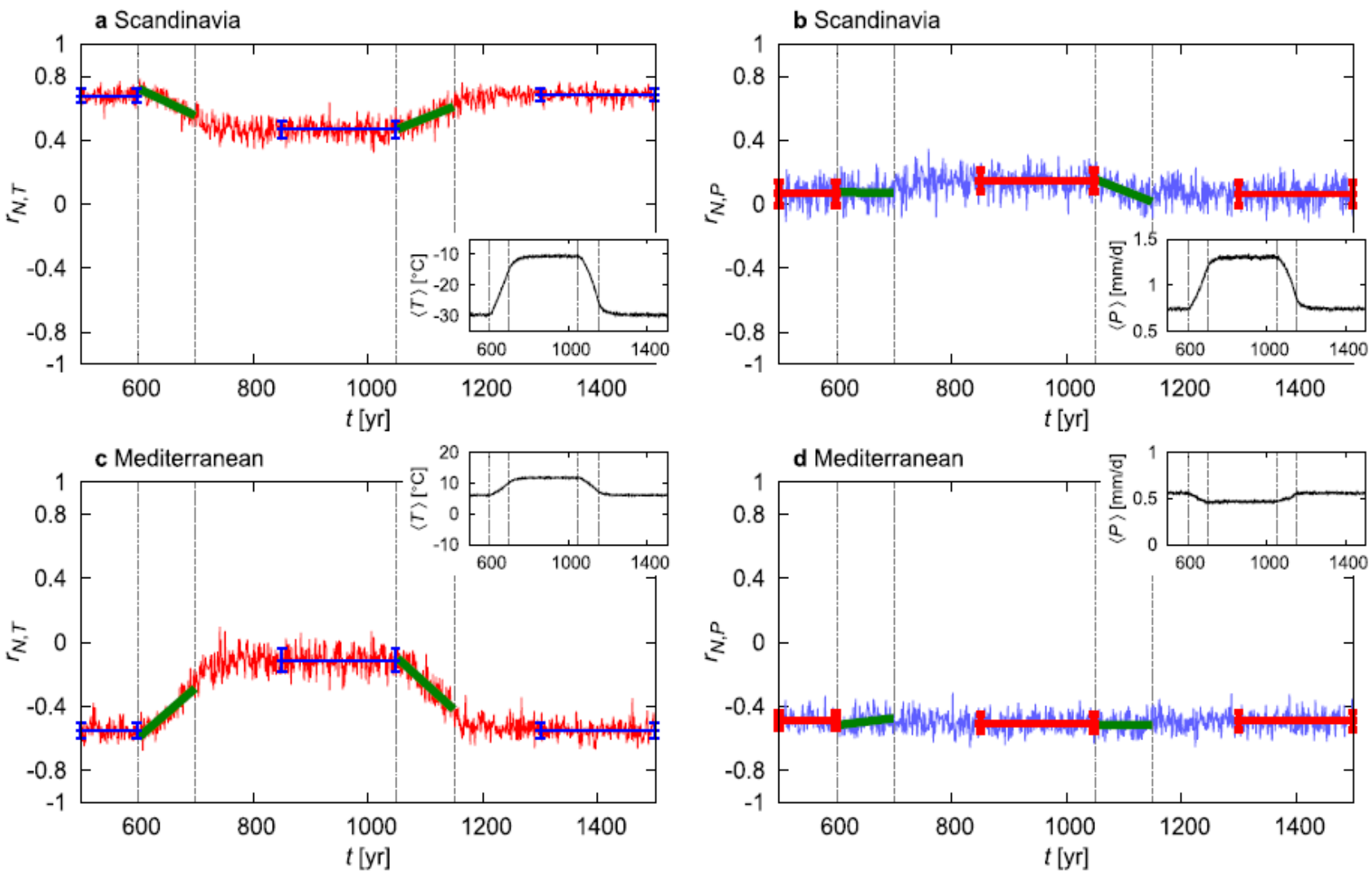
- **sokasági NAO-index**: adott időpillanatban **a sokaságon normalizált** SLP-k különbsége

Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

Hagyományos definíció sokaságképben

$$N(t) = \frac{p_{s,\mathcal{A}}(t) - \langle p_{s,\mathcal{A}}(t)\rangle}{\sqrt{\langle p_{s,\mathcal{A}}(t)^2\rangle - \langle p_{s,\mathcal{A}}(t)\rangle^2}} - \frac{p_{s,\mathcal{I}}(t) - \langle p_{s,\mathcal{I}}(t)\rangle}{\sqrt{\langle p_{s,\mathcal{I}}(t)^2\rangle - \langle p_{s,\mathcal{I}}(t)\rangle^2}}$$

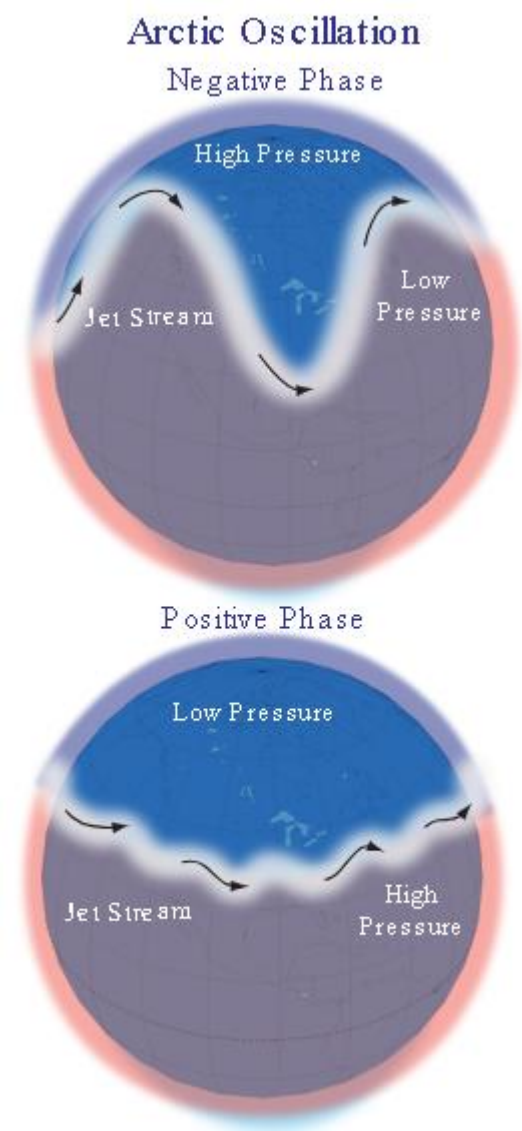
$$N(t) = SLP_{Azori}(t) - SLP_{Izland}(t)$$



Észak-atlanti Oszcilláció (NAO)

- az **égh. vált.-hoz köthető trendek** a NAO-jelben nem a pozitív/negatív NAO-index felé eltolódást jelentik
- a hagyományos módon idősorokból számolt **korreláció** értéke **függhet** a választott időablakoktól, de főként a kiválasztott ensemble tagtól
- megfelelő detrendálás: ha tökéletesen el lehet különíteni a **trend**et (külső kényszerekre adott válasz (pl. CO_2 növekedésre)) a **belső változékonyság**tól (fluktuációktól) → sokasági égh. szimulációkban: sokasági átlag + szórás segítségével **egyértelmű**
- sokasági szimulációkban a **pillanatnyi *r*(*t*)** a sokaság adott időpillanatban felvett értékei alapján számolható
- távkapcsolat erősségében **jelentős változás** is bekövetkezhet (r = -0.5 → ~0)

Arktikus Oszcilláció (AO)



- Arctic Oscillation/Northern Annular Mode: Északi-féltekén 20°-90°, „gyűrűszerű" SLP anomália +(-) előjellel az Arktiszon és ellenkező előjellel É. sz. 37-45°-nál, a szárazföldek miatt csak „-szerű" [Thompson & Wallace 1998]
- térbeli szerkezet ~ NAO-éhoz
- **AO-index:** az arktikus levegő milyen mértékben jut el a közepes szélességekre
- **AO+**: jet stream erős és állandó, a poláris levegőt blokkolja a pólusnál
- **AO-**: gyengébb zonális szelek, a poláris hideg levegő nagyobb mértékben jut a közepes szélességekre
- [több definíció: SLP, z1000, z500, z200 adatokból]
- SLP adatokból számított változékonyság vezető módusa (**1. EOF-módusa**) [EOF: empirikus ortogonális függvények]
- **AO-index**: az ehhez tartozó **PC1** idősor [principal component]

Kitérő: Empirical Orthogonal Functions (EOF) /Principal Component Analysis (PCA)/

- skalár mezők változékonyságának a vizsgálatára
- komplex, nemlineáris kölcsönhatások, magas a szabadsági fokok száma → csökkentsük a változók számát és határozzuk meg a legfontosabb módusokat (térbeli mintázatokat /**EOF**/), amik a változékonyságokat a legjobban magyarázzák, időfejlődésüket /**PC**/ és a „fontosságukat" /**%**/
- dióhéjban a számítás:
  - F: minden földrajzi hely egyedi idősorából az **időátlag kivonása**
  - kovarianciamátrix: $R = F^T F$
  - a változó területtel súlyozott ($\sqrt{\cos(\varphi)}$) kovarianciammátrixának a sajátértékeinek sajátvektorainak a kiszámítása
  - **sajátérték**: a magyarázott variancia aránya (→ %)
  - **sajátvektor**: EOF (térkép: álló oszcilláció)
  - **PC** (principal component) /az egyes módusok idősorai/: hogyan fejlődik az EOF időben, a sajátvektorok az anomáliákra vetítve, pl. EOF1-re: $\mathbf{a}_1 = \mathbf{F}\mathbf{c}_1$, ahol $\mathbf{a}_1$ a PC1 idősor

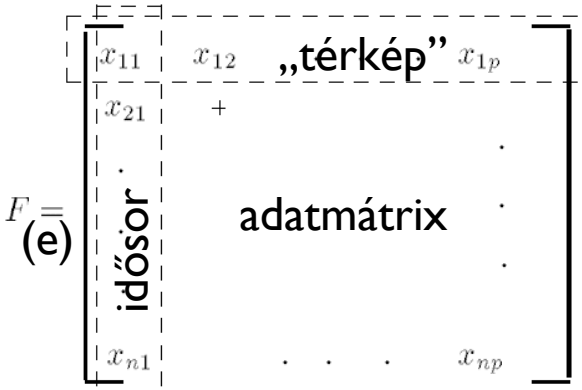
$$F = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \text{„térkép"} & x_{1p} \\ x_{21} & + & & \\ \vdots & & \text{adatmátrix} & \vdots \\ x_{n1} & & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

(vertikálisan: idősor)

Arktikus Oszcilláció (AO)

Hagyományos módszer

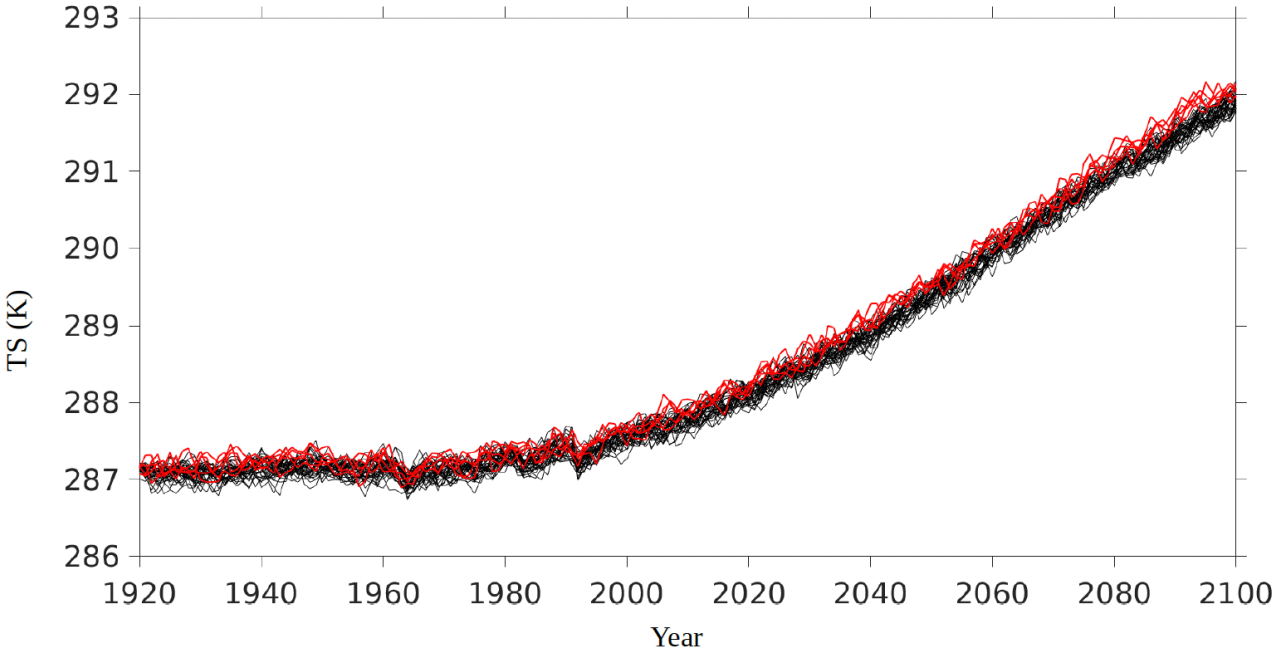
- **hagyományos módszer:**
  - meghatározzák egy referenciaidőszakra (CPC: 1979-2000) az EOF1-et és erre vetítik a többi év anomáliáit is → PC1 = AO-index
  - **detrendálás** problémája
  - **referenciaidőszak** kiválasztásának problémája: változhatnak a kapott PC értékek is



Arktikus Oszcilláció (AO)

Felhasznált adatok

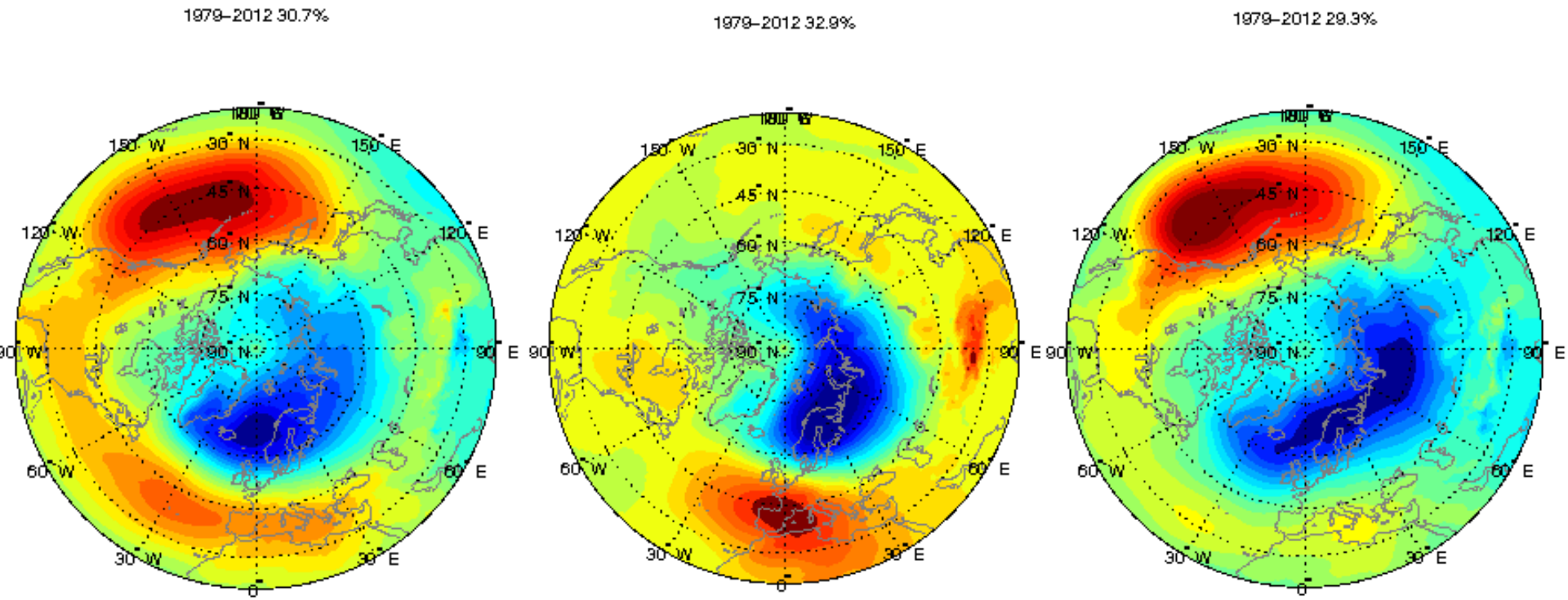
- **CESM–LE** (Community Earth System Model – Large Ensemble Project [Hurrell et al. 2013])
  - felbontás: 1.25°× 0.94°, 30 szint
  - sokaság: 40 szimuláció 2005-ig a mért adatokból, utána RCP8.5-ös forgatókönyv
  - ΔT_s **~5 °C** 1950–2100
  - DJF



Arktikus Oszcilláció (AO)

Hagyományos módszer

- a sokaság egyes tagjai között erősen eltérő EOF-ek is vannak
- egyiket **sem** tekinthetjük **reprezentatív**nak a várható éghajlatra nézve

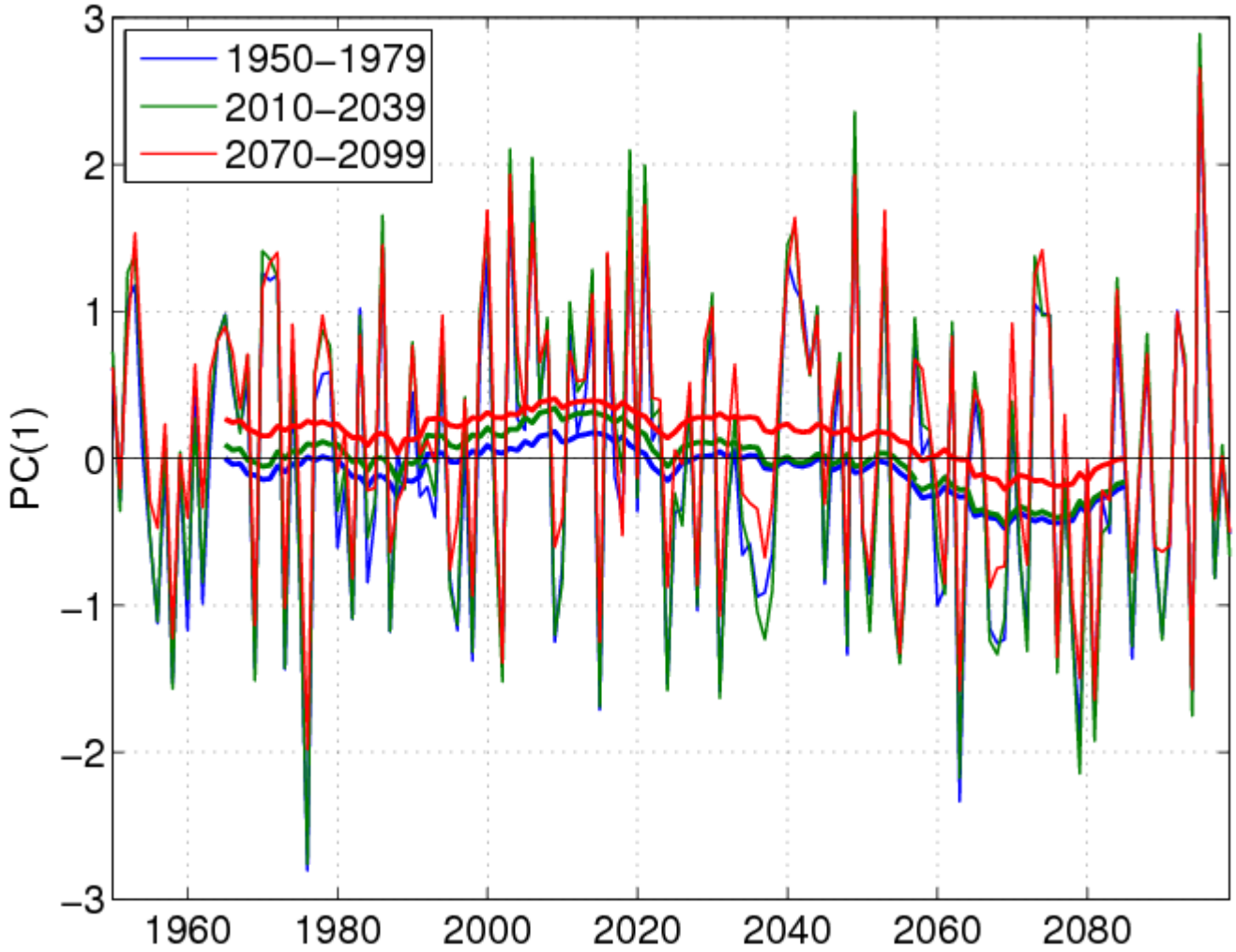


i = 1 i = 2 i = 20

Arktikus Oszcilláció (AO)

Hagyományos módszer

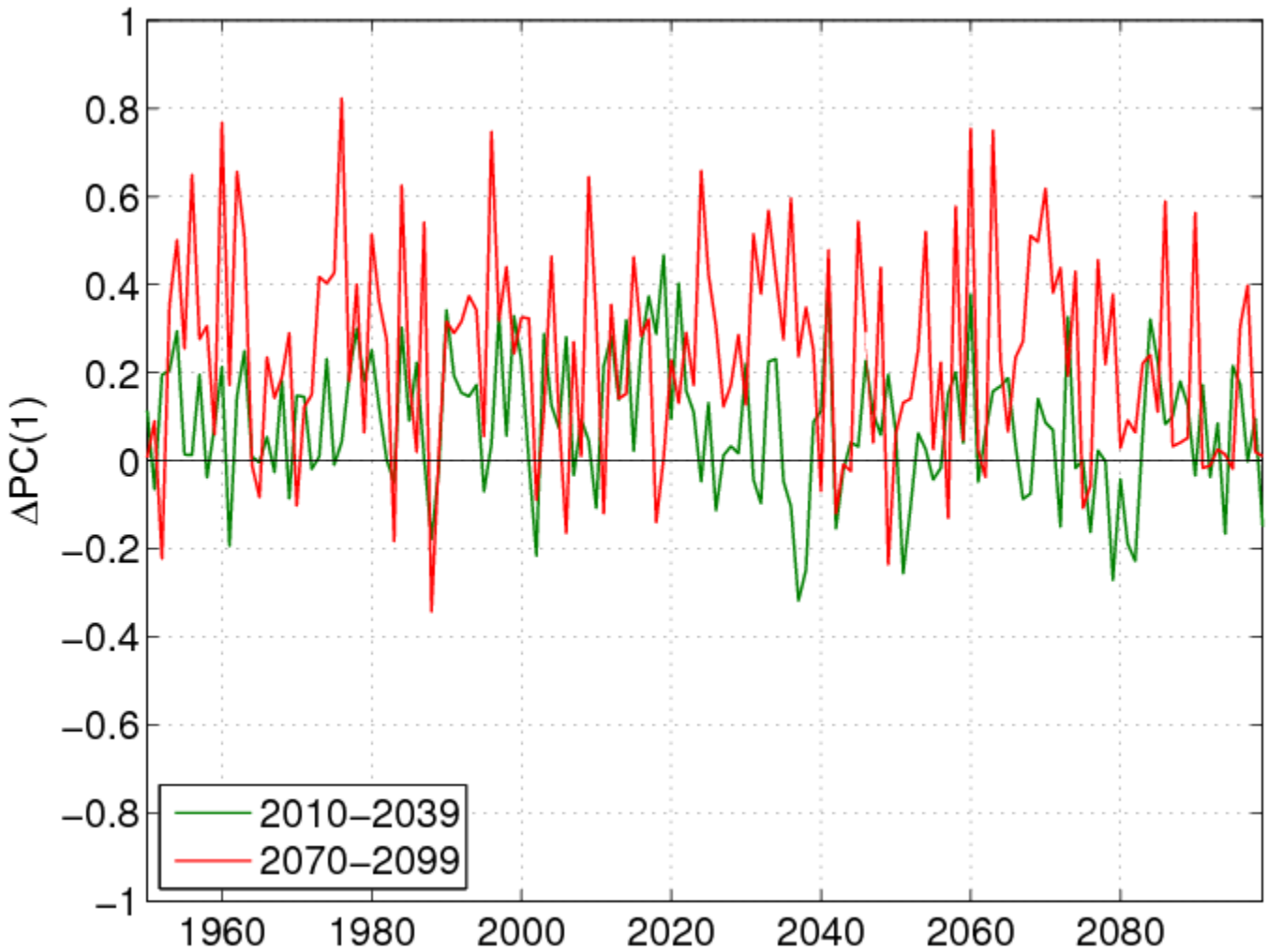
- különböző referenciaidőszakokra kissé különböző PC(1) idősorok



Arktikus Oszcilláció (AO)

Hagyományos módszer

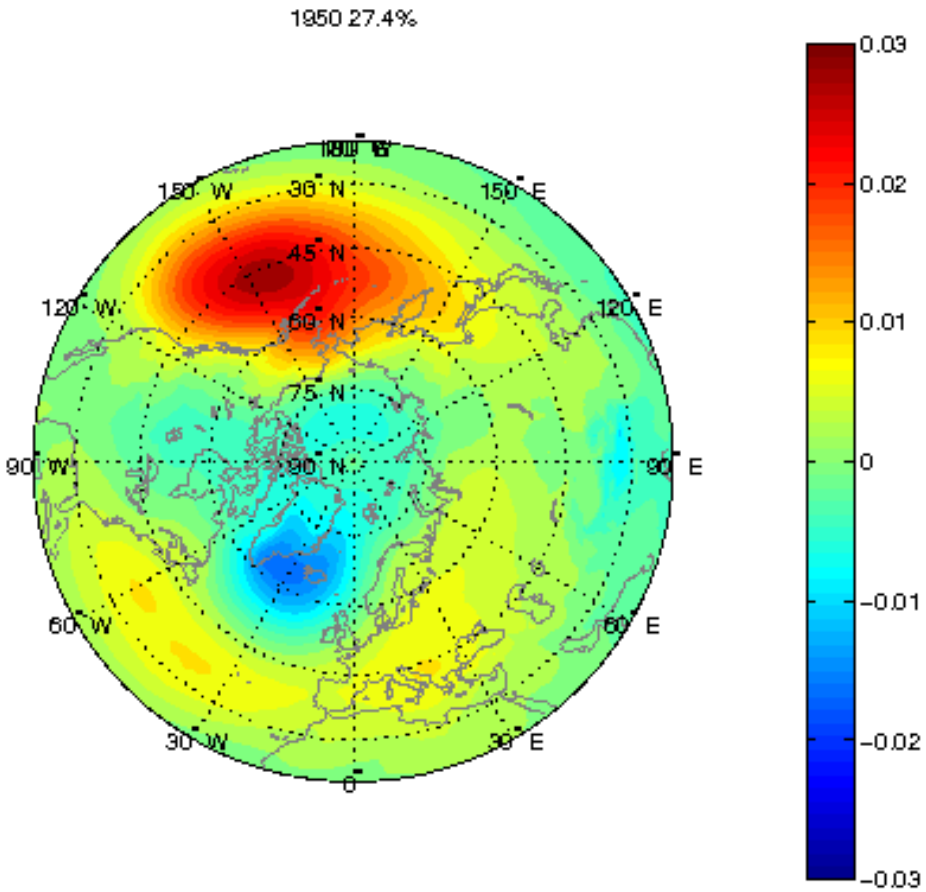
- PC(1) az 1950-1979 periódushoz számoltakhoz viszonyítva

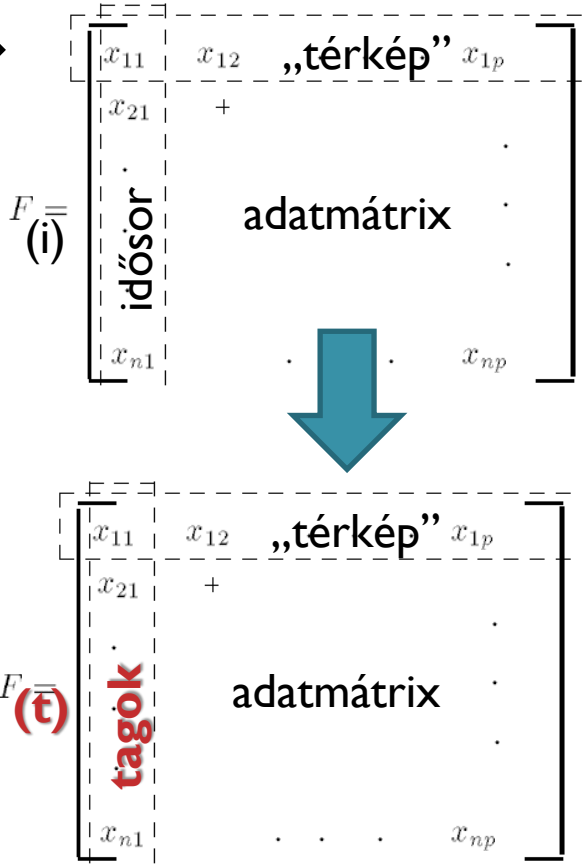


Arktikus Oszcilláció (AO)

Sokasági módszer → pillanatnyi EOF számítására

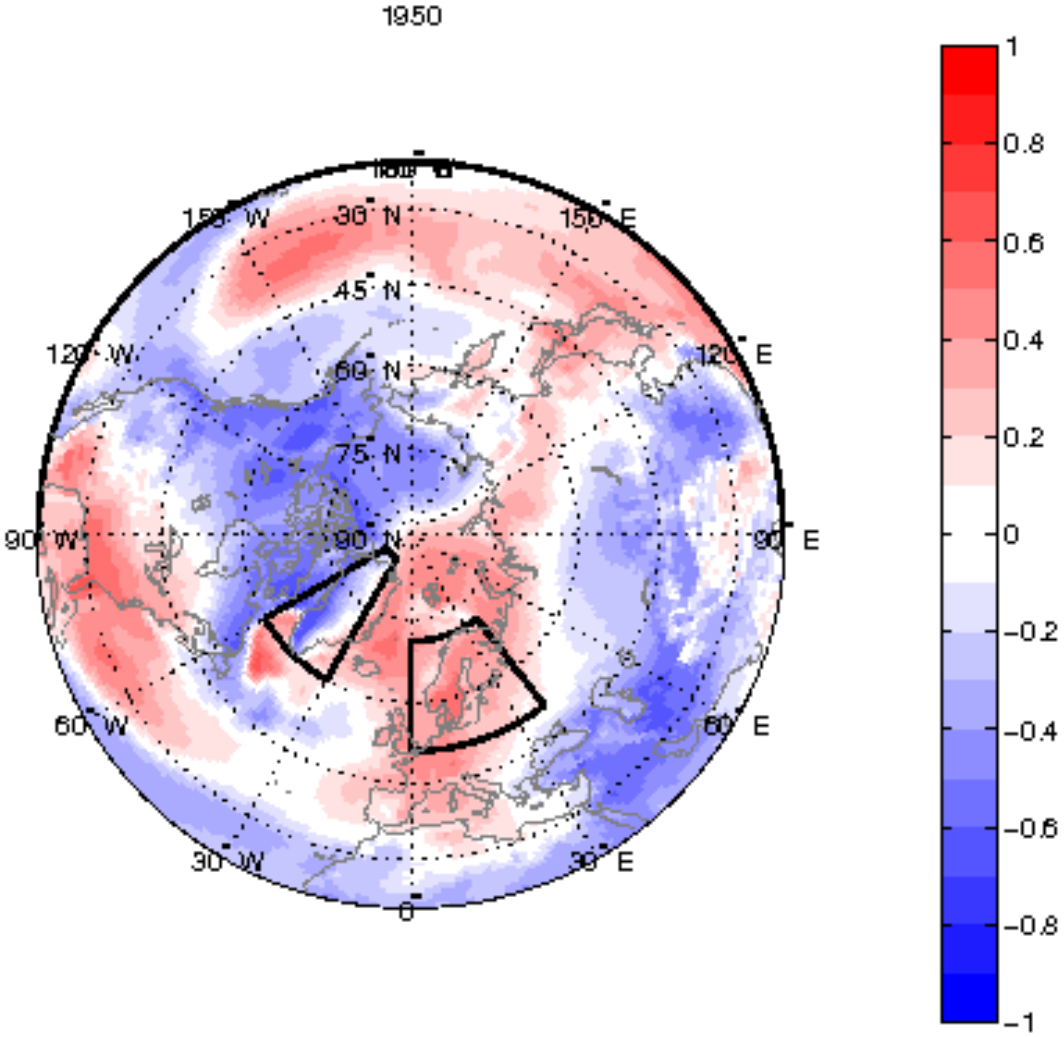
- F(i): hagyományos mód idősorainak oszlopai →
  F(t): sokasági módszer tagok oszlopai





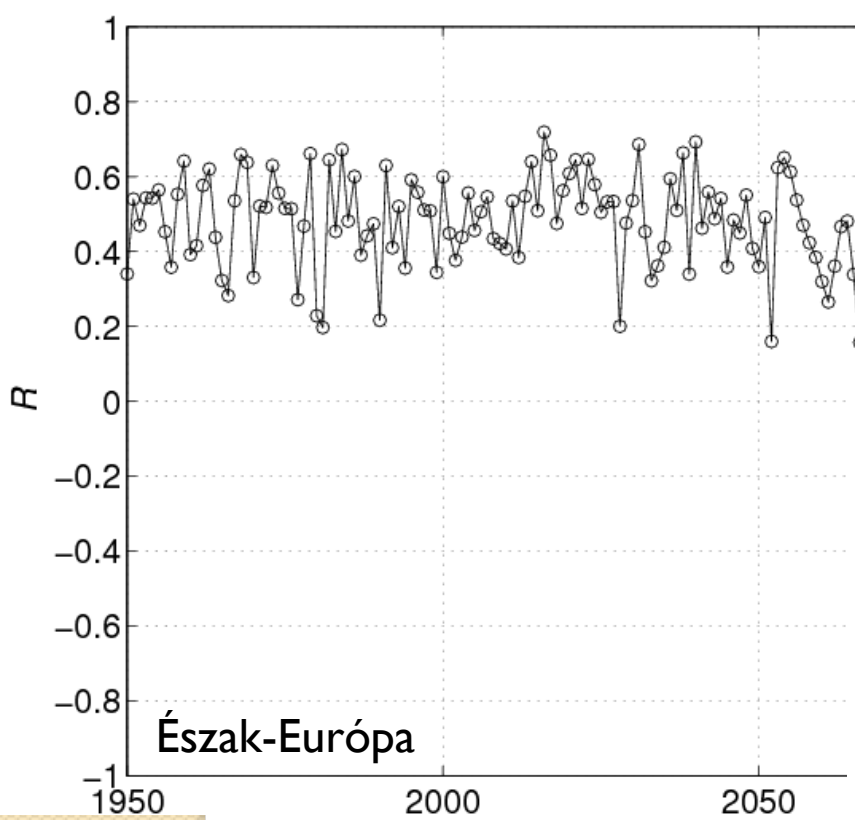
Arktikus Oszcilláció (AO)

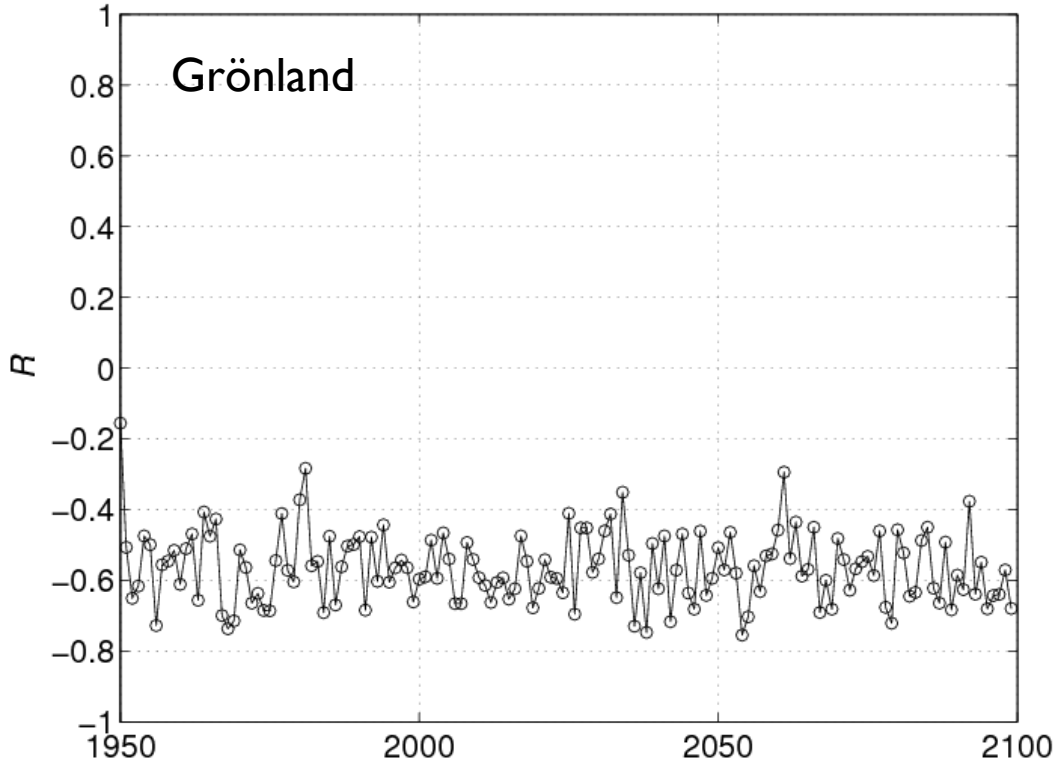
Sokaság alapú AOI-T korreláció



Arktikus Oszcilláció (AO)

Sokaság alapú AOI-T korreláció





Összefoglalás

- sokasági éghajlati szimulációkat használva az adott „pillanatban” (DJF évszakban) az aktuálisan lehetséges éghajlati állapotokra jellemző **pillanatnyi EOF-ek** határozhatók meg
- az AO és a hőmérséklet (vagy egyéb meteorológiai változók) **pillanatnyi *r*(*t*) értéke** a sokaság adott időpillanatban felvett értékei alapján számolható
- a távkapcsolatok túlélik az éghajlatváltozást, azonban az erősségüket leíró korrelációs együtthatók jelentős időfüggést mutathatnak
- új, objektív módszer a távkapcsolatok időfejlődésének vizsgálatára

Köszönöm a figyelmet!

Felhasznált irodalom

- Drótos Gábor, Bódai Tamás, Tél Tamás (2015): Probabilistic Concepts in a Changing Climate: A Snapshot Attractor Picture. *Journal of Climate*, 28, 3275.
- Ghil, Michael, Chekroun, Mickaël D., Simonnet, Eric (2008): Climate Dynamics and Fluid Mechanics: Natural Variability and Related Uncertainties. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 237, 2111–2126.
- Herein, M., Drótos, G., Haszpra, T., Márfy, J., Tél, T. (2017): The theory of parallel climate realizations as a new framework for teleconnection analysis. *Scientific Reports*, **7**, 44529
- Haszpra, T., Topál, D., Herein, M.: The time evolution of the Arctic Oscillation in an ensemble appraoch (manuscript in preparation)