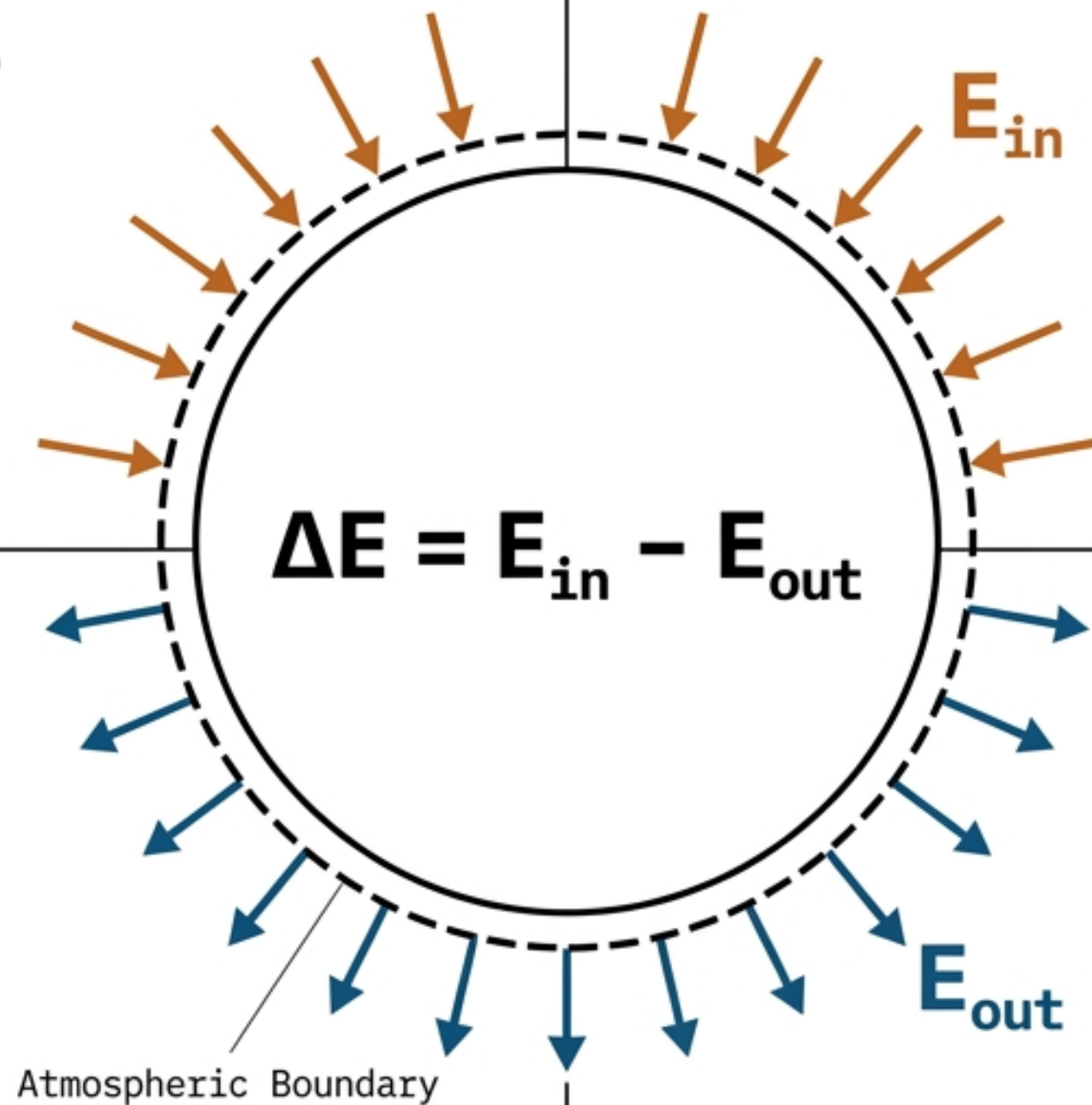


# Zemlja kot termodinamični sistem: Kalorimetrija na planetarni ravni

Kvantifikacija globalnega  
energetskega neravnovesja  
in zaloge toplote  
(1971–2020)



Omejeno na inženirsko analizo  
meritev, obdelave signalov  
in prenosa toplote.  
Podatki temeljijo na GCOS  
opazovanjih.

## Fizika problema: Zemljino energetska neravnovesje (EEI)


$$\Delta N_{\text{TOA}} = \Delta F_{\text{ERF}} - |\alpha_{\text{FP}}| \Delta T_s$$

Neto energetska neravnovesje na vrhu atmosfere ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Predstavlja razliko med vsiljenim sevanjem in odzivom sistema.

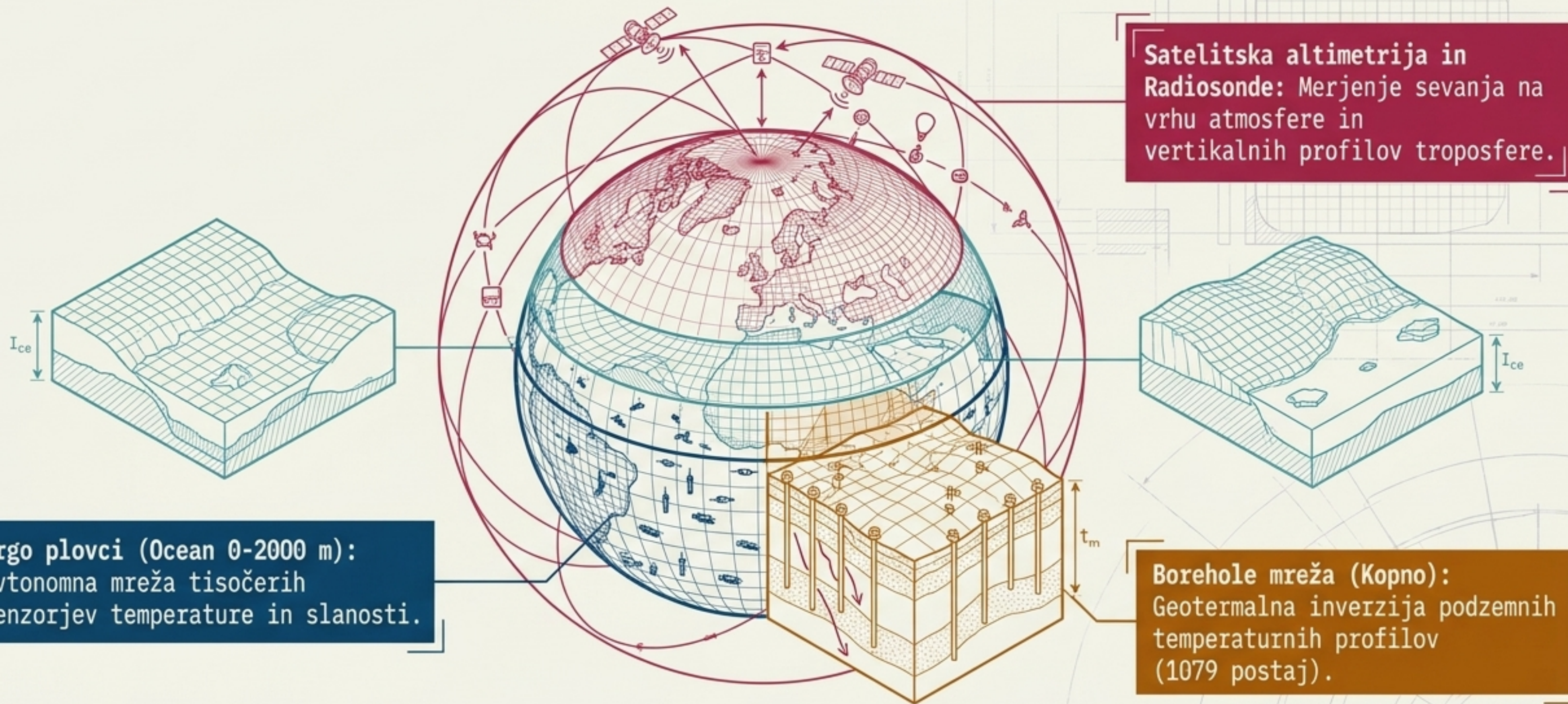
Efektivno radiativno siljenje.

Neto parameter povratnih zank ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^{-1}$ ). Merilo učinkovitosti sistema pri vzpostavljanju radiativnega ravnovesja.

Anomalija globalne površinske temperature (K).

 **KLJUČNO SPOZNANJE:** Dokler je  $\Delta N_{\text{TOA}} > 0$ , sistem kopiči energijo. To zahteva natančno spremljanje planetarne kalorimetrije.

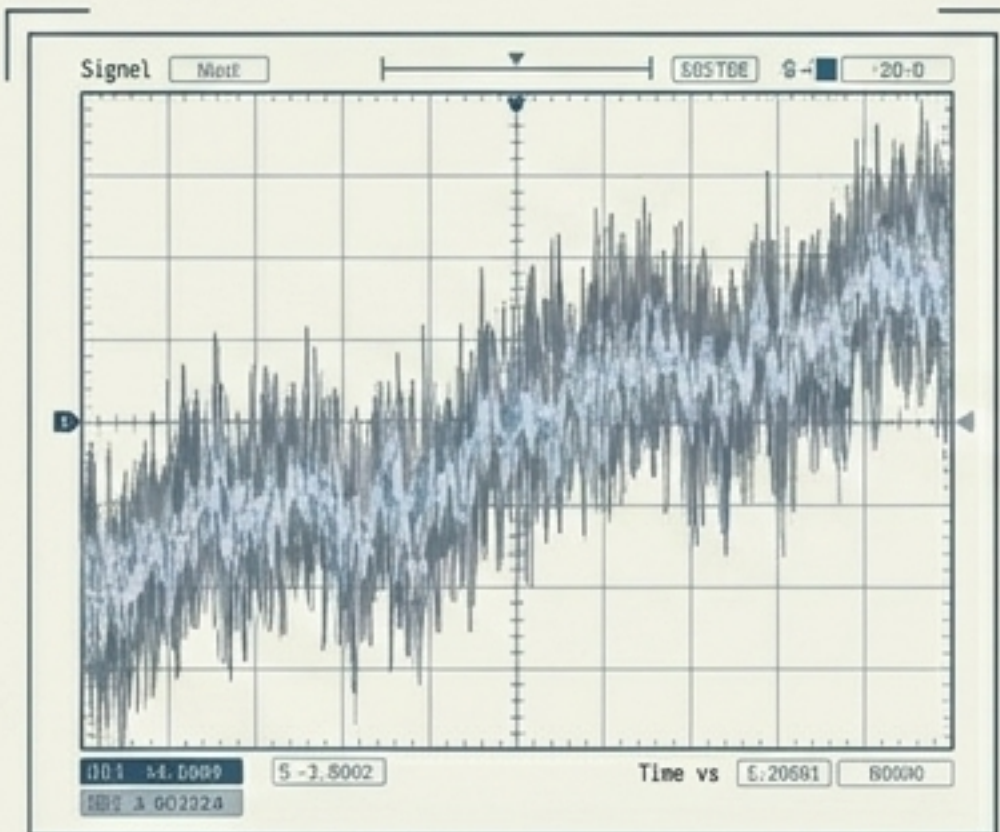
# Globalni opazovalni sistem (GCOS): Instrumentacija planeta



**OPOMBA:** Integracija teh večsenzorskih virov zahteva strogo statistično obdelavo za odpravo šuma in kalibracijskih napak.

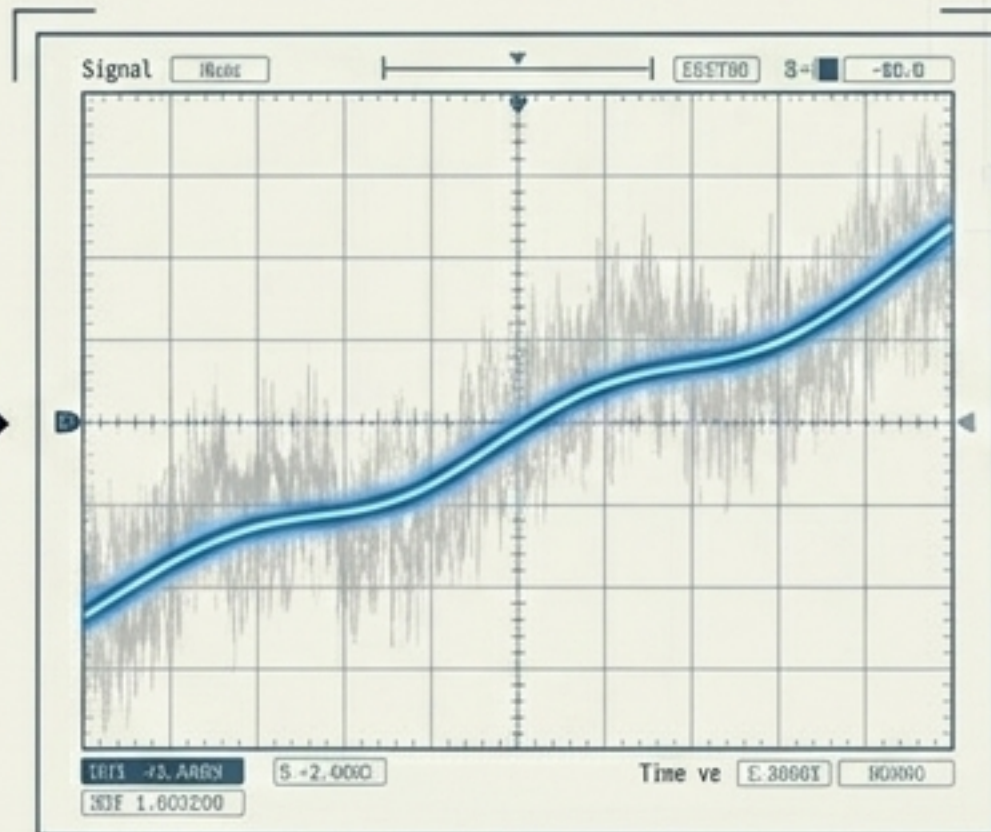
# Metodologija obdelave signalov: Izračun trendov in negotovosti

## 1. Ansambelsko povprečje



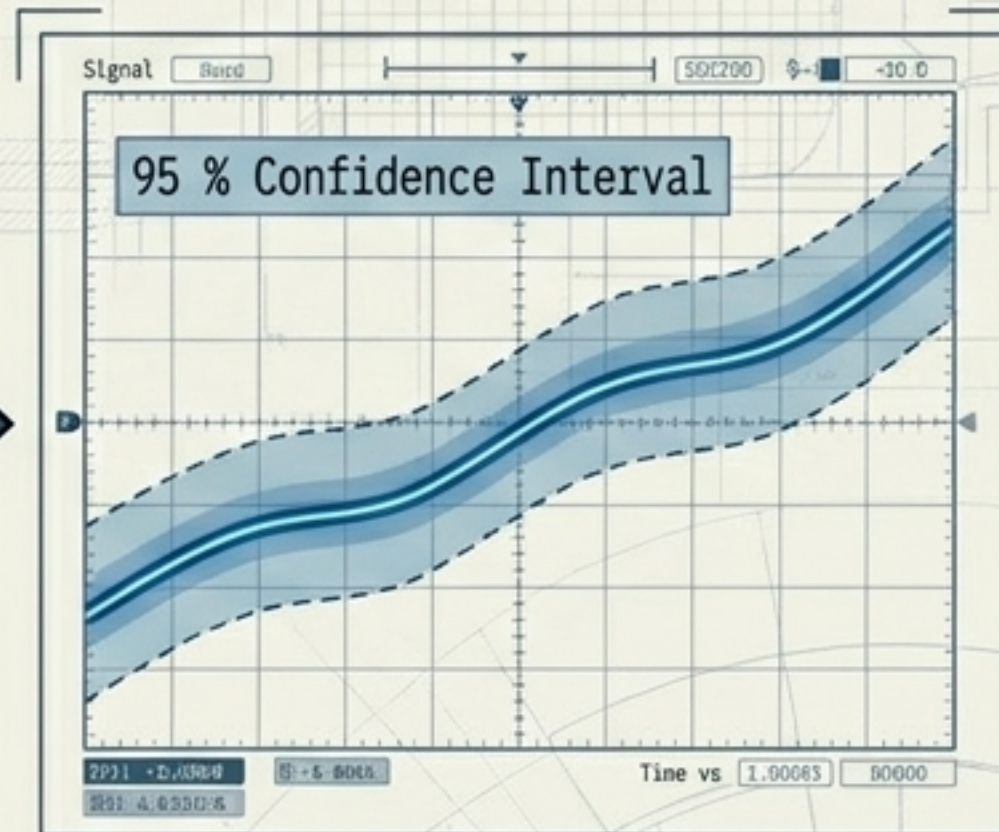
Združevanje več neodvisnih podatkovnih produktov z metodo podatkovne demokracije (enaka teža vsem).

## 2. LOWESS glajenje



Uporaba lokalno utežene regresije (25-letno okno) za odpravo visokofrekvenčnega šuma (npr. ENSO).

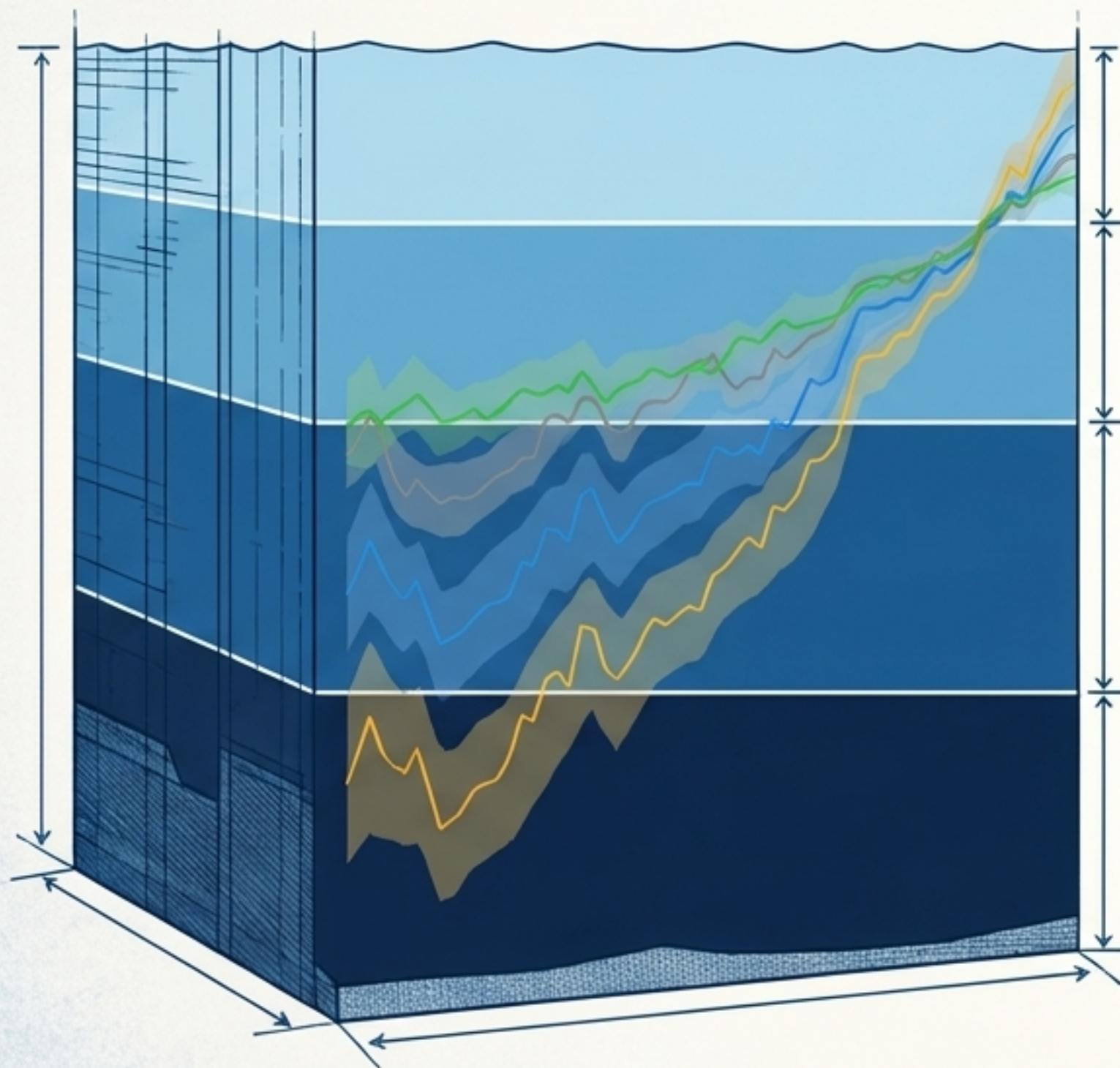
## 3. Monte Carlo simulacije



Generiranje 1000 naključnih serij. Naključni ostanek  
Naključni ostanek sledi AR1 modelu za robusten 95 % interval zaupanja ( $2\sigma$ ).

# Analiza podsistemov: Ocean kot primarni toplotni rezervoar

**Zajema 89 % celotne akumulirane energije (1971–2020).**



**0–300 m:** Stopnja segrevanja  $0.27 \text{ W/m}^2$   
(Najvišja absolutna vsebnost, hitra dinamika).

**0–700 m:** Stopnja segrevanja  $0.39 \text{ W/m}^2$

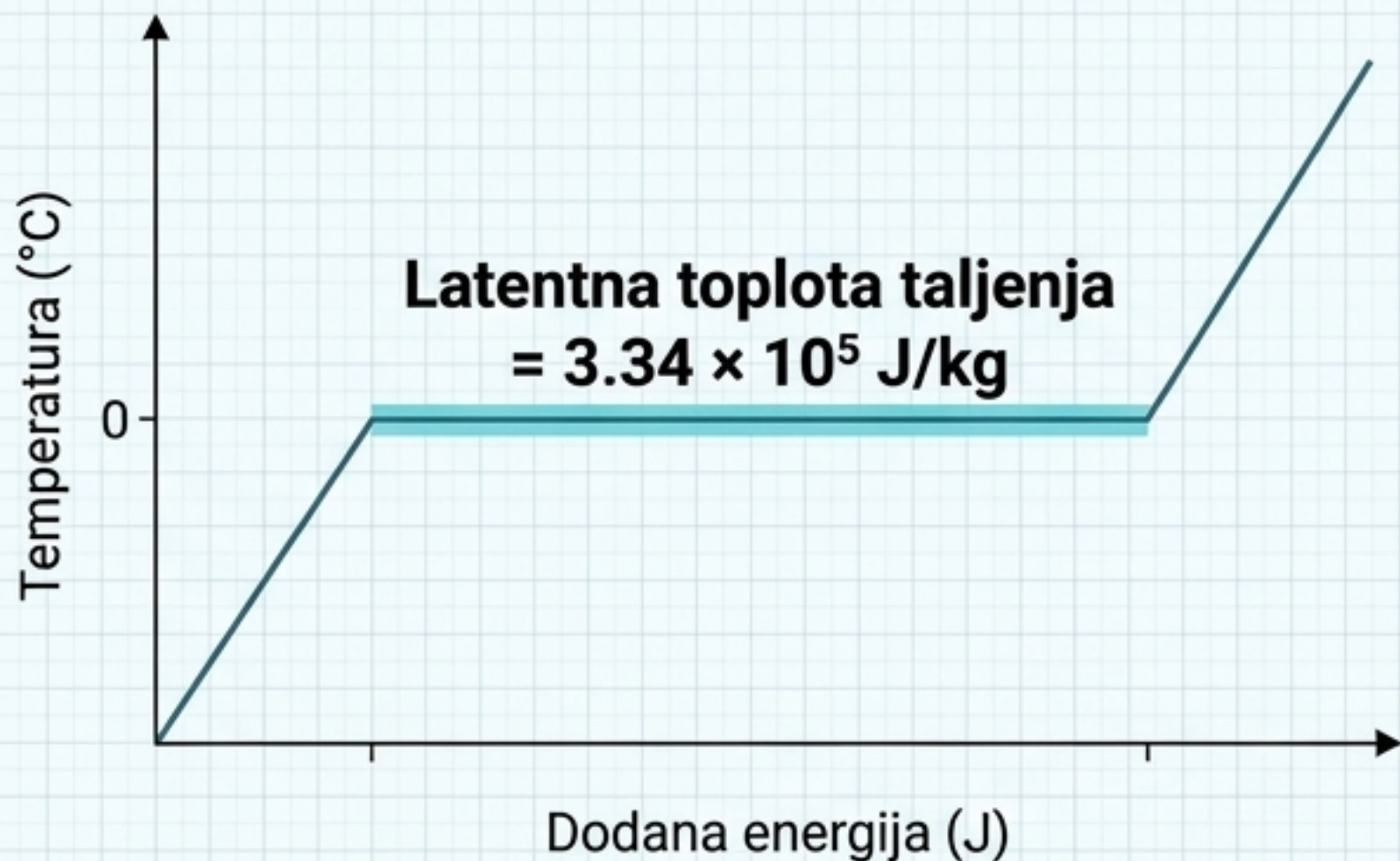
**700–2000 m:** Stopnja segrevanja  $0.23 \text{ W/m}^2$   
(Povečana sekvestracija v zadnjih desetletjih).

**Globoki ocean (>2000 m):** Ocena  $0.06 \text{ W/m}^2$   
(Uporaba modelov Greenovih funkcij in hidrografskih meritev).

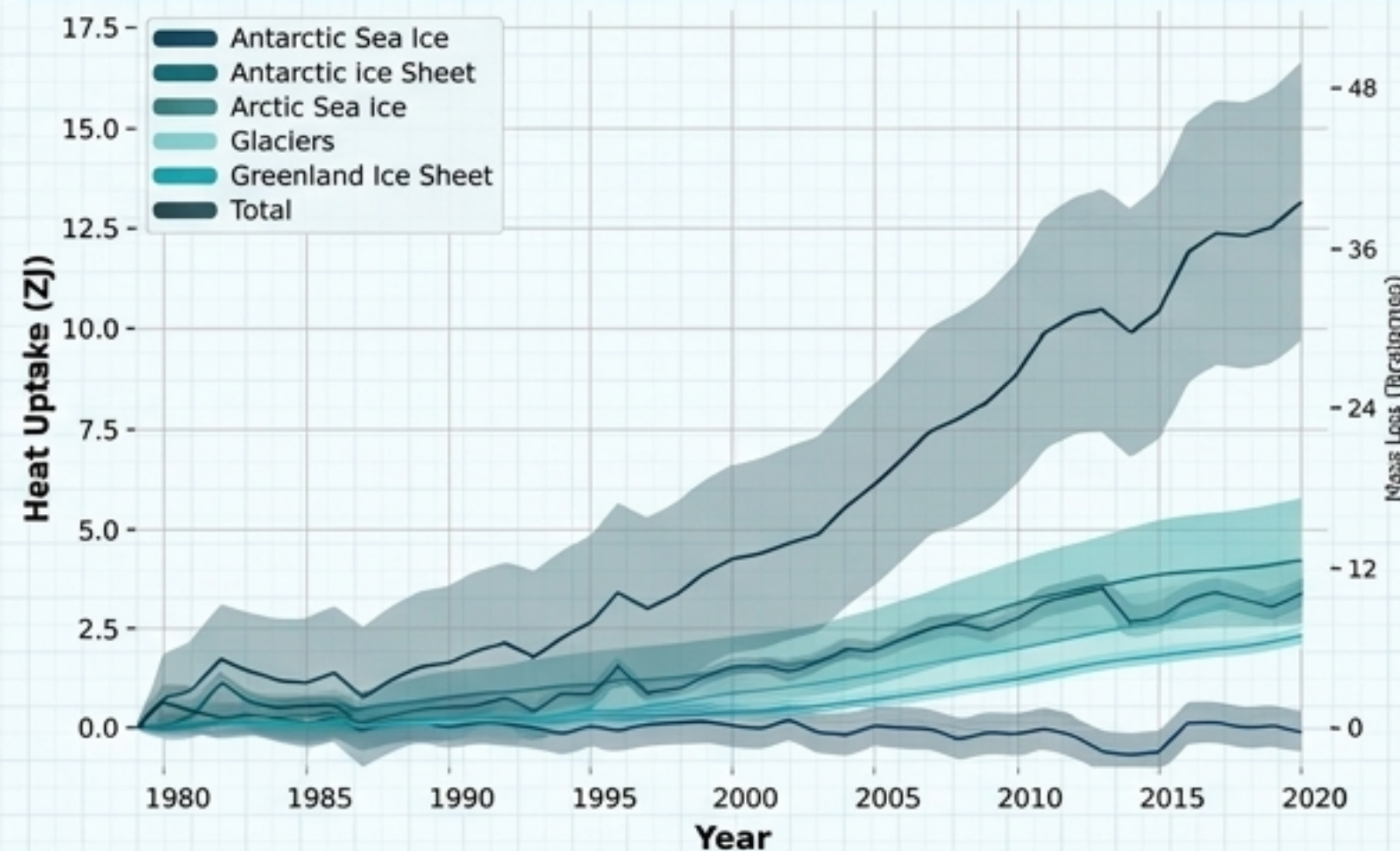
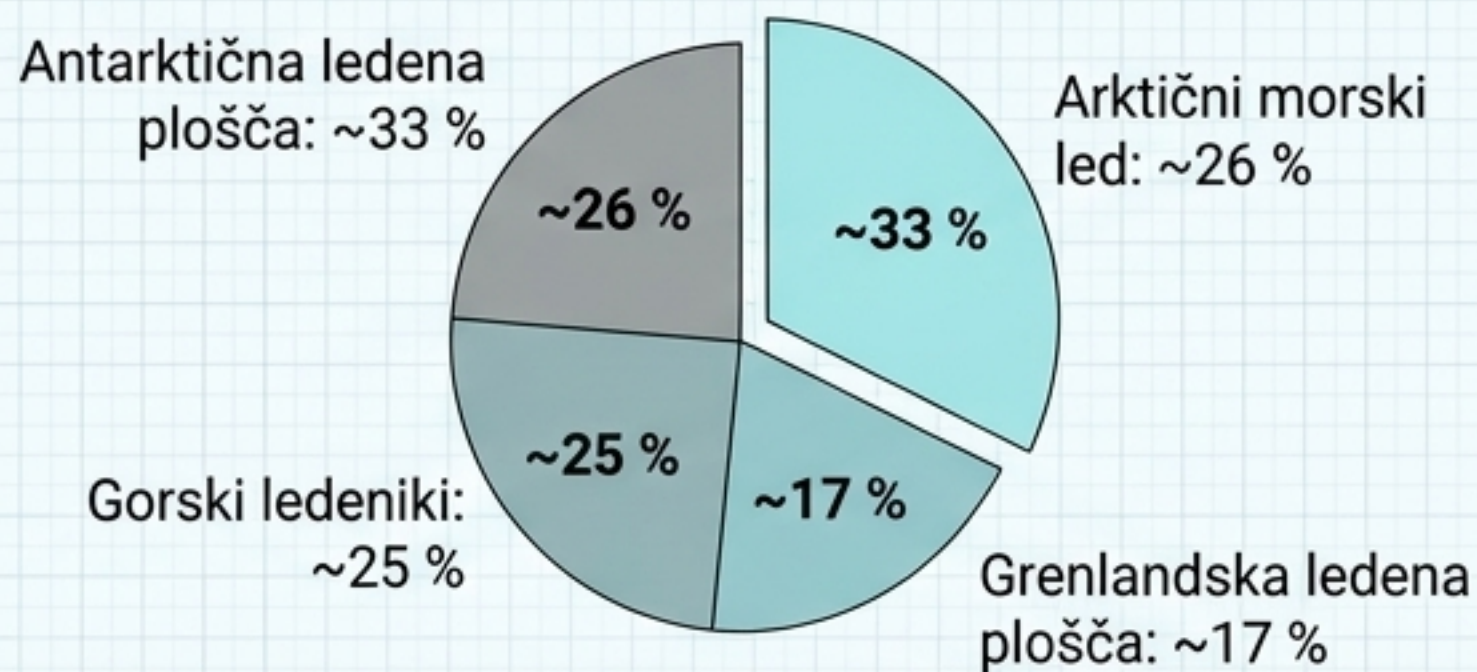
Omejitev na 300 m izobato in  $60^\circ\text{S}$ - $60^\circ\text{N}$  vodi v **podcenjevanje trendov za približno 10 % zaradi zanemarjanja plitvih voda.**

# Kriosfera: Baterija latentne toplote in prehod faz

Zajema **4 % energije**, kar ustreza **14 ± 4 ZJ** absorbirane toplote (1971-2020).

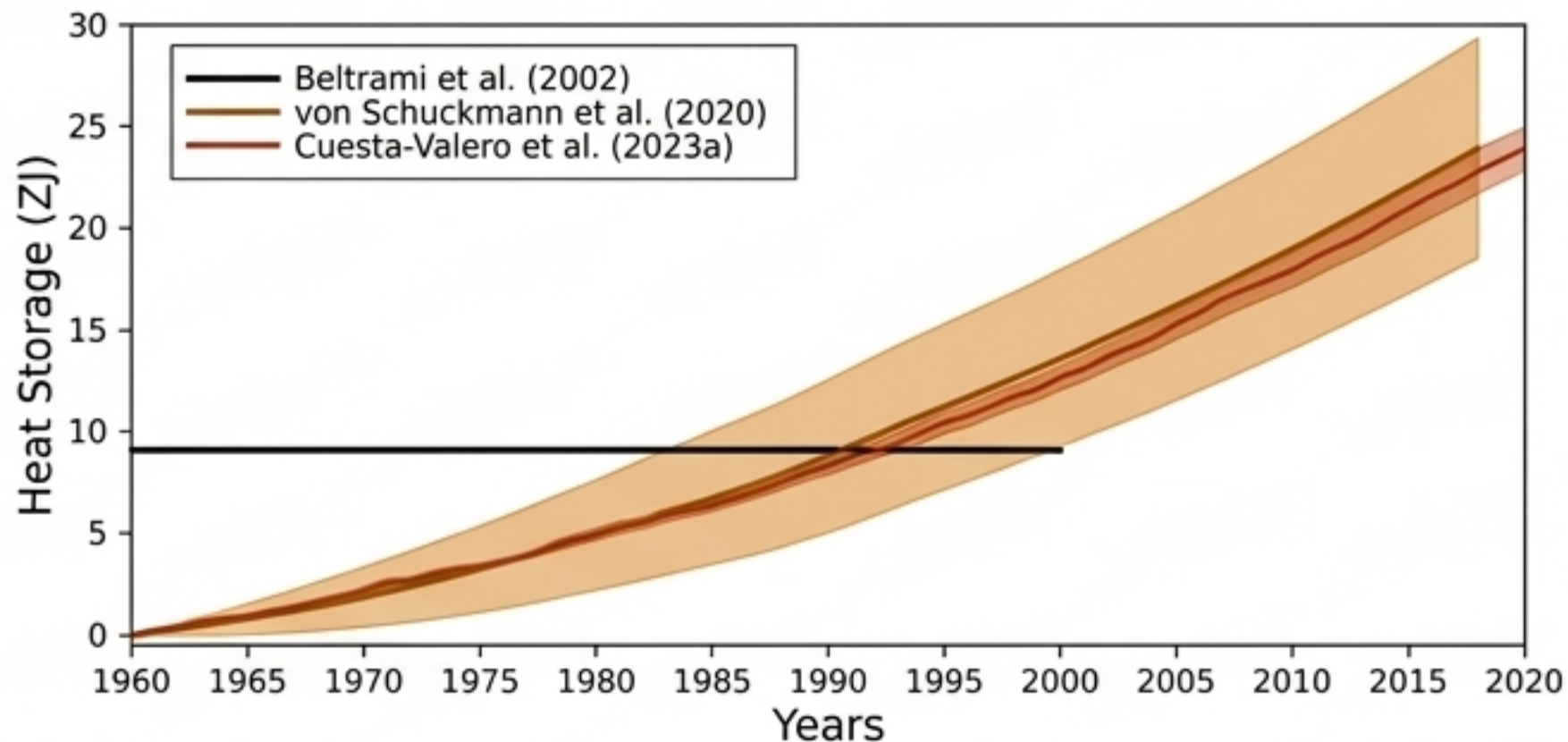
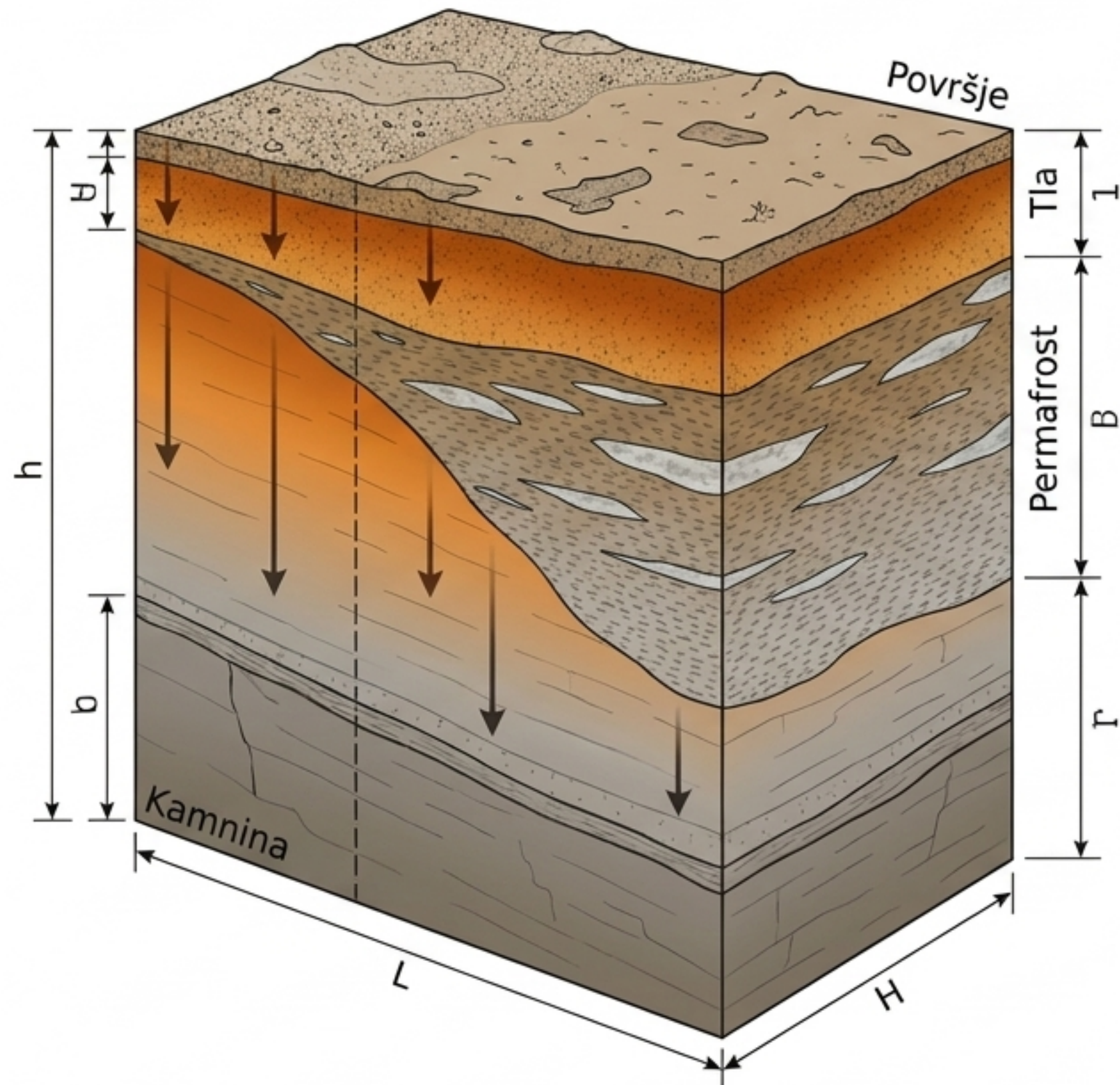


Energija se porabi za trganje molekularnih vezi, ne za dvig temperature.



# Kopno: Kompozitni sistem prevodnosti in taljenja

Zajema **5-6 %** celotne akumulirane energije ( $24 \pm 2$  ZJ od leta 1960).



## Geotermalno shranjevanje (90 % kopnega):

Natančno izmerjeno z inverzijo temperaturnih profilov vrtin z uporabo SVD algoritma.  
Toplotni signal potuje navzdol skozi prevodnost.

## Permafrost (9 % kopnega):

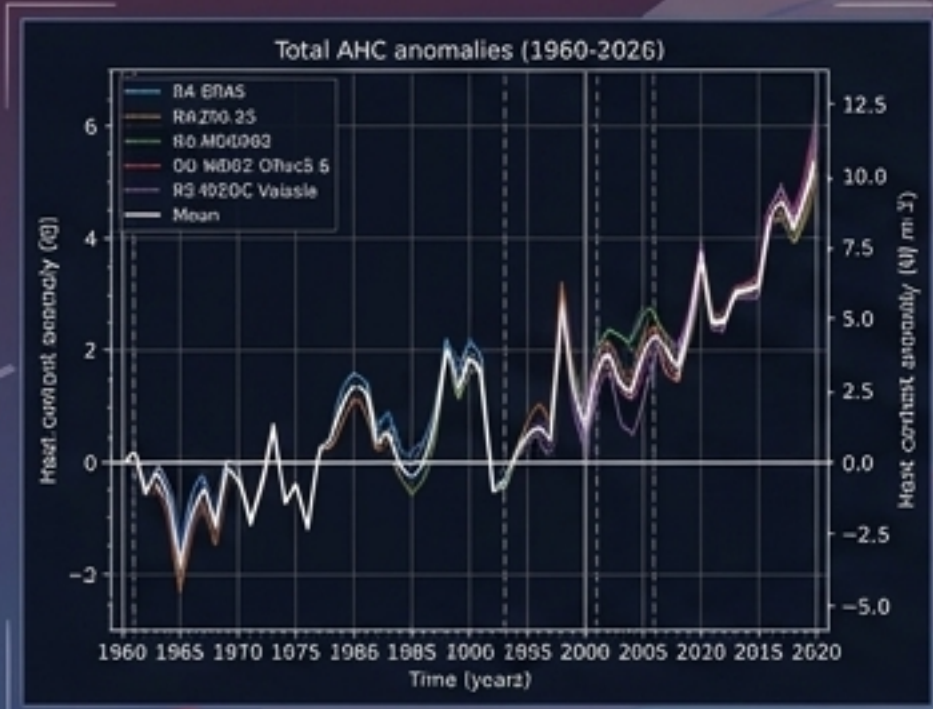
Taljenje talnega ledu do globine 550 m  
(simulirano z modelom CryoGridLite).

## Celine vode (0.7 % kopnega):

Absorpcija toplote v jezerih in rezervoarjih.

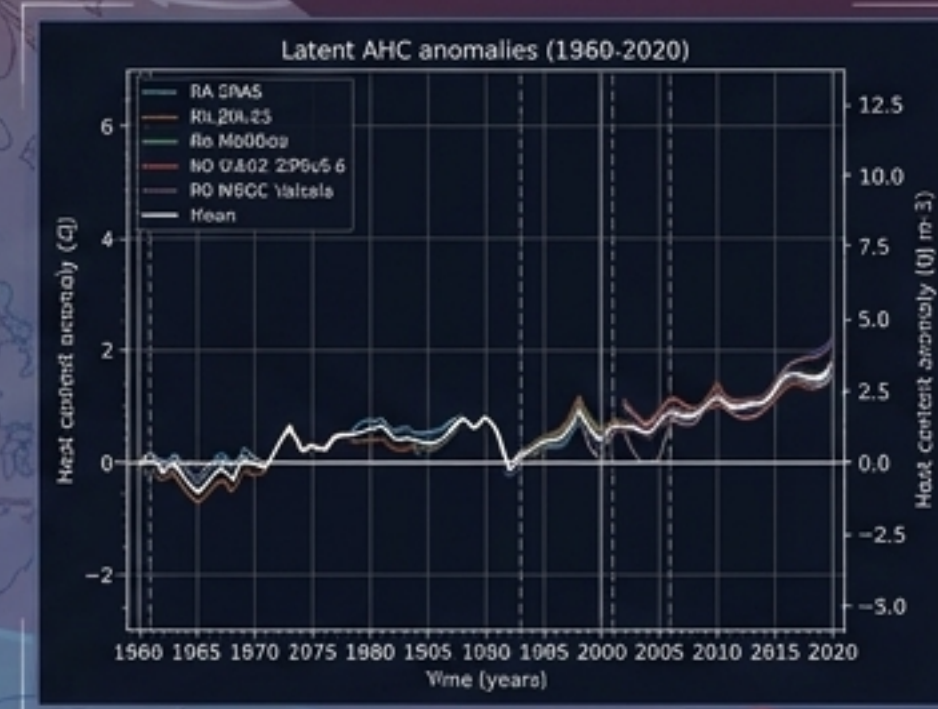
# Atmosfera: Nizka kapaciteta, visoka volatilnost

Zajema le 1-2 % energije, vendar neposredno določa ekstremne vremenske pojave.



$$E_A = \int \rho (c_v T + g(z - z_5) + L_e q + 0.5 V^2) dz$$

Equation 3



Občutna toplota  
(dvig temperature).

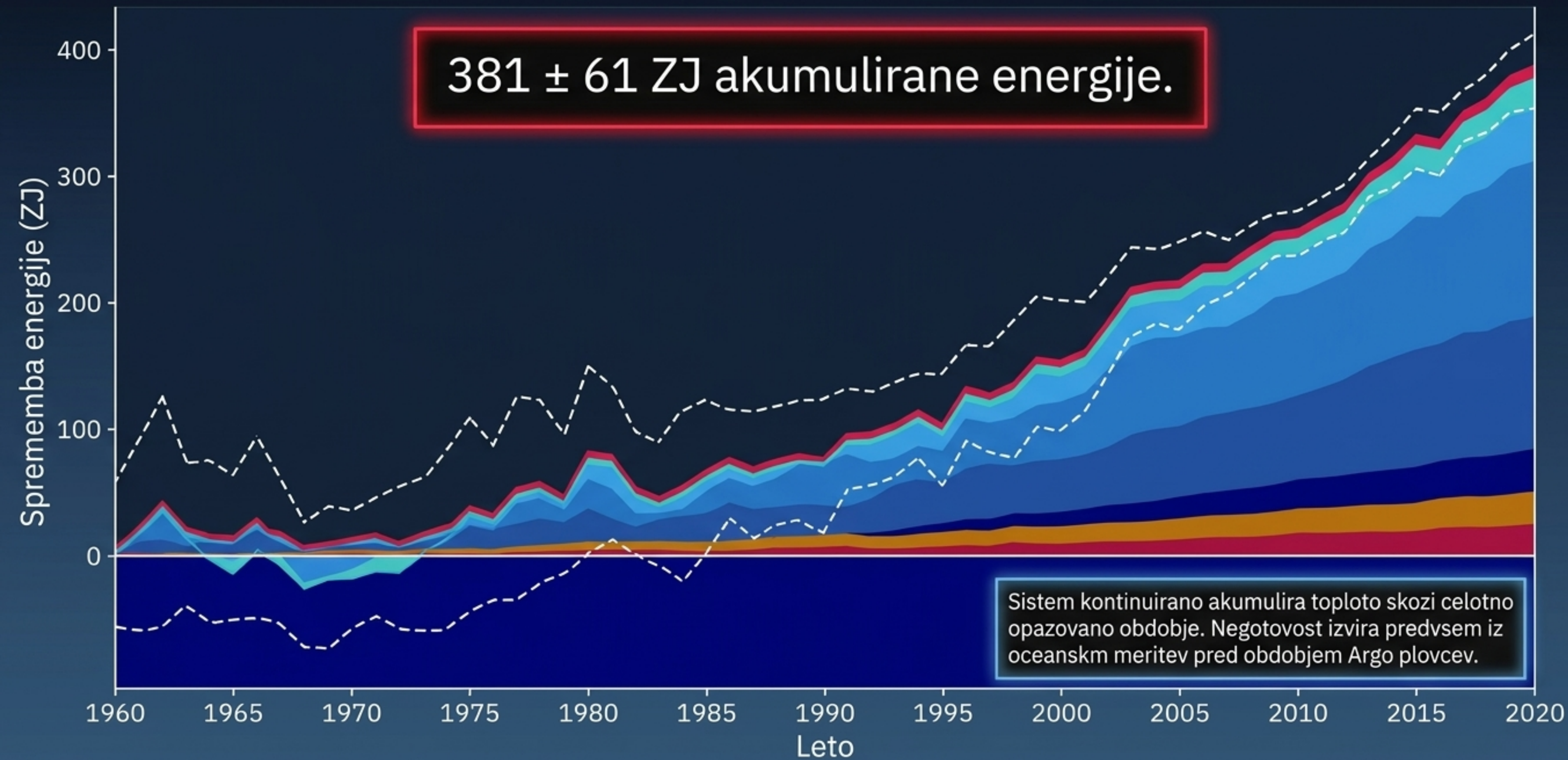
Latentna toplota vodne pare (ključni element).  
Kljub majhni celotni energiji latentni trendi naraščajo  
do 3-krat hitreje od zgodovinskih povprečij.

Trendi Amplifikacije: Hitrost povečanja atmosferske toplotne vsebnosti (AHC) se je v zadnjih dveh desetletjih početrila (iz ~1.7 TW na ~7 TW).

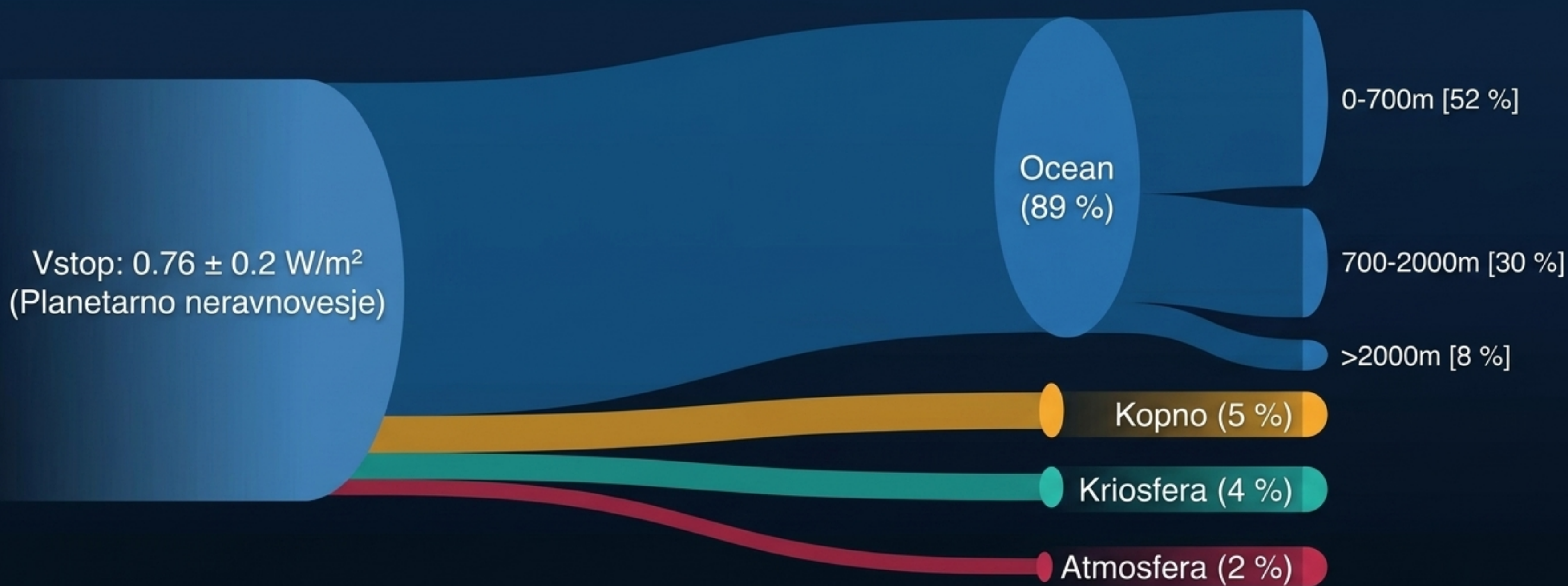
# Diagnostična matrika: Termodinamika Zemljinih podsistemov

Podsistem	Delež toplote	Primarni mehanizem	Ključna senzorska tehnologija	Glavni vir negotovosti
Ocean	89 %	Občutna toplota (visoka $c_p$ )	Argo plovci, Altimetrija	Nepopolna pokritost pod 2000m in plitvin
Kopno	5-6 %	Prevodnost (temperatura tal)	Mreža vrtin (Boreholes)	Pomanjkanje podatkov na južni polobli
Kriosfera	4 %	Latentna toplota (fuzija ledu)	Satelitska gravimetrija (CryoSat-2)	Ocenjevanje taljenja ledu pod morsko gladino
Atmosfera	1-2 %	Občutna + Latentna (para)	Reanaliza (ERA5), Radiosonde	Spremembe v gostoti meritev čez čas

# Zaloga toplote Zemlje: Končna sinteza (1971–2020)



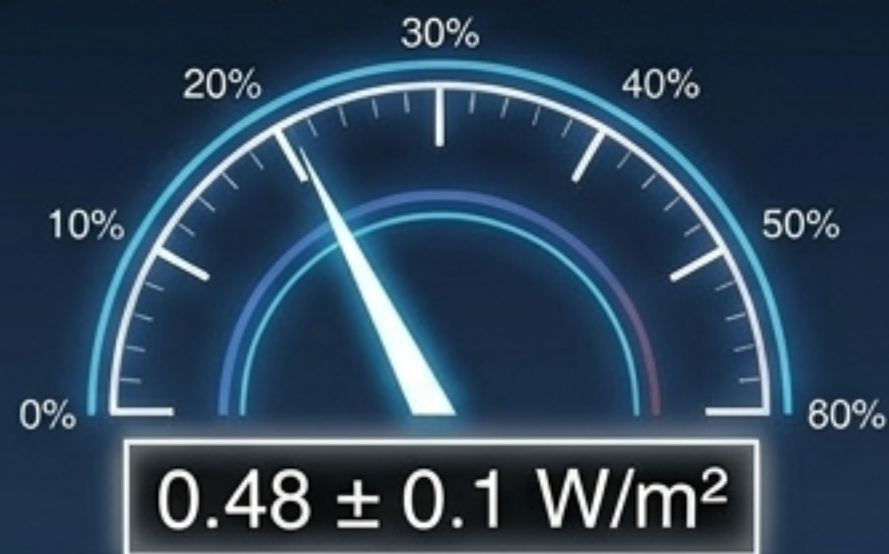
# Tok energije (2006–2020): Porazdelitev v rezervoarje



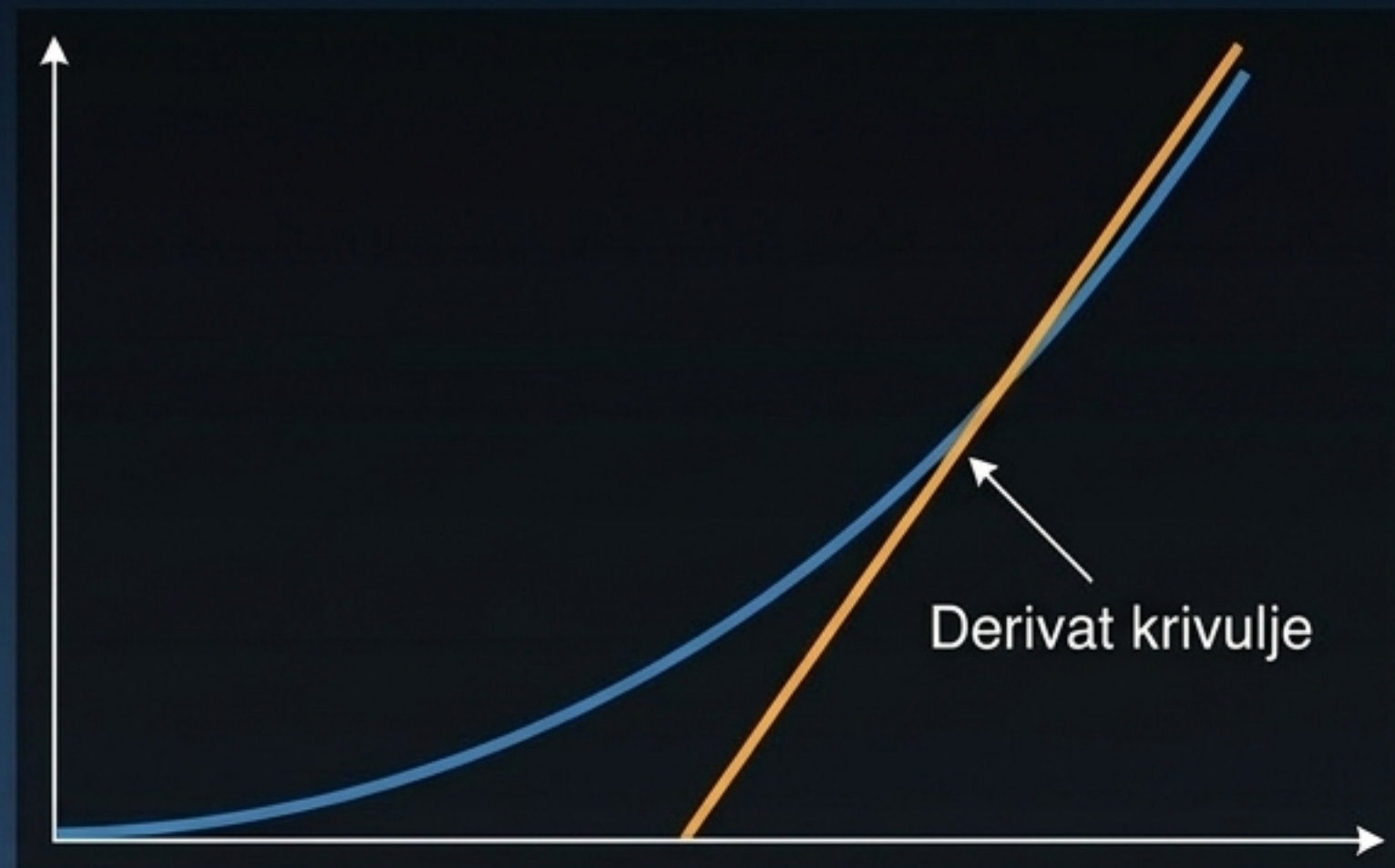
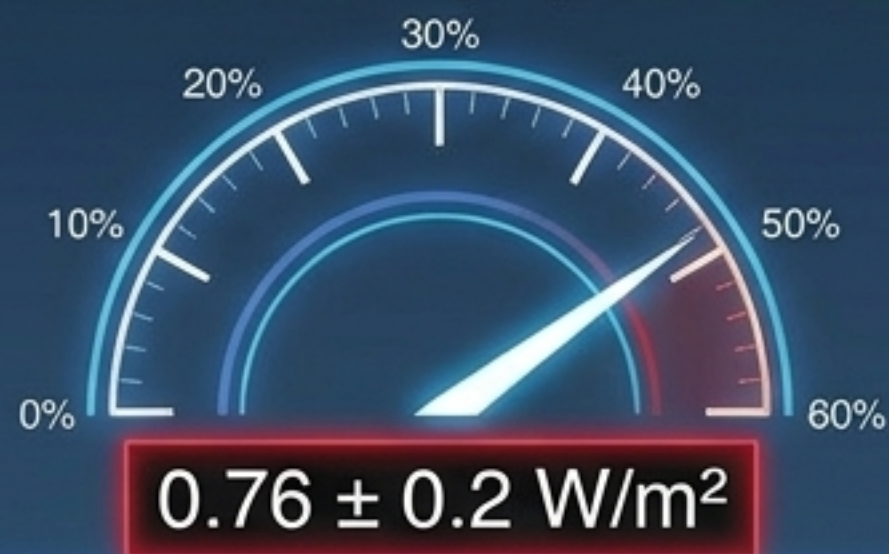
Ta porazdelitev velja za Zlato dobo Argo opazovanj (po letu 2006),  
kjer je pokritost opazovalnega sistema skoraj globalna.

# Odkritje pospeška: Planetarni toplotni tok se krepi

Dolgoročno povprečje (1971–2020)



Sodobno obdobje (2006–2020)



## Matematični uvid:

Derivat krivulje se povečuje. Ne le, da se energija kopiči (integral), povečala se je tudi hitrost kopičenja.

## Možni fizikalni vzroki:

Zmanjšan odboj sevanja zaradi zmanjšanja oblačnosti in arktičnega ledu, povečanje dobro premešanih toplogrednih plinov ter vodne pare, ob zmanjšanju emisij aerosolov.

# Zakaj je EEI superiorna metrika podnebnih sprememb?

## Površinska temperatura ( $\Delta T_s$ )



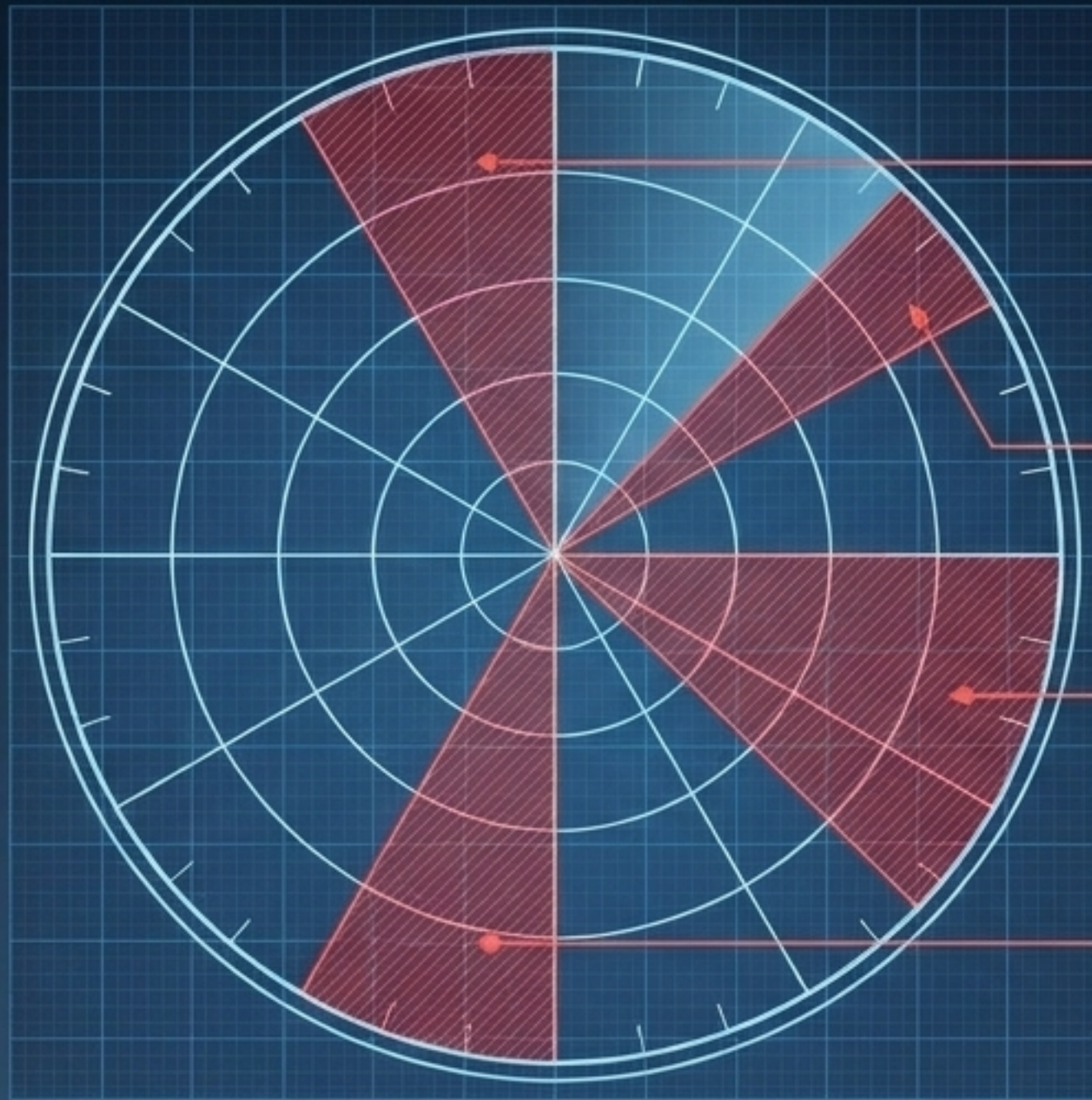
- Visok signal-šum razmerje.
- Zelo občutljiva na notranjo klimatsko variabilnost.
- El Niño / La Niña redistribuirata toploto, ne da bi spremenila celotno maso energije.

## Zemljino energetska neravnovesje (EEI)



- Zastopa resničen integral neravnovesja.
- Malo podvržen dekadnim variacijam.
- Določa zavezujoče segrevanje (committed warming) – opredeljuje dodatno segrevanje, ki se bo zgodilo tudi ob takojšnji stabilizaciji TGP.

# Prihodnost kalibracije: Slepe pege in inženirski izzivi



**Globoki ocean & plitvine:** Pod 2000 m potrebujemo razširitev Deep Argo mreže. Ocene zanemarjajo obalne cone in plitve vode.

**Dinamika kriosfere pod gladino:** Interakcije (taljenje) med oceanom in dnom ledenih polic so slabo izmerjene.

**Južna polobla na kopnem:** Zelo redka mreža meritev geotermalnih profilov vrtin.

**Zaloga toplote v rekah/jezerih:** Močno odvisno od modelskih simulacij z visoko stopnjo negotovosti.

**ZAKLJUČNA TRDITEV:** EEI je najosnovnejši kazalnik, ki ga mora vključiti Pariški sporazum. Zahteva kontinuirano mednarodno vzdrževanje in reševanje podatkov (*data rescuing*) s strani inženirske in znanstvene skupnosti.