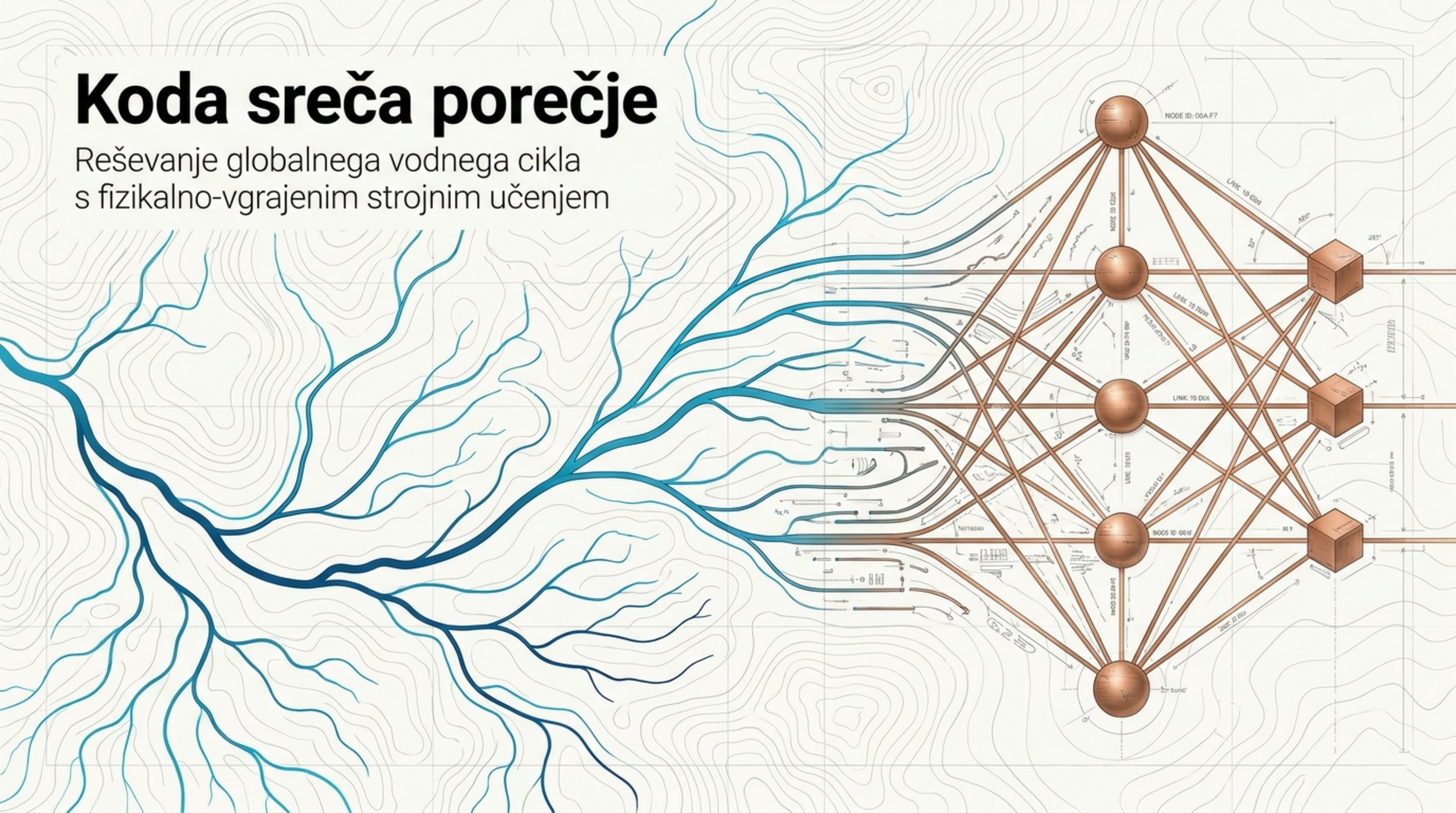


Koda sreča porečje

Reševanje globalnega vodnega cikla
s fizikalno-vgrajenim strojnim učenjem

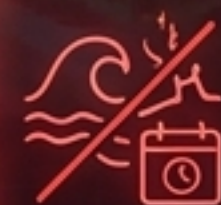


Globalni problem, lokalna slepota

Tradicionalni globalni modeli (GWMs) odlično simulirajo celinske trende in dolgoletna povprečja.

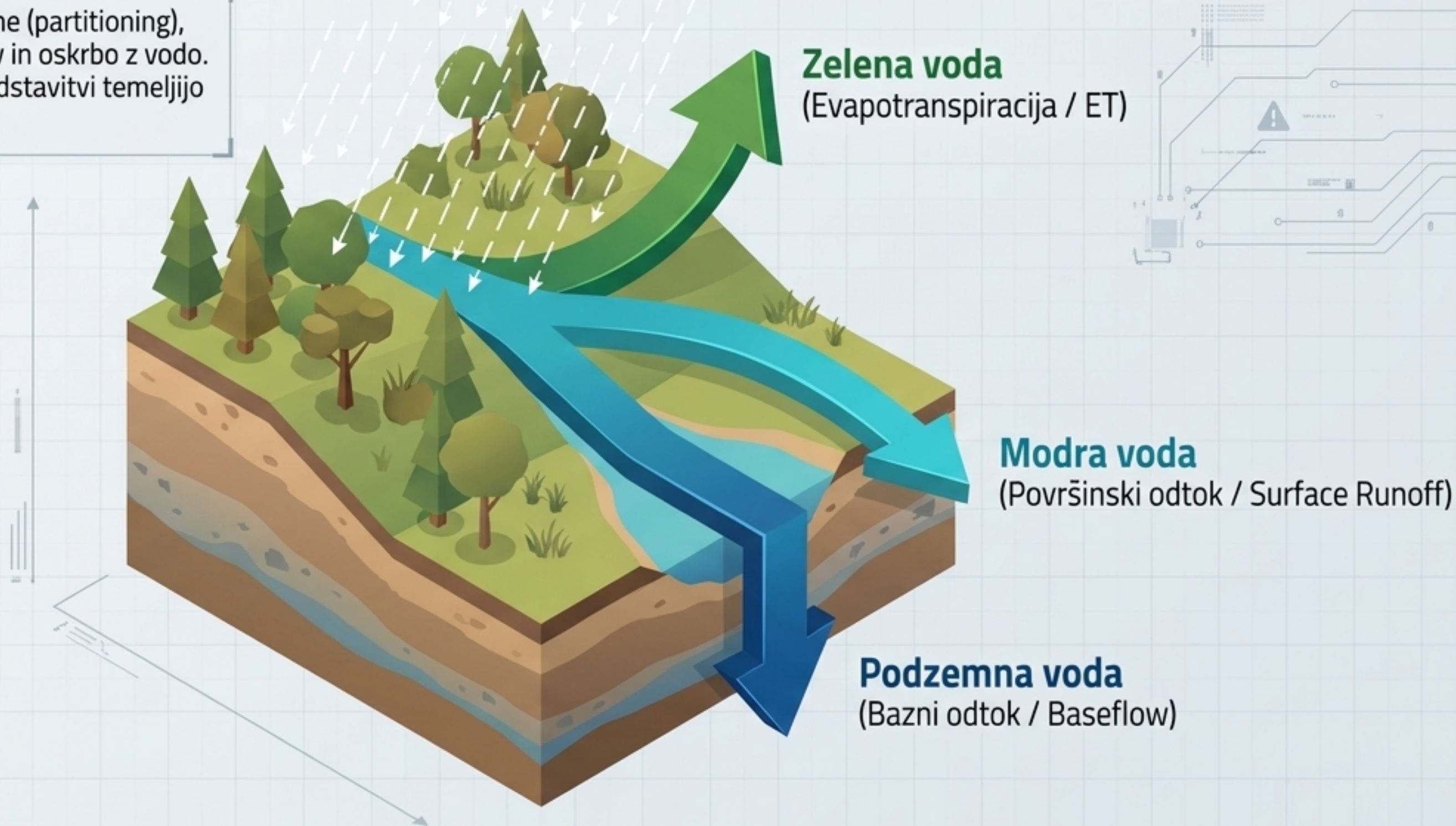


Vendar odpovejo pri visoki ločljivosti. Upravljanje z vodami potrebuje dnevne napovedi za specifična porečja (poplave, suše), česar pa GWMs zaradi računske zahtevnosti in pomanjkanja podatkov ne zmorejo.



Anatomija porečja: Zelena in modra voda

Kako pokrajina razdeli padavine (partitioning), določa preživetje ekosistemov in oskrbo z vodo. Vse nadaljnje analize v tej predstavitvi temeljijo na tej bilanci.



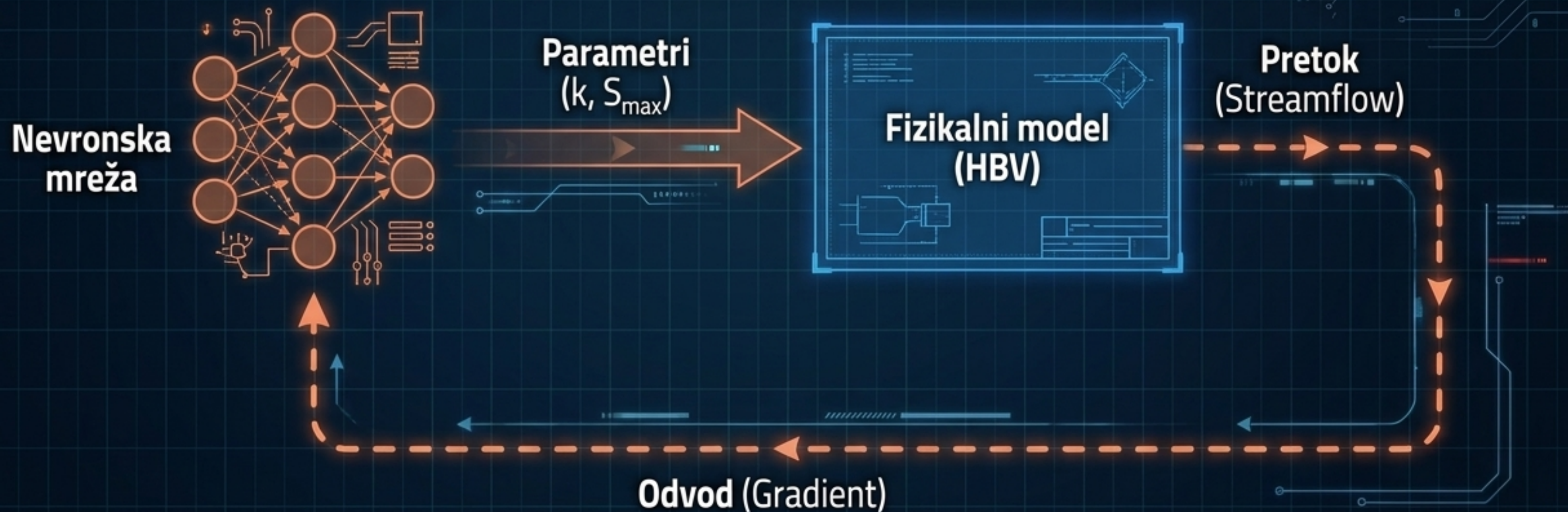
Evolucija hidrološkega modeliranja

	Tradicionalni GWMs	Čisto strojno učenje (Pure LSTM)	Fizikalno-vgrajeno ML (δ HBV2)
Učenje iz velikih podatkov (Big-Data)	⚠ Omejeno	✓ Odlično	✓ Odlično
Ohranjanje fizikalnih zakonov (Mass Conservation)	✓ Da	✗ Ne (Black box)	✓ Da
Prostorska ločljivost	Groba (~0.5°)	Točkovna	Visoka (MERIT ~37 km ²)
Diagnostika notranjih stanj (ET, Baseflow)	✓ Da	✗ Ne	✓ Da

Rešitev ni v opustitvi fizike, ampak v njeni integraciji z globokimi nevronskimi mrežami.

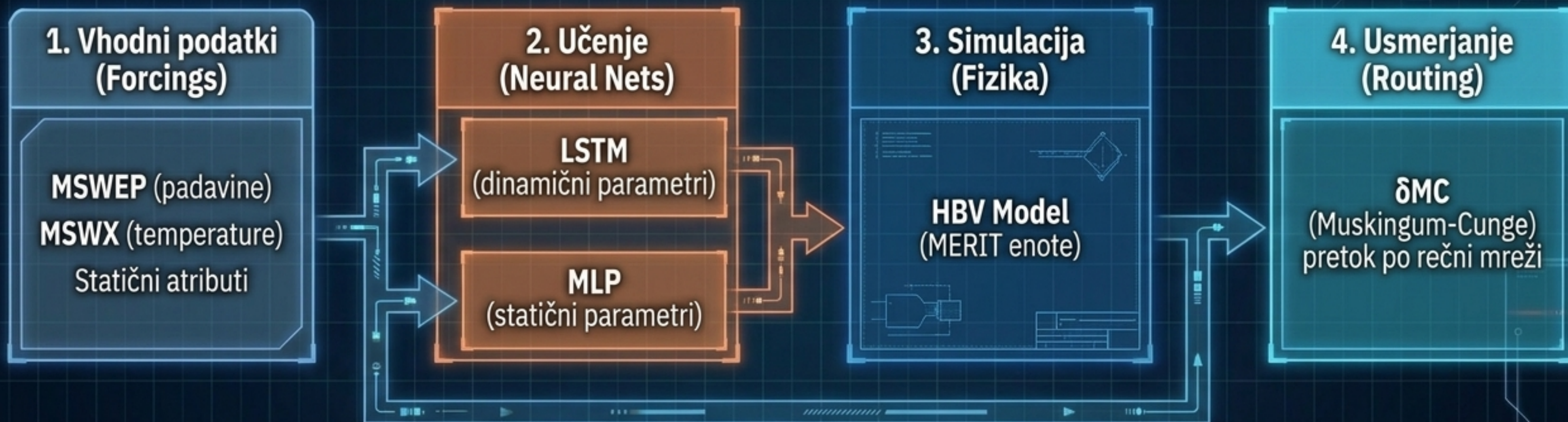
Odvedljiva fizika (Differentiable Modeling)

Nevronska mreža in fizikalne enačbe se trenirajo hkrati. Ker so fizikalne enačbe programirane kot odvedljive (differentiable) operacije v PyTorchu, lahko algoritem za vzratno širjenje napake (backpropagation) prilagodi nevronske mreže, pri tem pa ohrani zakone ohranitvi mase.



Arhitektura δ HBV2 modela

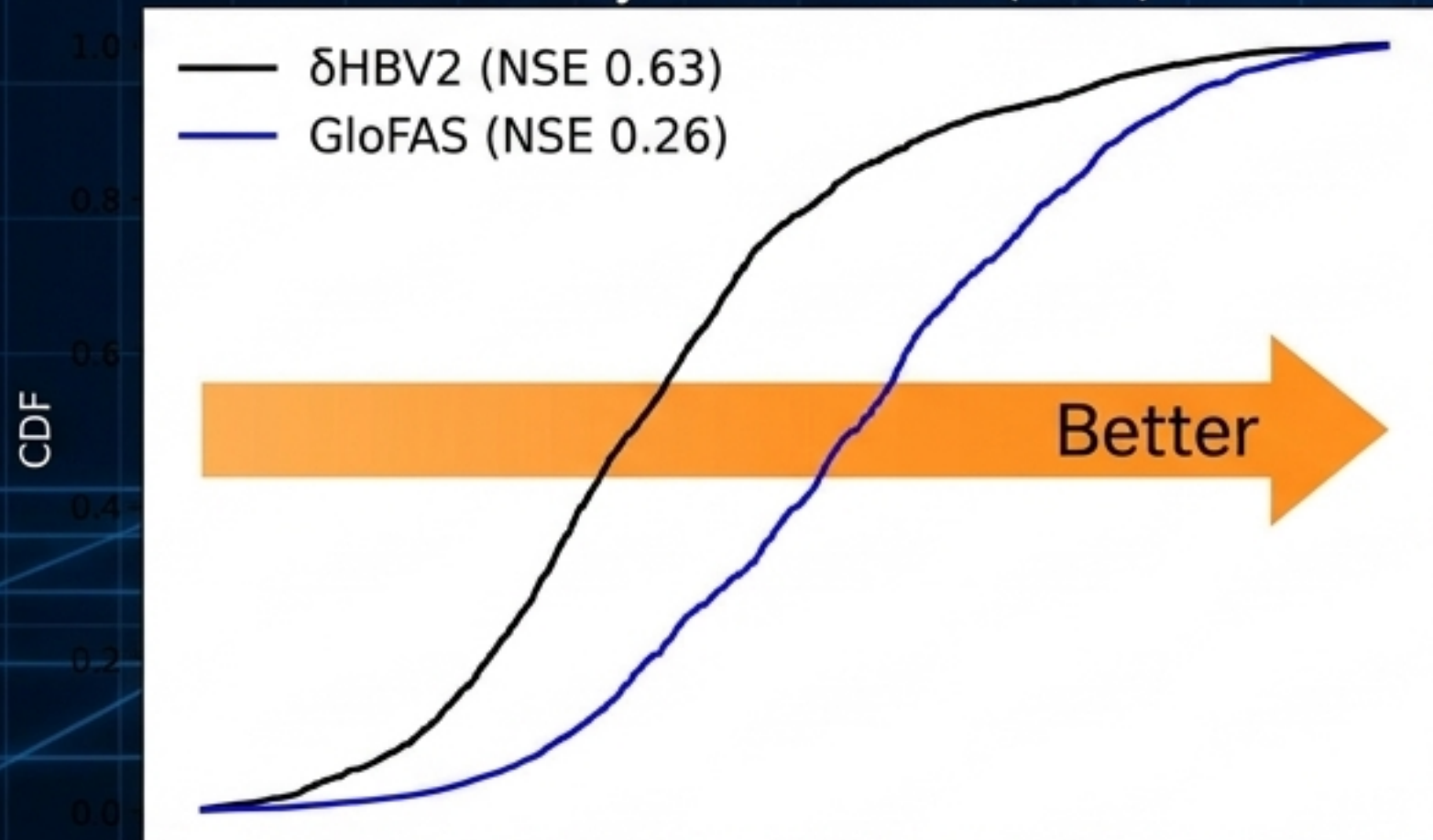
Model generira parametre za 2,9 milijona MERIT porečij (mediana 37 km²) in simulira pretok z visoko učinkovitostjo (10 let globalnih simulacij v 7 urah na enem A100 GPU).



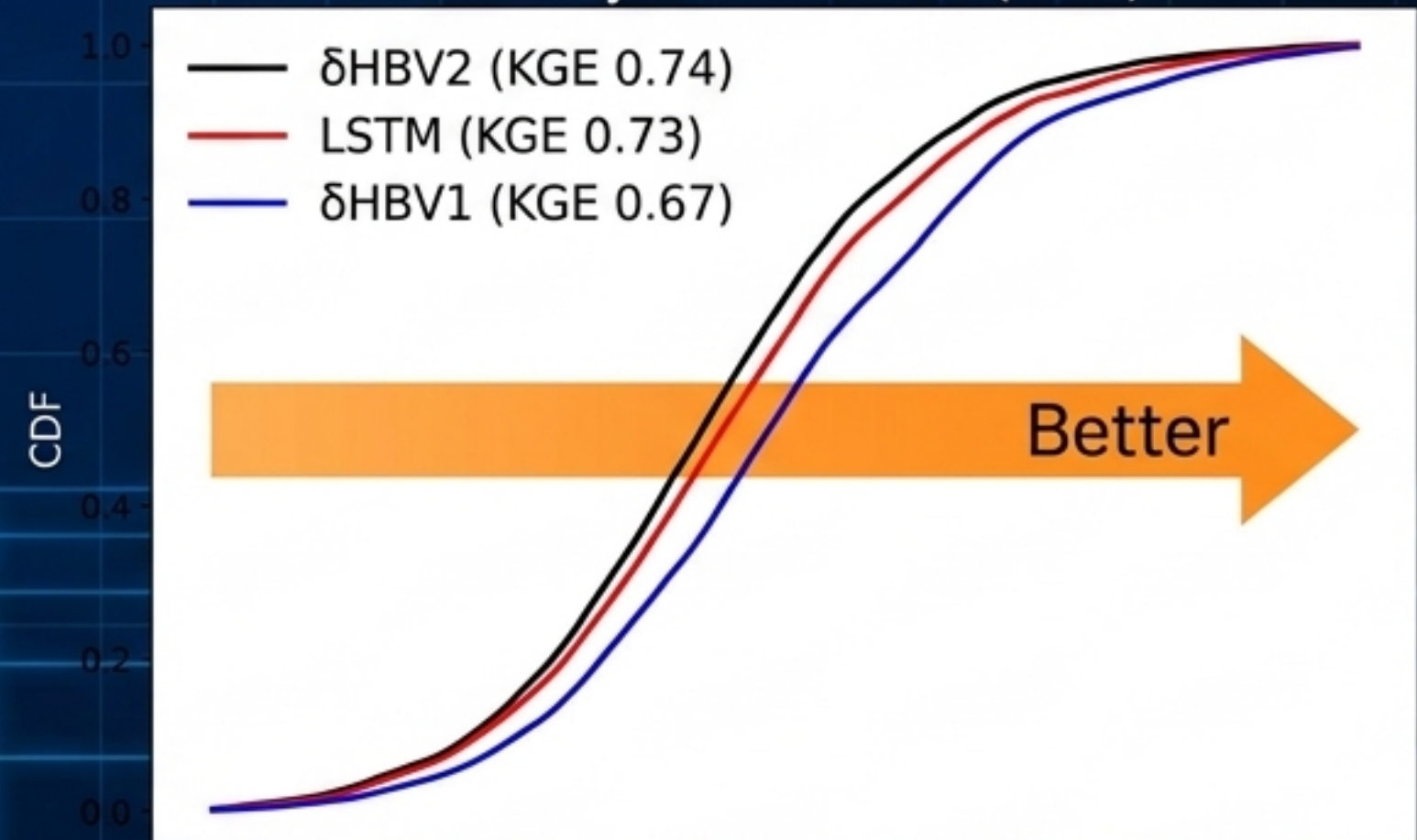
Kvantitativna potrditev (Benchmarking)

δ HBV2 dosega več kot **dvakrat višjo** mediano NSE na dnevni ravni kot operativni model GloFAS v neizmerjenih porečjih (PUB). Prav tako rahlo presega celo čiste LSTM modele v KGE metriki, obenem pa ohranja **fizikalno interpretabilnost**.

Primerjava modelov (NSE)



Primerjava modelov (KGE)



Premikajoče se ravnovesje (2001 - 2020)

Z globalnim segrevanjem se osnovna delitev vode na planetu podira. V nekaterih regijah se je delež vode, ki izhlapi ali odteče pod zemljo, v zadnjih dveh desetletjih spremenil za več kot 20 %. Ta razmerja **(hidrološki podpisi) niso več statična.**



Zelena voda
(ET/P)

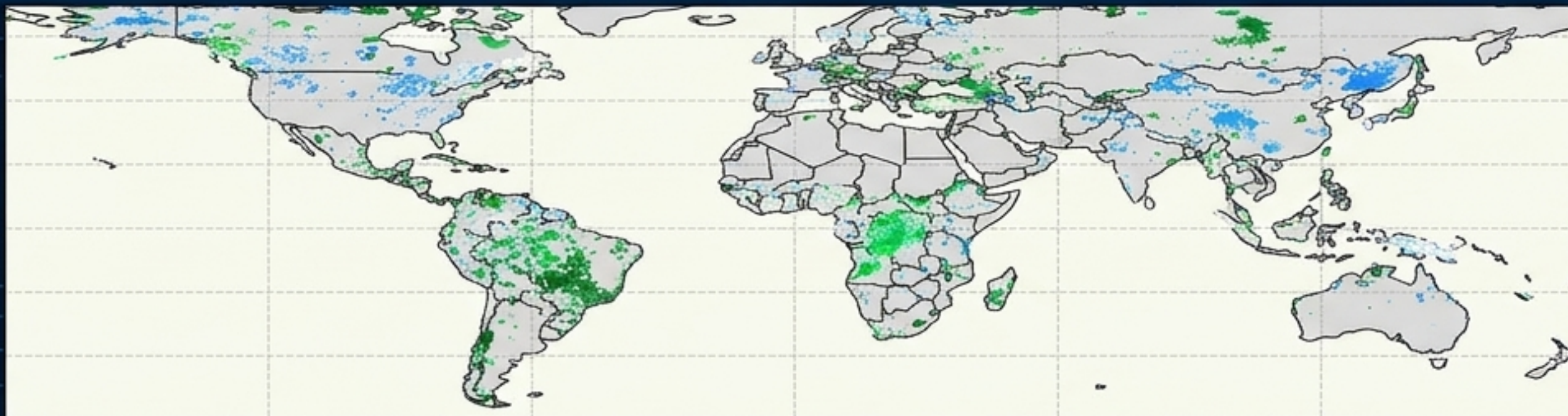


Modra voda
(Bazni odtok/Q')

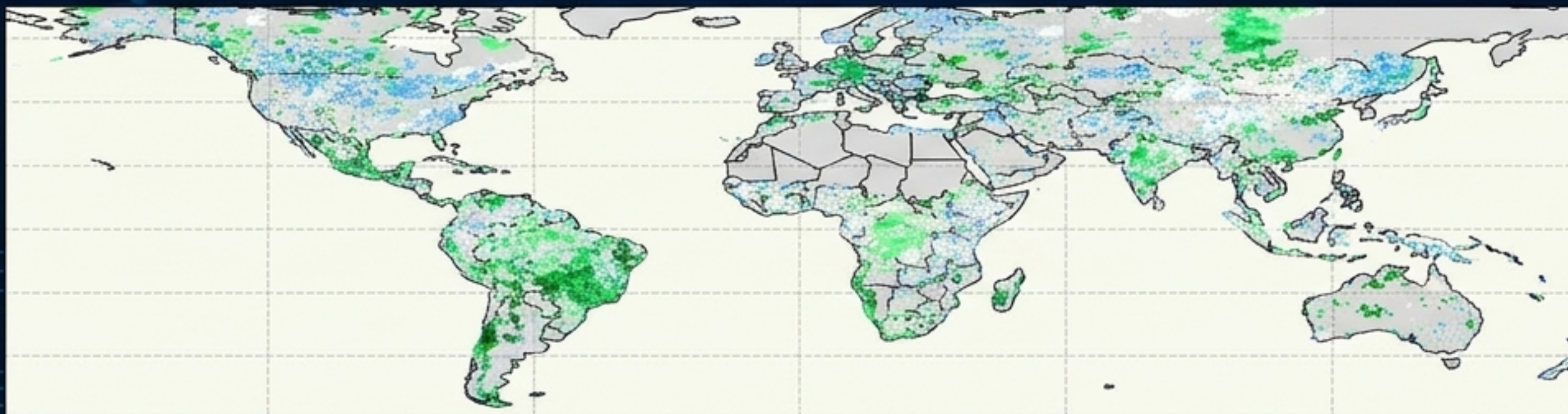
Globalna redistribucija vode

Zemljevidi prikazujejo letne spremembe. Kjer se poveča ET/P (**zeleno**), narava zadrži več vode na račun rek in ljudi. Kjer se poveča modra voda (modro), tveganje za nenadne poplave skokovito naraste.

Trendi v ET/P



Trendi v
Bazni odtok/Q'



120°W

60°W

0°

60°E

120°E

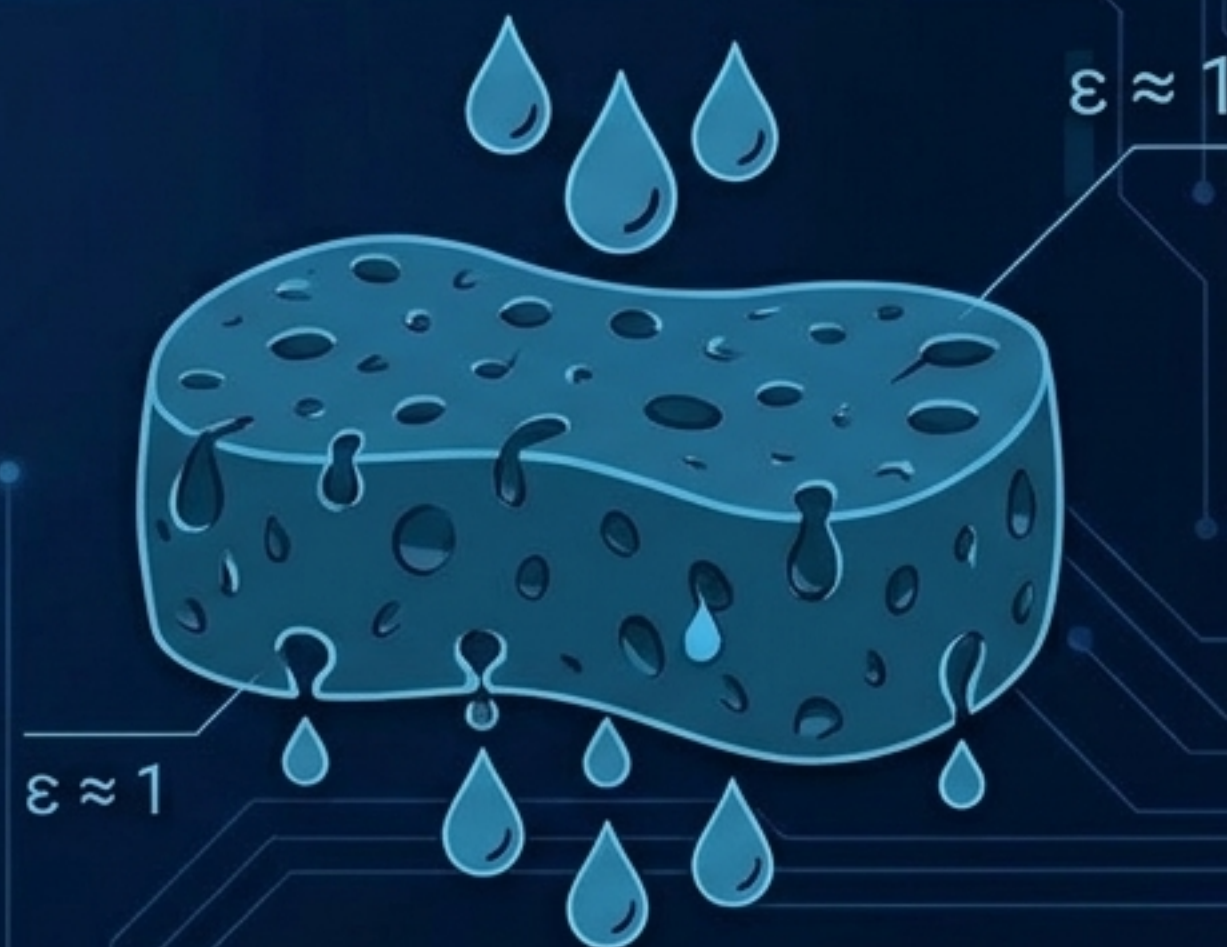
Elastičnost odtoka (ϵ): Koncept Spužve

Elastičnost meri občutljivost odtoka na padavine. V aridnih regijah pozimi (nasičena pokrajina) je odziv neposreden. Poleti (suha pokrajina) sistem deluje kot suha spužva – zmanjšanje poletnih padavin povzroči nesorazmerno velik upad rek, saj voda ne preseže praga za odtok.

Poletje / Suša (Visoka elastičnost)



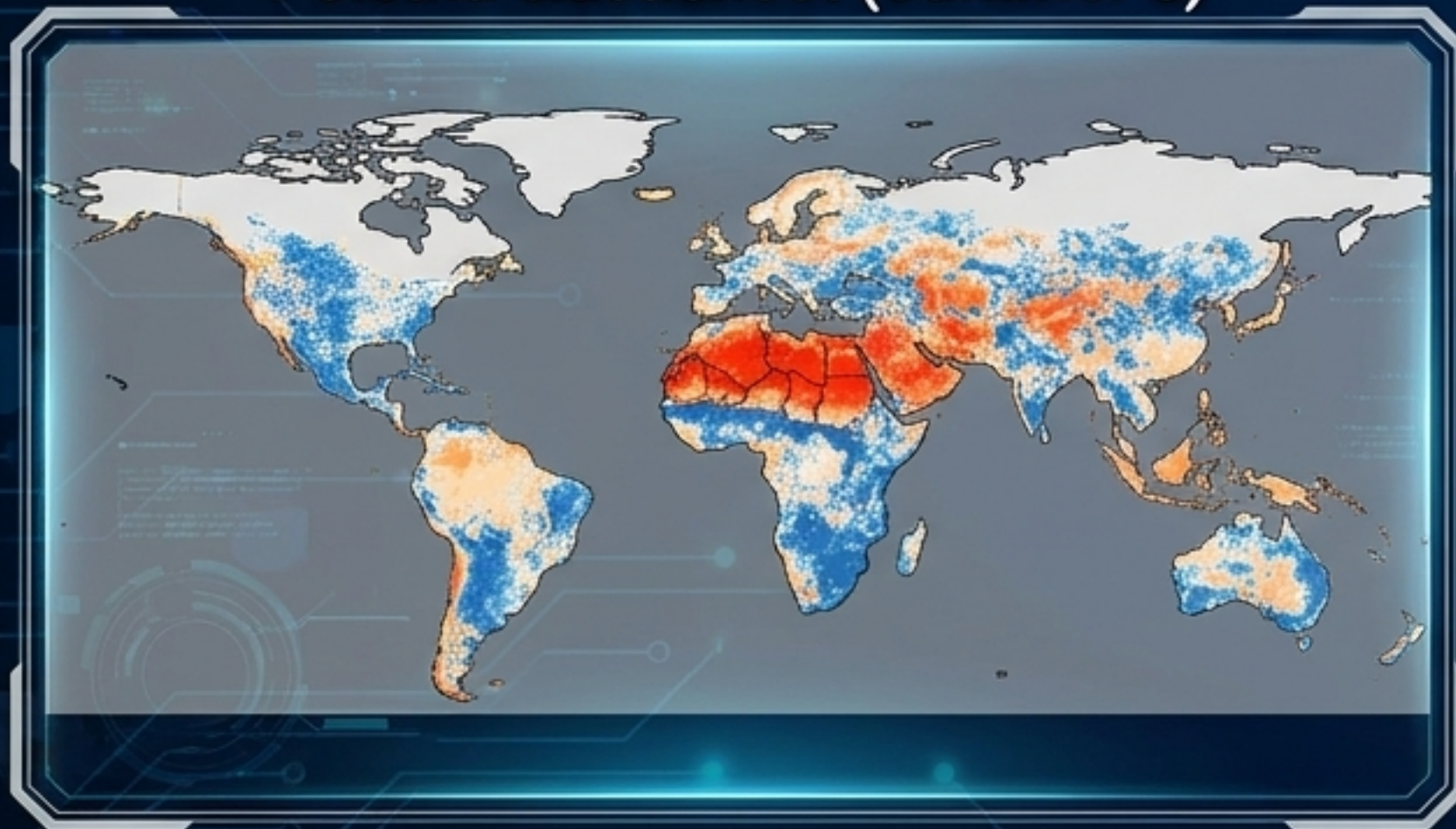
Zima / Nasičenost (Linearen odziv)



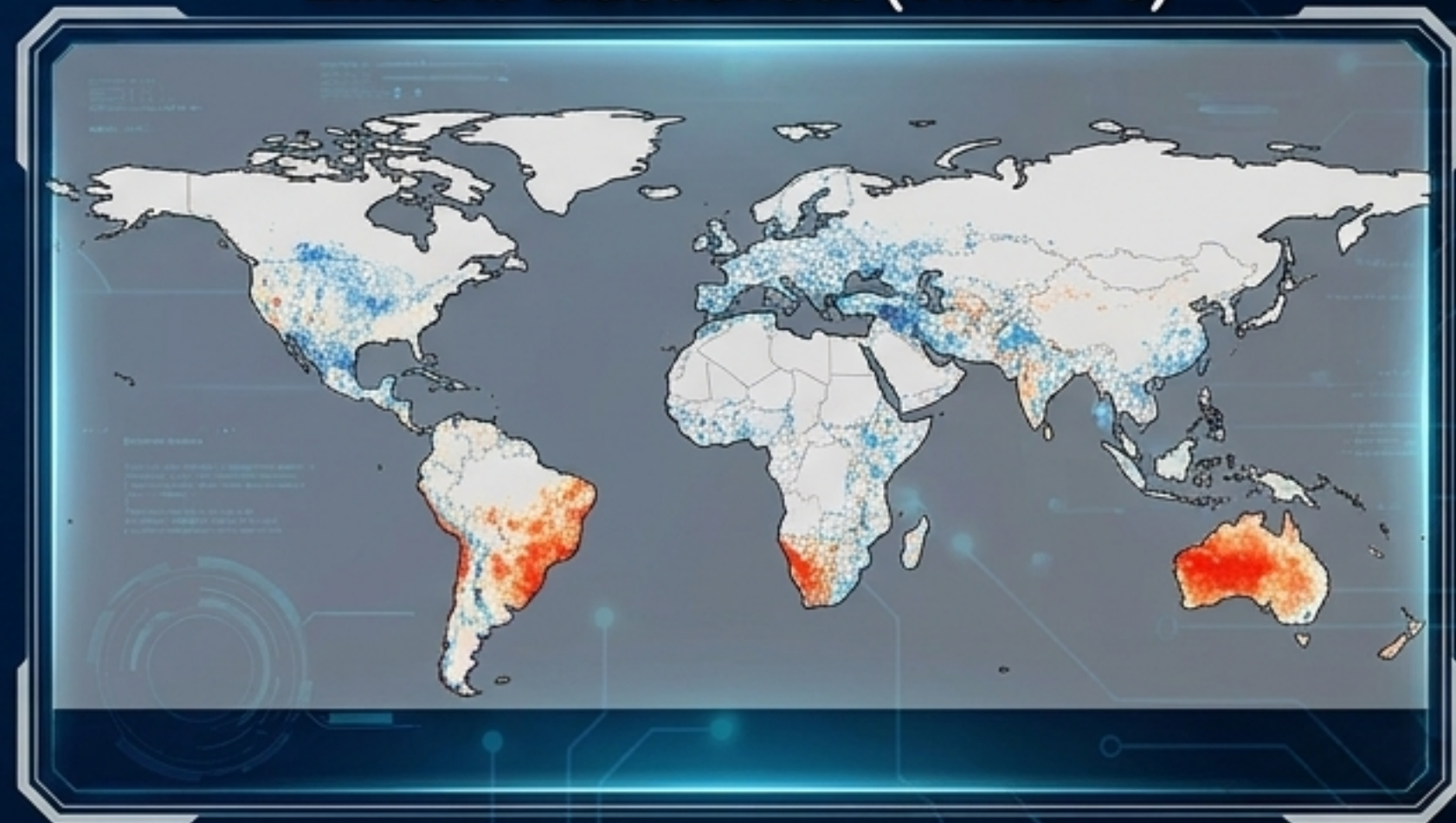
Sezonska občutljivost na klimatske spremembe

Visoka poletna elastičnost v ploskih regijah pomeni, da so lokalni ekosistemi izjemno ranljivi na poletne suše. Model δ HBV2 prvič omogoča vpogled v to sezonsko dinamiko z visoko ločljivostjo na globalni ravni.

Poletna elastičnost (Summer ϵ)

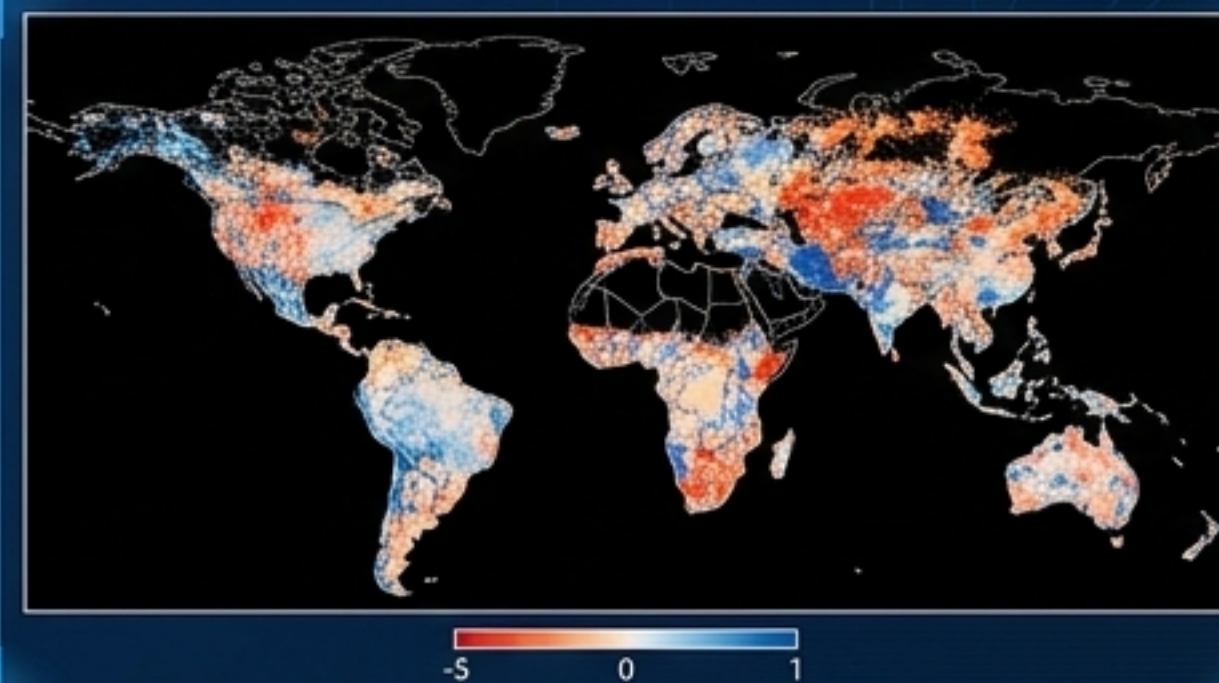
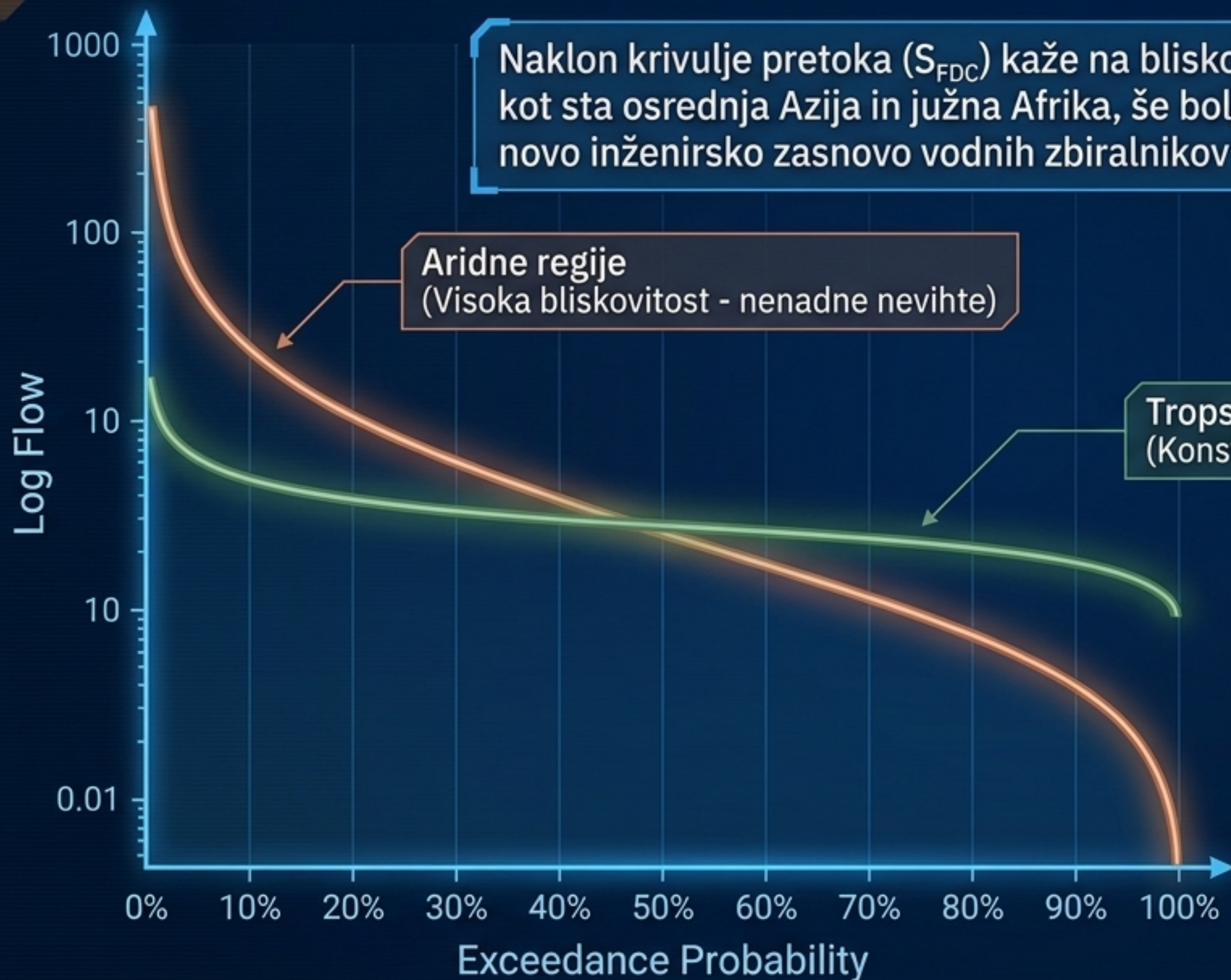


Zimska elastičnost (Winter ϵ)



Flashiness: Ekstremi rečnih pretokov

Naklon krivulje pretoka (S_{FDC}) kaže na bliskovitost rek. Trendi kažejo, da postajajo regije, kot sta osrednja Azija in južna Afrika, še bolj spremenljive (večji ekstremi). To zahteva novo inženirsko zasnovo vodnih zbiralnikov in protipoplavne obrambe.



Od podatkov do ukrepanja: Kako umetna inteligenca rešuje ekosisteme

Inženirska inovacija modela ni le akademska vaja. Matematični podpisi (signatures), ki jih je δ HBV2 odkril, pojasnjujejo tiho ekološko krizo, ki so jo tradicionalni modeli spregledali.



1. Povečan ET/P
(Več zelene vode)



2. Padajoč bazni odtok
(Manj podzemne vode)



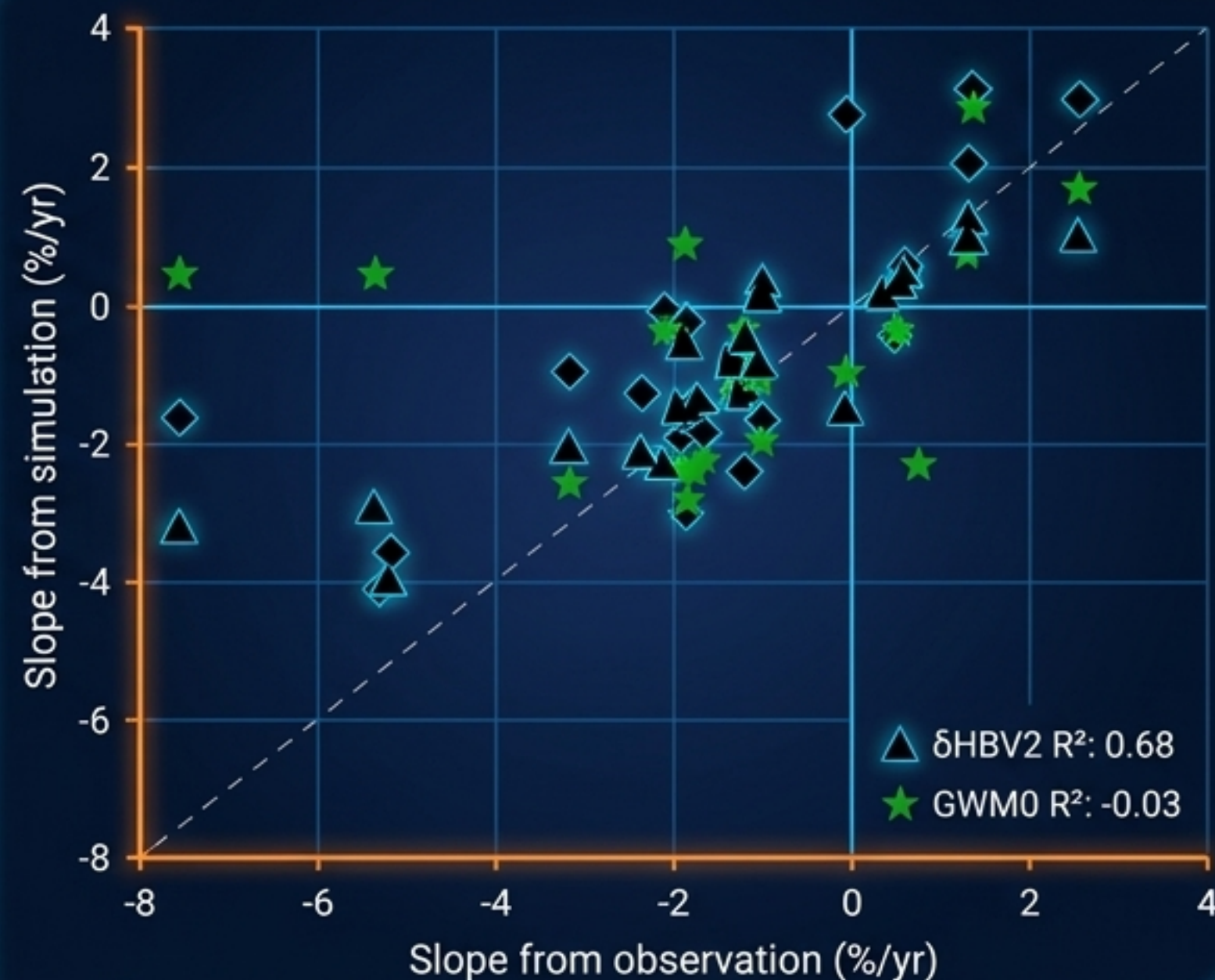
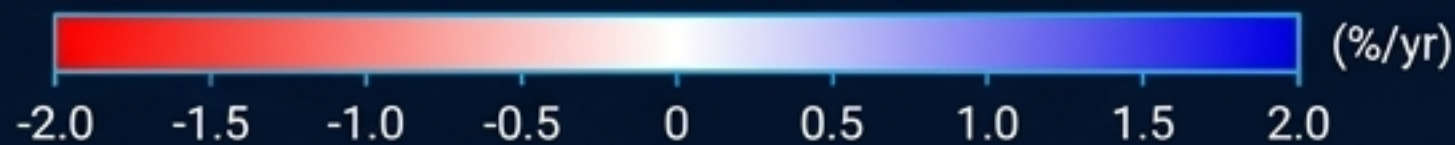
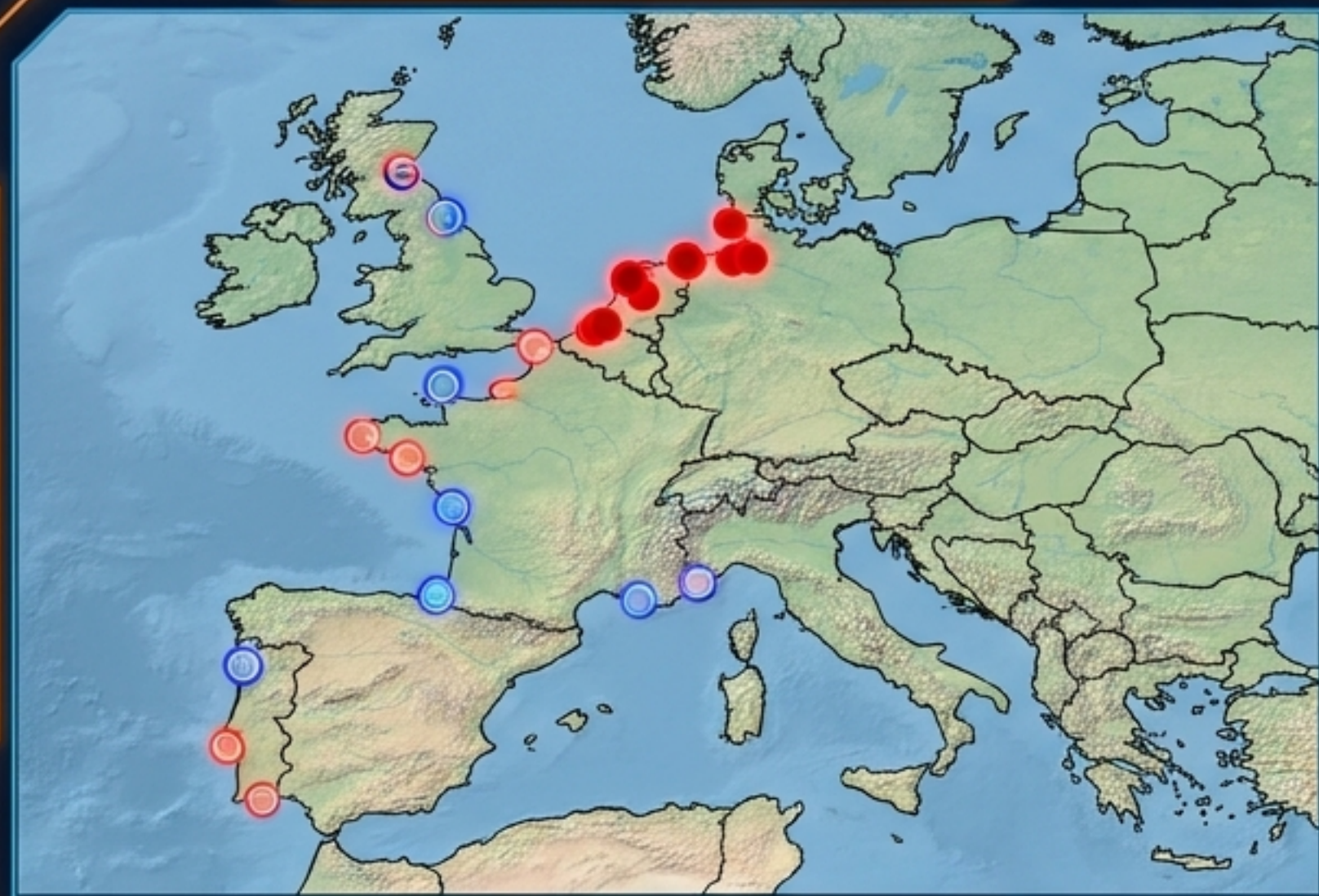
3. Visoka elastičnost
(Občutljivost na suše)

**Zmanjšan dotok
sladke vode v
obalna morja**

Študija primera: Umiranje evropskih estuarijev

Annotation:

δ HBV2 je odkril znaten upad (tudi do 30 % v 20 letih) dotoka sladke vode v estuarije Severnega morja. Tradicionalni GWM modeli ($R^2 < 0.0$) teh trendov sploh niso zaznali. Zmanjšan dotok povečuje slanost, kar uničuje ribje populacije in makrofavno, ter močno zaostruje učinke dviganja morske gladine.



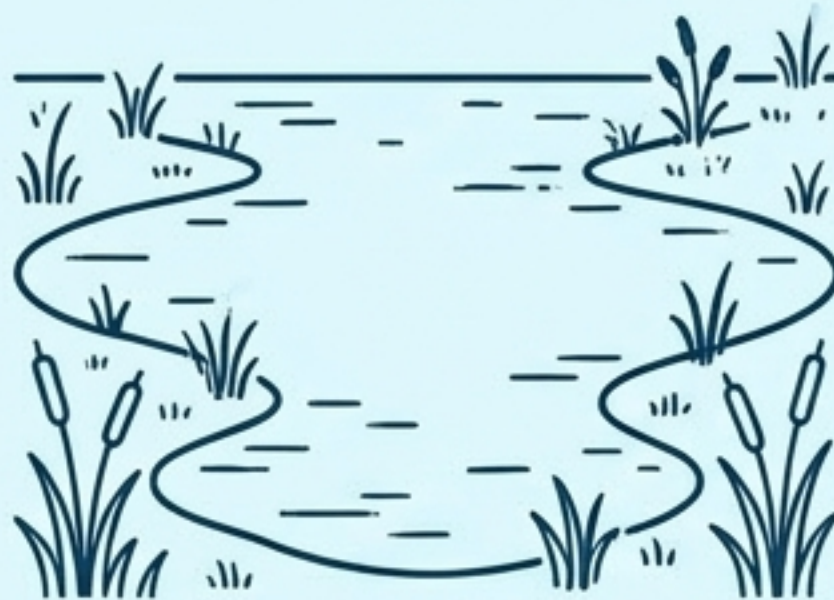
Omejitve sistema in izzivi za prihodnost

Annotation:

Noben model ni popoln. Čeprav δ MC usmerjanje presega prejšnje standarde, sistem trenutno težko simulira dinamiko masivnih jezer in jezov. Prav tako predpostavlja statično rabo tal. To so naslednje meje za integracijo UI in fizike.



Antropogeni vplivi (Jezovi)



Velika celinska jezera



Spremembe rabe tal



NOVA DOBA HIDROLOGIJE

“Globalni modeli zdaj zmorejo lokalno natančnost.”

Z združitvijo moči globokega učenja in zanesljivosti fizikalnih zakonov prehajamo v obdobje, kjer lahko dejansko razumemo in predvidimo odziv našega planeta na podnebne spremembe – porečje za porečjem, nevronskega vozla za nevronskega vozla.