

KUMULATIVNI HIDRODINAMIČNI VPLIVI VETRNIH ELEKTRARN NA MORJU

Sistemska analiza zračnih in plimskih sledi na
mehaniko tekočin in termodinamiko Severnega morja



Sistem: SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydro-science Integrated System Model)



Simulacijski časovni okvir: 2008–2017



Resolucija mreže: Ne-strukturirana mreža (700 m - 2000 m)

SPREMEMBA ROBNIH POGOJEV: EKSPONENTNA RAST INFRASTRUKTURE

2024 (Trenutno stanje)

~23,5 GW
instalirane moči

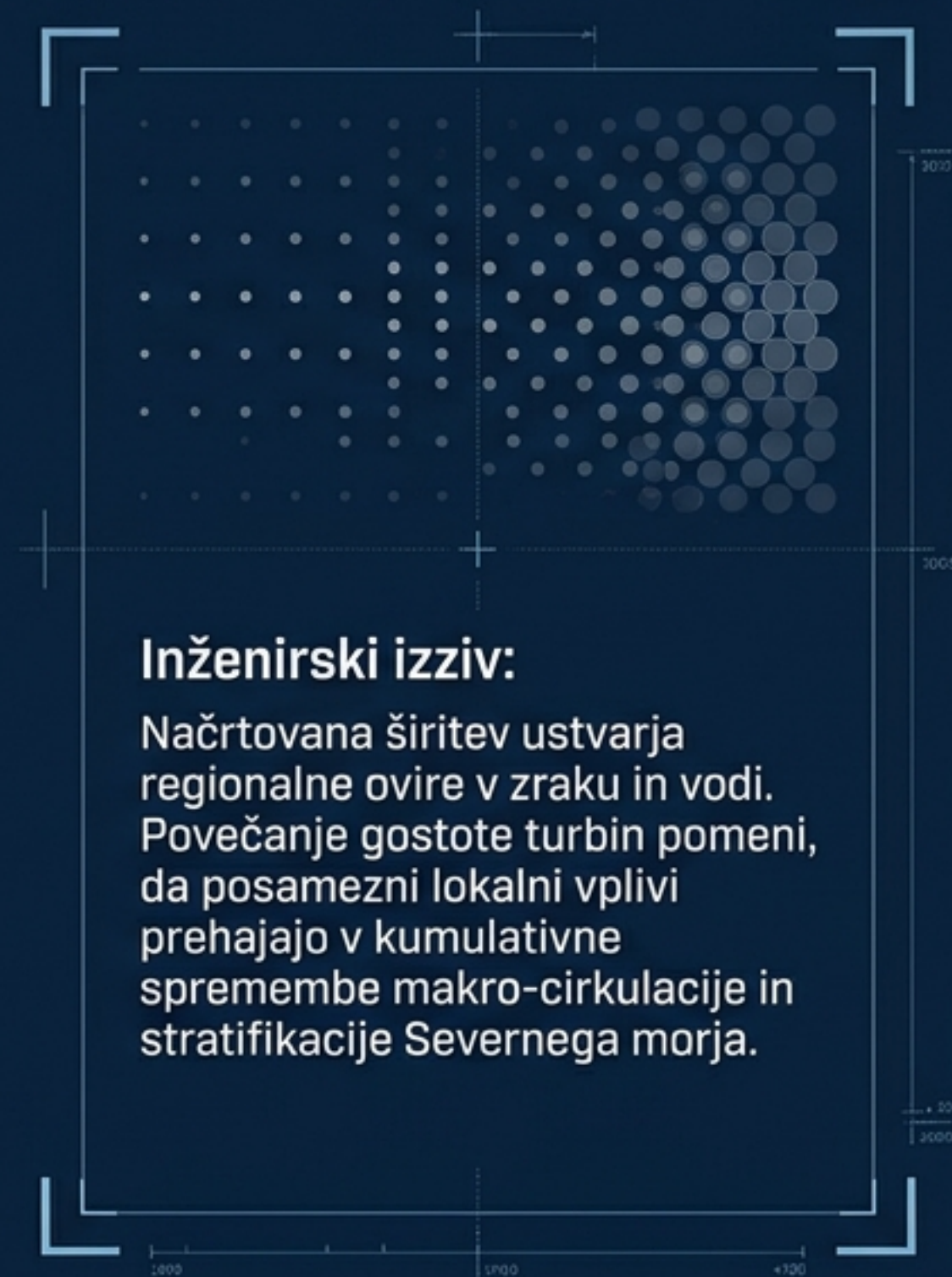
~4.500
turbin



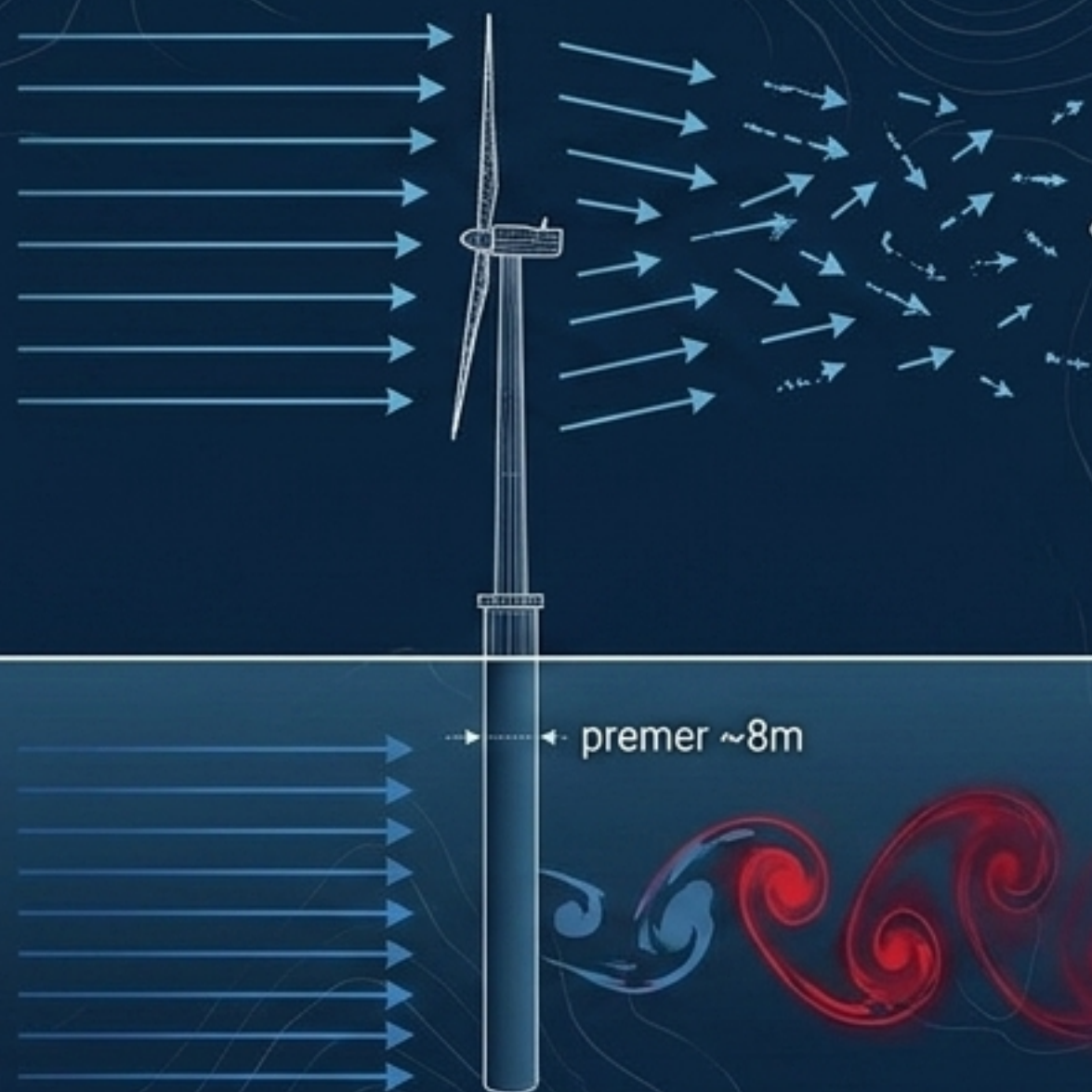
2050 (Ciljno stanje)

300 GW
instalirane moči

Več kot 10.000
turbin



FIZIOLOGIJA MOTNJE: DVOJNI UPOR



Zračne sledi (Wind Wakes):

Aerodinamični upor rotorja zmanjša kinetično energijo vetra. Hitrost vetra pade za 10–15 % na površini. Zmanjšanje strižne napetosti vetra na površini morja.

Plimske sledi (Tidal Wakes):

Hidrodinamični upor monopilnih temeljev. Oviranje plimskih tokov povzroča močne strižne učinke in lokalizirano turbulenco (Kármánove vrtince) pod morsko gladino.

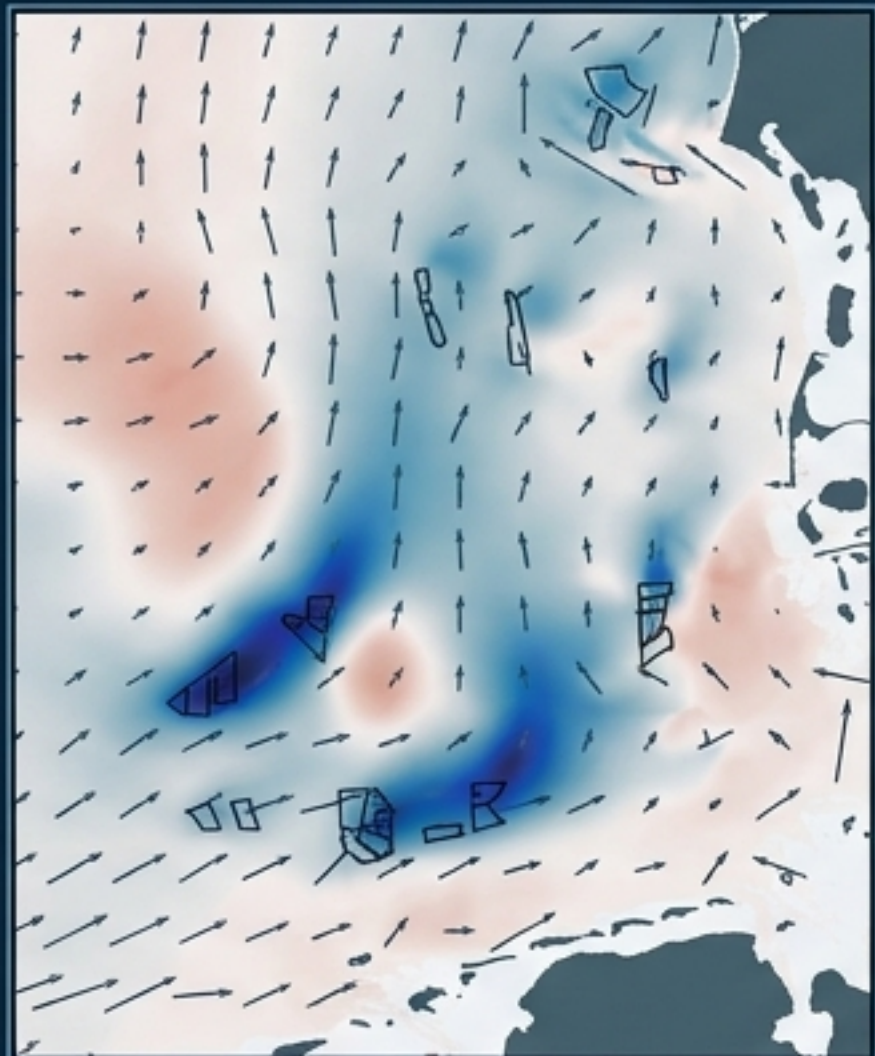
Zaključek: Interakcija teh dveh nasprotujočih si motenj določa spremembe v mešanju vodnega stolpca.

DIAGNOSTIČNA PRIMERJAVA: ZRAČNE PROTI PLIMSKIM SLEDDEM

PARAMETER	ZRAČNE SLEDI (WIND WAKES) 	PLIMSKÉ SLEDI (TIDAL WAKES) 	KUMULATIVNI UČINEK 
Izvor	Aerodinamični (rotor)	Hidrodinamični (monopilni temelj)	Interakcija na meji zrak-voda
Doseg vpliva (Scale)	Daljni doseg (do 100 km)	Lokalni doseg (metri do kilometri)	Sistemiški
Vpliv na TKE (Površina)	Zmanjšanje (5–10 %) zaradi šibkejšega vetra	Povečanje (>30 %) zaradi ovire	Lokalna žarišča turbulence obdana s širšim območjem pojetanja
Mešanje vodnega stolpca (K_v)	Pojemanje vertikalnega mešanja	Močno povečanje (50–100 % pozimi, >100 % poleti)	Odvisno od gostote in razmika turbin
Učinek na poletno SST	Segrevanje (do +0,2 °C)	Ohlajanje (lokalni dvig hladne vode)	Dominira segrevanje na makro nivoju, hlajenje okoli temeljev

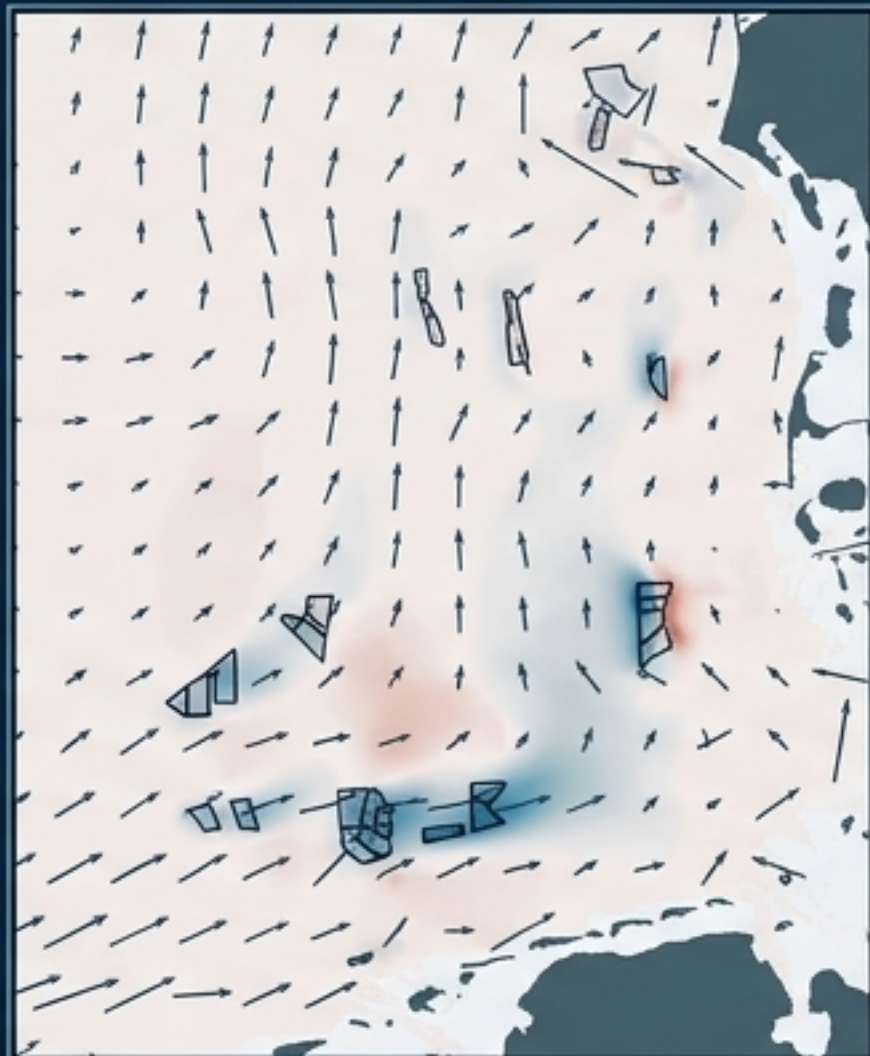
HIDRODINAMIČNI ODZIV: ATENTUACIJA HITROSTI POVRŠINSKIH TOKOV

Graf A (Vpliv zraka)



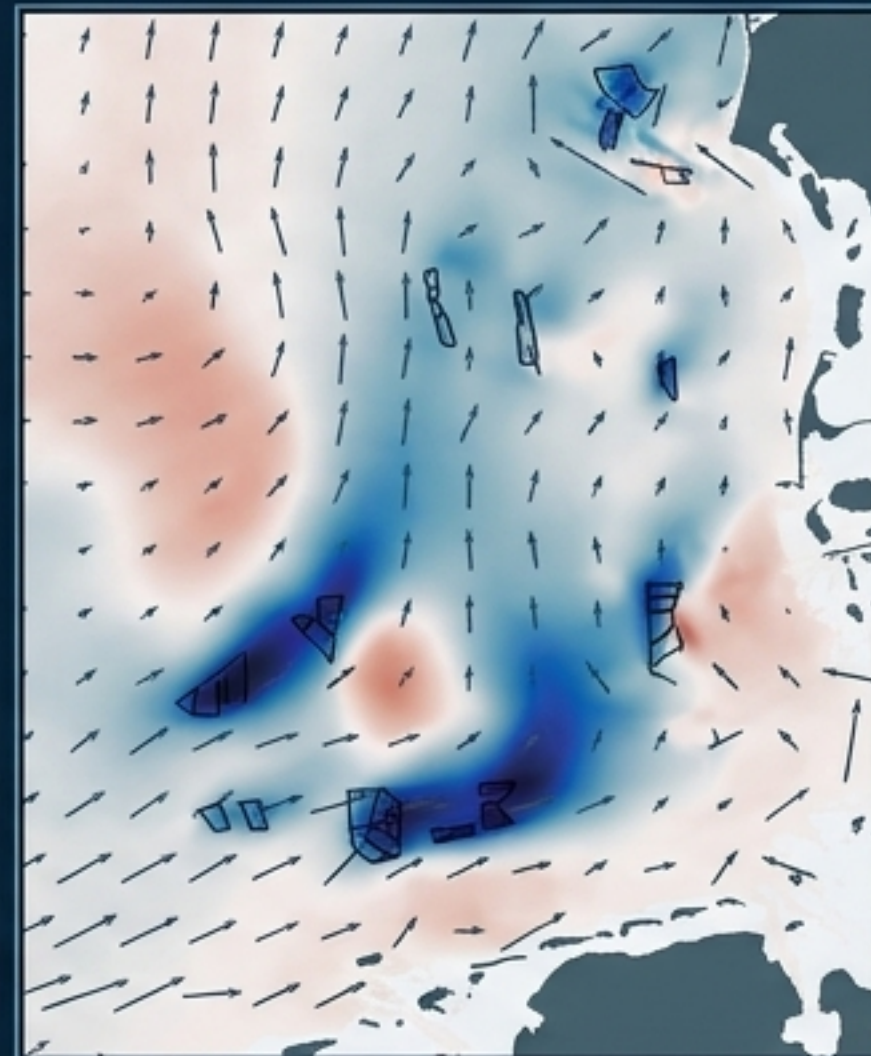
Zračne sledi zmanjšajo povprečne hitrosti površinskih tokov za približno 10 %.

Graf B (Vpliv vode)

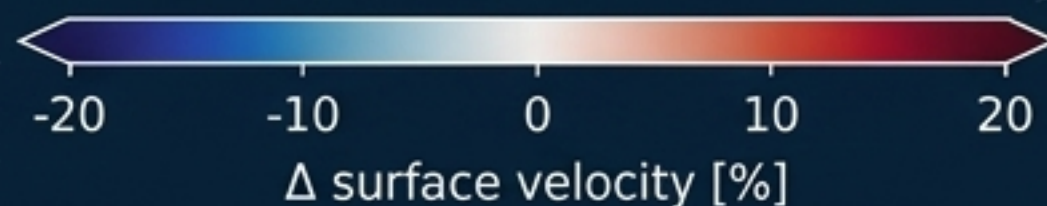


Plimske sledi prispevajo polovični vpliv (znižanje za ~5 %).

Graf C (Kumulativno)



Skupni upad hitrosti doseže do 20 % v območjih z visoko gostoto turbin (npr. Nemški zaliv).

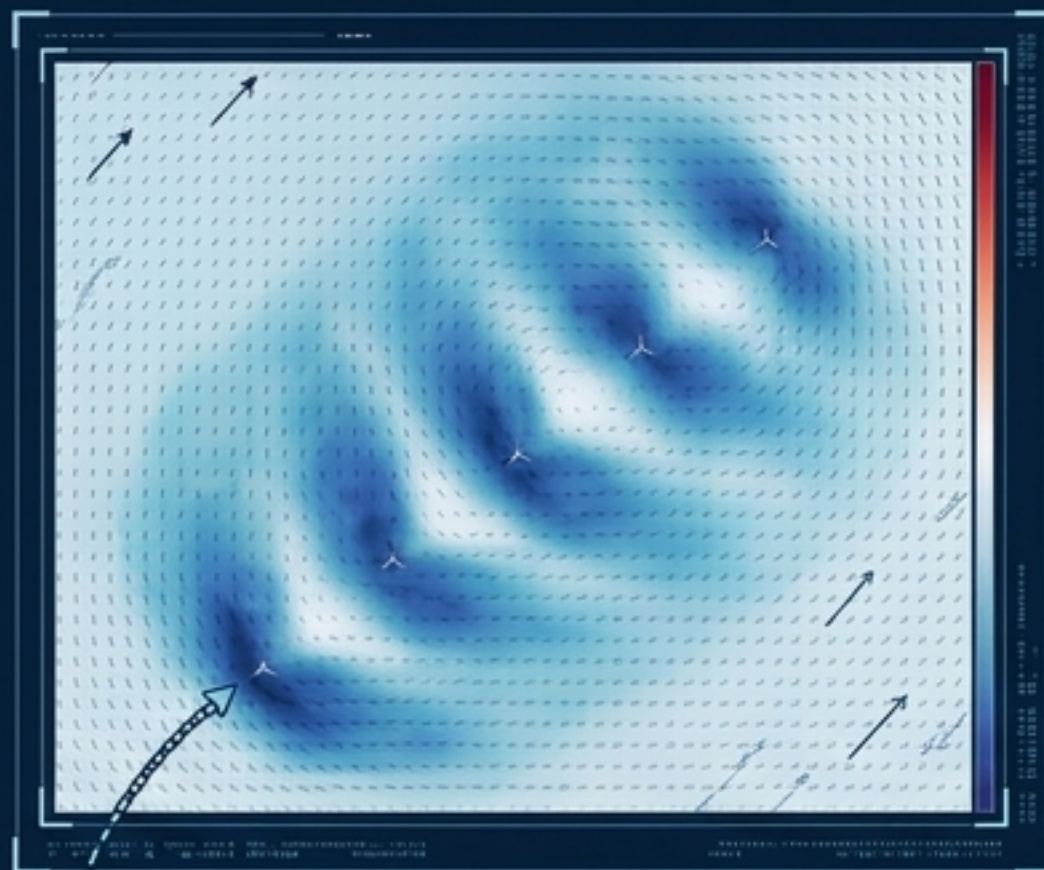


Inženirski vpogled

Učinek blokade (Blocking effect). Zmanjšana hitrost znotraj vetrnih parkov pospešuje kompenzacijske tokove ob njihovih robovih.

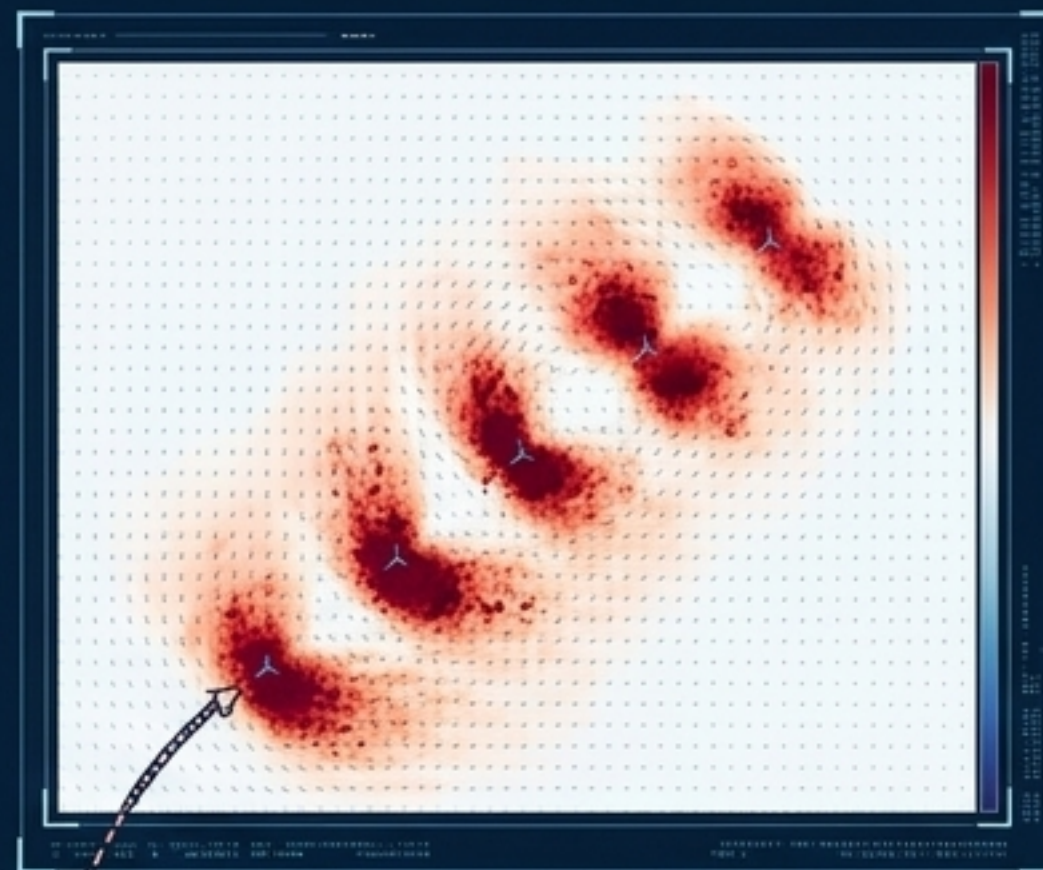
TURBULENCA V KONFLIKTU: NASPROTUJOČI SI UČINKI NA TKE

ZRAČNE SLEDI (SURFACE TKE)



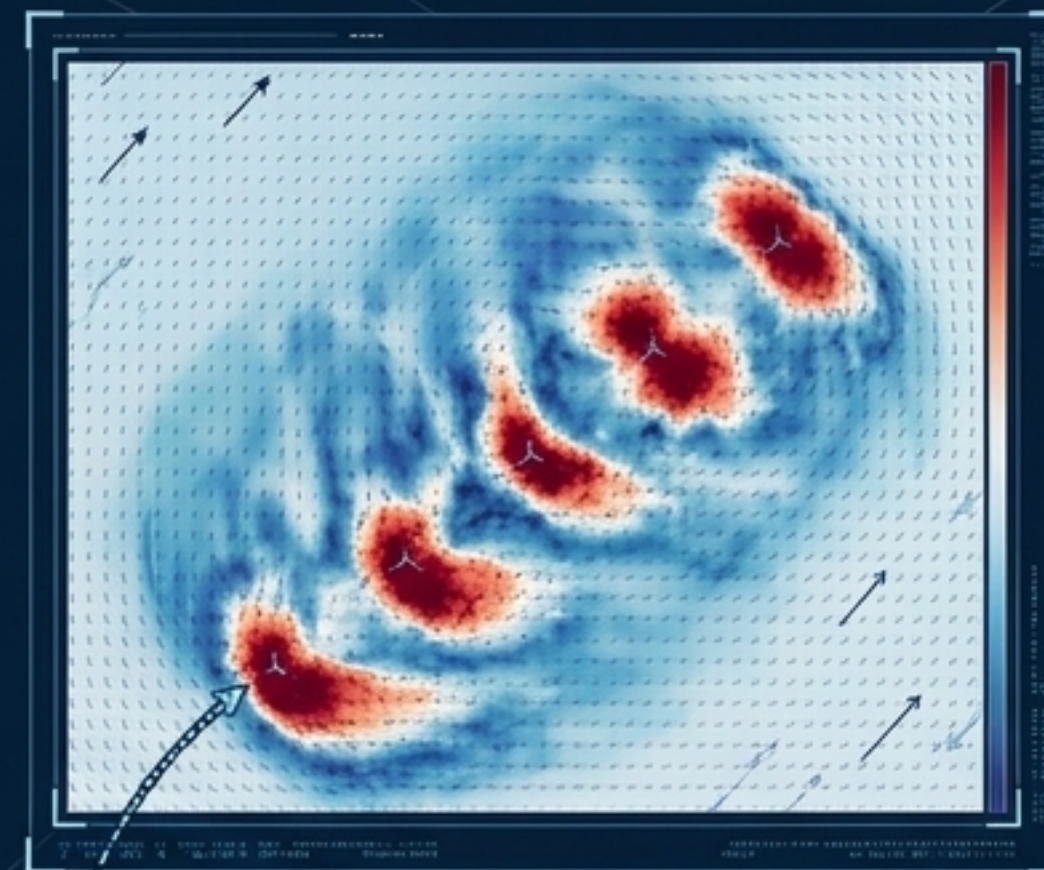
Zračne sledi (Modro): Zmanjšanje strižnih napetosti vetra povzroči širokopasovno dušenje površinske TKE (-10 %).

PLIMSKÉ SLEDI (SURFACE TKE)



Plimske sledi (Rdeče): Trenje na monopilnih temeljih povzroči masivno in lokalizirano generacijo TKE (>+30 %), ki presega naravne nivoje.

KUMULATIVNI UČINEK (SURFACE TKE)

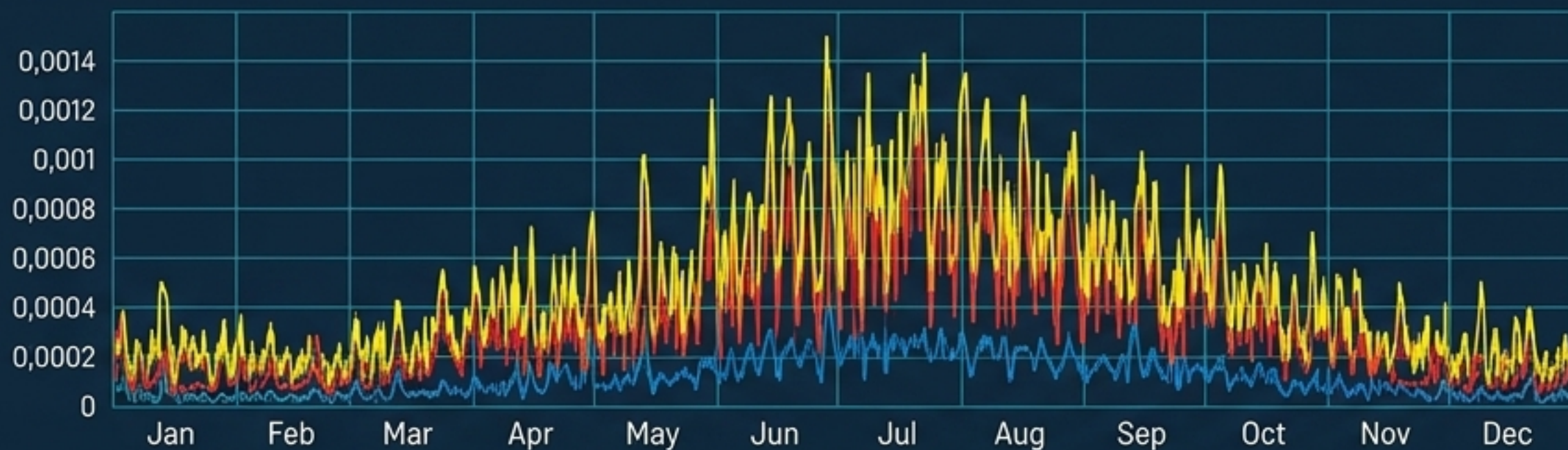


Sinteza: Nastanek izrazitih lokalnih vročih točk turbulence (hotspots), ki so obdane s prostranimi območji znižane turbulence.

KLJUČNA SPREMENLJIVKA: INTENZIVNOST TKE IN SPOSOBNOST AKUMULACIJE STA NEPOSREDNO ODVISNI OD MEDSEBOJNEGA RAZMIKA TURBIN.

ČASOVNA DOMENA: SEZONSKA DINAMIKA VERTIKALNEGA MEŠANJA (K_v)

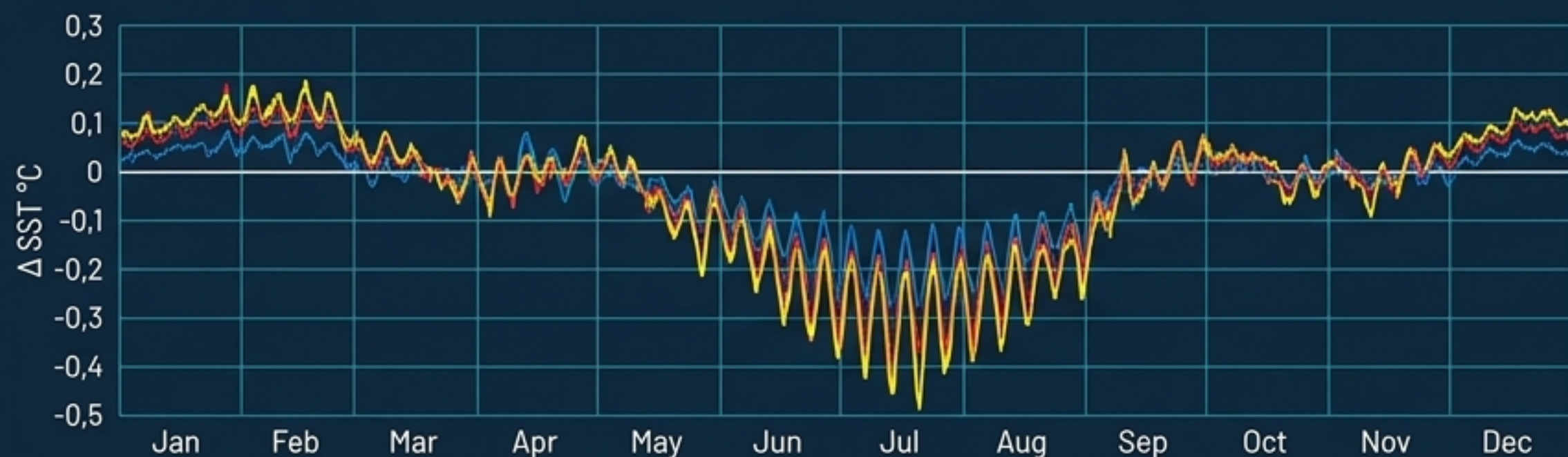
Graf A (Vertikalna difuzivnost)



Razlaga grafa A:

- Plimske sledi poleti povečajo stopnjo mešanja za več kot 100 % (z 0,0005 na $>0,001 m^2/s$).
- Zračne sledi imajo na mešanje pri dnu zanemarljiv vpliv v primerjavi z masivnim učinkom turbin.

Graf B (Anomalija SST)

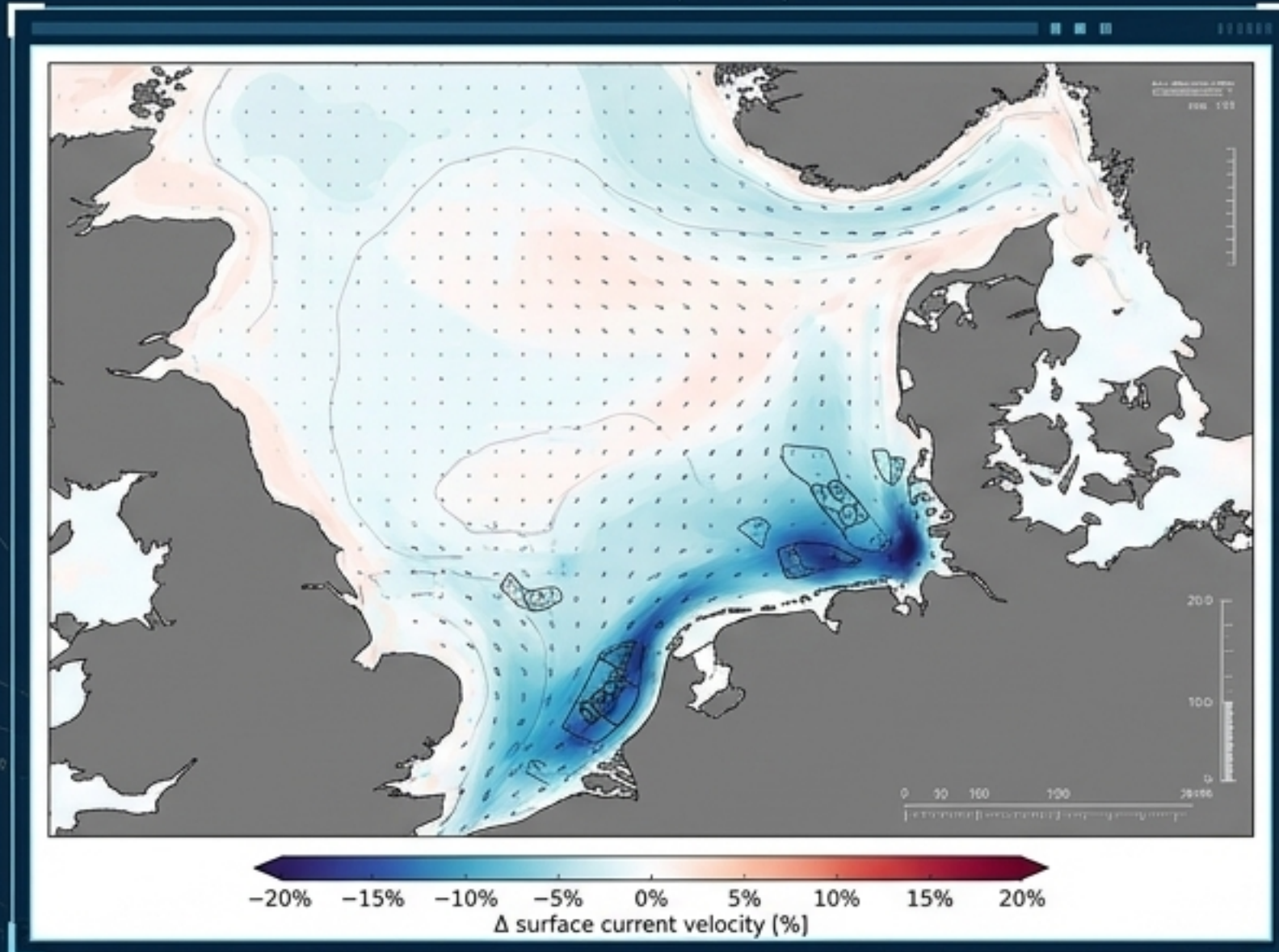


Razlaga grafa B:

- Povečano lokalno mešanje poleti črpa hladno vodo z dna in zniža lokalno temperaturo gladine za do 0,5 $^{\circ}C$.
- Zmanjšani veter pozimi pa preprečuje izgubo toplote v atmosfero, kar povzroči segrevanje (do 0,2 $^{\circ}C$).

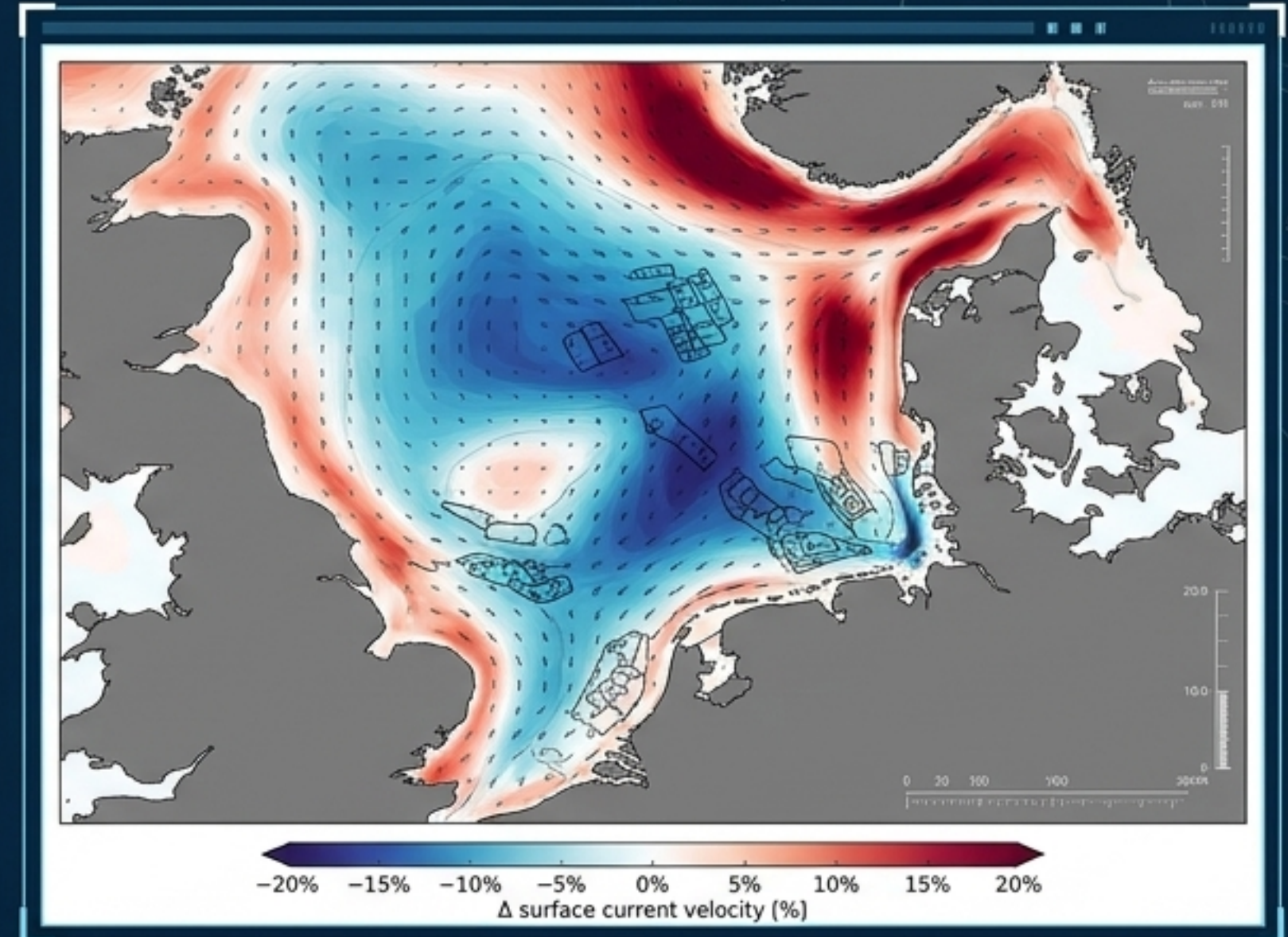
SISTEMSKA KASKADA: MAKRO-SKALARNI VPLIV ŠIRITVE (SCENARIJ 2050)

Panel A (2023)



Zmanjšanje hitrosti površinskih tokov je lokalizirano (Belgijska obala, Nemški zaliv), predvsem za 10 %.

Panel B (2050)

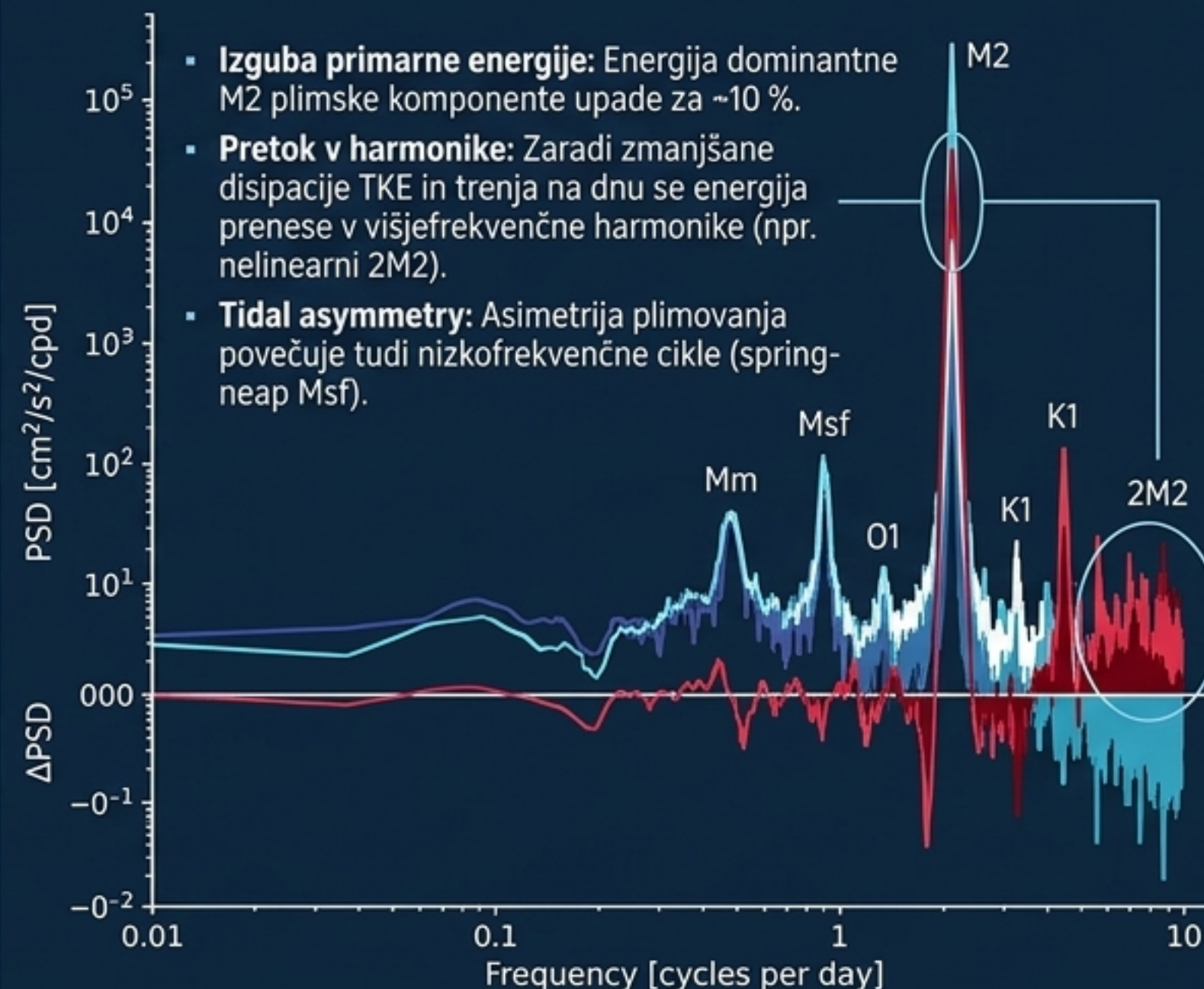
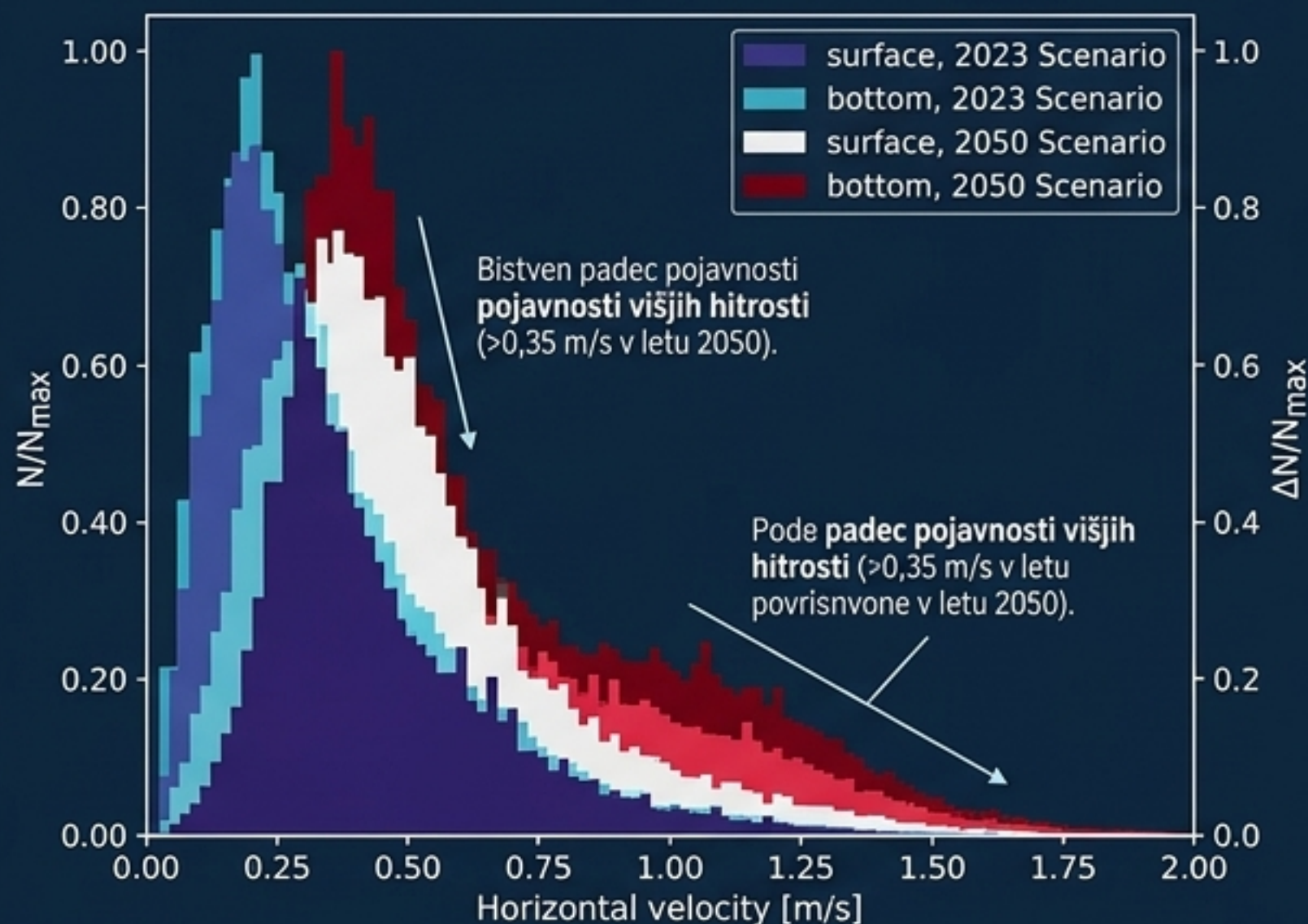


Upočasnitev celotne povprečne površinske cirkulacije v osrednjem Severnem morju.
- Upad za več kot 20 % v območjih maksimalne poseljenosti s turbinami.
- Makro učinek blokade povzroči pospešitev tokov (za >5 %) severno od regije Dogger Bank in zunaj načrtovanih con.

SPREMEMBE V SPEKTRALNI GOSTOTI MOČI (PSD) IN PORAZDELITVI KINETIČNE ENERGIJE

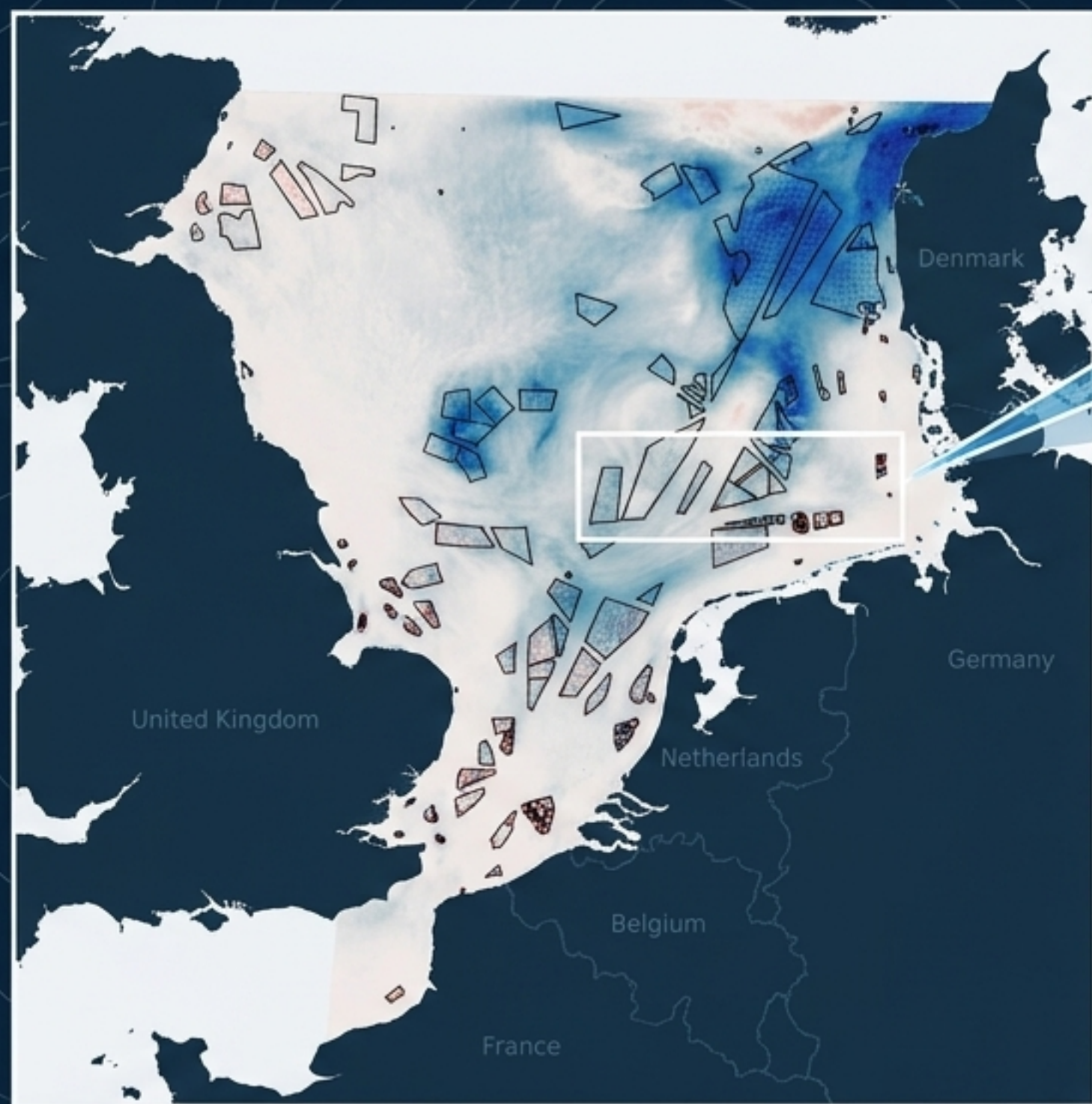
Premik frekvence hitrosti

Bistven padec pojavnosti višjih hitrosti ($>0,35$ m/s v letu 2050).



Neto bilanca (2050): 3,7-odstotna neto izguba površinske kinetične energije na ravni celotnega bazena.

PRENOS NA DNO: OSLABITEV STRIŽNE NAPETOSTI



-10

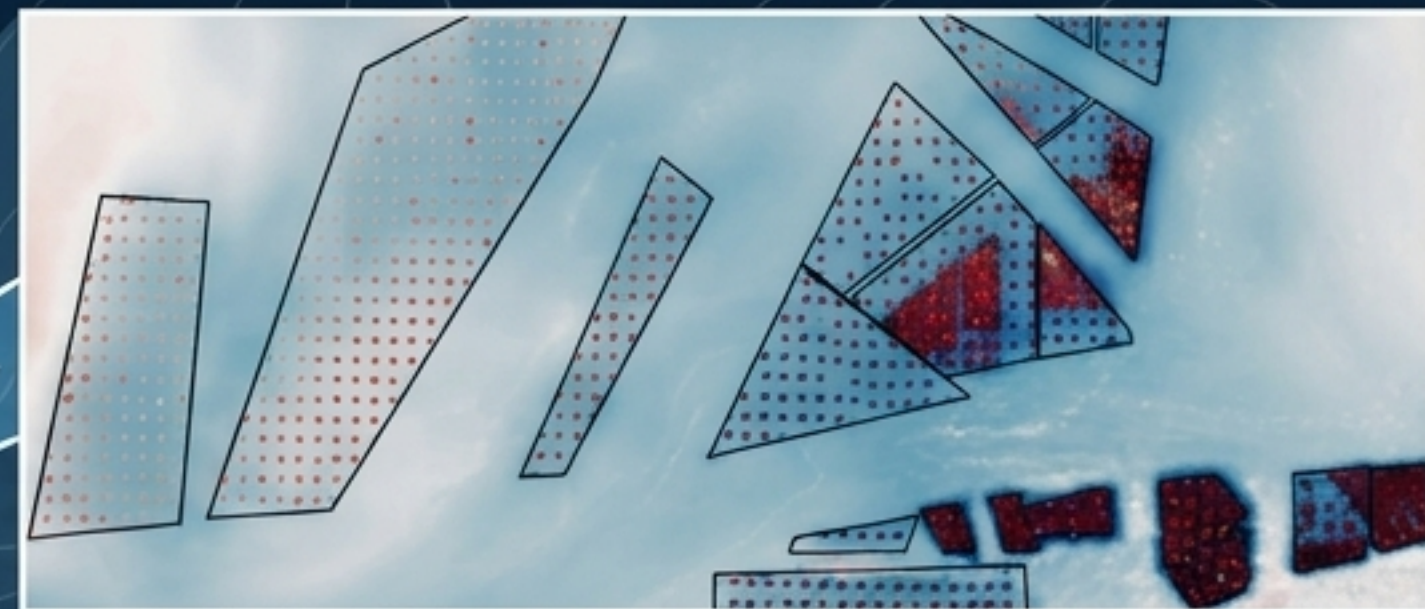
-5

0

5

10

Δ bottom shear stress [%]

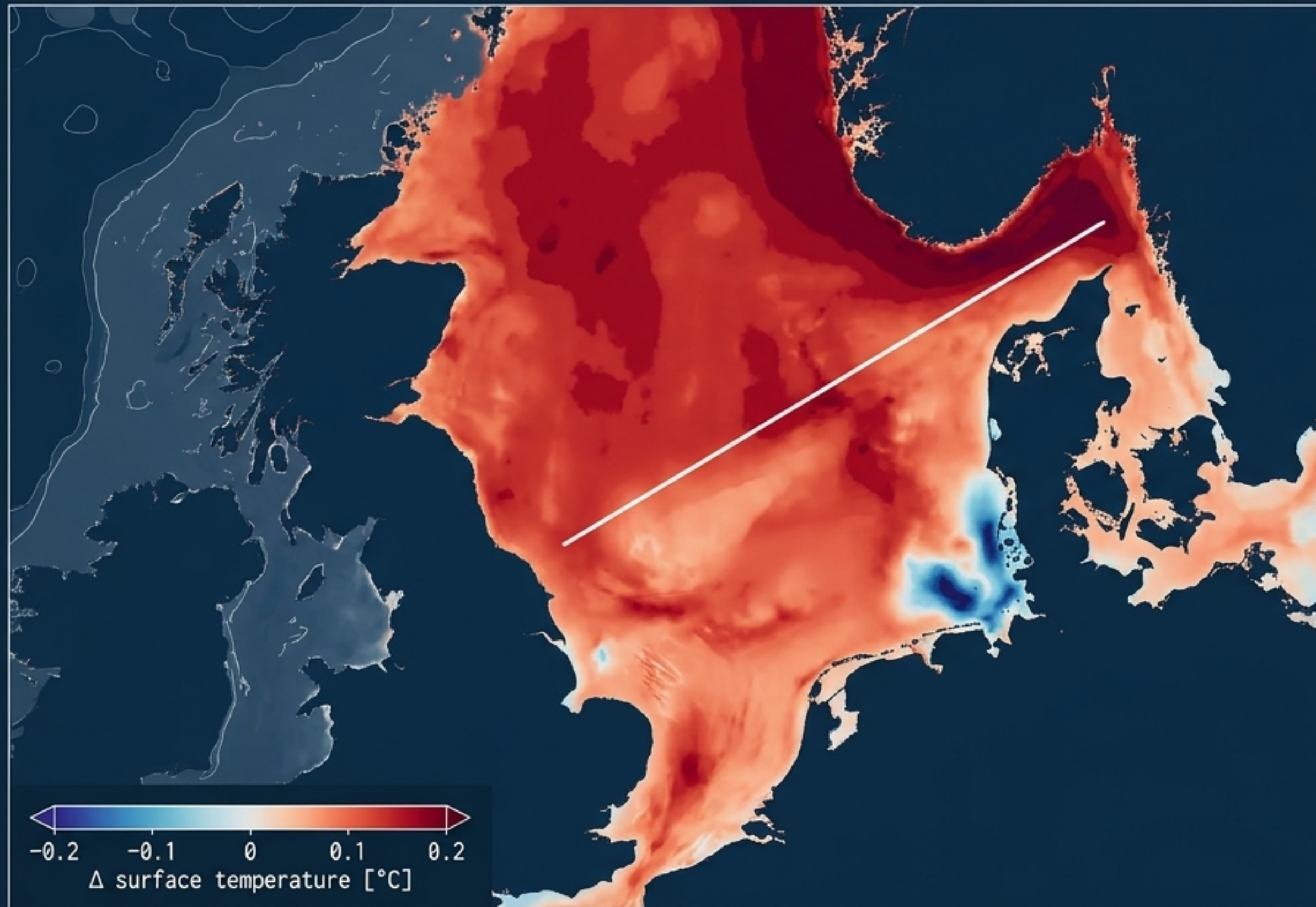


- Oslabljeni površinski tokovi se prenašajo vzdolž plitvega vodnega stolpca vse do dna.
- Makro upad (**Modra območja**): Sistemsko zmanjšanje strižne napetosti na dnu za 5 do 10 % (še posebej plitva območja, kot je Dogger Bank).
- Mikro prirast (**Rdeča območja**): Na ravni posameznih turbin se zaradi lokalnega vrtnčenja strižna napetost poveča, a prevladuje makro padec napetosti.

Posledice za inženiring/ekologijo:

Zmanjšana napetost na dnu pomeni manjšo resuspenzijo sedimentov, kar poveča akumulacijo organskega ogljika (za 10–20 %).

TERMODINAMSKI ODZIVI: ANOMALIJE TEMPERATURE MORSKE GLADINE (SST)



Glavna ugotovitev:

Scenarij 2050 povzroča obsežen dvig povprečne temperature morja za 0,05 °C do 0,15 °C.

Mehanizem: Povezava med zmanjšanjem površinske hitrosti vetra, manjšim mešanjem in segrevanjem.

Izjema (Mitigation):

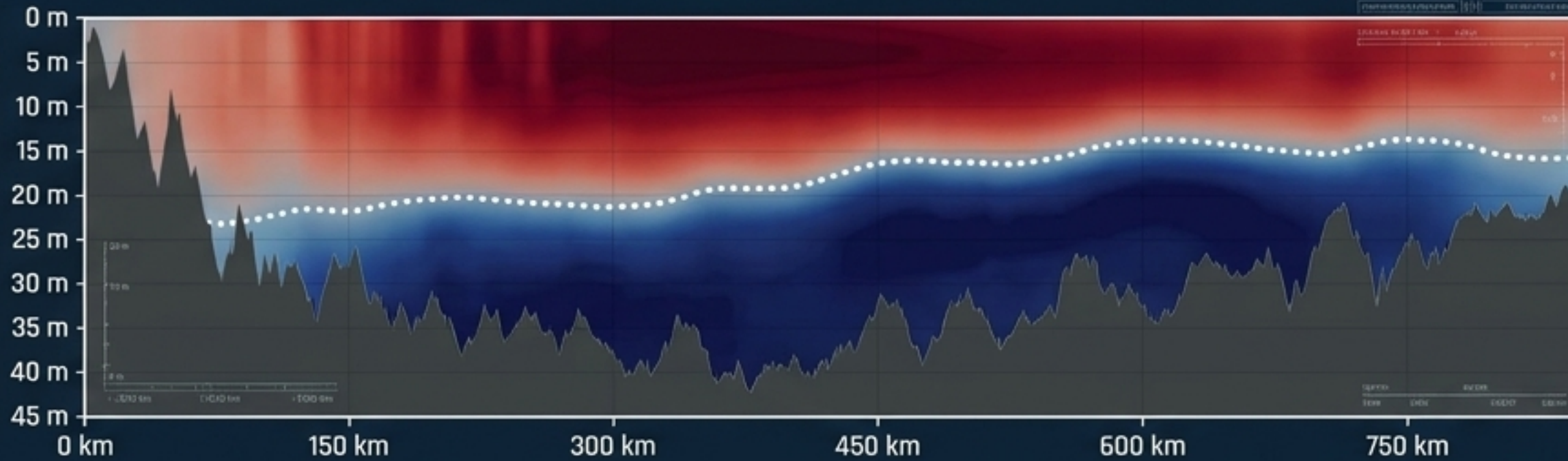
Lokalne vrzeli (modra barva) v Nemškem zalivu razkrivajo območja, kjer izjemna gostota turbin (plimske sledi) izčrpa dovolj hladne vode z dna, da izniči površinsko segrevanje zračnih sledi.

Skala vpliva:

Segrevanje zaradi vetrnih parkov predstavlja približno 10 % projiciranega signala globalnega segrevanja za Severno morje (1–3 °C).

DEFORMACIJA STRATIFIKACIJE: PREREZ VODNEGA STOLPCA

Poletje (Stratificirano stanje)



- Toplotne anomalije kažejo segrevanje površine in močno ohlajanje pod piknoklino.
- Zmanjšano vertikalno vpletanje: Zračni upor zmanjša mešanje. Piknoklina (bela črta) se pomakne navzgor za do 2 metra. Povečana jakost stratifikacije.

Zima (Premešano stanje)

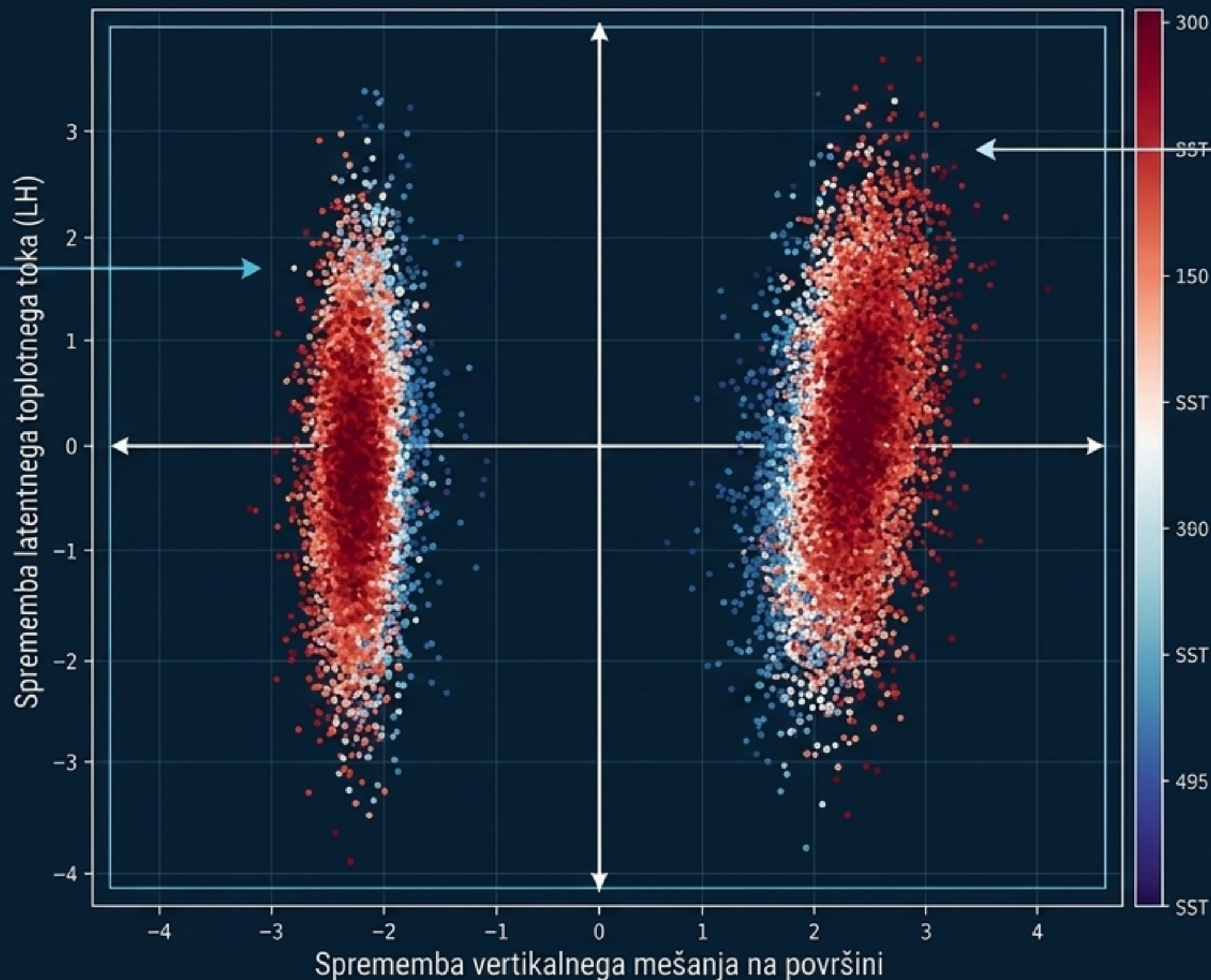


- Enakomerno povišane temperature po celotnem prerezu. Omejene izgube toplote dominirajo nad fizikalnim mešanjem.

MATRIKA TOPLITNIH TOKOV: LATENTNA TOPLOTA VS. MEŠANJE

Paradoks mešanja:

Močno segrevanje površine pogosto sovпада z upadom vertikalnega mešanja (sezonsko stratificirane vode).



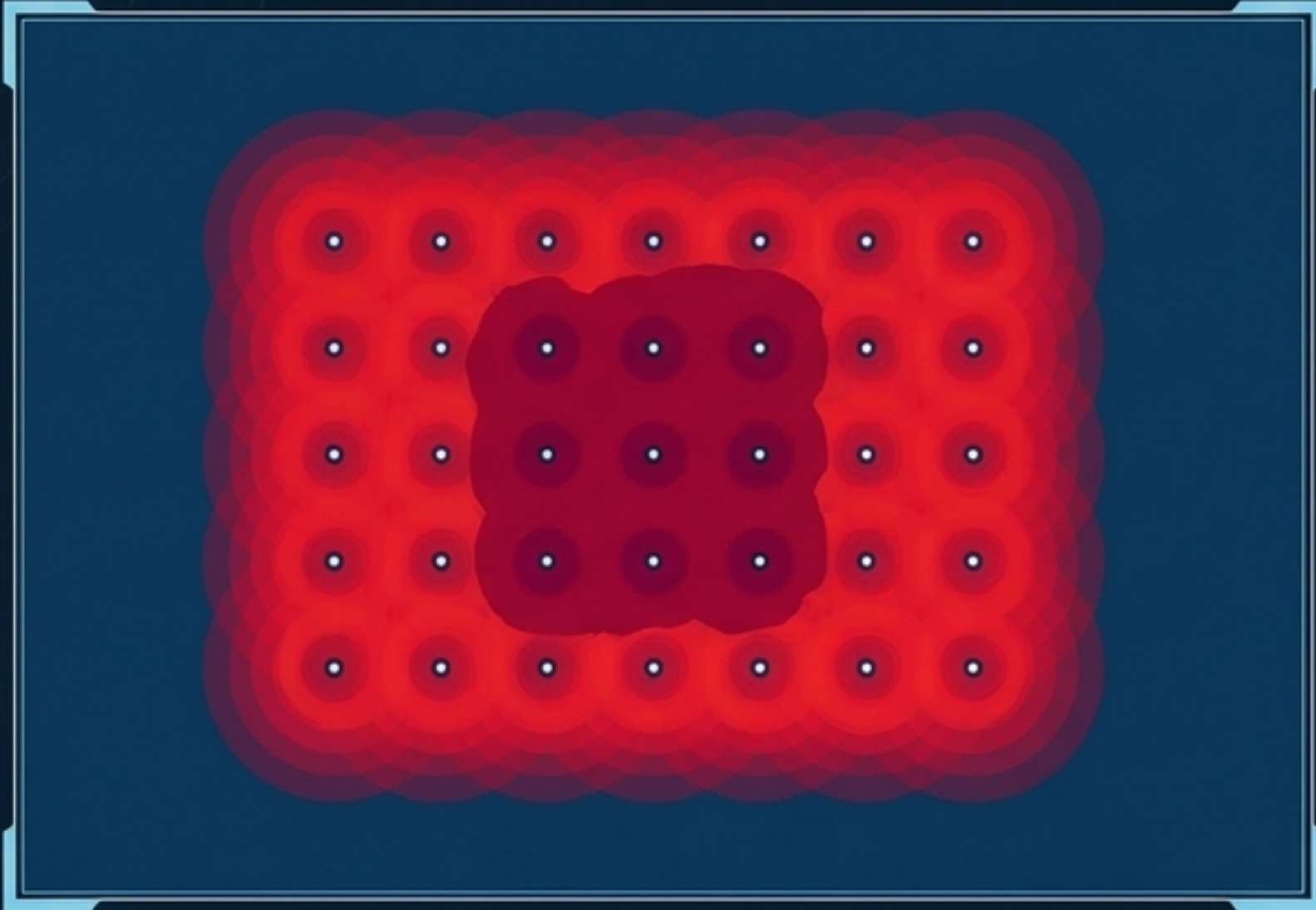
Veter kot kontrolor izgube toplote:

Tudi ob povečanem mešanju lahko pride do segrevanja. Upočasnjen veter neposredno oslabi zračno-morsko izmenjavo (zmanjša izhlapevanje in izgubo latentne toplote v atmosfero). V premešanih vodah je vpliv šibkejšega vetra nad vplivom mešanja.

PARAMETRIČNI NADZOR: OPTIMIZACIJA GOSTOTE INSTALACIJ

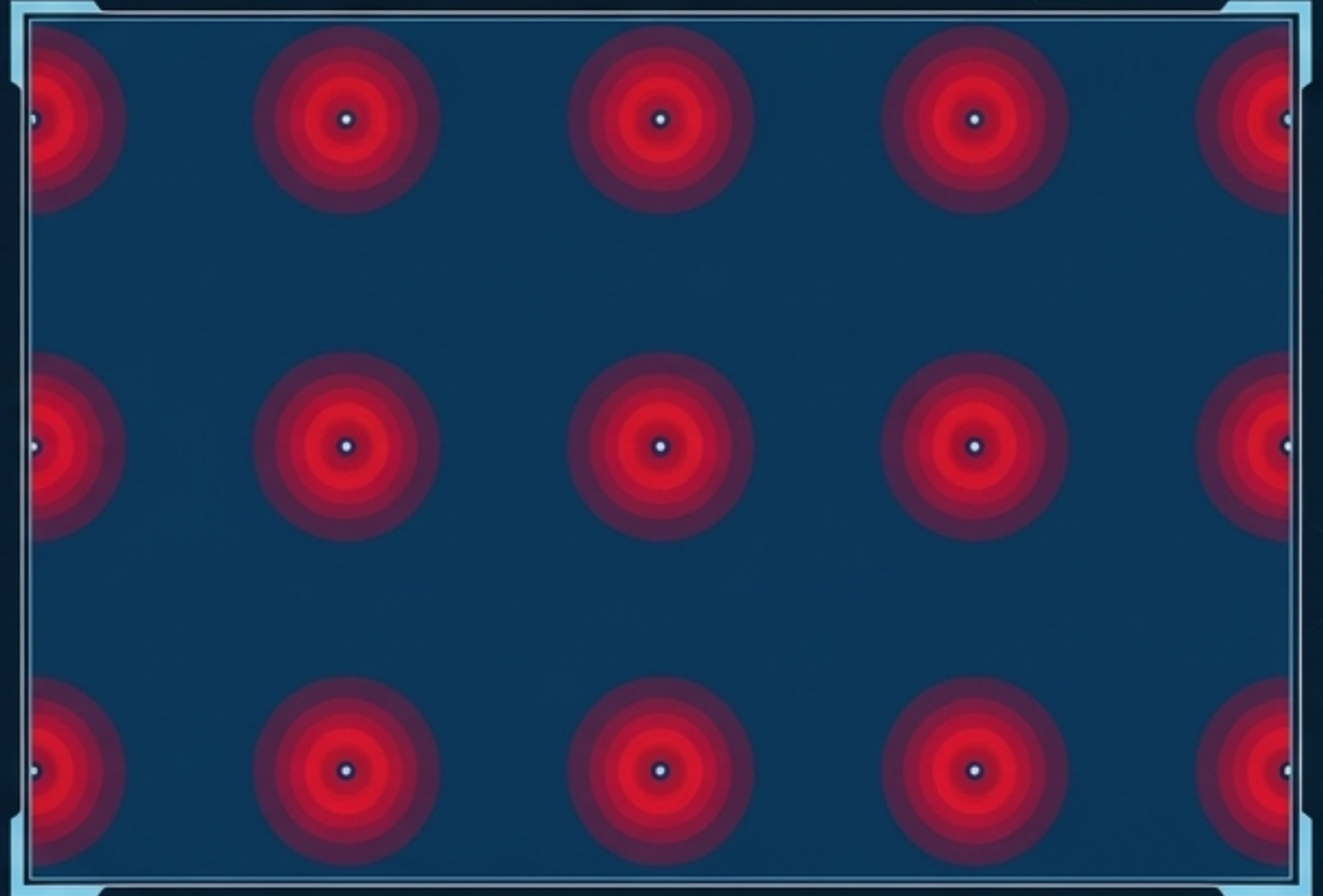
Problem: Kumulativni odziv se dramatično poveča v sistemih z visoko gostoto. Temelji, postavljeni blizu skupaj, ustvarijo superpozicijo turbulence.

Gosta mreža (≤ 1000 m razmika)



Pojav masivnih vročih točk (hotspots) vertikalnega mešanja. Tok se močno zmanjša (blokada), kar poveča striženje okoli parkov.

Redka mreža (~ 3000 m razmika)



Akumulirana podvodna turbulenca je minimalna. Vpliv postane skoraj izključno atmosferski (prevlada zračnih sledi).

Zaključek: Pravilno dimenzioniranje razmika turbin je osrednja inženirska strategija za ublažitev hidrodinamičnega odtisa v Severnem morju.

SISTEMSKA SINTEZA: OD LOKALNEGA UPORA DO BAZENSKEGA ODZIVA

KORAK 1 - IZVOR

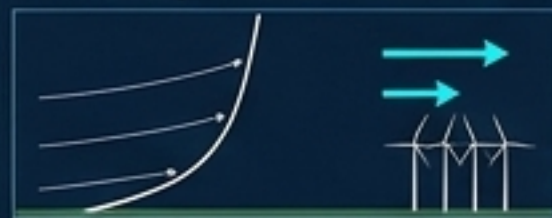
Ekspenzija kapacitet (300 GW) ustvari mrežo stacionarnega upora.



300 GW

KORAK 2 - MEHANIKA (A)

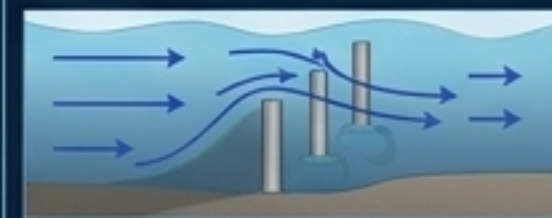
(A) Zračni upor -> Padeč hitrosti vetra



$$\Delta U < 0$$

KORAK 2 - MEHANIKA (B)

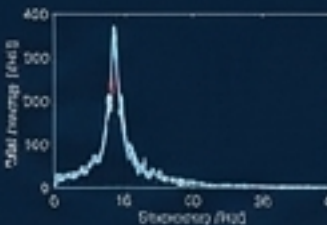
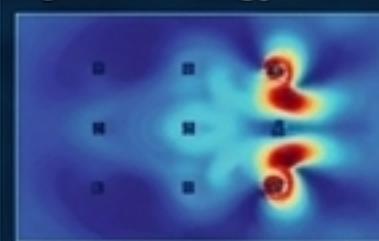
(B) Monopilni upor -> Padeč hitrosti plimovanja



$$\Delta V < 0$$

KORAK 3 - KINETIKA

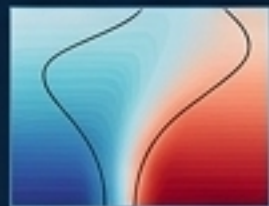
Prerazporeditev TKE (makro upad, mikro žarišča) & izguba M2 energije.



TKE REDISTRIBUTION

KORAK 4 - DINAMIKA

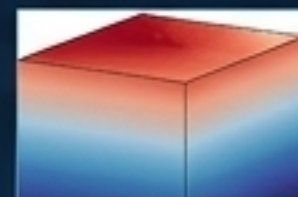
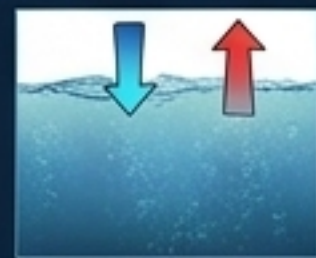
Modificirano vertikalno mešanje in upad napetosti na dnu.



$$\Delta K_z \text{ \& \; } \tau_b \downarrow$$

KORAK 5 - TERMODINAMIKA (LEFT GATE)

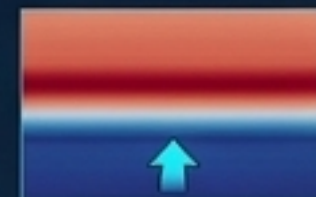
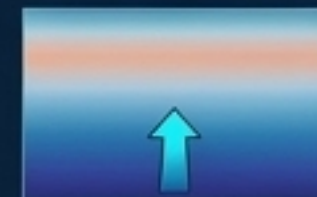
Če voda premešana: Dominira upad prenosa latentne toplote -> Globalno segrevanje (SST).



MIXED: LHF $\downarrow$ -> SST $\uparrow$

KORAK 5 - TERMODINAMIKA (RIGHT GATE)

Če voda stratificirana: Dominira zmanjšano vpletanje dna -> Pomik piknokline in močnejša stratifikacija.



STRATIFIED: ENTRAINMENT $\downarrow$ -> PYCNOCLINE SHIFT

KONČNO SPOROČILO: Vetrne elektrarne so na teh ravneh namestitve več kot le infrastruktura za energijo; so aktivni geofizikalni agensi, ki preoblikujejo robne pogoje morja.