

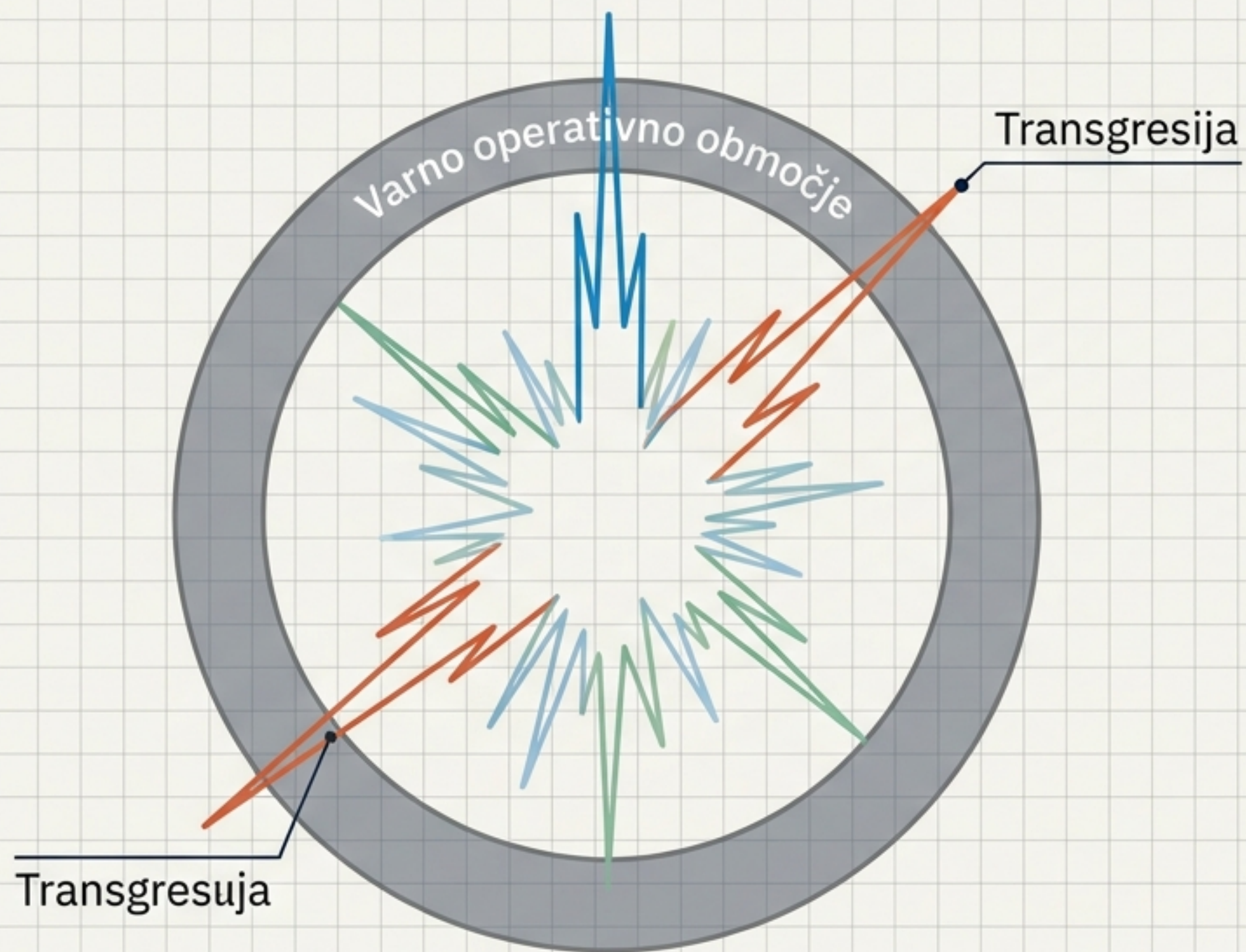


Preseganje planetarne meje sladke vode: Sistemska diagnostika in gonilniki

Dekompozicija vplivov podnebnih sprememb
in neposrednih človeških posegov v globalni
vodni cikel (1901–2019).

- Podatkovni vir: ISIMIP 3a (Ansambelsko modeliranje)
- Časovni okvir: 1901 – 2019
- Fokus: Prostorsko-časovna izolacija signalov

Konceptualizacija sistema: Zemlja kot zaprt hidrotehnični sistem



Kaj so planetarne meje (PB)?

Mejne vrednosti kritičnih zemeljskih procesov. Preseganje pomeni eksponentno rast tveganja za destabilizacijo sistema.

Planetarna meja sladke vode (PB-FW):

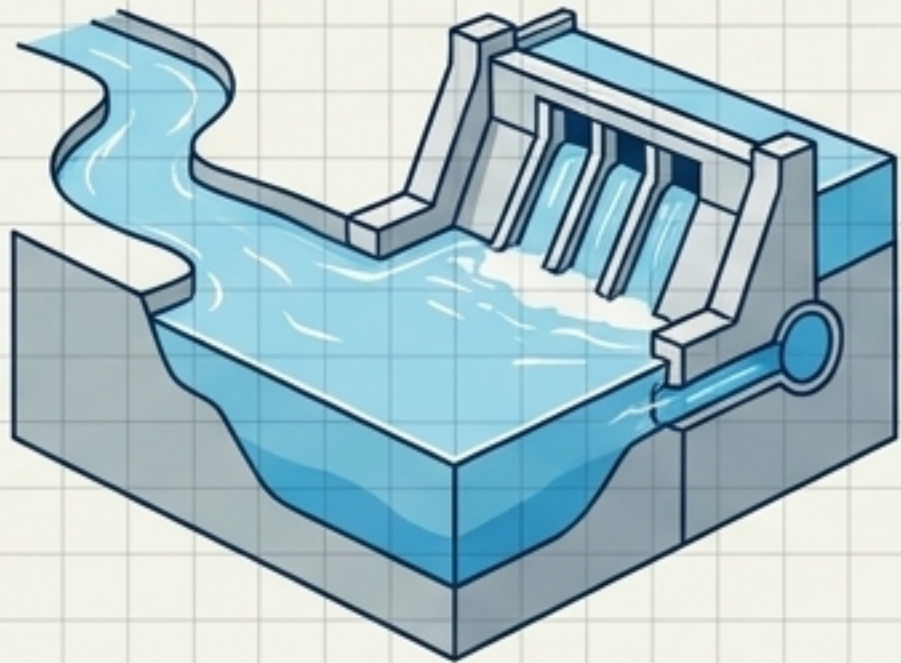
Indikator systemskega stresa. Ne meri zgolj porabe, temveč odstopanja od zgodovinsko stabilnih hidroloških stanj.

Inženirski problem:

Kako ločiti naravni šum (lokalno variabilnost) od globalnega signala systemske okvare?

Metrika nadzornih spremenljivk: Dvojna narava sladke vode

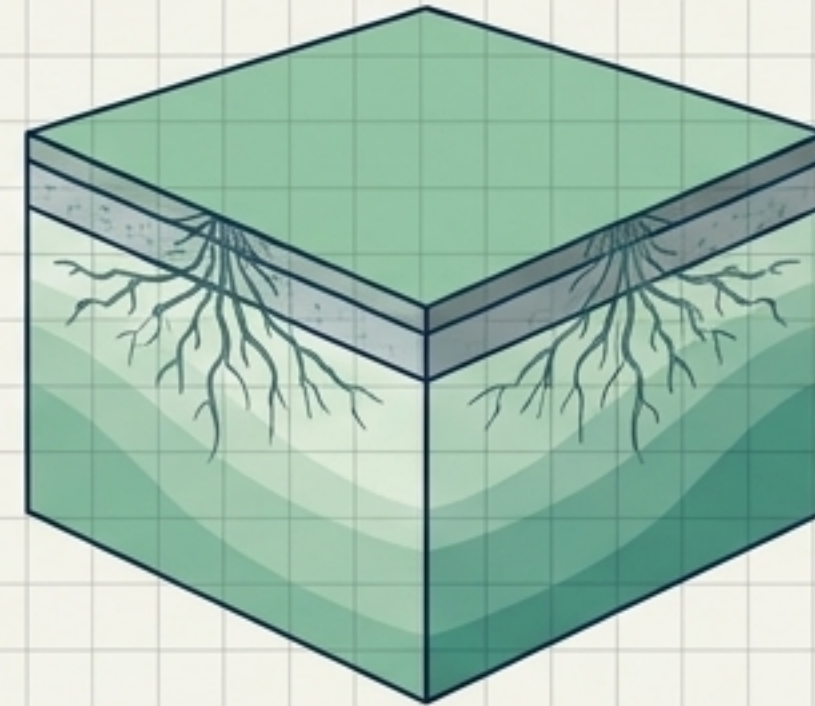
Modra voda (Blue Water)



- **Metrika:** Pretok rek (Streamflow - m^3/s)

- **Sistemska vloga:** Površinska dinamika, oskrba infrastrukture in vodnih ekosistemov.

Zelena voda (Green Water)



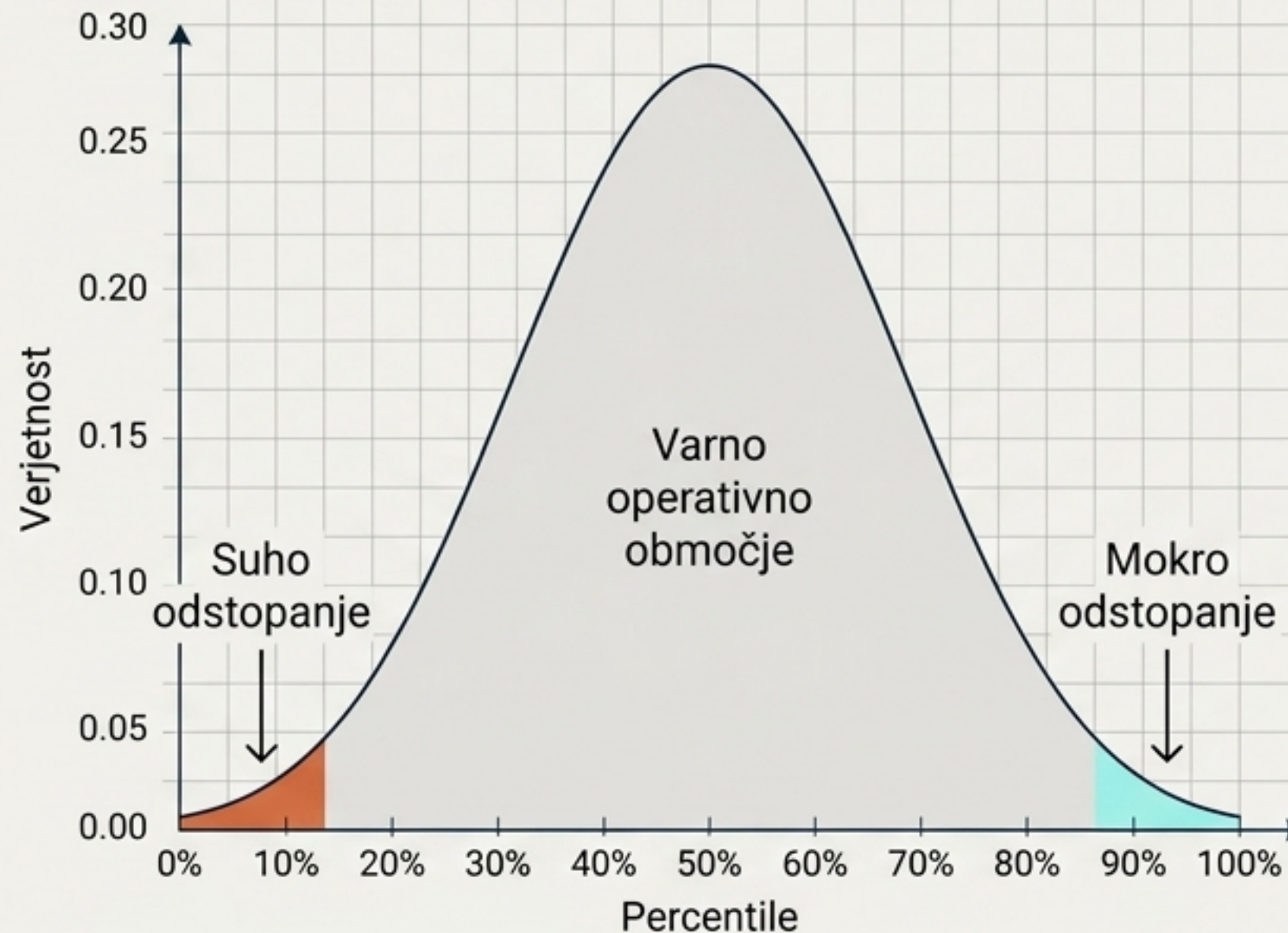
- **Metrika:** Vlaga v koreninskem območju tal (Root-zone soil moisture - kg/m^2)

- **Sistemska vloga:** Podzemna dinamika, regulacija kopenskih ekosistemov in kmetijske produkcije.

Obe komponenti sta ključni za stabilnost Zemljinega sistema, a se na zunanje pritiske odzivata z različno dinamiko.

Opredelitev tolerance:

Določanje lokalnih in globalnih mej

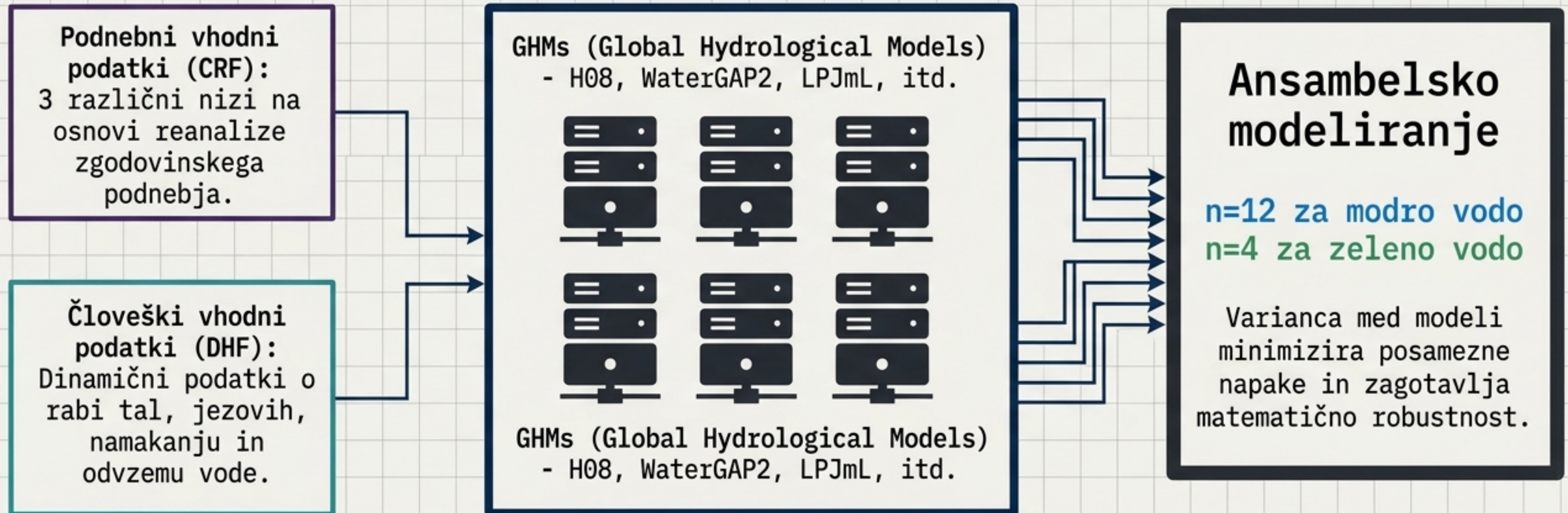


Lokalna meja (Grid-cell scale):
Določena na podlagi 5. in 95. percentila lokalne variabilnosti v referenčnem obdobju brez vplivov (1901–1910).

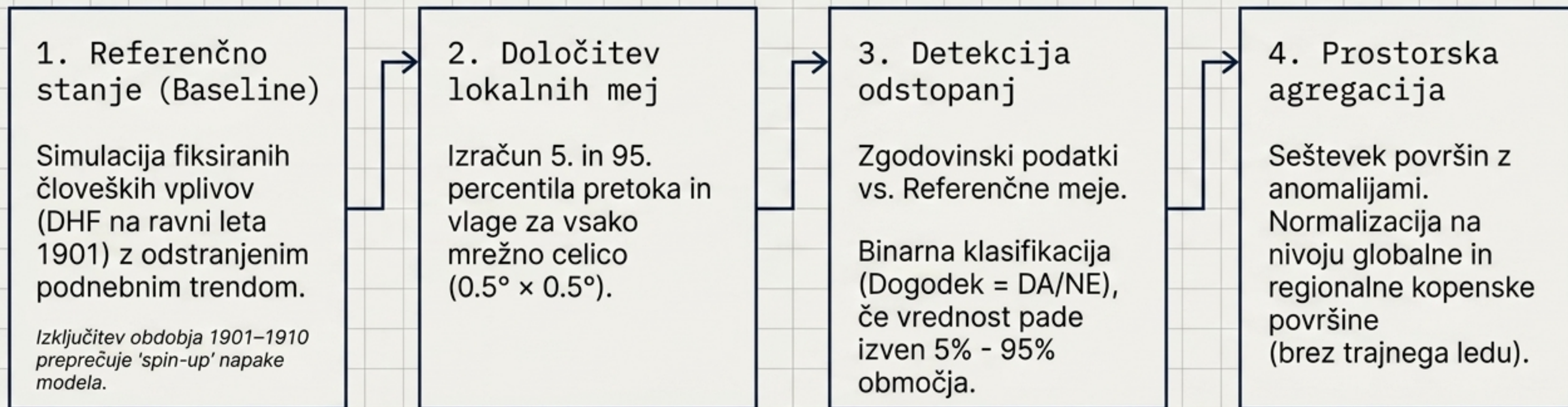
Planetarna meja (PB-FW):
Agregacija lokalnih odstopanj. Zgornja meja (95. percentil) regionalne/globalne variabilnosti osnovnega scenarija.

Transgresija ne pomeni absolutnega pomanjkanja vode, temveč frekvenčno povečanje anomalij, na katere ekosistemi niso prilagojeni.

Diagnostični aparat: Podatkovni inženiring in ISIMIP 3a



Procesni cevovod: Od surovih podatkov do detekcije anomalij



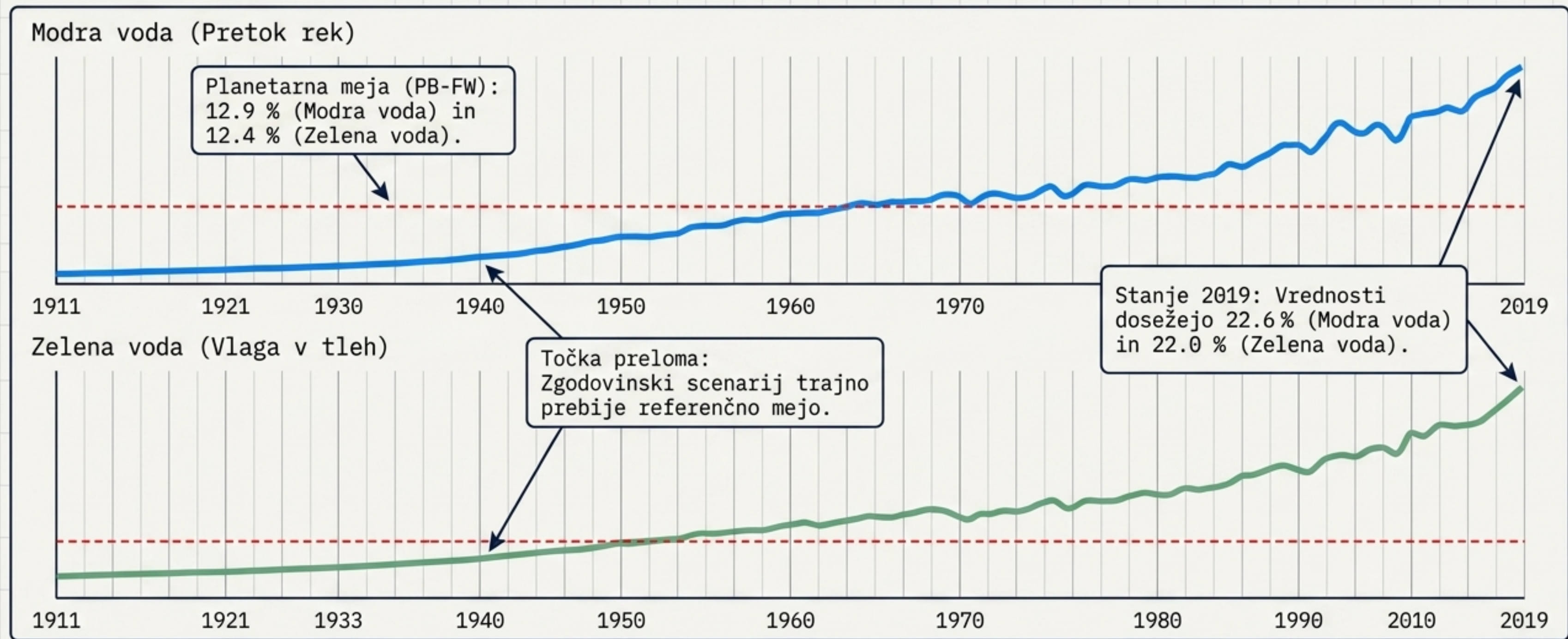
Izolacija signalov: Razcep vplivov prek 4 scenarijev

Človek (DHF)

		Fiksno (1901)	Zgodovinsko
Podnebje (CRF)	Fiksno/Detrendirano	Osnovni scenarij (Baseline) Opis: Referenca predfosilne dobe.	Zgolj DHF Opis: Izoliran vpliv krčenja gozdov, jezov in namakanja.
	Zgodovinsko	Zgolj CRF Opis: Izoliran vpliv podnebnih sprememb.	Zgodovinski scenarij Opis: Dejansko izmerjeno stanje (CRF + DHF).

Matematična pripisljivost: S primerjavo posameznih izoliranih scenarijev proti osnovnemu lahko matematično pripišemo delež krivde specifičnemu gonilniku.

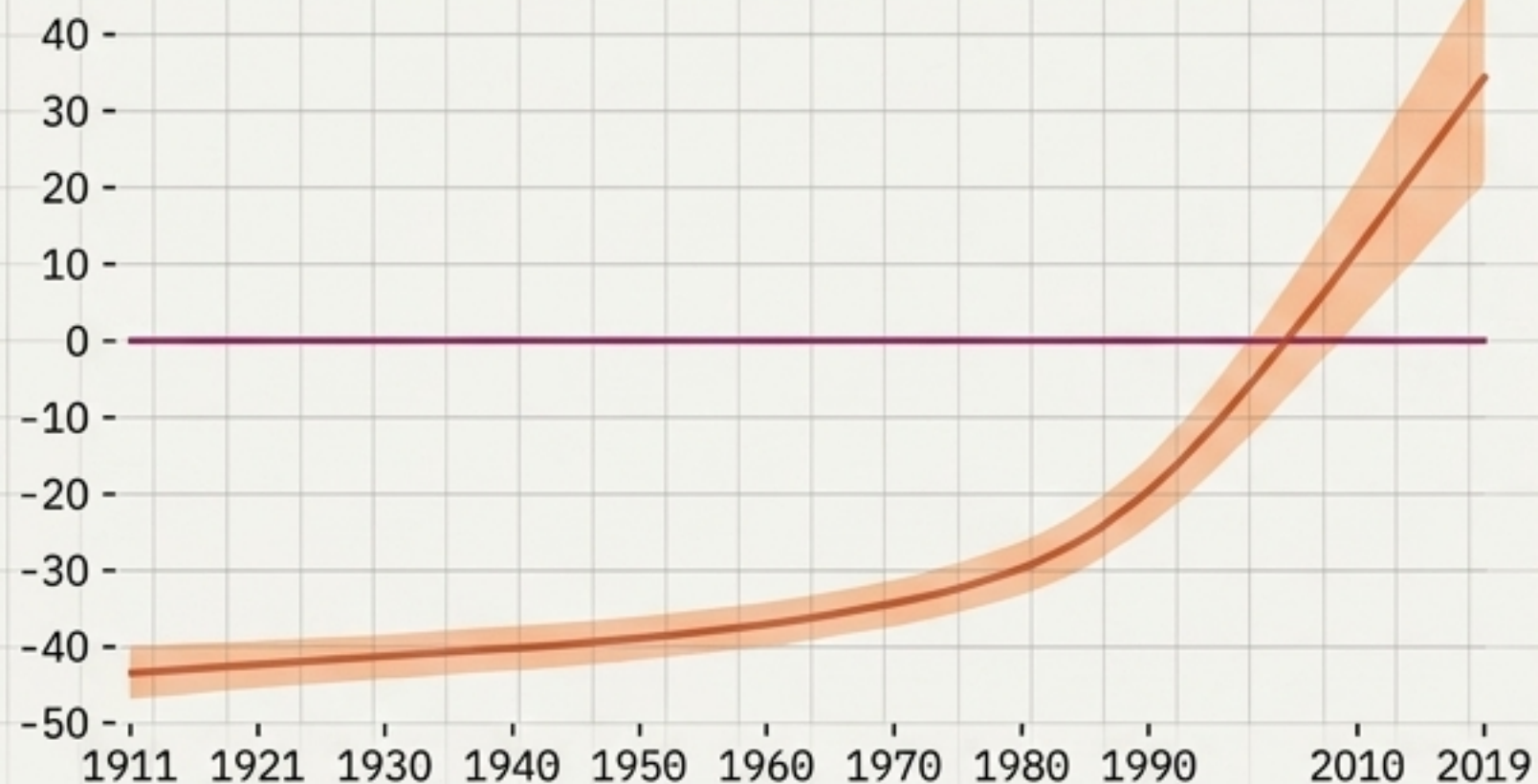
Globalni signal: Zgodovinski prelom in sistemska transgresija



Več kot polovica celotne transgresije se je zgodila v poznem 20. in zgodnjem 21. stoletju, brez znakov stabilizacije (stopnja rasti ~ 0.2 odstotne točke na leto).

Dekompozicija anomalij: Asimetrija ekstremov

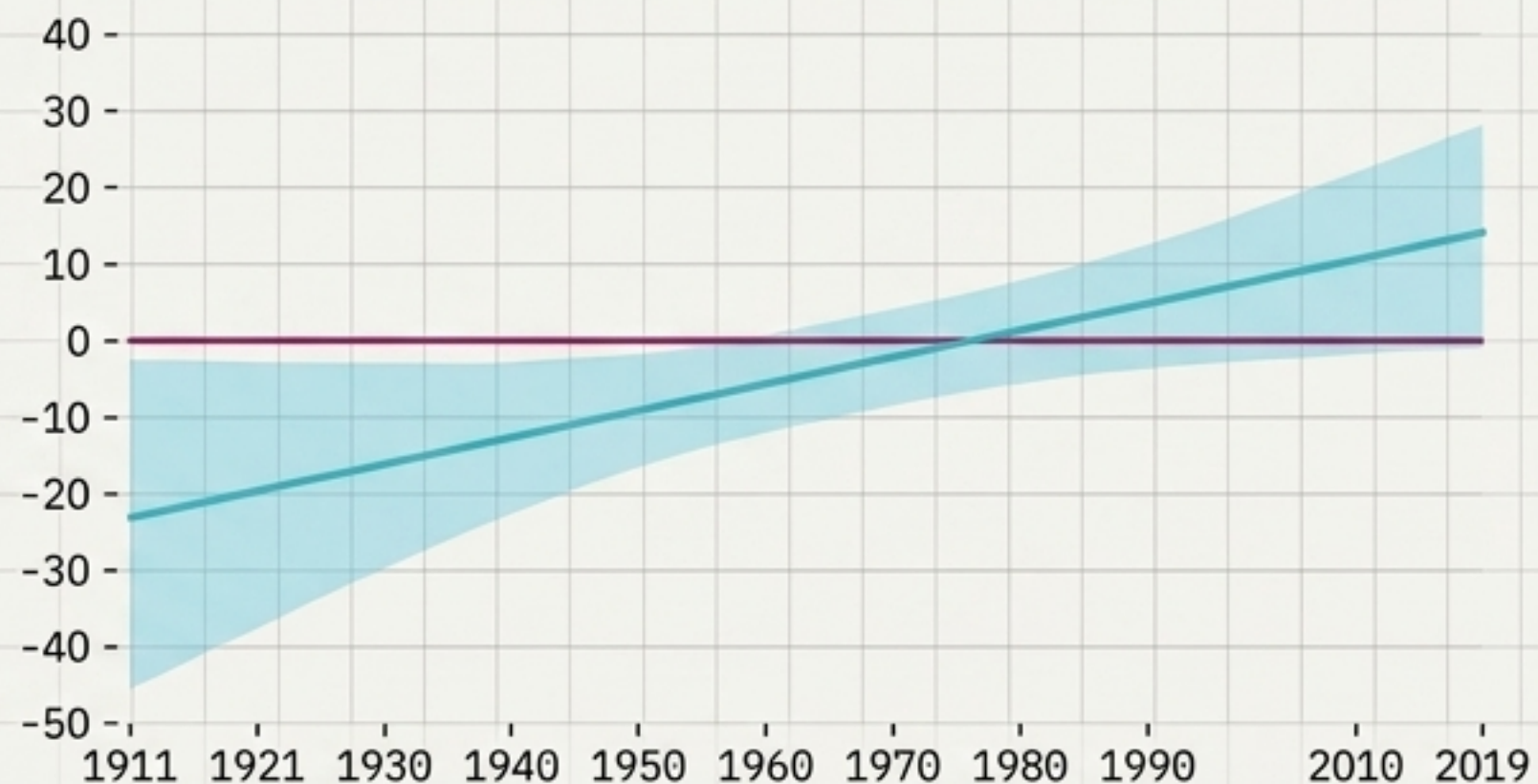
Suha odstopanja



Eksplozija suše:

- Najhitrejša rast (0.13 - 0.23 odstotne točke/leto).
- Vrednosti so se več kot podvojile v primerjavi z mediano referenčnega stanja.

Mokra odstopanja

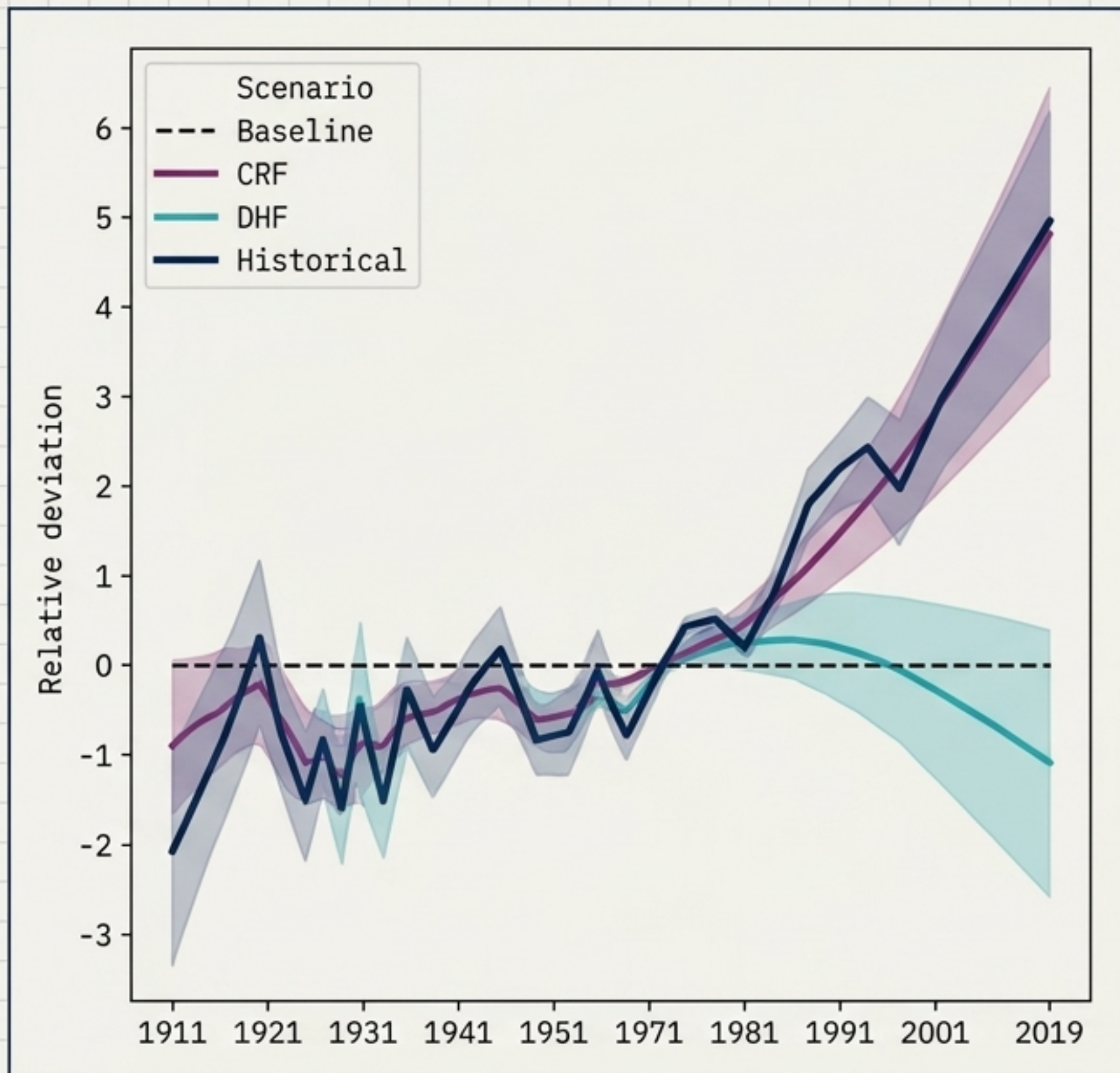


Postopno močenje:

- Zmernejša rast (0.08 - 0.09 odstotne točke/leto).

Inženirski zaključek: Sistem postaja globalno bolj sušen in volatilen, pri čemer so ekstremi pomanjkanja vode bistveno bolj razširjeni kot ekstremi presežka.

Globalni gonilniki: Dominacija podnebja in človeški ojačevalci



Klimatsko pogojeni dejavniki (CRF)

Absolutni glavni sistem.
Prevladuje pri obeh vrstah vode.
Odgovoren za skoraj 100 % povečanja pri mokrih odstopanjih.

Neposredni človeški dejavniki (DHF)

Deluje asimetrično.
Njegov globalni vpliv na mokra odstopanja je minimalen, pri suhih odstopanjih pa deluje kot močan ojačevalec systemskega stresa (prekomerno črpanje in raba tal).

Po letu 1970 se krivulji CRF in DHF močno ločita od naravnega stanja, kar dokazuje pospešen antropogeni vpliv.

Prehod na mikro raven: Delinacija HydroBASINS



Problem globalnih povprečij:

Globalni podatki maskirajo lokalne inženirske in ekološke katastrofe. Sistem se ne zlomi povsod naenkrat.

Sistemska resolucija (HydroBASINS Level 4):

- 1280 hidrološko zaključenih regij (porečij).
- Povprečna velikost regije: 103,000 km².
- Izključena območja z >50% trajnega ledu.

Matematika normalizacije: Primerjava neprimerljivega

Kako primerjamo sušno podnebje Afrike z vlažno sibirsko tajgo?

$$\text{Indeks normalizacije (IN)} = \frac{(\text{Vrednost} - \text{Mediana_osnovne_variabilnosti})}{95.\text{ percentil_osnovne_variabilnosti} - \text{Mediana_osnovne_variabilnosti}}$$

$$\text{Vrednost}_t = \sum (X_i * w_i) - \text{Osnovno_stanje}$$

$$\text{Mediana_osnovne_variabilnosti} = 50.\text{ percentil} (\sum \text{pretekli_podatki})$$

$$95.\text{ percentil_osnovne_variabilnosti} = \text{Meja_transgresije} (\sum \text{pretekli_podatki})$$

1



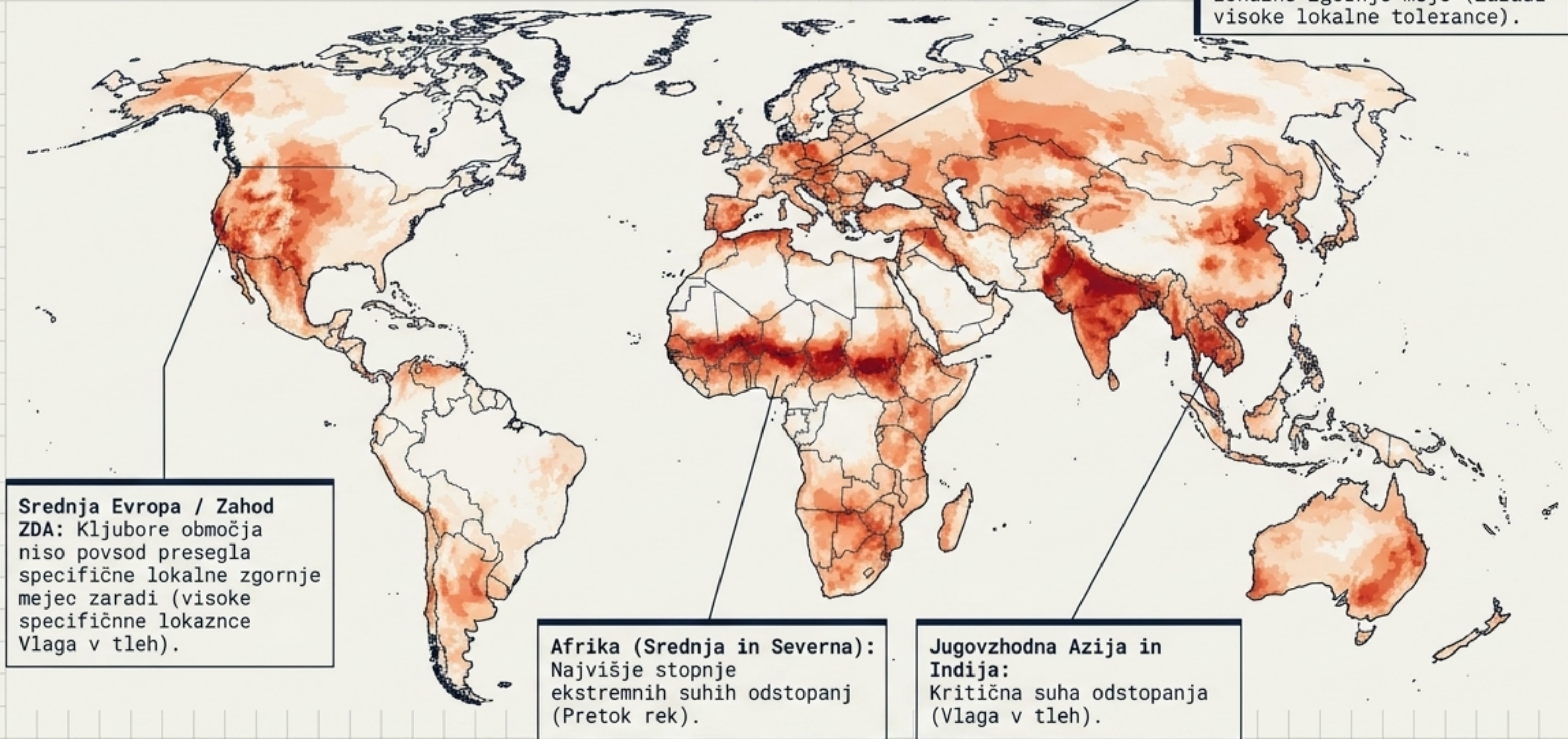
0

Vrednost 1:
Stanje ustreza zgornji meji (95. percentil) osnovne variabilnosti (Meja transgresije).

Vrednost 0:
Stanje ustreza mediani osnovne variabilnosti (Sistem v ravnovesju).

Indeks normalizacije meri odstopanje od lokalne naravne variance. S tem omogočimo pravično identifikacijo ranljivih vročih točk neodvisno od njihove absolutne vlažnosti.

Regionalna diagnostika: Vroče točke sušnih odstopanj



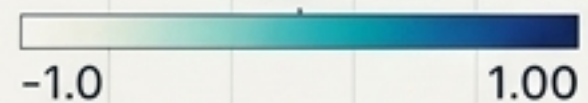
Regionalna diagnostika: Vroče točke mokrih odstopanj

Borealno območje:
Zelo visoka frekvenca mokrih odstopanj tako pri modri kot zeleni vodi.
Posledica: Taljenje permafrosta in sproščanje toplogrednih plinov.

Kongo / Vzhodna Avstralija:
Indeks kaže negativne vrednosti (pod mediano), kar pomeni drastičen upad naravnih mokrih dogodkov in splošno sušenje teh sistemov.

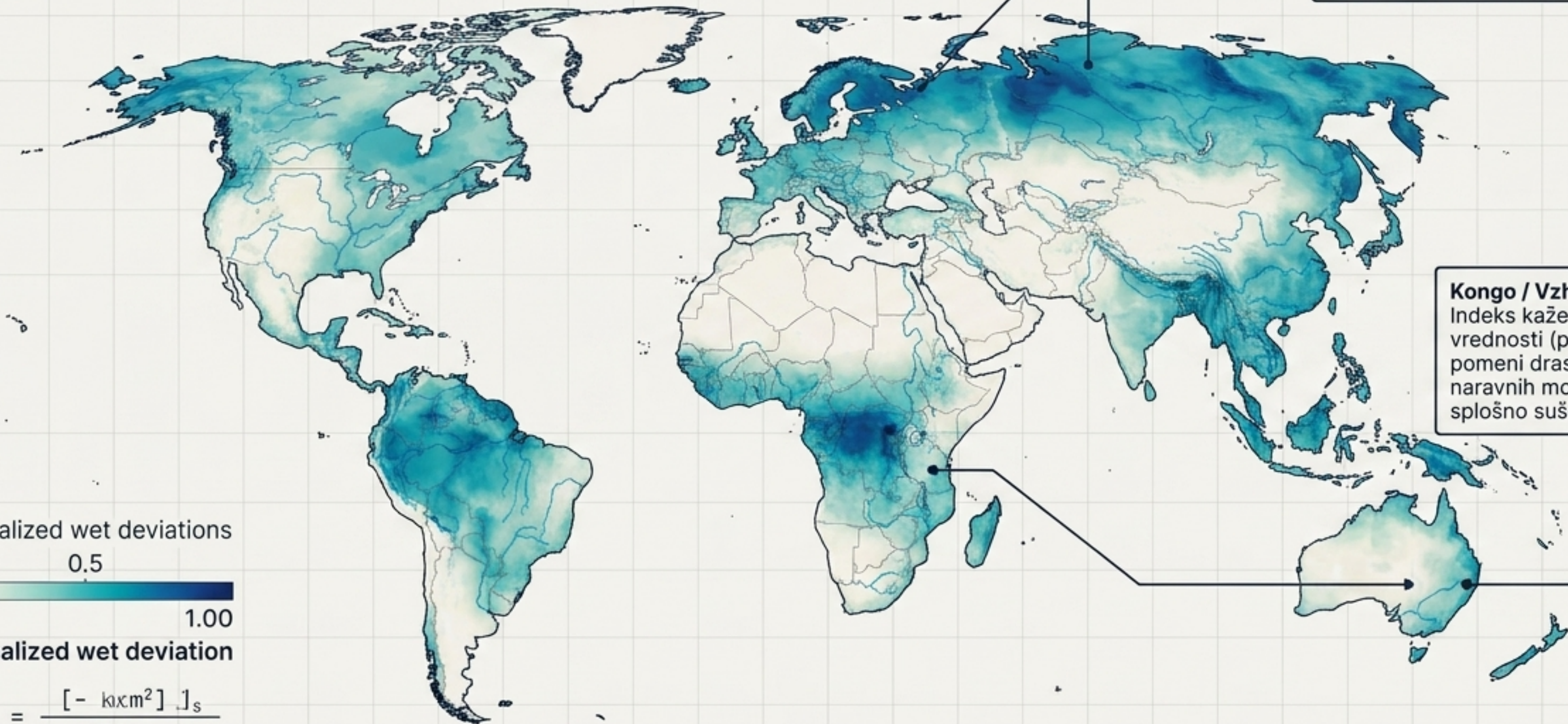
Normalized wet deviations

0.5



Normalized wet deviation

$$W_{wrotx} = \frac{[-k \times m^2] \cdot J_s}{1 - \sum(r - d_w)}$$

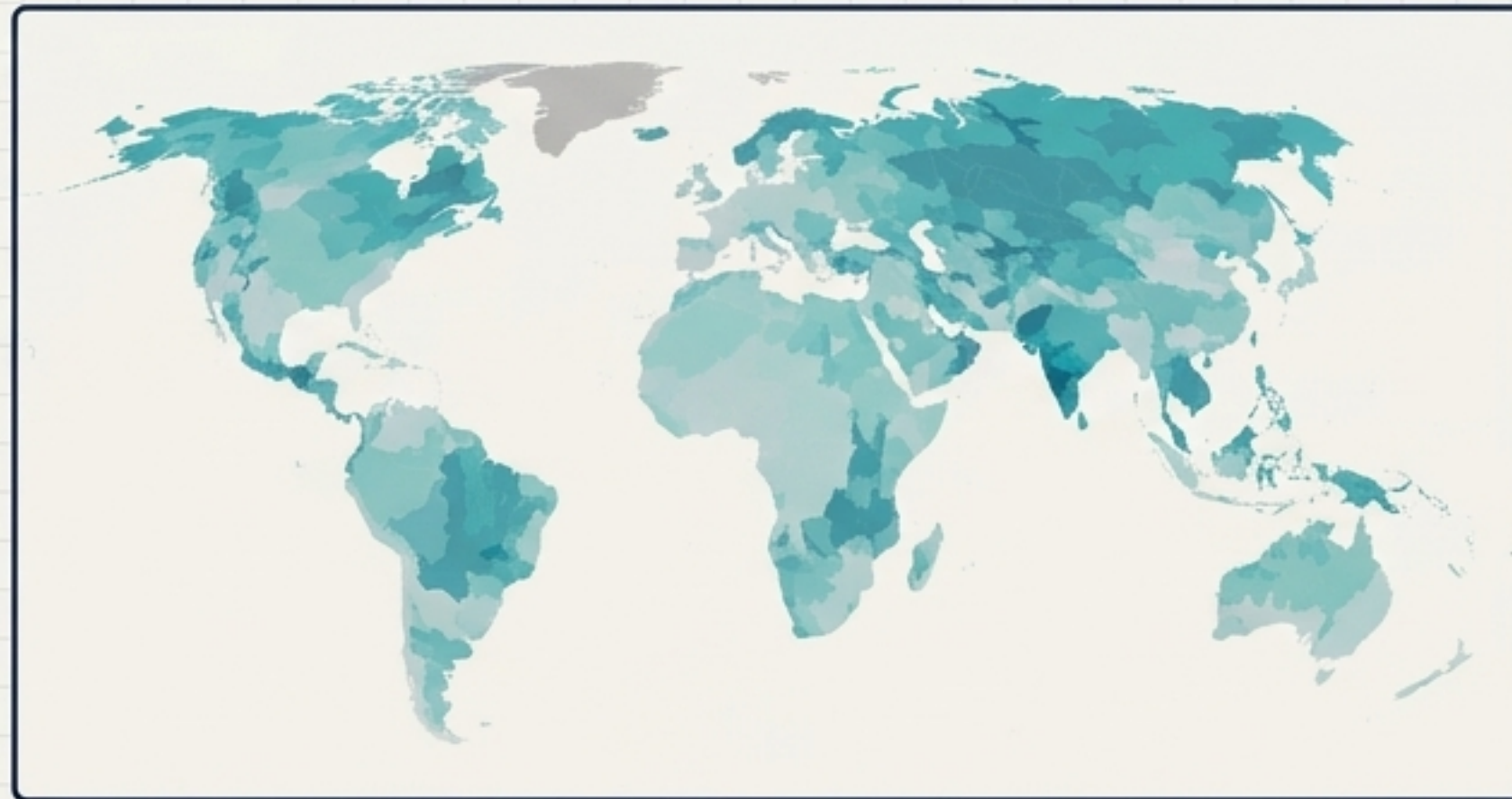


Kavzalna polarizacija: Geografija gonilnikov



Zemljevid A (Podnebje - CRF):

Širok in homogen globalni odtis. Dominira pri **mokrih odstopanjih** na severu in **suhih** v veliki večini večini Afrike.



Zemljevid B (Človek - DHF):

Visoko lokaliziran odtis. Močno vpliva na **suha odstopanja** v **kmetijsko** in **infrastrukturno** intenzivnih regijah (Indija, Zahod ZDA, Centralna Azija, Arabski polotok).

Ugotovitev: Kjer sta hkrati prisotna **podnebni** in **človeški pritisk** z veliko močjo, gre skoraj izključno za **suha odstopanja pretoka rek**.

Inženirski paradoksi: Maskiranje in ojačevanje signalov

Paradox 1: Umetno blaženje (Centralna Azija & Indija)

CRF (Podnebje):
Povečuje
razpoložljivost vode
v sušni sezoni.

DHF (Človek):
EkspONENTNA RAST
PORABE VODE.

Rezultat: Človek
popolnoma izniči
naravni bonus in
ustvari ekstremno
sušo.

Paradox 2: Regulacija pretoka (Borealni sever & Evropa)

CRF (Podnebje):
Splošen trend
drastičnega močenja
sistema.

**DHF (Človek -
Jezovi):**
Zadrževanje
sezonskih viškov
vode.

Rezultat: Lokalna
infrastruktura
maskira in
zmanjšuje mokra
odstopanja pod
jezom kljub makro
podnebnemu signalu.

Uvajanje zunanjih spremenljivk: Kvantifikacija stresa



Prebivalstvo
(Population)

Opis: Gostota prebivalstva (HYDE 3.5 baza, 2019).

Pomen: Kvantifikacija pritiska neposredne porabe **modre vode** na lokalne sisteme.



HANPP

Opis: Človeška prisvojitvev neto primarne produkcije.

Pomen: Odstotek energije in biomase, ki si jo človek prisvoji prek rabe tal in žetve. Indikator intenzivnega pritiska na **zeleno vodo**.

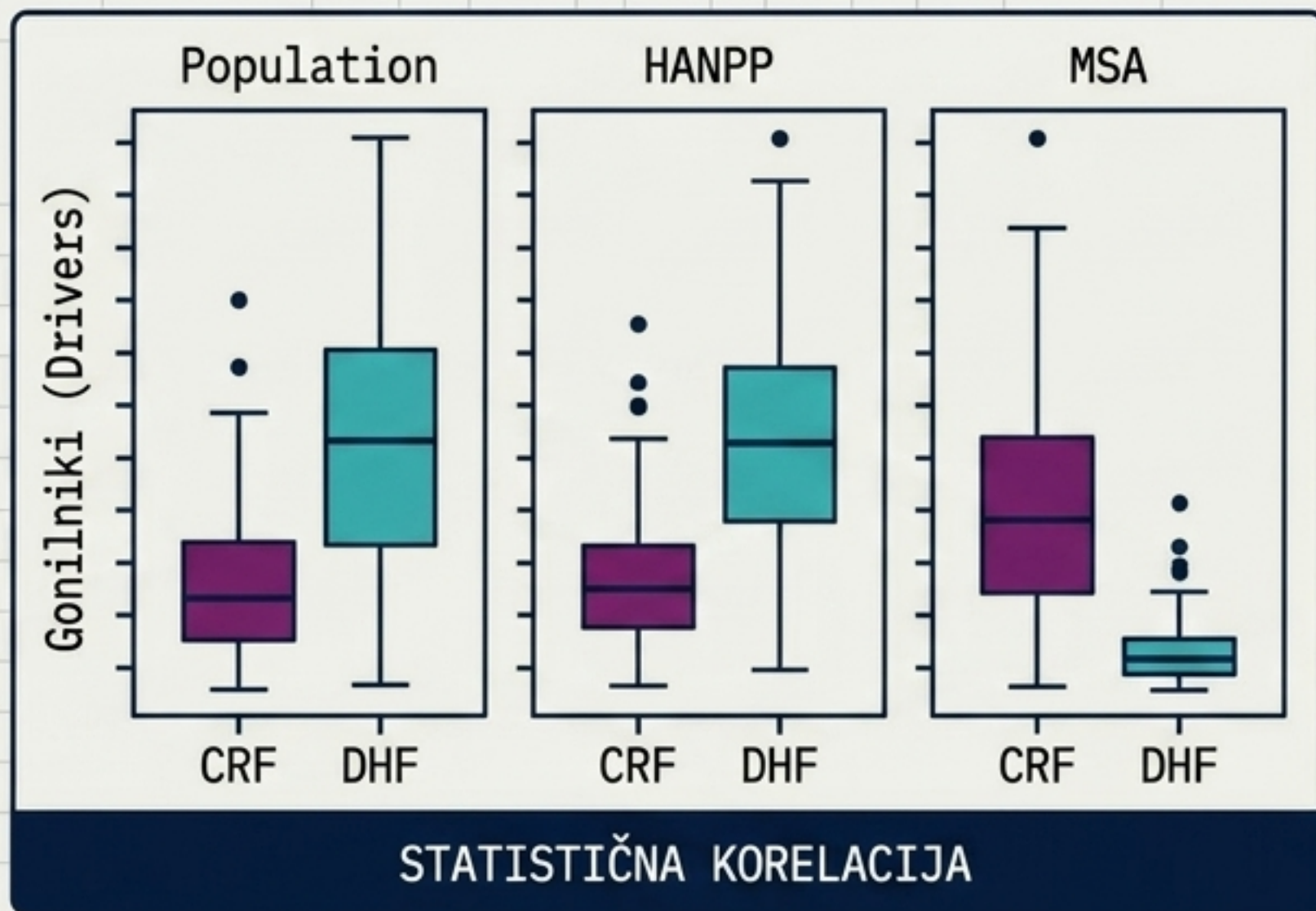


MSA

Opis: Povprečna obilnost vrst (Mean Species Abundance, 0 do 1).

Pomen: Merilo neokrnjenosti biodiverzitete. Nizek MSA pomeni visoko stopnjo uničenja lokalnega ekosistema.

Sistemska sinteza: Kjer dominira človek, sistem odpoveduje



CRF in ekosistemi

Najmočnejši podnebni vplivi se pogosto nahajajo v regijah, kjer so ekosistemi razmeroma nedotaknjeni (visok MSA, nizek HANPP), a vseeno utrpijo hude hidrološke spremembe.

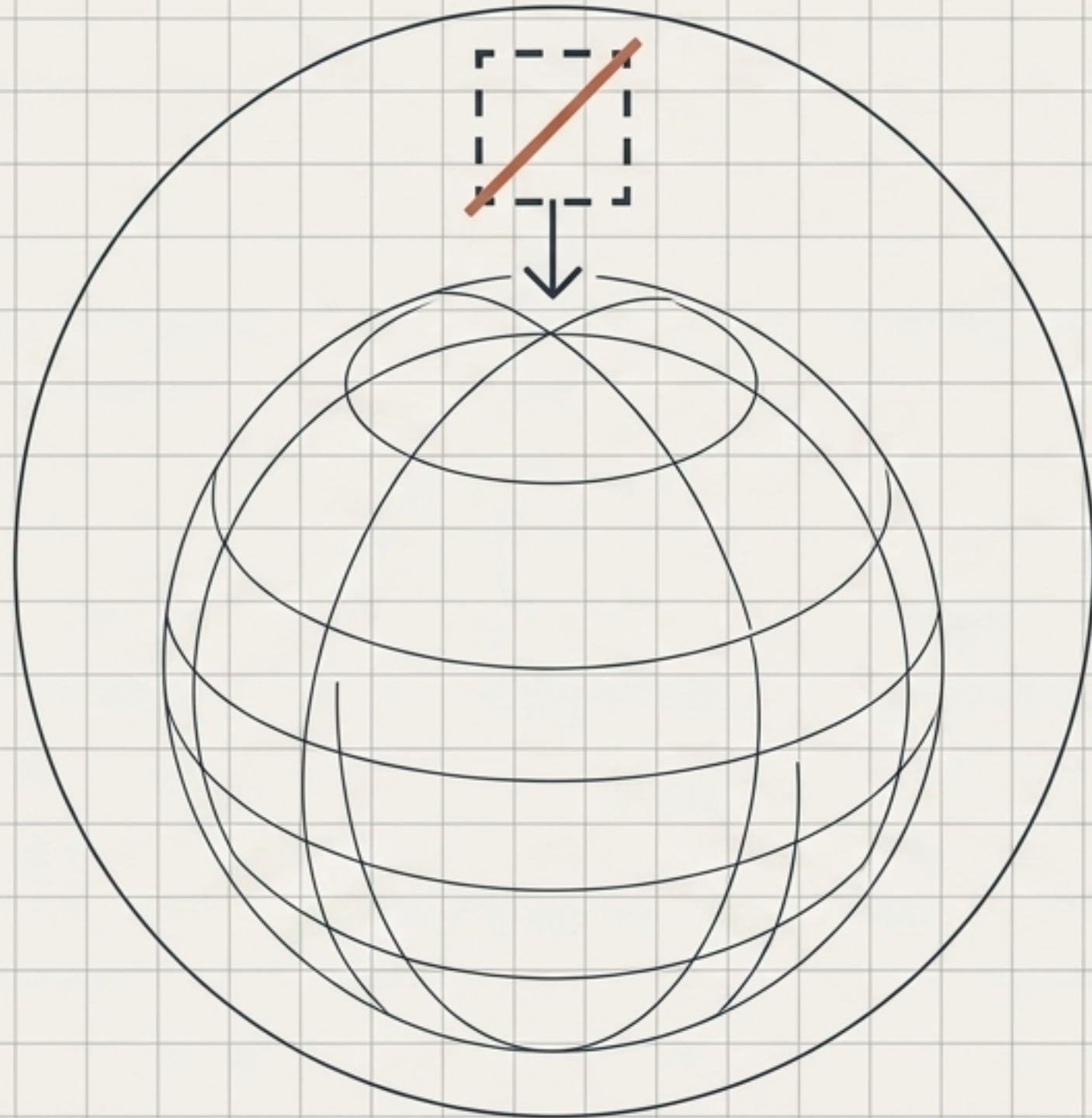
DHF in sistemska ranljivost

Najvišji prispevek človeka je neposredno prostorsko koreliran z:

1. Najvišjo populacijo
2. Visokim deležem HANPP
3. Najnižjo obilnostjo vrst (MSA)

Zaključek: Regije z najmočnejšim DHF signalom so popolnoma odvisne od modre/zelene vode, hkrati pa same povzročajo njen drastičen upad.

Sistemske negotovosti in omejitve simulacij



Fizična resolucija:

Omejena na 0.5° mrežo. Lokalni, mikro-inženirski ukrepi (specifične tehnike namakanja na nivoju kmetije) niso zajeti v ISIMIP podatkih.

Enosmerne interakcije:

GHMs obravnavajo površinsko in podzemno vodo, a nimajo vgrajenih povratnih zank z atmosfero (land-atmosphere interactions). Otežena je ocena padavinske regulacije prek evapotranspiracije.

Definicija meje:

Okvir planetarnih mej predpostavlja, da 95. percentil lokalne variance neizogibno pomeni nesprejemljivo tveganje. Empirična določitev točnih prelomnih točk za vsak specifičen lokalni ekosistem ostaja izziv.

Zaključek: Pomen za infrastrukturno planiranje

Zemlja ni prilagodljiva pipa: Sladkovodnega cikla ni mogoče več obravnavati zgolj kot statičen vir za potrošnjo, temveč kot močno spremenjen in dinamičen planetarni podsystem.

Povratek ni več mogoč: Vrnitev v pred-transgresijsko stanje je malo verjetna tudi ob radikalnih podnebnih ukrepih. Fokus se mora premakniti na obvladovanje hitrosti in stopnje prihodnje transgresije.

Lokalne rešitve (DHF):

Medtem ko je globalni podnebni signal težko obvladljiv kratkoročno, je mitigacija človeških posegov (optimizacija namakanja, pametno upravljanje z jezovi) najbolj otipljiv vzvod za zmanjšanje sistemske ranljivosti.