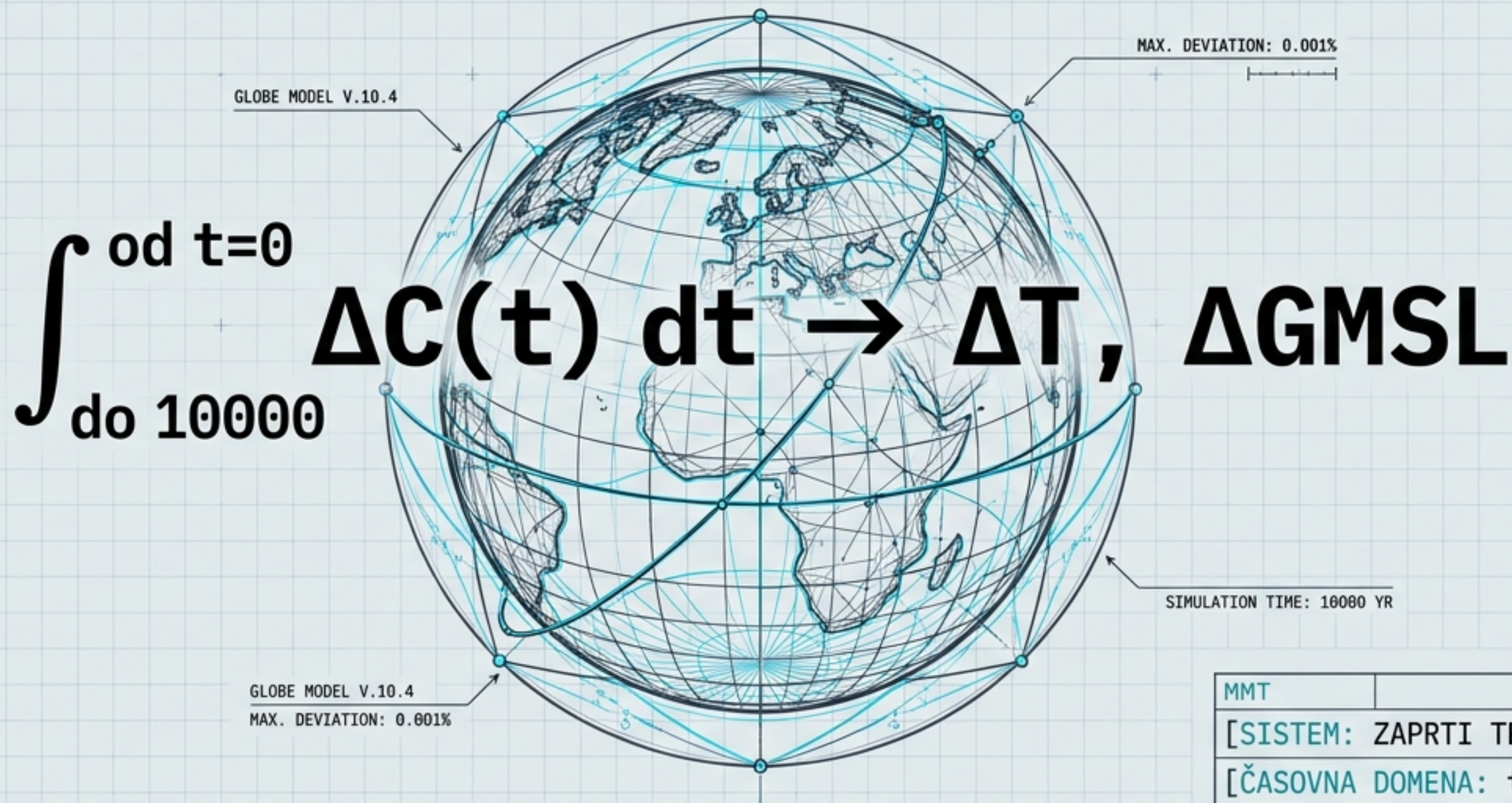


Napaka v mejnih pogojih

Fizikalna realnost 10.000-letne sistemske vztrajnosti podnebja



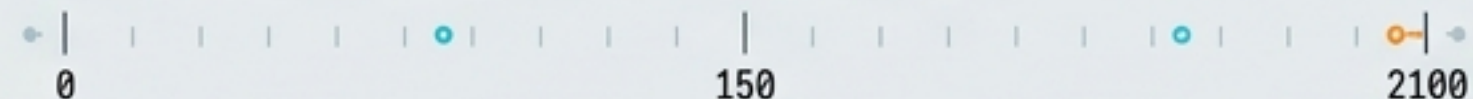
MMT	
[SISTEM: ZAPRTI TERMODINAMIČNI]	
[ČASOVNA DOMENA: $t = 10^4$ LET]	
[VIR: CLARK ET AL., 2016]	

ARBITRARNA PREKINITEV SIMULACIJE PRI T=2100

POLITIČNI / JAVNI MODEL

ČASOVNA DOMENA:

150 LET V PRETEKLOST → LETO 2100.

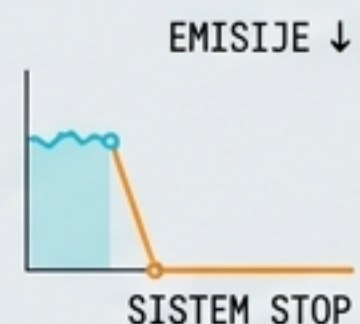


PREDPOSTAVKA SYSTEMSKEGA ODZIVA:
LINEAREN IN REVERZIBILEN.



INŽENIRSKA NAPAKA:

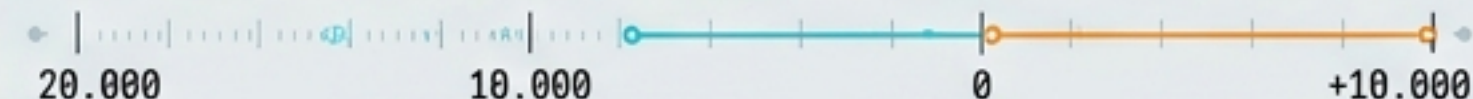
IGNORIRA TOPLOTNO VZTRAJNOST OČEANOV
IN ŽIVLJENJSKO DOBO OGLJIKA V ATMOSFERI.
USTVARJA LAŽNI VTIS, DA SE PROCES
USTAVI, KO ZMANJŠAMO EMISIJE.



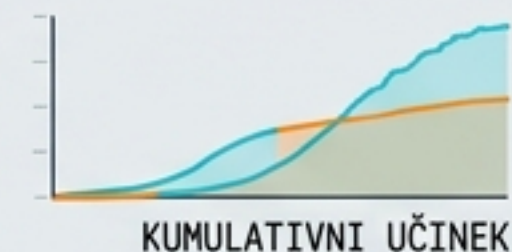
FIZIKALNY / GEOLOŠKI MODEL

ČASOVNA DOMENA:

20.000 LET V PRETEKLOST → 10.000 LET V PRIHODNOST.

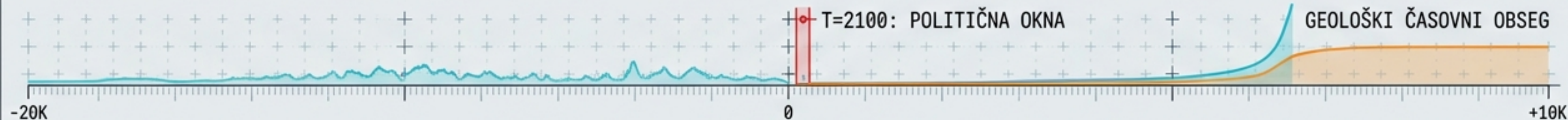
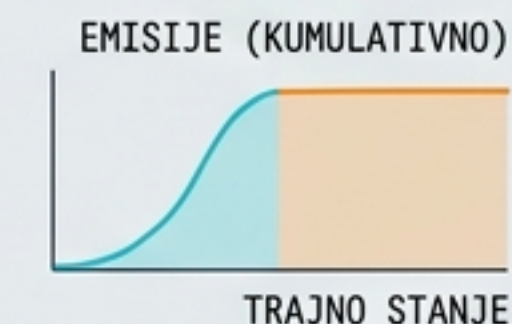


PREDPOSTAVKA SYSTEMSKEGA ODZIVA:
VEČISOČLETNI ZAMIK
(KUMULATIVNI INTEGRAL).

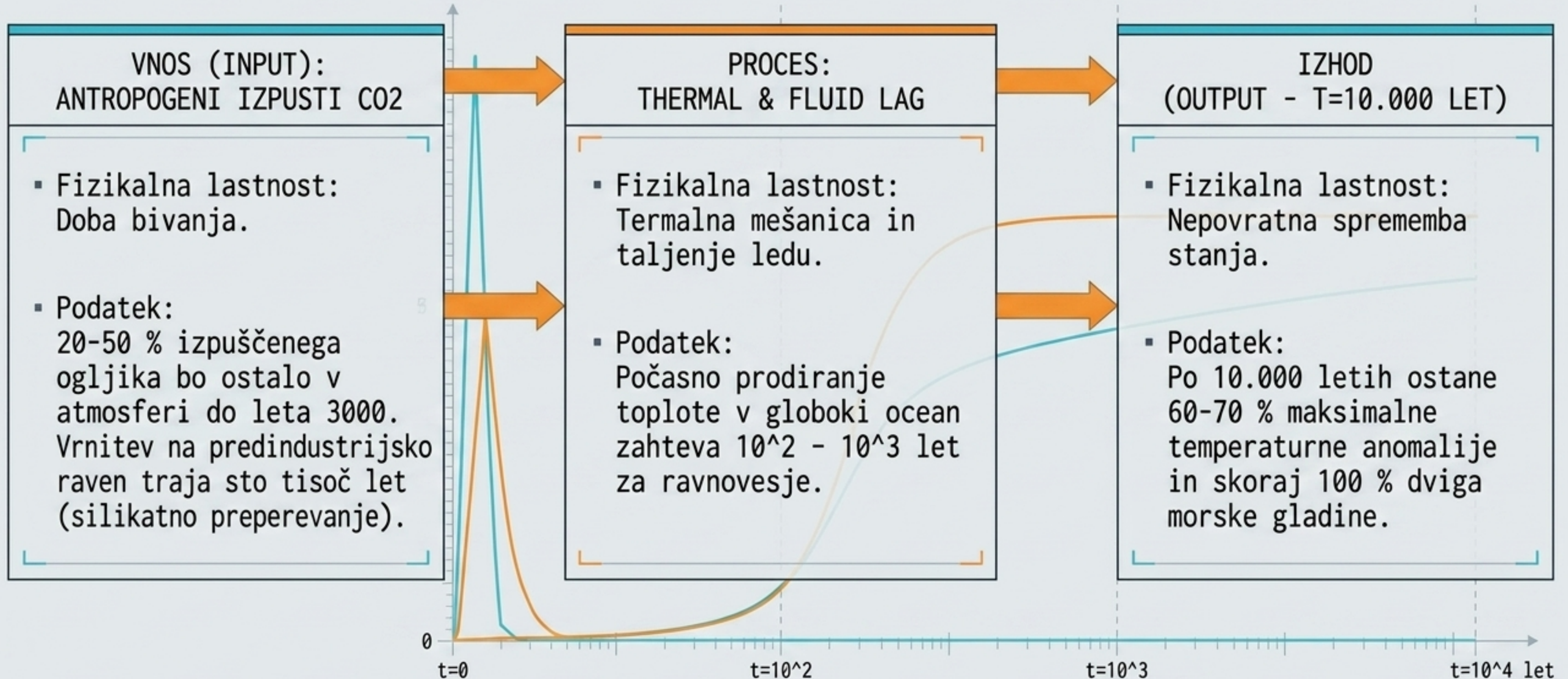


INŽENIRSKA REALNOST:

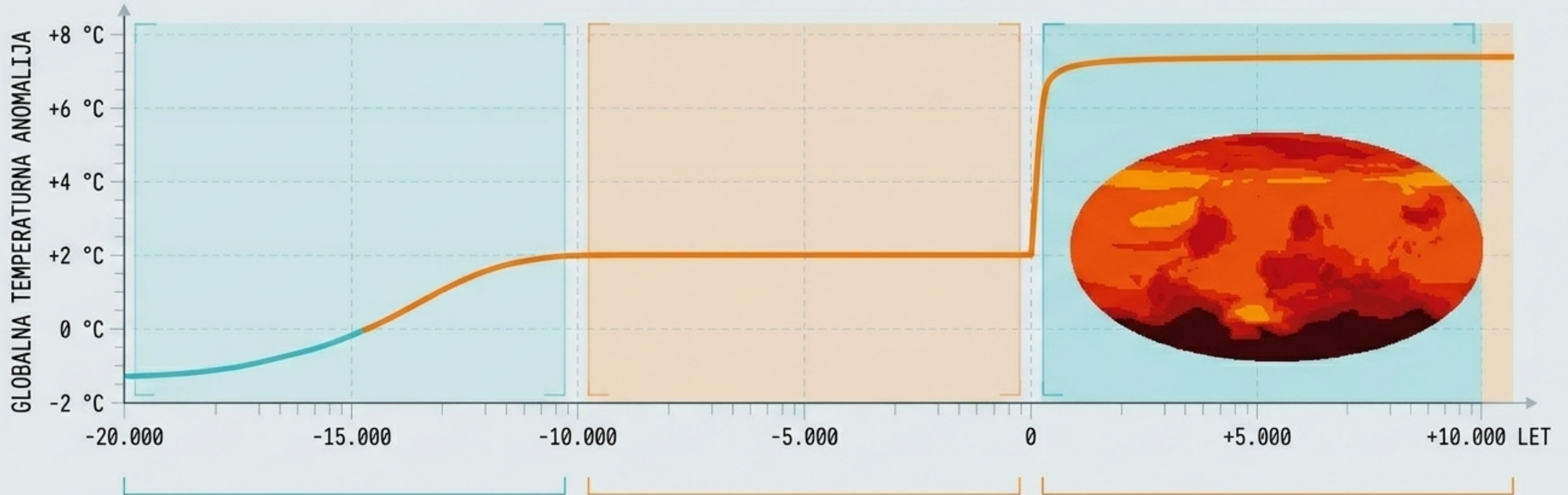
EMISIJE USTVARJAJO DOLGOROČNO,
NEPOVRATNO STANJE. USPEŠNA
MITIGACIJA ZAHTEVA POPOLNO
ZAUSTAVITEV VNOSA (NET-ZERO).



MEHANIKA SISTEMSKE VZTRAJNOSTI



Makroskopski pogled na 30.000 let



LGM do Holocena (-20k do -10k)

Naravni prehod. Dvig za ~4 °C v razponu 8.000 let. Koncentracija CO2 narasla iz 190 ppm na 270 ppm. Rezultat: Dvig morske gladine za 130 metrov.

Holocen (-10k do 0)

Faza stabilnosti. CO2 med 260 in 280 ppm. Razvoj civilizacije.

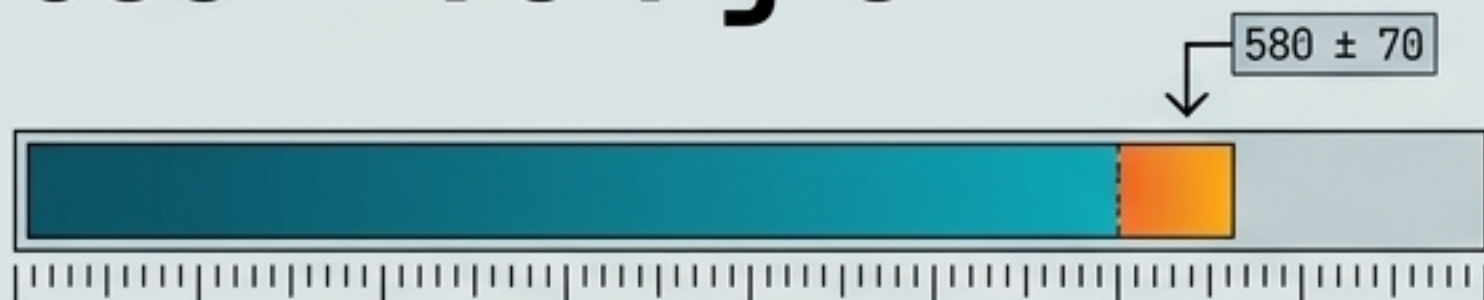
Antropocenski šok (0 do +10k)

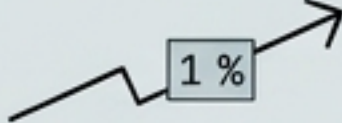
Projekcija vnosa. Hitrost spremembe je za red velikosti višja kot pri zadnji deglaciaciji. Pričakovano povišanje za 2,0 °C do 7,5 °C nad stabilnim holocenom.

DOLOČITEV VHODNIH SPREMENLJIVK (MASNA BILANCA)

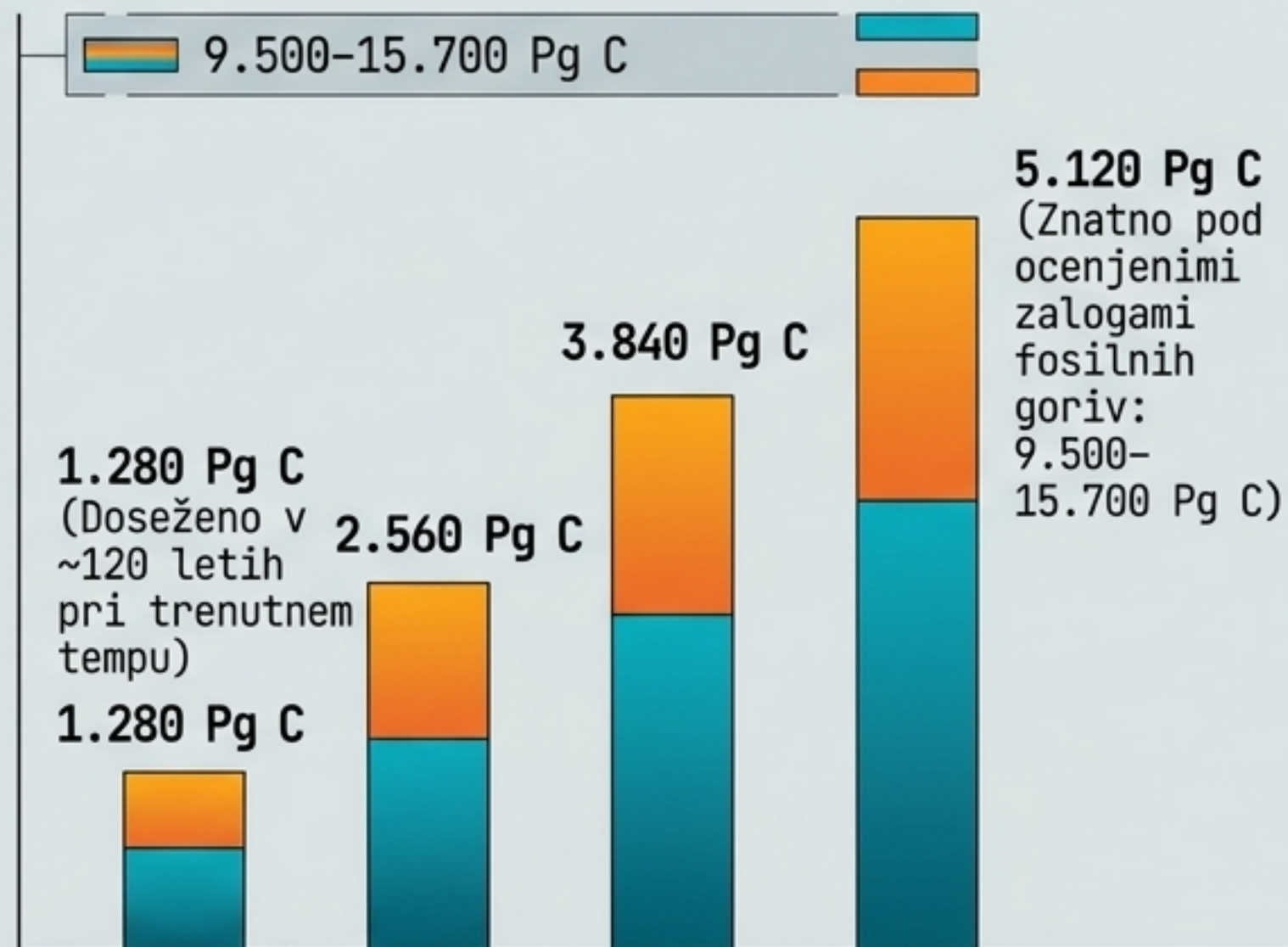
TRENTNO STANJE SISTEMSKEGA VNOSA:

ŽE IZPUŠČENO (1750–2013):
580 ± 70 Pg C



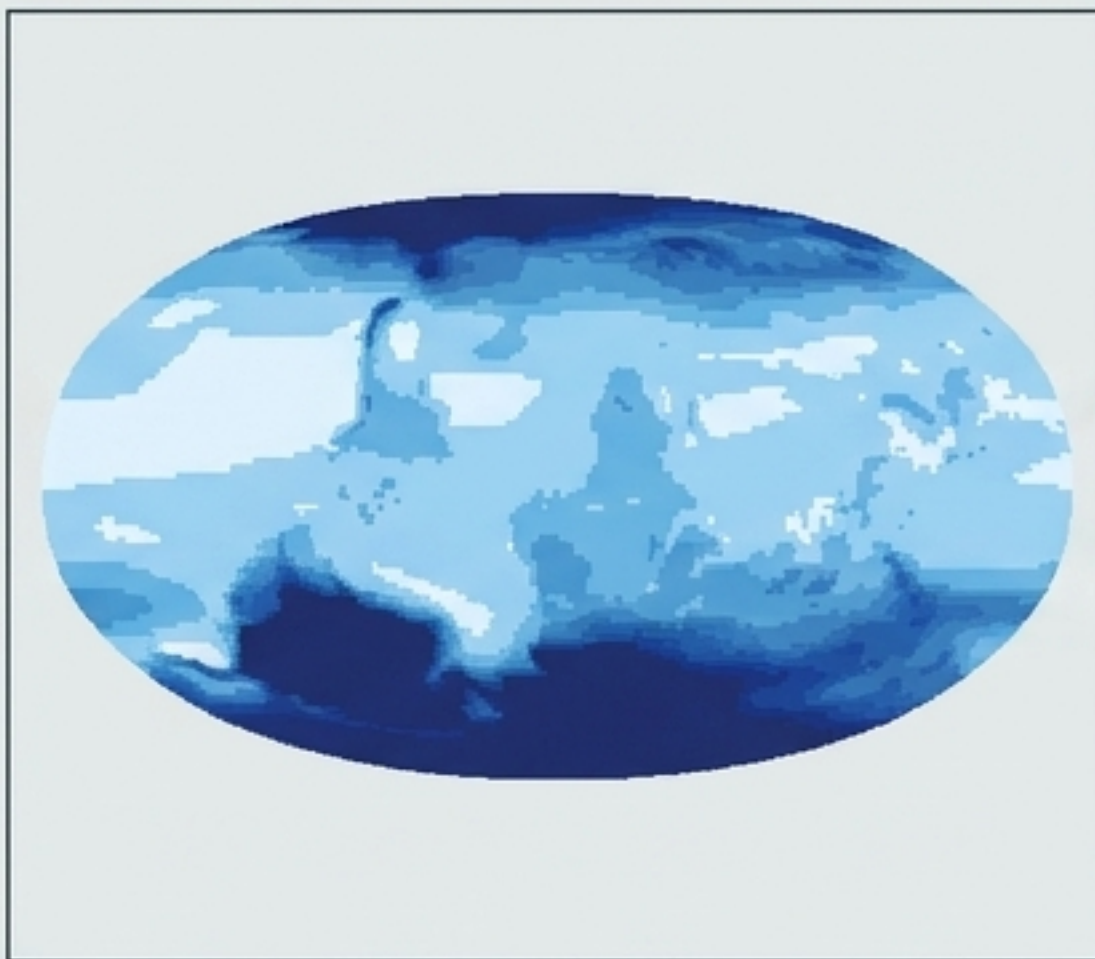
TRENTNA STOPNJA VNOSA:
~10 Pg C / leto 
(in narašča za ~2,5 % letno).

4 MODELIRANI SCENARIJI KUMULATIVNIH EMISIJ (DO LETA 2300):

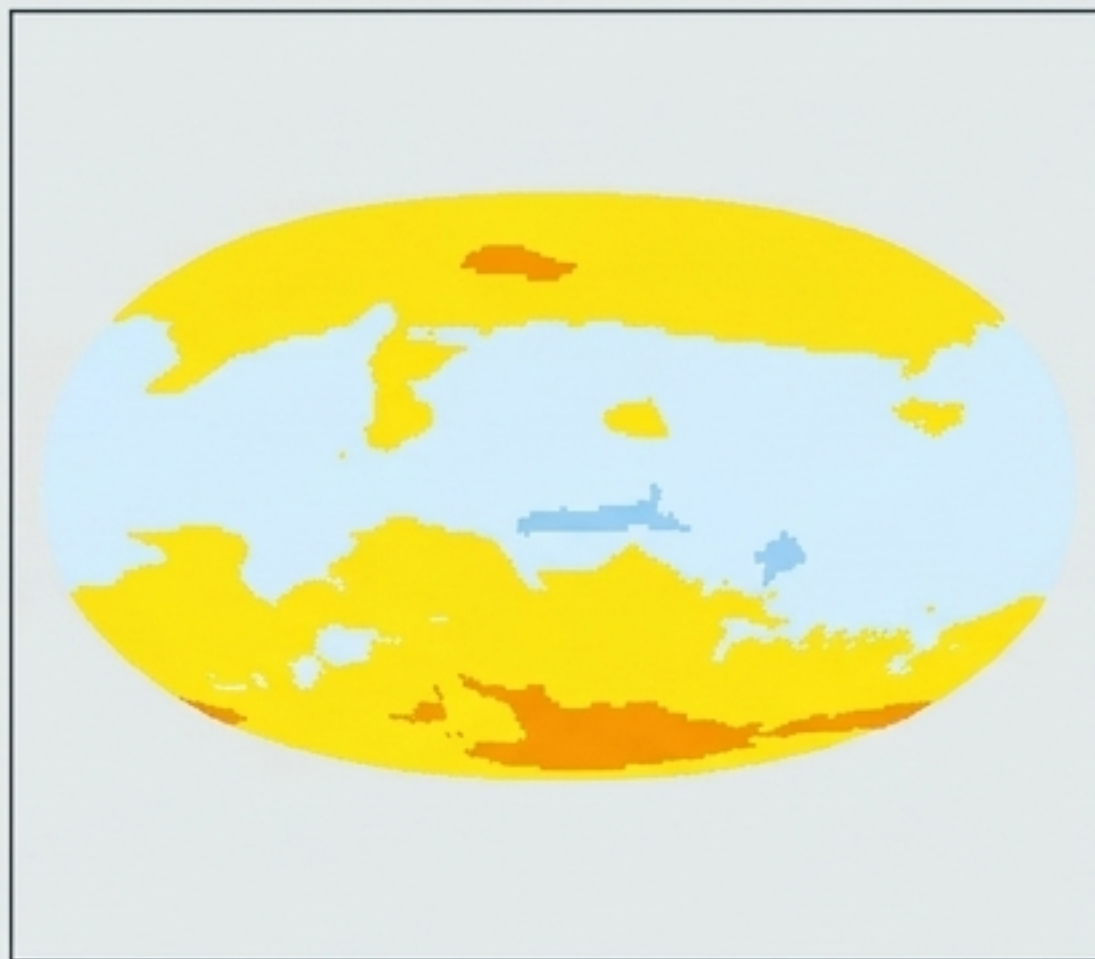


SKLEP MODULA: VSI SCENARIJI MODELIRAJO POPOLNO USTAVITEV EMISIJ DO LETA 2300. VPRAŠANJE JE LE VELIKOST KUMULATIVNEGA INTEGRALA.

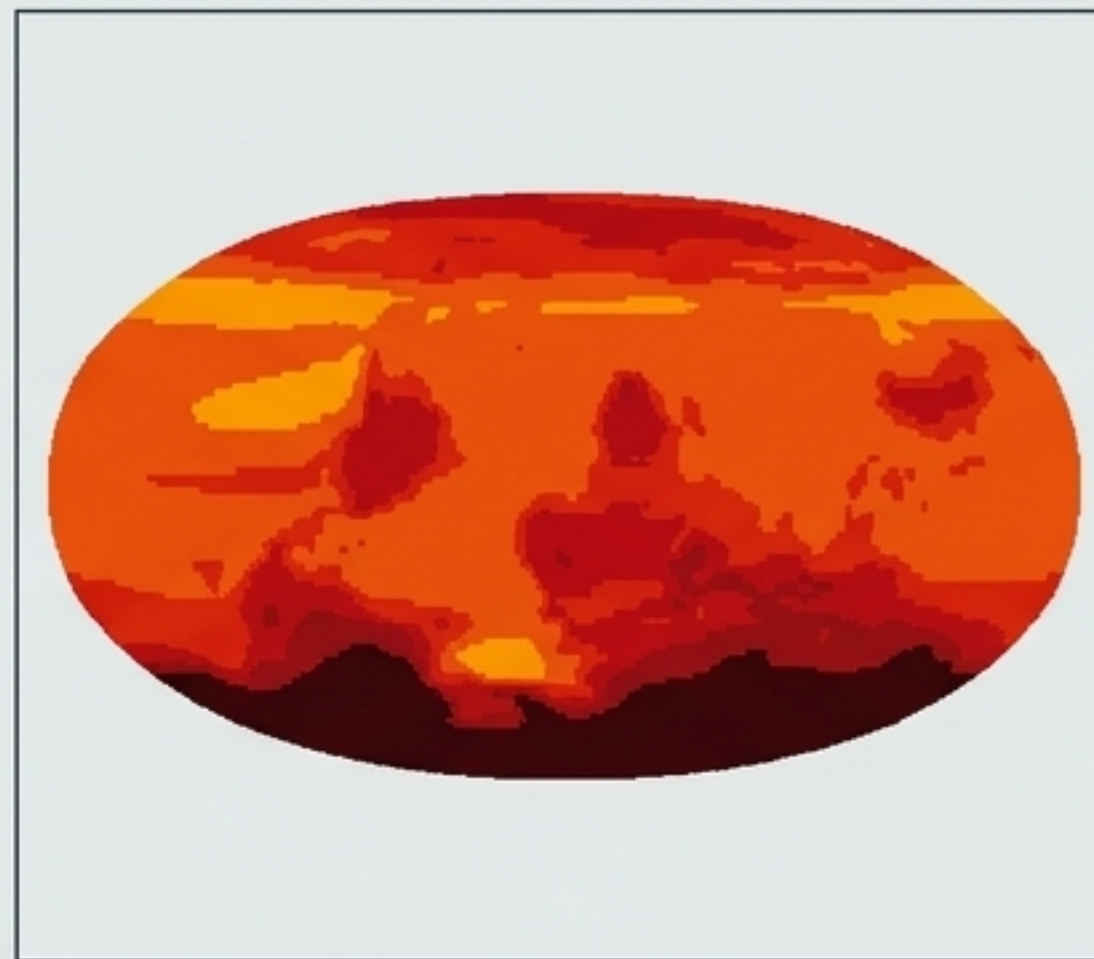
Rezultat 1: Termodinamični odziv (ΔT)



LGM (-21.000 let):
Hladno stanje, masivni ledeni pokrovi na severni polobli.



Holocen (-6.000 let):
Ravnovesno stanje, ki je omogočilo kmetijstvo.



Prihodnost (+10.000 let):
Vbrizganih 1.280 do 5.120 Pg C sproži segrevanje za 2,0 do 7,5 °C.

Inženirska opomba: Toplotna energija ne izgine ob prenehanju izpustov. Ponikne v globoki ocean in se počasi sprošča, kar ohranja povišano temperaturo tisočletja.

Rezultat 2: Dinamika tekočin (GMSL)

GLAVNI ODČITEK IZ SIMULACIJE:

Zaklenjen dvig morske gladine med

25 in 52 metri

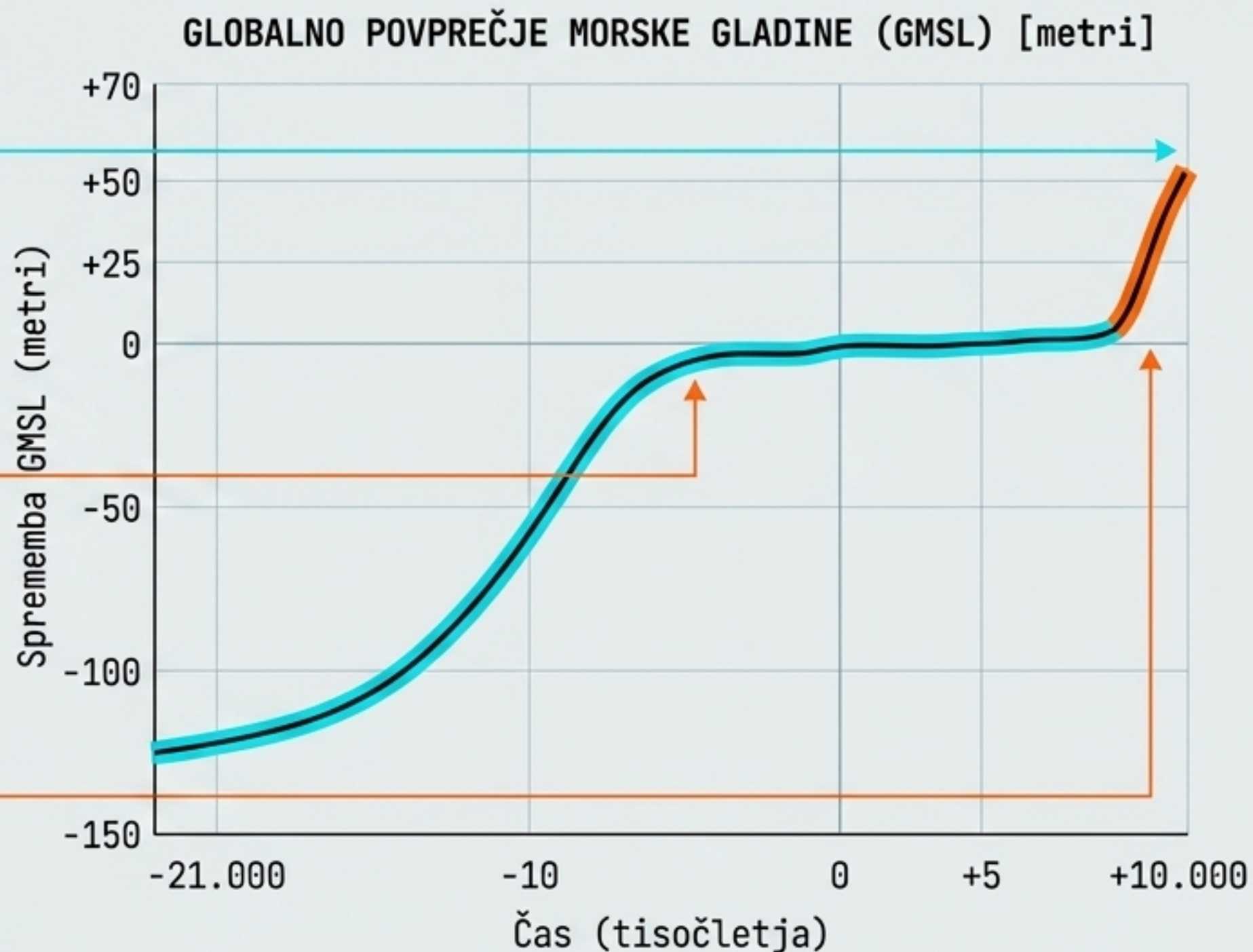
v naslednjih 10.000 letih.

ZGODOVINSKA OBČUTLJIVOST:

Segrevanje za nekaj stopinj ob koncu ledene dobe je povzročilo dvig za 130 metrov. Dvig je zaostajal za temperaturo za 8.000 let.

STOPNJA SPREMEMBE:

Projekcije kažejo na prihodnje stopnje dviga od 2 do 4 metre na stoletje — vrednosti, ki nimajo primere v zadnjih 8.000 letih.



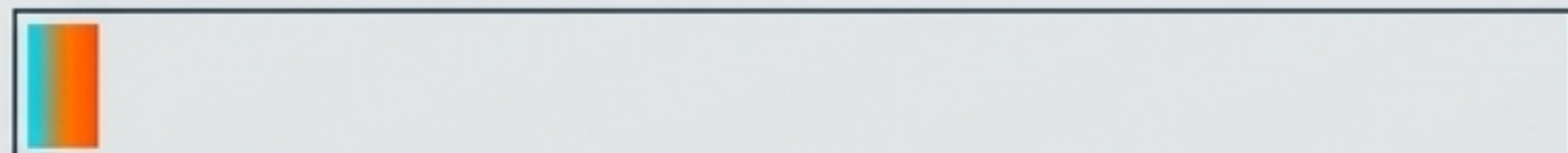
Komponentna analiza povečanja volumna

Toplotna razteznost oceanov



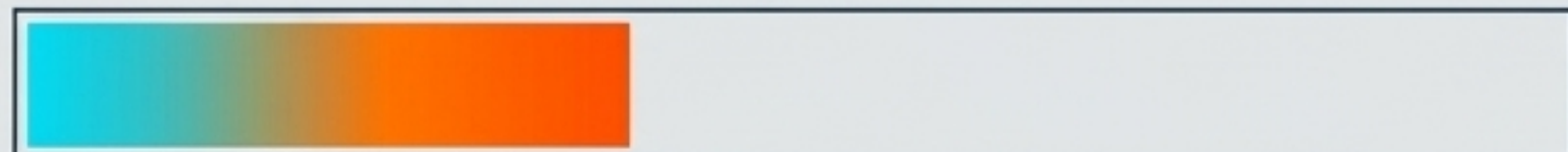
Omejena na 1,1 m (nizek scenarij) do 3,4 m (visok scenarij). Vrh doseže po 2.300 letih, nato počasi upada.

Gorski ledeniki



Hitri odzivni čas (10^1 - 10^2 let), vendar striktno fizično omejen volumen. Maksimalni doprinos znaša le 0,37 m.

Grenlandski ledeni pokrov



Hranina ekvivalent 7 m GMSL. Pri najnižjem scenariju se stali 4 m. Pri 5.120 Pg C Grenlandija postane brez ledu v 2.500 letih.

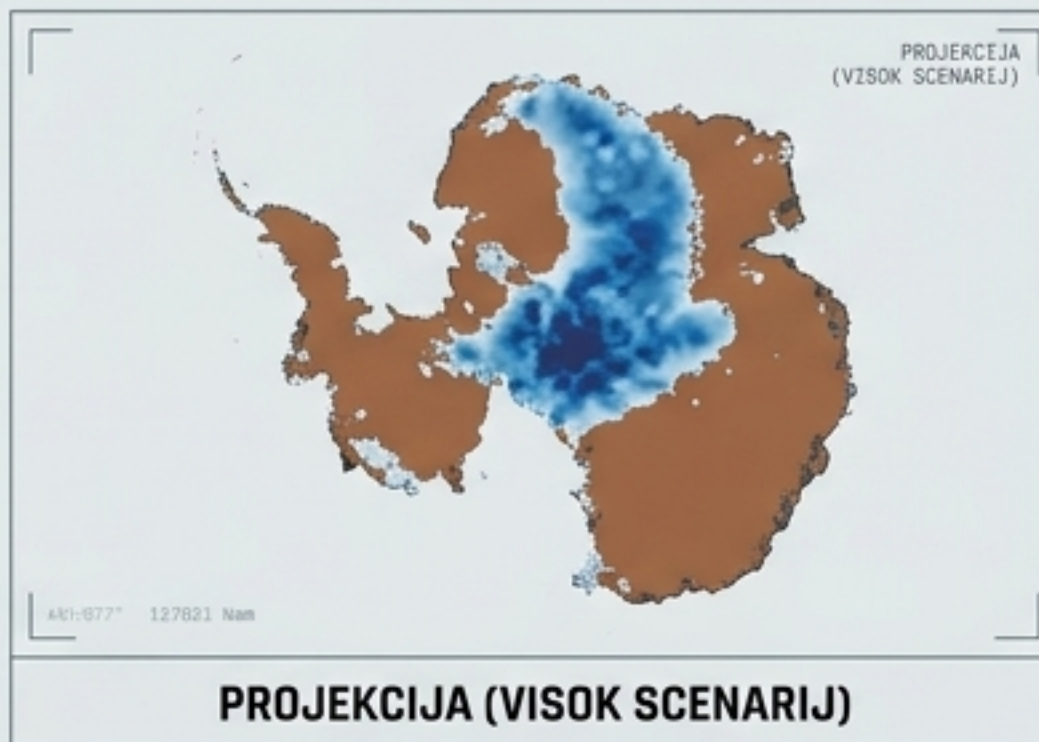
Antarktika



Ekstremna spremenljivka. Hrani ekvivalent

58 m GMSL.

Primarna spremenljivka: Nestabilnost Antarktike



MEHANIKA NESTABILNOSTI:
Večina izgube mase se zgodi v morskimi delih ledene plošče.

'REVERSE BED SLOPE' (OBRATNI NAKLON DNA):
Ko se odstrani robni 'ledeni čep' (ice plug), topografija dna, ki se spušča proti notranosti celine, povzroči nepovratno drsenje in taljenje ledene plošče, ki je zasidrana pod morsk gladino.

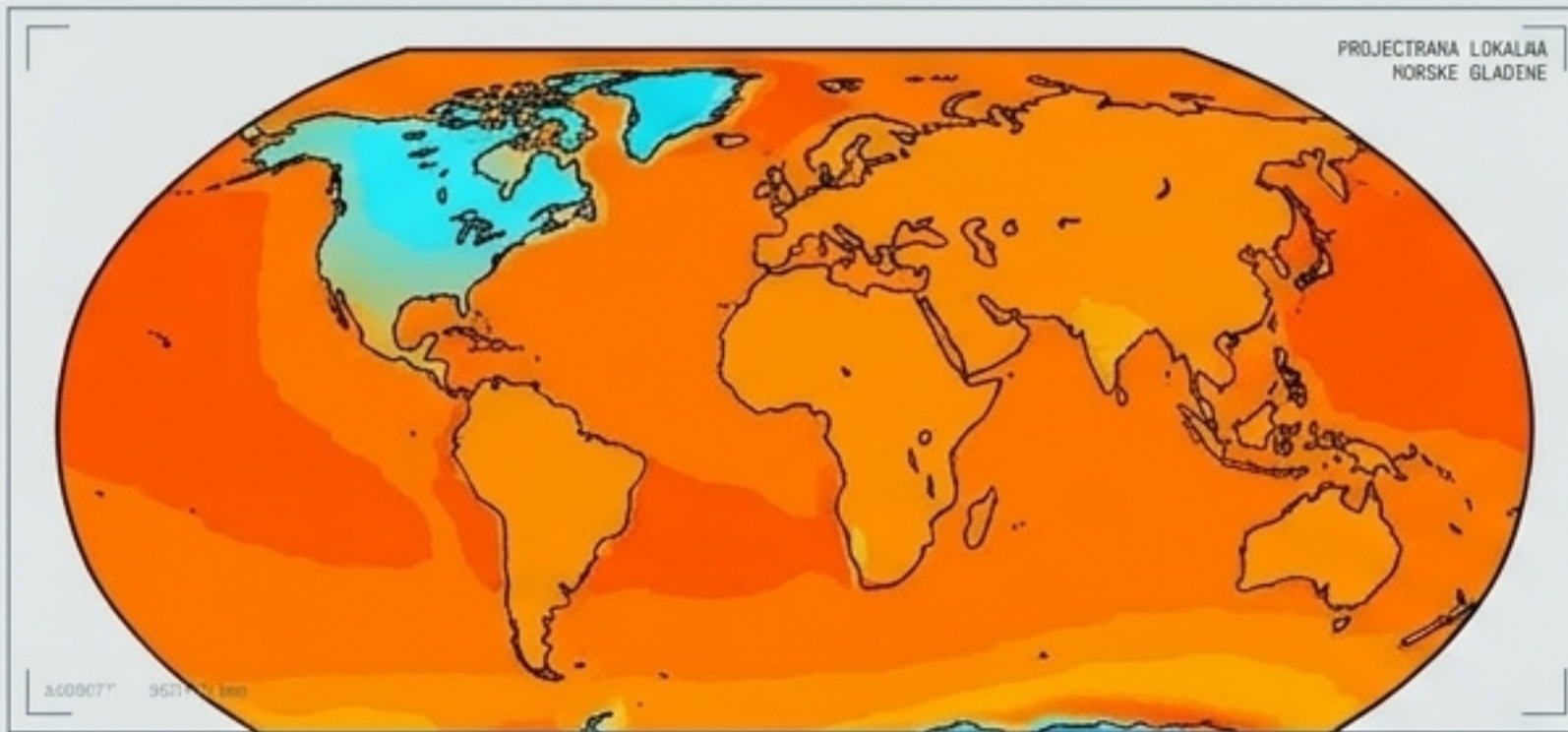


SISTEMSKI IZID:
Že najnižji scenarij (1.280 Pg C) odstrani led, vreden 24 m GMSL. Najvišji scenarij prispeva 45 metrov

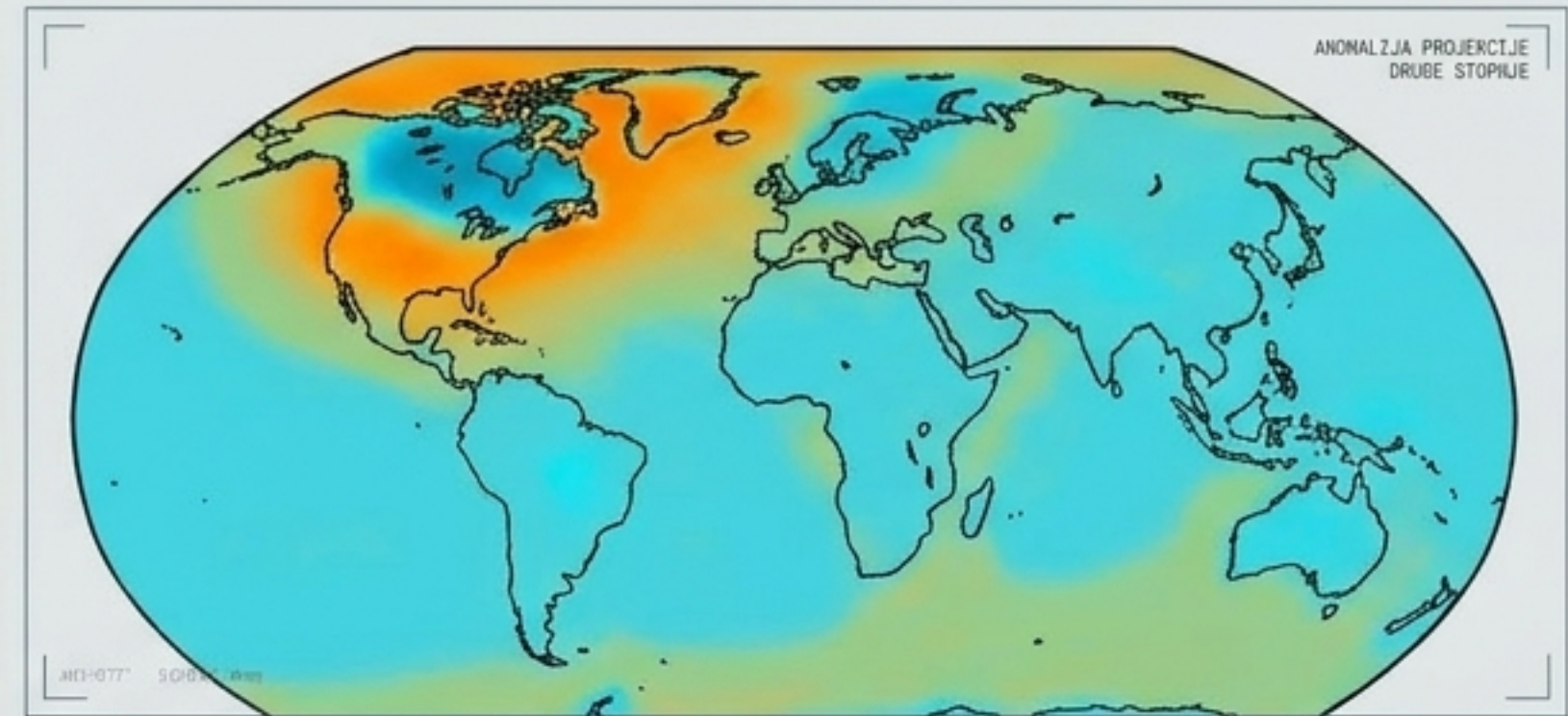
45 METROV GMSL ↑

– kar je štirikrat več kot vsi ostali viri skupaj.

Gravitacijska in izostatična anomalija



PROJECIRANA LOKALNA VARIACIJA DVIGA MORSKE GLADINE



ANOMALIJA PROJEKCIJE DRUGE STOPNJE

- ▣ **Paradoks gladine:** Dvig morske gladine ni enakomeren po vsem svetu.
- ▣ **Izguba lokalne gravitacije:** Ko masivna ledena plošča (npr. Grenlandija) izgubi maso, njena gravitacijska privlačnost pade. Posledično gladina morja neposredno ob njej dejansko upade.
- ▣ **Izostatični odboj:** Zemljina skorja, osvobojena teže ledu, se elastično dvigne.
- ▣ **Distribucija:** Zaradi teh učinkov se voda prerazporedi proti ekvatorju. Odstopanja od globalnega povprečja so dramatična: obale daleč od težišča ledu bodo izkusile precej višji dvig od 25-52 m povprečja.

Geografska simulacija: Scenarij 1.280 Pg C

PROJEKCIJA POTOPLJENIH OBMOČIJ (SCENARIJ 1.280 Pg C)



MISSION STATUS BOARD

VHODNI PARAMETER:

Najnižji scenarij izpustov (1.280 Pg C). Pomeni še dodatnih ~120 let pri trenutni stopnji emisij.

IZID POTOPIŤVE (Submergence State):

122 DRŹAV

izgubi vsaj 10 % trenutnega z dejavnostmi naseljenega ozemlja.



25 OBALNIH MEGAMEST

bo imelo potopljenih vsaj 50 % svoje površine.



1,3 MILIJARDE LJUDI

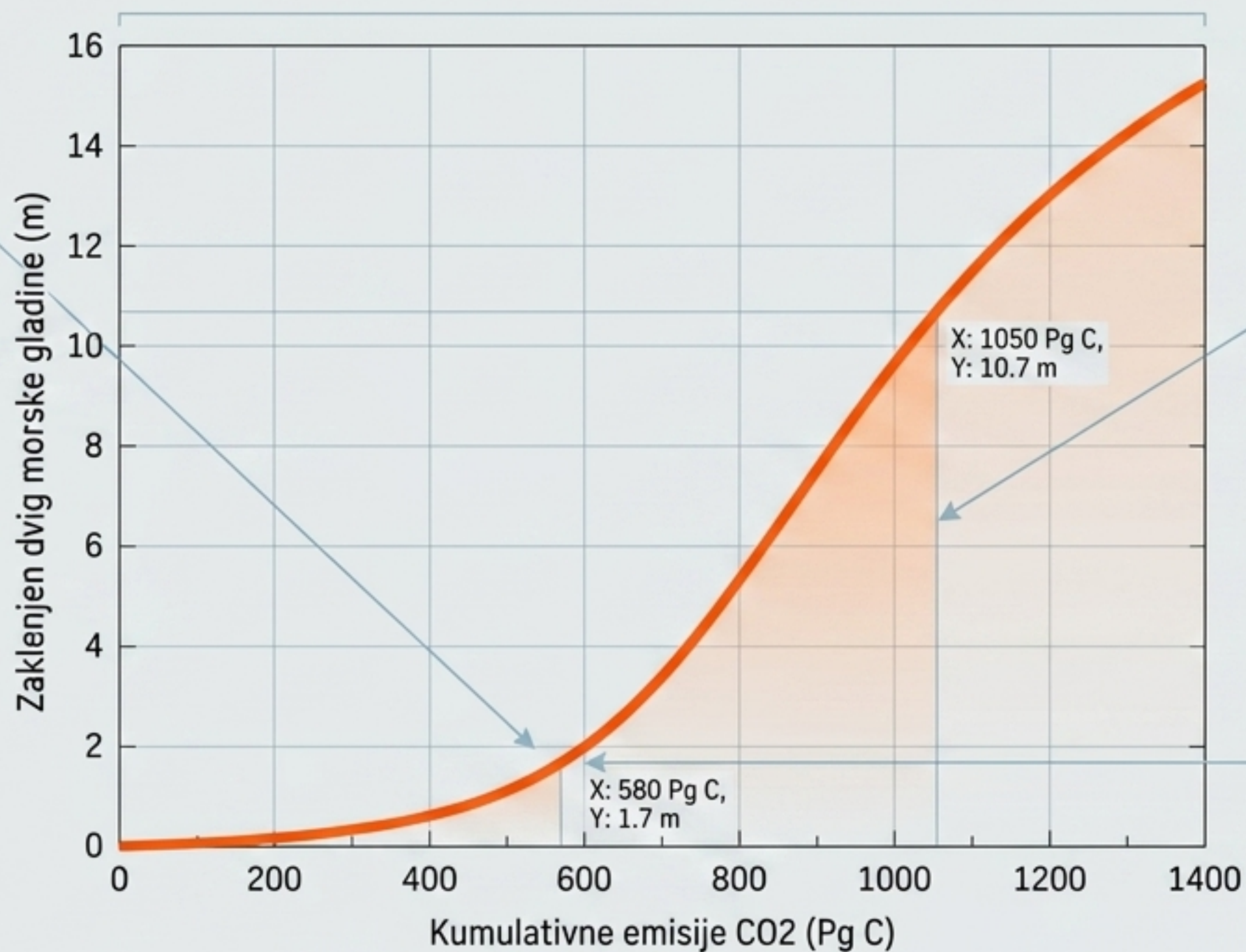
(po populaciji iz leta 2010) prebiva na zemljišču, priključenem oceanu, ki pade pod projekcijsko gladino.



Kumulativna enačba zaklenjenega stanja

Matematika vztrajnosti

Dvig gladine morja se obnaša kot integral. Funkcija ni odvisna od trenutne stopnje izpustov, temveč od celotne vsote (kumulativnega ogljika).



Fizikalno dejstvo

Znižanje stopnje emisij (npr. prehod na naravni plin ali zgolj povečanje učinkovitosti) ne ustavi dviganja morja. Samo upočasni hitrost, s katero se bližamo maksimalni vrednosti.

Že zaklenjeno

Z do zdaj izpuščenimi ~580 Pg C smo že 'zaklenili' dolgoročni dvig za približno 1,7 m. Dodatnih 470 Pg C bo zaklenilo nadaljnjih ~9 m.

Inženirski mandat: Četrta industrijska revolucija

Sistemska napaka postopnega zmanjševanja

Marginalno zmanjšanje emisij je nezadostno za preprečitev prihodnje škode.
Če CO2 teče v sistem, integral še vedno raste.

Edina matematična rešitev

Neto nične (ali neto negativne) emisije.
Popolna zaustavitev vnosa CO2.

Zahtevana infrastrukturna transformacija:

1

Sistem brez emisij ogljika predstavlja popolno transformacijo upravljanja virov.

01: -22.03° -5.017 N
0: -23.61° -3.037 N
0: 25.67° -4.367 N

2

Pospešen razvoj disruptivnih tehnologij (ne-fosilni energetske sistemi, shranjevanje energije na omrežni skali, dekarbonizacija industrije).

07: -26.05° -3.067 N
N: -6.67° 2.067 N
0: +6.07° 2.067 N

3

Cilj: Ustvariti sistem, kjer so brezogljicne tehnologije osnovni tehnološki inženirski standard.

07: -0.03° -6.007 N
N: -16.07° 0.300 N
0: 22.67° 1.300 N

Končno stanje simulacije

Odčitek: Z upoštevanjem 10.000-letnega časovnega okvira postane jasno: odločitve o energetskei infrastrukturi v naslednjih nekaj desetletjih bodo trajno spremenile geografijo planeta.

Ekonomija vs. Fizika: Modeli, ki razvrednotijo prihodnost z upocrabo finančnih diskontnih stopenj, odpovejo ob trku z neizprosnimi zakoni termodinamike.

Inženirska odgovornost: Mi določamo mejne pogoje, s katerimi se bo moralo spoprijeti naslednjih 400 generacij. Ne ustvarjamo rešitev le do leta 2100; projektiramo planet za geološko dobo.