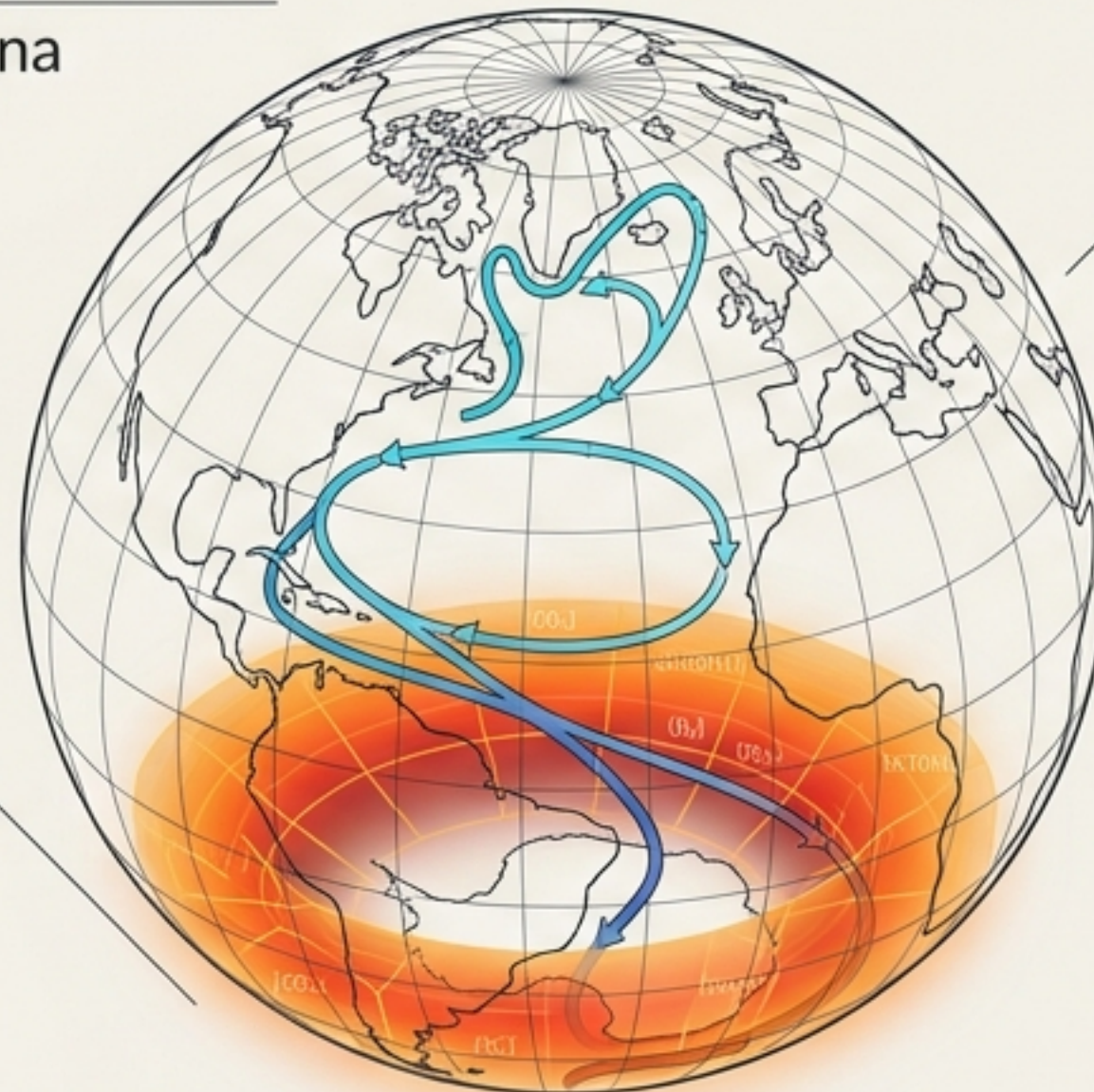
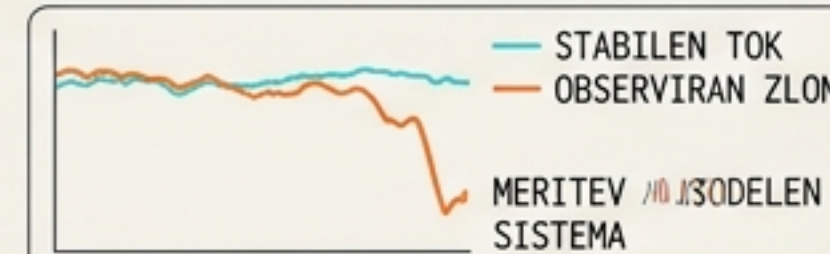


Kolaps AMOC in skriti plametarni termostat

Sistemska analiza kaskadnih učinkov na ogljični cikel in globalno segrevanje.

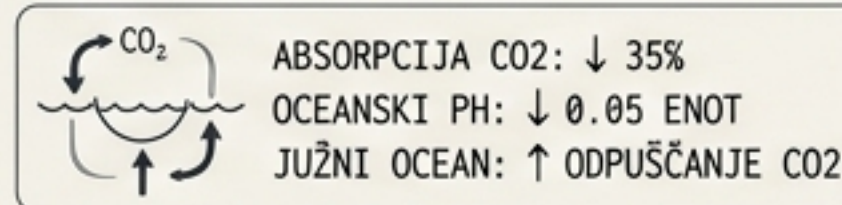


AMOC TOK: STATUS ANALIZA



MERITEV: 12.5 Sv (Referenčno 18.0 Sv) ⚠

OGLJIČNI CIKEL: ANOMALIJA



SISTEM: CLIMBER-X (Earth System Model)
KONFIGURACIJA: coupled-ocean-atmosphere
VERZIJA: 3.2.1-RC5

VHODNA_MOTNJA: 0.2 Sv sladke vode
LOKACIJA: Severni Atlantik (NA)
TRAJANJE: 100 let (simulirano)

STATUS: Analiza odpovedi sistema
OPOZORILO: AMOC kaskadni kolaps zaznan
INDIKATOR: Termohalinska nestabilnost

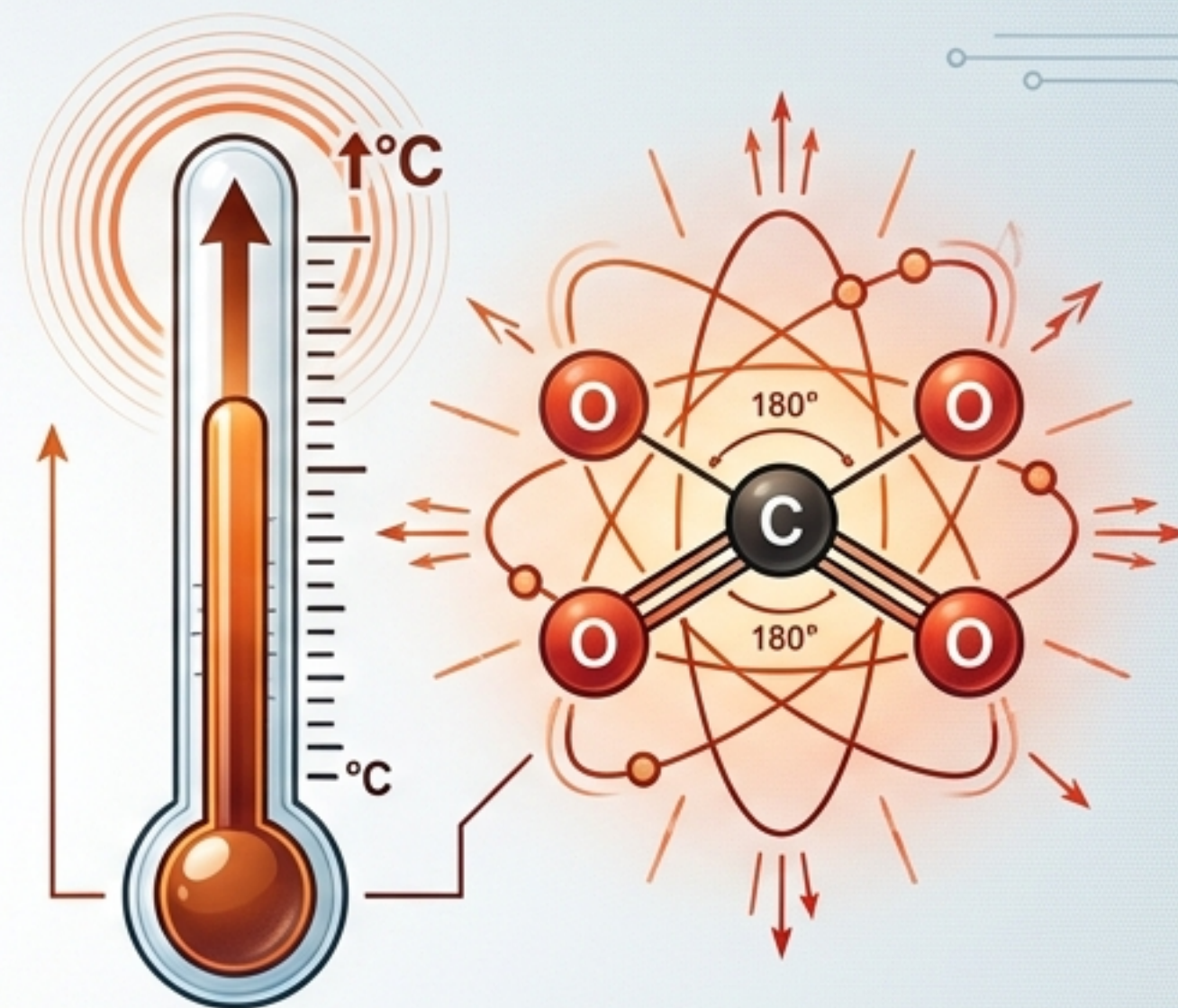
Zmotno prepričanje: Ne-povezan fizični model



Kolaps AMOC povzroči padec transporta toplote in prinaša drastično ohlajanje severne poloble ter neto padec globalne temperature.

$$\Delta\text{GMT} = \text{Ohlajanje (izolirana fizika)}$$

Nova paradigma: Povezan sistemski model



Kolaps AMOC sproži kaskadno reakcijo v Južnem oceanu in masovno sproščanje globokomorskega ogljika, kar vodi v NETO globalno segrevanje.

$$\Delta\text{GMT}_{\text{AMOC}} = +0.2^{\circ}\text{C} \text{ (neto segrevanje)}$$

Sistemske meje so ključne. Ignoriranje ogljičnega cikla pri modeliranju vodi v napačno oceno globalnega izida.

3D Ocean (GOLDSTEIN):
Frikcijsko-geostrofični ocean
(23 vertikalnih slojev).

Atmosfera (SESAM):
Pol-empirični statistično-
dinamični model.

CLIMBER-X:
Arhitektura
modela
zemeljskega
sistema

Morski led (SISIM):
Termodinamično-
dinamični model.

**Kopno in vegetacija
(PALADYN):**
Dinamična vegetacija in
kopenski ogljični cikel.

Biogeokemija oceana:
Sledenje tokovom
ogljika (pCO₂).

- **Računska učinkovitost:** Model omogoča simulacije 10.000-letnih ravnovesnih stanj (spin-ups) za stabilizacijo sistema pred vnosom motnje.
- **Klimatska občutljivost:** ~3°C (primerljivo s CMIP6 modeli).

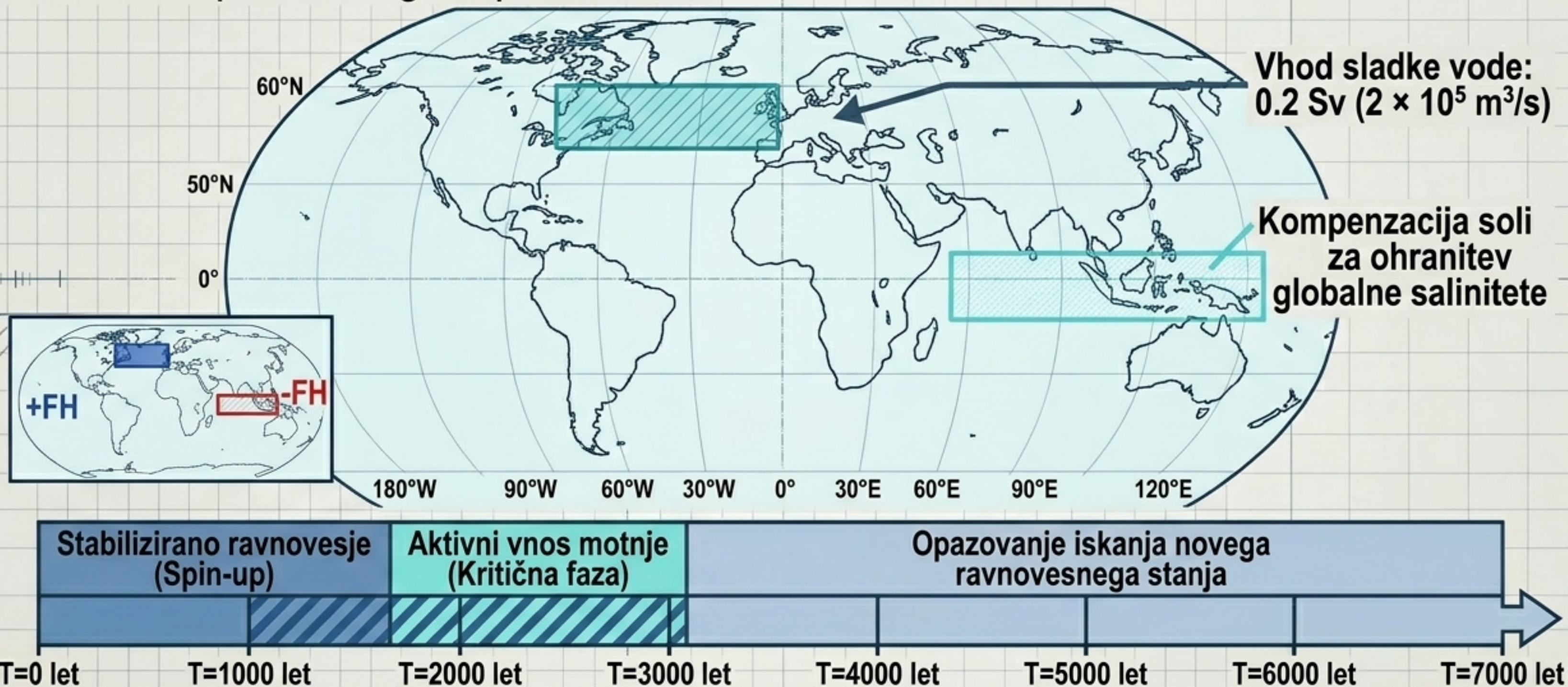
Matrika eksperimentov za izolacijo spremenljivk

Strukturna dekompozicija klimatskega in ogljičnega odziva

Nastavitev Modela	Oceanska dinamika	Oceanski ogljik	Kopenski ogljik	Raziskovalni cilj
Fiksni CO2	VKLOP	IZKLOP	IZKLOP	Čisti fizični odziv klime na kolaps.
Brez kopenskega ogljika	VKLOP	VKLOP	IZKLOP	Izolacija vpliva oceanskega sproščanja CO2.
Polno povezan sistem	VKLOP	VKLOP	VKLOP	Končna sistemska bilanca z vsemi blažilci.

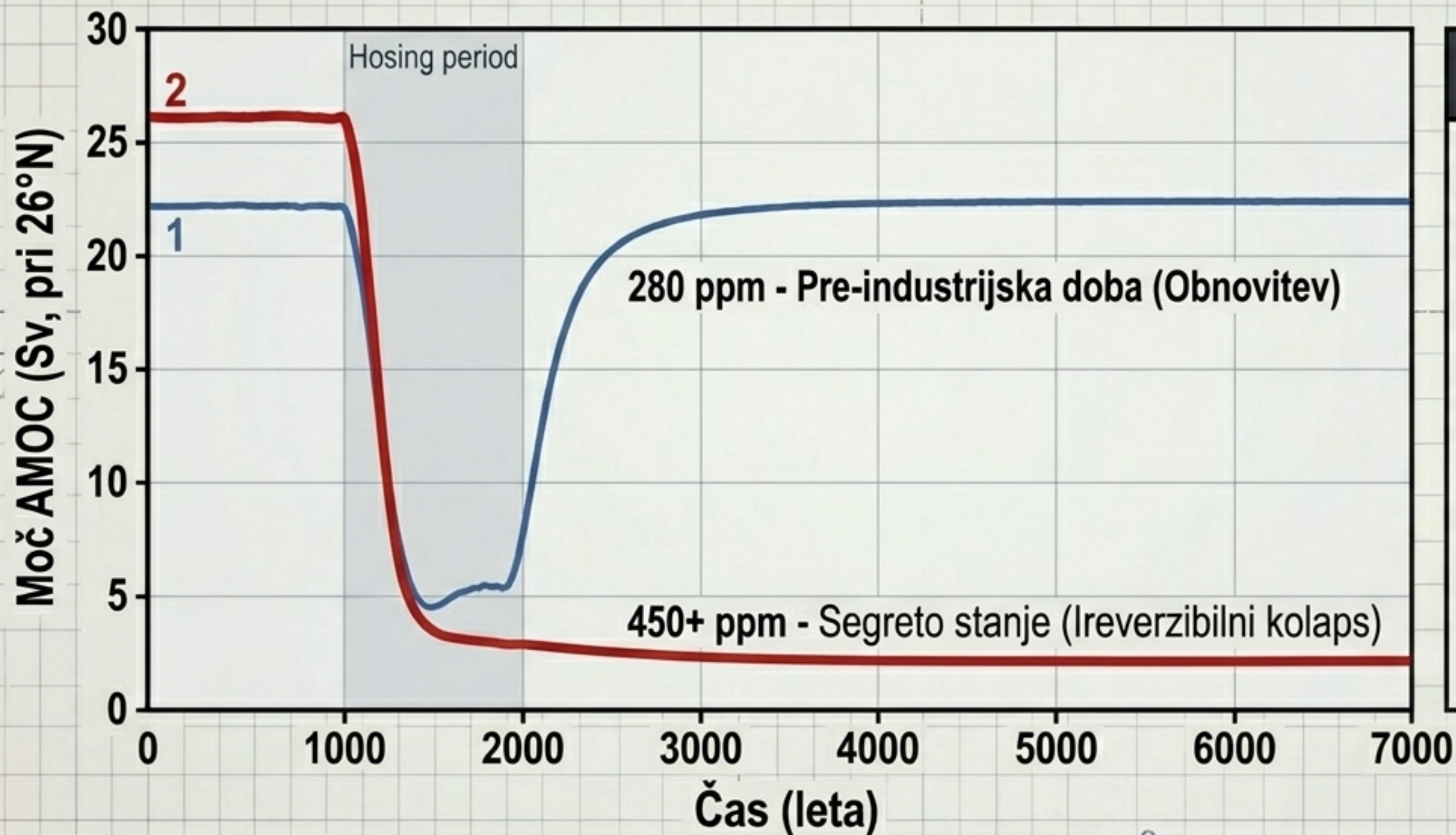
Vnos motnje v sistem (Perturbacija)

Prisilni kolaps s hosing eksperimentom



Bistabilnost AMOC sistema

Nelinearni odziv na motnjo pri višjih ravneh energije.



Ireverzibilni kolaps

Pri sistemski ravni >350 ppm CO_2 sistem izkazuje bistabilno vedenje.

Ko kroženje odpove, ostane v stanju **IZKLOP**.

Višja kot je izhodiščna energija, težja je povrnitev.

Bipolarna temperaturna gugalnica

Ekstremna redistribucija toplotne energije ob zaustavitvi atlantske črpalke.

Arktika
(60°N–90°N)

$\Delta T \approx -7^{\circ}\text{C}$

Drastično ohlajanje. Padeč transporta toplote sproži močno povratno zanko albedu zaradi širjenja morskega ledu.

Kljub na videz majhni spremembi globalnega povprečja, sistem utrpi lokalne ekstreme z razliko več kot 13°C med poloma.

Antarktika
(60°S–90°S)

$\Delta T \approx +6^{\circ}\text{C}$

Ekstremno segrevanje. Toplota se zadržuje na južni polobli. Izguba morskega ledu dodatno ojača lokalno segrevanje.

Fizični vpliv (Fiksni CO₂ model)

Izoliran termodinamični izid brez ogljičnega cikla.

$$\Delta\text{GMT}_{\text{AMOC}} = -0.2^{\circ}\text{C do } -0.3^{\circ}\text{C}$$

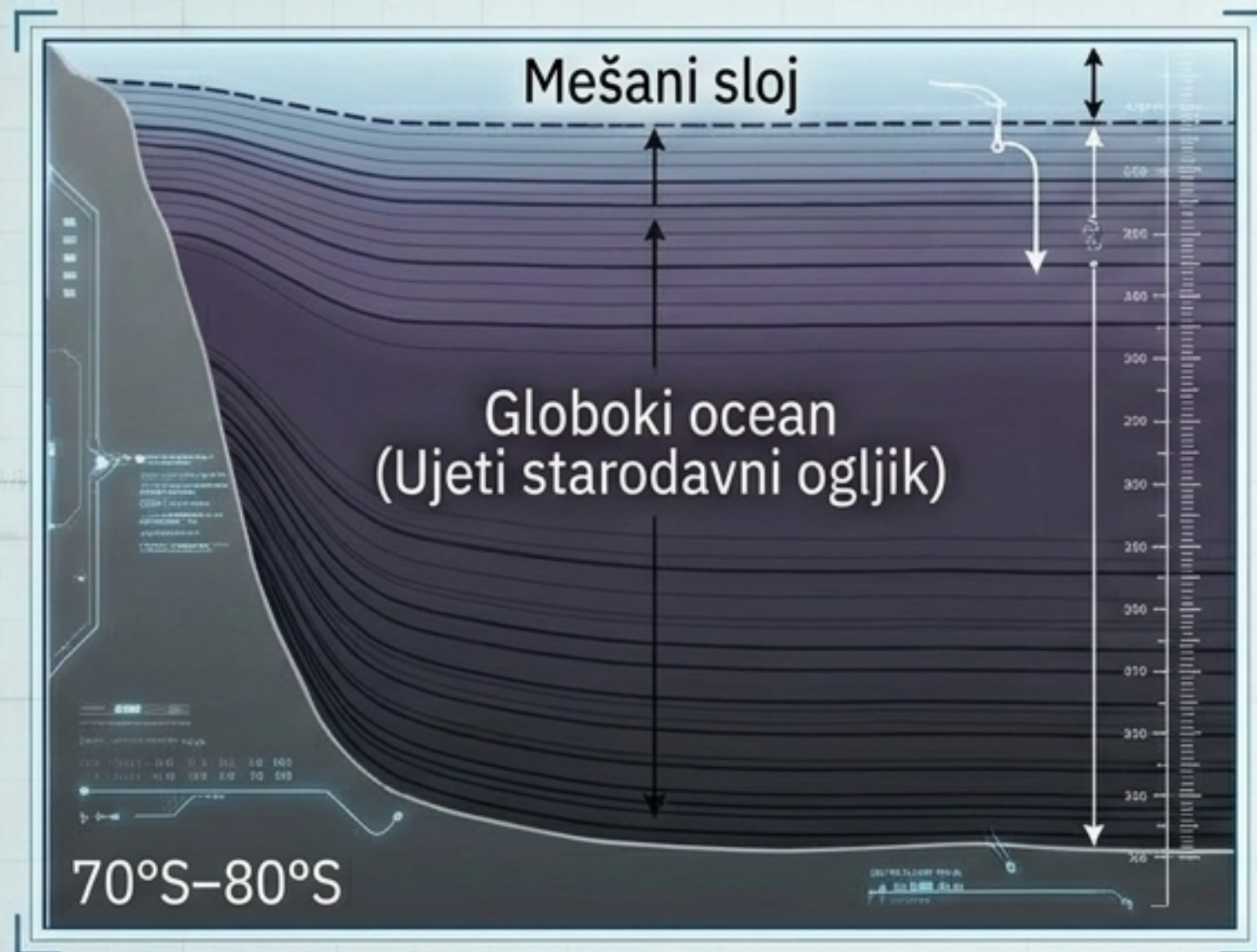
- Če izključimo kemični/ogljčni odziv sistema, je neto rezultat kolapsa AMOC globalno ohlajanje. Ohlajanje na severu fizikalno preglasi segrevanje na jugu.
- Paradoks: Zakaj polno povezan sistem na koncu pokaže neto segrevanje?

Iskanje skrite povratne zanke.

Odповed stratifikacije v Južnem oceanu

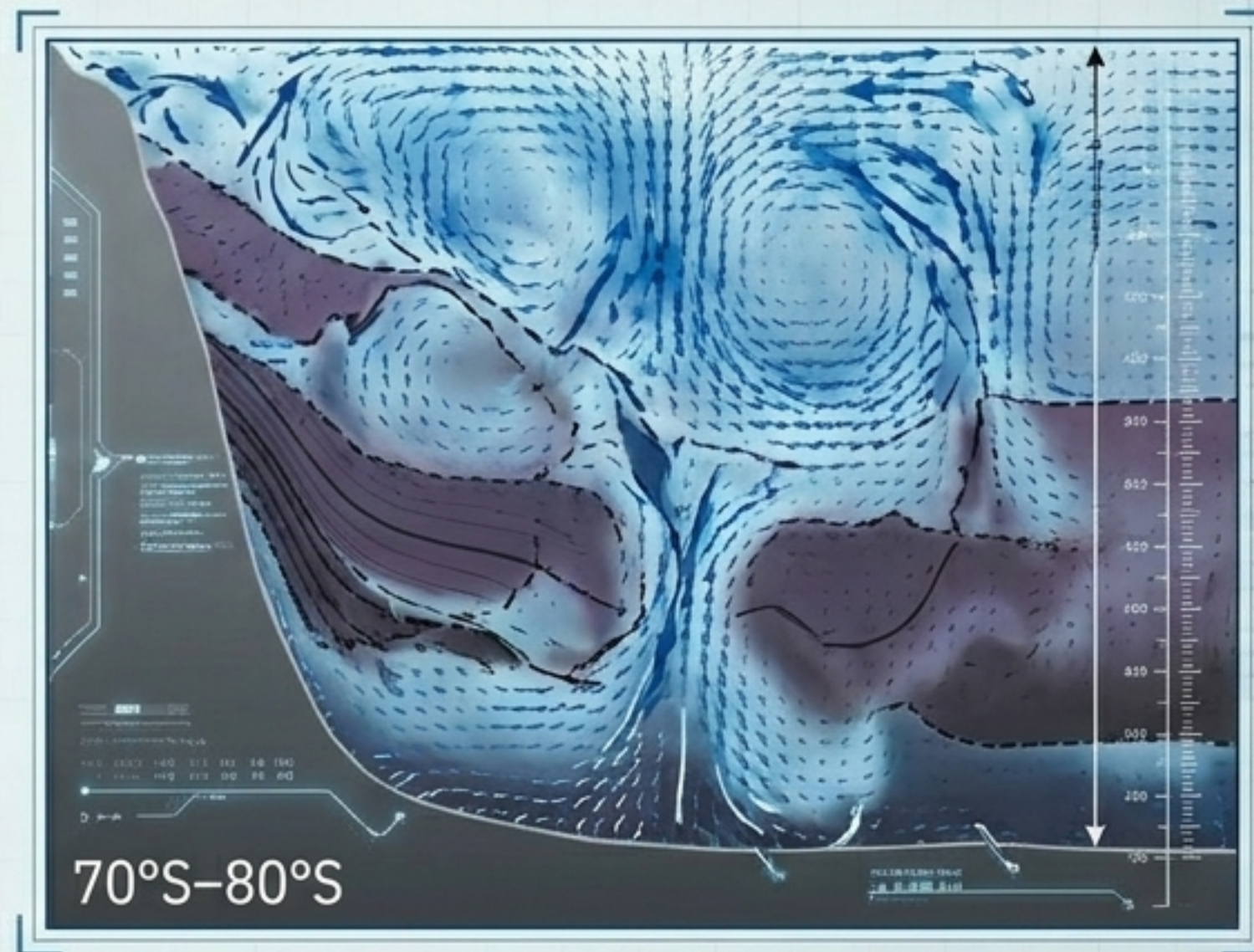
Fizični premik sproži odповed kemičnega tesnila.

Pred Kolapsom (Stabilno stanje)



Močna stratifikacija vodnega stolpca. Ogljik bogata globoka voda je varno ujeta na dnu oceana.

Po Kolapsu AMOC (Destratifikacija)



Bipolarna gugalnica segreje jug. Globina mešanega sloja drastično pade. Stratifikacija se zruši.

Globoka konvekcija in ventilacija

Fizična napaka na severu sproži kemično sproščanje na jugu.

1

Termična sprožitev:

Toplota, ujeta na jugu, in izguba ledu omogočita konvektivno nestabilnost.

2

Globoka konvekcija:

Masa vode se začne vertikalno mešati od površja do morskega dna.

4

CO₂ Outgassing:

Kemično neravnovesje povzroči masovno odvajanje CO₂ neposredno v atmosfero.

3

Masovna ventilacija:

Stari, z ogljikom bogati tokovi se dvignejo na površje.

Skriti mehanizem je razkrit. Planetarni termostat je povezan s konvekcijo Južnega oceana.

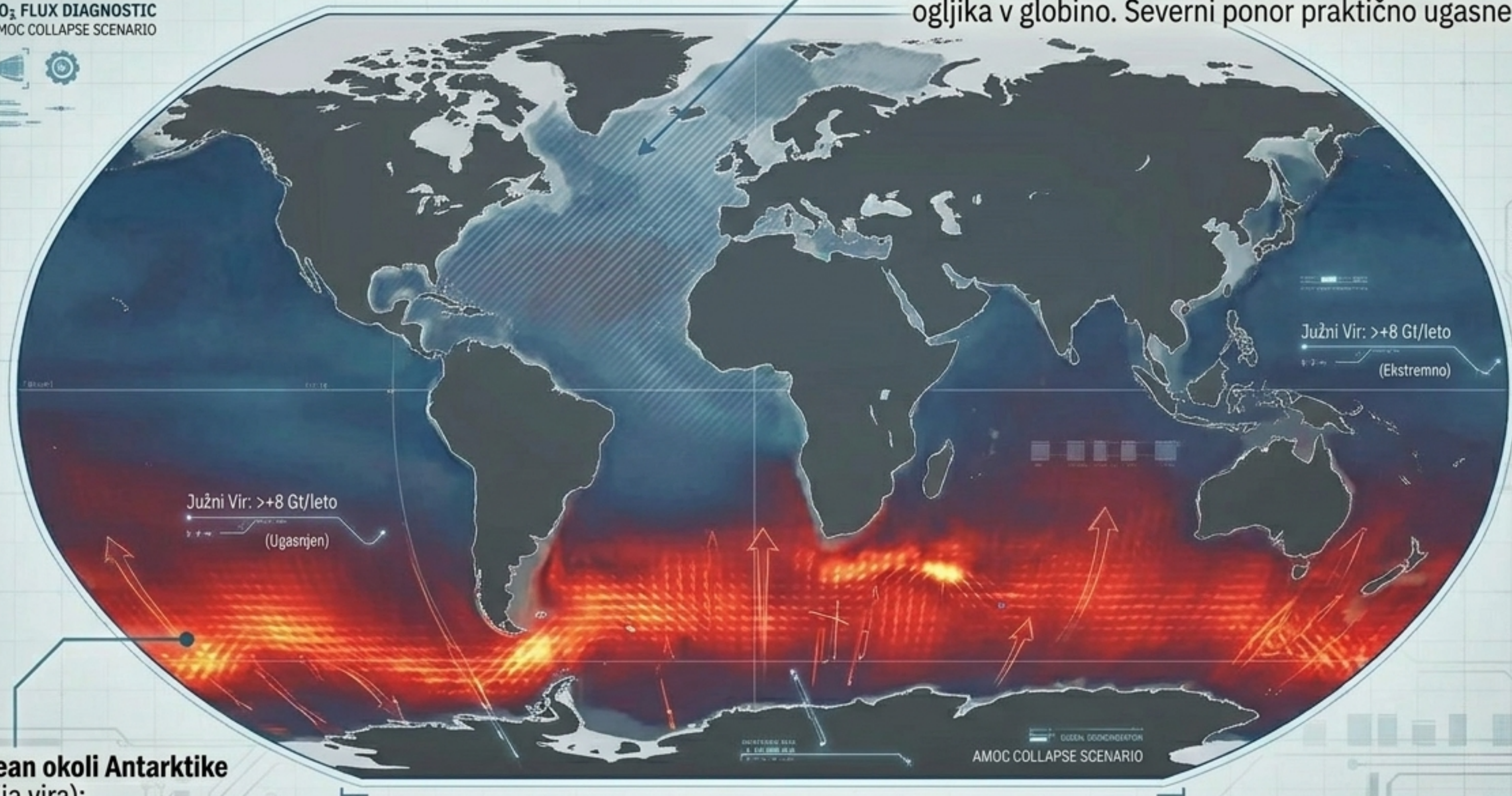
Spremembe vzorcev ponorov in virov

Reorganizacija globalnega ogljičnega cikla.

CO₂ FLUX DIAGNOSTIC
AMOC COLLAPSE SCENARIO



Severni Atlantik (Smrt ponora): Prenehanje formacije globoke vode ustavi prenos površinskega ogljika v globino. Severni ponor praktično ugasne.



Južni Vir: >+8 Gt/leto
(Ekstremno)

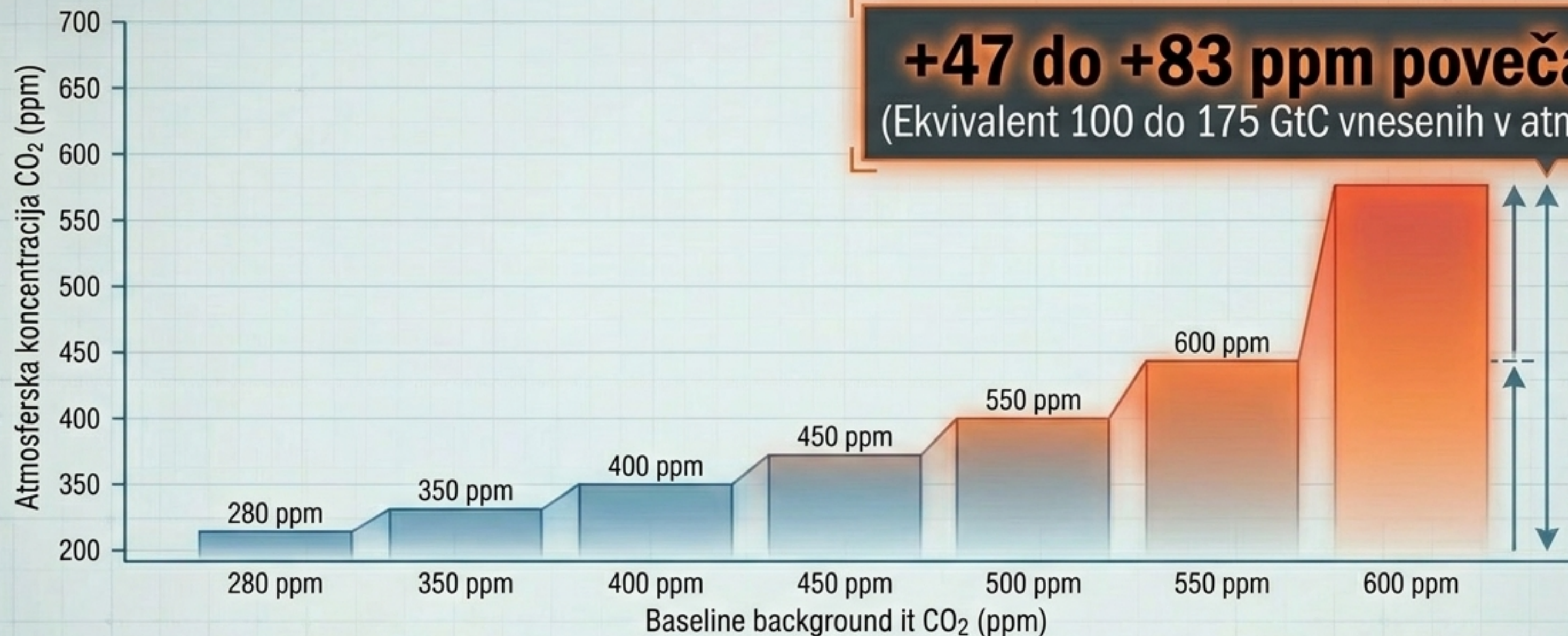
Južni Vir: >+8 Gt/leto
(Ugasnjen)

Južni Ocean okoli Antarktike
(Eksplozija vira):
Globoka konvekcija

AMOC COLLAPSE SCENARIO

Šok v atmosferskem CO₂

Kvantifikacija sistemskega izbruha ogljika.



+47 do +83 ppm povečanje
(Ekvivalent 100 do 175 GtC vnesenih v atmosfero).

Volatlnost pri višjih energijah

Višja kot je izhodiščna raven ravnovesnega CO₂ (npr. 450 ppm do 600 ppm), večji je absolutni dvig.

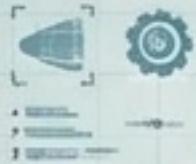
Sistemska neizprosnost

Toplejši sistem vsebuje večji oceanski inventar ogljika; ob kolapsu je izbruh sorazmerno močnejši.

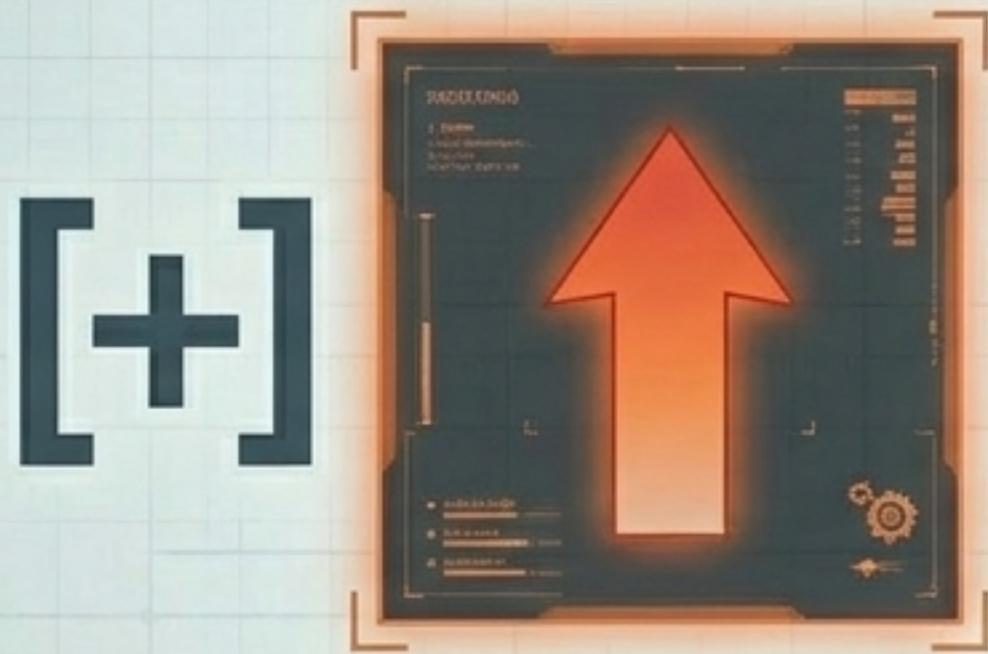
Blažilni učinek kopnega (Kopenski ponor)

Biološki blažilci preprečijo še hujši sistemski šok.

CO₂ FLUX DIAGNOSTIC
AMOC COLLAPSE SCENARIO

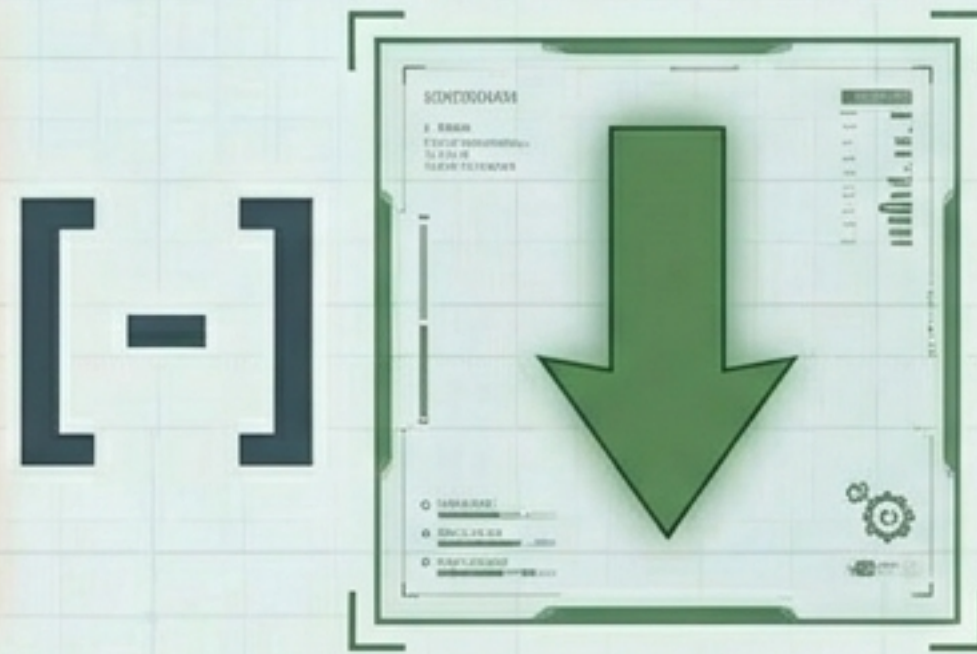


Oceansko sproščanje
(Masovni vir)



Dvig za 72 do 130 ppm
(brez kopnega)

Kopenska absorpcija
(Sistemski blažilec)



Delna ublažitev zaradi
povečane vegetacijske rasti

**Neto atmosferski
prirast**

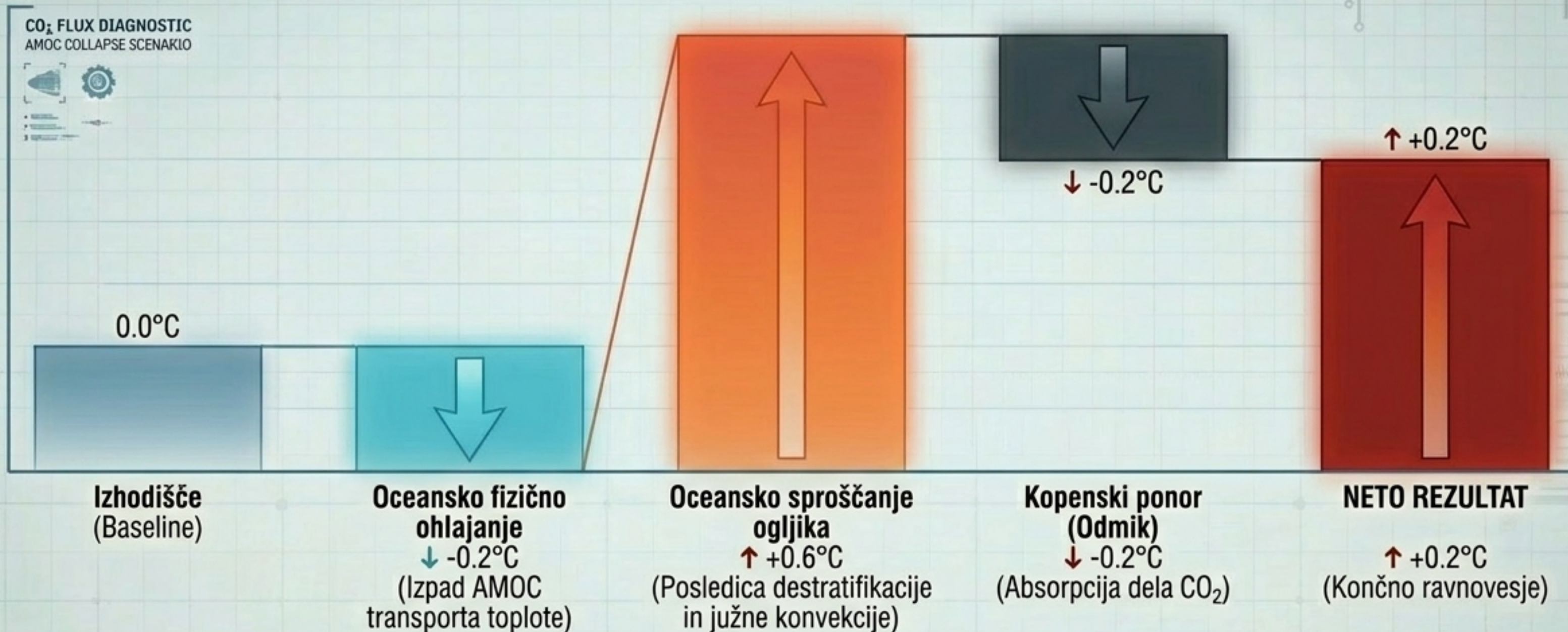


Dokončnih
+47 do +83 ppm

Brez blažilnega učinka kopenske biologije (model 'Brez kopenskega ogljika') bi bil **šok skoraj dvojno večji**. Kopenski ekosistemi delujejo kot kritičen sistemski amortizer.

Končna bilanca: Neto segrevanje

Dekompozicija globalne temperature (Δ GMT).



Kemični odziv zemeljskega sistema znatno preglasi njegov čisti fizični odziv.

Kaskada planetarnega stroja

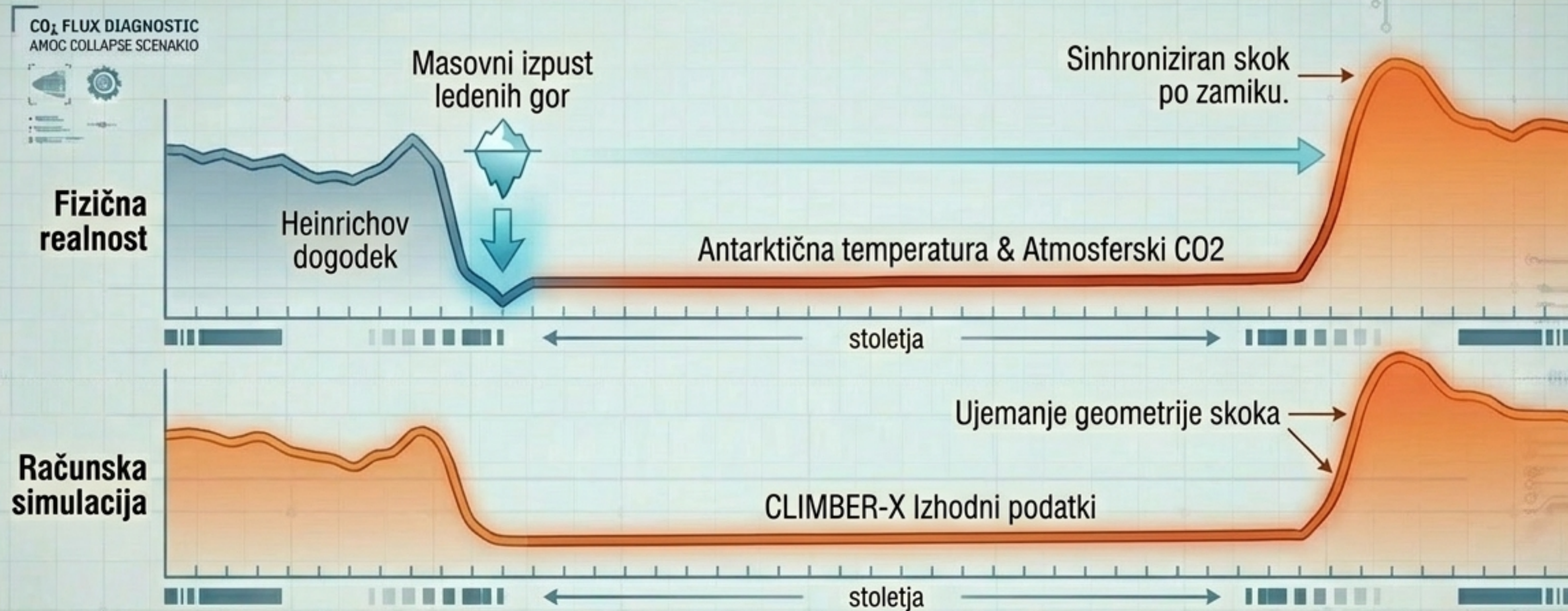
Celovita shema povratnih zank po zrušitvi AMOC.

CO₂ FLUX DIAGNOSTIC
AMOC COLLAPSE SCENARIO



Lekcije iz preteklosti (Paleoklimatologija)

Validacija modela z uporabo podatkov ledenih dob.



Heinrichovi dogodki:

Masovni izpusti ledenih gor v preteklosti so povzročili kolaps AMOC.



Podatki iz ledenih vrtin:

Kažejo drastičen skok antarktičnih temperatur in skok atmosferskega CO₂ več stoletij po zaustavitvi.



Zanesljivost modela:

CLIMBER-X uspešno reproducira te skoke, kar potrjuje, da mehanizem obstaja v resničnem svetu in ni zgolj matematični artefakt.

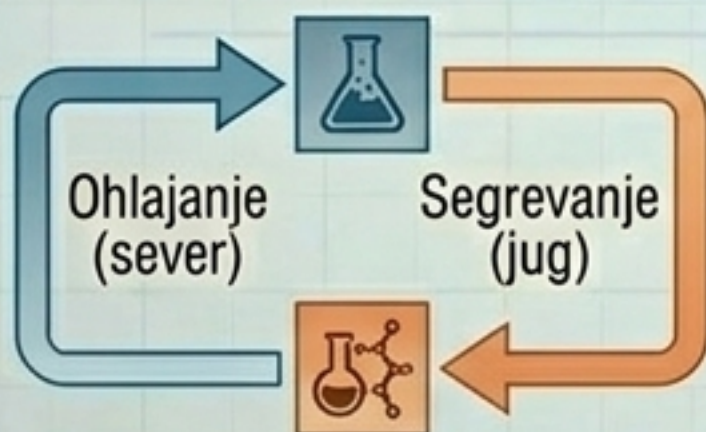
Inženirski sklep

Zaključna diagnoza zemeljskega sistema.

1

Nelinearne povratne zanke

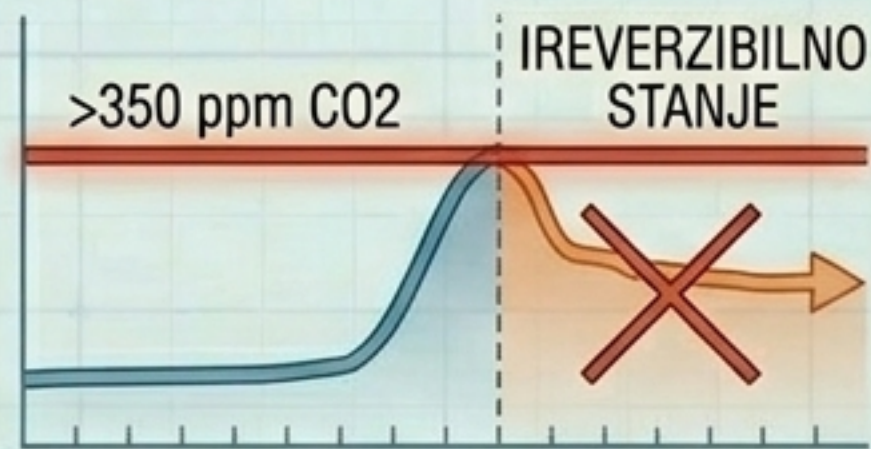
Kompleksni sistemi skrivajo nasprotujoče si povratne zanke. Lokalni fizični zlom (ohlajanje na severu) deluje kot kemični sprožilec za globalni dvig CO₂ (segrevanje na jugu). Sistemskih napak ne smemo analizirati izolirano.



2

Pragovi bistabilnosti

Višje ravni sistemske energije (>350 ppm CO₂) naredijo planetarni stroj bistabilen. Po prekoračitvi praga vrnitev v prvotno stanje ni več mogoča, odpoved postane ireverzibilna.



3

Skriti lokalni ekstremi

Skromen neto globalni seštevek (+0.2°C) maskira katastrofalne regionalne ekstreme (Δ 13°C razlike med severnim in južnim polom). Globalna povprečja niso zadostna metrika za ocenjevanje operativnih tveganj sistema.

