

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Vodarstvo in  
komunalno inženirstvo

Kandidatka:

**Elvira Dorić**

# **Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D za simulacije hidrodinamike v Tržaškem zalivu**

**Diplomska naloga št.: 95**

**Mentor:**

doc. dr. Dušan Žagar

**Somentor:**

dr. Gregor Petkovšek

Ljubljana, 5. 3. 2008



## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana ELVIRA DORIĆ izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
»PRIMERJAVA MODELOV MIKE 3 IN PCFLOW3D ZA SIMULACIJE  
HIDRODINAMIKE V TRŽAŠKEM ZALIVU«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske  
separatoteke FGG.

Ljubljana, 15.01.08

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 519.61/.64:532.5:551.46(043.2)

**Avtor:** Elvira Dorić

**Mentor:** doc. dr. Dušan Žagar

**Somentor:** dr. Gregor Petkovšek

**Naslov:** Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D za simulacije hidrodinamike v Tržaškem zalivu

**Obseg in oprema:** 76 strani, 8 preglednic, 79 slik, 9 enačb

**Ključne besede:** matematični model, tridimenzionalni model, hidrodinamični modul, PCFLOW3D, MIKE 3, Tržaški zaliv.

### **IZVLEČEK**

Izvedena je bila primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D pri simulacijah hidrodinamike v Tržaškem zalivu.

Model MIKE 3, razvit na Danskem hidravličnem inštitutu (DHI), uporabljamo pri simulacijah tridimenzionalnih tokov s prosto gladino. Na Katedri za mehaniko tekočin se že od leta 1985 razvija in v praksi uporablja podoben tridimenzionalni model PCFLOW3D. Namenjen je preučevanju procesov v večjih vodnih telesih, npr. jezerih in morjih, kjer so horizontalne komponente hitrosti za red velikosti večje od vertikalnih komponent. V diplomski nalogi je podan opis osnovnih značilnosti modelov MIKE 3 in PCFLOW3D.

Prikazani so podatki in primerjava rezultatov simulacij, ki so bile izvedene na območju Tržaškega zaliva z obema modeloma. Vhodni podatki obsegajo geometrijo definicijskega območja in kote dna, temperaturne in slanostne razmere v Tržaškem zalivu in Soči, hitrost in smer vetra ter pretok in hitrost Soče na izlivu. Izvedene so simulacije z realnimi sezonskimi razmerami z uporabo različnih modelov turbulence. V okolici izliva Soče so bili rezultati primerjani tudi na zgoščeni mreži. Boljše ujemanje rezultatov dobimo za zimske razmere (burja), slabše pa ob upoštevanju plime ter šibkega vetra v poletnih razmerah.

Rezultati obeh modelov so med seboj primerljivi, kljub razmeroma velikemu odstopanju rezultatov na nekaterih delih definicijskega območja. Vzroki so v nekoliko različnih numeričnih shemah in modelih turbulence, ki so vgrajeni v oba modela ter v različnem podajanju robnih pogojev, predvsem odprtega roba in vtokov, pri obeh modelih.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 519.61/.64:532.5:551.46(043.2)

**Author:** Elvira Dorić

**Supervisor:** Assist. prof. Dr. Dušan Žagar

**Cosupervisor:** Dr. Gregor Petkovšek

**Title:** A comparison of the MIKE 3 and PCFLOW3D models for hydrodynamic simulations in the Gulf of Trieste

**Notes:** 76 pages, 8 tables, 79 figures, 9 equations

**Keywords:** mathematical model, three-dimensional model, hydrodynamics module, PCFLOW3D, MIKE 3, the Gulf of Trieste.

### **ABSTRACT**

A comparison between the hydrodynamic simulations of the models MIKE 3 and PCFLOW3D in the Gulf of Trieste was performed.

The model MIKE 3 was developed at the Danish Hydraulic Institute (DHI). It is used to simulate three-dimensional free-surface flow. At the Chair of Fluid Mechanics a similar model PCFLOW3D is being developed and practically used since 1985. This model is used to study processes in larger water bodies, such as lakes and seas, where the horizontal velocities are larger than vertical for an order of magnitude. The basic characteristics of both models are presented in this work.

The input data and a comparison of the results of some simulations performed in the Gulf of Trieste with both models is further shown. Geometry and bathymetry data, temperature and salinity conditions in the Gulf of Trieste and at the Soča river mouth, wind velocity and direction as well as discharge and velocity of the River Soča were required for the simulations. Realistic seasonal conditions were simulated using different turbulence models. In the vicinity of the Soča river mouth a comparison of the results was performed also for a refined numerical grid. The agreement of results was better in winter conditions (bora wind), while simulations of tidal forcing and in summer conditions showed worse agreement of the results.

The results of both models are comparable, despite relatively high discrepancies in some parts of the modelling domain. Minor differences in numerical schemes and turbulence models offered by both models and different input of boundary conditions, particularly at the open boundary and in the inflow cell, were found to be the main reasons of discrepancies.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se doc. dr. Dušanu Žagarju in dr. Gregorju Petkovšku za trud, čas, in nasvete, ki sta mi jih namenila med izdelavo diplomske naloge. Hvala tudi Danskemu hidravličnemu inštitutu (DHI), ki mi je posodil model MIKE 3 za seminar in diplomu, in podjetju CGS plus d.o.o., ki je zastopnik za DHI software v Sloveniji in mi je s tem omogočil preučevanje in spoznavanje z modelom.

Zahvaljujem se tudi mojima staršema in mojemu Džebotu, ki so me v času študija in ob nastajanju diplomske naloge podpirali in mi ves čas stali ob strani.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OPIS MODELOV IN METOD</b>	<b>6</b>
2.1	Osnovne enačbe hidrodinamičnega modula	6
2.2	Modeli turbulence	8
2.3	Numerične sheme	9
2.4	Robni pogoji	10
2.5	Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D	11
<b>3</b>	<b>VHODNI PODATKI IN OPIS SIMULACIJ</b>	<b>12</b>
3.1	Definicija računske mreže na območju modeliranja	12
3.2	Hidrometeorološki in oceanografski podatki	14
3.2.1	Soča	14
3.2.2	Tržaški zaliv	16
3.2.3	Veter	16
3.2.4	Plimovanje	16
3.3	SIMULACIJE	16
<b>4</b>	<b>PREDSTAVITEV IN ANALIZA REZULTATOV</b>	<b>20</b>
4.1	Kriteriji za ocenjevanje primerjave rezultatov med modeloma	20
4.2	Hitrost računa	21
4.3	Rezultati simulacij	22
4.3.1	Enakomerna mreža z modelom konstantne viskoznosti	22
4.3.2	Enakomerna mreža z modeli spremenljive viskoznosti	34
4.3.3	Neenakomerna mreža z modeli spremenljive viskoznosti	56
4.3.4	Različni modeli turbulence	61
4.3.5	Analiza rezultatov	65
4.4	Primerjava izvedenih simulacij z drugimi dosedanjimi raziskavami	66
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČKI</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>VIRI</b>	<b>73</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D	11
Preglednica 2: Podatki o vtoku Soče (vtočna celica):	15
Preglednica 3: Numerična shema in turbulentni model v posameznih simulacijah	18
Preglednica 4: Hidrometeorološki in oceanografski podatki v posameznih simulacijah	19
Preglednica 5: Kriteriji za ocenjevanje primerjave rezultatov	20
Preglednica 6: Hitrost računa	21
Preglednica 7: Rezultati analize:	65
Preglednica 8: Primerjava vhodnih podatkov:	66



## KAZALO SLIK

Slika 1: Podaljšano" definicijsko območje in linija rezanja.	13
Slika 2: Simulacija a1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)	22
Slika 3: Simulacija a1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)	23
Slika 4: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji a1 po 48h (MIKE 3)	24
Slika 5: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji a1 po 48h (MIKE 3)	24
Slika 6: Slanost v 25. sloju pri simulaciji a1 po 48h (MIKE 3)	24
Slika 7: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji a1 po 48h (PCFLOW3D)	24
Slika 8: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji a1 po 48h (PCFLOW3D)	24
Slika 9: Slanost v 25. sloju pri simulaciji a1 po 48h (PCFLOW3D)	24
Slika 10: Slanost v 20. sloju pri simulaciji a1 po 48h (MIKE 3)	25
Slika 11: Slanost v 20. sloju pri simulaciji a1 po 48h (PCFLOW3D)	25
Slika 12: Simulacija a2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)	26
Slika 13: Simulacija a2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)	27
Slika 14: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji a2 po 48h (MIKE 3)	28
Slika 15: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji a2 po 48h (MIKE 3)	28
Slika 16: Slanost v 25. sloju pri simulaciji a2 po 48h (MIKE 3)	28
Slika 17: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji a2 po 48h (PCFLOW3D)	28
Slika 18: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji a2 po 48h (PCFLOW3D)	28
Slika 19: Slanost v 25. sloju pri simulaciji a2 po 48h (PCFLOW3D)	28
Slika 20: Slanost v 20. sloju pri simulaciji a2 po 48h (MIKE 3)	29
Slika 21: Slanost v 20. sloju pri simulaciji a2 po 48h (PCFLOW3D)	29
Slika 22: Simulacija a3 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)	30

Slika 23: Simulacija a3 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (20. sloj)	31
Slika 24: Simulacija a4 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)	32
Slika 25: Simulacija a4 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (20. sloj)	33
Slika 26: Simulacija b1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)	34
Slika 27: Simulacija b1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (24. sloj)	35
Slika 28: Simulacija b1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)	36
Slika 29: Simulacija b1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (11. sloj)	37
Slika 30: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)	38
Slika 31: Temperatura v 24. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)	38
Slika 32: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)	38
Slika 33: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)	38
Slika 34: Temperatura v 24. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)	38
Slika 35: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)	38
Slika 36: Temperatura v 11. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)	39
Slika 37: Slanost v 25. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)	39
Slika 38: Slanost v 24. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)	39
Slika 39: Temperatura v 11. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)	39
Slika 40: Slanost v 25. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)	39
Slika 41: Slanost v 24. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)	39
Slika 42: Slanost v 20. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)	40
Slika 43: Slanost v 11. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)	40
Slika 44: Slanost v 20. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)	40
Slika 45: Slanost v 11. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)	40

Slika 46: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)	41
Slika 47: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 27h (25. sloj)	42
Slika 48: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 30h (25. sloj)	43
Slika 49: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 33h (25. sloj)	44
Slika 50: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 36h (25. sloj)	45
Slika 51: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 39h (25. sloj)	46
Slika 52: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 42h (25. sloj)	47
Slika 53: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 45h (25. sloj)	48
Slika 54: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)	49
Slika 55: Simulacija b3 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)	50
Slika 56: Simulacija b3 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (20. sloj)	51
Slika 57: Simulacija b4 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)	52
Slika 58: Simulacija b4 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)	53
Slika 59: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji b4 po 48h (MIKE 3)	54
Slika 60: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji b4 po 48h (MIKE 3)	54
Slika 61: Slanost v 25. sloju pri simulaciji b4 po 48h (MIKE 3)	54
Slika 62: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji b4 po 48h (PCFLOW3D)	54
Slika 63: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji b4 po 48h (PCFLOW3D)	54
Slika 64: Slanost v 25. sloju pri simulaciji b4 po 48h (PCFLOW3D)	54
Slika 65: Slanost v 20. sloju pri simulaciji b4 po 48h (MIKE 3)	55
Slika 66: Slanost v 20. sloju pri simulaciji b4 po 48h (PCFLOW3D)	55

Slika 67: Simulacija c1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)	56
Slika 68: Simulacija c1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)	57
Slika 69: Simulacija c1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)	58
Slika 70: Simulacija c2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)	59
Slika 71: Simulacija c2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (20. sloj)	60
Slika 72: Simulacija a2/b1 - Primerjava modelov turbulence (MIKE 3) po 48h (25. sloj)	61
Slika 73: Simulacija a2/b1 - Primerjava modelov turbulence (PCFLOW3D) po 48h (25. sloj)	62
Slika 74: Simulacija a2/b1 - Primerjava modelov turbulence (PCFLOW3D) po 48h (25. sloj)	63
Slika 75: Simulacija a2/b1 - Primerjava modelov turbulence (PCFLOW3D) po 48h (25. sloj)	64
Slika 76: Model MIKE 3 – površinski sloj	67
Slika 77: Model PCFLOW3D – površinski sloj	68
Slika 78: Model MIKE 3 – 10. sloj	69
Slika 79: Model PCFLOW3D – 10. sloj	69

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

$u$	komponenta hitrosti v $x$ smeri
$u_1$	komponenta hitrosti v $x$ smeri (model PCFLOW3D)
$u_2$	komponenta hitrosti v $x$ smeri (model MIKE 3)
$v$	komponenta hitrosti v $y$ smeri
$v_1$	komponenta hitrosti v $y$ smeri (model PCFLOW3D)
$v_2$	komponenta hitrosti v $y$ smeri (model MIKE 3)
$w$	vertikalna hitrost
$w_b$	komponenta hitrosti v $z$ smeri na spodnjem robu kontrolnega volumna
$w_t$	komponenta hitrosti v $z$ smeri na spodnjem robu kontrolnega volumna
$h$	debelina posameznega sloja
$f = 2\omega \sin \varphi$	parameter Coriolisove sile, kjer je $\omega$ kotna hitrost zemlje in $\varphi$ zemljepisna širina
$t$	čas
$p_a$	atmosferski tlak
$z_s$	višina vodne gladine
$N_h$	koeficient horizontalne turbulentne viskoznosti
$N_v$	koeficient vertikalne turbulentne viskoznosti
$\rho$	gostota
$T_{wx}$	strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v $x$ smeri
$T_{wy}$	strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v $y$ smeri
$T_{bx}$	strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v $x$ smeri
$T_{by}$	strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v $y$ smeri
$N$	število horizontalnih slojev, gledano v $z$ smeri
$h_a$	gladina vode v površinskem sloju
$T$	temperatura
$s$	slanost
$D_h$	koeficient vertikalne turbulentne difuzije
$D_v$	koeficient horizontalne turbulentne difuzije
$R$	penetracija kratkovalovnega sevanja preko vodne gladine
$C_p$	specifična toplota
$\Delta x, \Delta y$	dimenzije kontrolnega volumna
$C_{smaH}$	brezdimenzijski koeficient Smagorinsky, ki se določa empirično
$C$	koncentracija poljubnega nekonservativnega polutanta
$x, y, z$	koordinatne smeri
$SRC$	izvorno/ponorni člen
$D$	difuzijski koeficient
$W_s$	hitrost usedanja delcev plavin (sedimentacijska hitrost)

$\nu_T$	turbulentna viskoznost
$\Delta s$	koraki mreže (dimenzije celice v horizontalni smeri)
$C_{sm}$	Smagorinsky-jev koeficient
$c'_u$	empirična konstanta, ki je določena iz poskusov
$k$	turbulentna kinetična energija
$l$	dolžinsko merilo
$\beta$	koeficient volumenskega raztezanja vode
$\phi$	vzgon (skalar)
$c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, c_{3\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_t, c_\mu$	empirične konstante
$g$	gravitacija
$\rho$	gostota
$\sigma_T$	Prandtl-ovo število

## 1 UVOD

Predmet modeliranja je Tržaški zaliv (slika spodaj, NASA). Tržaški zaliv je plitev zaliv v skrajnem severnem delu Jadranskega morja. Je del Beneškega zaliva, ki si ga delijo Italija, Slovenija in Hrvaška. Njegova površina je približno 600 km<sup>2</sup>, največja globina je 25 m in povprečna globina 16 m. Z izjemo nizkih otočkov, ki zapirajo Gradeško laguno na italijanski strani, v njem ni otokov in čeri. Vzhodna obala, kjer leži Trst in Slovensko primorje, je razčlenjena, najgloblje so vrezani Miljski, Koprski in Piranski zaliv. V zaliv se izlivajo vodotoki Soča, Timav, Rižana in Dragonja (Wikipedija, 2007).



Tržaški zaliv in Slovensko primorje (NASA)

Matematični modeli se v vodnem okolju uporabljajo že dlje časa za simulacije hidrodinamike, transporta, vplivov onesnaženja na okolje itd. V diplomski delu smo se ukvarjali predvsem z modeliranjem hidrodinamike, torej s hidrodinamičnim modulom matematičnih modelov cirkulacije. Rezultati simulacij hidrodinamike lahko služijo kot vhodni podatek za nadaljnje modeliranje (npr. ekologija – dolgotrajni biogeokemični procesi, širjenje polutantov ob nesrečah, ipd.) Simulacije cirkulacije so torej pomembne tudi za poznavanje širjenja odpadnih snovi ter poznavanja procesov v primeru npr. anoksičnega stanja na dnu Tržaškega zaliva. V izrazito večdimenzionalnih območjih, kot so oceani, pa tudi v priobalnih območjih, kjer je močan vpliv advekcije, disperzije in stratifikacije, 1D in 2D modeli niso primerni za simulacije, zato se je pojavila potreba po uporabi 3D modelov. Oceani in priobalna morska območja so razmeroma velika in advekcijski transport zaradi tokov je preveč pomemben, da bi lahko opisali pojave z 0- ali 1D modelom. Predvsem za opisovanje procesov, ki so izrazito neenakomerni po globini, je primerna samo uporaba 3D modela. Modeli so uporabno orodje tudi pri načrtovanju meritev, saj lahko z njihovo pomočjo določimo ustrezen načrt lokacij in terminov meritev vseh pomembnih parametrov, ki jih nato uporabimo kot vhodne podatke za modeliranje (Rajar in sod., 2000; Rajar in sod., 2004a).

Na Katedri za mehaniko tekočin se že od leta 1985 razvija in v praksi uporablja tridimenzionalni model PCFLOW3D. Uporabljen je bil pri številnih študijah hidrodinamike toka in transporta ter disperzije polutantov tako pri nas kot v tujini (Rajar in Četina, 1997a; Rajar, 2000; Rajar in sod., 2007). Tudi model MIKE 3, razvit na Danskem hidravličnem inštitutu (DHI), je rezultat 20 letnega nenehnega izboljševanja in pridobivanja izkušenj na številnih področjih uporabe in aplikacijah po vsem svetu (DHI, 2007f). Oba modela z dodatnimi moduli predstavljata tako imenovani celostni ekološki matematični model. Namenjena sta za preučevanje hidrodinamičnih, transportno-disperzijskih in biogeokemičnih procesov v večjih vodnih telesih, npr. jezerih in morjih, kjer so običajno horizontalne komponente hitrosti za red velikosti večje od vertikalnih komponent.

Pri preučevanju omenjenih procesov se vse bolj uveljavlja interdisciplinarni pristop, ki upošteva tudi socialno-ekonomske vidike in ki posledice dogajanja vrednoti po različnih scenarijih (Rajar in sod., 2000; Horvat in sod., 1999). Za izvedbo in vrednotenje le-teh pa potrebujemo dobro podlago, ki jo dobimo s kombinirano uporabo meritev in matematičnih modelov. Osnova za simulacije procesov v vodnem okolju pa ostaja cirkulacija. Tudi v Tržaškem zalivu je simulacija hidrodinamike že desetletja predmet različnih raziskav, ki pogosto potekajo tudi v obliki mednarodnih projektov. V zadnjih dveh desetletjih je bilo za območje Tržaškega zaliva izdelanih več študij, v katerih so bili uporabljeni matematični modeli cirkulacije.

Rajar in Četina (1990) sta modelirala vpliv plime in vetra na tok in disperzijo v Severnem Jadranu. Za verifikacijo modela so bile uporabljene meritve, opravljene v letih 1984-1986. Ujemanje rezultatov je bilo relativno dobro. Z istim 3D modelom je bil simuliran tok, ki ga povzročita veter ter transport in disperzija vode reke Pad v severnem Jadranu. Istega leta so tudi italijanski strokovnjaki z numeričnim modeliranjem preučili transport in difuzijo radionuklidov v Tržaškem zalivu (Longo, Raicich in Mosetti, 1990). Tudi tu so kot vzrok cirkulacije upoštevali veter in plimo.

Na osnovi 3D modela, ki je bil uporabljen pri simulacijah v Severnem Jadranu, je bil izdelan 3D model SIMON (SImulacijski MOdel Nafta) za simulacijo širjenja nafte (Žagar, 1994). Rezultati modeliranja razlitja nafte v Tržaškem zalivu so bili objavljeni naslednje leto (Rajar in sod., 1995a; Rajar in sod., 1995b). Rezultati 3D modela so se dobro ujemali z rezultati 2D metod, za primerjavo pa je bil uporabljen tudi model MIKE-SAW (Spill Analysis Workstation) Danskega hidravličnega inštituta.

Širca (1996) je razvil 2D model za račun transporta in disperzije živega srebra STATRIM, kjer je tokove v Tržaškem zalivu računal z modeloma MIKE-2 (DHI) in LMTe-2D (FGG). 2D model STATRIM je obravnaval le stacionarno nestratificirano stanje in ni podrobneje opisoval dnevne in letne dinamike cirkulacije Tržaškega zaliva.

V naslednjih letih je bil modeliran vpliv vetra na povprečno cirkulacijo in dolgotrajno disperzijo onesnažil v Tržaškem zalivu (Širca in Rajar, 1997b). Preverjena je bila uspešnost in uporabnost dveh metod (metodi VERANDA in VECTRA). Izkazalo se je, da sta obe metodi dovolj natančni za uporabo. Izvedeno je bilo tudi dodatno umerjanje 2D modela transporta živega srebra STATRIM (Širca in Rajar, 1997a). V simulacijah je bil upoštevan povprečni letni veter.



Rajar in Četina (1997a) ter Rajar in sod. (1997b) so predstavili modeliranje hidrodinamike in kvalitete vode v dveh prispevkih, kjer je opisan model PCFLOW3D ter predstavljeni rezultati modeliranja Bohinjskega jezera in dveh simulacij v Tržaškem zalivu, razlitja nafte in transporta in disperzije živega srebra.

Rajar in sod. (1998) in Žagar in sod. (1998) so modelirali transport živega srebra v Tržaškem zalivu z 2D in 3D modeli, naslednje leto pa so naredili študijo o onesnaženju z živim srebrom v vodnem okolju ter študijo o transportu živega srebra in njegovem vplivu na Tržaški zaliv. Istega leta je bila ocenjena tudi prva masna bilanca živega srebra v Tržaškem zalivu (Širca in sod., 1999a) ter transport živega srebra v Tržaškem zalivu (Širca in sod., 1999b), Horvat in sod. (1999) pa so predstavili preučevanje posledic onesnaženja z živim srebrom na močno onesnaženih priobalnih območjih. Pri vseh navedenih študijah je bila cirkulacija na območju Tržaškega zaliva izračunana z 2D in 3D modeli, razvitimi na FGG.

V doktorski disertaciji je Žagar (1999) predstavil nadgraditev tridimenzionalnega baroklinega matematičnega modela PCFLOW3D z novima 3D moduloma za račun transporta lebdječih plavin in živega srebra v morskem okolju. Kot verifikacija sedimentacijskega modula je bila izvedena primerjava z rešitvami analitičnih enačb, meritev v laboratoriju in naravi ter rezultati sorodnega modela. Tokrat je bila cirkulacija modelirana nestacionarno po sezonah in zaradi uporabe 3D modela je bilo mogoče simulirati stratificirano stanje.

Potrebo po večdimenzionalnem modeliranju tokov in uporabi modelov cirkulacije pri simulacijah v morju je podrobneje predstavil Rajar (2000). Podani so tudi primeri računa cirkulacije Sredozemlja in Tržaškega zaliva.

Rajar in sod. (2000) so opisali izvedeno 3D modeliranje kroženja živega srebra v Tržaškem zalivu na osnovi modela PCFLOW3D, Žagar in sod. (2000 in 2001) pa dolgotrajno 3D simulacijo transporta in disperzije živega srebra v raztopljeni in na delce vezani obliki, prav tako na primeru Tržaškega zaliva. V 3D modelu so upoštevali gibanje vode zaradi vpliva vetra, plimovanja in gibalne količine rek, ki vtekajo v zaliv ter stratifikacijo. Za verifikacijo in umerjanje modela so uporabili meritve in opazovanja iz let 1995 – 1997. Doseženo je bilo kvalitativno dobro ujemanje rezultatov in meritev.

Brecelj (2002) je izdelal uporabniški vmesnik za model PCFLOW3D ter ga preizkusil. Program PCFLOW3D je z vmesnikom pridobil na prijaznosti do uporabnika, vendar pa je vmesnik že zastarel. Model PCFLOW3D se namreč ves čas spreminja, uporabniški vmesnik pa ne sledi posodobitvam modela.

Crise, Querin in Malačič (2002) so predstavili študijo o vetrni cirkulaciji Tržaškega zaliva v stratificiranih razmerah. Preučili so cirkulacijo Tržaškega zaliva na primeru močne burje. Raziskave so bile narejene najprej z idealnimi in nato z realnimi pogoji. V idealnih razmerah so predpostavili stacionaren veter, močno burjo, pri realnih pa tudi vpliv gostotnega gibanja. Rezultati študije so se dobro ujemali z meritvami, ki so bile izvršene junija leta 2002. Ugotovljeno je bilo, da burja odnaša sladko vodo proti sredini zaliva. Preverjena je bila tudi občutljivost numeričnih rešitev na vpliv vetra.

Naslednje leto sta Malačič in Petelin (2003) izvedla numerično simulacijo zimske cirkulacije v Tržaškem zalivu. Model ACOAST - 1.2, ki temelji na modelu POM (Princeton Ocean Model), je dal dobre rezultate cirkulacije v zimskih razmerah, ko je burja prevladujoč veter.

Izvedla sta tri numerične simulacije z različnimi začetnimi in robnimi pogoji. Vsi so pokazali, da iz površinskih slojev voda izteka iz zaliva, v globljih slojih pa doteka v zaliv. Gradienti temperatur in slanosti in posledični vertikalni tokovi pa imajo vpliv na dejansko, kompleksno sliko cirkulacije. Istega leta sta Zavatarelli in Pinardi (2003) predstavila metode modeliranja v Jadranskem morju s 3D modelnimi orodji, kjer so numerične mreže gnezdene v treh nivojih (celo Sredozemsko morje, celo Jadransko morje in Severni Jadran).

Rajar in sod. (2004a in 2004b) so izvedli simulacijo 3D kroženja živega srebra na priobalnih območjih (Tržaški zaliv in zaliv Minamata na Japonskem), kjer so cirkulacijo na posameznih definicijskih območjih ponovno računali z modelom PCFLOW3D.

Naslednje leto sta bila ponovno simulirana transport in disperzija živega srebra z modelom PCFLOW3D v Tržaškem zalivu za obdobje nekajdnevnega močnega vetra v zimskih razmerah (Rozman, 2005). Pri tem je bil poudarek na primerjavi modelov turbulence, razlike pa so bile minimalne, saj so bili vsi računi izvedeni v zimskih razmerah. Galuf (2005) je v diplomski nalogi predstavil simulacijo razlitja nafte v Tržaškem zalivu s prenovljenim modelom SIMON2, Žagar (2005) pa simulacije transporta in disperzije živega srebra v vodnem okolju, modelirano je bilo celo Sredozemlje.

Pri ekspertizi čezmejnega vpliva načrtovanih plinskih terminalov (Četina in sod., 2006) se je ponovno izkazalo, da le 3D modeliranje cirkulacije ustreza za določitev nadaljnjih parametrov transporta in ekološkega modeliranja v priobalnih območjih, uporabljen je bil model PCFLOW3D. Podroben opis sprememb na modelu (dodatni modeli turbulence) in primerjavo simulacij z modelom Cormix je podala Kovšca (2007).

Z izpopolnjenim modelom PCFLOW3D je bila izvedena še študija hidrodinamike s časovno spremenljivim vetrom (Ramšak, 2006; Ramšak, 2007), ki je služila kot podlaga za ovrednotenje izmenjave živega srebra med vodo in zrakom na območju Tržaškega zaliva. Kot zadnja študija hidrodinamike v Tržaškem zalivu je bila preverjena možnost uporabe modela MIKE 3 za simulacije hidrodinamike v Tržaškem zalivu (Dorić, 2007). Tudi model PCFLOW3D je bil v zadnjem letu še posodobljen. Zadnje posodobitve in modeliranje cirkulacije ter transporta in pretvorb živega srebra v Sredozemlju so opisane v Žagar in sod. (2007) ter Rajar in sod. (2007).

Kot cilj diplomske naloge smo si zadali podrobno primerjavo rezultatov hidrodinamičnih simulacij v Tržaškem zalivu med modeloma MIKE 3 in PCFLOW3D. 3D modeli, ki jih za takšne simulacije potrebujemo so razmeroma redki, zato je vsaka možnost preizkušanja 3D modelov cirkulacije dobrodošla. Slovenija je namreč edina mediteranska država, ki še ne napoveduje dogajanja v morju, vetrno-valovnega gibanja na površini vode ter cirkulacije morja, zato je pomembno, da se raziskave teh pojavov in z njimi povezano modeliranje razširijo. Pri iskanju primernih orodij pa je pomembno spoznati čim več modelov, pridobiti izkušnje pri delu z njimi in primerjati rezultate med seboj, po možnosti pa tudi z meritvami. Kljub temu, da so na nekaj mestih v Tržaškem zalivu na voljo meritve tokov (boja MBP pred Piranom, dve boji na italijanski strani zaliva, rezultatov simulacij nismo primerjali z meritvami. Pri simulacijah tipičnih sezonskih (kvazi-stacionarnih) razmer, kakršne smo izvedli z obema modeloma, je iskanje ustreznih vremenskih pogojev, ki bi omogočali primerjavo z meritvami, težko izvedljiva naloga. Poleg tega je bil model PCFLOW3D že verificiran in validiran z meritvami (Četina, 1992; Žagar, 1999), zato smo v okviru diplomske naloge izvedli samo primerjavo rezultatov med obema modeloma.

Glavni cilj diplomske naloge je torej ugotoviti, če je model MIKE 3 primeren za tovrstne raziskave pri dejanskih oz. tipičnih razmerah v Tržaškem zalivu. V naslednjih poglavjih je kratko predstavljeno delovanje modelov MIKE 3 in PCFLOW3D ter izvedena primerjava simulacij hidrodinamike, na koncu pa so ovrednotene podobnosti in razlike med simulacijami ter podani zaključki o ujemanju rezultatov in potrebnem nadaljnjem delu.

|

## 2 OPIS MODELOV IN METOD

Osnovne značilnosti toka s prosto gladino so opisane v literaturi (Rajar, 1980; Rajar, 1999; Steinman, 1999). Tudi oba modela, PCFLOW3D in MIKE 3 sta v nadaljevanju opisana na kratko. Podrobnejši opis modelov in dosedanjega modeliranja se nahaja v literaturi, ki je bila navedena v uvodu, še posebej pa v navodilih za uporabo modelov (Četina in sod., 1999; DHI, 2007a, b, c, d, e) in literature, kjer je poleg simulacij opisan tudi razvoj modela PCFLOW3D (Četina, 1992; Rajar in Četina, 1997a, b; Rajar in sod., 2000; Kovšca, 2007). Pregled vseh vgrajenih modelov turbulence z enačbami je opisan v (Dorić, 2007).

### 2.1 Osnovne enačbe hidrodinamičnega modula

V vsakem kontrolnem volumnu definicijskega območja se na podlagi kontinuitetne in treh dinamičnih enačb ter kinematičnega robnega pogoja za vrhnji sloj izračunajo komponente hitrosti  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , tlak  $p$  ter debelina površinskega sloja  $h$ . Izračunane komponente hitrosti se v nadaljevanju uporabijo za reševanje advekcijsko-difuzijske enačbe, ki določa porazdelitev temperature in slanosti. Neenakomerna porazdelitev temperature in slanosti vpliva na gostoto vode in posredno tudi na hitrostno polje, zato se v naslednji iteraciji pri izračunu komponent hitrosti upošteva spremenjena gostota vode. Osnovne enačbe obeh modelov so:

#### Kontinuitetna enačba za posamezni sloj debeline $h$ , z izjemo površinskega

$$\frac{\partial \langle hu \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle hv \rangle}{\partial y} + w_t - w_b = 0 \quad (1)$$

pomen oznak:

- $u$        komponenta hitrosti v  $x$  smeri
- $v$        komponenta hitrosti v  $y$  smeri
- $w_b$      komponenta hitrosti v  $z$  smeri na spodnjem robu kontrolnega volumna
- $w_t$      komponenta hitrosti v  $z$  smeri na spodnjem robu kontrolnega volumna
- $h$        debelina posameznega sloja

#### Dinamične enačbe v $x$ , $y$ in $z$ smeri

V modelu PCFLOW3D so upoštewane dinamične enačbe s hidrostatično aproksimacijo, pri modelu MIKE 3 pa se lahko odločimo tudi za uporabo modela s polnimi 3D dinamičnimi enačbami računa s tremi polnimi dinamičnimi enačbami. V simulacijah smo izbrali model s hidrostatično aproksimacijo (enačbe 2, 3 in 4).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle hu \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle hu^2 \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle huv \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle huw \rangle}{\partial z} = \\ & = +fvh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hN_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hN_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( hN_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{wx} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle v^2 \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle uv \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle uw \rangle}{\partial z} =$$

$$= -fuh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hN_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hN_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( hN_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{wy} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \quad (3)$$

$$p = p_a + g \int_z^{z_s} \rho dz \quad (4)$$

Pomen oznak:

$f = 2\omega \sin \varphi$  ... Coriolisova sila, kjer je  $\omega$  kotna hitrost zemlje in  $\varphi$  zemljepisna širina

$t$  čas

$p_a$  atmosferski tlak

$z_s$  višina vodne gladine

$N_h$  koeficient horizontalne turbulentne viskoznosti

$N_v$  koeficient vertikalne turbulentne viskoznosti

$\rho$  gostota

$\tau_{wx}$  strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v x smeri

$\tau_{wy}$  strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v y smeri

$\tau_{bx}$  strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v x smeri

$\tau_{by}$  strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v y smeri

### Kinematični robni pogoj za površinski sloj

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} = - \sum_{K=1}^N \left( \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Pomen oznak:

$N$  število horizontalnih slojev, gledano v z smeri

$h_a$  gladina vode v površinskem sloju

### Advekcijsko–difuzijski enačbi

Enačbi služita za izračun časovne in prostorske porazdelitve temperature  $T$  in slanosti  $s$  (lahko tudi poljubnega polutanta), zato spadata bolj v transportno-disperzijski modul. V modelu PCFLOW3D in MIKE 3 sta upoštevani obe enačbi tudi v hidrodinamičnem modulu, saj je potrebno celoten sistem enačb reševati istočasno, ker porazdelitev temperature in slanosti vpliva na gostoto, ta pa nazaj na hidrodinamične količine, ki so končni rezultat hidrodinamičnega modula (baroklini model).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle \rho T \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \rho u T \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle \rho v T \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle \rho w T \rangle}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( hD_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hD_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( hD_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial \langle \rho R \rangle}{\rho c_p \partial z} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle \rho s \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \rho u s \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle \rho v s \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle \rho w s \rangle}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( hD_h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hD_h \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( hD_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial \langle \rho s \rangle}{\partial t} \right)_{\text{površje}} \end{aligned} \quad (7)$$

Pomen oznak:

T temperatura [°C]

s slanost

$D_h$  koeficient vertikalne turbulentne difuzije

$D_v$  koeficient horizontalne turbulentne difuzije

$R$  penetracija kratkovalovnega sevanja preko vodne gladine

$C_p$  specifična toplota

## Enačba stanja

Gostota je odvisna od porazdelitve temperature  $T$ , slanosti  $s$  in koncentracije poljubnega polutanta  $C$  (enačba stanja).

$$\rho = \rho(T, s, C) \quad (8)$$

Opisane enačbe sestavljajo hidrodinamični modul obeh modelov (s hidrostatično aproksimacijo), s katerim lahko simuliramo 3D cirkulacijo v različnih pogojih in z upoštevanjem različnih vsiljevanj (veter, plimovanje, gostotna gibanja zaradi gradientov temperatur in slanosti, gibalna količina vtokov). Spremenljiva gostota omogoča tudi simulacije stratificiranega stanja. Rezultati HD modula se lahko uporabljajo tudi kot vhodni podatki za druge module modelov.

## 2.2 Modeli turbulence

Na določitev hitrostnega polja ( $u, v, w$ ) in tlakov  $p$  ali višine vode  $h_a$  poleg robnih pogojev vpliva tudi intenzivnost turbulence. Turbulenco povzročajo strižne sile med sloji tekočine in na stiku med tekočino in obalo. Nastane kaotično stanje izraženo z mešanjem, vrtinčenjem in pulzacijami hitrosti, ki povzročajo velike izgube energije (dušenje toka). Vpliv turbulence opišemo s koeficienti turbulentne viskoznosti  $N_v$  in  $N_h$  ter koeficienti turbulentne difuzije  $D_{vT}$ ,  $D_{vs}$ ,  $D_{hT}$  in  $D_{hs}$ , ki se določijo na podlagi dodatnih enačb, s tako imenovanimi modeli turbulence. Koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije so odvisni od lastnosti toka in ne tekočine, zato so odvisni od kraja in časa v toku. Za turbulentni transport polutanta ali toplote,

je pomemben predvsem pojav difuzije, ki je posledica mikroturbulence in povzroča, da se koncentracija snovi razprši po tekočini (Četina, 1992).

Model PCFLOW3D omogoča poljubno kombinacijo horizontalnega in vertikalnega modela turbulence. Izbiramo lahko med:

- konstantno viskoznostjo (vertikalno in/ali horizontalno)
- Smagorinsky horizontalno
- Koutitas vertikalno
- Mellor-Yamada vertikalno
- Smagorinsky vertikalno

Pri modelu MIKE 3 pa izbiramo med modeli turbulence:

- konstantna viskoznost (vertikalno in horizontalno)
- model Smagorinsky (vertikalno in horizontalno)
- k model (vertikalno in horizontalno)
- k-ε model (vertikalno in horizontalno)
- k-ε model vertikalno / model Smagorinsky horizontalno.

Podrobnejši opis vseh naštetih modelov turbulence z enačbami je podan v Dorić (2007).

## 2.3 Numerične sheme

Reševanje enačb v modelih MIKE 3 in PCFLOW3D poteka po numerični metodi končnih razlik (volumnov) z definirano pravokotno mrežo v x, y in z smeri. Za diskretizacijo v posamezni smeri uporabimo izbrano numerično shemo. V modelu MIKE 3 imamo štiri možnosti:

- 3D QUICKEST-SHARP
- ULTIMATE-QUICKEST
- simple UPWIND
- polni 3D UPWIND

V modelu PCFLOW3D pa dve:

- QUICK
- HIBRIDNA

*QUICK* (Quadratic Upstream Interpolation Convective Kinematic) je kompleksnejša shema tretjega reda točnosti. Slabe lastnosti *QUICK* sheme so te, da je programiranje in določanje robnih pogojev zahtevno, ter da se pojavljajo težave s stabilnostjo. Podaljša se tudi računski čas, kar pa v zadnjem času, zaradi razvoja vse zmogljivejših računalnikov, ni več problematično. Shemi 3D QUICKEST-SHARP in ULTIMATE-QUICKEST sta zasnovani na *QUICK*u. (Kovšca, 2007; DHI, 2007e).

*HIBRIDNA* shema je kombinacija centralno-diferenčne sheme in sheme gorvodnih razlik (*UPWIND*). Prva je drugega reda točnosti, a pogosto ni primerna za računanje konvekcijskih členov v enačbah. Zato se uporablja v kombinaciji z enostavno interpolacijsko shemo prvega reda točnosti *UPWIND*, pri kateri je privzeto, da je interpolirana vrednost vmesne točke kontrolnega volumna enaka vrednosti v gorvodni točki. Numerična shema *UPWIND* nastopa

samo v primerih, ko advekcija proti toku prevlada nad difuzijo, sicer pa poteka račun po centralno-diferenčni shemi. Hibridna shema se zaradi enostavnosti in stabilnosti, tudi v primerih z bolj zapletenimi robnimi pogoji in geometrijo, še vedno veliko uporablja. Njena glavna pomanjkljivost pa je pojav numerične difuzije. Pri aproksimaciji konvekcijskih členov se v vsaki iteraciji napravi določena napaka, ki se med potekom izračuna povečuje. Napaka predstavlja določen pribitek h koeficientom turbulentne viskoznosti in difuzije, zato se gibalna količina ali kontaminant širi v večji meri kot je fizikalno realno. Pojavlja se samo pri večdimenzionalnih modelih v primeru, ko se smer toka ne ujema s smerjo ene od koordinatnih osi. Možno jo je zmanjšati z zgoščevanjem numerične mreže (Četina, 1992).

Model MIKE 3 omogoča izbiro med pravokotno in trikotno (prilagodljivo) mrežo, model PCFLOW3D pa samo pravokotno, zato smo za simulacije izbrali pravokotno mrežo pri obeh modelih.

## **2.4 Robni pogoji**

Podajanje in definicija robnega pogoja se med modeloma razlikuje.

### **Odpri rob**

Za opis dogajanja na polodprtem definicijskem območju, kot je Tržaški zaliv, je zelo pomemben vpliv odprtega roba. Pri primerjavi modelov je potrebno podati robni pogoj na odprtem robu enako ali vsaj čim bolj podobno. Oba modela imata različne možnosti opisa dogajanja na odprtem robu. Model PCFLOW3D vsebuje kontinuitetni in radiacijski robni pogoj, možnost podajanja fiksnih ali spremenljivih hitrosti in podajanje 1D ali 2D plimne krivulje. Model MIKE 3 pa omogoča na odprtem robu različne možnosti in kombinacije: podajamo potek gladine, tlakov, fiksnih ali spremenljivih vektorjev hitrosti ter plimne krivulje. Model MIKE 3 omogoča tudi podajanje slanosti in temperature izven definicijskega območja modeliranja.

### **Vtoki**

Pri obeh modelih je potrebo definirati vtočno celico, v njej pa podati vtok mase in gibalne količine. Pri modelu PCFLOW3D je potrebno podati komponenti hitrosti vtoka v x in y smeri, pretok se na osnovi dimenzij celice izračuna sam; pri modelu MIKE 3 podajamo smer in hitrost v izbrani smeri ter dotok v celico. V obeh modelih je potrebno podati tudi slanost in temperaturo vtoka.

### **Gladina**

Na gladini je potrebno podati faktor trenja vetra, ki določa, koliko energije vetra se prenese na površinski sloj vode. V obeh modelih smo uporabili vrednost koeficienta 0,002.

### **Dno**

V obeh modelih je potrebno podati Manningov koeficient trenja med podlago in vodo.



## 2.5 Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D

V preglednici 1 so predstavljene lastnosti, podobnosti in razlike med modeloma MIKE 3 in PCFLOW3D.

Preglednica 1: Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D

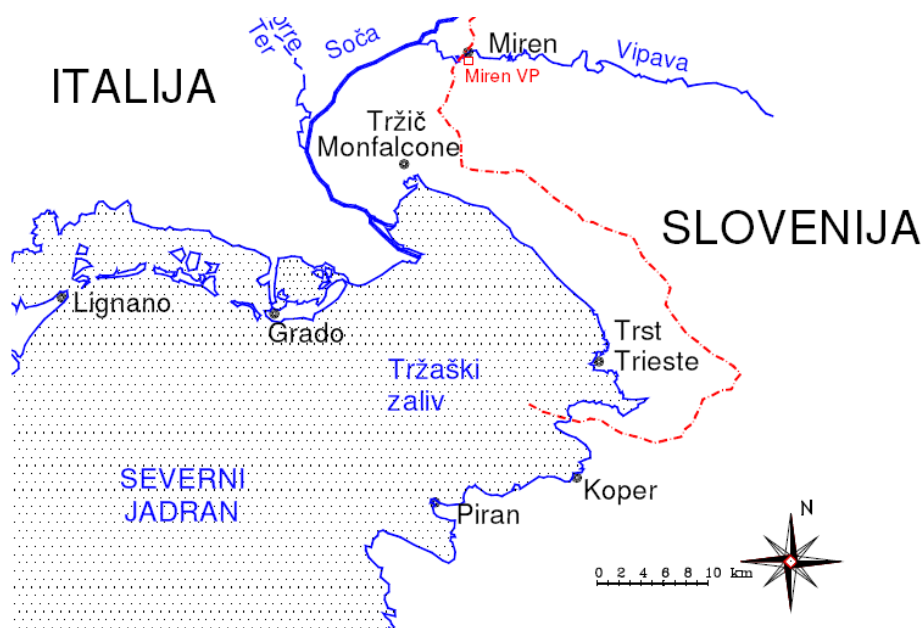
	PCFLOW3D	MIKE 3
	3D model	3D model
Moduli:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hidrodinamični</li> <li>- sedimentacijski</li> <li>- transportno – disperzijski</li> <li>- bio – geokemični</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hidrodinamični</li> <li>- sedimentacijski</li> <li>- transportno – disperzijski</li> <li>- ekološki</li> </ul>
Metoda:	- končnih razlik (volumnov)	- končnih razlik (volumnov)
Numerična shema za transportni modul:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hibridna upwind – centralno diferenčna</li> <li>- quick</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3D quickest – sharp</li> <li>- ultimate - quickest</li> <li>- simple upwind</li> <li>- fully 3D upwind</li> </ul>
Vsebovani modeli turbulence:	Poljubna kombinacija horizontalnega in vertikalnega modela: <ul style="list-style-type: none"> <li>- konstantna viskoznost vertikalno in/ali horizontalno</li> <li>- Smagorinsky horizontalno</li> <li>- Koutitas vertikalno</li> <li>- Mellor-Yamada vertikalno</li> <li>- Smagorinsky vertikalno</li> </ul>	Izbira med podanimi modeli turbulence: <ul style="list-style-type: none"> <li>- konstantna viskoznost (hor. in vert.)</li> <li>- model Smagorinsky (hor. in vert.)</li> <li>- k model (hor. in vert.)</li> <li>- k-ε model (hor. in vert.)</li> <li>- k-ε model vert./model Smagorinsky hor.</li> </ul>
Robni pogoji:	potrebno je podati komponento hitrosti v x in y smeri	podamo smer vtoka in hitrost v določeni smeri ter pretok

### 3 VHODNI PODATKI IN OPIS SIMULACIJ

Najprej smo želeli ugotoviti, kje se med modeloma pojavljajo razlike. Zato smo izvedli simulacije z upoštevanjem konstantnega koeficienta turbulentne viskoznosti (simulacije a1, a2, a3 in a4) in s tem preprečili razlike, ki bi nastale zaradi modelov turbulence. Nato smo izvajali simulacije z modeli turbulence, ki se dejansko uporabljajo pri tovrstnih simulacijah (simulacije b1, b2, b3 in b4). Na koncu smo izvedli simulacije z zgoščeno mrežo v okolici vtoka reke Soče ter podrobneje analizirali rezultate na območju vtoka (simulaciji c1 in c2).

#### 3.1 Definicija računske mreže na območju modeliranja

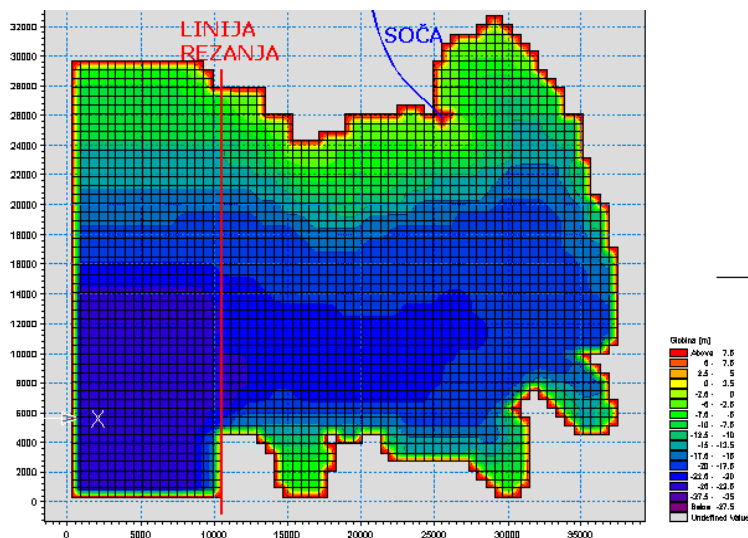
Tržaški zaliv, prikazan na spodnji sliki, ima v grobem obliko pravokotnika, tako da znašajo dimenzije računskega področja vzdolž glavnih osi 31800 m × 33000 m. Po globini smo ga razdelili na 25 slojev enakomerne debeline 1 m.



Pregledna karta Tržaškega zaliva (Širca, 1996, str. 4)

Ker so preliminarne simulacije z obema modeloma pokazale, da je vpliv različnih načinov podajanja odprtega roba vzrok za razmeroma velika odstopanja rezultatov simulacij (Dorić, 2007) smo definicijsko območje podaljšali za 17 celic (10,2 km) in rob zaprli, s čimer smo se izognili vplivu odprtega roba na simulacije. Rob je ostal odprt edino pri simulaciji cirkulacije zaradi plime.

Na sliki 1 je prikazano "podaljšano" definicijsko območje in linija, ki označuje mejo Tržaškega zaliva.



Slika 1: Podaljšano" definicijsko območje in linija rezanja.

V nadaljevanju so vse slike hitrostnih polj, temperatur in slanosti izrisane le za notranje definicijsko območje.

Prve simulacije so bile izvedene s konstantnim koeficientom turbulentne viskoznosti ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  in  $a_4$ ). Za model PCFLOW3D smo izbrali UPWIND, za model MIKE3 pa 3D UPWIND shemo. Pri simulacijah  $a_1$  (brez vpliva reke Soče) in  $a_2$  (z vplivom reke Soče) smo preverili gostotno gibanje zaradi neenakomernih T in s polj. Nato smo naredili še simulaciji  $a_3$  (brez vpliva reke Soče) in  $a_4$  (z vplivom reke Soče) v popolnoma premešanem Tržaškem zalivu z upoštevanjem močne burje. V nadaljnjih simulacijah pa smo za model PCFLOW3D izbrali UPWIND shemo in turbulentni model Mellor-Yamada v vertikalni ter Smagorinsky v horizontalni smeri, v modelu MIKE 3 pa 3D UPWIND shemo in kombiniran turbulentni model k- $\epsilon$  v vertikalni ter Smagorinsky v horizontalni smeri ( $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  in  $b_4$ ). Izvedli smo simulacijo gostotnega gibanja zaradi neenakomernih T in s polj (simulacija  $b_1$ ). V naslednji simulaciji smo kot edini vzrok gibanja upoštevali plimo ( $b_2$ ). Nato smo izvedli simulacijo v popolnoma premešanem Tržaškem zalivu z upoštevanjem močne burje ( $b_3$ ) in simulacijo v poletnih razmerah s šibkim maestralom ( $b_4$ ). Nazadnje smo še zgostili mrežo v okolici reke Soče (simulaciji  $c_1$  in  $c_2$ ) in ponovili simulacijo z gostotnim gibanjem zaradi neenakomernih T in s polj ( $c_1$ ), nato pa še simulacijo v popolnoma premešanem Tržaškem zalivu z močno burjo ( $c_2$ ).

Za simulacije a in b smo obravnavano območje razdelili na kontrolne volumne enakih dimenzij, tako da ima numerična mreža tako z modelom MIKE 3 kot z modelom PCFLOW3D dimenzije  $D_x = 600$  m in  $D_y = 600$  m. Podajanje dimenzij kontrolnih volumnov pri zgoščeni mreži pa se med modeloma razlikuje in je bilo pri simulaciji c bolj zahtevno. Za model MIKE 3 je potrebno pripraviti dodatno mrežo z dimenzijami kontrolnih volumnov  $D_x = 200$  m in  $D_y = 200$  m (tretjina dimenzije celice v osnovni mreži) in pripraviti nove podatke o globini, temperaturi in slanosti na zgoščenem območju, ki nas zanima. Za model PCFLOW3D pa smo pripravili drugo mrežo, ki je zgoščena v okolici Soče in prilagodili vhodne podatke novi mreži, kot je opisano v Četina in sod. (1999). Med fino in grobo mrežo je v modelu PCFLOW3D postopen prehod. Zato se topografija med mrežama v obeh modelih nekoliko razlikuje.

Število kontrolnih volumnov v  $x$  smeri je  $NI = 63$ , v  $y$  smeri pa  $NJ = 55$ . Po globini je skupno 25 aktivnih slojev. Skupno število slojev je v modelu PCFLOW3D 27 (zgoraj in spodaj sta po en neaktivni sloj), v modelu MIKE 3 pa jih je 26 s spodnjim neaktivnim slojem. Vsi sloji so debeline 1 m.

### 3.2 Hidrometeorološki in oceanografski podatki

Za simulacije so bili potrebni naslednji podatki: hitrost in smer vetra, temperatura, slanost in pretok Soče, temperatura in slanost v Tržaškem zalivu. V nadaljevanju so opisani vsi hidrometeorološki in oceanografski vhodni parametri za simulacije hidrodinamike.

#### 3.2.1 Soča

##### Sezonski pretoki Soče

Sezonski pretoki Soče temeljijo na meritvah, opravljenih na vodomerni postaji Solkan. Povprečni letni pretok znaša  $94 \text{ m}^3/\text{s}$ , povprečni mesečni pretoki nihajo med  $60$  in  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  v februarju in avgustu,  $110$  do  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  v maju in juniju, največji pa je v novembru ( $140 \text{ m}^3/\text{s}$ ), kar je razvidno tudi iz spodnje preglednice. V koledarskem letu se tipično pojavita dve konici, daljša spomladanska (med marcem in junijem), kot posledica padavin in taljenja snega, ter krajša, a mnogo intenzivnejša jesenska (v oktobru in novembru), ki je posledica jesenskega deževja (Širca in sod., 1999).

Mesečni in sezonski povprečni pretoki Soče (Žagar, 1999, str. 54)

Mesec	Pretoki [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]				
	Soča Solkan	Vipava Miren	$\Sigma$ Soča+ Vipava	Soča na ustju	Sezonski povprečni na ustju
Januar	72	22	94	141	
Februar	70	20	90	135	150
Marec	94	21	115	173	
April	109	20	129	194	
Maj	116	16	132	192	190
Junij	109	13	122	183	
Julij	69	9	78	117	
Avgust	59	7	66	99	120
September	82	14	96	144	
Oktober	109	20	129	194	
November	144	27	171	257	209
December	94	26	120	180	
Povp. letni	94	18	112	168	168

Med Solkanom in izlivom Soče v Tržaški zaliv dotekata v Sočo dva večja pritoka, Vipava in Ter (Torre). Podatki za Vipavo so vidni v preglednici, hidrologija italijanskega dela Soče pa je slabše raziskana, saj po razpoložljivih podatkih pretokov nihče ne meri. V spodnjem toku Soče obdelavo podatkov otežuje tudi kompleksen sistem nadzemnih in podzemnih tokov v vzhodnem delu Furlanske nižine in Krasa ob slovensko-italijanski meji. Največja neznanka v



### 3.2.2 Tržaški zaliv

#### Temperatura in slanost

Za simulacije, ki so bile izvedene v poletnih razmerah, je bilo potrebno zagotoviti podatke o porazdelitvi temperatur in slanosti v vseh točkah računske mreže. Uporabili smo temperature in slanosti, že opisane v Žagar (1999) in Ramšak (2006). Podatki so dobljeni iz meritev in interpolirani po celotnem definicijskem območju za posamezno sezono.

V simulacijah poletnih razmer (a1, a2, b1, b4, c1 in c3) smo upoštevali temperature in slanosti za mesec avgust, v simulacijah zimskih razmer (a3, a4, b2, b3 in c2) pa smo predpostavili, da je Tržaški zaliv popolnoma premešan s temperaturo 8°C in slanostjo 36.5‰.

### 3.2.3 Veter

V simulacijah zimskih razmer smo upoštevali močno burjo, ki piha iz smeri ENE (63°) z jakostjo 13 m/s. Burja je suh, mrzel in sunkovit veter v Jadranu. Nastane, ko se razvijeta dve področji zračnega pritiska nad srednjo Evropo in Jadranom ali Sredozemljem. Piha čez vse leto, predvsem pa pozimi. Lahko traja od nekaj ur (predvsem poleti), nekaj dni, pa vse do teden ali dva (predvsem pozimi). Najbolj znana območja z močno burjo so Tržaški zaliv, Kvarner, Senjska vrata, Klis, Vrulje pri Makarski (Wikipedia, 2007).

Pri simulacijah poletnih razmer smo upoštevali maestral iz smeri WNW (288°) jakosti 4 m/s. Maestral je v Jadranu prijeten, priobalni dnevni termični veter, ki piha z morja proti kopnemu, ker se kopno podnevi segreva hitreje kot morje (Wikipedia, 2007).

### 3.2.4 Plimovanje

Plimovanje je pojav nihanja vodne gladine v morjih in oceanih. Na morske mene (plima in oseka) vpliva gravitacijska sila predvsem Lune in v manjši meri Sonca. Ostali faktorji, ki vplivajo na plimo in oseko so: konfiguracija obale, lokalna globina morja, topografija morskega dna, veter in vreme. Vsi ti faktorji povečujejo ali zmanjšujejo interval nastopanja in razliko v višini (Wikipedia, 2007). Na osnovi izračunov je mogoče izdelati za vsako območje plimne tabele. Plimovanje smo upoštevali samo v eni simulaciji in sicer nihanje vodne gladine z amplitudo 0,45 m na odprtem robu, kolikor znaša povprečna zimska amplituda za Koprski zaliv, izračunana iz prognoze plimovanja ARSO (2008).

## 3.3 Simulacije

Izvedene so bile naslednje simulacije:

**a.** Numerična mreža ima dimenzije  $D_x = 600$  m in  $D_y = 600$  m. Izvedene so bile simulacije z upoštevanjem konstantnega koeficienta turbulentne viskoznosti. Horizontalni koeficient je pri vseh štirih simulacijah znašal  $5 \text{ m}^2/\text{s}$ , vertikalni pa je pri simulacijah a1 in a2  $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$ , pri

simulacijah a3 in a4 pa  $0,004 \text{ m}^2/\text{s}$ . V modelu PCFLOW3D smo uporabili UPWIND shemo, v modelu MIKE 3 pa 3D UPWIND shemo. Posamezne simulacije so obsegale:

a1. Gostotno gibanje zaradi gradientov T in s polj brez vseh zunanjih vsiljevanj, poletne temperaturne in slanostne razmere.

a2. Gostotno gibanje + vtok Soče, poletne temperaturne in slanostne razmere,

a3. Močan veter, zimske razmere, popolnoma premešan zaliv brez vpliva vtoka Soče. Burja piha z hitrostjo 13 m/s. Temperatura Tržaškega zaliva je  $8^\circ\text{C}$ , slanost pa 36,5 ‰.

a4. Močan veter + vtok Soče, zimske razmere, popolnoma premešan zaliv z dodatnim vplivom vtoka Soče. Burja piha z hitrostjo 13 m/s. Temperatura Tržaškega zaliva je  $8^\circ\text{C}$ , slanost pa 36,5 ‰.

**b.** Numerična mreža ima dimenzije  $D_x = 600 \text{ m}$  in  $D_y = 600 \text{ m}$ . V modelu PCFLOW3D smo uporabili UPWIND shemo in model turbulence Mellor-Yamada v vertikalni – Smagorinsky v horizontalni smeri, v modelu MIKE 3 pa 3D UPWIND shemo in kombinirani model turbulence k- $\epsilon$  v vertikalni – Smagorinsky v horizontalni smeri.

b1. Gostotno gibanje + vtok Soče, poletne temperaturne in slanostne razmere,

b2. Plimovanje + vtok Soče v zimskih razmerah. Popolnoma premešan zaliv, temperatura je  $8^\circ\text{C}$ , slanost pa 36,5 ‰. Plimovanje ima amplitudo 45 cm.

b3. Močan veter + vtok Soče, upoštevali smo močan zimski veter na popolnoma premešanem zalivu. Burja piha z hitrostjo 13 m/s. Temperatura Tržaškega zaliva je  $8^\circ\text{C}$ , slanost pa 36,5 ‰.

b4. Šibak veter + vtok Soče, upoštevan je maestral hitrosti 4 m/s, v zalivu so poletne temperaturne in slanostne razmere.

**c.** Numerična mreža ima dimenzije  $D_x = 600 \text{ m}$  in  $D_y = 600 \text{ m}$ . V okolici Soče je mreža zgoščena na dimenzije  $200 \times 200 \text{ m}$ . V modelu PCFLOW3D smo uporabili UPWIND shemo in model turbulence Mellor-Yamada v vertikalni – Smagorinsky v horizontalni smeri, v modelu MIKE 3 pa 3D UPWIND shemo in kombinirani model turbulence k- $\epsilon$  v vertikalni – Smagorinsky v horizontalni smeri.

c1. Gostotno gibanje + vtok Soče, poletne temperaturne in slanostne razmere,

c2. Močan veter + vtok Soče, zimske razmere. Upoštevali smo močan zimski veter na popolnoma premešanem zalivu. Burja piha z hitrostjo 13 m/s. Temperatura Tržaškega zaliva je  $8^\circ\text{C}$ , slanost pa 36,5 ‰.

V preglednicah 3 in 4 so podrobno prikazani podatki, ki so bili uporabljeni v posameznih simulacijah.

Preglednica 3: Numerična shema in turbulentni model v posameznih simulacijah

Sim.	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2
Dim. num. Mreže	X	600m				600m			200m – 600m	
	Y	600m				600m			200m – 600m	
Turb. model	x, y	Konstantna viskoznost			Smagorinsky			Smagorinsky		
		5 m <sup>2</sup> /s	5 m <sup>2</sup> /s							
Z	Konstantna viskoznost			MIKE 3: k-ε PCFLOW3D: Mellor-Yamada	MIKE 3: k-ε PCFLOW3D: Mellor-Yamada			MIKE 3: k-ε PCFLOW3D: Mellor-Yamada		
	0,001 m <sup>2</sup> /s	0,004 m <sup>2</sup> /s								
Trajanje sim. [h]	48	48	24	24	48	48	24	48	48	24
Num. shema	MIKE 3: 3D upwind PCFLOW3D: upwind									



Preglednica 4: Hidrometeorološki in oceanografski podatki v posameznih simulacijah

Sim.	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2
Veter	Jakost [m/s]	/	/	13	/	/	13	4	/	13
	Smer	/	ENE 63°	ENE 63°	/	/	ENE 63°	WNW 288°	/	ENE 63°
Gost.	Temp.	pol	zim	zim	pol	zima	zim	pol	pol	zim
	Slan.	pol	zim	zim	pol	zim	zim	pol	pol	zim
Vtok reke Soče	Pretok [m <sup>3</sup> /s]	/	/	150	120	150	15	120	120	150
	hitr. (m/s) MIKE3 (108°)	/	/	0,177	0,141	0,177	0,177	0,141	0,423	0,531
Vplov Coriol. Koef.	hitr. (m/s) PCFLO W3D	/	/	u = 0,125 v = -0,125	u = 0,1 v = -0,1	u = 0,125 v = -0,125	u = 0,125 v = -0,125	u = 0,1 v = -0,1	u = 0,3 v = -0,3	u = 0,375 v = -0,375
	temp. [°C]	/	/	7,7	16,3	7,7	7,7	16,3	16,3	7,7
Plima	slan. [%o]	/	/	17	17	17	17	17	17	17
	Vplov Coriol. Koef.	J	J	J	J	J	J	J	J	J
Plima	Amplituda	/	/	/	/	45 cm	/	/	/	/
	Amplituda	/	/	/	/	45 cm	/	/	/	/

## 4 PREDSTAVITEV IN ANALIZA REZULTATOV

### 4.1 Kriteriji za ocenjevanje primerjave rezultatov med modeloma

Rezultate smo preverili vizualno, pa tudi numerično s spodaj opisano metodo. Pri analizi velikega števila grafičnih slik je težko objektivno oceniti odstopanje vektorjev, posebej še pri vektorjih različnih dolžin. Zato smo numerično ovrednotili odstopanje vektorjev hitrosti v horizontalni smeri po metodi korena normaliziranih kvadratov odstopanj (RMS normalised; RMSN), pri čemer velja:

$$\text{RMSN} = \sqrt{\frac{\sum (u_1 - u_2)^2 + \sum (v_1 - v_2)^2}{\sum (u_1^2 + v_1^2)}} \quad (9)$$

$u_1$  ... komponenta hitrosti v  $x$  smeri (model PCFLOW3D)

$u_2$  ... komponenta hitrosti v  $x$  smeri (model MIKE 3)

$v_1$  ... komponenta hitrosti v  $y$  smeri (model PCFLOW3D)

$v_2$  ... komponenta hitrosti v  $y$  smeri (model MIKE 3)

Kriteriji, po katerih smo ocenjevali ujemanje rezultatov obeh modelov, so izbrani po predhodni vizualni primerjavi ujemanja vektorjev hitrosti in so prikazani v preglednici 5.

Preglednica 5: Kriteriji za ocenjevanje primerjave rezultatov

VREDNOST	OCENA
$\text{RMSN} < 0,20$	Odlično
$0,20 < \text{RMSN} < 0,40$	Dobro
$0,40 < \text{RMSN} < 0,60$	Sprejemljivo
$\text{RMSN} > 0,60$	Slabo

Pri vsaki simulaciji je tako podana numerična ocena ujemanja v skladu z navedenimi kriteriji in vizualni opis značilnih razlik med modeli. Za lažjo predstavo in opis, kje se pojavljajo razlike, smo definicijsko območje razdelili na več kvadratov.

## 4.2 Hitrost računa

Preverili smo, kateri model je časovno primernejši za simulacije. Najprej smo primerjali simulaciji s konstantnim koeficientom turbulentne viskoznosti, nato pa še simulaciji z različnimi modeli turbulence. Izkazalo se je, da je pri obeh primerih model MIKE 3 več kot 6x hitrejši (preglednica 6).

Preglednica 6: Hitrost računa

	PCFLOW3D	MIKE 3
Hitrost računa simulacije a1	-časovni korak: 10 s -čas simulacije: 48 h -število računskih celic: 39042	
	čas računanja: 6,3 h	čas računanja: 0,9 h
		6,9 x hitrejši
Hitrost računa simulacije b1	-časovni korak: 10 s -čas simulacije: 48 h -število računskih celic: 39042	
	čas računanja: 8,5 h	čas računanja: 1,4 h
		6,2 x hitrejši

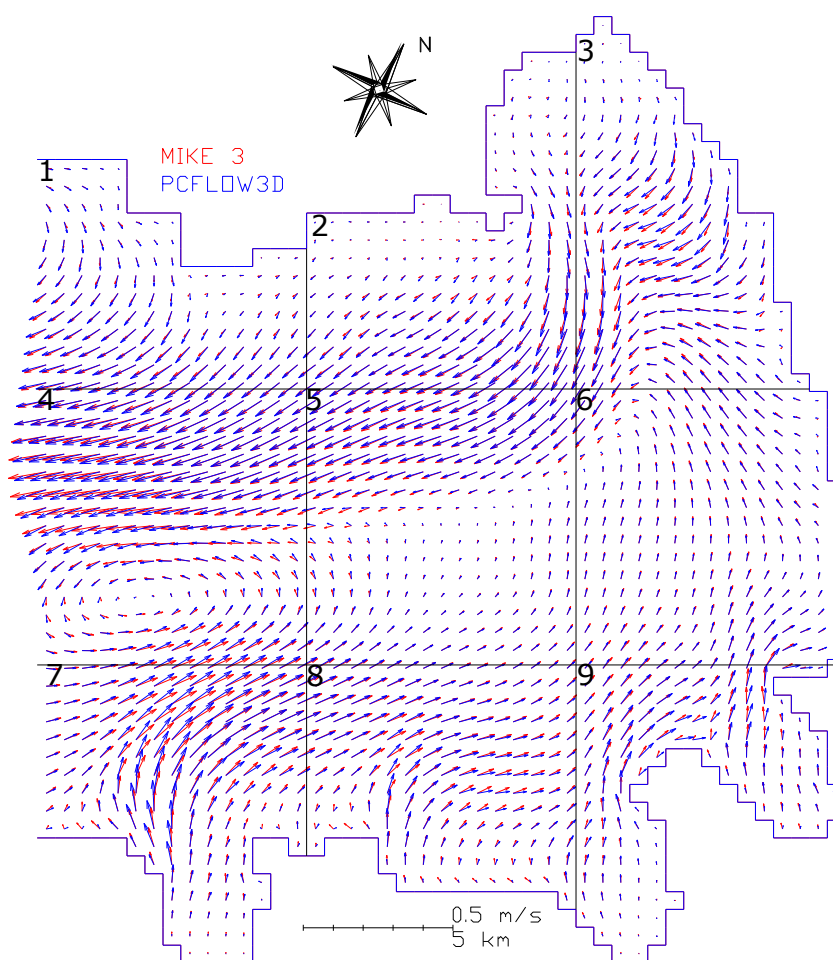
## 4.3 Rezultati simulacij

### 4.3.1 Enakomerna mreža z modelom konstantne viskoznosti

- a. Numerična mreža ima dimenzije  $D_x = 600$  m in  $D_y = 600$  m. Izvedene so bile simulacije s konstantnim koeficientom turbulentne viskoznosti. Na ta način smo preverili, kakšne so razlike med modeloma, če upoštevam enake vhodne podatke za oba modela.

#### Simulacija a1:

25. sloj:

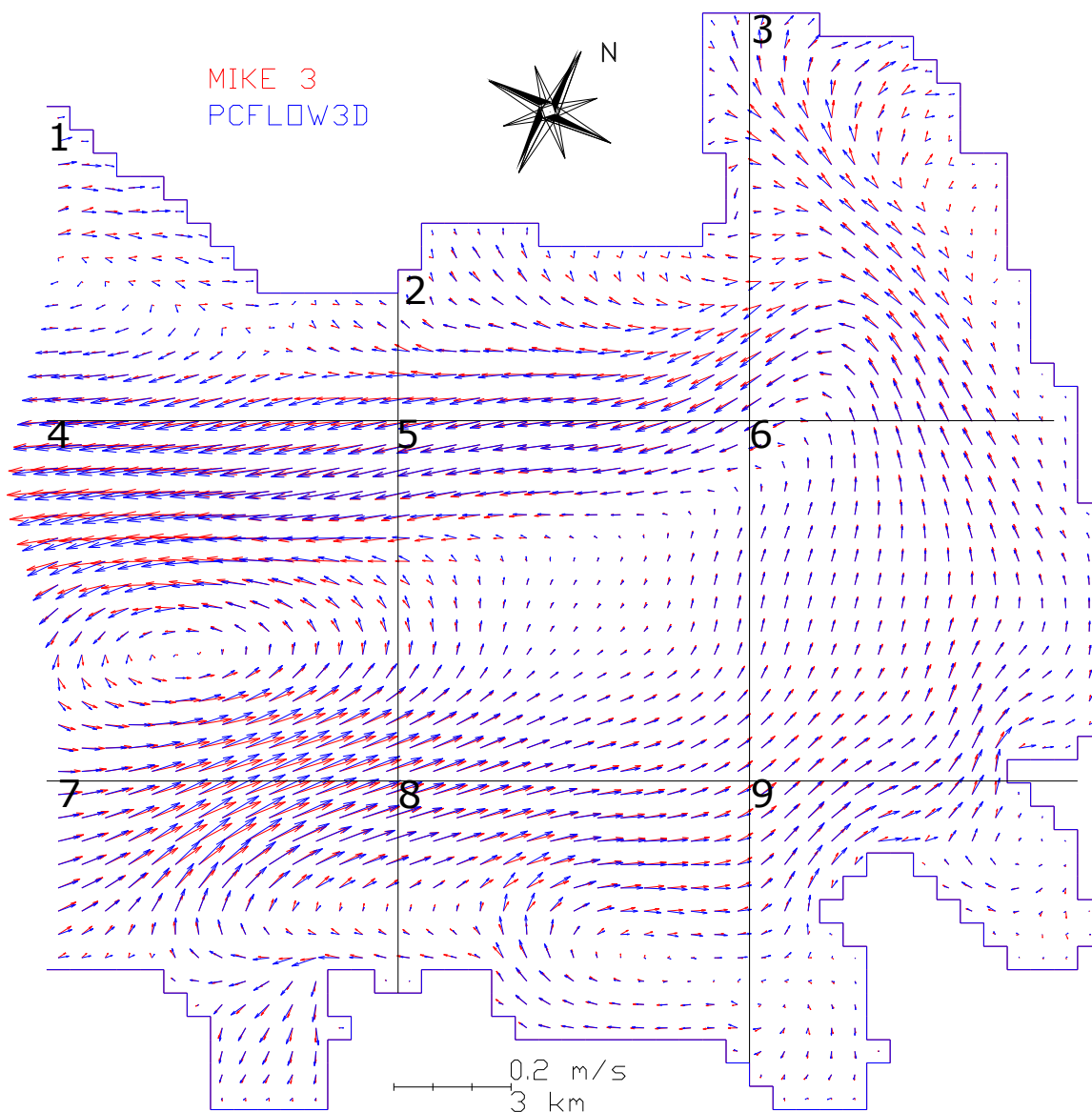


Slika 2: Simulacija a1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,195 (odlično)

Iz slike 2 je razvidno, da bistvenih razlik med modeloma ni, tako v smeri in velikosti vektorjev hitrosti (slika 2) kot pri porazdelitvi temperatur in slanosti (slike 4 – 11). V površinskem sloju se pojavljajo manjše razlike med modeloma v smeri vektorjev hitrosti v sedmem kvadratu. Pri obeh modelih sovpadajo območja s hitrejšim in počasnejšim tokom pa tudi vrtinca v četrtem kvadratu sta na popolnoma istem mestu .

20. sloj:



Slika 3: Simulacija a1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)

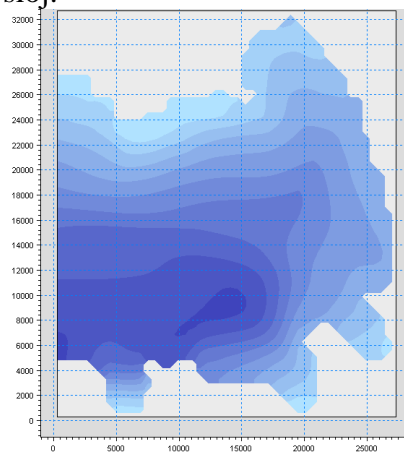
RMSN = 0,230 (dobro)

Tudi 5,5 m pod površjem (slika 3) ni bistvenih razlik v hitrostnih poljih med obema modeloma. V prvem, drugem in tretjem kvadratu se pojavijo manjše razlike med modeloma v smeri vektorjev hitrosti. Vrtinca v četrtem kvadratu sta še vedno na istem mestu.

### MIKE 3

#### Temperatura:

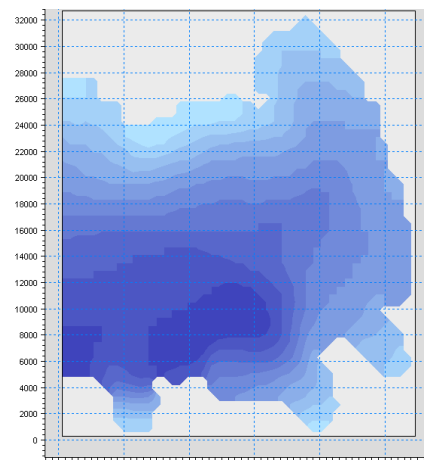
25. sloj:



Slika 4: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji a1 po 48h (MIKE 3)

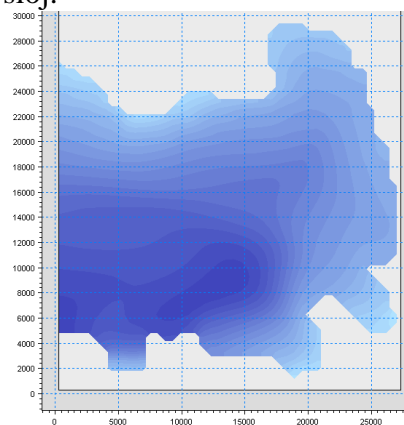
### PCFLOW3D

#### Temperatura:

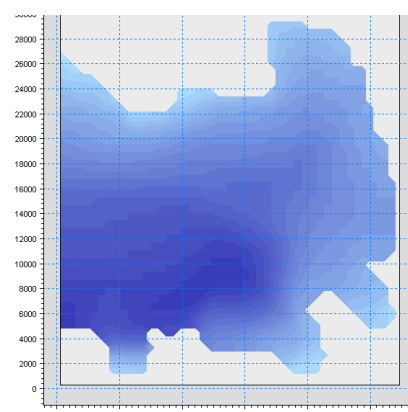
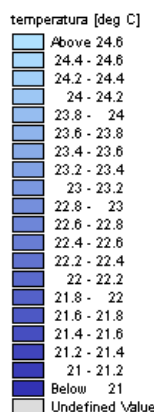


Slika 7: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji a1 po 48h (PCFLOW3D)

20. sloj:



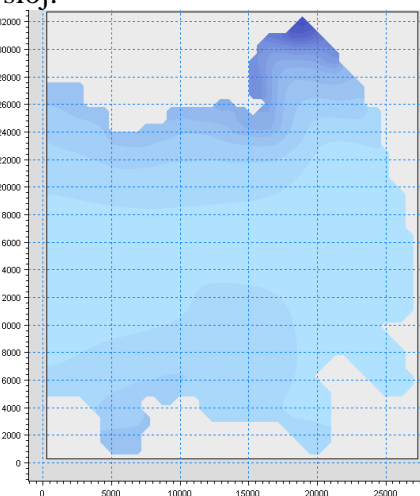
Slika 5: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji a1 po 48h (MIKE 3)



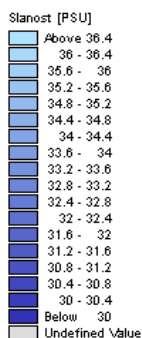
Slika 8: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji a1 po 48h (PCFLOW3D)

#### Slanost:

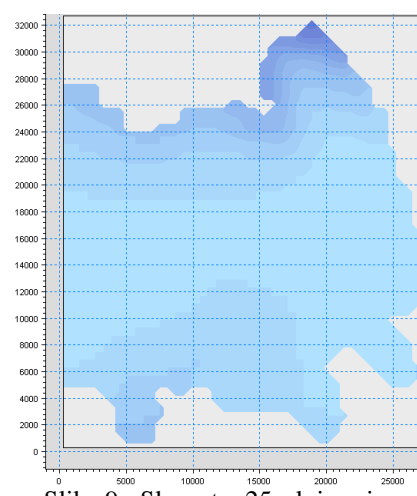
25. sloj:



Slika 6: Slanost v 25. sloju pri simulaciji a1 po 48h (MIKE 3)

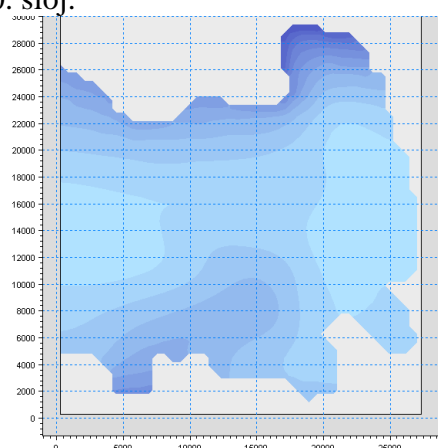


#### Slanost:

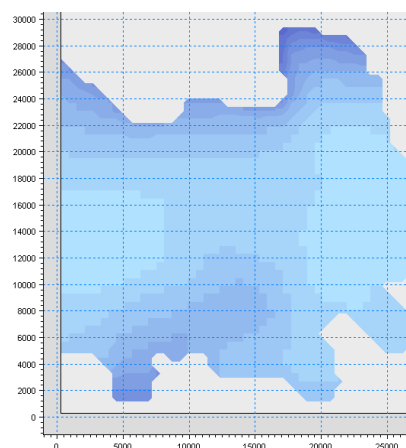
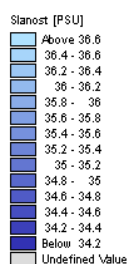


Slika 9: Slanost v 25. sloju pri simulaciji a1 po 48h (PCFLOW3D)

20. sloj:



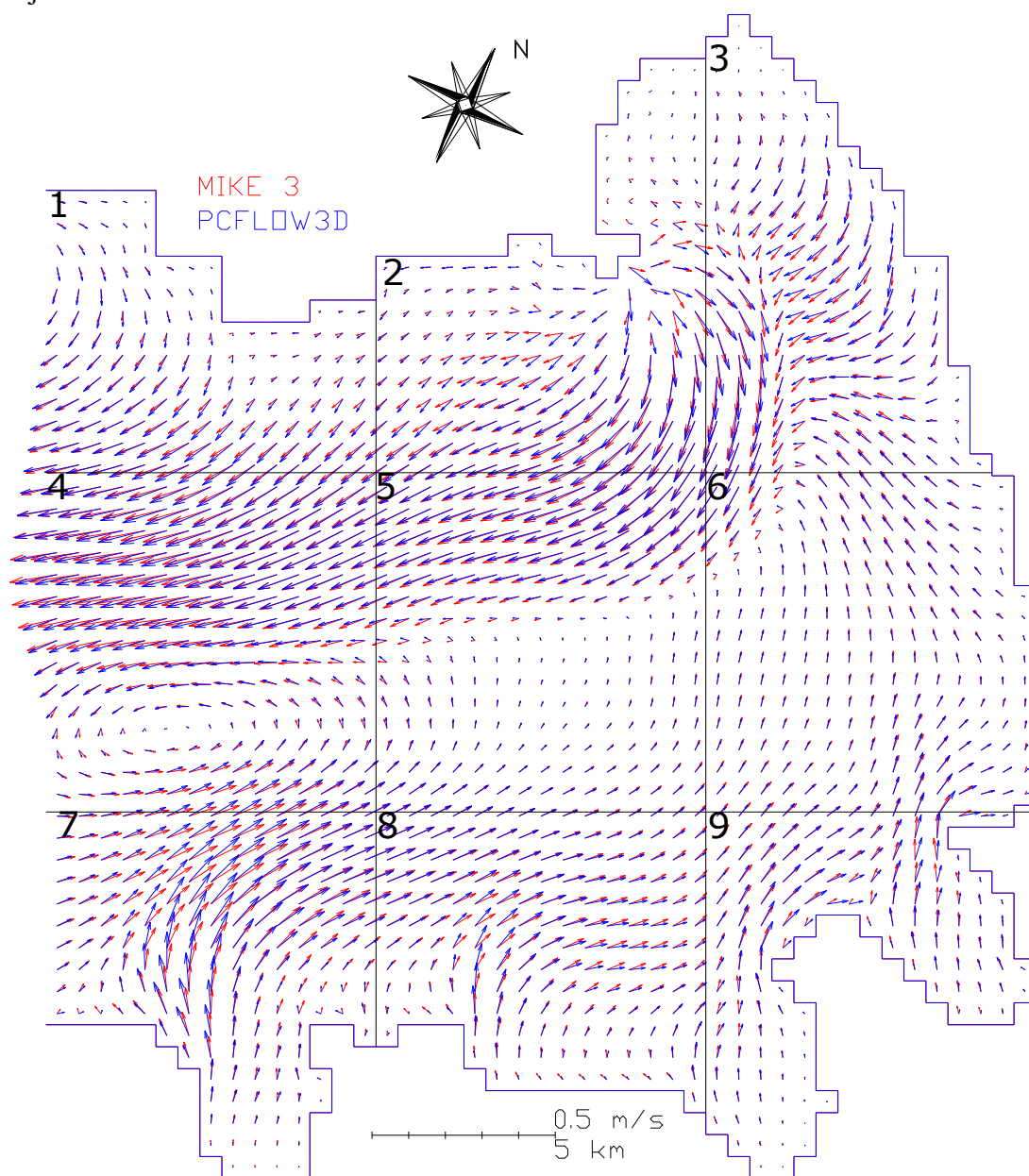
Slika 10: Slanost v 20. sloju pri simulaciji a1 po 48h (MIKE 3)



Slika 11: Slanost v 20. sloju pri simulaciji a1 po 48h (PCFLOW3D)

## Simulacija a2:

25. sloj:



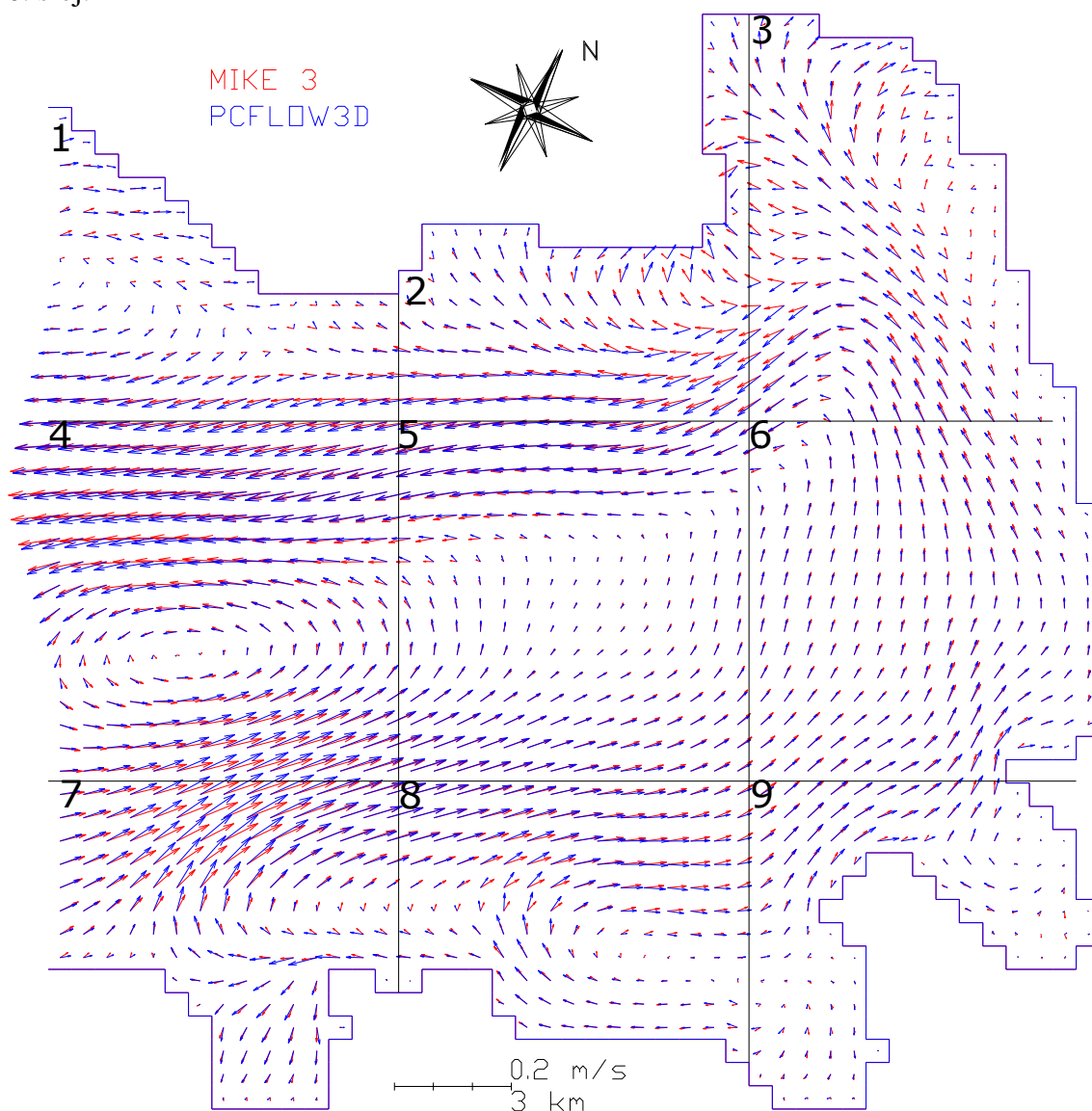
Slika 12: Simulacija a2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,202 (dobro)

Nekoliko večje razlike med modeloma se pojavljajo v površinskem sloju (slika 12) v drugem in tretjem kvadratu v okolici vtoka reke Soče. Te razlike nastanejo zaradi različnega načina upoštevanja dotokov. Tok povzroči pri modelu MIKE 3 nekoliko večji odklon vektorjev hitrosti na severni strani vtoka kot pri modelu PCFLOW3D. V sedmem kvadratu nastanejo manjše razlike v smeri vektorjev. Vrtinca v četrtem kvadratu sta pri obeh modelih na istem mestu. V okolici Soče opazimo večjo razpršitev temperature in slanosti z modelom PCFLOW3D kot z modelom MIKE 3 (slike 14 - 21).



20. sloj:



Slika 13: Simulacija a2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)

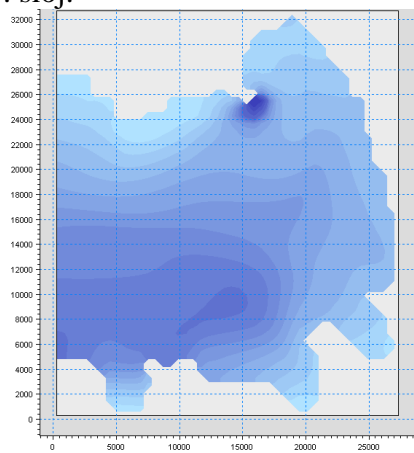
RMSN = 0,232 (dobro)

Tudi 5,5 m pod gladino (slika 13) se pojavljajo razlike med modeloma v drugem in tretjem kvadratu zaradi različnega načina upoštevanja dotokov. Pojavijo se tudi nekoliko večje razlike v smeri vektorjev hitrosti v sedmem kvadratu.

### MIKE 3

#### Temperatura:

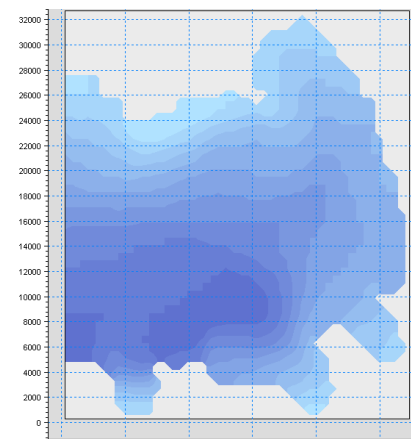
25. sloj:



Slika 14: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji a2 po 48h (MIKE 3)

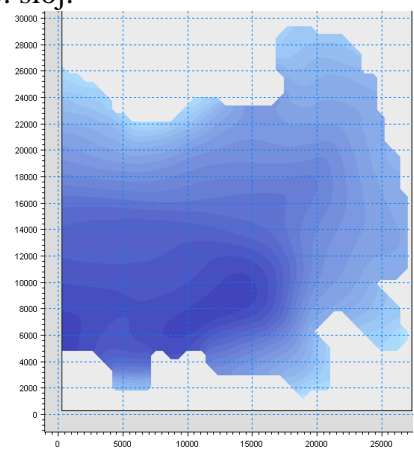
### PCFLOW3D

#### Temperatura:

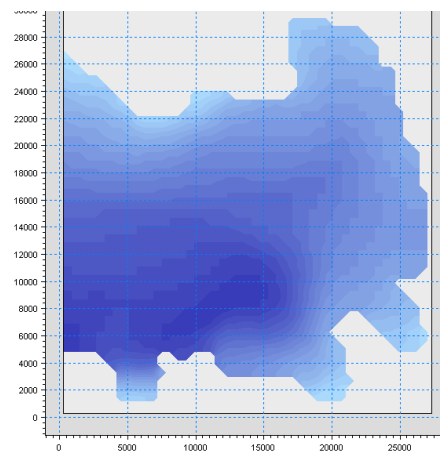


Slika 17: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji a2 po 48h (PCFLOW3D)

20. sloj:



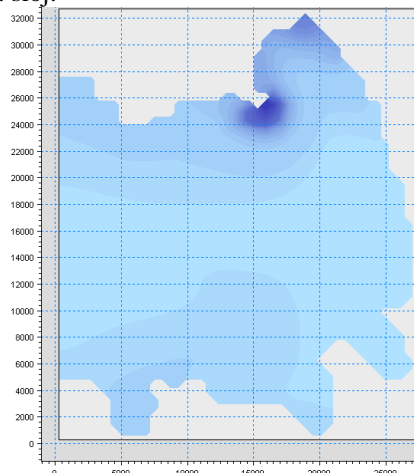
Slika 15: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji a2 po 48h (MIKE 3)



Slika 18: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji a2 po 48h (PCFLOW3D)

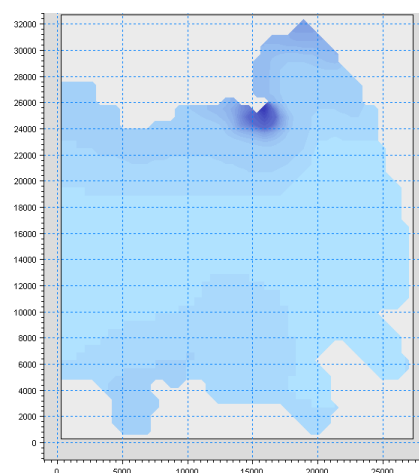
#### Slanost:

25. sloj:



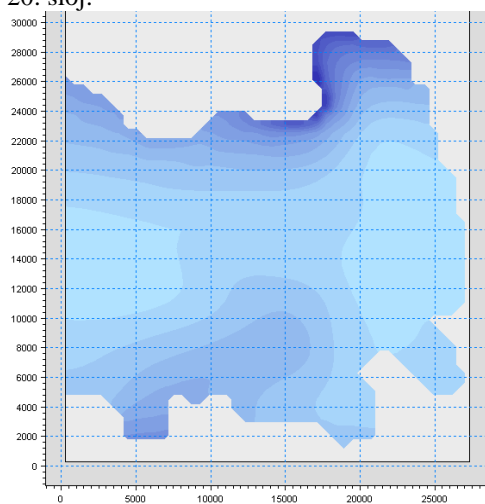
Slika 16: Slanost v 25. sloju pri simulaciji a2 po 48h (MIKE 3)

#### Slanost:

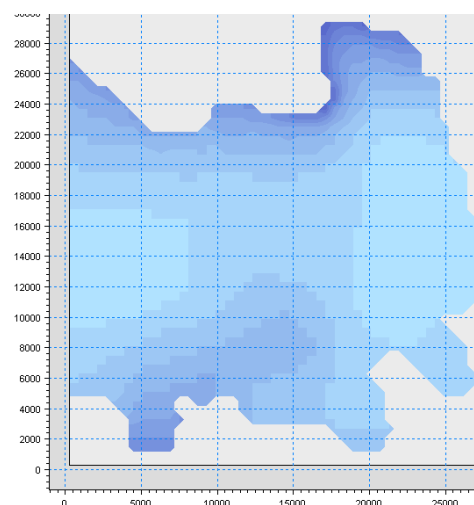


Slika 19: Slanost v 25. sloju pri simulaciji a2 po 48h (PCFLOW3D)

20. sloj:



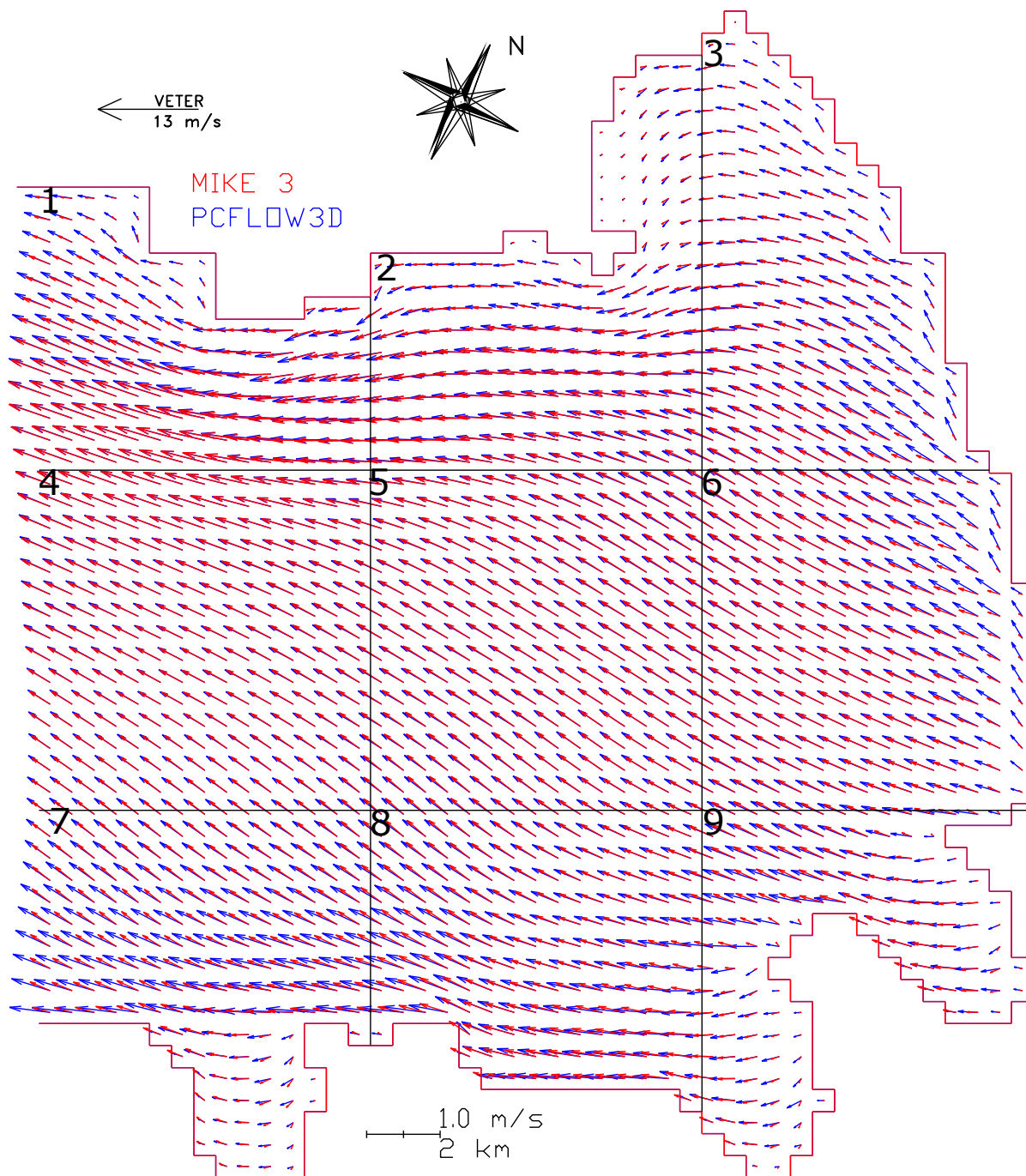
Slika 20: Slanost v 20. sloju pri simulaciji a2 po 48h (MIKE 3)



Slika 21: Slanost v 20. sloju pri simulaciji a2 po 48h (PCFLOW3D)

### Simulacija a3:

25. sloj:

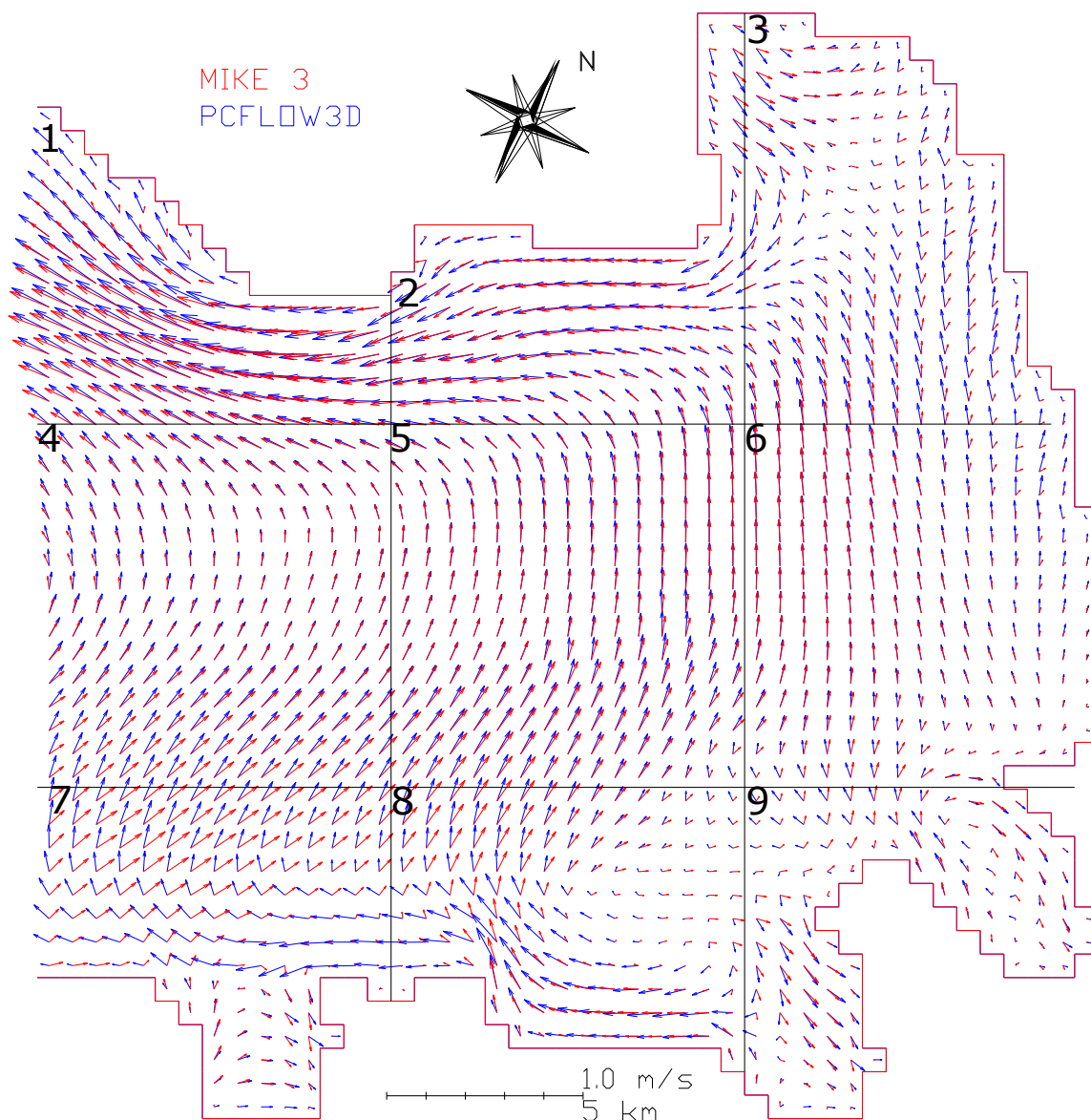


Slika 22: Simulacija a3 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)

RMSN = 0,243 (dobro)

Na površini zaliva (slika 22) ni bistvenih razlik med modeloma, razen v zalivih v devetem kvadratu in ob obalah, kjer dobimo z modelom PCFLOW3D tudi do dvakrat večje hitrosti kot z modelom MIKE 3.

20. sloj:



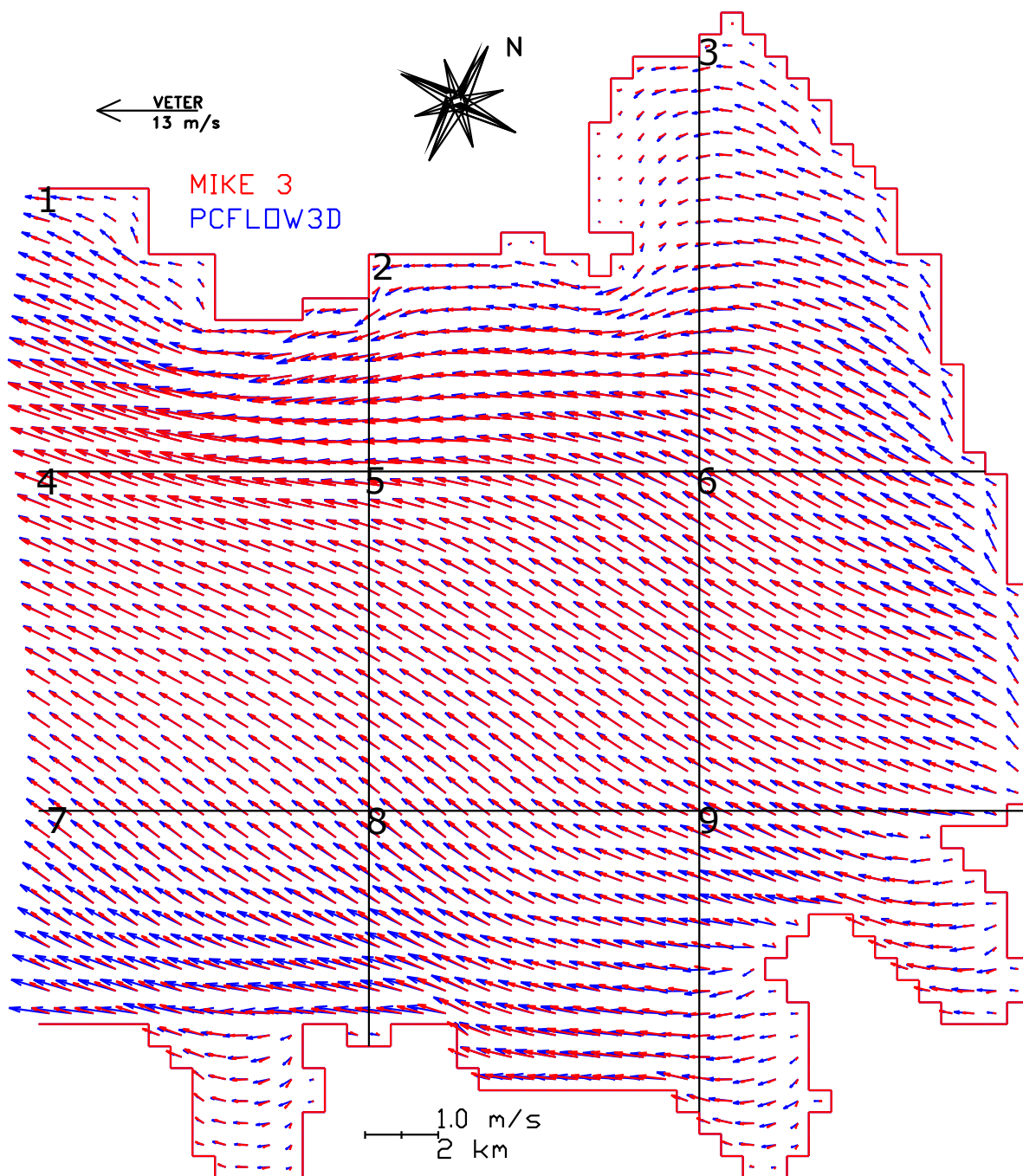
Slika 23: Simulacija a3 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (20. sloj)

RMSN = 0,428 (sprejemljivo)

Večje razlike se pojavijo 5,5 m pod gladino (slika 23). V sedmem in osmem kvadratu se pojavijo razlike v smeri (tudi za  $100^\circ$ ) in v velikosti (tudi do šestkrat) vektorjev hitrosti. Večje razlike vektorjev hitrosti se pojavijo tudi v tretjem kvadratu.

## Simulacija a4:

25. sloj:

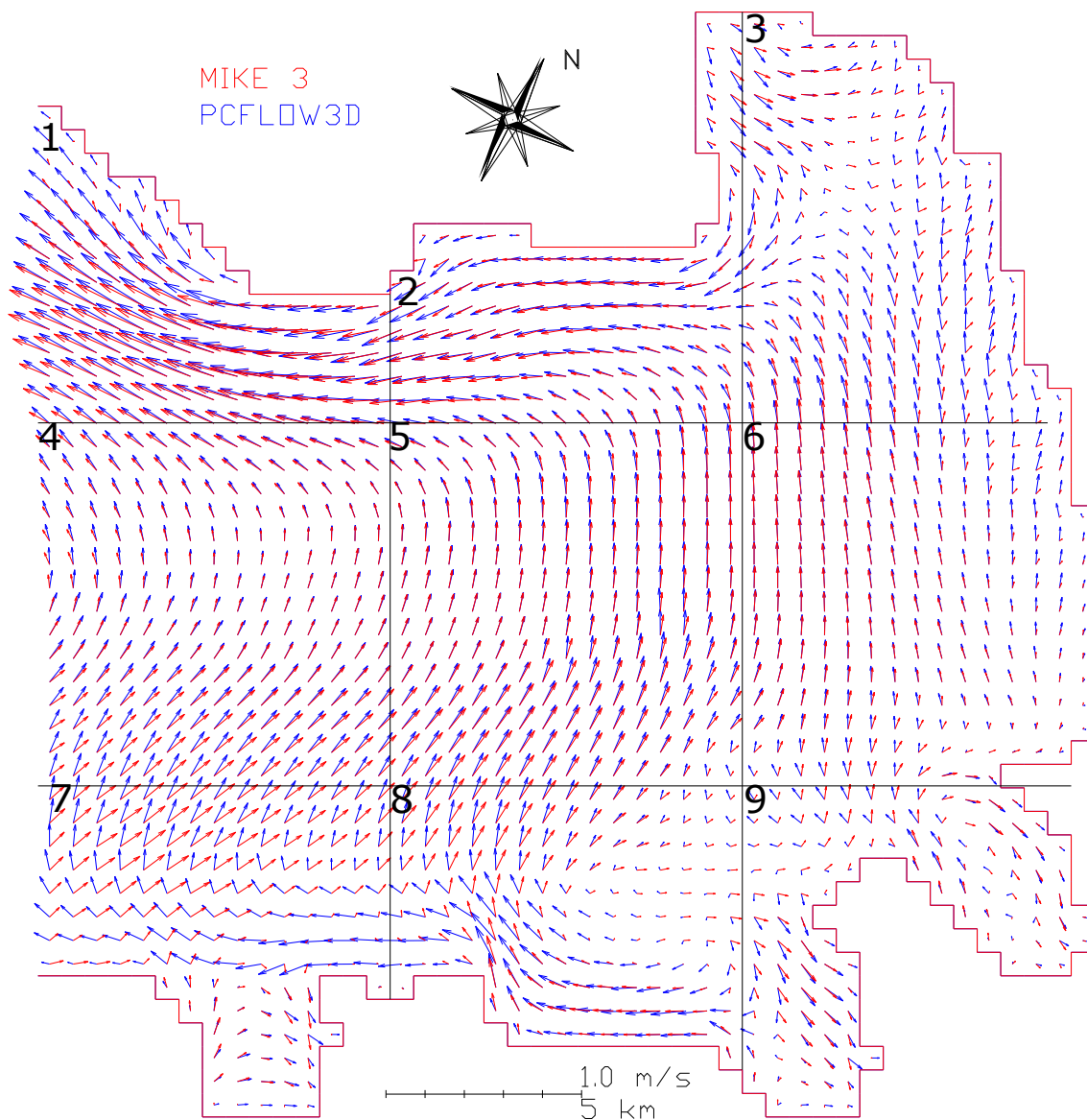


Slika 24: Simulacija a4 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)

RMSN = 0,245 (dobro)

Ujemanje med modeloma je v površinskem sloju (slika 24) dobro. Odstopanja v velikosti vektorjev hitrosti so opazna v 7. kvadratu. Zaradi močnega vetra je vpliv reke Soče majhen zato tudi ni večjih razlik med simulacijama a3 in a4 (sliki 22 in 24).

20. sloj:



Slika 25: Simulacija a4 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (20. sloj)

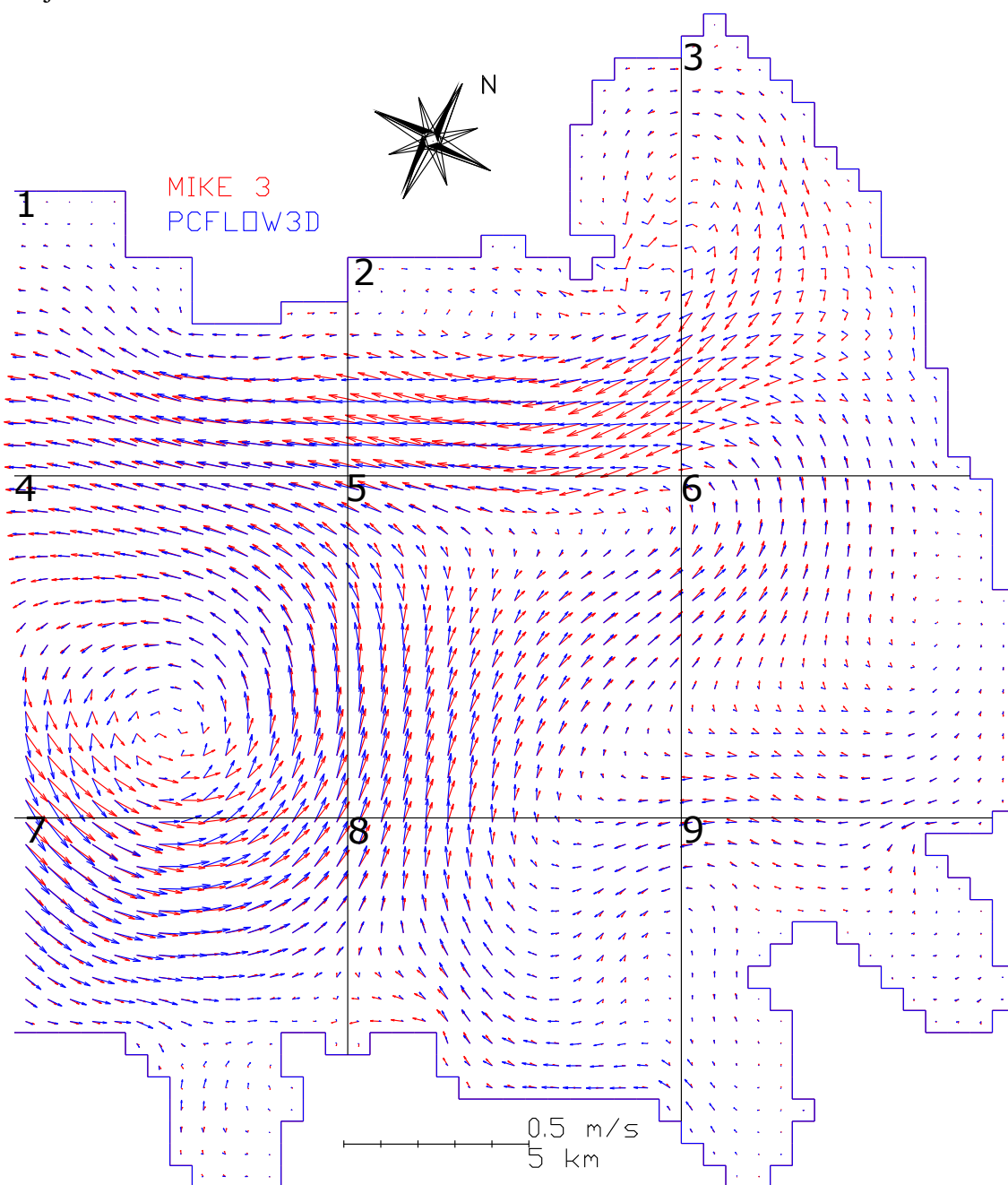
RMSN = 0,429 (sprejemljivo)

Tudi v globljih slojih (5,5 m) ni večjih razlik med simulacijama a3 in a4 (sliki 23 in 25). V 20. sloju pa so razlike med modeloma velike, predvsem v 7. in 3. kvadratu.





24. sloj:

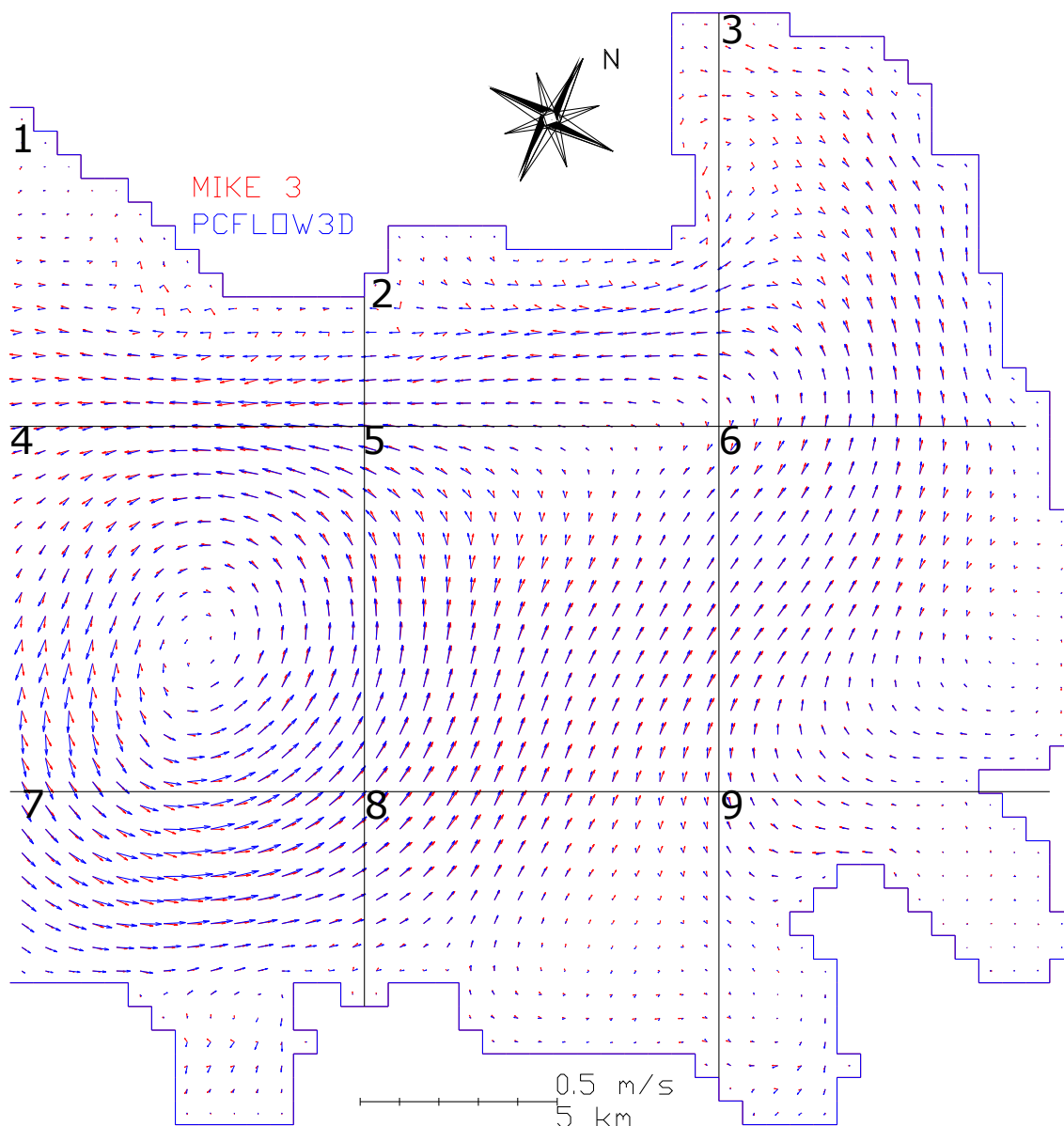


Slika 27: Simulacija b1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (24. sloj)

RMSN = 0,421 (sprejemljivo)

1,5 m pod gladino se v drugem in tretjem kvadratu pojavljajo precejšnje razlike v smeri vektorjev (slika 27). Vrtinca v četrtem kvadratu sta nekoliko odmaknjena drug od drugega.

20. sloj.

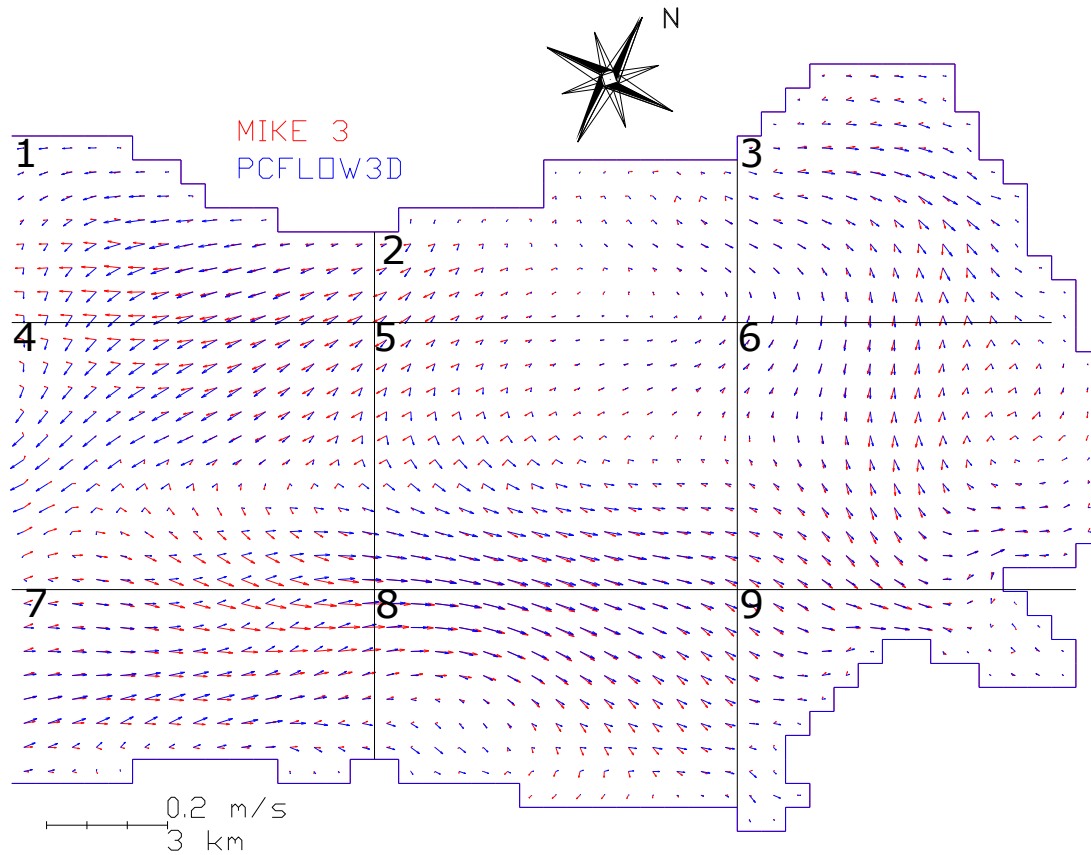


Slika 28: Simulacija b1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)

RMSN = 0,376 (dobro)

5,5 m pod gladino se v prvem in zlasti drugem kvadratu pojavljajo večje razlike med vektorji hitrosti predvsem ob obali (slika 28). Vrtinec v četrtem kvadratu se v tem sloju pri simulacijah z obema modeloma pojavi na istem mestu.

11. sloj



Slika 29: Simulacija b1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (11. sloj)

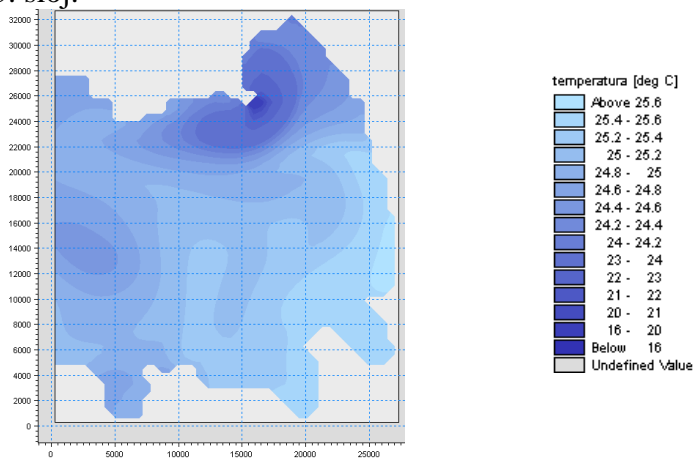
RMSN = 0,602 (slabo)

V 11. sloju (14,5 m pod gladino) se pojavljajo velike razlike v smeri in velikosti vektorjev hitrosti (slika 29). Te so najbolj opazne v četrtem kvadratu.

### MIKE 3

#### Temperatura:

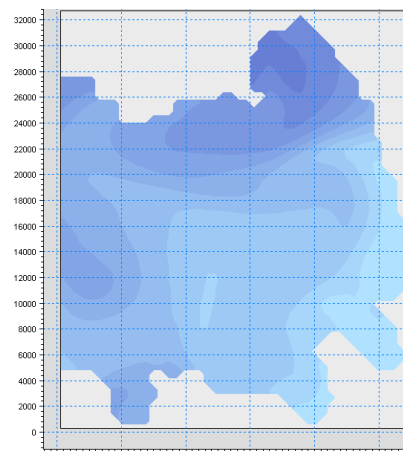
25. sloj:



Slika 30: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)

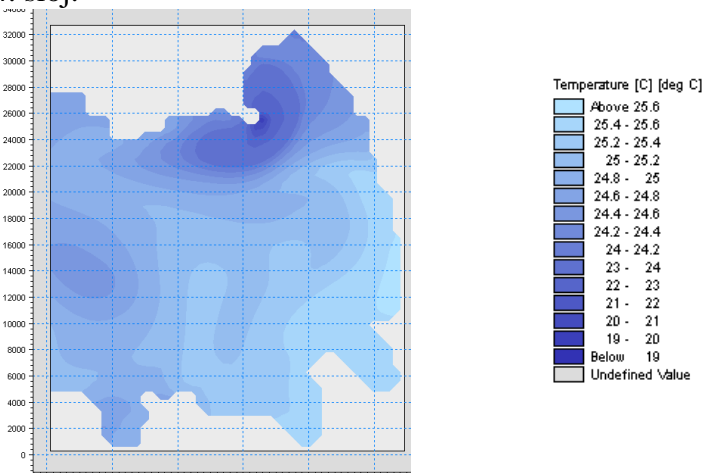
### PCFLOW3D

#### Temperatura:

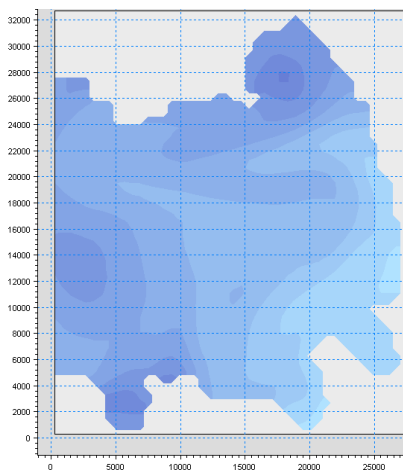


Slika 33: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)

24. sloj:

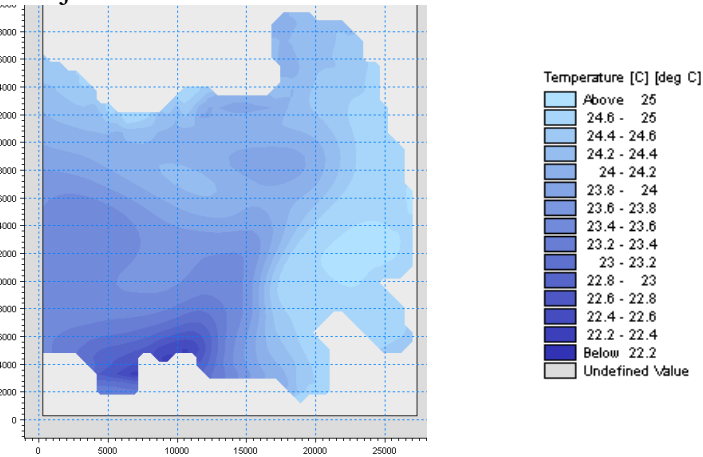


Slika 31: Temperatura v 24. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)

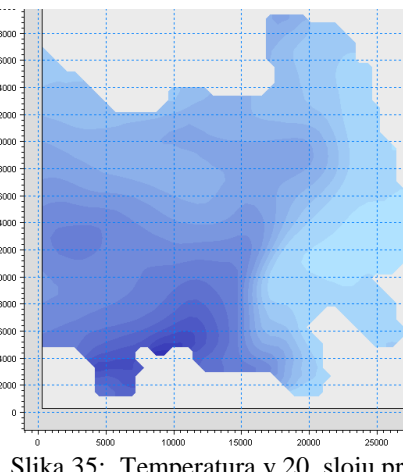


Slika 34: Temperatura v 24. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)

20. sloj:

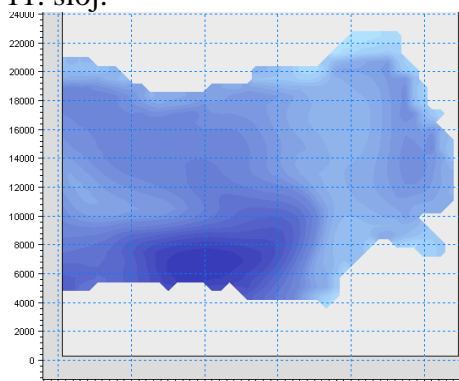


Slika 32: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)



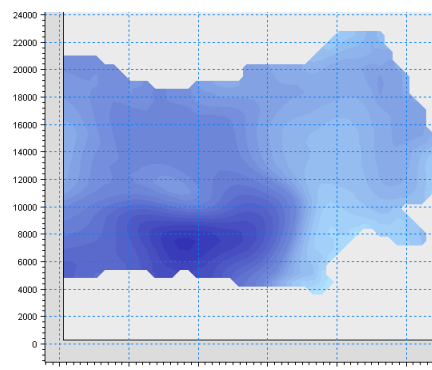
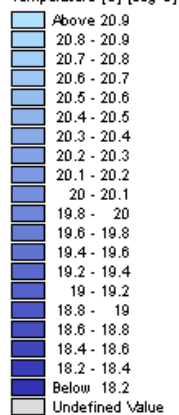
Slika 35: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)

11. sloj:



Slika 36: Temperatura v 11. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)

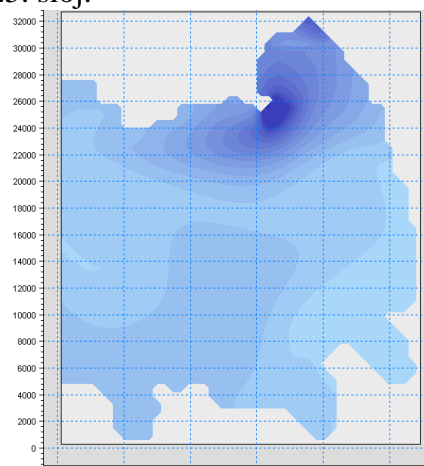
Temperature [C] [deg C]



Slika 39: Temperatura v 11. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)

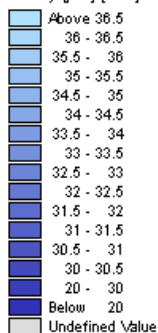
Slanost:

25. sloj:

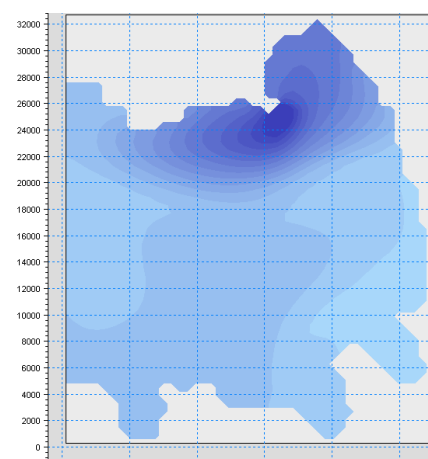


Slika 37: Slanost v 25. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)

Salinity [psu] [PSU]

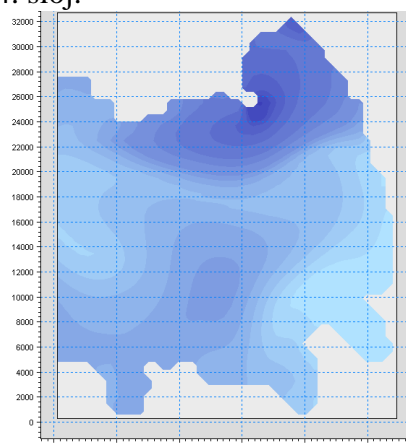


Slanost:



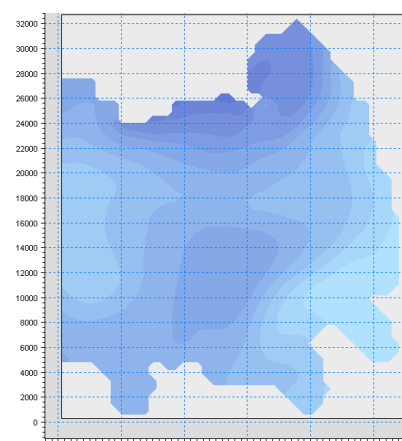
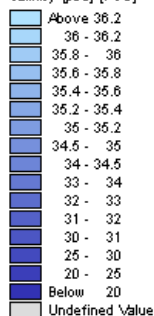
Slika 40: Slanost v 25. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)

24. sloj:



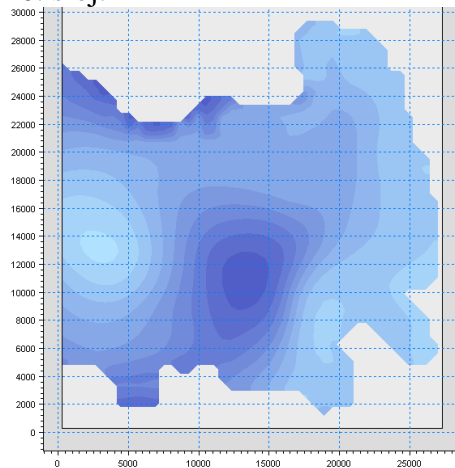
Slika 38: Slanost v 24. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)

Salinity [psu] [PSU]

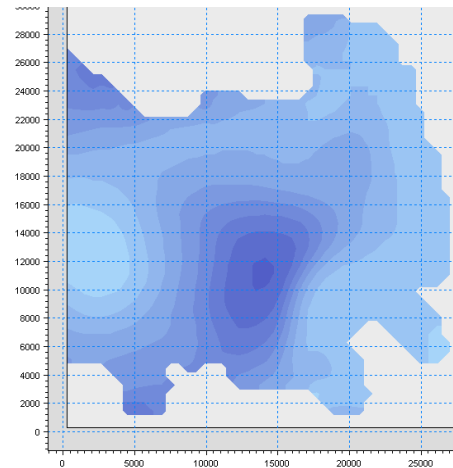


Slika 41: Slanost v 24. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)

20. sloj:

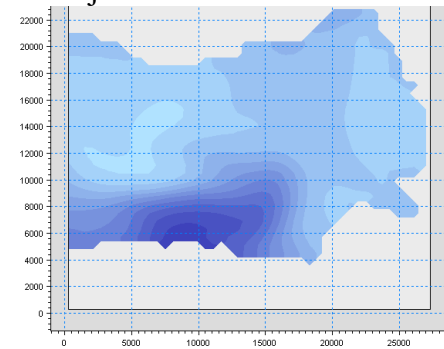


Slika 42: Slanost v 20. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)

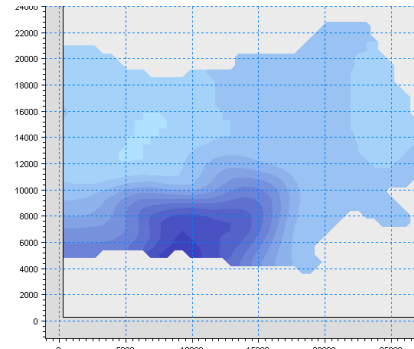


Slika 44: Slanost v 20. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)

11. sloj:



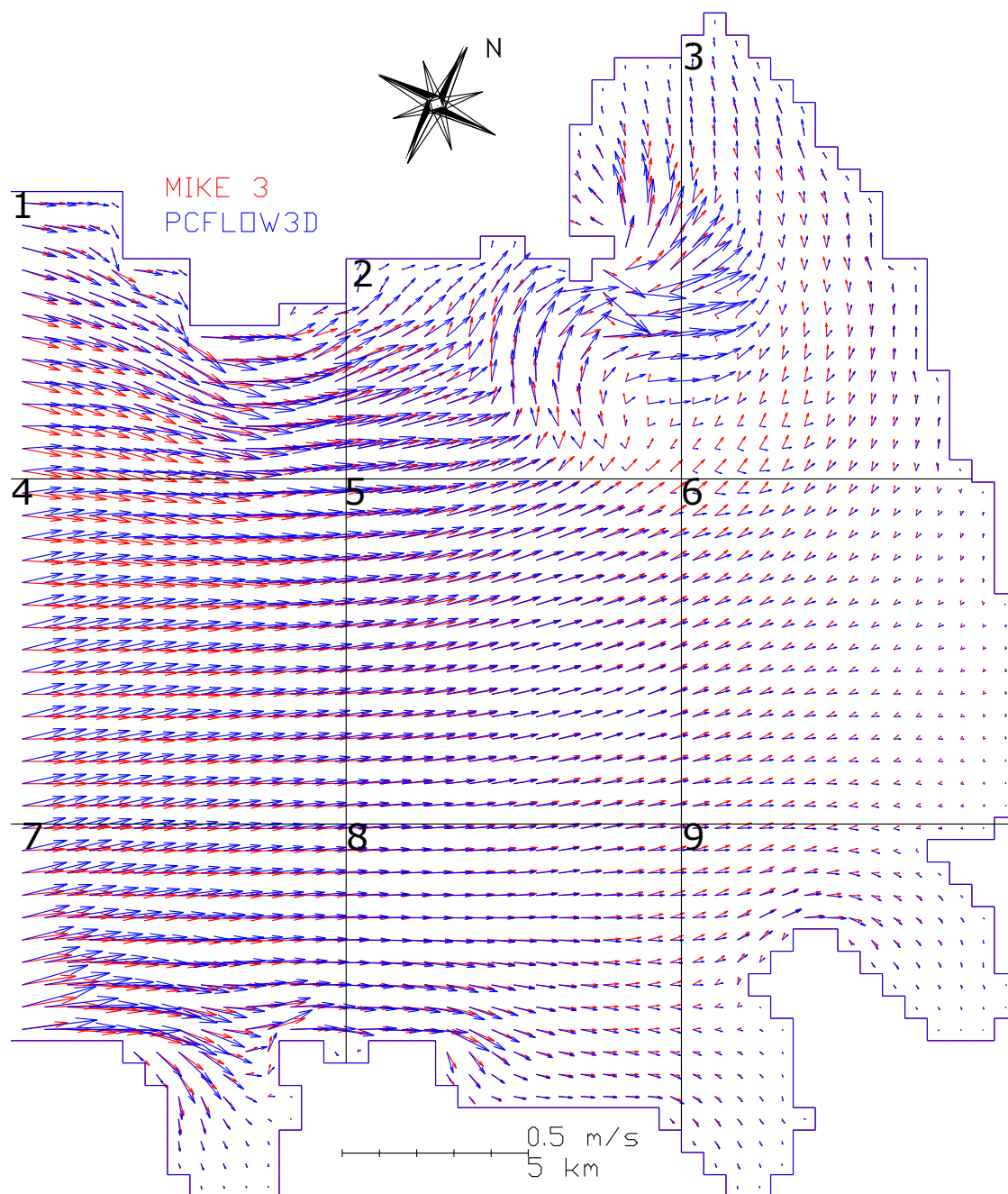
Slika 43: Slanost v 11. sloju pri simulaciji b1 po 48h (MIKE 3)



Slika 45: Slanost v 11. sloju pri simulaciji b1 po 48h (PCFLOW3D)

## Simulacija b2:

25. sloj – 24 ur:

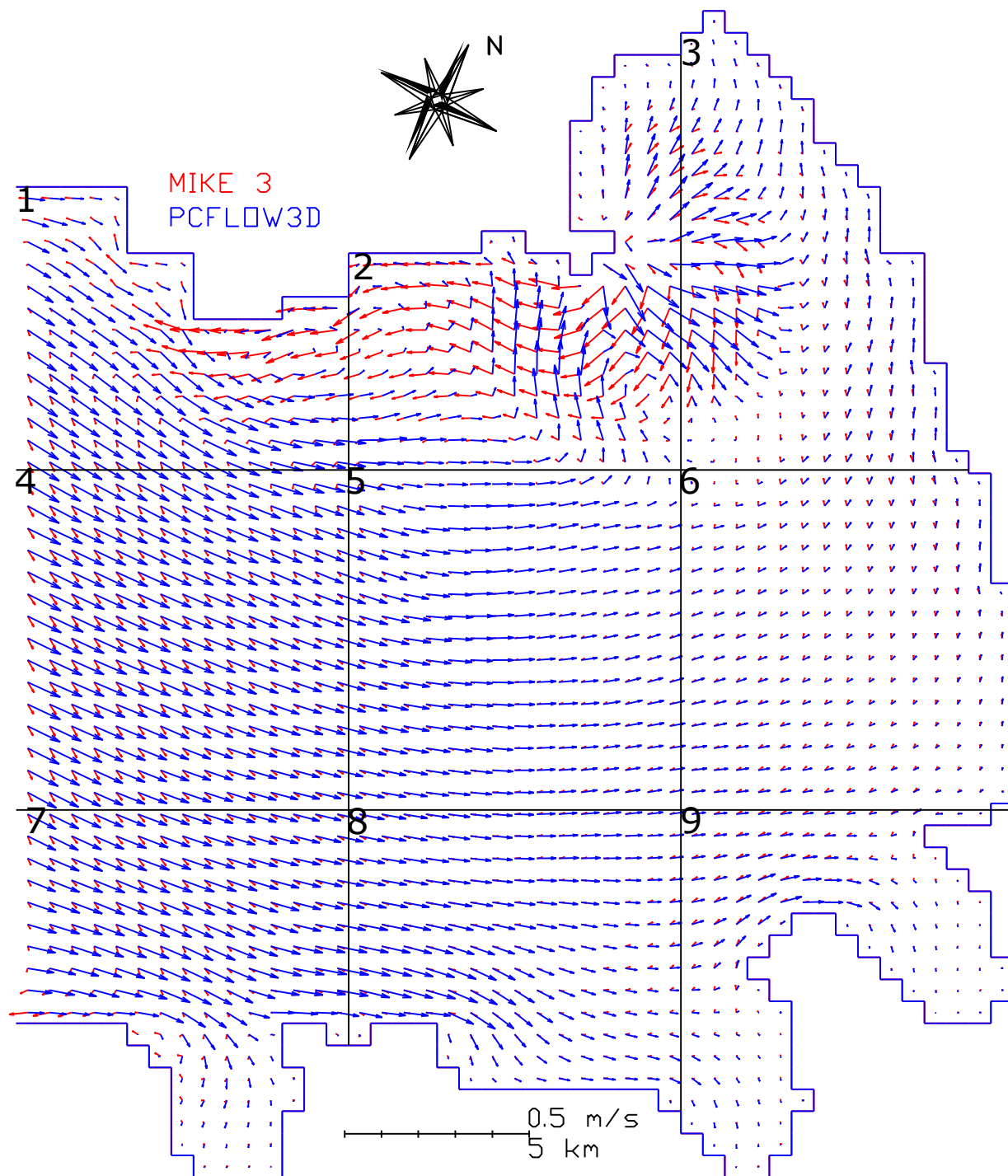


Slika 46: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)

RMSN = 0,293 (dobro)

V okolici Soče dobimo z obema modeloma večje hitrosti kot v ostalem delu Tržaškega zaliva (slika 46), vendar so smeri le-teh precej različne (odstopanje tudi do 100°). V notranjosti zaliva so manjše razlike v smeri vektorjev hitrosti kot na robovih. Te razlike verjetno nastanejo zaradi različnega načina upoštevanja dotokov (vtok reke Soče, plimovanje).

25. sloj – 27 ur:



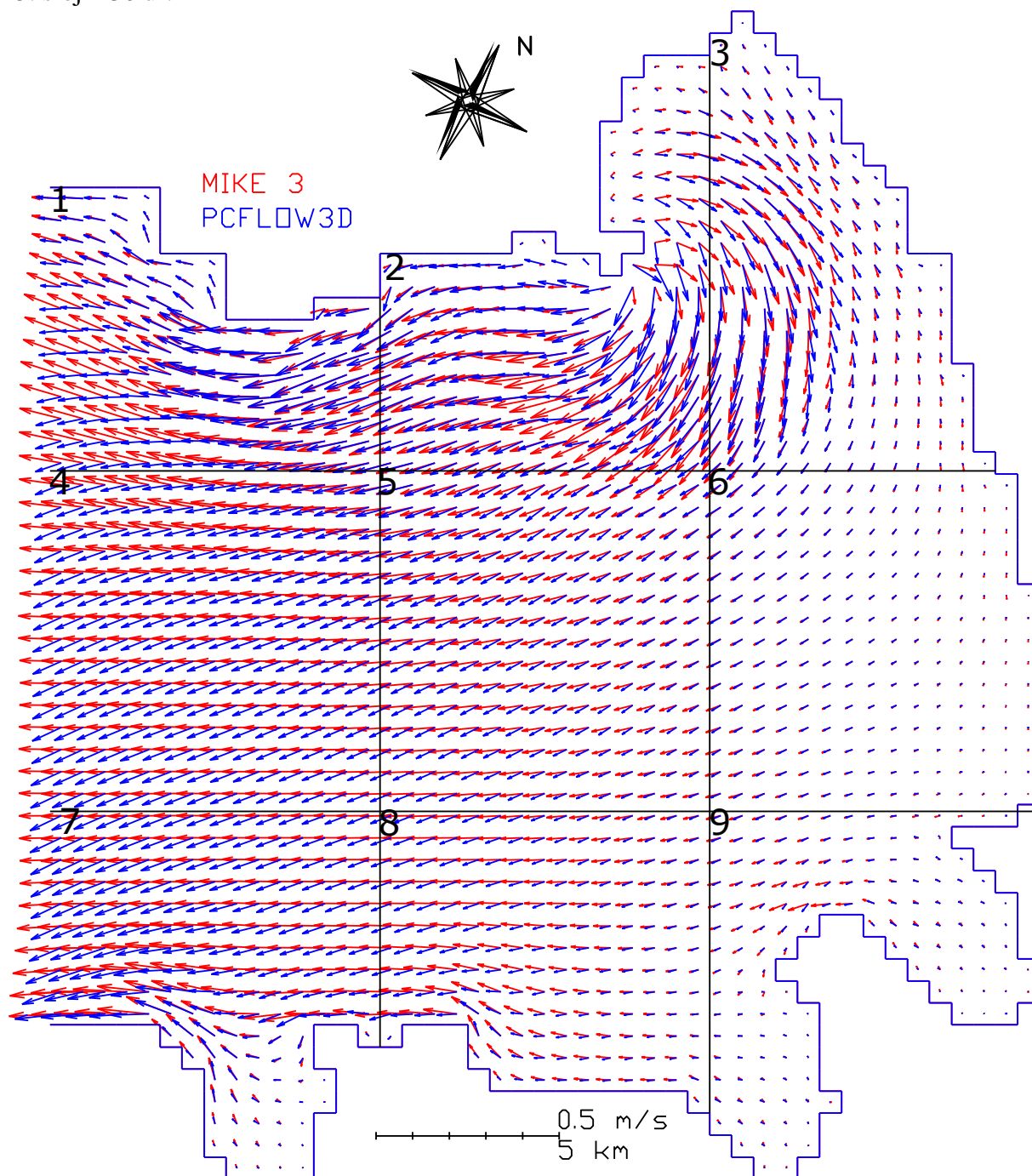
Slika 47: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 27h (25. sloj)

RMSN = 0,877 (slabo)

Z modelom PCFLOW3D dobim v petem in osmem kvadratu tudi do 5x večje hitrosti toka kot z modelom MIKE 3. V okolici reke Soče nastanejo bistvene razlike v smeri vektorjev hitrosti, ponekod tudi za več kot 90°. Bistvene razlike so tudi na območju odprtega roba.



25. sloj – 30 ur:

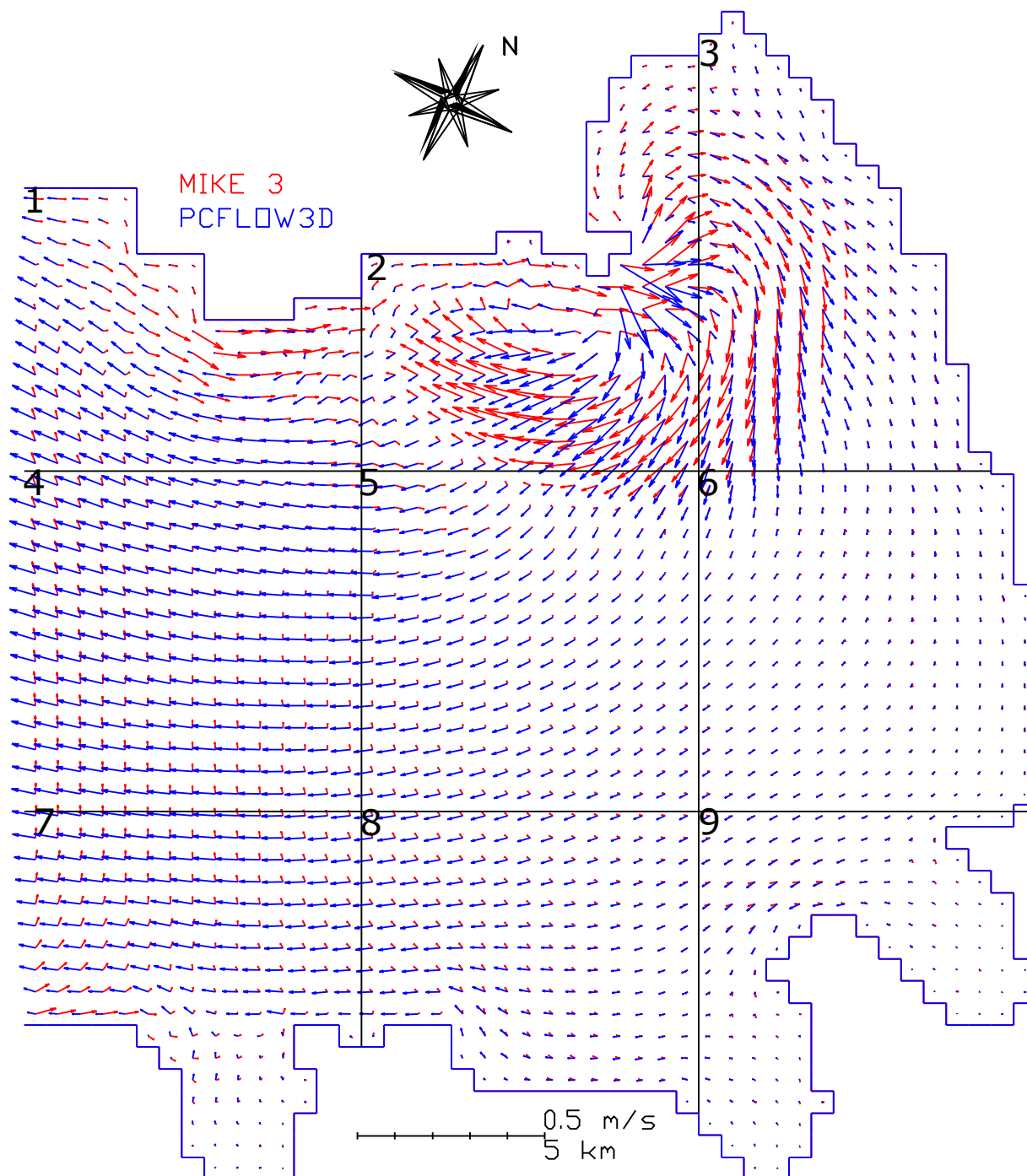


Slika 48: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 30h (25. sloj)

RMSN = 0,492 (sprejemljivo)

Na zahodni polovici Tržaškega zaliva se pojavijo razlike v smeri vektorjev hitrosti za ca.  $45^\circ$  (slika 48). Drugod so razlike v smeri manjše, pojavljajo pa se odstopanja v velikosti hitrostnih vektorjev.

25. sloj – 33 ur:

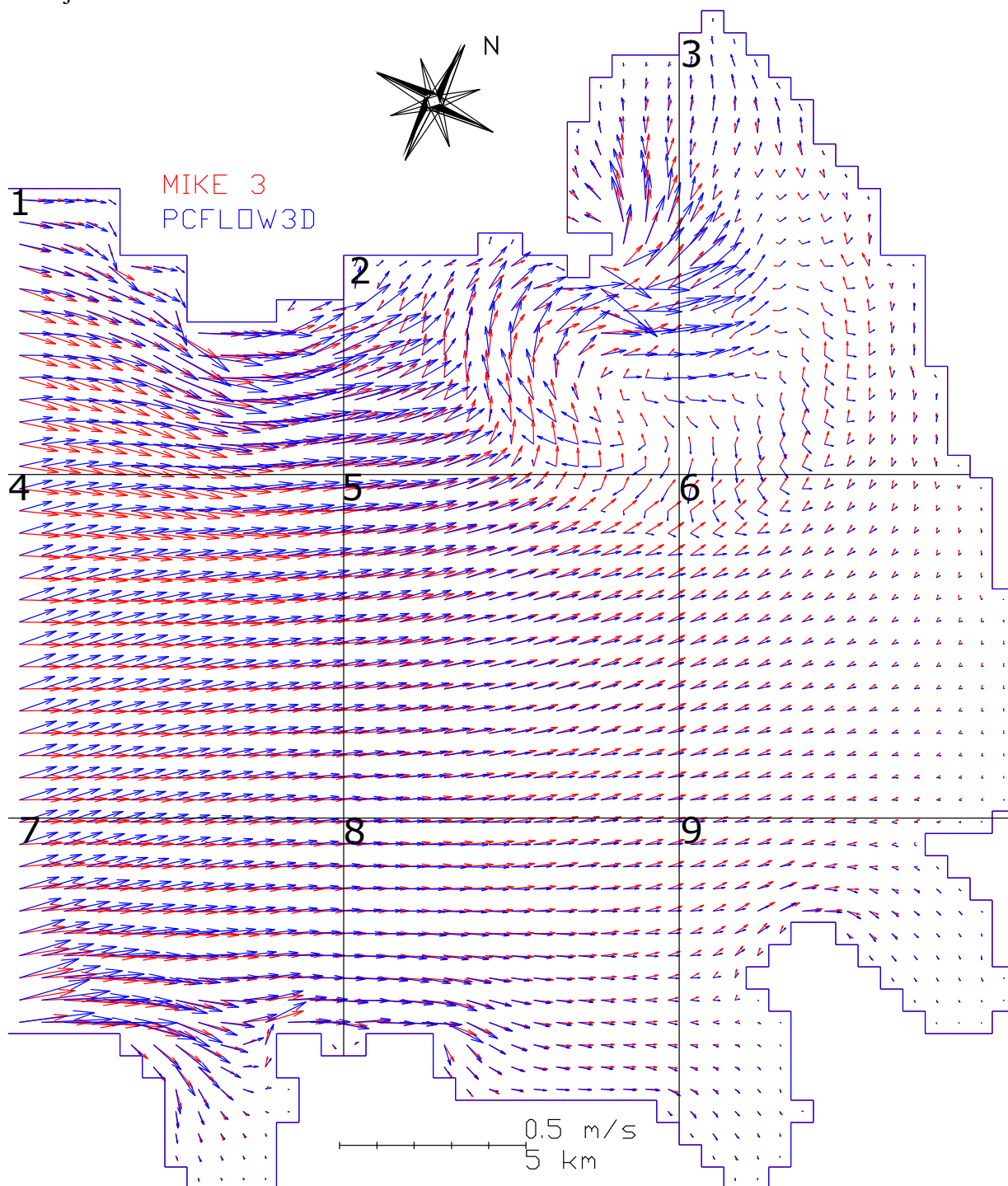


Slika 49: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 33h (25. sloj)

RMSN = 0,995 (slabo)

Po 33. urah plimovanja se v površinskem sloju (slika 49) pojavijo zelo velike razlike med rezultati obeh modelov. Z modelom PCFLOW3D se pojavijo do 5x večje hitrosti v petem, šestem in osmem kvadratu. V prvem kvadratu se pojavljajo razlike v smeri vektorjev tudi do 180°.

25. sloj – 36 ur:

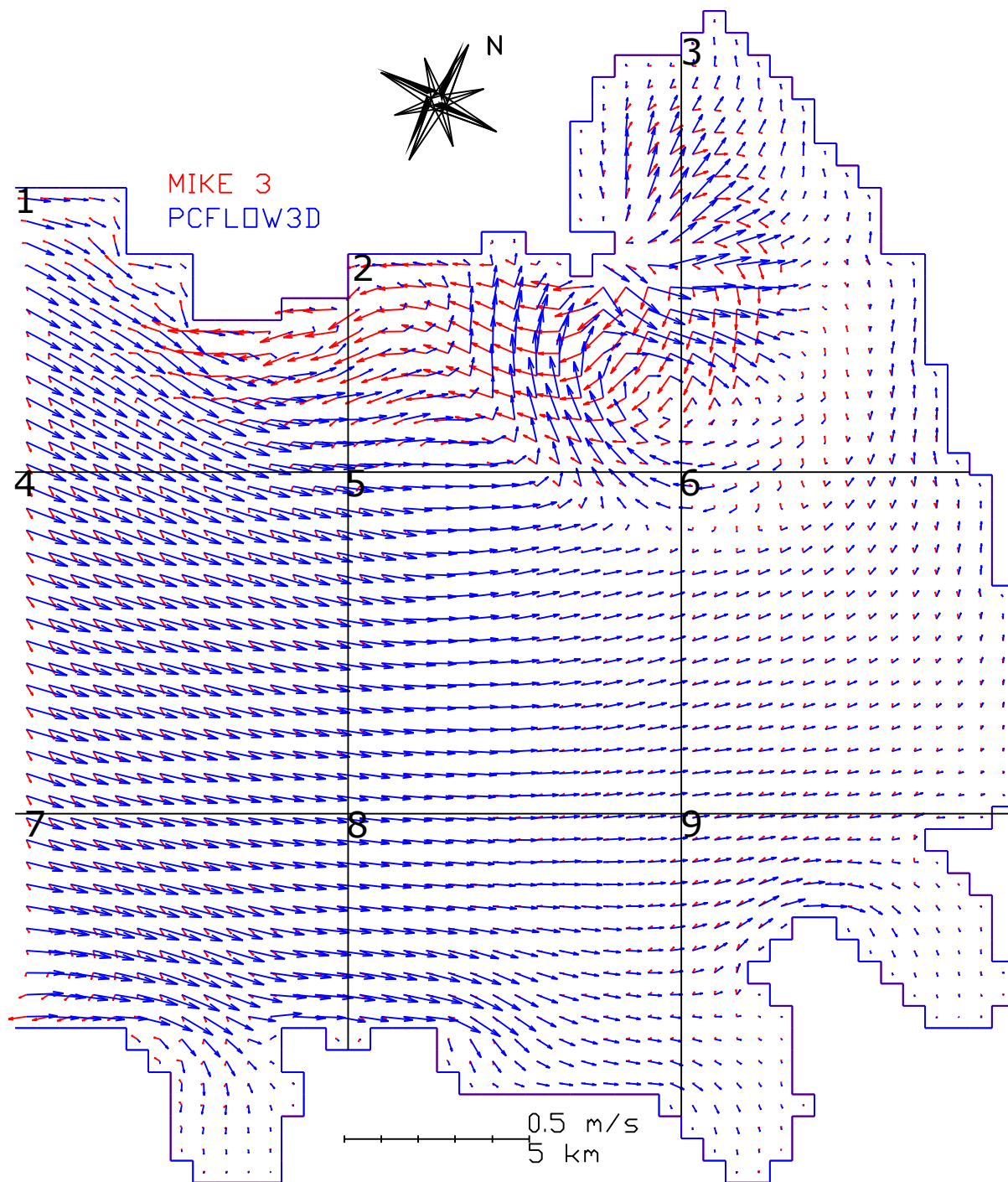


Slika 50: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 36h (25. sloj)

RMSN = 0,367 (dobro)

Zelo velike razlike se pojavljalo v okolici vtoka reke Soče (slika 50). Drugod je ujemanje hitrostnih polj razmeroma dobro.

25. sloj – 39 ur:

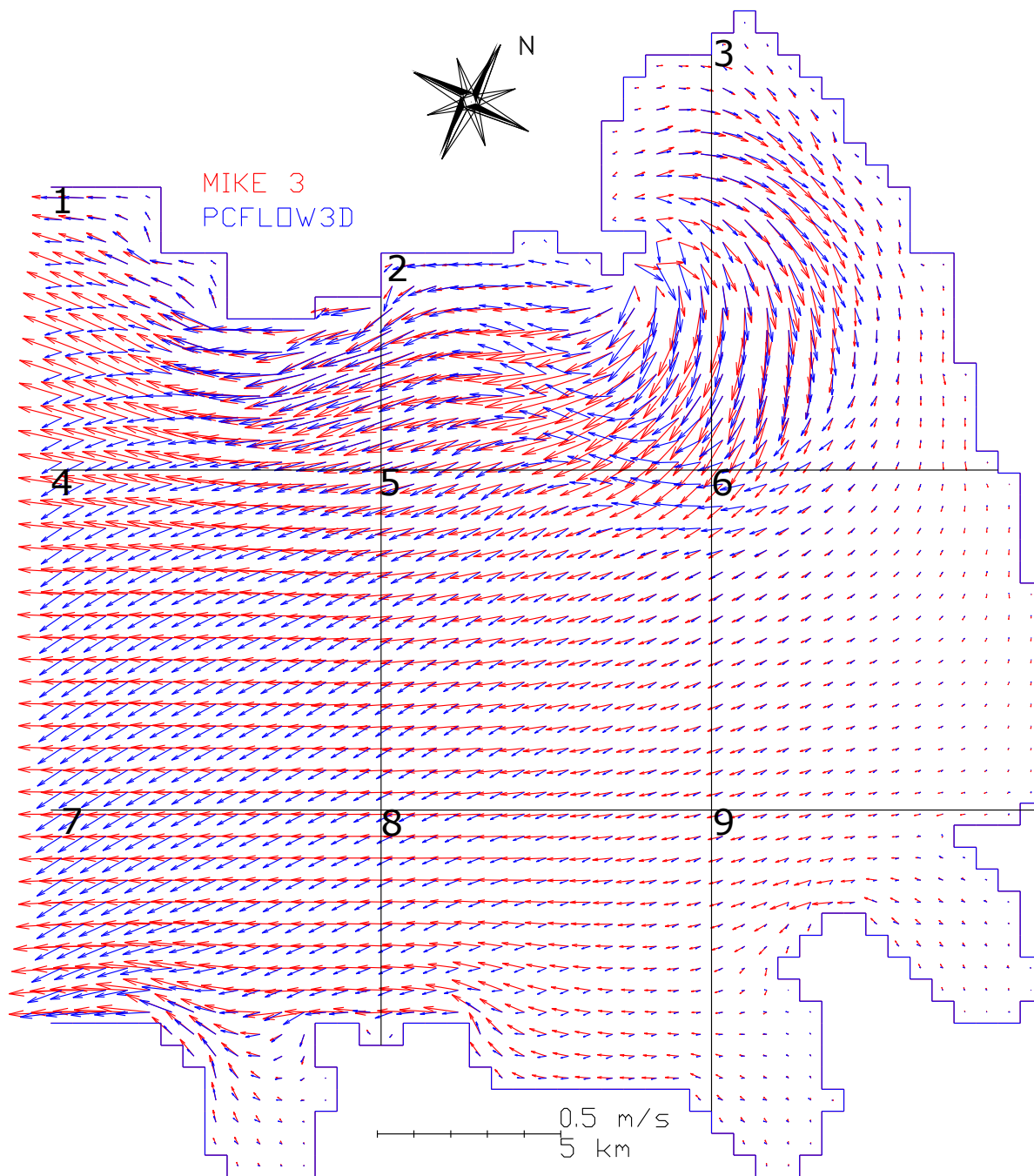


Slika 51: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 39h (25. sloj)

RMSN = 0,943 (slabo)

Tudi po 39. urah plimovanja (slika 51) se v površinskem sloju, podobno kot po 33 urah, pojavijo večje razlike med modeloma. Z modelom PCFLOW3D se pojavijo do 5x večje hitrosti v petem in osmem kvadratu. V prvem kvadratu se pojavljajo razlike v smeri vektorjev tudi do 180°.

25. sloj – 42 ur:

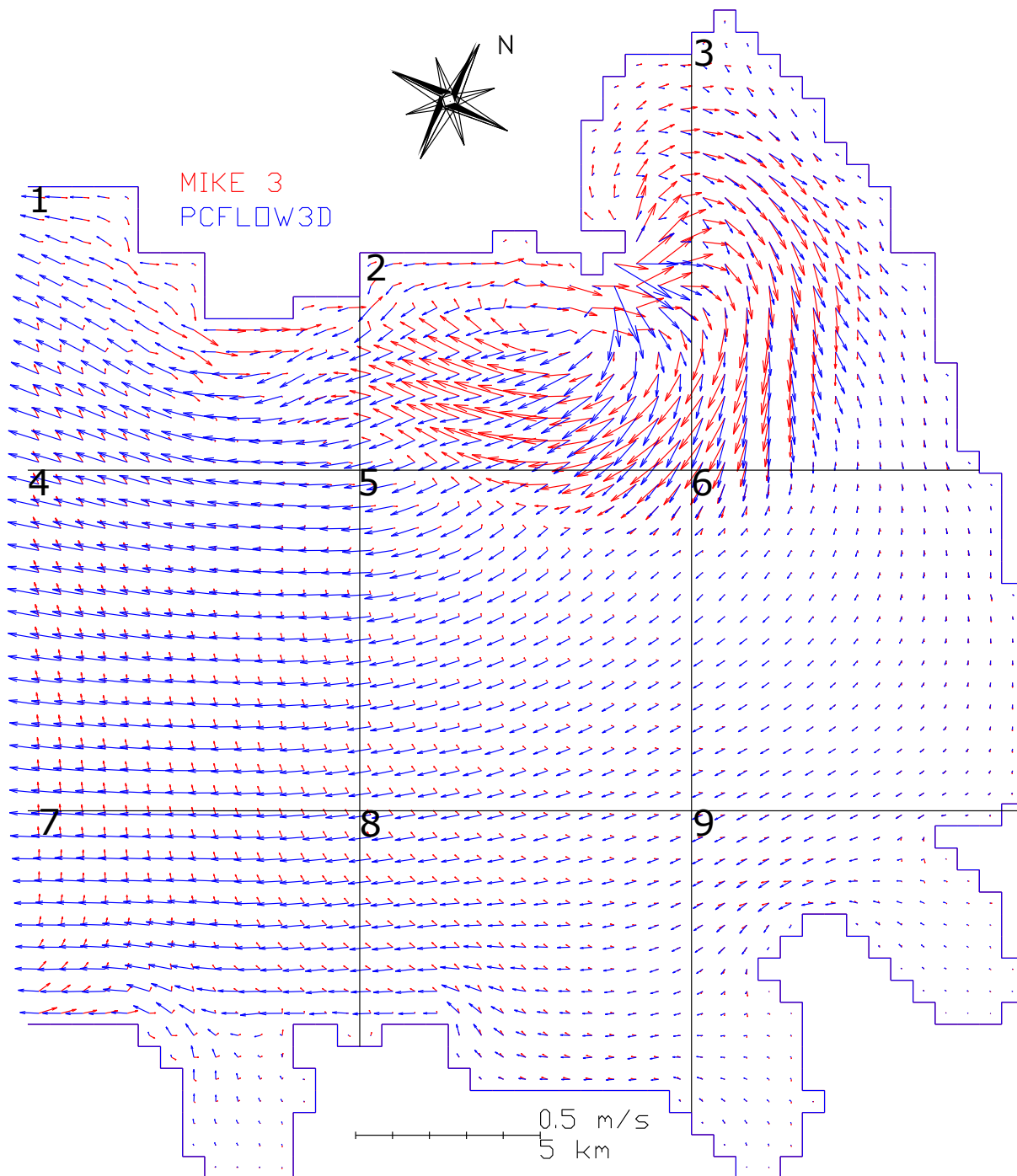


Slika 52: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 42h (25. sloj)

RMSN = 0,776 (slabo)

V zahodni polovici Tržaškega zaliva se pojavijo razlike v smeri vektorjev hitrosti za ca. 45° (slika 52). Tudi ujemanje hitrostni polj v okolici izliva Soče je razmeroma slabo.

25. sloj – 45 ur:

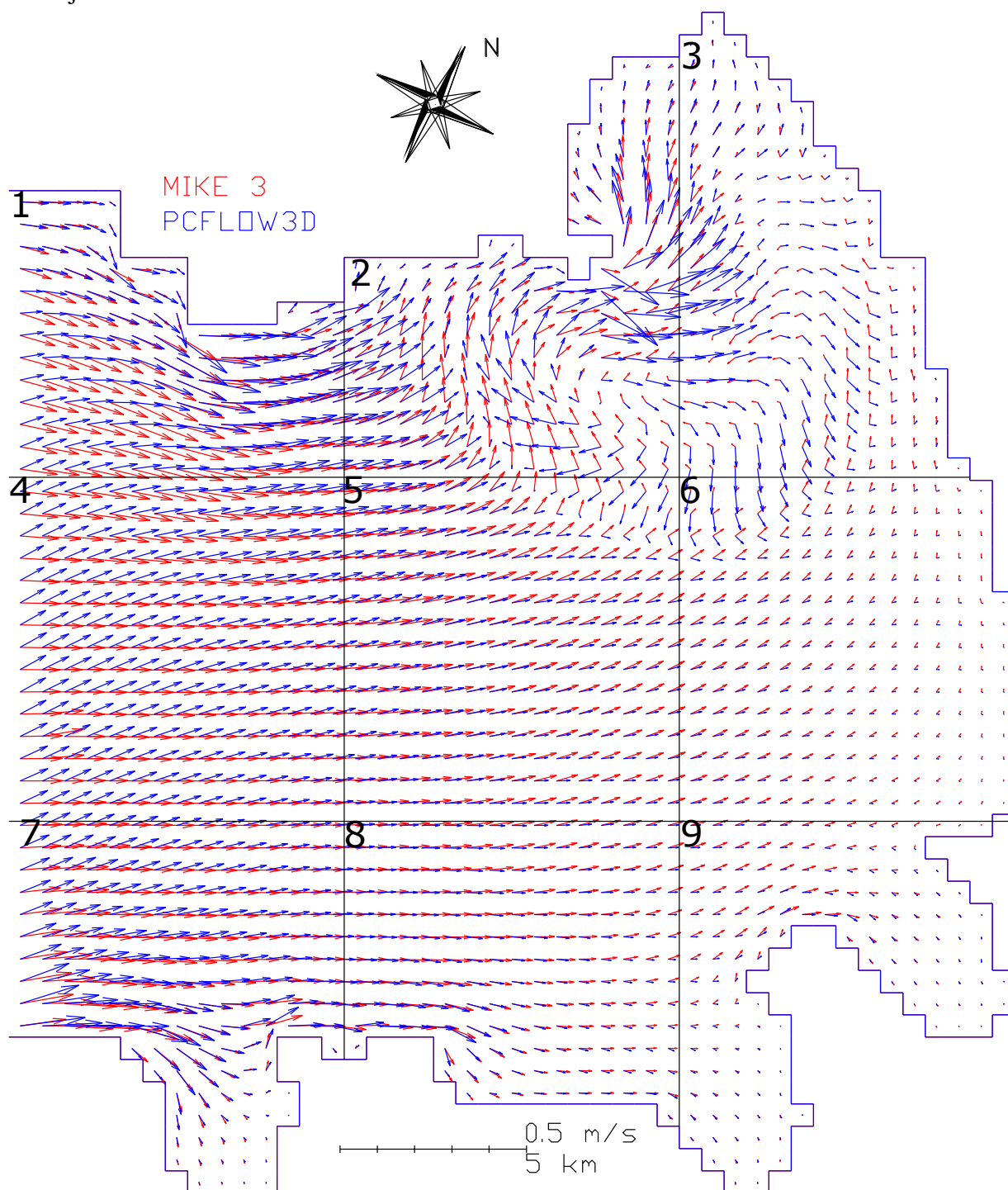


Slika 53: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 45h (25. sloj)

RMSN = 0,955 (slabo)

Tudi po 45. urah plimovanja dobimo zelo velike razlike med hitrostnima poljema obeh modelov (slika 53).

25. sloj – 48 ur:



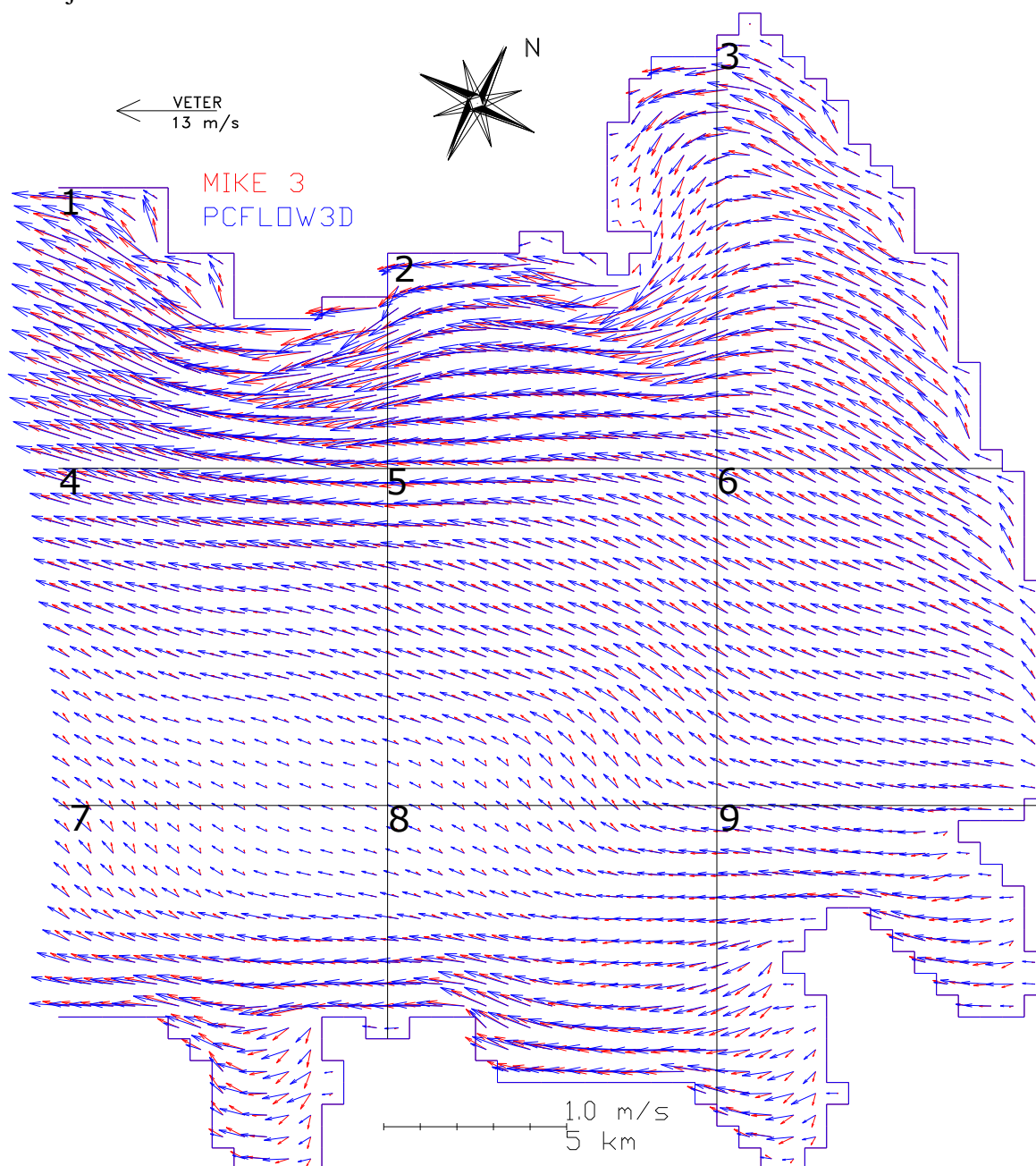
Slika 54: Simulacija b2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,564 (sprejemljivo)

Večje razlike se pojavljajo v okolici vtoka reke Soče (slika 54). V četrtem kvadratu se smer vektorjev hitrosti med modeloma razlikuje tudi za 45°.

### Simulacija b3:

25. sloj:



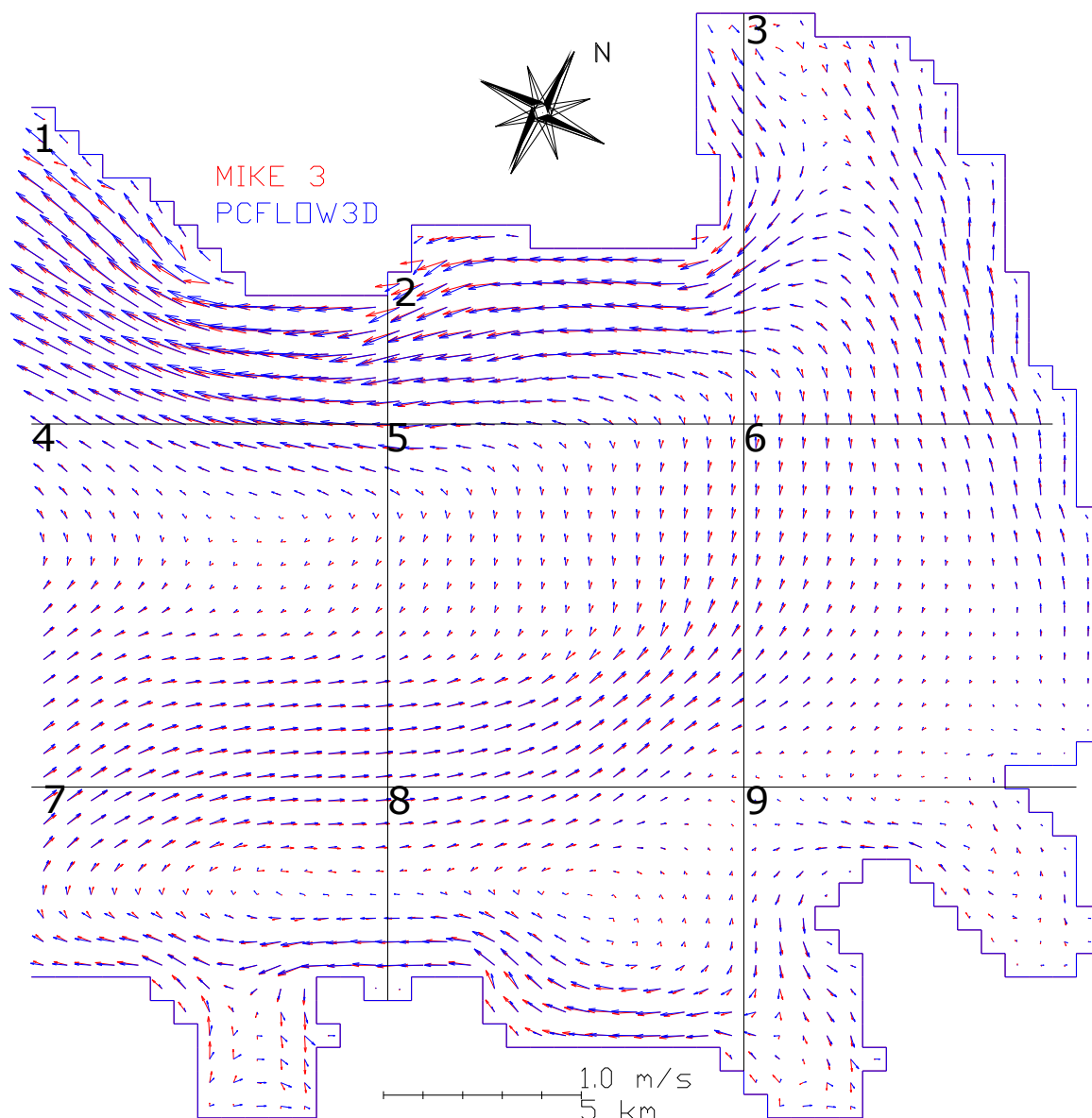
Slika 55: Simulacija b3 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)

RMSN = 0,354 (dobro)

Iz slike 55 je razvidno, da dobimo z obema modeloma območja s hitrejšim in območja s počasnejšim tokom, ki niso bila opazna pri simulaciji a4 (slika 24). Na severovzhodnem in jugozahodnem delu zaliva se tok vode z obema modeloma usmeri proti severu zaliva za ca. 10-20°. Razlika je v tem, da je zamik toka od smeri vetra pri rezultatih modela MIKE 3 za ca. 10° večji kot pri modelu PCFLOW3D.



20. sloj:



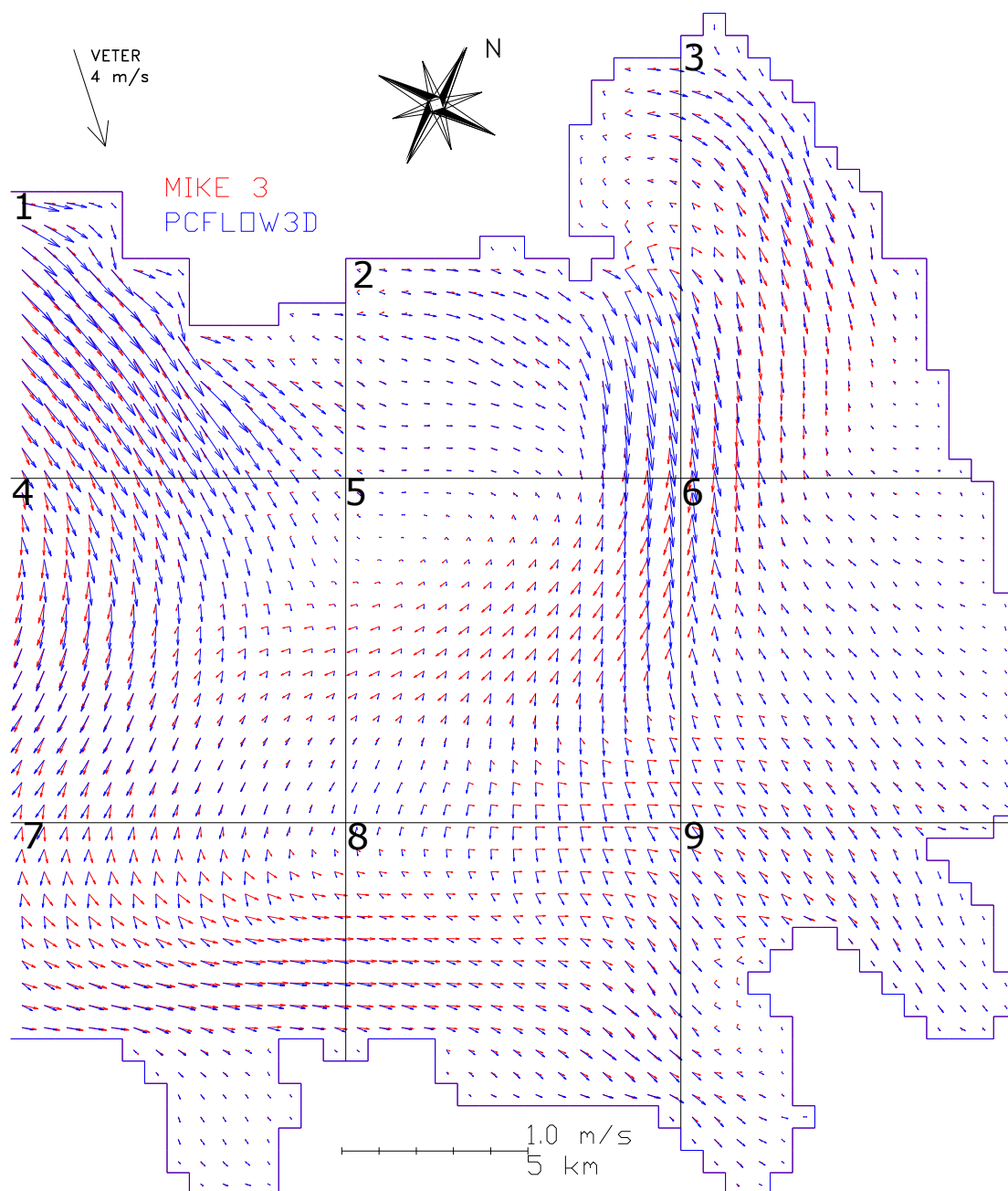
Slika 56: Simulacija b3 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (20. sloj)

RMSN = 0,255 (dobro)

V globljih slojih (5,5 m) so razlike med modeloma manjše (slika 56). V petem kvadratu se pojavljajo manjše razlike v smeri vektorjev hitrosti, do ca. 20°. Vrtinca v osmem kvadratu sta nekoliko zamaknjena. Pri simulaciji b3 dobimo v tem sloju boljše ujemanje kot pri simulaciji a3.

## Simulacija b4:

25. sloj:

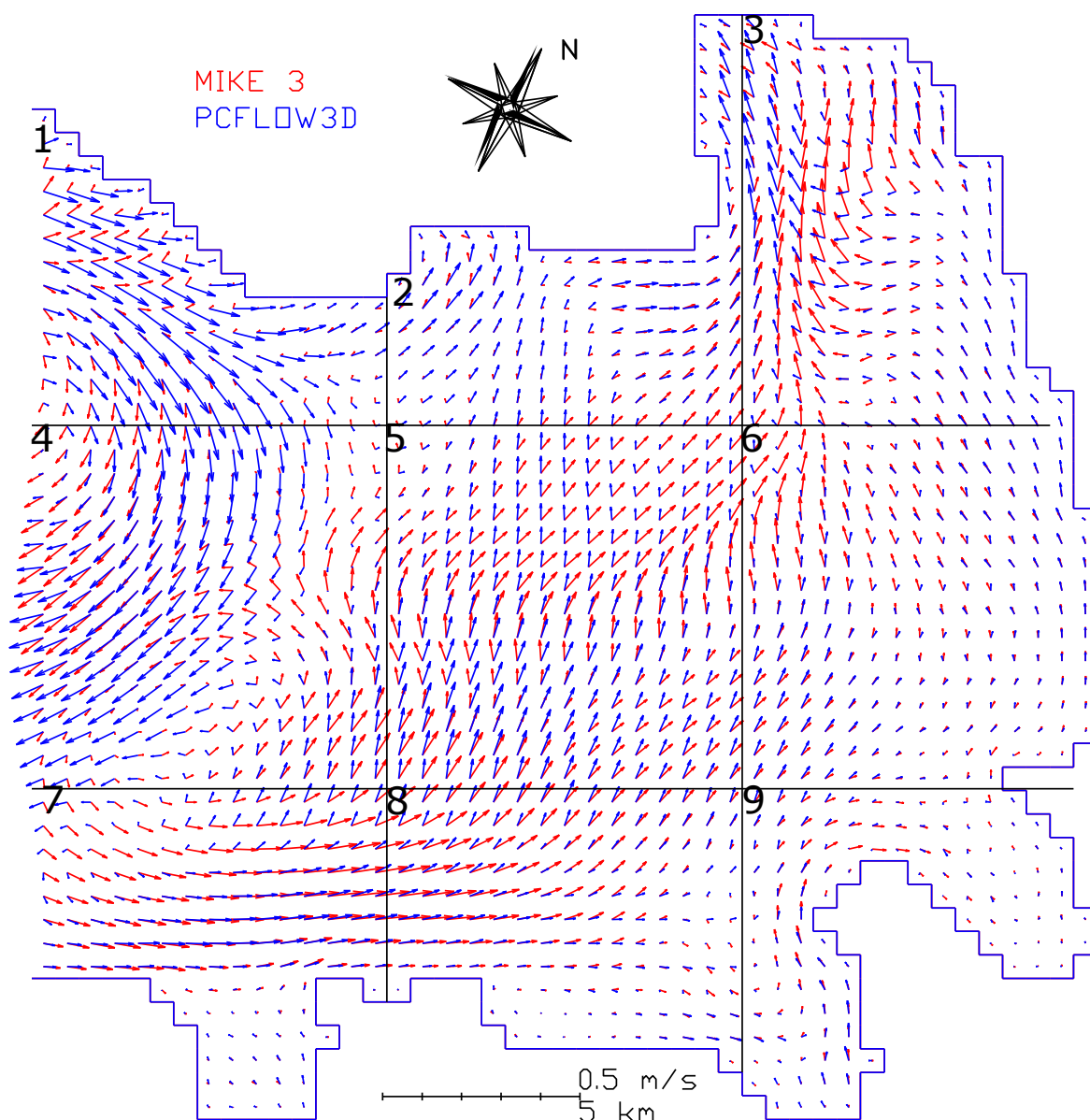


Slika 57: Simulacija b4 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,594 (sprejemljivo)

V prvem in drugem kvadratu dobimo do 5x, v šestem kvadratu pa do 3x večje hitrosti z modelom PCFLOW3D (slika 57). Tudi tu je opazen nekoliko večji vpliv vtoka reke Soče severno od izliva pri modelu MIKE 3 kot pri modelu PCFLOW3D. V okolici Soče opazim večjo razpršitev temperature in slanosti z modelom PCFLOW3D kot z modelom MIKE 3 (slike 59 – 66).

20. sloj:



Slika 58: Simulacija b4 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)

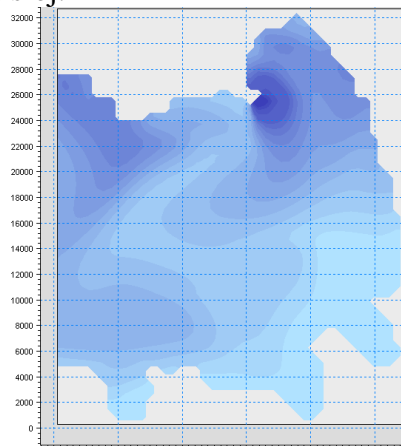
RMSN = 0,756 (slabo)

Na meji med četrtem in sedmim kvadratom (5,5 m pod gladino) nastane vrtnec pri rezultatih obeh modelov, vendar je le-ta pri modelu MIKE 3 odmaknjen za ca. 3500 m bolj proti severu, (slika 58). Večje razlike v velikosti vektorjev so opazne v prvem in četrtem kvadratu, kjer so hitrosti dobljene z modelom PCFLOW3D tudi do 12 x večje kot z modelom MIKE 3. V tretjem, petem in šestem kvadratu dobimo do 4x večje hitrosti z modelom MIKE 3 ter do 90° različno smer vektorjev hitrosti. Večje razlike v smeri vektorjev hitrosti se pojavijo tudi v prvem in četrtem kvadratu.

### MIKE 3

#### Temperatura:

25. sloj:

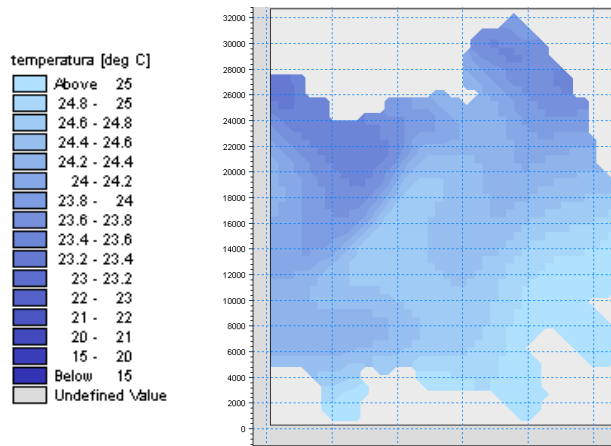


Slika 59: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji b4 po 48h (MIKE 3)

### PCFLOW3D

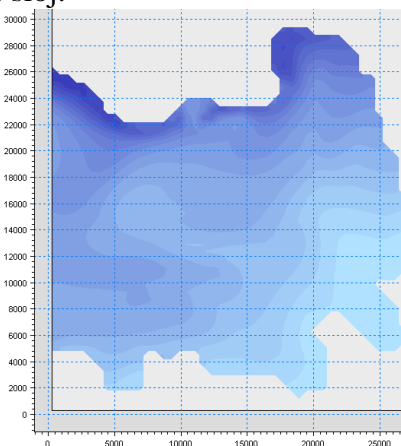
#### Temperatura:

25. sloj:

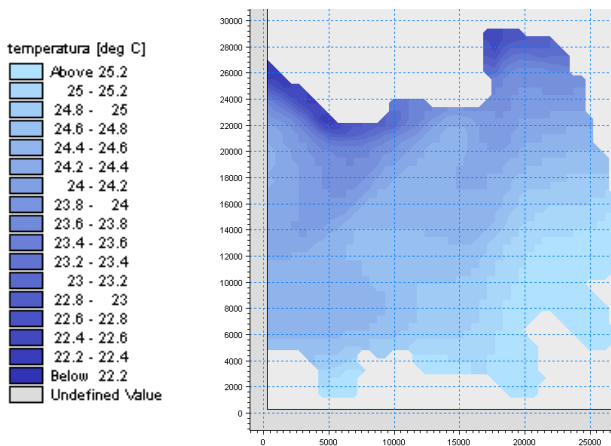


Slika 62: Temperatura v 25. sloju pri simulaciji b4 po 48h (PCFLOW3D)

20. sloj:



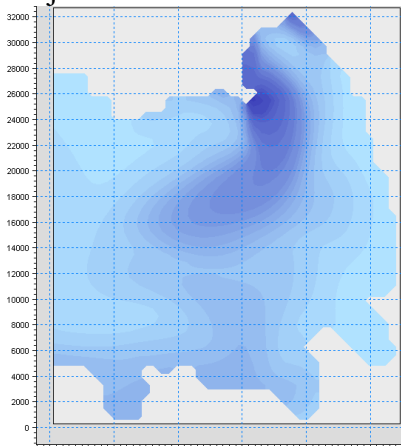
Slika 60: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji b4 po 48h (MIKE 3)



Slika 63: Temperatura v 20. sloju pri simulaciji b4 po 48h (PCFLOW3D)

#### Slanost:

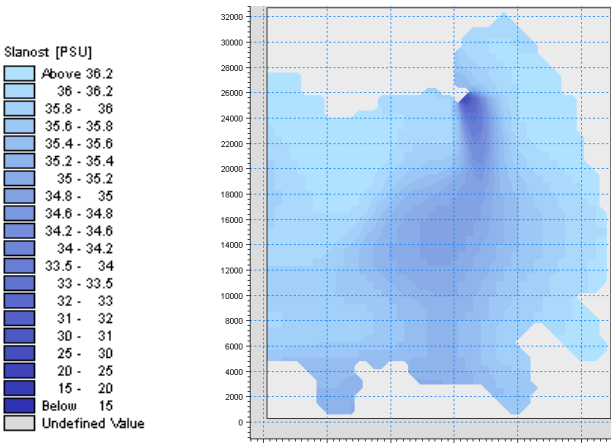
25. sloj:



Slika 61: Slanost v 25. sloju pri simulaciji b4 po 48h (MIKE 3)

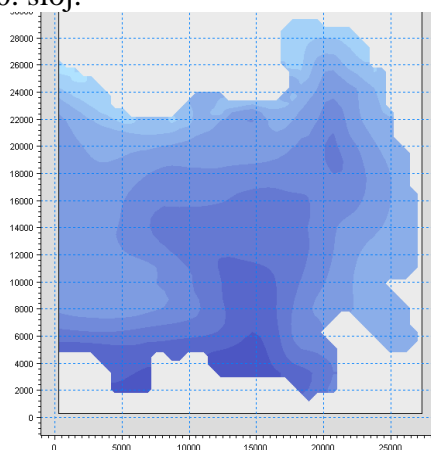
#### Slanost:

25. sloj:

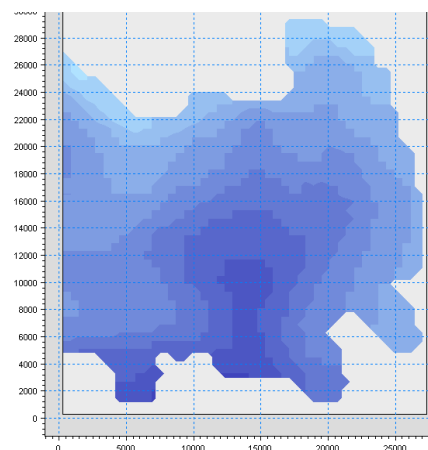
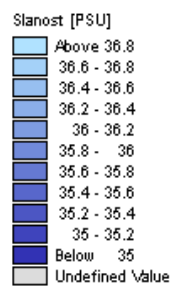


Slika 64: Slanost v 25. sloju pri simulaciji b4 po 48h (PCFLOW3D)

20. sloj:



Slika 65: Slanost v 20. sloju pri simulaciji b4 po 48h (MIKE 3)



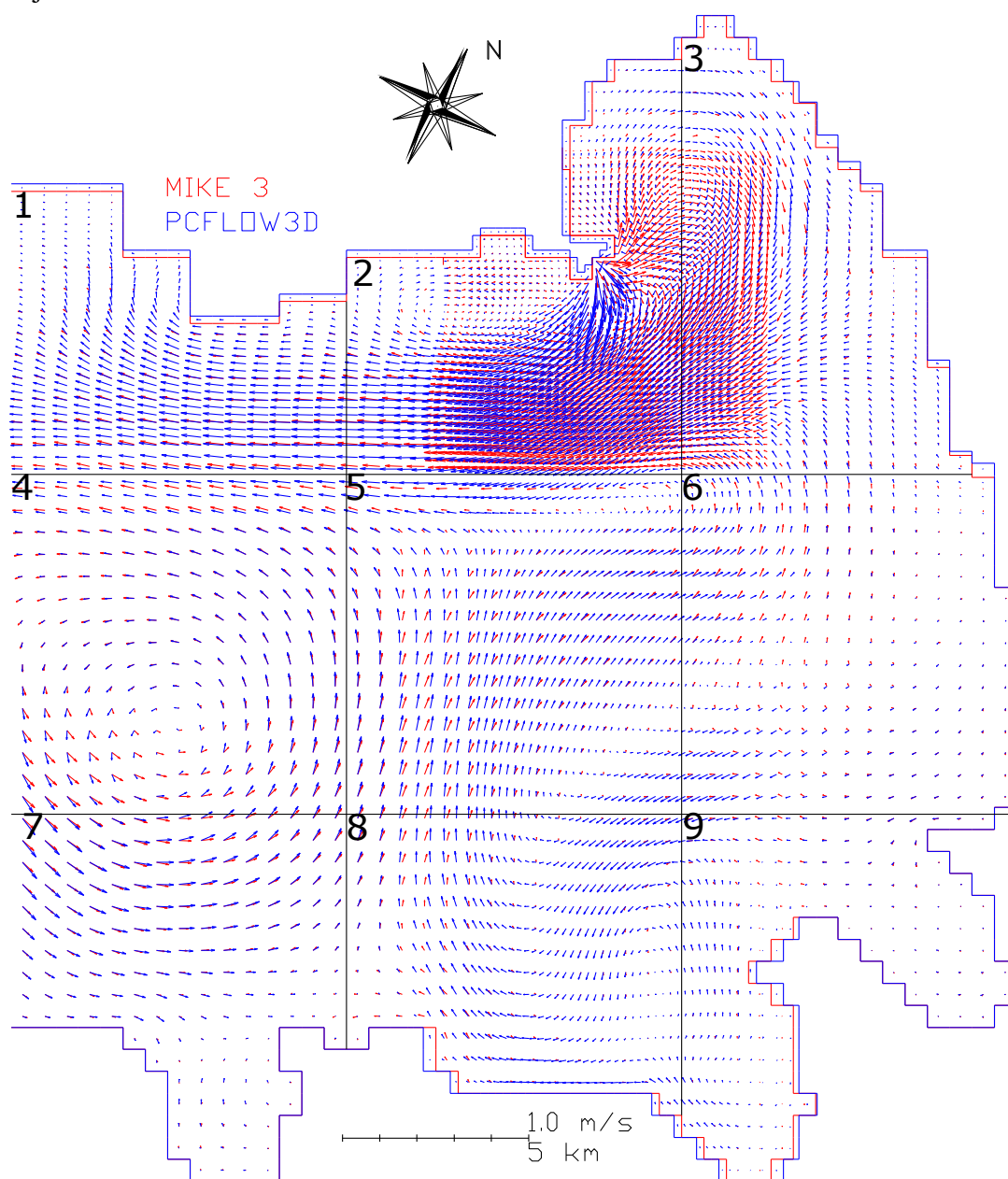
Slika 66: Slanost v 20. sloju pri simulaciji b4 po 48h (PCFLOW3D)

### 4.3.3 Neenakomerna mreža z modeli spremenljive viskoznosti

- c. Numerična mreža ima dimenzije  $D_x = 600$  m in  $D_y = 600$  m. V okolici Soče je mreža zgoščena na dimenzije  $200 \times 200$  m (slika 67). V modelu PCFLOW3D smo uporabili UPWIND shemo in model turbulence Mellor-Yamada v vertikalni - Smagorinsky v horizontalni smeri, v modelu MIKE 3 pa 3D UPWIND shemo in kombiniran model turbulence k- $\epsilon$  v vertikalni - Smagorinsky v horizontalni smeri.

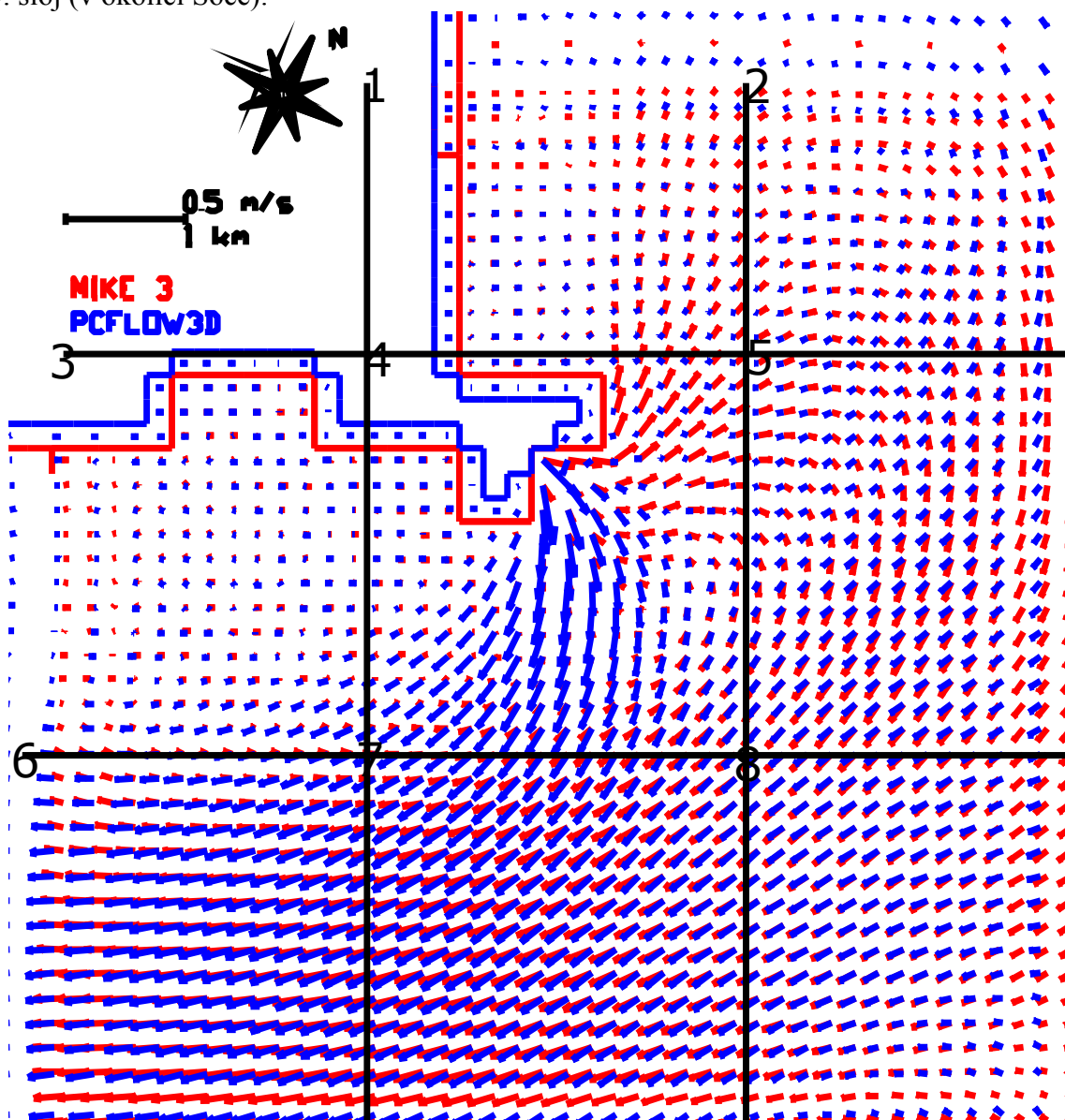
#### Simulacija c1:

25. sloj:



Slika 67: Simulacija c1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)

25. sloj (v okolici Soče):

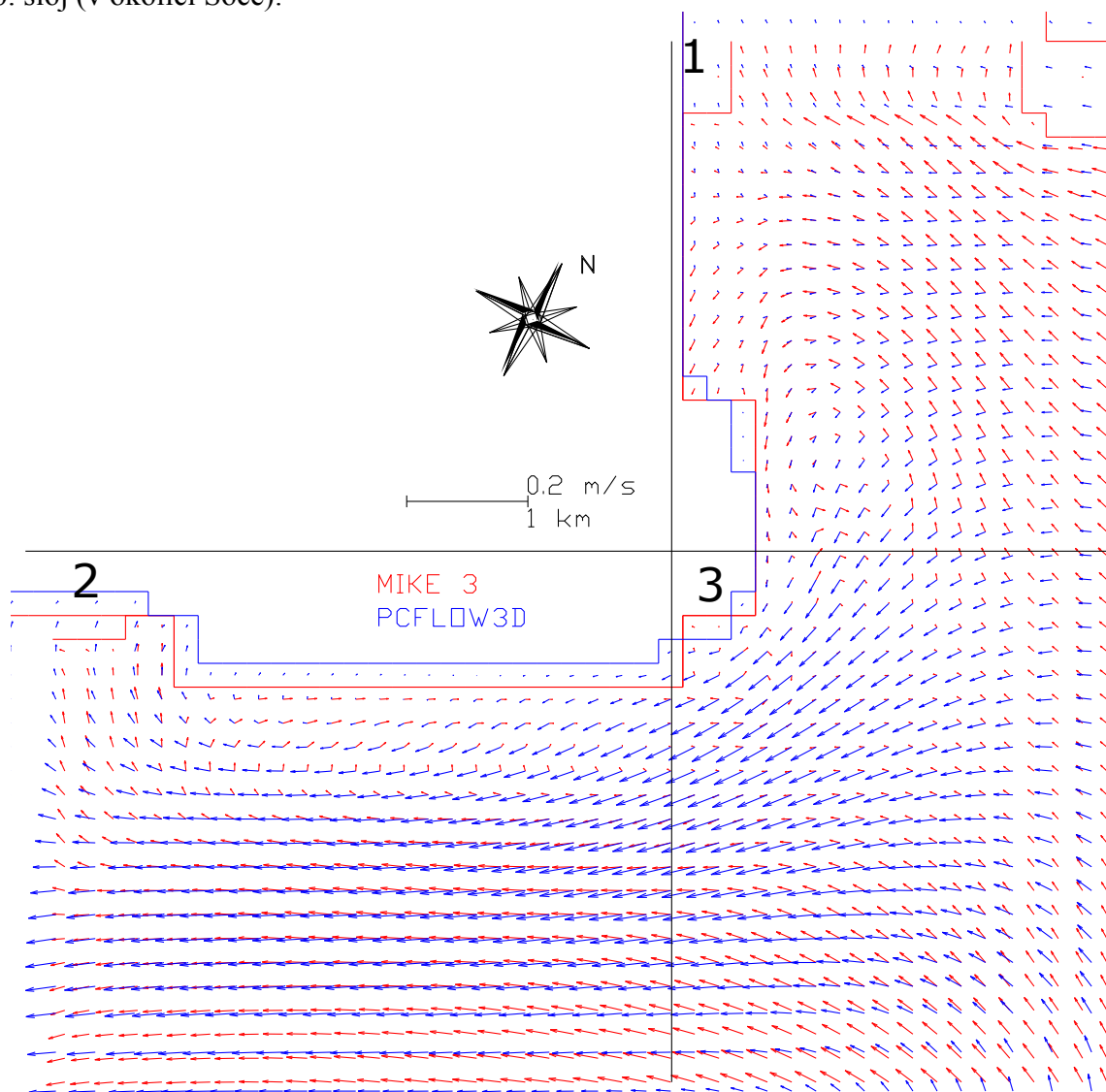


Slika 68: Simulacija c1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,574 (sprejemljivo)

Na slikah 67 in 68 je opazno, da je vpliv vtoka Soče na severni strani izliva pri modelu MIKE 3 spet večji kot pri modelu PCFLOW3D. Zaradi tega so opazne razlike med vektorji hitrosti na obeh straneh vtoka (četrti in drugi kvadrat). Tudi v šestem in sedmem kvadratu nastanejo razlike (do ca. 20°) v smeri vektorjev hitrosti.

20. sloj (v okolici Soče):



Slika 69: Simulacija c1 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 48h (20. sloj)

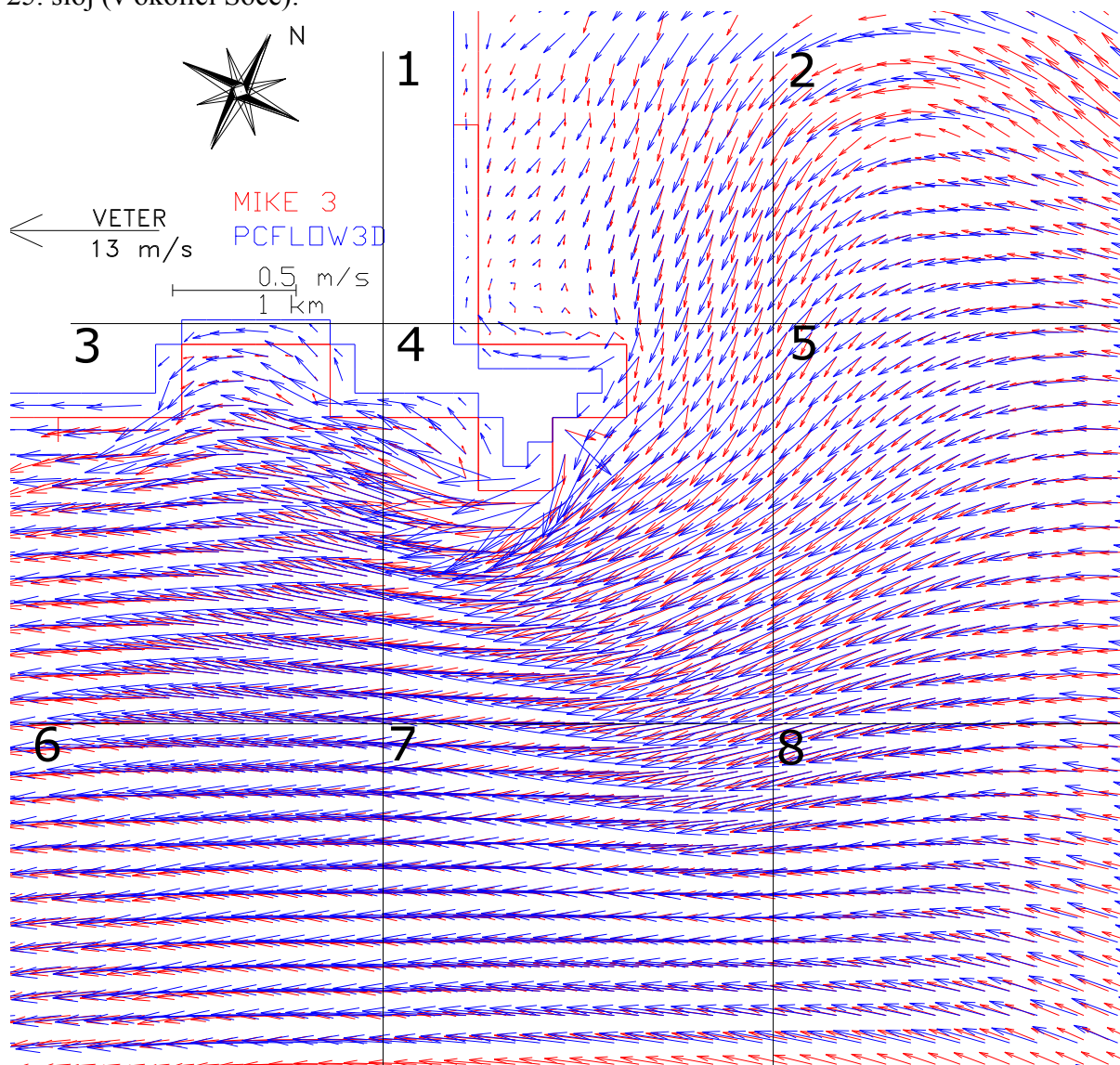
RMSN = 0,644 (slabo)

V globljih slojih (5,5 m) se razlika med rezultati večja (slika 69). Vektorji hitrosti so tudi do 10x večji v tretjem kvadratu pri modelu PCFLOW3D, poleg tega pa se smeri vektorjev razlikujejo za ca. 45°. V prvem kvadratu nastane pri simulaciji z modelom MIKE 3 vrtinec, z modelom PCFLOW3D pa ne. V drugem kvadratu nastanejo velike razlike v smeri vektorjev (do 180°) ob obali.



## Simulacija c2:

25. sloj (v okolici Soče):

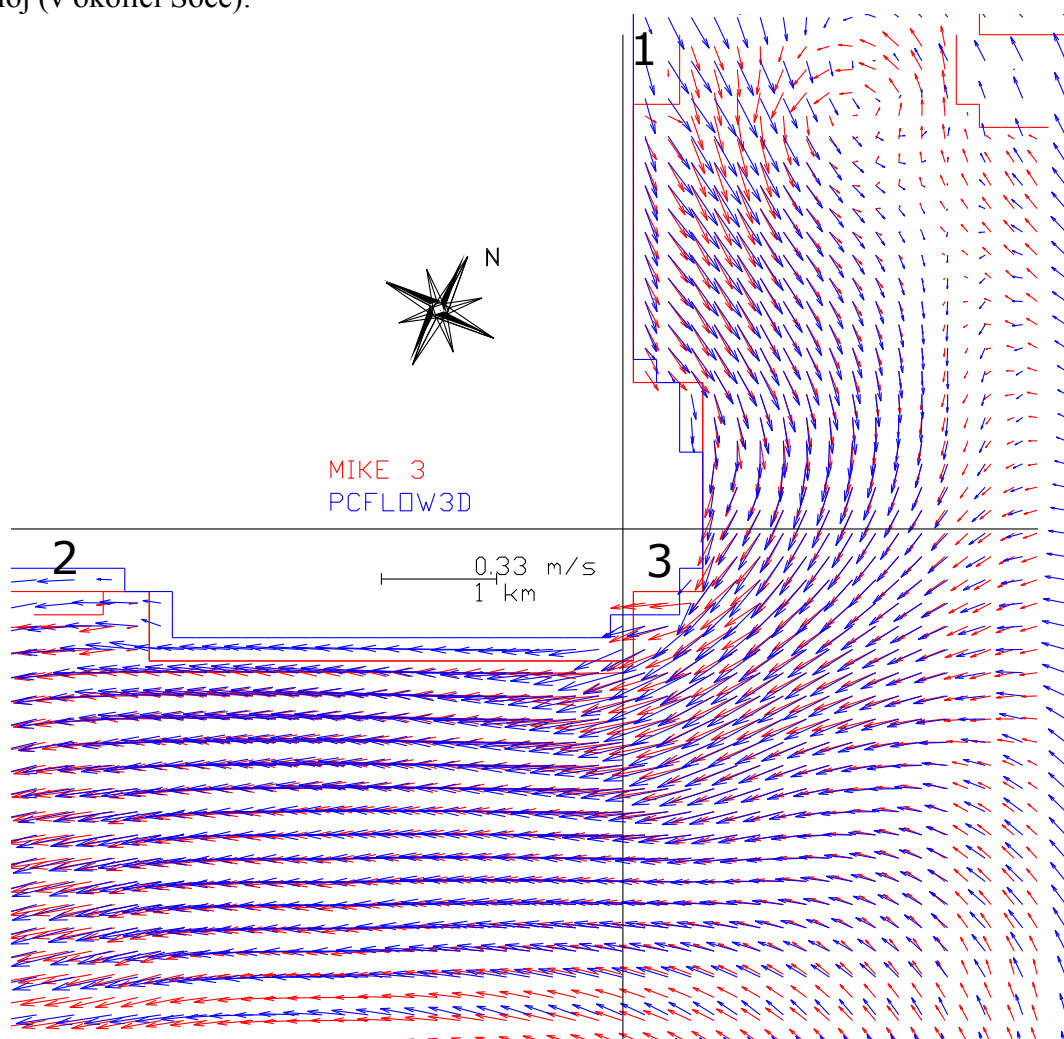


Slika 70: Simulacija c2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (25. sloj)

RMSN = 0,321 (dobro)

Na severu vtoka reke Soče je v glavnem toku razlika v smeri vektorjev hitrosti za ca. 10° (slika 70).

20. sloj (v okolici Soče):



Slika 71: Simulacija c2 - Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D po 24h (20. sloj)

RMSN = 0,255 (dobro)

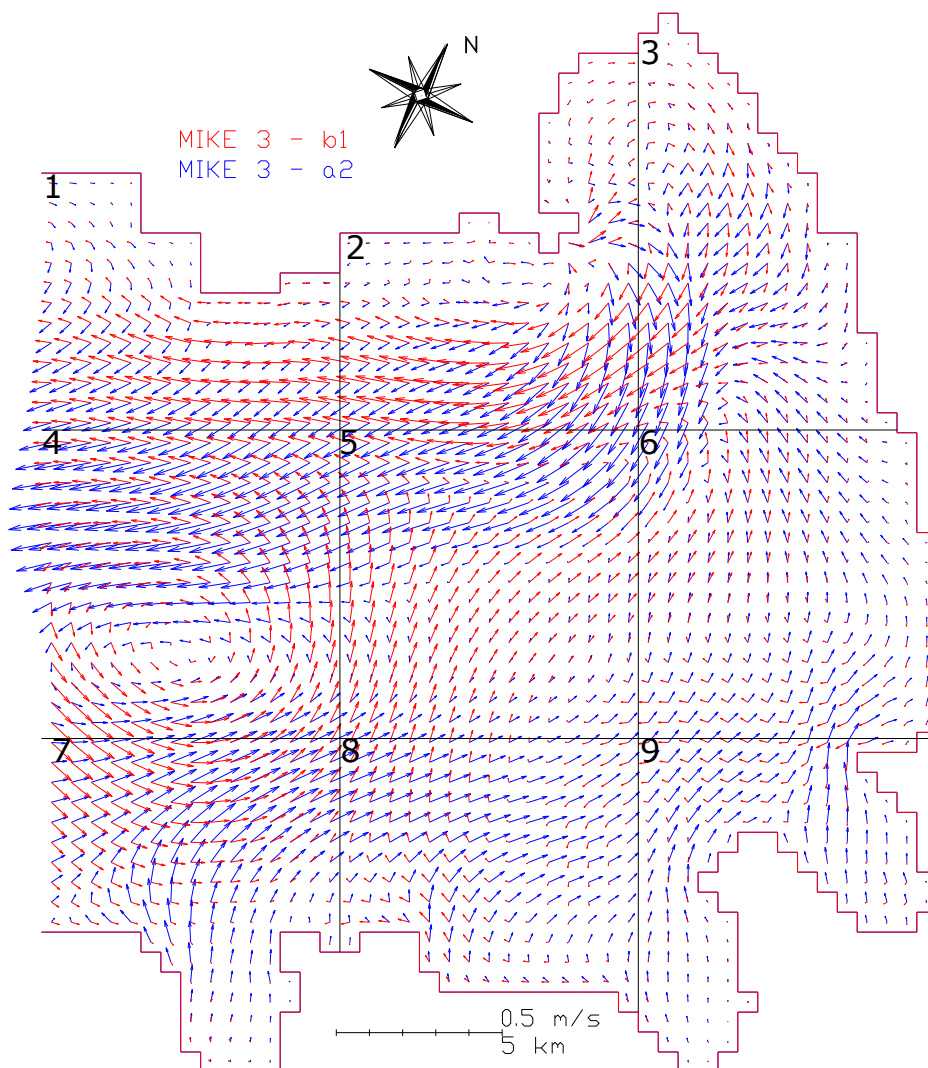
V prvem kvadratu nastaneta vrtinca pri obeh modelih, ki pa sta med seboj oddaljena za ca. 400 m (slika 71).

#### 4.3.4 Različni modeli turbulence

Preverili smo, kakšne razlike se pojavijo pri uporabi različnih modelov turbulence. Sicer so vhodni podatki simulacij enaki.

##### a2/b1 MIKE 3:

25. sloj:



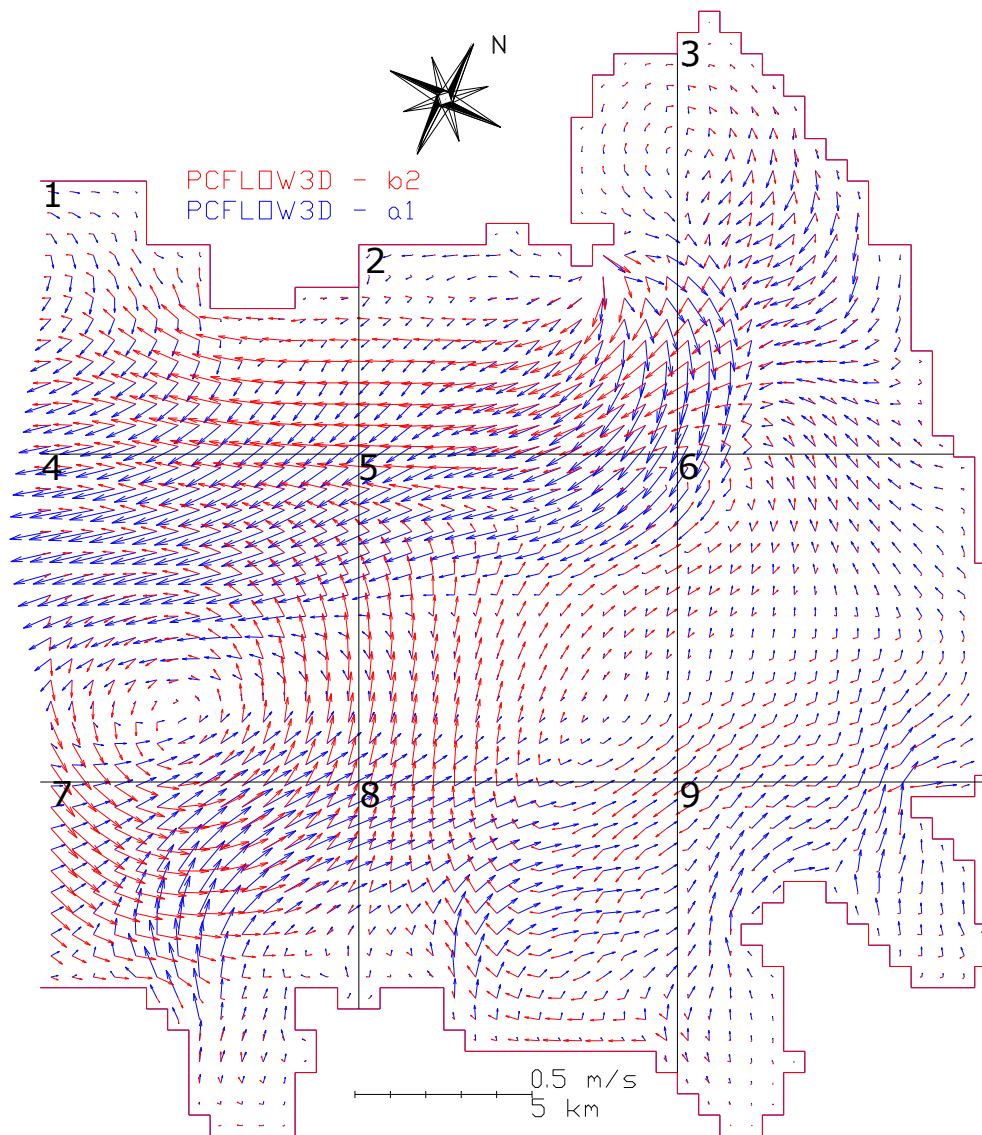
Slika 72: Simulacija a2/b1 - Primerjava modelov turbulence (MIKE 3) po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,869 (slabo)

Pojavljajo se večje razlike po celotnem Tržaškem zalivu (slika 72). Vrtinca v četrtem kvadratu sta med seboj odmaknjena za ca. 1200 m. Poteka glavnega toka, ki ga povzroči vtok Soče, sta pri različnih modelih turbulence drugačna. Pri konstantni viskoznosti poteka glavni tok po sredini Tržaškega zaliva, pri drugih uporabljenih modelih turbulence pa bolj severozahodno od sredine Tržaškega zaliva.

## a2/b1 PCFLOW3D:

25. sloj:



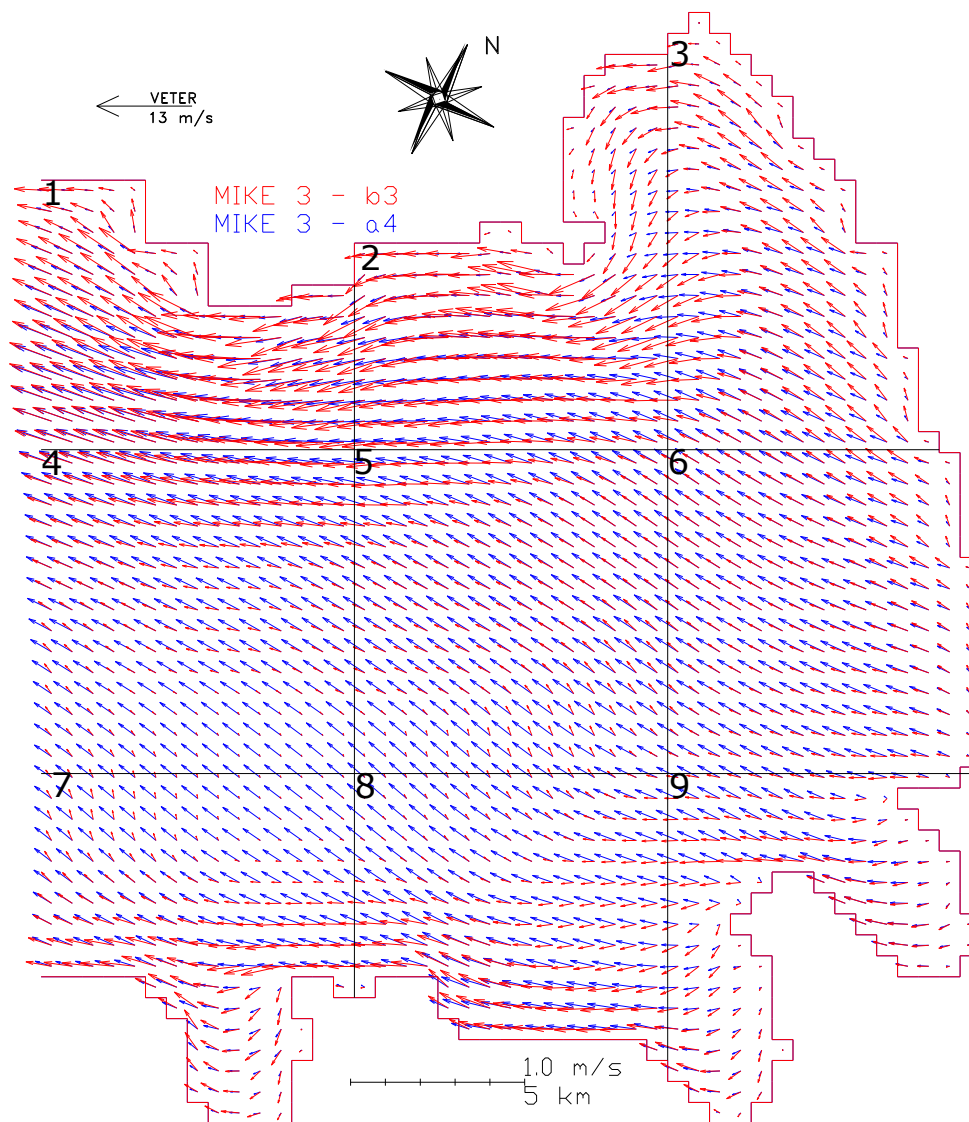
Slika 73: Simulacija a2/b1 - Primerjava modelov turbulence (PCFLOW3D) po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,934 (slabo)

Tudi pri modelu PCFLOW3D se pojavljajo velike razlike po celotnem Tržaškem zalivu (slika 73). Vrtinca v četrtem kvadratu sta med seboj odmaknjena za ca. 1000 m. Pri modelu PCFLOW3D opazimo, da glavni tok, ki ga v zalivu povzroči reka Soča, poteka drugače. Tokovnice glavnega toka pri različnih modelih turbulence pa so podobne kot pri modelu MIKE 3 (slika 72).

### a4/b3 MIKE 3:

25. sloj:



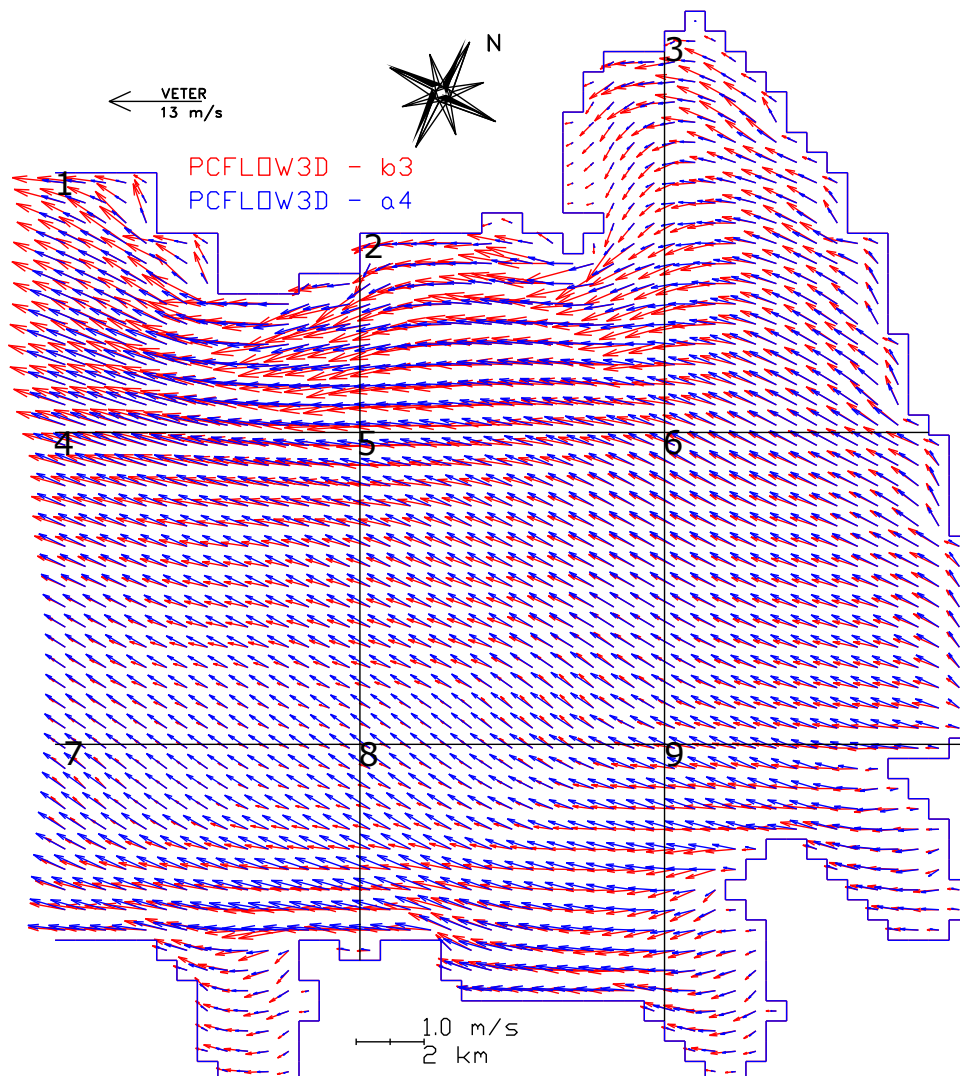
Slika 74: Simulacija a2/b1 - Primerjava modelov turbulence (PCFLOW3D) po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,666 (slabo)

Pri simulaciji b3 se pojavita območji s hitrejšim in počasnejšim tokom, ki pri simulaciji a4 nista tako izraziti (slika 74). V območju s hitrejšim tokom (prvi in drugi kvadrat) dobimo pri simulaciji b3 do dvakrat večje hitrosti kot pri simulaciji a4. V območju s počasnejšim tokom (četrti, peti, sedmi in osmi kvadrat) pa so hitrosti lokalno tudi do 12 x manjše pri simulaciji b3.

## a4/b3 PCFLOW3D:

25. sloj:



Slika 75: Simulacija a2/b1 - Primerjava modelov turbulence (PCFLOW3D) po 48h (25. sloj)

RMSN = 0,555 (sprejemljivo)

Tudi pri modelu PCFLOW3D se pri simulaciji b3 pojavita območja s hitrejšim in počasnejšim tokom, ki pri simulaciji a4 nista tako izraziti (slika 75). V območju s hitrejšim tokom (prvi in drugi kvadrat) dobimo pri simulaciji b3, tako kot pri modelu MIKE 3, do dvakrat večje hitrosti kot pri simulaciji a4. V območju s počasnejšim tokom (četrti, peti, sedmi in osmi kvadrat) pa so hitrosti do 2,5-krat manjše pri simulaciji b3. V tem delu se pri modelu PCFLOW3D pojavijo manjše razlike v velikosti vektorjev hitrosti, kot pri modelu MIKE 3.

#### 4.3.5 Analiza rezultatov

V preglednici 7 so prikazani rezultati metode korena normaliziranih kvadratov odstopanj (RMS normalised; RMSN)

Preglednica 7: Rezultati analize:

Sloj/sim	A1	A2	A3	A4	B1	B3	B4
25	0,195 odl.	0,202 dob.	0,243 dob.	0,245 dob.	0,351 dob.	0,354 dob.	0,594 spr.
24	_____	_____	_____	_____	0,421 spr.	_____	_____
20	0,230 dob,	0,232 dob.	0,428 spr.	0,429 spr.	0,376 dob.	0,255 dob.	0,756 slabo
11	_____	_____	_____	_____	0,602 slabo	_____	_____

Sloj/si m	C1	C2	A2/B1 MIKE 3	A2/B1 PCFLOW3D	A2/B1 MIKE 3	A2/B1 PCFLOW3D
25	0,574 spr.	0,321 dob.	0,869 slabo	0,934 slabo	0,666 slabo	0,555 spr.
24	_____	_____	_____	_____	_____	_____
20	0,644 Slabo	0,255 dob.	_____	_____	_____	_____
11	_____	_____	_____	_____	_____	_____

Sloj/sim_ur	B2 24ur	B2 27ur	B2 30ur	B2 33ur	B2 36ur	B2 39ur	B2 42ur	B2 45ur	B2 48ur
25	0,293 dob.	0,877 Slabo	0,492 spr.	0,995 slabo	0,367 dob.	0,943 slabo	0,776 slabo	0,955 slabo	0,564 spr.

Samo pri simulaciji s konstantno turbulentno viskoznostjo A1, kjer simuliramo gostotno gibanje T in s polj brez vpliva reke Soče, je ujemanje med modeloma na površinskem sloju odlično. Pri simulaciji A2 je ujemanje nekoliko slabše kot pri simulaciji A1. Rezultati so pričakovani, saj pri simulaciji A2 upoštevamo tudi vpliv reke Soče, način upoštevanja dotokov pa se med modeloma nekoliko razlikuje.

Simulaciji A2 in B1 se razlikujeta med seboj v izbiri modela turbulence. Pri simulaciji B1 smo uporabili v modelu PCFLOW3D model Mellor-Yamada v vertikalni ter Smagorinsky v horizontalni smeri, v modelu MIKE 3 pa kombiniran model k-ε v vertikalni ter Smagorinsky v horizontalni smeri. Pri simulaciji A2 smo izvedli simulacije s konstantnim koeficientom turbulentne viskoznosti. Zaradi različnih uporabljenih modelov turbulence so tudi razlike pri simulaciji B1 nekoliko večje, kot pri simulaciji A2.

Simulaciji B1 in C1 se razlikujeta samo v dimenzijah numerične mreže. Ocena je bila opravljena samo v okolici reke Soče, kjer je mreža zgoščena na 200 x 200 m. Način upoštevanja dotokov se med modeloma razlikuje, zaradi tega nastanejo razlike v okolici reke Soče, torej je slabše ujemanje simulacije C1, ki upošteva samo območje v okolici vtoka, pričakovano.

Pri simulacijah A3 in A4, kjer smo upoštevali močan zimski veter na popolnoma premešanem zalivu, ni bistvenih razlik med rezultati. Kljub vplivu reke Soče, ki smo ga upoštevali pri simulaciji A4, ni večjih razlik med rezultati. Močan veter je glavni vzrok gibanja, zato Soča v tem primeru nima bistvenega vpliva na rezultate.

Simulaciji A4 in B3 se med seboj razlikujeta v izbiri modela turbulence. Pri simulaciji B3 je zato ujemanje v površinskem sloju slabše. V dvajsetem sloju pa je, po našem mnenju slučajno, ujemanje boljše pri simulaciji B3 kot pri simulaciji A4. Simulacija C2 se razlikuje od simulacije B3 samo v dimenzijah numerične mreže. Ocena v okolici reke Soče (simulacija C2) je nekoliko boljša kot ocena pri simulaciji B3.

Pri simulacijah B4 smo upoštevali šibak veter (maestral, ki piha z hitrostjo 4 m/s) v poletnih razmerah. Razlike med modeloma so velike.

Pri simulaciji B2 smo kot edini vzrok gibanja upoštevali plimo. Analizirali smo rezultate za površinski sloj po 24., 27., 30., 33., 36., 39., 42., 45. in 48. urah. Rezultati se med seboj zelo razlikujejo, še najslabši so po 27., 33., 39. in 45. urah. Kljub številnim poskusom umerjanja so razlike ostale velike. Hitrosti v modelu PCFLOW3D, ki so vzporedne z odprtim robom, nepričakovano nihajo. To je po našem mnenju glavni razlog odstopanja.

#### 4.4 Primerjava izvedenih simulacij z drugimi dosedanjimi raziskavami

**Primerjava simulacije b3 s študijo Malačič in Petelin (2006)** z naslovom »Numerično modeliranje vetrne cirkulacije v Tržaškem zalivu.«

Simulacije so bile opravljene z modelom POM (Princeton Ocean Model). Dimenzije kontrolnih volumnov so 500 x 500 m. V študiji je bil upoštevan popolnoma premešan Tržaški zaliv s temperaturo 7,19 °C in slanostjo 36,62 ‰. Od 5-15 januarja je burja pihala s povprečno hitrostjo 8.2 m/s in večinoma v smeri 63°. Te vhodne podatke smo primerjali z podatki iz simulacije b3 (preglednica 8).

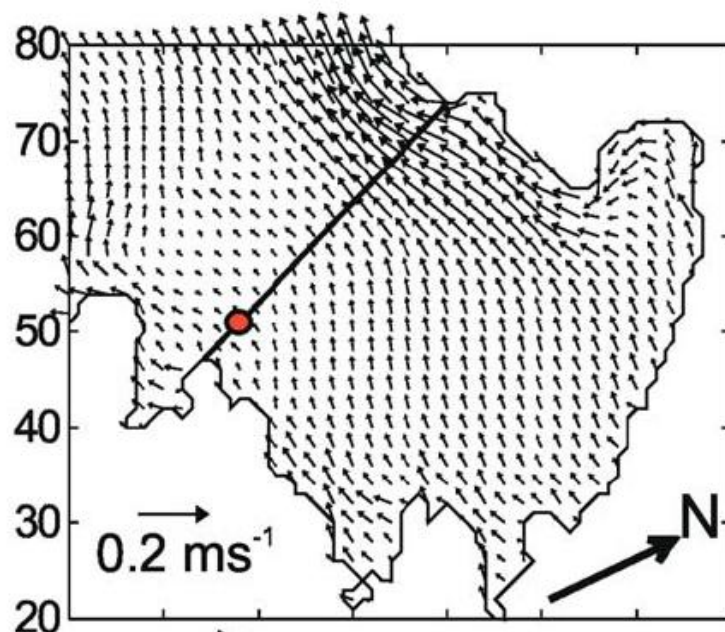
Preglednica 8: Primerjava vhodnih podatkov:

Model		Princeton Ocean Model	MIKE 3 in PCFLOW3D
Dimenzije kontrolnih volumnov		500 x 500 m	600 x 600 m
Gostota Tržaškega zaliva	Slanost	36,62 ‰	36,5 ‰
	temperatura	7,19 °C	8 °C
Veter	Hitrost	8,2 m/s	13 m/s
	Smer	ENE (63°)	ENE (63°)

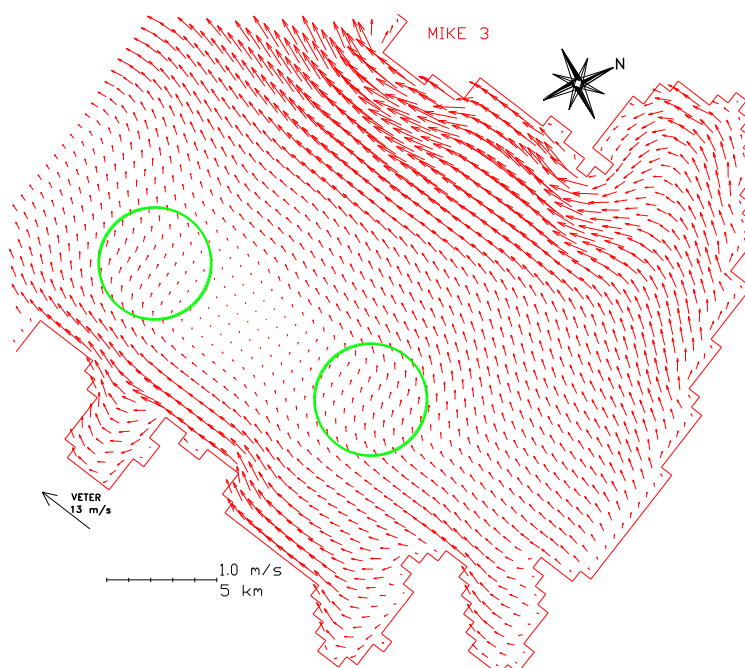


Vhodni podatki se nekoliko razlikujejo. Pri vseh simulacijah je bil upoštevan popolnoma premešan Tržaški zaliv, tako da tudi manjše razlike v temperaturi in slanosti Tržaškega zaliva nimajo večjega vpliva na rezultate. Smer vetra je v vseh primerih ista. Edini vzrok, ki lahko ima pomembnejši vpliv na rezultate, je razlika v hitrosti vetra (4,8 m/s), zato lahko pričakujemo večje hitrosti z modeloma MIKE 3 in PCFLOW3D, kot z modelom POM. Kvalitativno bi se rezultati kljub tej razliki morali ujemati.

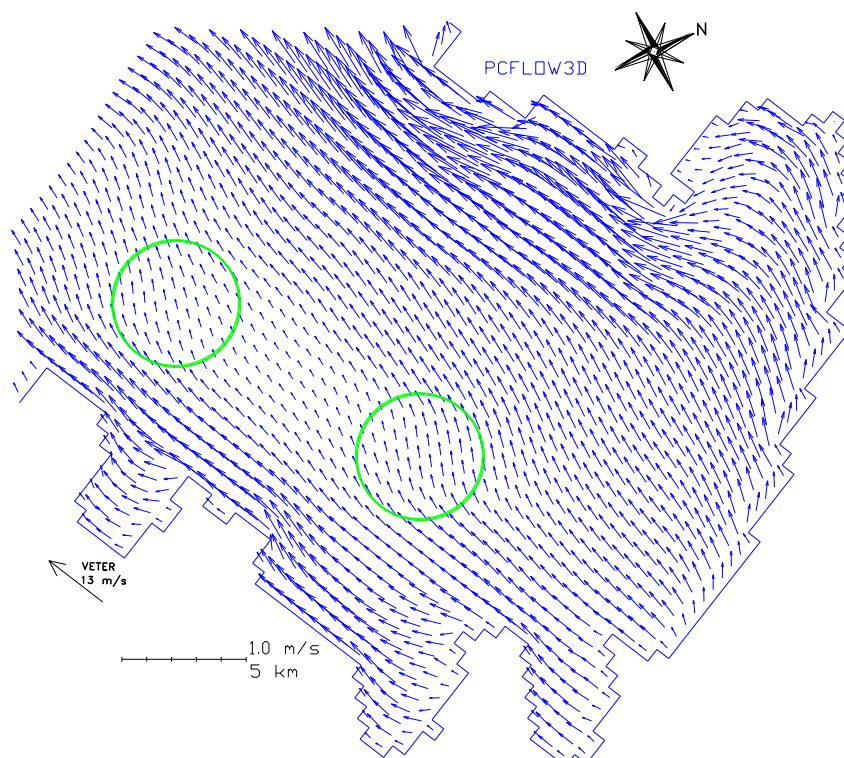
### Površinski (25) sloj:



Model Princeton Ocean Model (Malačič, Petelin, 2003, str. 213) – površinski sloj



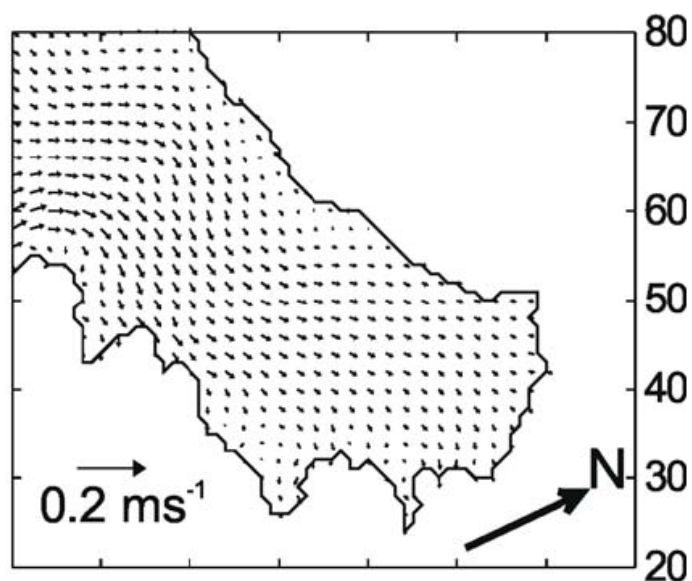
Slika 76: Model MIKE 3 – površinski sloj



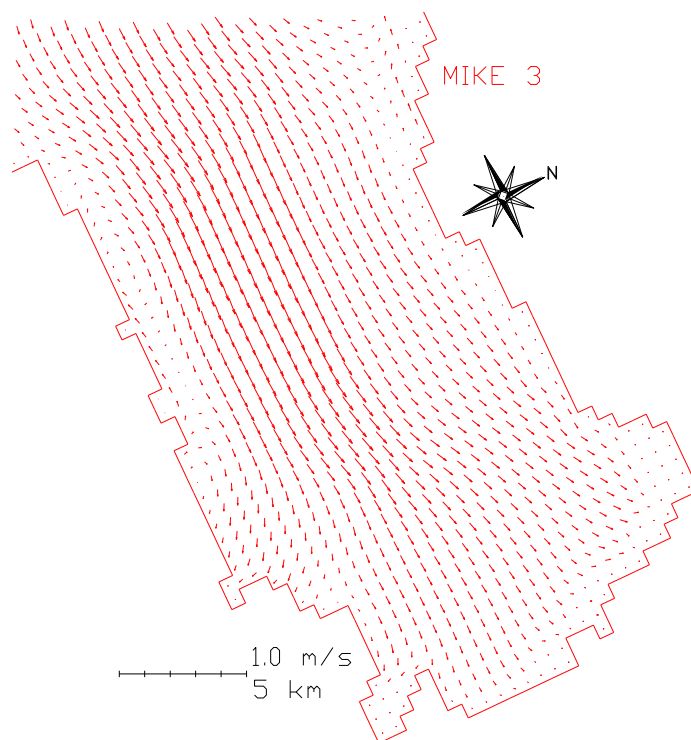
Slika 77: Model PCFLOW3D – površinski sloj

Če primerjamo vse tri modele, opazimo, da se v modelu MIKE 3 odkloni tok v okolici počasnejšega toka (obkroženo) bolj proti severu (slika 76) kot pri drugih dveh modelih. V tem delu zaliva se Princeton Ocean Model (Malačič, Petelin, 2003) in model PCFLOW3D (slika 77) bolje ujemata med sabo kot z modelom MIKE 3. V celotnem preostalem delu zaliva je kvalitativno ujemanje med modeli odlično.

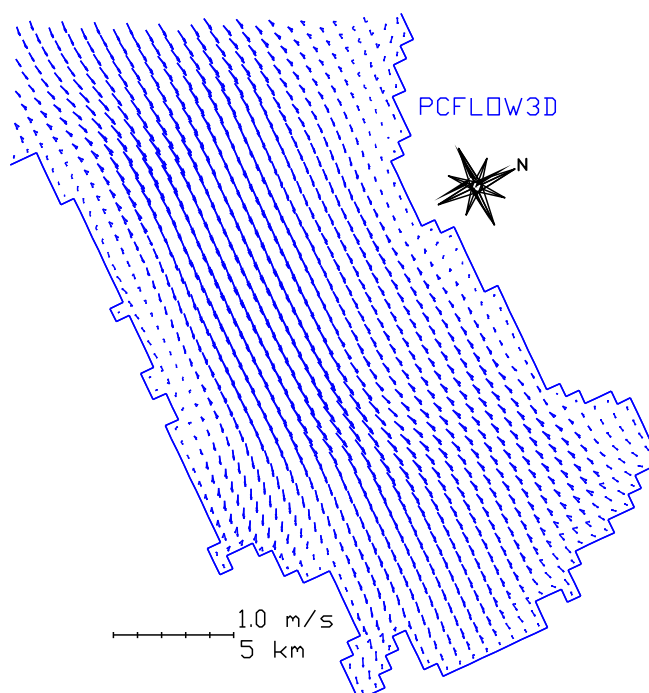
#### 10. sloj:



Model Princeton Ocean Model (Malačič, Petelin, 2003, str. 213) – 10. sloj



Slika 78: Model MIKE 3 – 10. sloj



Slika 79: Model PCFLOW3D – 10. sloj

V 10. sloju (15,5 m pod gladino) voda pri vseh treh modelih doteka v zaliv (Malačič, Petelin, 2003; slika 78; slika 79). Večjih razlik med modeli ni.

Ponovno pa moramo poudariti, da je pri simulacijah tipičnih sezonskih (kvazi-stacionarnih) razmer, kakršne smo izvedli z obema modeloma, iskanje ustreznih vremenskih pogojev, ki bi omogočalo primerjavo z meritvami, težko izvedljiva naloga. Zato so bile izvedene samo primerjave med modeli in primerjave s podobnimi študijami, ne pa tudi primerjave z meritvami. Rezultati vseh treh modelov pa so bili seveda tekom izpopolnjevanja in različnih simulacij doslej že večkrat primerjani z meritvami.

## 5 ZAKLJUČKI

V okviru diplomske naloge sem spoznala osnovne zakonitosti modeliranja hidrodinamičnih procesov ter delovanje modelov MIKE 3 in PCFLOW3D. Model PCFLOW3D je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin, torej je t.i. »hišni model«, ki ga lahko prilagajamo, spreminjamo in dopolnjujemo glede na naše potrebe. Če se pojavijo kakšne nepravilnosti v delovanju modela, jih lahko popravimo. Model MIKE 3 pa je, nasprotno, komercialni model. Takšni modeli so ponavadi prijaznejši do uporabnika, različni vmesniki in pisani priročniki nam omogočajo enostaven vnos podatkov in prikaz rezultatov. Zavedati se pa moramo, da takšnih modelov ne moremo spreminjati in popravljati, poleg tega pa so običajno tudi razmeroma dragi. Pogosto je tudi pomoč uporabnikom težko dosegljiva, pri očitnih napakah v modelu pa smo včasih obsojeni na daljše čakanje na novo različico modela in nove uporabniške priročnike.

S pripravljenimi podatki so bile narejene nekatere simulacije, v katerih smo upoštevali dejanske sezonske razmere v Tržaškem zalivu. Rezultate smo numerično primerjali z metodo korena normaliziranih kvadratov odstopanj. To je bil vsaj v Sloveniji prvi poskus preverjanja ujemanja oz. odstopanja vektorjev hitrosti z numeričnim vrednotenjem. To vrednotenje se je izkazalo za uporabno, saj so rezultati metode glede na vizualno oceno logični.

Primerjali smo rezultate modeliranja z obema modeloma, pri tem pa smo pri obeh modelih izbrali kar najbolj podobne modele turbulence, ki pa smo jih spreminjali med simulacijami. Primerjali smo rezultate osnovne in v okolici izliva Soče zgoščene numerične mreže, ter analizirali rezultate obeh vrst simulacij. Samo pri simulaciji, kjer nismo upoštevali vtoka, vetra in plime, je bilo ujemanje odlično. Dobre rezultate dobimo na primerih gostotnih gibanj zaradi gradientov T in s polj ter na primeru močne burje, precej slabše pa v primeru šibkega vetra, plime in primerjave različnih modelov turbulence.

Simulacije z močno burjo smo primerjali tudi s simulacijo, ki sta jo objavila Malačič in Petelin (2003). Kvalitativno ujemanje rezultatov vseh treh modelov je dobro.

Rezultati obeh modelov so med seboj podobni, večinoma so rezultati med seboj primerljivi, torej lahko oba modela priporočimo za nadaljnje delo na podobnih primerih. Nekatere, ponekod tudi razmeroma velike razlike rezultatov, izvirajo iz razlik med numeričnimi shemami in modeli turbulence ter različnimi načini podajanja robnih pogojev. Za podrobnejše študije cirkulacije bi bilo torej potrebno preučiti še velikost napake, ki jo povzročijo posamezni omenjeni vplivi, po možnosti na simulacijah v realnem času, ki bi jih bilo potrebno primerjati z meritvami. Nekoliko verjetno prispeva tudi numerična difuzija, ki je lahko vzrok za (nepravilna) gostotna gibanja in posledično napačno sliko cirkulacije.

Za natančnejšo primerjavo modelov MIKE 3 in PCFLOW3D bi bilo potrebno tudi podrobneje preučiti robni pogoj na odprtem robu obeh modelov in izpopolniti robni pogoj v modelu PCFLOW3D. Model MIKE 3 na odprtem robu omogoča različne možnosti in kombinacije podajanja gladine, tlakov, fiksnih ali spremenljivih hitrosti, smeri vektorjev hitrosti, slanosti, temperature ter plimne krivulje, kar je vsekakor velika prednost, ki pa je zaradi omejitev v modelu PCFLOW3D nismo uspeli preizkusiti. Ugotovili smo, da se med modeloma razlikuje tudi način podajanja vhodnih podatkov v vtočni celici (pretok in gibalna količina), zato bi bilo

ugodno, če bi tudi v tem pogledu modelu PCFLOW3D dodali možnosti, ki jih ponuja MIKE 3.

Med uporabo so se pokazale tudi prednosti posameznega modela. Model MIKE 3 ima zelo prijazen uporabniški vmesnik. Vnos podatkov je razmeroma enostaven. Podatke in rezultate modela je možno tudi enostavno predstaviti. Zaradi velikega števila podatkov je ta predstavitev dobrodošla, saj nam omogoča hitro iskanje morebitnih napak. Zelo enostaven je tudi uvoz in izvoz podatkov in rezultatov. Izkazalo se je, da je računski čas tega modela v primerjavi s primerljivimi modeli precej krajši.

Prednost modela PCFLOW3D je predvsem v tem, da je to t.i. »hišni model«, kar nam omogoča možnost sprotnega dograjevanja in popravljanja modela glede na potrebe simulacij. PCFLOW3D dopušča več različnih kombinacij modelov turbulence v horizontalni in vertikalni smeri. Ker so nekateri modeli turbulence v pogledu računskega časa zahtevnejši, je večja fleksibilnost ugodna.

Kljub razlikam med rezultati izvedenih simulacij se je model MIKE 3 izkazal kot uporaben model za modeliranje hidrodinamike na območjih, ki imajo podobne značilnosti, kot Tržaški zaliv. Poleg tega ima MIKE 3 prijazen uporabniški vmesnik, kar je zelo pomembno za mlade inženirje, ki se prvič srečujejo z podobnimi modeli.

## 6 VIRI

Brecelj, M. 2002. Izdelava uporabniškega vmesnika za PCFLOW3D. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 92 f.

Crise, A., Querin, S., Malačič, V. 2002. A strong bora event in the Gulf of Trieste: a numerical study of wind driven circulation in stratified conditions with a preoperational model. *Acta Adriatica*: str 185-206.

Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za akademijo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 72 f.

Četina, M., Rajar, R., Širca, A., Žagar, D. 1999. PCFLOW3D. User's Manual. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin: 294 str.

Četina, M., Rajar, R., Krzyk, M., Zakrajšek, M., Žagar, D. 2006. Eksperimentalna analiza čezmejnega vpliva projektov plinskega terminala v Tržaškem zalivu in plinskega terminala v Žavljah in študije presoje vplivov na okolje v Republiki Sloveniji za projekt plinskega terminala v Tržaškem zalivu in plinskega terminala v Žavljah. Končno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 23 f.

DHI software. 2007a. MIKE Zero – Marine tools. User guides: 298 str.

DHI software. 2007b. MIKE Zero – Preprocessing & Postprocessing. User guides: 472 str.

DHI software. 2007c. MIKE Zero – The common DHI user interface for project oriented water modelling. User guides: 92 str.

DHI software. 2007d. MIKE 3 – Environmental hydraulics. User guides: 232 str.

DHI software. 2007e. MIKE 3 – Estuarine and coastal hydraulics and oceanography. User guides: 266 str.

DHI software. 2007f. MIKE 3 – Inland, Coastal Waters and Seas in 3D.  
<http://www.dhigroup.com/Software/Marine/MIKE3.aspx> (15.12.2007).

Dorić, E. 2007. Možnosti uporabe modela MIKE 3 v Tržaškem zalivu. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 77 f.

Galuf, S. 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 69 f.

Hidrološka študija Soče. 1982. Zvezek 6, VP Solkan, Osnovni podatki, št. naloge C-1023, VGI 1982. Študijski oddelek.

Horvat, M., Covelli, S., Faganeli, J., Logar, M., Mandić, V., Rajar, R., Širca, A., Žagar, D. 1999. Mercury in contaminated coastal environments. A case study: the Gulf of Trieste. *Science of the Total Environment*: str. 43-56.

Kotnik, J. 2003. The role of Isonzo River suspended matter in transferring mercury compounds into the Gulf of Trieste. IJS Final report.

Kovšca, J. 2007. Dopolnitve modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 67 f.

Longo, R., Raicich, F., Mosetti, F. 1990. A numerical model of transport and fate of radionuclides in the Gulf of Trieste. *Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata* 1 (January): str. 13-24.

Malačič, V., Petelin, B. 2003. Numerical modeling of the winter circulation of the Gulf of Trieste (northern Adriatic). *Acta Adriatica* 47: str. 207-217.

Mosetti, F. 1983. Sintesi sull'idrologia del Friuli – Venezia Giulia. Quaderni dell'ente tutela pesca, *Rivista di Limnologia* 6: 11 str.

Prognozirano plimovanje morja. Tide tables 2008. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje.  
<http://www.arso.gov.si/vode/morje/plima08.pdf> (12.2.2008).

Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 279 str.

Rajar, R., Četina, M. 1990. Modelling of tidal and wind induced currents and dispersion in the Northern Adriatic. *Acta Adriatica* 2: str. 785-812.

Rajar, R., Četina, M., Žagar, D. 1995a. Three-dimensional modelling of oil spill in the Adriatic. V: WROBEL, L. C. (ur.), BREBBIA, C. A. (ur.), TRAVERSONI, L. (ur.). *Computer modelling of seas and coastal regions II*. Southampton. Boston, Computational Mechanics Publications: str. 95-102.

Rajar, R., Četina, M., Žagar, D., Širca, A. 1995b. 3D matematički model za simulacijo razlijevanja nafte u moru. V: GEREŠ, Dragutin (ur.). *Održivi razvoj i upravljanje vodama*. Zbornik radova. Zagreb, Hrvatska vodoprivreda: str. 385-391.

Rajar, R., Četina, M. 1997a. Hydrodynamic and Water Quality Modelling. An Experience. *Ecological Modelling* 101: str. 195-207.

Rajar, R., Četina, M., Širca, A. 1997b. Hydrodynamic and Water Quality Modelling. Case Studies. *Ecological Modelling* 101: str. 209-228.



Rajar, R., Žagar, D., Širca, A., Horvat, M. 1998. Two- and three-dimensional modelling of mercury transport in the Gulf of Trieste. V: BREBBIA, C. A. (ur.). Second International Conference on Environmental Coastal Regions held in Cancun. Mexico, Environmental coastal regions, Environmental studies. Boston, Southampton, WIT Press, 1998: str. 289-300.

Rajar, R. 1999. Hidromehanika. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 141 str.

Rajar, R. 2000. Numerical modeling of currents. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 9 str.

Rajar, R., Žagar, D., Širca, A., Horvat, M. 2000. Three-dimensional modelling of mercury cycling in the gulf of Trieste. The Science of the Total Environment 260: str. 109-123.

Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Agagi, H., Yano, S., Tomiyasu, T., Horvat, M. 2004a. Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. Ecological Modelling 171: str. 139-155.

Rajar, R., Yano, S., Tada, A., Akagi, H., Oshikawa, H., Žagar, D., Četina, M., Krzyk, M., Breclj, M. 2004b. Measurements and three-dimensional modelling of mercury cycling in Minamata Bay and in the Gulf of Trieste. RMZ-mater. geoviron. 2: str. 1328-1331.

Rajar, R., Četina, M., Horvat, M., Žagar, D. 2007. Mass balance of mercury in the Mediterranean sea. Mar. Chem.: str. 1-14.

Ramšak, V. 2006. Simulacija izmenjave živega srebra med vodo in zrakom s 3-D modelom PCFLOW3D v Tržaškem zalivu. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 120 f.

Ramšak, V. 2007. Simulacija hidrodinamike s spremenljivim vetrom z modelom PCFLOW3D. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 28 f.

Rozman, S. 2005. Simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu z modelom PCFLOW3D. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 91 f.

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 295 str.

Širca, A. 1996. Modeliranje hidromehanike in transporta živosrebrnih spojin v Tržaškem Zalivu. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 164 f.

Širca, A., Rajar, R. 1997a. Modelling the effect of wind on average circulation and long-term pollutant dispersion in the Gulf of Trieste. Acta Adriatica 2: str. 45-59.

Širca, A., Rajar, R. 1997b. Calibration of a 2D mercury transport and fate model of the Gulf of Trieste. In *Water Pollution 97*, Rajar, R. and Brebbia, M. (Eds.). Computational Mechanics Publication, WIT, Southampton: str. 503-512.

Širca, A., Horvat, M., Rajar, R., Covelli, S., Žagar, D., Faganeli, J. 1999a. Estimation of mercury mass balance in the Gulf of Trieste. *Acta Adriatica 2*: str. 75-85.

Širca, A., Rajar, R., Harris, R. C., Horvat, M. 1999b. Mercury transport and fate in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic) – a two-dimensional approach. *Environmental Modelling & Software 14*: str. 645-655.

Vodnogospodarske osnove Slovenije. 1978. Zveza vodnih skupnosti Slovenije.

Zavatarelli, M., Pinardi, N. 2003. The Adriatic Sea modelling system: a nested approach. *Annales Geophysicae 21*: str. 345-364.

Žagar, D. 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 63 f.

Žagar, D., Širca, A., Rajar, R., Horvat, M., Covelli, S., Harris, R.C. 1998. Two dimensional modeling of mercury transport in the Gulf of Trieste. V: *Book of abstracts*. Center for Environmental & Applied Mechanics. Baltimore, Johns Hopkins University: str. 162-163.

Žagar, D. 1999. Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v Tržaškem zalivu. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 101 f.

Žagar, D., Rajar, R., Širca, A., Horvat, M., Četina, M. 2000. Three-dimensional model of dispersion of mercury in marine environment. V: RODRÍGUEZ, G. R. (ur.), BREBBIA, C. A. (ur.), PÉREZ-MARTELL, E. (ur.). *Environmental coastal regions III*. Boston, Environmental studies, WIT Press: str. 205-215.

Žagar, D., Rajar, R., Širca, A., Horvat, M., Četina, M. 2001. Dolgotrajna 3D simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu. *Acta hydrotech 30*: str. 25-43.

Žagar, D. 2005. Mercury in the aquatic environment – an integrated modelling approach. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 8 str.

Žagar, D., Petkovšek, G., Rajar, R., Sirnik, N., Horvat, M., Voudouri, A., Kallos, G., Četina, M. 2007. Modelling of mercury transport and transformations in the water compartment of the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry 107*: str. 64-88.