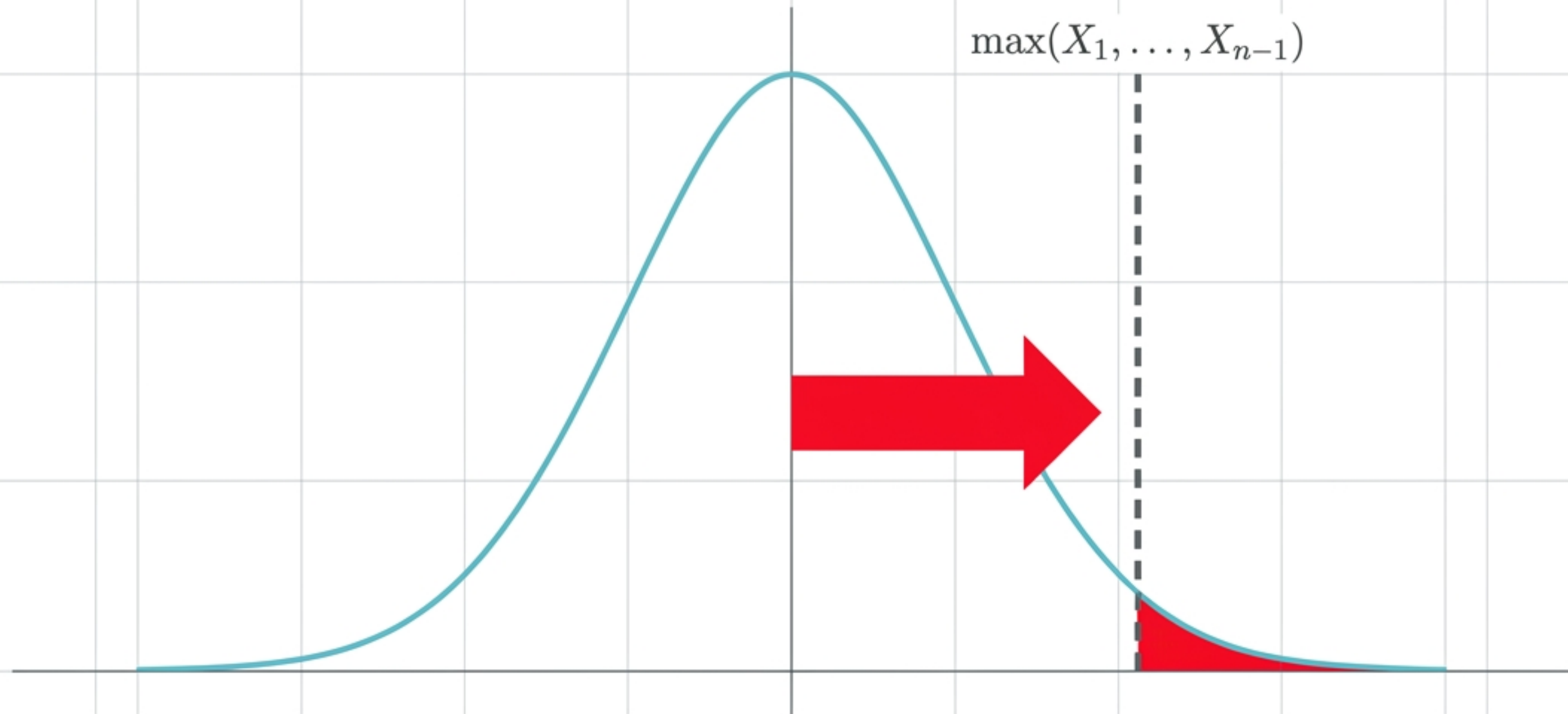




Rekordni ekstremi v segrevajočem se podnebj

Statistična in termodinamična analiza za inženirsko načrtovanje

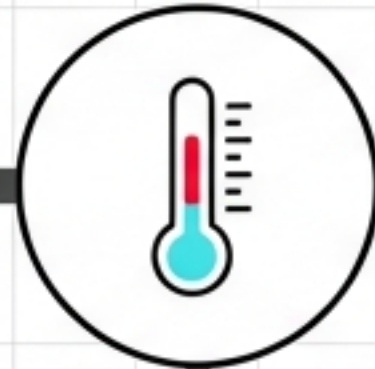
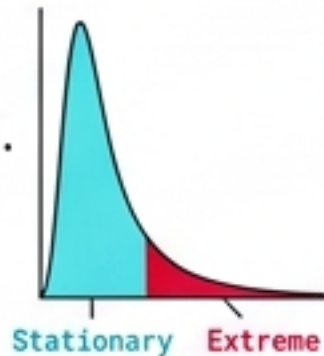
Temelji na raziskavi Fischer et al. (2025), Nature Reviews Earth & Environment

Od osnovnih principov do kompleksnih sistemov



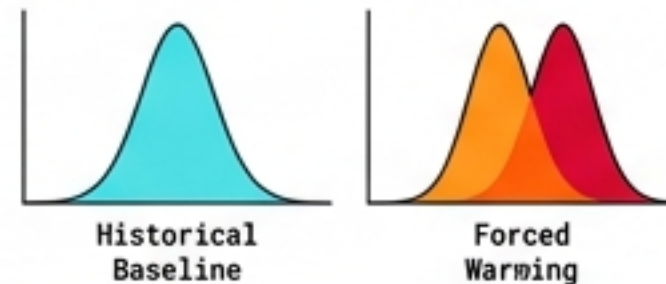
Matematika nepredvidenega

Osnove teorije ekstremnih vrednosti in i.i.d. modeli.



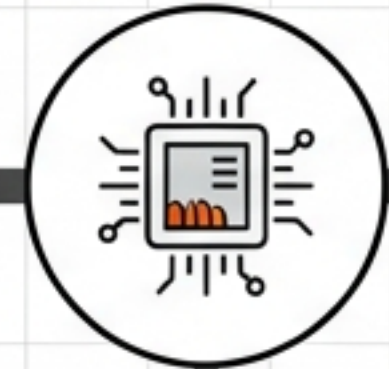
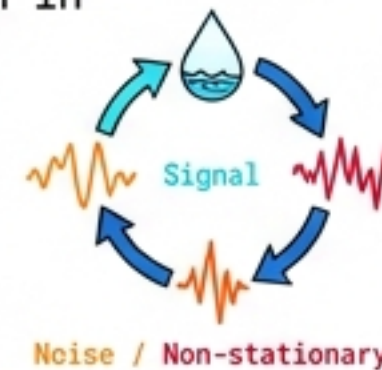
Termodinamični premiki

Kvantifikacija asimetrije temperaturnih rekordov.



Kompleksnost vodnega kroga

Signal, šum in hidrološki ekstremi.



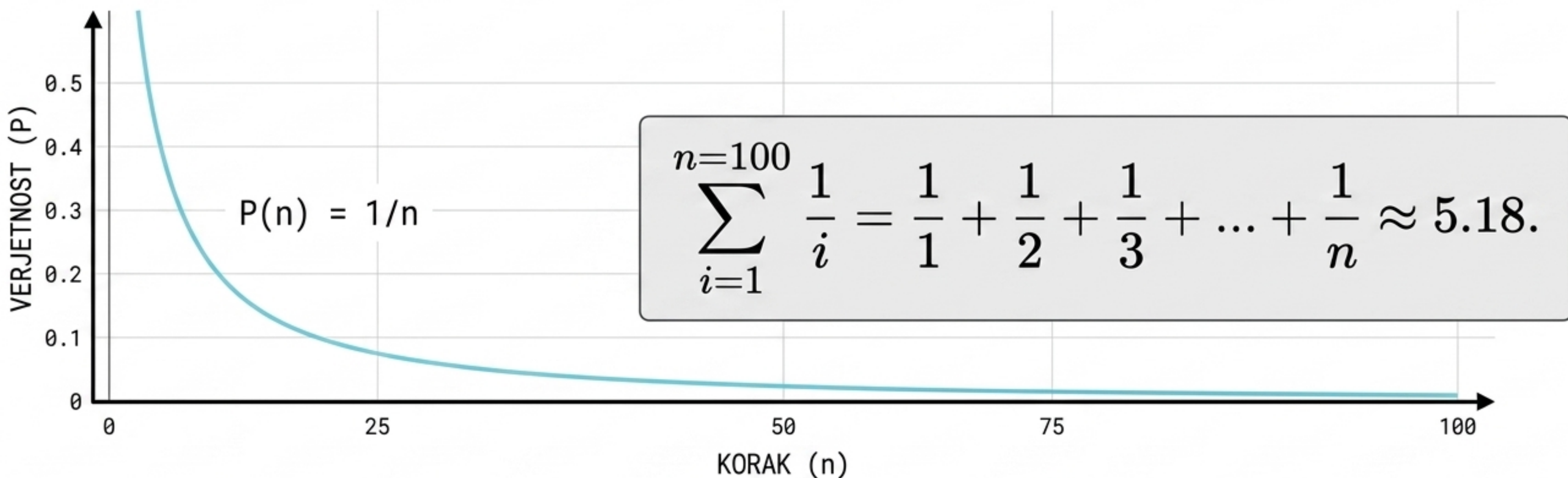
Inženiring prihodnosti

Računsko modeliranje za oceno tveganj infrastrukture.



Stacionarna paradigma in pričakovani rekordi

V stabilnem podnebjju predpostavljamo neodvisne in enako porazdeljene spremenljivke (i.i.d.). Verjetnost padca rekorda v koraku n je natanko $1/n$.



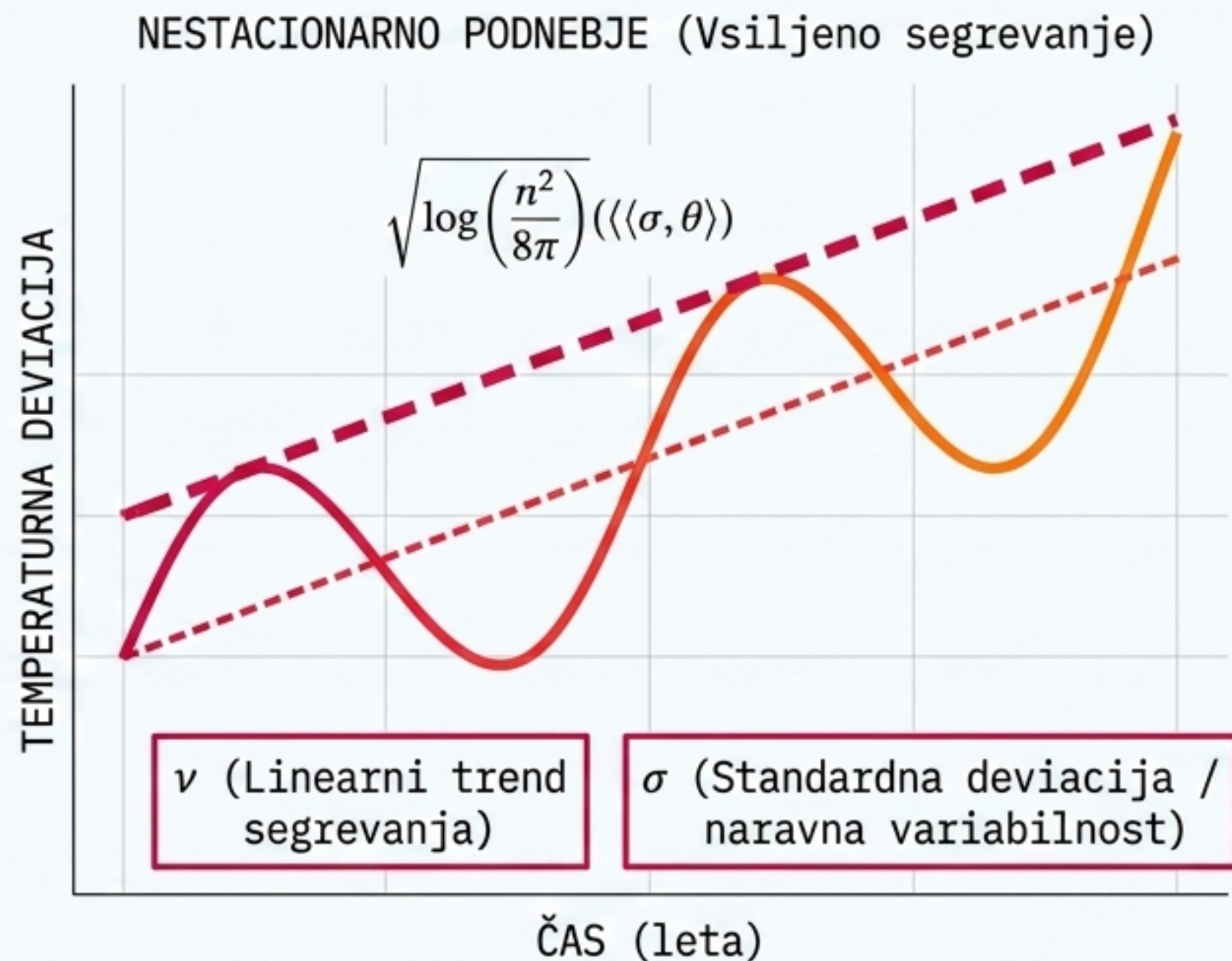
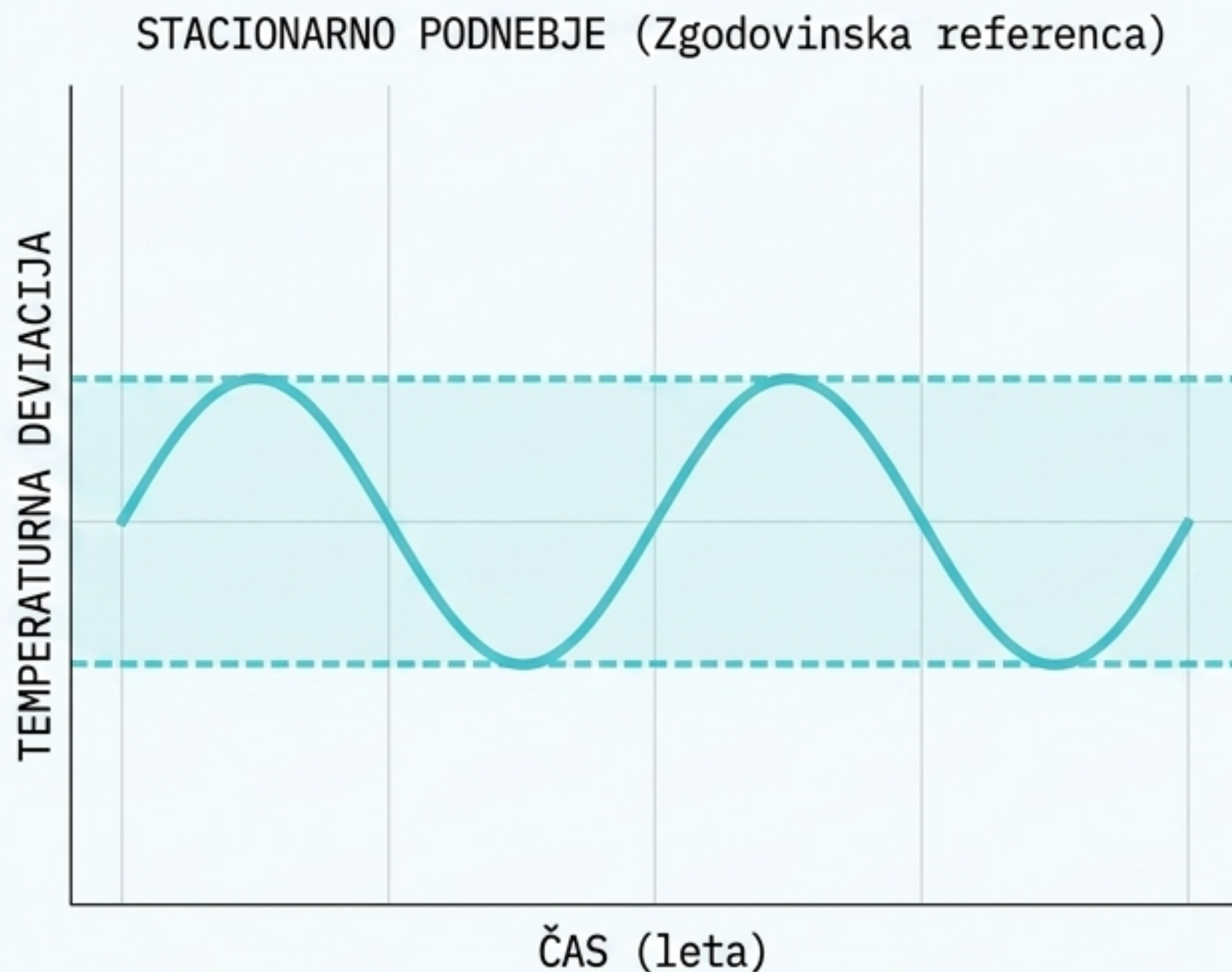
$1/n$ (Eksponentno upadanje verjetnosti)

$\gamma \approx 0.577$ (Euler-Mascheronijeva konstanta)

V zaporedju 100 let bi v stabilnem sistemu pričakovali zgolj 5,18 rekordov.

Prehod v nestacionarnost: Vpliv vsiljenega trenda

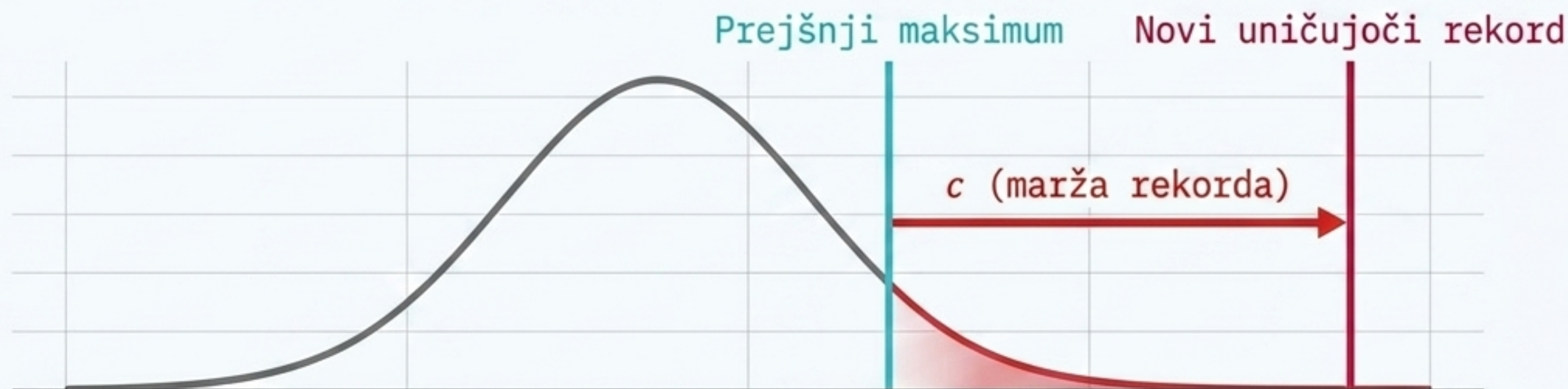
Podnebne spremembe kršijo i.i.d. predpostavko. Uvajamo Gaussovo porazdelitev z linearnim trendom v povprečju in konstantno standardno deviacijo.



Verjetnost rekorda se poveča sorazmerno z razmerjem ν / σ .

Definicija 'uničujočega' rekorda (Record-Shattering)

Dogodek, ki prejšnji rekord preseže za vnaprej določeno pozitivno maržo c . Za razliko od navadnega preloma rekorda, zahteva premik celotne funkcije gostote verjetnosti.



$$X_n > \max(X_1, \dots, X_{n-1}) + c$$

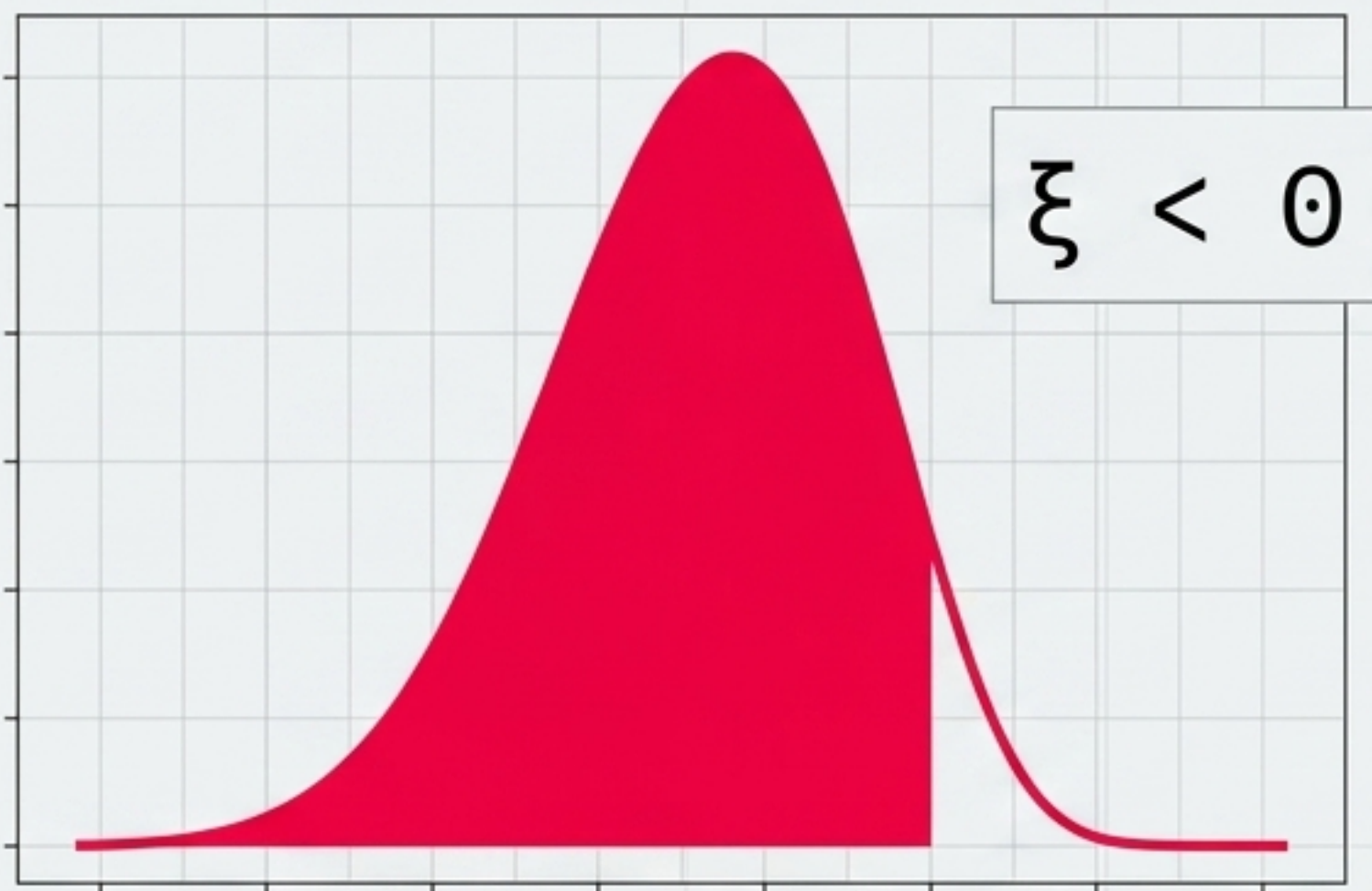
Marža c (Običajno določena kot 1 standardna deviacija, 1σ)

$$\begin{aligned} \Pr(\text{record-shattering event}) &= \Pr[X_n > \max(X_1, \dots, X_{n-1}) + c] \\ &= E_{X_n}[\Pr(X_1 < X_n - c, \dots, X_{n-1} < X_n - c | X_n)] \\ &= \int \left\{ \prod_{t=1}^{n-1} F_t(x - c) \right\} f_n(x) dx. \end{aligned} \tag{4}$$

Vpliv repov porazdelitve na magnitude ekstremov

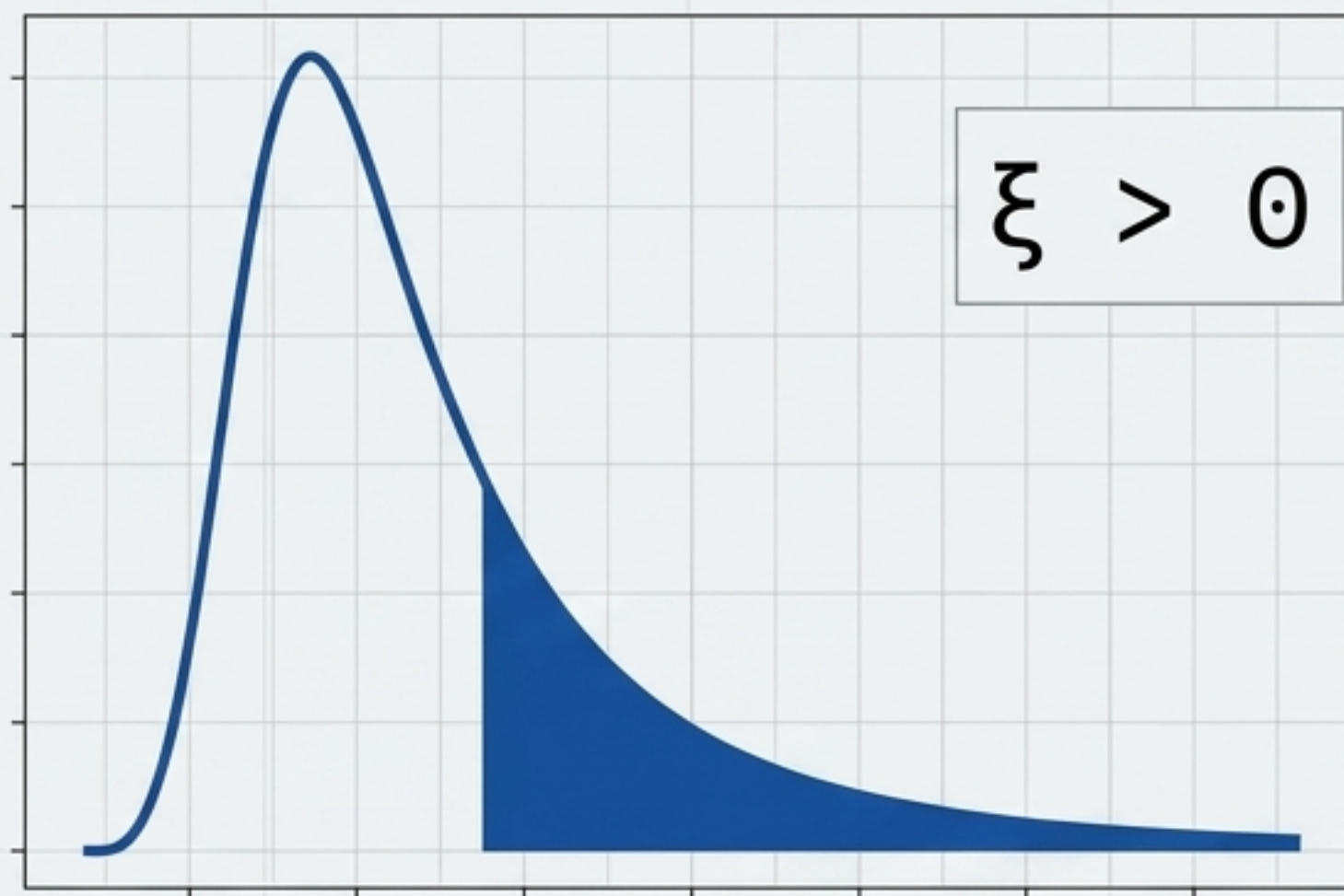
V splošni porazdelitvi ekstremnih vrednosti (GEV) oblikovni parameter ξ določa obnašanje marže rekorda skozi čas.

Omejeni repi (Bounded Tails)



Tipično za nekatere temperaturne spremenljivke. Marže rekordov se sčasoma manjšajo. Trend segrevanja močno poveča verjetnost zrušitve.

Težki repi (Heavy Tails)



Tipično za padavine. Marže rekordov se sčasoma naravno večajo. Obnašanje je bolj stabilno, a ekstremi sežejo bistveno dlje v neznano.

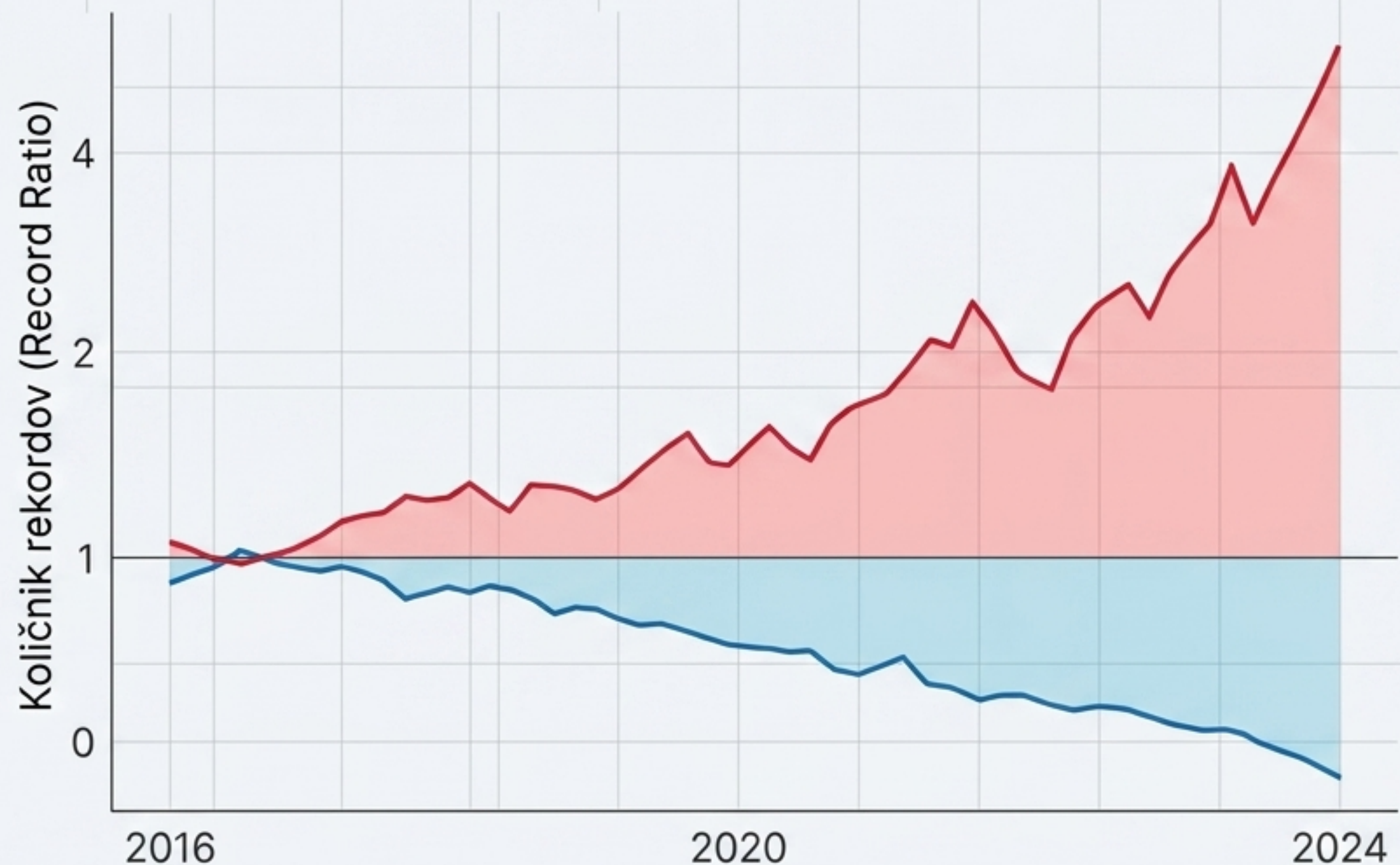
Kvantifikacija odklona: Količnik rekordov (Record Ratio)



$$\frac{\text{Opažena pogostost rekordov}}{\text{Teoretično pričakovana pogostost v stacionarnem podnebjju}} = \text{Količnik rekordov}$$

Vrednost 1.0 pomeni popolno stacionarnost. Vrednosti nad 1.0 dokazujejo vsiljen zunanji vpliv (non-stationarity).

Opažena asimetrija temperatur (2016–2024)



Vročina: 4.1x povečanje

Globalni dnevni vročinski rekordi so več kot štirikrat pogostejši od stacionarnih pričakovanj.

Mraz: 0.5x upad

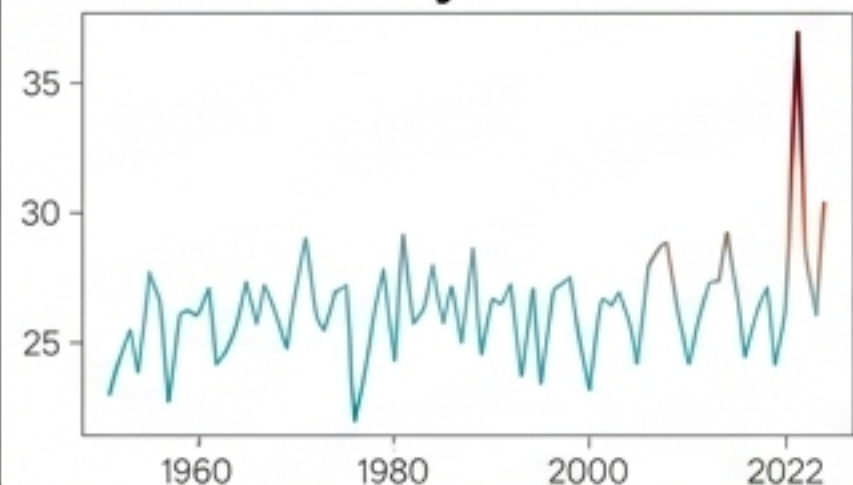
Verjetnost novih hladnih rekordov je zmanjšana za več kot polovico.

Analiza podatkovnih nizov ERA5 in BEST potrjuje drastičen premik Gaussove krivulje v desno.

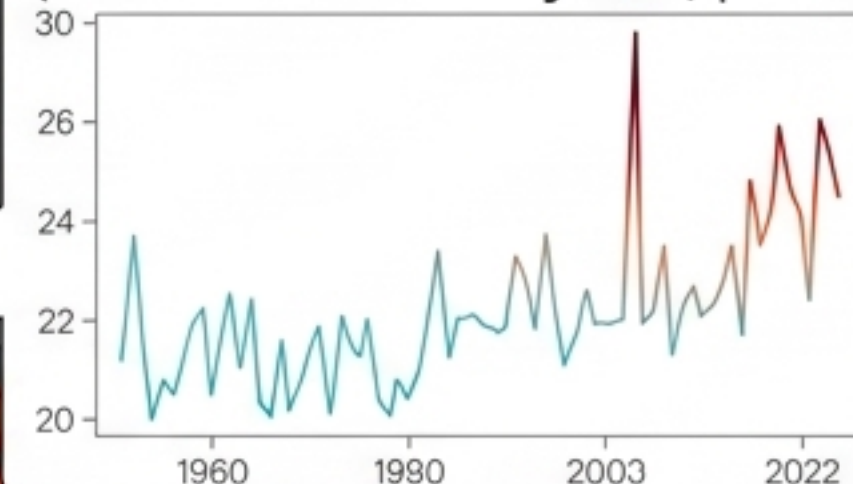
Prostorska porazdelitev uničujočih temperaturnih marž

Med letoma 2010 in 2024 je 62 % kopnega doživelo nove dnevne vročinske rekorde. Mnogi so presegli prejšnje maksimume za več standardnih deviacij.

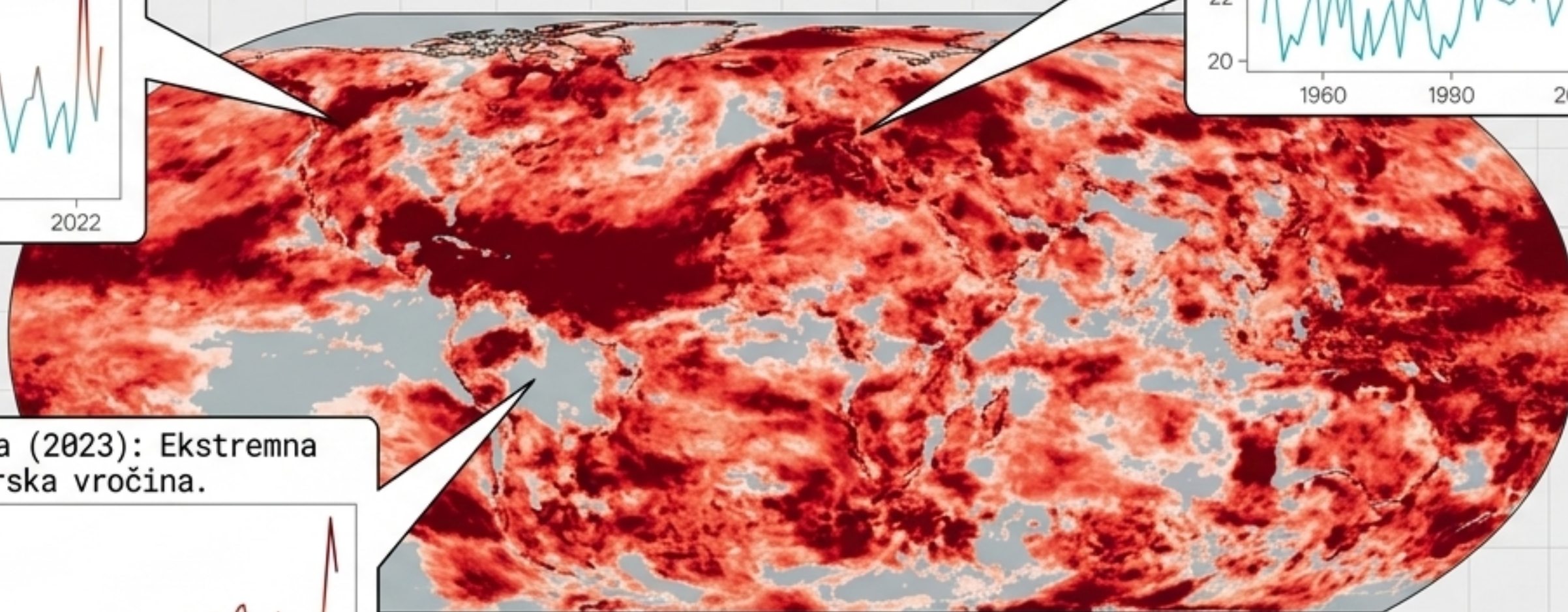
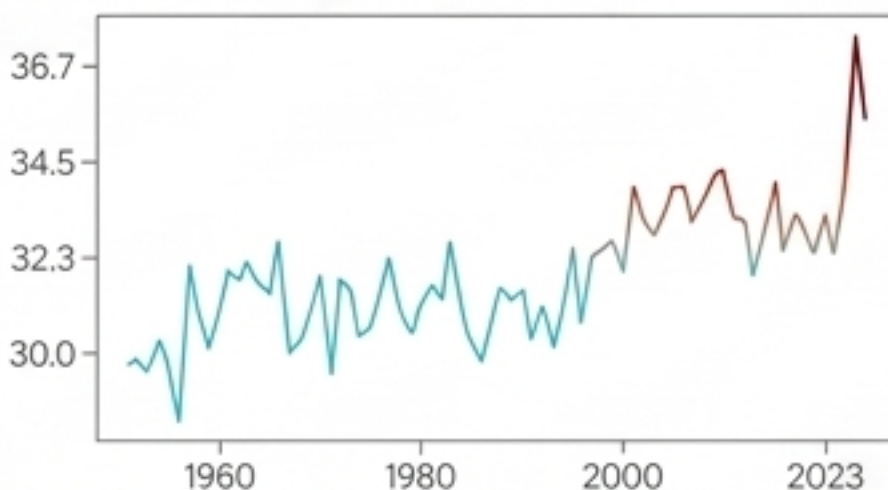
Pacific Northwest (2021):
5-dnevna anomalija.



Evropa (2003): 91-dnevna anomalija
(kaskadni učinki: umrljivost, požari).

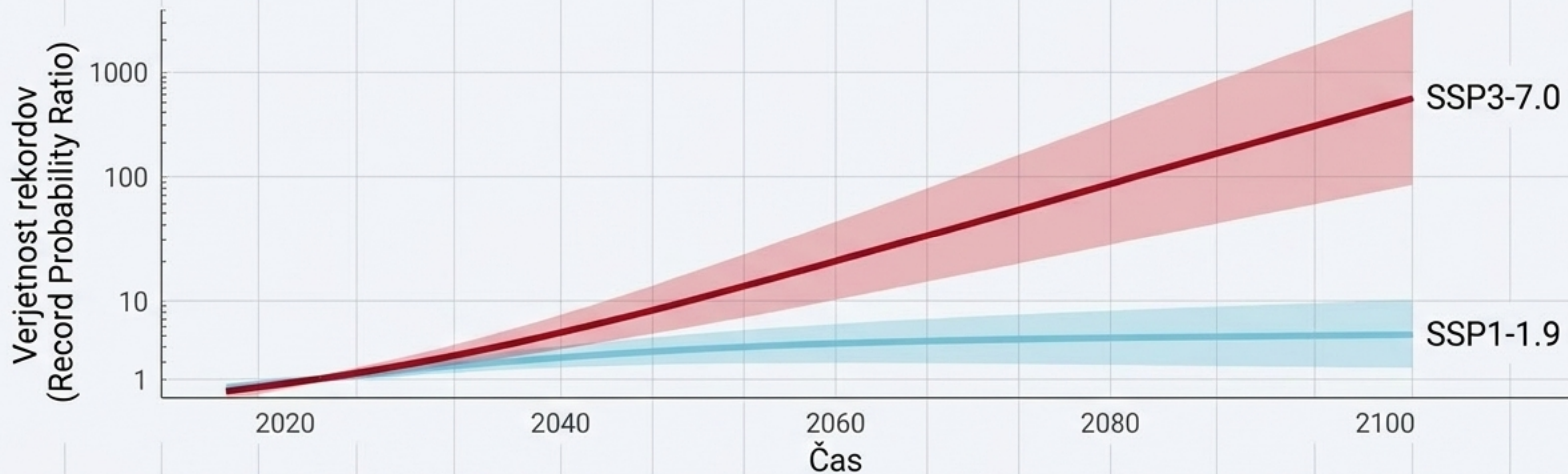


Južna Amerika (2023): Ekstremna
atlantska morska vročina.



Prihodnje trajektorije rekordov in vloga blažitve

Verjetnost rekorda je odvisna od hitrosti segrevanja. Upočasnitev trenda povzročnega segrevanja močno zmanjša količnik rekordov.



SSP3-7.0 (Visoke emisije):

Projekcija 15.7x višjega števila rekordov do konca stoletja.

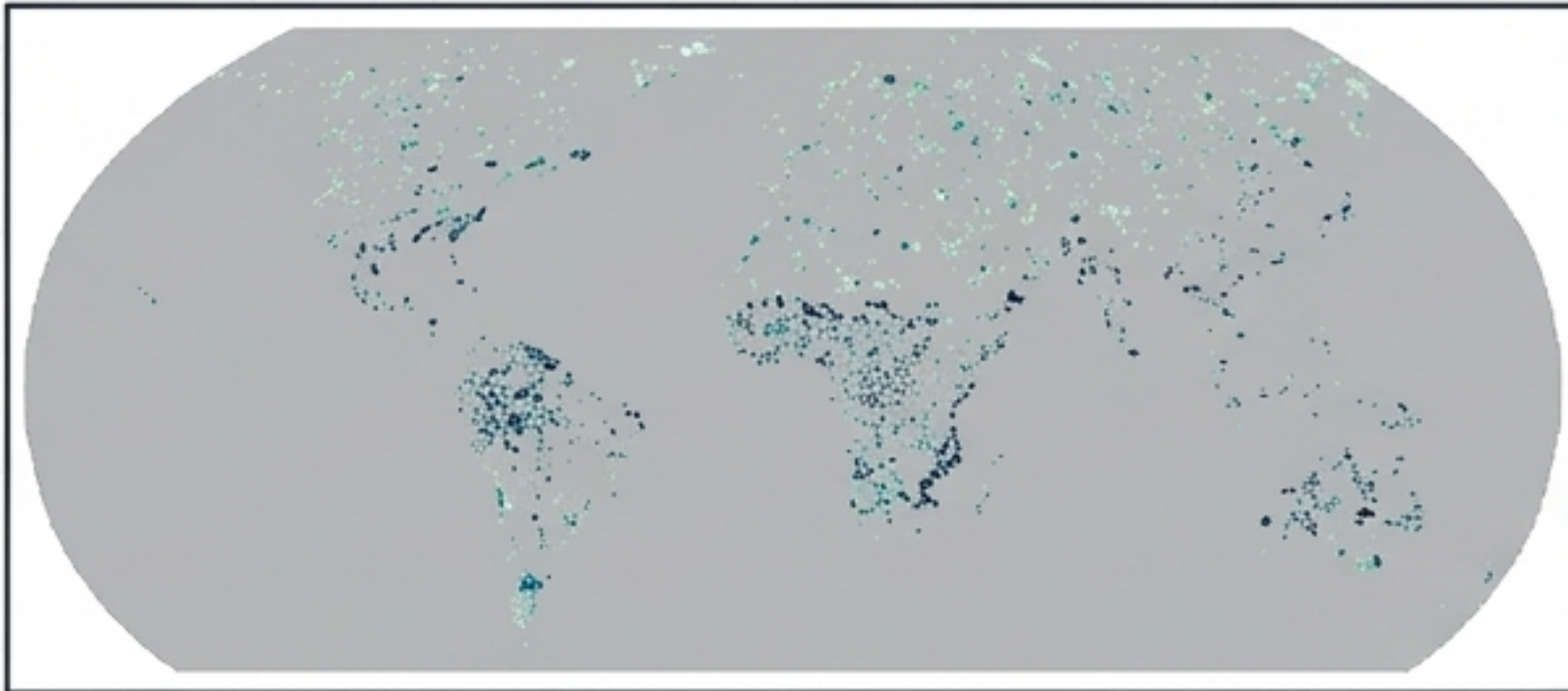
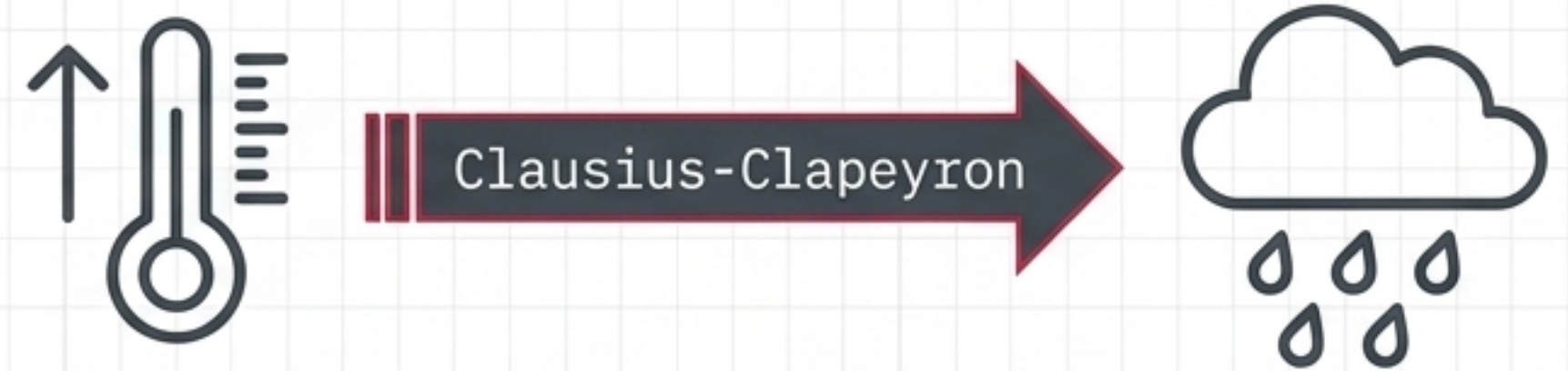
SSP1-1.9 (Nizke emisije):

Stabilizacija na 1.8x.

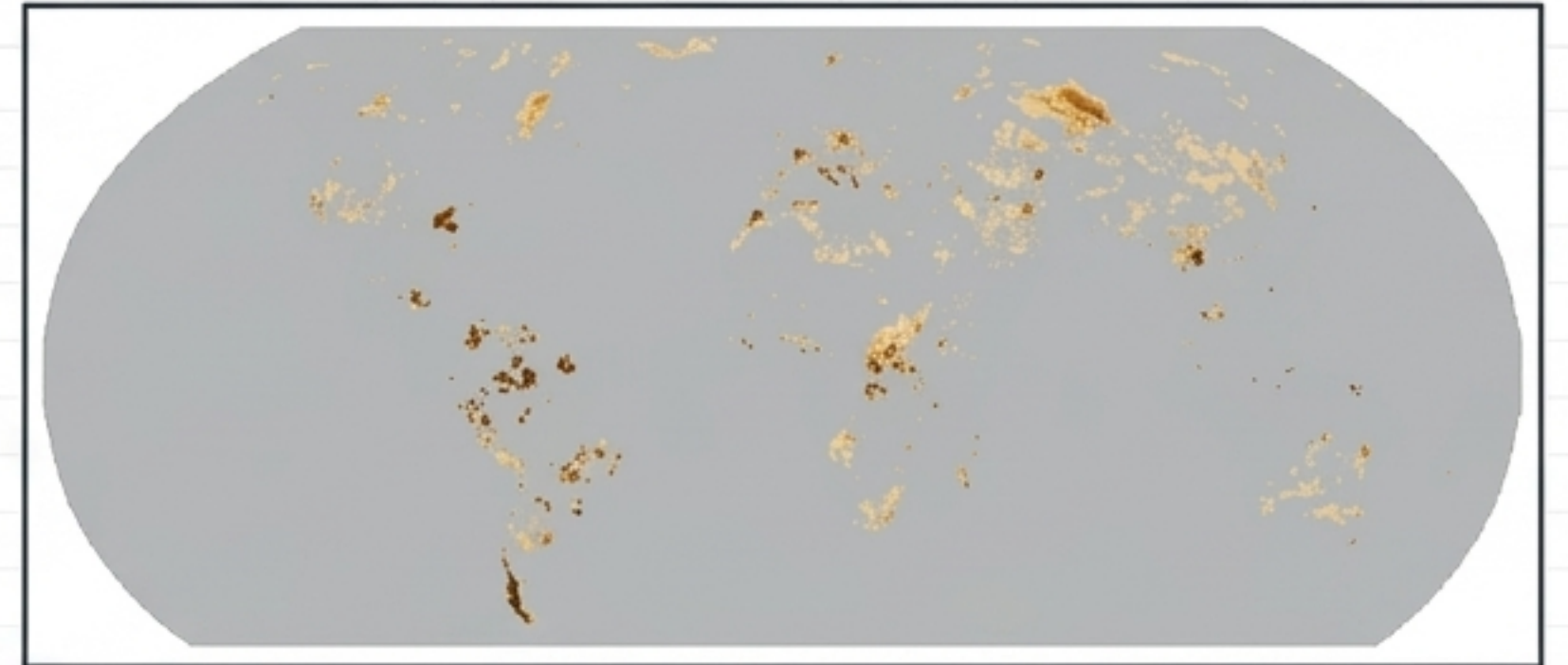
Insight: Novi hladni rekordi bodo do leta 2050 praktično izginili pri vseh scenarijih.

Termodinamika in ekstremi vodnega kroga

Povečana kapaciteta atmosfere za zadrževanje vlage (Clausius-Clapeyronov zakon) neposredno širi rep porazdelitve padavin ($\xi > 0$).



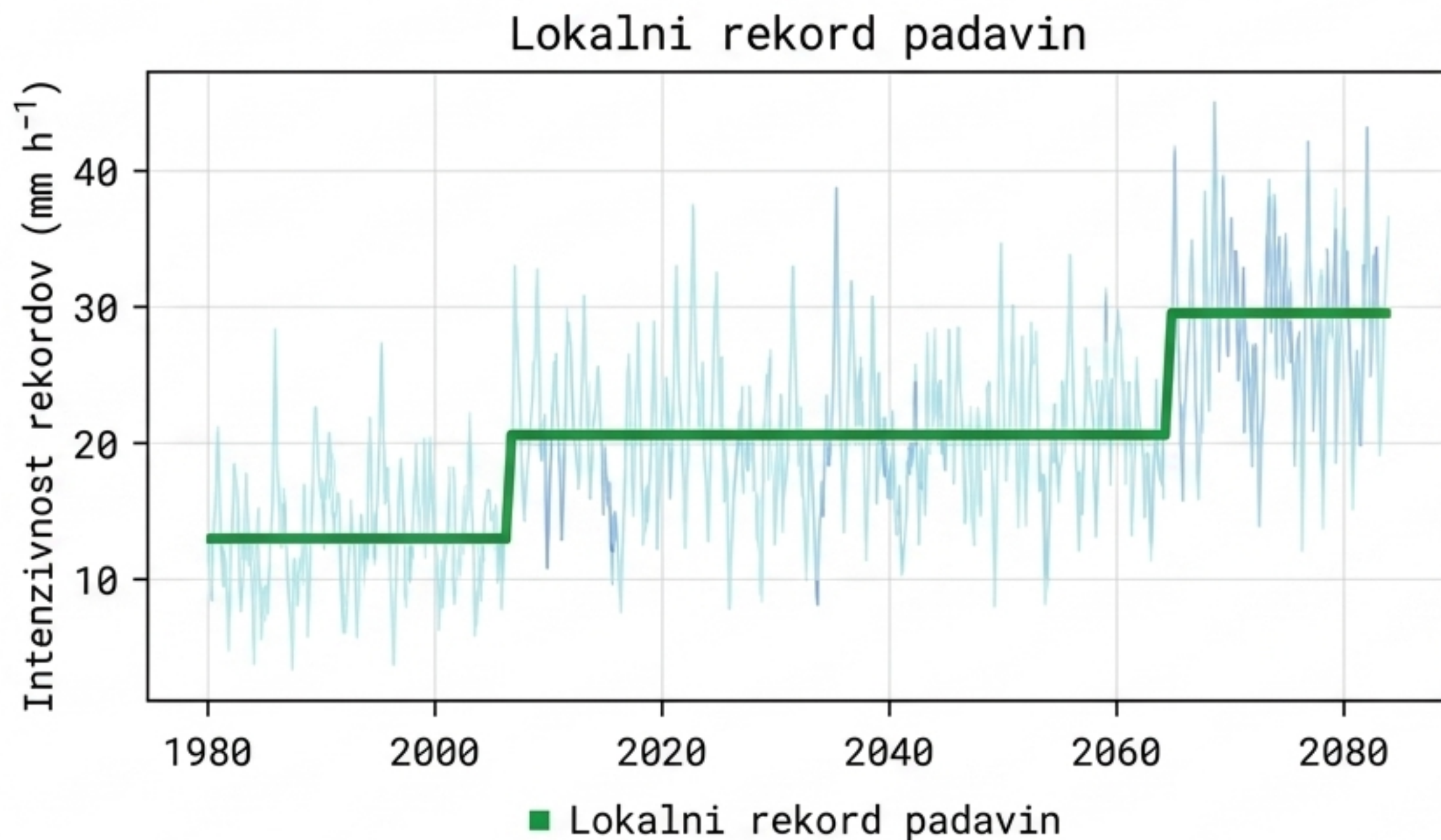
- +40 % (Količnik rekordov 1.45 za 1-dnevne ekstremne padavine med 2016-2024).



- Ostrejši ekstremi pogosto zajamejo manjša prostorska območja kot vročinski valovi.

Signal v šumu: Lokalna variabilnost padavin

Na lokalni ravni ekstremne padavine kažejo zelo veliko ne-vsiljeno notranjo variabilnost. To zakriva dolgoročne trende.



Stopničasta funkcija rekordov

Namesto gladkega povečevanja se rekordi obnašajo stopničasto. Obdobju intenzivnega rušenja rekordov lahko sledijo desetletja 'tišine', kar ustvarja lažen občutek varnosti v inženirskem načrtovanju.

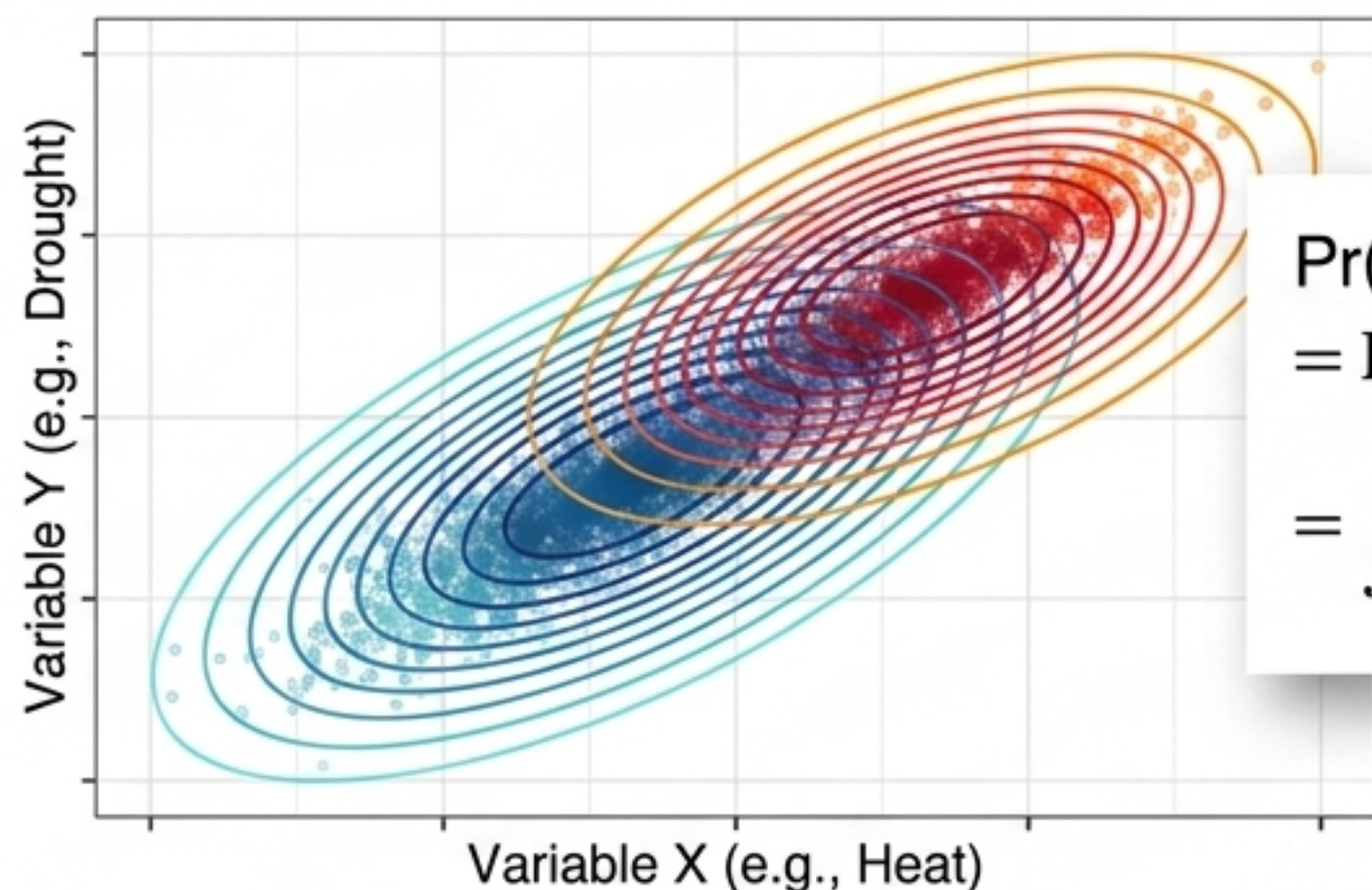
Kompleksnost merjenja sušnih rekordov

Suše je statistično najtežje uvrstiti med rekorde zaradi zapletenih interakcij in dolgotrajnih časovnih lestvic. Količnik rekordov trenutno znaša 1.12.

Spremenljivka	Časovni zamik	Omejitve
P-E deficit (Padavine minus evaporacija).	Ekološke in hidrološke suše se akumulirajo počasi in nelinearno.	Vpliv aerosolov in naravna nizkofrekvenčna variabilnost zamegljujeta signal antropogenega vpliva.

Sestavljeni rekordi: Multivariatna odvisnost

Največja škoda nastane ob sočasnem zrušenju več rekordov (npr. vročina in suša). Uporabljamo bivariatne GEV modele.



Pr(compound record-shattering event)

$$= \Pr\{X_n > \max(X_1, \dots, X_{n-1}) + c_x \text{ and } Y_n > \max(Y_1, \dots, Y_{n-1}) + c_y\}$$

$$= \int \int \left\{ \prod_{t=1}^{n-1} F_t(x - c_x, y - c_y) \right\} f_n(x, y) dx dy,$$

Odvisnostna struktura

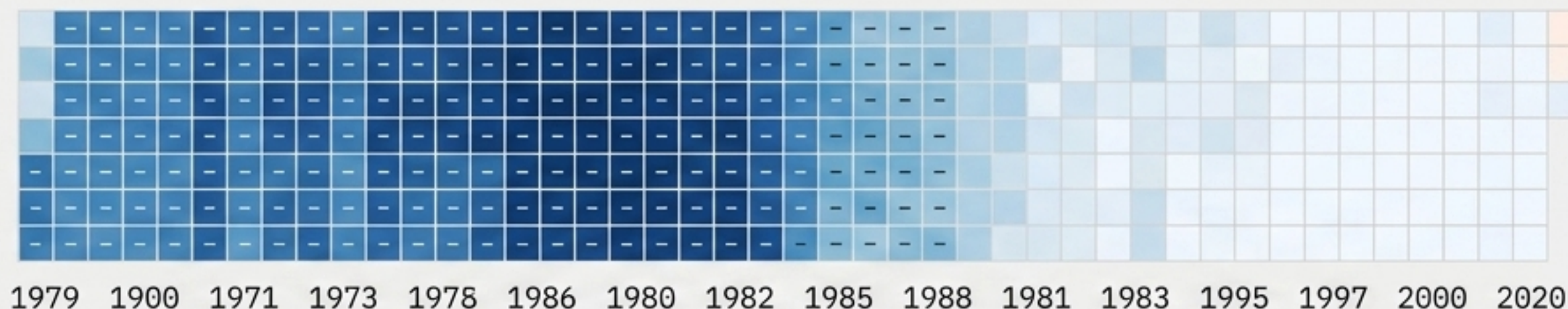
Bivariatna funkcija z logistično odvisnostno strukturo ekstremnih vrednosti.

Ključna spremenljivka: $\alpha \in (0, 1]$

Parameter odvisnosti, ki interpolira med popolno odvisnostjo ($\alpha \rightarrow 0$) in neodvisnostjo ($\alpha = 1$). Višja odvisnost eksponentno poveča verjetnost sestavljenih rekordov.

Kaskadni učinki: Kriosfera in oceani

Led in oceani zaradi svoje vztrajnosti integrirajo "signale" in izkazujejo visoko razmerje signal/šum.



93 mesečnih
rekordnih
minimumov
obsega
arktičnega
morskega ledu
(1979–2020).

Nič rekordnih maksimumov od leta 1986.

Gledano sistemsko, izguba mase celinskega ledu in naraščajoča toplotna vsebnost oceanov (OHC) premikata izhodiščno črto za prihodnje obalne poplave.

Inženirski izziv: Vrzel verjetnosti (Plausibility Gap)

Tradicionalno inženirsko načrtovanje infrastrukture temelji na zgodovinskih opazovanjih. Ker se nahajamo v območju ne-stacionarnosti, opazovanja niso več zadostna osnova za **obremenitvene teste** (stress tests).



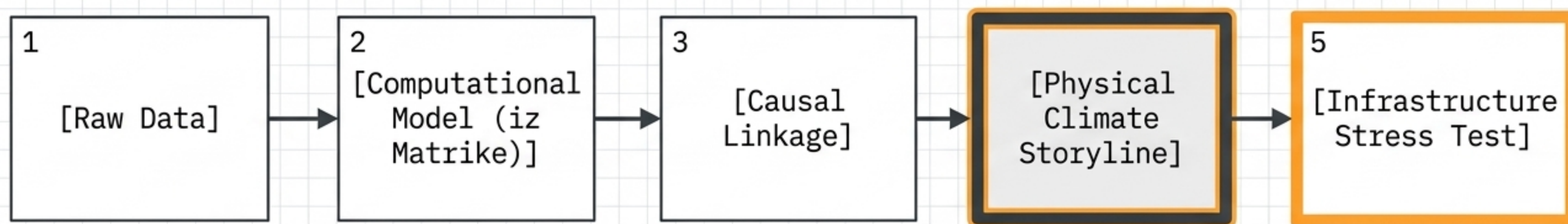
Core Problem: Kako načrtovati zaščito za dogodke, ki se fizično še nikoli niso zgodili?

Primerjalna matrika: Računsko modeliranje nepredvidenega

Empirično pomembno vzorčenje (Empirical Importance Sampling)	Inicializirane pretekle napovedi (Initialized Hindcasts)	Algoritmi redkih dogodkov (Rare Event Algorithms)	Ansamblsko krepitev (Ensemble Boosting)
Uporablja vremenske generatorje in analogije atmosferskega toka.	Iskanje ekstremov v velikih ansamblih predikcijskih sistemov, ki se niso realizirali v resničnosti.	Perturbacija podnebnih modelov z osredotočanjem na najbolj ekstremne trajektorije.	Ponovna inicializacija ekstremnih dogodkov z naključnimi motnjami za vzorčenje 'repov' porazdelitve.

Priprava na najhujše: Fizične podnebne zgodbe

Modele združujemo v “Fizične podnebne zgodbe” (Physical Climate Storylines). Te omogočajo raziskovanje vzročnih verig, ki vodijo do dogodkov z majhno verjetnostjo, a velikim vplivom.

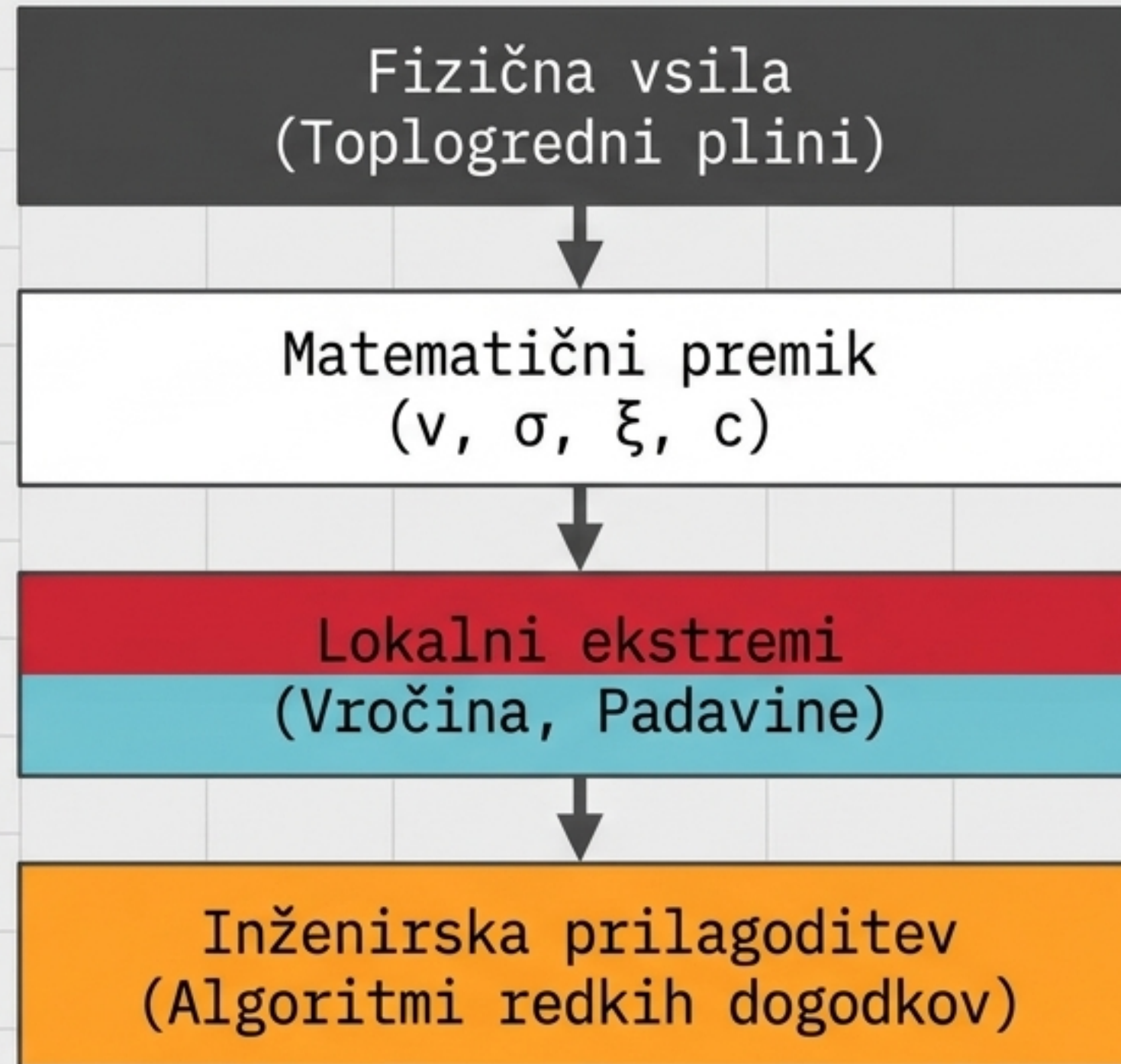


Actionable outcome

Omogoča inženirjem in načrtovalcem, da preizkusijo odpornost protipoplavnih ukrepov, energetske omrežij in zdravstvene infrastrukture na fizikalno možne, a še nikoli videne uničujoče ekstreme.

Sinteza: Arhitektura tveganja in prilagajanja

Ekstremi **niso** anomalije; so **matematično matematično predvidljiv rezultat premikajoče se Gaussove in GEV porazdelitve v nestacionarnem sistemu.**



Medtem ko bo **blažitev** zmanjšala zmanjšala hitrost premika (in s tem število novih rekordov), se mora infrastruktura **takoj** zanašati na **napredno računsko modeliranje zunaj zgodovinskih referenc.**

Obvladovanje tveganja v 21. stoletju je inženiring zunaj meja opazovanega.