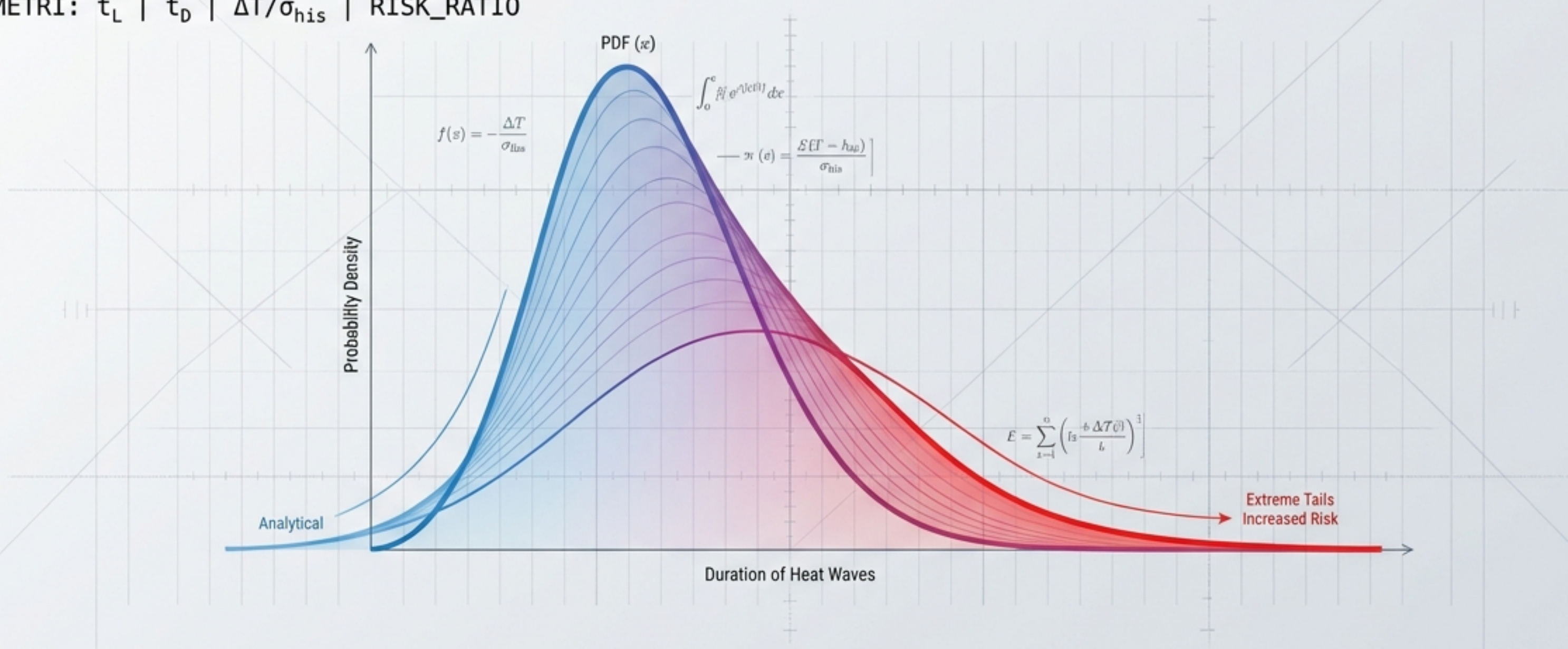


# Nelinearno pospeševanje trajanja vročinskih valov

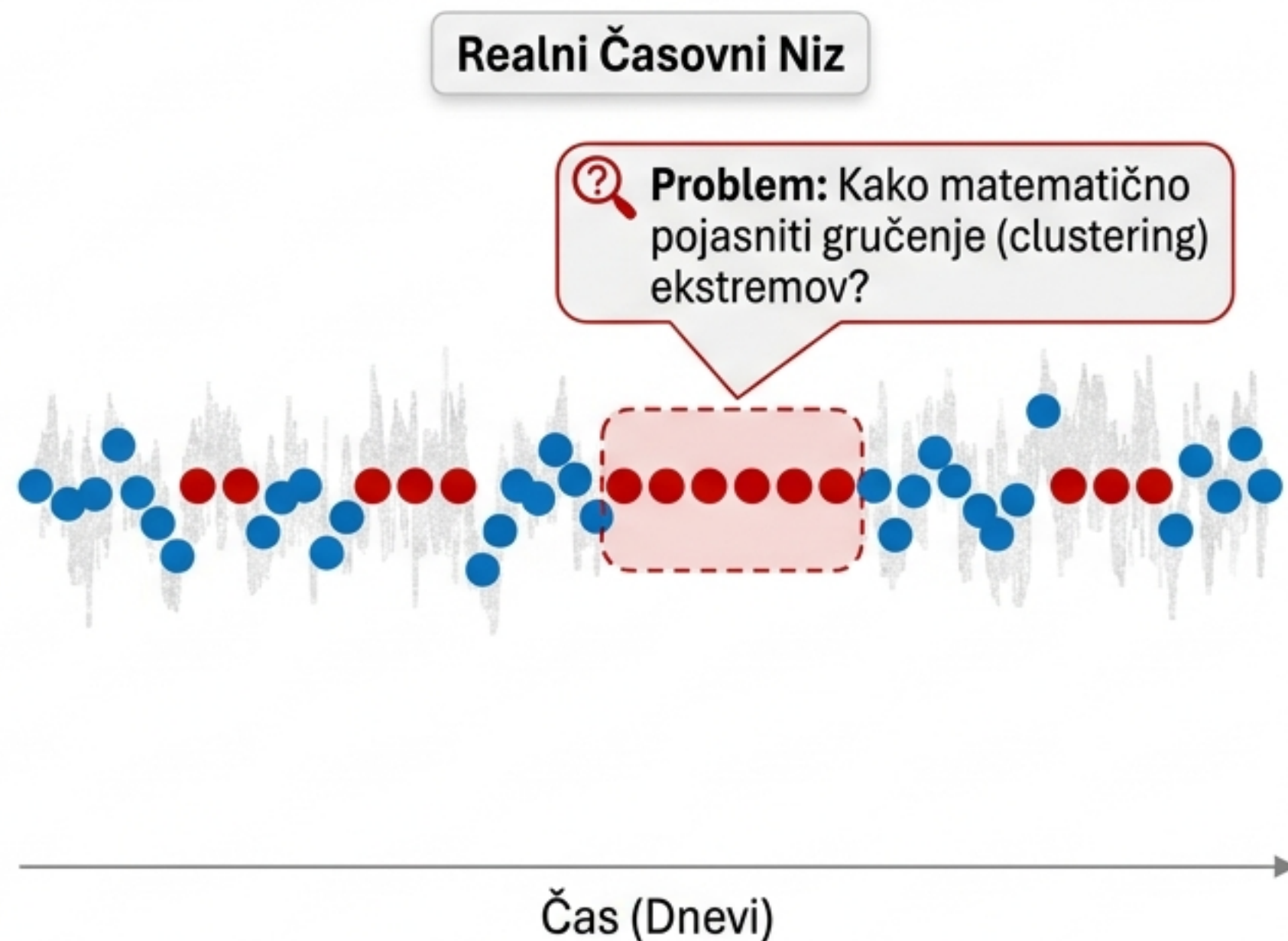
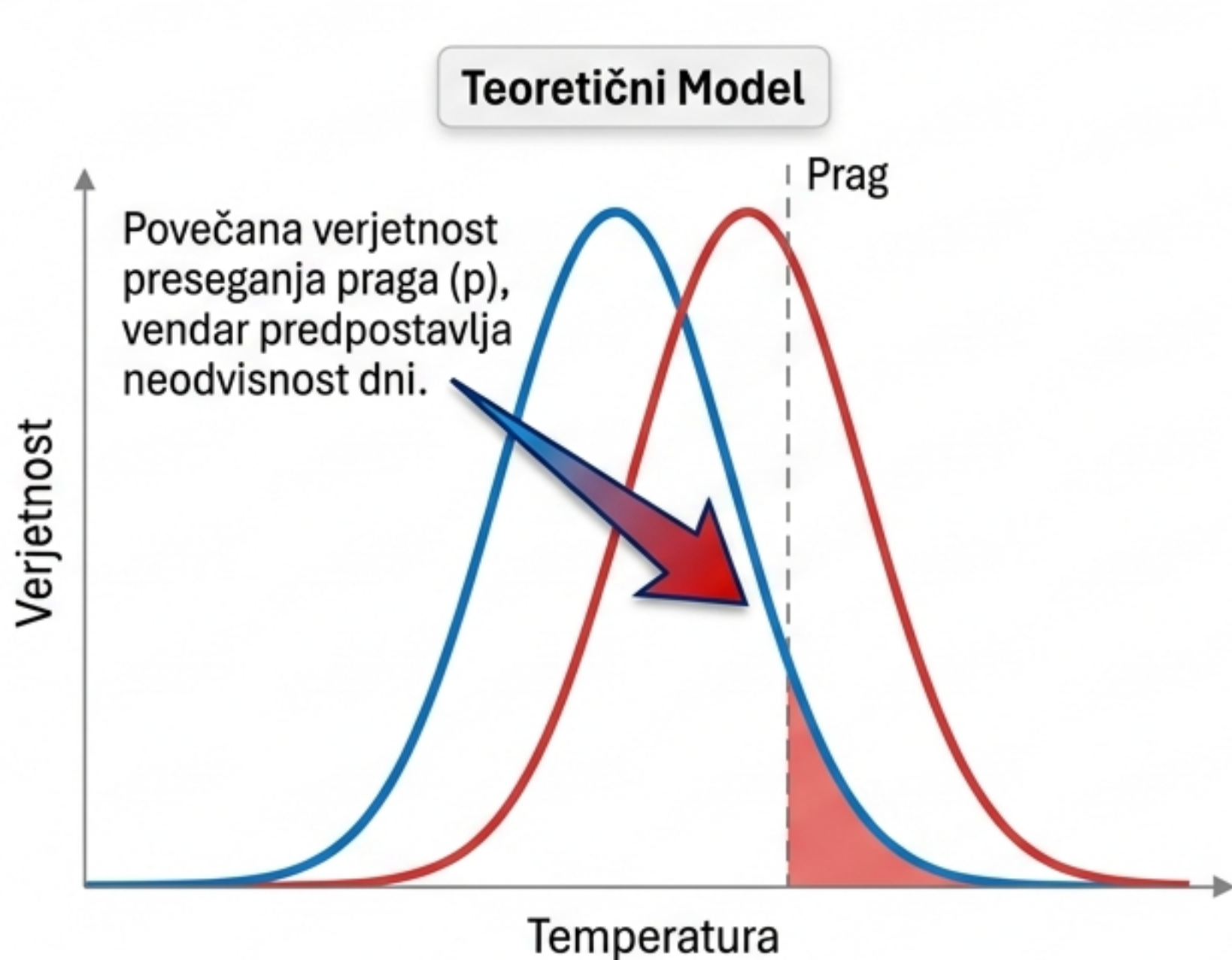
Analiza sistemskega spomina in ekstremnih repov verjetnostnih porazdelitev na podlagi CMIP6 in ERA5 modelov.

PARAMETRI:  $t_L$  |  $t_D$  |  $\Delta T / \sigma_{his}$  | RISK\_RATIO



# Omejitve klasičnega modela neodvisnih dogodkov

Model brez spomina (no-memory) napove več vročih dni, vendar **ne** pojasni ekstremnih dolžin neprekinjenih vročinskih valov.



# Toplotna inercija: Uvedba systemskega spomina ( $t_D$ )

Temperature niso neodvisni Bernoullijevi poskusi.  
Anomalija danes močno vpliva na verjetnost anomalije jutri.

## Bernoullijev proces (Brez spomina)



$$P(T_{\text{dan } 2} > \text{prag} \mid T_{\text{dan } 1} > \text{prag}) = P(T_{\text{dan } 2} > \text{prag})$$



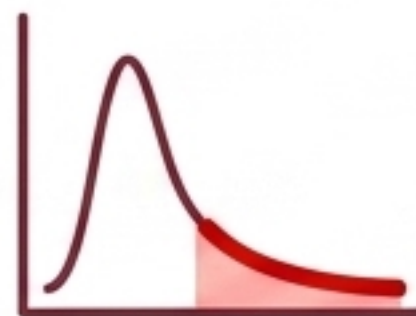
Zelo strm (eksponencialen) padec verjetnosti za dolge valove.

## Avtokoreliran proces (S spominom)



$t_D$  (časovna skala avtokorelacije)

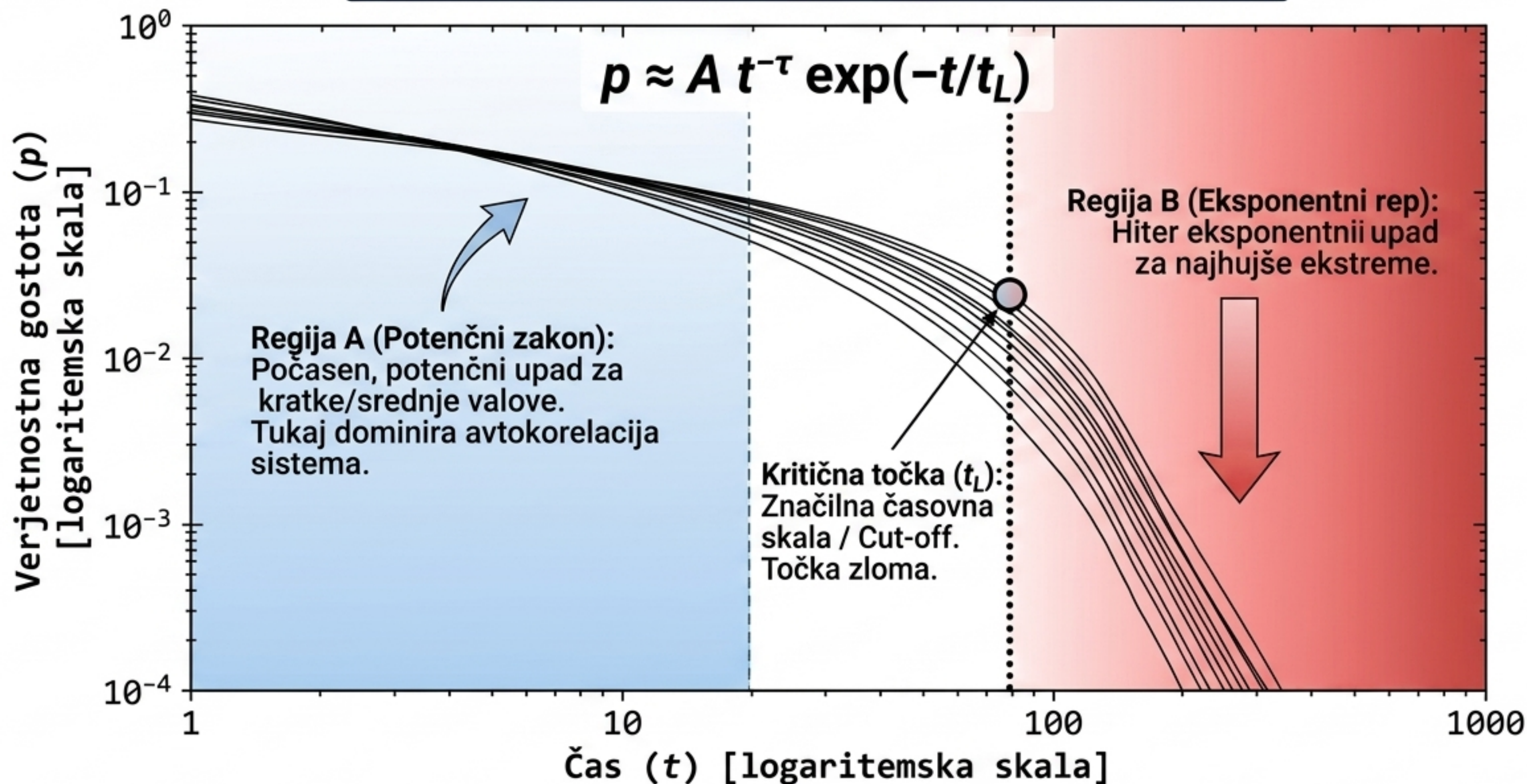
$$P(T_{\text{dan } 2} > \text{prag} \mid T_{\text{dan } 1} > \text{prag}) \gg P(T_{\text{dan } 2} > \text{prag})$$



Systemska vztrajnost kreira dolgotrajne ekstreme (debel rep).

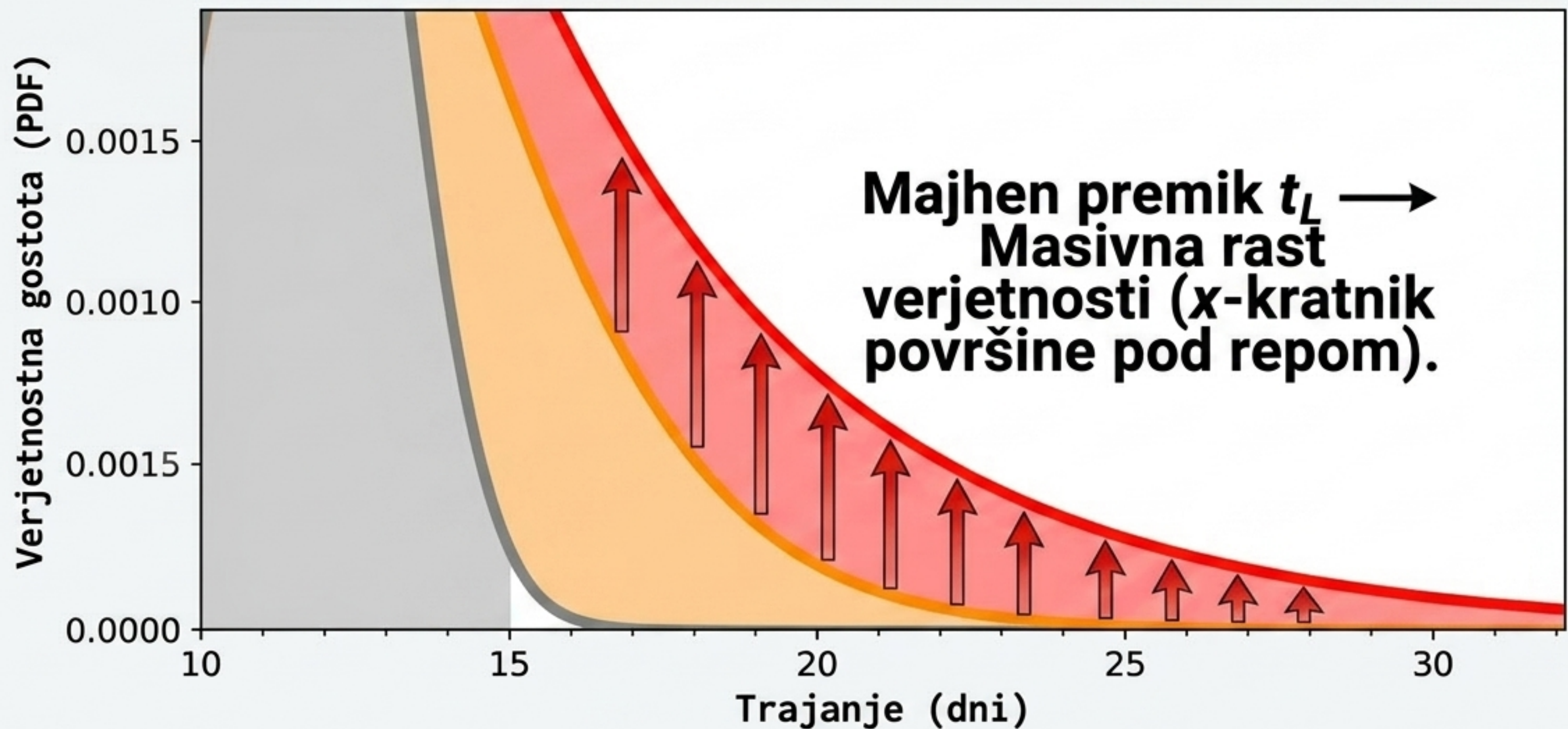
# Matematična anatomija trajanja vročinskega vala

Verjetnostna gostota (PDF) trajanja ne upada linearno. Razdeljena je na območje potenčnega zakona in območje eksponentnega reza.



# Dinamika skale $t_L$ : Glavni kontrolni mehanizem

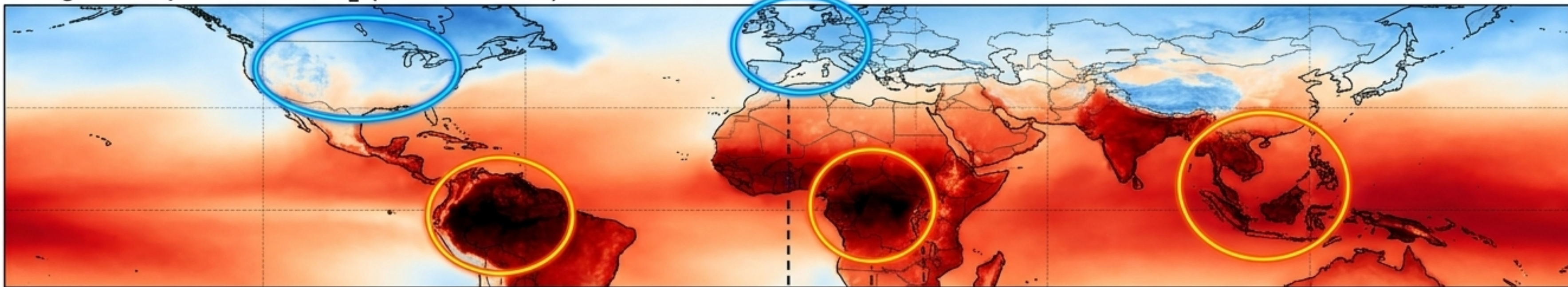
$t_L$  dominira obnašanje visokih percentilov (npr.  $t_{99}$ ).  
Celo minimalno povečanje  $t_L$  drastično razširi površino pod repom krivulje.



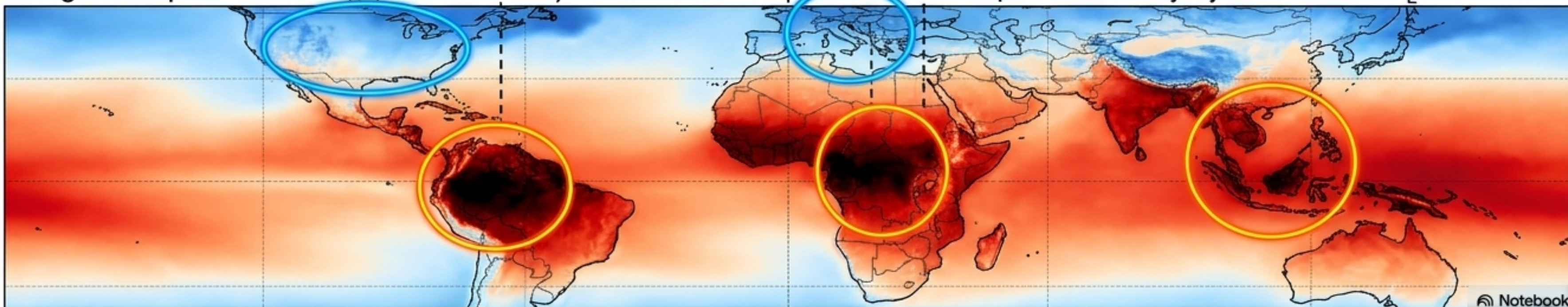
# Prostorska potrditev: Zemljevid termodinamičnega spomina

Podatki opazovanj (ERA5 1990-2014) in klimatski modeli (CMIP6 MME) kažejo močno geografsko korelacijo med naravnim spominom okolja ( $t_D$ ) in dolžino ekstremov ( $t_L$ ).

Geografska porazdelitev  $t_L$  (MME / ERA5)




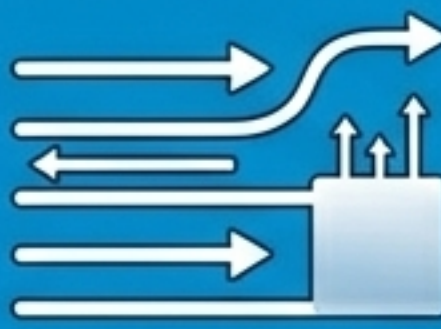


Geografska porazdelitev  $t_D$  (MME / ERA5)



**Fizikalna realnost:** Območja z visokim  $t_D$  (naravna avtokorelacija >5 dni) so neposredno povezana z najvišjimi vrednostmi  $t_L$ .

# Diagnostična matrika podnebnih sistemov

Primerjava fizikalnih karakteristik zmernih geografskih širin in ekvatorialnega pasu.

	Zmerne širine (Evropa, ZDA)	Tropski pas (Amazonija, Afrika)
Dinamika	 <p><b>Hitra de-korelacija.</b> Vreme se hitro spreminja zaradi potujočih ciklonov.</p>	 <p><b>Visoka avtokorelacija.</b> Stabilni zračni masivi, toplotna inercija.</p>
Naravna variabilnost $\sigma$	 <p><b>VISOKA</b> (Široka Gaussova krivulja).</p>	 <p><b>NIZKA</b> (Ozka, ostra Gaussova krivulja).</p>
Karakterističen $t_L$	1 do 2 dni.	3 do >5 dni.



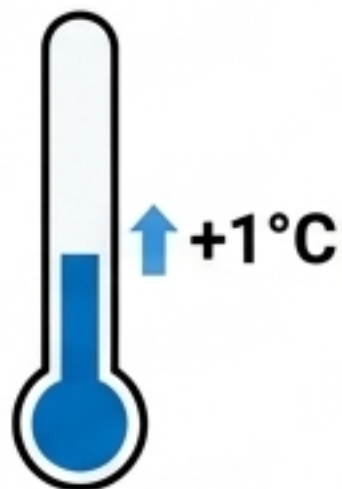
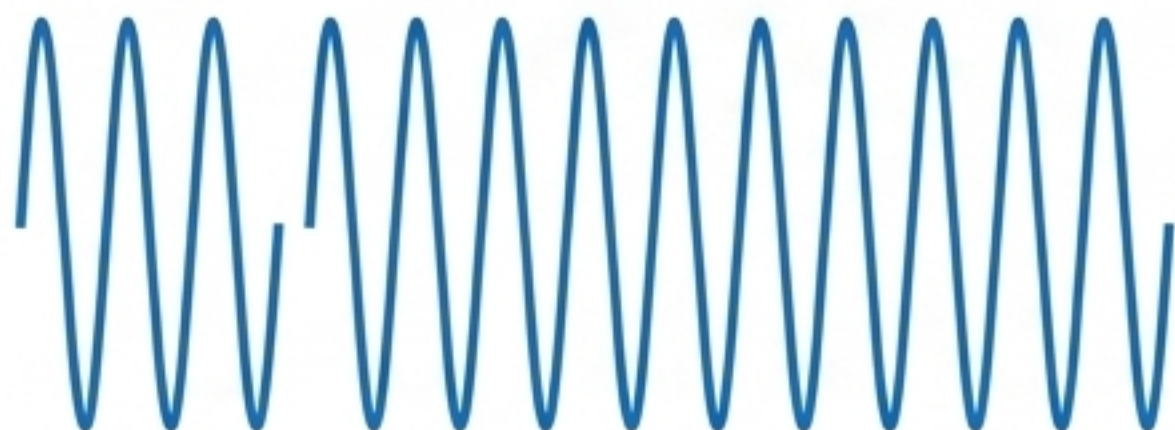
**Zaključek:** Zaradi izjemno majhne naravne variabilnosti ( $\sigma$ ) in visokega notranjega spomina, so tropi sistemsko najbolj občutljivi na anomalije.

# Normalizacija: Edini pravi pokazatelj šoka

Absolutni dvig temperature za 1°C nima enakega vpliva povsod. Vpliv moramo meriti relativno glede na **lokalno zgodovinsko standardno deviacijo** ( $\sigma_{his}$ ).

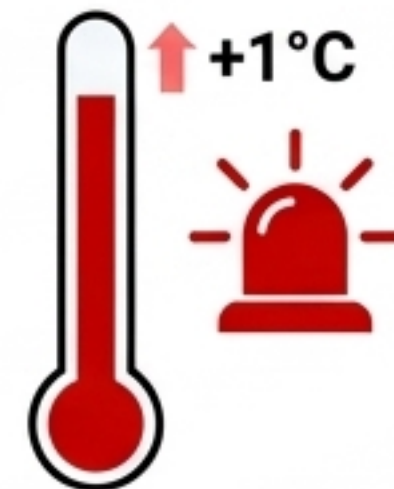
$$\Delta T / \sigma_{his}$$

Zmerne širine ( $\sigma_{his} = 4^\circ\text{C}$ )



Dvig za 1°C predstavlja blag sistemski šok ( $0.25\sigma$ ).

Tropi ( $\sigma_{his} = 0.5^\circ\text{C}$ )

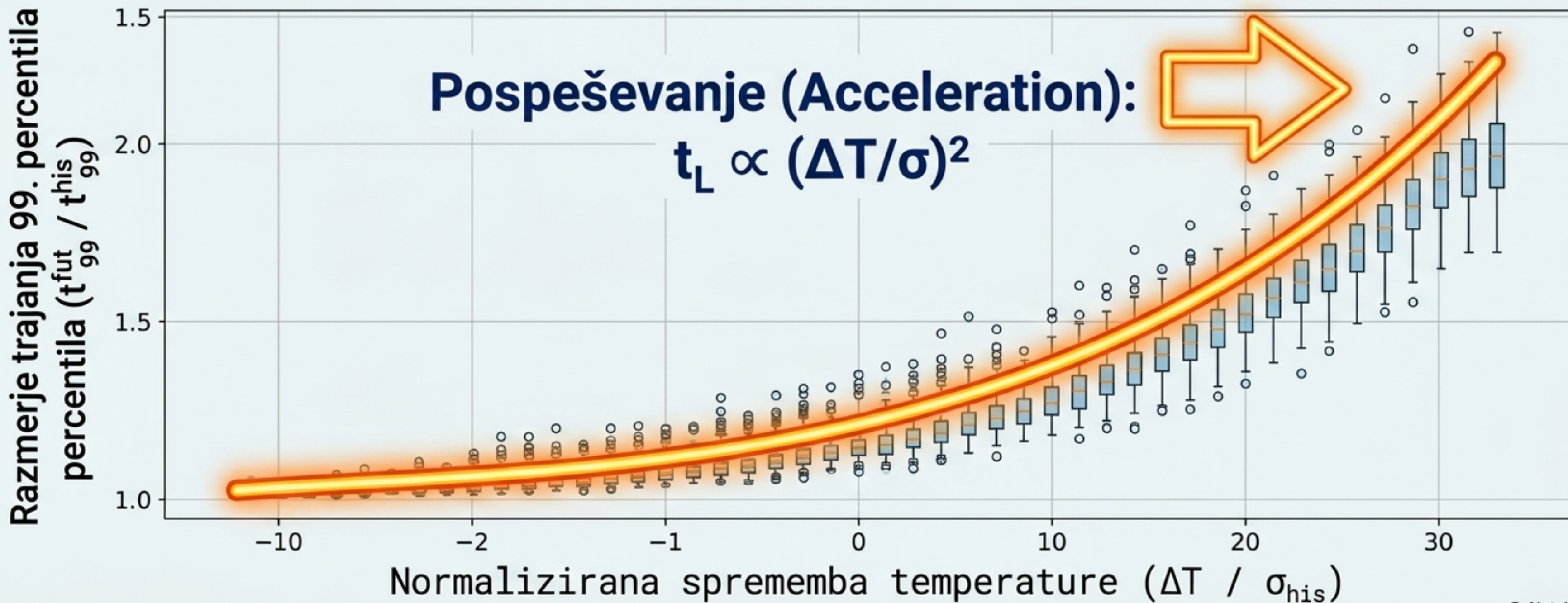


Dvig za 1°C predstavlja **masiven, neprepoznan šok** ( $2.0\sigma$ ).

Normalizacija ( $\Delta T / \sigma_{his}$ ) omogoča univerzalno kolapsiranje podatkov iz vseh regij na enotno matematično krivuljo.

# Jedro študije: Kvadratno pospeševanje $t_L$

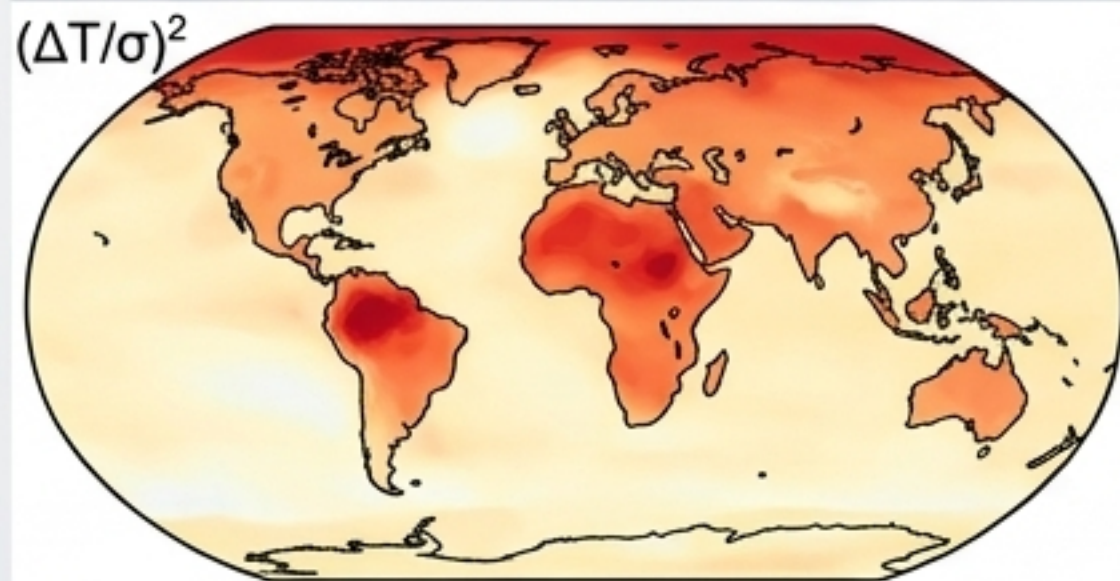
Časovna skala trajanja ekstremov ( $t_{99}$ ) ne raste linearno s segrevanjem. Vsak dodaten prirastek temperature povzroči **večji skok** kot prejšnji.



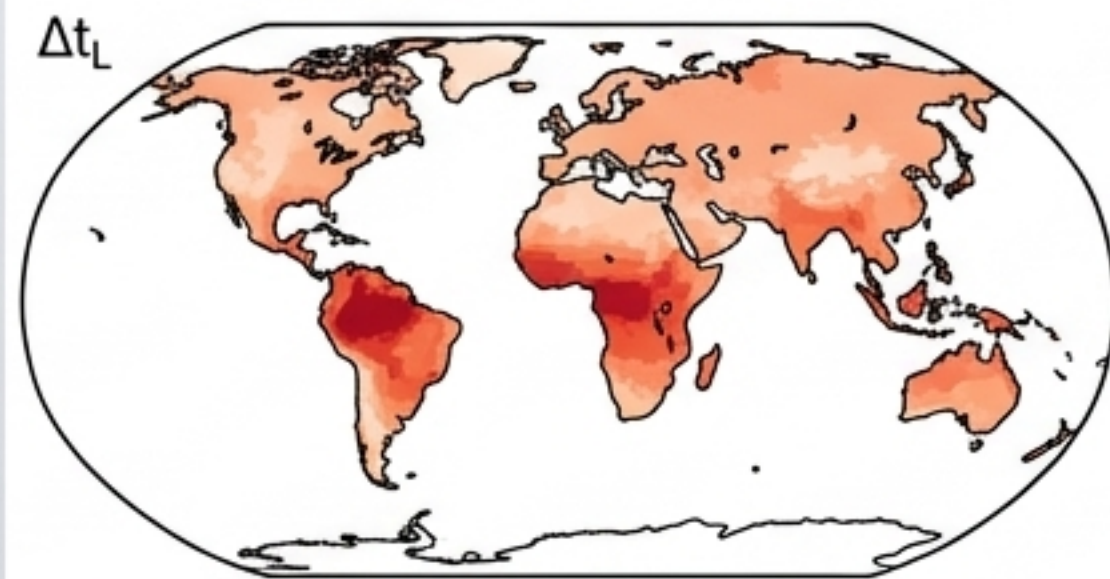
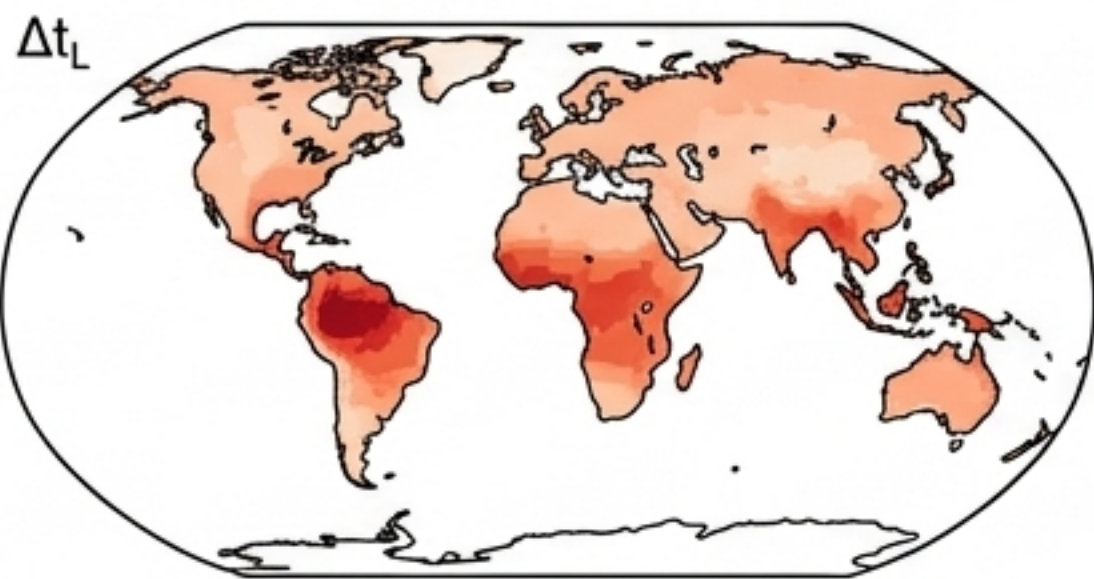
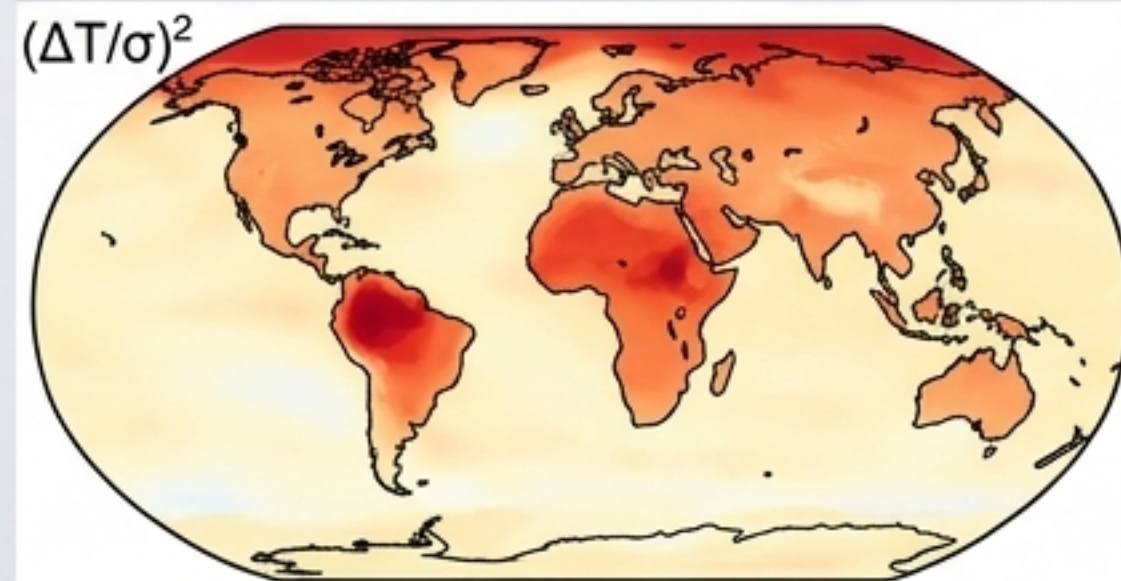
# Diagnostika modelov: ERA5 opazovanja potrjujejo CMIP6

Spremembe, posnete v realnem svetu v zadnjih 40 letih, kažejo popolnoma enake prostorske vzorce nelinearnega pospeševanja kot projekcije klimatskih modelov.

Napoved modelov MME  
(2020-2044 vs 1990-2014)



Opazovana realnost ERA5  
(2002-2021 vs 1982-2001)

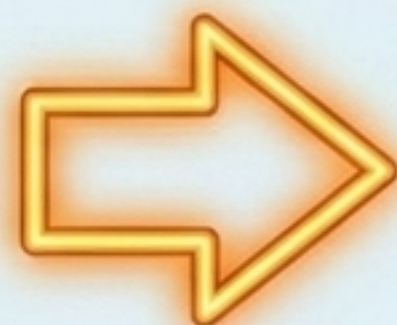


Zelo visoka korelacija vzorcev nad Amazonijo in Afriko. Modeli opisujejo že izmerjeno fiziko.

# Posledica: Eksponentna eksplozija tveganja

Matematično dejstvo: Ko se kvadratno rastoč parameter ( $t_L$ ) vstavi v verjetnostno funkcijo z eksponentnim repom, tveganje zraste eksponentno (*Compound non-linearity*).

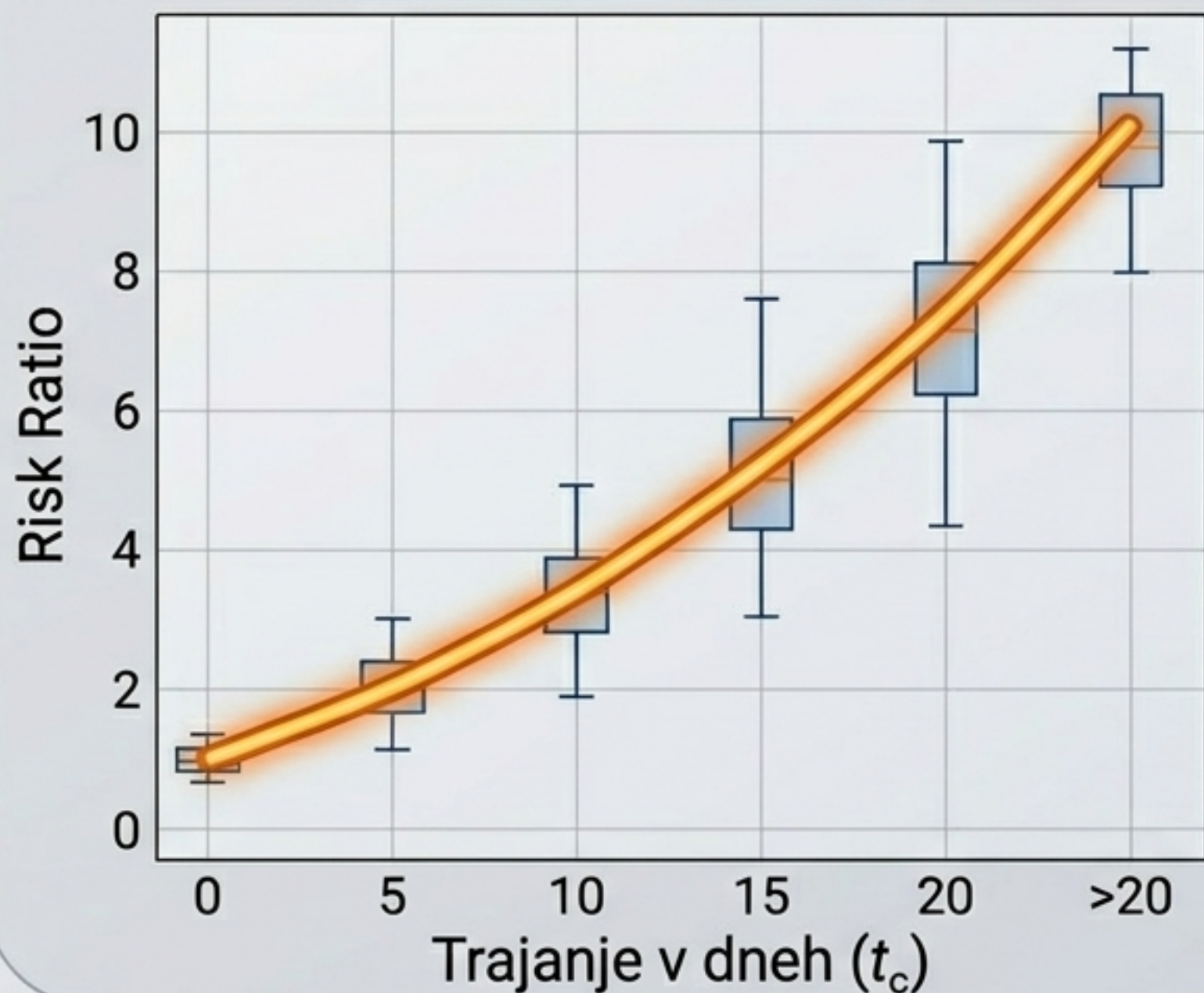
$$\text{Risk Ratio} = \frac{\text{Število valov } > t_c \text{ (Prihodnost)}}{\text{Število valov } > t_c \text{ (Zgodovina)}}$$



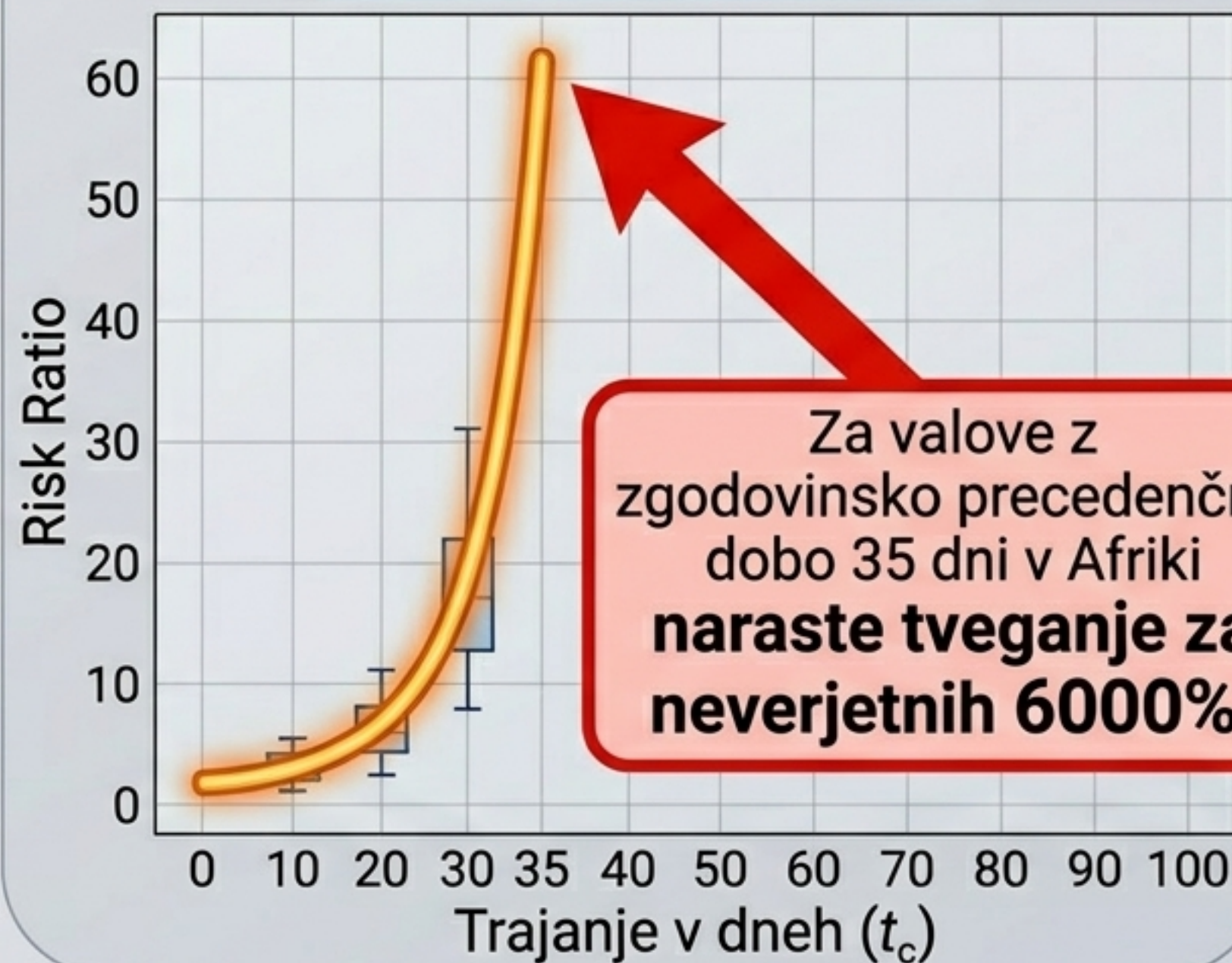
# Projekcije ekstremov (CMIP6, 2020–2044)

*Risk Ratio* za najdaljše vročinske valove presega vrednosti **x10**,  
v določenih primerih pa dosega celo neverjetnih **x60**.

## Amazonija



## Ekvatorialna Afrika

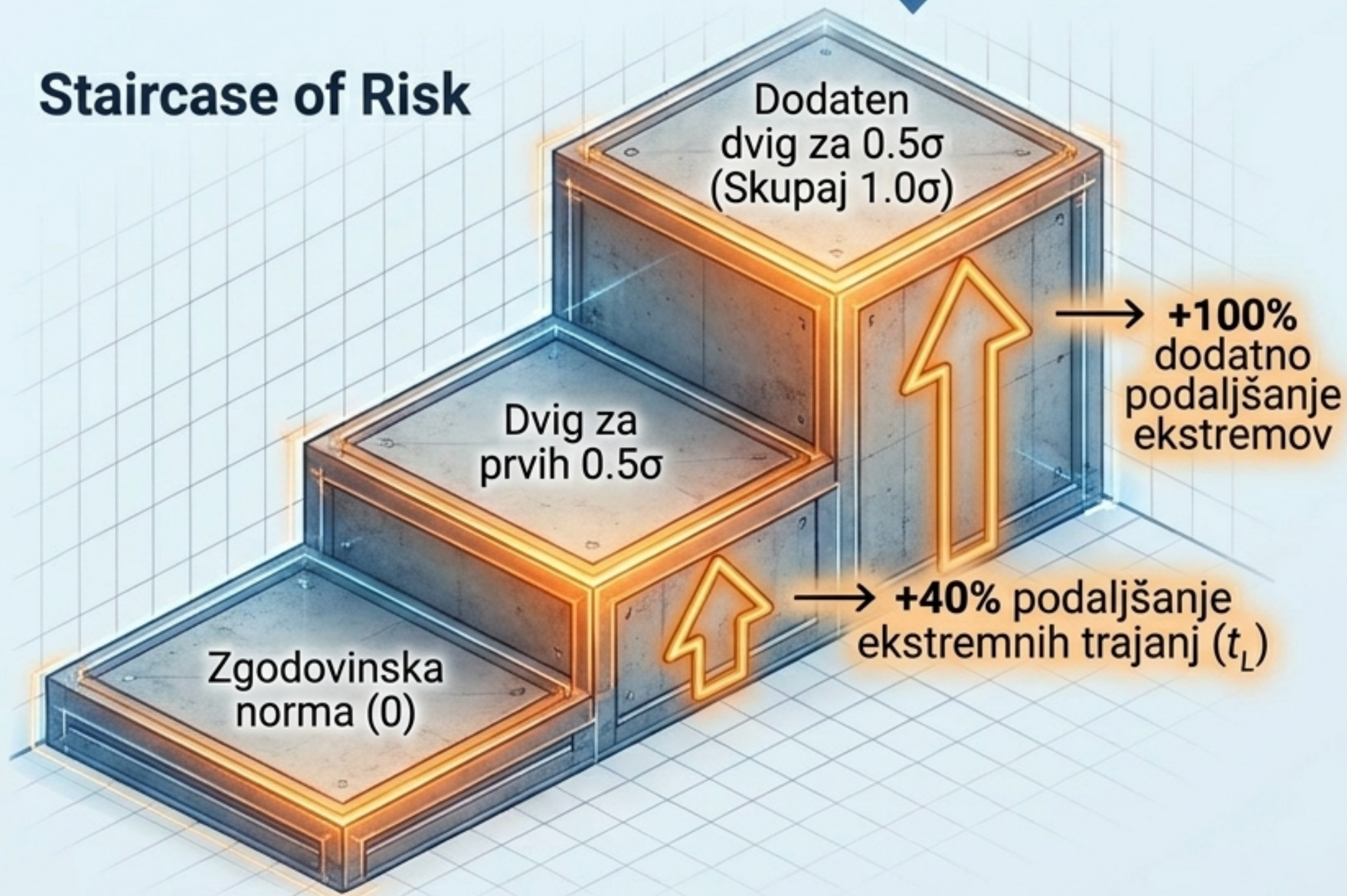


Za valove z zgodovinsko precedenčno dobo 35 dni v Afriki **naraste tveganje za neverjetnih 6000%**.

# Hevristično pravilo: Rule of Thumb za oceno tveganja

Prirastki se ne seštevajo linearno, temveč se množijo.  
Zapomnljiv mehanizem za načrtovalce sistemov.

## Staircase of Risk



Vsak naslednji prirastek globalnega segrevanja podaljša vročinske valove **bistveno huje** kot **prejšnji prirastek** enake velikosti.

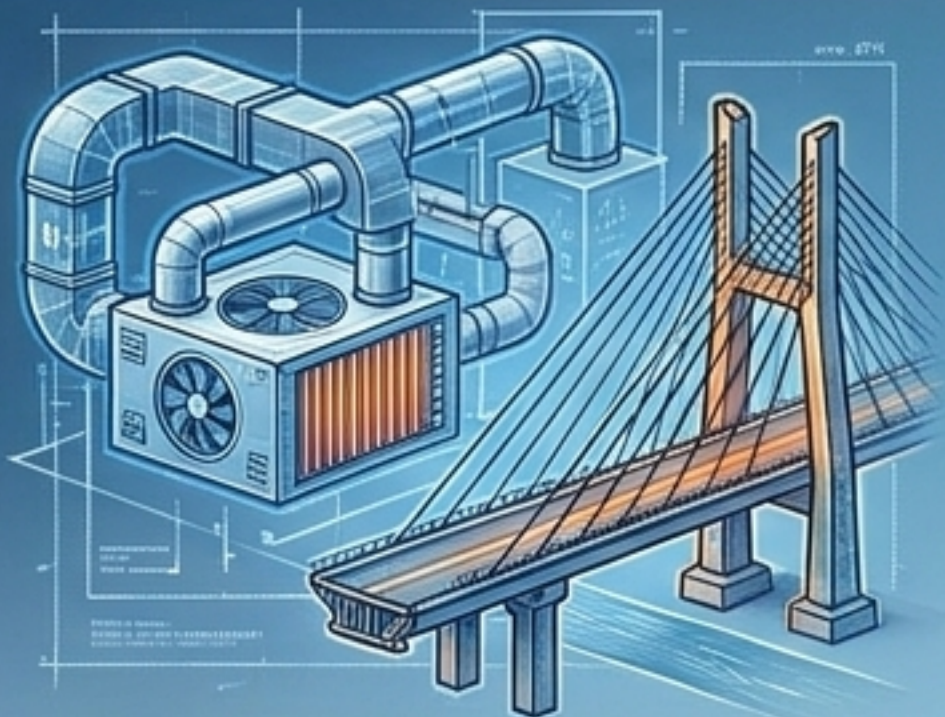
# Sintezni model: Anatomija nelinearne kaskade

Celoten proces transformacije začetnega temperaturnega dviga v eksponentno tveganje.



# Implikacije za sistemski inženiring in načrtovanje

Ekstrapolacija zgodovinskih ekstremov (**Return periods**) bo privedla do katarofalnega **pod-dimenzioniranja** (under-engineering) sistemov.



## Infrastruktura

**Konec zgodovinskih Return-periods.**

Statistični modeli dimenzioniranja hlajenja in materialov, ki predpostavljajo neodvisnost dogodkov, niso več veljavni.



## Energetika

**Neprekinjene obremenitve.**

Omrežja se morajo pripraviti na neprekinjene bazne obremenitve hlajenja (peak loads), ki ne popustijo nencijo več tednov in s tem preprečijo nočno termalno razbremenitev.



## Ranljivost sistemov

**Tropi prvi na udaru.**

Projektiranje za tropske in subtropske regije mora računati na najhitrejše kritične zlome zaradi majhne naravne variance ( $\sigma$ ). Šok tam nastopi z eksponentno hitrostjo.