

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 Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidat:

Mitja Centa

Modeliranje transporta hranil v Tržaškem zalivu s programom PCFLOW3D

Diplomska naloga št.: 3014

Mentor:

doc. dr. Dušan Žagar

Somentor:

dr. Monika Peterlin , prof. dr. Boris Kompare

Ljubljana, 29. 5. 2008

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MITJA CENTA** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»MODELIRANJE TRANSPORTA HRANIL V TRŽAŠKEM ZALIVU Z MODELOM
PCFLOW3D«.**

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

Ljubljana, 22. 4. 2008

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 519.61/.64:504.4:532.5:551.46(043.2)
- Avtor:** Mitja Centa
- Mentor:** doc. dr. Dušan Žagar
- Somentor:** dr. Monika Peterlin
izr. prof. dr. Boris Kompare
- Naslov:** Modeliranje transporta hranil v Tržaškem zalivu z modelom PCFLOW3D
- Obseg in oprema:** 100 str., 25 pregl., 63 sl., 15 en.
- Ključne besede:** tridimenzionalni model, matematični model, hranila, celokupni fosfor, fekalne koliformne bakterije, Tržaški zaliv

Izvodček

Diplomsko delo obravnava modeliranje transporta celokupnega fosforja in fekalnih koliformnih bakterij v Tržaškem zalivu z modelom PCFLOW3D. Zbrani in obdelani so podatki o temperaturnih in slanostnih razmerah, vetru, koncentracijah celokupnega fosforja v Tržaškem zalivu ter pretokih, temperaturi in koncentracijah celokupnega fosforja v rekah Soči in Rižani ter podatki o številu fekalnih koliformnih bakterij v Rižani in na kopališčih v Koprskem zalivu. Iz podatkov so izračunane povprečne sezonske vrednosti parametrov, ki predstavljajo vhodne podatke modela. Na podlagi teh podatkov so izdelani scenariji za simulacije. Hkrati smo poskušali modelirati hidrodinamiko in transport celokupnega fosforja. Zaradi razmeroma slabega ujemanja rezultatov modela PCFLOW3D z meritvami smo rezultate poskusili izboljšati z upoštevanjem sedimentacije, in sicer z Imbodenovim modelom. Rezultate smo primerjali med seboj ter z meritvami, izvedenimi na petih merilnih mestih v Tržaškem zalivu. Korekcija oz. izboljšanje rezultatov je pokazalo dokaj dobro ujemanje z meritvami. Poleg modeliranja transporta celokupnega fosforja smo izvedli tudi simulacije transporta fekalnih koliformnih bakterij. Z modeliranjem koncentracij fekalnih koliformnih bakterij zaradi cirkulacije vode s hkratnim upoštevanjem njihove umrljivosti smo ugotovili, da fekalne koliformne bakterije iz Rižane lahko vplivajo na kvaliteto kopalne vode na petih kopališčih v Koprskem zalivu.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:504.4:532.5:551.46(043.2)

Author: Mitja Centa

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dušan Žagar

Cosupervisor: Dr. Monika Peterlin
Assoc. Prof. Dr. Boris Kompare

Title: Modelling of nutrient transport in the Gulf of Trieste with the PCFLOW3D model

Notes: 100 p., 25 tab., 63 fig., 15 eq.

Key words: three – dimensional model, mathematical model, nutrients, total phosphorus, faecal coliforms, Gulf of Trieste

Abstract

This research paper focuses on the modelling of the transport of total phosphorus and faecal coliforms in the Gulf of Trieste using the PCFLOW3D model. The data about the water temperatures and salinity conditions, the wind and the total phosphorus concentrations in the Gulf of Trieste as well as the data about the discharges, the temperatures, the total phosphorus concentrations in the Soča and the Rižana rivers and the number of faecal coliforms in the Rižana river and on five seaside resorts in the Gulf of Koper have been collected and processed for use in the model. On the basis of the average seasonal parameters and values, the scenarios for simulations have been established. We have tried to model the hydrodynamics and the transport of total phosphorus simultaneously. Because of a relatively poor compliance of the PCFLOW3D model results with the measurements taken, we have tried to improve them by considering sedimentation using the Imboden model. The results have been analyzed and compared to the measures carried out on five measure points in the Gulf of Trieste. The improved results show a better compliance with the previous measurements. Besides modelling the transport of total phosphorus, the simulations of the transport of faecal coliforms have also been performed. Taking into consideration the effect of water circulation and the mortality rate of the faecal coliforms, we discovered through this modelling that the faecal coliforms from the Rižana River can influence the water quality of five seaside resorts in the Gulf of Koper.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Dušanu Žagarju, somentorjema dr. Moniki Peterlin in izr. prof. dr. Borisu Komparetu ter asist. dr. Nataši Atanasovi in pa sodelavcem v službi (Inštitut za vode Republike Slovenije – IzVRS) za pomoč pri nastajanju in pisanju diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO), ki mi je posredovala potrebne podatke za diplomsko nalogo. Še posebej se zahvaljujem družini in moji Mateji, ki so me v času študija in ob nastajanju diplomske naloge podpirali in mi ves čas stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	MODEL	4
2.1	Model PCFLOW3D	4
2.1.1	Hidrodinamični modul	4
2.1.1.1	Osnovne enačbe.....	4
2.1.1.2	Modeli turbulence in upoštevanje stratifikacije.....	9
2.1.1.3	Metoda reševanja	11
2.1.2	Transportno – disperzijski modul	12
2.1.2.1	Osnovna enačba	12
2.1.2.2	Metoda reševanja	13
2.1.3	Sedimentacijski modul (modul za transport plavin)	14
2.1.4	Biogeokemični modul.....	14
2.2	Imbodenov model.....	15
2.2.1	Spremenljivke in parametri modela.....	16
3	HRANILA, FOSFOR (P) IN FEKALNE KOLIFORMNE BAKTERIJE (FC).....	17
3.1	Hranila	17
3.2	Fosfor.....	21
3.3	Fekalne koliformne bakterije (FC).....	23
4	PODATKI.....	25
4.1	Definicijsko območje.....	25
4.2	Monitoring kakovosti morja v Tržaškem zalivu.....	29

4.2.1	Monitoring kakovosti morja, brakičnih voda in voda za življenje in rast morskih školjk in morskih polžev	30
4.2.2	Monitoring kakovosti morja in kontrola onesnaženja s kopnega.....	32
4.2.3	Meritve na merilnih mestih, ki smo jih uporabili v diplomii.....	33
4.3	Kopalna voda	34
4.4	Podatki za modeliranje	37
4.4.1	Tržaški zaliv	37
4.4.1.1	Veter.....	37
4.4.1.1.1	Sezonski veter.....	38
4.4.1.1.2	Dnevni in nočni veter.....	38
4.4.1.1.3	Tramontana.....	40
4.4.1.2	Temperatura in slanost v zalivu	40
4.4.1.3	Plimovanje v Koprskem zalivu.....	41
4.4.1.4	Začetne koncentracije celokupnega fosforja v zalivu	42
4.4.1.5	Začetno stanje – število fekalnih koliformnih bakterij v Koprskem zalivu.	44
4.4.2	Reki Soča in Rižana.....	44
4.4.2.1	Temperatura in slanost na ustju Soče in Rižane	44
4.4.2.2	Sezonski pretok na ustjih Soče in Rižane	45
4.4.2.2.1	Sezonski pretok na ustju Soče	45
4.4.2.2.2	Sezonski pretok na ustju Rižane	46
4.4.2.3	Koncentracija celokupnega fosforja na ustjih Soče in Rižane	48
4.4.2.3.1	Koncentracija celokupnega fosforja na ustju Soče	48
4.4.2.3.2	Koncentracija celokupnega fosforja na ustju Rižane	50
4.4.2.4	Število fekalnih koliformnih bakterij v Rižani	50
5	SIMULACIJE	52
5.1	Modeliranje celokupnega fosforja	52
5.2	Modeliranje fekalnih koliformnih bakterij.....	78
6	ZAKLJUČKI IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO.....	92

6.1	Zaključki.....	92
6.2	Napotki za nadaljnje delo.....	93
VIRI.....		94

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Merilna mesta (poleg morskih je poleg še edino žarišče rečnega onesnaženja)	33
Preglednica 2: Prikaz števila meritev za celokupni fosfor na posameznem merilnem mestu na določeni globini in na edinem uporabljenem žarišču rečnega onesnaženja	33
Preglednica 3: Prikaz merilnih mest in globin, na katerih so se izvajale meritve	33
Preglednica 4: Primerjava med mikrobiološkimi zahtevami po kopalni direktivi 76/160/EGS in slovenski zakonodaji (ARSO, 2007a)	35
Preglednica 5: Seznam uporabljenih kopališč (ARSO).....	36
Preglednica 6: Število vzorčenj na posameznem kopališču (ARSO).....	36
Preglednica 7: Prikaz povprečnega števila fekalnih koliformnih bakterij na posameznem kopališču.....	36
Preglednica 8: Smer in hitrost povprečnih sezonskih vetrov v Tržaškem zalivu (Žagar, 1999)	38
Preglednica 9: Veter po komponentah za model	39
Preglednica 10: Prikaz povprečja koncentracij celokupnega fosforja za določeno globino	42
Preglednica 11: Koncentracija celokupnega fosforja v posameznem sloju kot vhodni podatek za model.....	43
Preglednica 12: Povprečna sezonska temperatura Soče pod zadnjim mostom pred izlivom (Žagar, 1999)	45
Preglednica 13: Izračun sezonskega pretoka na ustju Soče.....	46
Preglednica 14: Mesečni in sezonski povprečni pretoki na ustju Rižane.....	47
Preglednica 15: Povprečni sezonski pretoki na ustju Rižane	48
Preglednica 16: Izračun koncentracije celokupnega fosforja v Soči in Vipavi.....	49
Preglednica 17: Izračun sezonskih koncentracij celokupnega fosforja na ustju Soče.....	49
Preglednica 18: Sezonske koncentracije celokupnega fosforja na ustju Rižane	50
Preglednica 19: Prikaz meritev v poletnih mesecih, ki prikazujejo število fekalnih koliformnih bakterij na merilnem mestu 00RI in njihovo skupno povprečje.....	50

Preglednica 20: Povprečno število fekalnih koliformnih bakterij v poletnih mesecih na merilnem mestu 00RI izračunano brez upoštevanja maksimalne in minimalne vrednosti.....	51
Preglednica 21: Dnevna hidravlična obremenitev q_s po sezonah	75
Preglednica 22: Dnevna obremenitev s celokupnim fosforjem L_t po sezonah	75
Preglednica 23: Prikaz hitrosti usedanja g in hitrosti fotosinteze α ter pripadajoča krivulja...	76
Preglednica 24: Prikaz vpliva fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane na izbrana kopališča z upoštevanjem povprečnega števila fekalnih koliformnih bakterij iz vseh meritev v poletnih mesecih	89
Preglednica 25: Prikaz vpliva fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane na izbrana kopališča z upoštevanjem povprečnega števila fekalnih koliformnih bakterij v poletnih mesecih brez upoštevanja maksimalne in minimalne vrednosti	90

KAZALO SLIK

Slika 1: Shema Imbodenovega modela (Rismal, 1980)	15
Slika 2: Ilustracija procesa obogatitve s hranili in posledica le te na morsko okolje (Crouzet in sod., 1999)	19
Slika 3: V izlivnem območju Rižane na zmesi kanalizacijskih odplak raste morska solata (foto: Lean Fonda)	20
Slika 4: Stanje v Koprskem zalivu izven izlivnega območja Rižane (foto: Ugo Fonda)	20
Slika 5: Kroženje fosforja v vodnih sistemih (Bowie in sod., 1985)	22
Slika 6: Tržaški zaliv, ki je z navidezno črto Grado – Savudrija ločen od Beneškega zaliva (Wikipedija, 2007)	26
Slika 7: Numerična mreža modela	27
Slika 8: Sloji porazdeljeni po globini, ki smo jih uporabili v modelu PCFLOW3D	28
Slika 9: Položaj merilnih mest, ki smo jih uporabili v diplomu (IzVRS)	31
Slika 10: Položaj 5-ih kopališč na slovenski obali (IzVRS)	35
Slika 11: Smer nočnega in dnevnega vetra prikazan na obrisu numerične mreže	39
Slika 12: Definijsko območje modeliranja in merske točke v Tržaškem zalivu (Žagar, 1999)	40
Slika 13: Prikaz začetnega stanja koncentracije celokupnega fosforja po globini za celotni Tržaški zaliv	43
Slika 14: Hitrostno polje na globini 16 m (sloj 10) – Poletje	54
Slika 15: Hitrostno polje na globini 6 m (sloj 20) – Poletje	55
Slika 16: Hitrostno polje na globini 2 m (sloj 24) – Poletje	56
Slika 17: Hitrostno polje na gladini – površinski sloj (sloj 27) – Poletje	57
Slika 18: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje	58
Slika 19: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Jesen	59
Slika 20: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Zima	60
Slika 21: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Pomlad	61
Slika 22: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na globini 16 m (sloj 10) – Poletje	62

Slika 23: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na globini 6 m (sloj 20) – Poletje	63
Slika 24: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na globini 2 m (sloj 24) – Poletje	63
Slika 25: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na globini 0 m – površinski sloj (sloj 27) – Poletje	64
Slika 26: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na gladini – površinski sloj (sloj 27) – Jesen	64
Slika 27: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na gladini – površinski sloj (sloj 27) – Zima	65
Slika 28: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na gladini – površinski sloj (sloj 27) – Pomlad	65
Slika 29: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Poletje	66
Slika 30: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Poletje.....	66
Slika 31: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Poletje	67
Slika 32: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Poletje.....	67
Slika 33: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Poletje	67
Slika 34: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Jesen.....	68
Slika 35: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Jesen	68
Slika 36: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Jesen.....	68
Slika 37: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Jesen	68
Slika 38: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Jesen	69
Slika 39: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Zima	69
Slika 40: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Zima	69
Slika 41: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Zima.....	70
Slika 42: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Zima	70
Slika 43: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Zima.....	70
Slika 44: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Pomlad	71
Slika 45: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Pomlad	71
Slika 46: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Pomlad	71
Slika 47: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Pomlad	71
Slika 48: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Pomlad.....	72

Slika 49: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Poletje II	72
Slika 50: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Poletje II	72
Slika 51: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Poletje II	73
Slika 52: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Poletje II	73
Slika 53: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Poletje II	73
Slika 54: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; 5. dan po 3 urah	79
Slika 55: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; 5. dan po 9-ih urah	80
Slika 56: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; 5. dan po 15-ih urah	81
Slika 57: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; 5. dan po 21-ih urah	82
Slika 58: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; po 6-urnem pihanju tramontane	83
Slika 59: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij za 13. dan z upoštevanjem oseke in nočnega vetra	84
Slika 60: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij za 13. dan z upoštevanjem plime in dnevnega vetra	85
Slika 61: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij za 15. dan z upoštevanjem oseke in nočnega vetra	85
Slika 62: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij za 15. dan z upoštevanjem plime in dnevnega vetra	86
Slika 63: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij po 6-urnem pihanju tramontane	86

1 UVOD

Voda je nepogrešljiva za vse življenje na Zemlji, zaradi povečevanja števila prebivalstva in vedno večjih človekovih potreb pa se pritiski na vodno okolje nenehno povečujejo. Izziv sodobni družbi je poiskati ravnotežje med rabo voda in človekovimi dejavnostmi. Eden od načinov (analiza tveganja, monitoring itd), ki nam pomagajo pri odločanju o izbiri ustreznih ukrepov za izboljšanje stanja voda, je tudi matematično modeliranje, ki se iz leta v leto bolj uveljavlja pri nas in po svetu.

Z matematičnimi modeli simuliramo različne scenarije in dogodke, ki se lahko pripetijo ob določenemu scenariju. Pri vsaki posamezni simulaciji lahko vidimo vpliv posameznih vhodnih podatkov in njihovih kombinacij na posamezne parametre, ki jih modeliramo. Eden od ciljev modeliranja je, da spoznamo zakonitosti in posledice določenih posegov v okolje in tudi vpliv takih posegov naprej v prihodnosti, zato izberemo več različnih scenarijev in izvajamo simulacije. Zato potrebujemo kvalitetne modele, ki zmorejo upoštevati vse ali vsaj večino ključnih dejavnikov. Če izberemo ustrezen model in ga tudi pravilno uporabimo, lahko zelo olajšamo in skrajšamo reševanje različnih okoljskih problemov.

Na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, natančneje na Katedri za mehaniko tekočin, se že več kot 20 let razvija in uporablja 3D model PCFLOW3D. Model se nenehno dopolnjuje, tako da sedaj vsebuje hidrodinamični, transportni, sedimentacijski in biogeokemični modul. Uporabljen je bil pri številnih študijah hidrodinamike toka in transporta, disperzije ter razgradnje polutantov, v zadnjem času največ živega srebra v rekah, jezerih in morjih. V Tržaškem zalivu so bile izvedene simulacije transporta in pretvorb živega srebra (Žagar, 1999; Rajar in sod., 2000; Ramšak, 2006). Natančnejši opis modela je v drugem poglavju diplomske naloge.

Drugače pa obstaja še veliko drugih modelov, ki bi jih lahko uporabili za transport in pretvorbe polutantov, vendar jih ima zelo malo vgrajenih hidrodinamični modul in so za ta način modeliranja, ki je predstavljen v nadaljevanju diplome, manj primerni.

Model PCFLOW3D potrebuje za delovanje veliko vhodnih podatkov o Tržaškem zalivu, Soči in Rižani. Zbiranje in priprava le teh v primerno obliko za model se je izkazalo za enega izmed zahtevnejših delov pri izdelavi diplomske naloge. Podatki, ki smo jih uporabili v diplomu so, opisani in predstavljeni v četrtem poglavju.

Glavni cilji diplomske naloge so bili:

- Pripraviti model za modeliranje transporta hranil (celokupnega fosforja) in fekalnih koliformnih bakterij
- Pripraviti vhodne podatke za model PCFLOW3D in z njimi izvesti simulacije transporta hranil (celokupnega fosforja) in fekalnih koliformnih bakterij v Tržaškem zalivu
- Izvesti celoletno simulacijo hidrodinamike in transporta celokupnega fosforja
- Rezultate modela za modeliranje celokupnega fosforja primerjati z meritvami, izvedenimi na petih merilnih mestih v Tržaškem zalivu
- Izvesti simulacijo hidrodinamike in transporta fekalnih koliformnih bakterij z upoštevanjem njihove umrljivosti v tipičnih poletnih razmerah in ob nenadni tramontani
- Pokazati možni vpliv fekalnih koliformnih bakterij, ki se izlivajo v Tržaški zaliv z Rižano na kvaliteto kopalne vode na petih kopališčih v Koprskem zalivu.

Za modeliranje hranil je bil model že uporabljen, in sicer za modeliranje cirkulacije in transporta hranil v Bohinjskem jezeru (Rajar in sod., 1997). V okviru diplomske naloge smo ga poskusili uporabiti za modeliranje transporta celokupnega fosforja v Tržaškem zalivu, kar je prva uporaba modela PCFLOW3D za modeliranje transporta hranil v morskem okolju. Za celokupni fosfor smo se odločili, ker je poleg dušika eden izmed ključnih kemijskih elementov za nastanek procesa evtrofikacije.

Iz številnih simulacij transporta in pretvorb živega srebra vemo, da so slednje pogosto pomembnejše od transporta. Zato se zavedamo, da tudi modeliranje celokupnega fosforja zahteva vključitev celotnega fosforjevega kroga. Če bi hoteli dobiti resnično uporabne rezultate modela, bi morali poleg fosforjevega kroga hkrati modelirati še druge kroge (C, N, in S), saj so med seboj močno povezani. To pa presega trenutne zmogljivosti modela in bi

zahtevalo večje posege v samo zasnovo modela, ki jih ni bilo mogoče narediti v razmeroma kratkem času, ki je na razpolago za izdelavo diplome.

Zaradi omejenega časa smo v diplomu hkrati modelirali hidrodinamiko in transport celokupnega fosforja brez upoštevanja procesov pretvorb. Zaradi razmeroma slabega ujemanja smo rezultate modela PCFLOW3D poskusili še izboljšati z upoštevanjem sedimentacije in sicer z Imbodenovim modelom. Rezultate smo primerjali med seboj ter z meritvami. Končni cilj, katerega prvi korak smo s tem storili, bi bilo kombinirano modeliranje hidrodinamike in kroženja hranil v morskem okolju. Simulacije transporta celokupnega fosforja in pa izboljšanje rezultatov s sedimentacijo sta opisana v poglavju 5.1.

Poleg modeliranja transporta celokupnega fosforja smo izvedli tudi simulacije transporta fekalnih koliformnih bakterij (FC). Prav tako kot modeliranje celokupnega fosforja, je bilo tudi modeliranje transporta z upoštevanjem umrljivosti fekalnih koliformnih bakterij v Tržaškem zalivu izvedeno prvič. Uporabili smo nekatera hitrostna polja, ki smo jih izračunali za potrebe simulacij transporta celokupnega fosforja, pri modeliranju transporta fekalnih koliformnih bakterij pa smo upoštevali tudi njihovo umrljivost v morski vodi, zaradi občutljivosti teh bakterij na vpliv sončnega sevanja, temperaturo, slanost ter pH. Prisotnost fekalnih koliformnih bakterij v vodnih okoljih kaže, da je voda onesnažena s fekalijami zaradi izpustov neočiščenih, premalo očiščenih, oz. nerazkuženih očiščenih odpadnih voda, kar ima lahko pomemben vpliv na kvaliteto površinskih voda.

Z modeliranjem koncentracij fekalnih koliformnih bakterij zaradi cirkulacije vode s hkratnim upoštevanjem njihove umrljivosti smo hoteli pokazati možni vpliv fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane na kvaliteto kopalne vode na petih kopališčih v Koprskem zalivu. Simulacije transporta fekalnih koliformnih bakterij in primerjave z meritvami ter ovrednotenje možnega vpliva na kvaliteto kopalnih voda so opisane v poglavju 5.2.

2 MODEL

2.1 Model PCFLOW3D

Model PCFLOW3D je tridimenzionalni nestacionarni nelinearni baroklini matematični model, ki je bil razvit na katedri za mehaniko tekočin na FGG. Model je sestavljen iz štirih modulov: hidrodinamičnega modula (HD), transportno-disperzijskega modula (TD), sedimentacijskega modula (ST) in biogeokemičnega modula (BGC).

Model PCFLOW3D je bil že uporabljen pri reševanju teoretičnih in praktičnih problemov disperzije polutantov v vodnem okolju tako v Sloveniji kot tudi v tujini in je bil že podrobno opisan v literaturi (Rajar in Širca, 1996, 1998; Rajar in sod., 1997, 2000, 2004, 2007; Žagar in sod., 2007). Verificiran in validiran je bil za hidrodinamiko (Rajar in sod., 1997, 2000), za transport plavin v laboratorijskih razmerah in v naravnem okolju (Žagar, 1999), biogeokemični modul pa za transport in kombinirane račune transporta in procesov pretvorb živega srebra (Žagar, 1999; Žagar in sod., 2005, 2007). Pri računih povezanih z živim srebrom je bilo ugotovljeno kvalitativno dobro ujemanje merjenih in izračunanih rezultatov (Žagar, 1999; Žagar in sod., 2005, 2007).

Moduli so na kratko opisani v nadaljevanju.

2.1.1 Hidrodinamični modul

2.1.1.1 Osnovne enačbe

Enačbe, ki jih rešujemo s hidrodinamičnim modulom, so:

- kontinuitetna enačba

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

- dinamična enačba

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2.2)$$

- advekcijsko-disperzijska enačba za temperaturo, slanost in/ali poljuben polutant, ki vpliva na spremenljivo gostoto vode

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial U_i \Phi}{\partial x_i} = \Gamma_\Phi \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i \partial x_i} + S_\Phi \quad (2.3)$$

- enačba stanja

$$\rho = \rho(T, s, C) \quad (2.4)$$

kjer je:

$U_i (i=1,2,3)$trenutne hitrosti v posameznih koordinatnih smereh

Ptrenutni tlak

x_iposamezne koordinatne smeri

tčas

νkinematični koeficient laminarne viskoznosti

ρgostota

f_iprostorninska sila na enoto mase v koordinatni smeri i

Φtrenutna vrednost skalarja (koncentracije C , temperature T , slanosti s ipd.)

S_Φizvorni člen skalarja Φ

Γ_Φlaminarna difuzija skalarja Φ

Ttemperatura

sslanost

Ckoncentracija poljubnega polutanta

Če enačbe (2.1) - (2.3) povprečimo po času in integriramo znotraj posameznih slojev debeline h ter upoštevamo hidrostatično razporeditev tlakov, dobimo kontinuitetno in dinamične enačbe v posameznih koordinatnih smereh v naslednji obliki:

- kontinuitenta enačba za posamezni sloj debeline h

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + w_t - w_b = 0 \quad (2.5)$$

kjer je:

u, v, w, \dots časovno povprečene vrednosti komponent hitrosti v koordinatnih smereh X, Y in Z

h debelina obravnavanega sloja

w_t vertikalna hitrost na gornjem robu obravnavanega sloja

w_b vertikalna hitrost na spodnjem robu obravnavanega sloja

- kontinuitetna enačba za vse sloje (račun gladine)

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \int_{z_b}^{z_b+H} \left(\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right) dz = 0 \quad (2.6)$$

kjer je:

z_b kota dna

H globina vode od dna do trenutne gladine

ξ odmik gladine od referenčne srednje vrednosti

- dinamična enačba v X smeri

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(huw)}{\partial z} = +fvh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hN_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{wx} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \end{aligned} \quad (2.7)$$

- dinamična enačba v Y smeri

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(hvw)}{\partial z} = -fuh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hN_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{yx} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \end{aligned} \quad (2.8)$$

- dinamična enačba v Z smeri

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \rightarrow p = p_a + g \int_{z_b}^{z_b+H} \rho dz \quad (2.9)$$

kjer je:

hdebelina posameznega sloja

Hcelotna gladina vode od dna do trenutne gladine

u, vvertikalno povprečene horizontalne hitrosti v posameznem sloju

wvertikalna hitrost

p_aatmosferski tlak na površini vode

N_hhorizontalni kinematični koeficient turbulentne viskoznosti

N_vvertikalni kinematični koeficient turbulentne viskoznosti

τ_{wx}, τ_{wy}strižna napetost na površini vode v smereh X in Y

τ_{bx}, τ_{by}strižna napetost zaradi trenja ob dnu v smereh X in Y

- advekcijsko-disperzijska enačba za temperaturo T

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hT)}{\partial t} + \frac{\partial(huT)}{\partial x} + \frac{\partial(hvT)}{\partial y} + \frac{\partial(hwT)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

- advekcijsko-disperzijska enačba za slanost s

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hs)}{\partial t} + \frac{\partial(hus)}{\partial x} + \frac{\partial(hvs)}{\partial y} + \frac{\partial(hws)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

kjer je:

D_hhorizontalni difuzijski koeficient

D_vvertikalni difuzijski koeficient

Difuzijska koeficienta sta s turbulentno viskoznostjo povezana prek Prandtlovega (σ_T) in Schmidtovega (σ_S) števila, ki se gibljeta med 0.5 in 1.0, po enačbah:

$$D_h = \frac{N_h}{\sigma_T} \text{ oz. } D_h = \frac{N_h}{\sigma_S} \quad (2.12a)$$

$$D_v = \frac{N_v}{\sigma_T} \text{ oz. } D_v = \frac{N_v}{\sigma_S} \quad (2.12b)$$

Enačbi (2.10) in (2.11) sta napisani za konservativna polutanta, t. j. za primer, ko v tekočini ni izvorov ali ponorov za obravnavani količini. Po naravi spadata v transportno-disperzijski modul, ki je opisan v poglavju 2.2, vendar pa sta v modelu PCFLOW3D obravnavani 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.

Z danimi enačbami in upoštevanjem robnih pogojev (Četina, 1992) izračunamo hidrodinamične količine u , v , w , ξ , p in ρ ter porazdelitev slanosti in temperature, ki so osnova za izračun transporta in koncentracij poljubnega polutanta.

2.1.1.2 Modeli turbulence in upoštevanje stratifikacije

Vpliv turbulence opišemo s t.i. modeli turbulence, s katerimi izračunamo koeficiente turbulentne viskoznosti in turbulentne difuzije. Koeficienti turbulentne viskoznosti so odvisni od lastnosti toka in ne tekočine, zato so odvisni od kraja in časa v toku, koeficienti turbulentne difuzije pa upoštevajo vpliv mikroturbulence in jih potrebujemo za račun turbulentnega transporta snovi in toplote.

Koeficienti turbulentne difuzije in viskoznosti so v modelu PCFLOW3D obravnavani ločeno v horizontalni in vertikalni smeri. Posebej še v plitvem priobalnem morju, kjer je velika razlika med globino in horizontalnima dimenzijama območja, se koeficienti v obeh smereh razlikujejo za red velikosti ali več. V obravnavanem primeru (Tržaškem zalivu) je največja globina 25 m, horizontalni dimenziji območja pa sta okrog 30 km, razmerje dimenzij je tako 1:1000.

Za določitev koeficientov turbulentne difuzije in viskoznosti imamo v modelu na izbiro več modelov turbulence, ki jih delimo glede na število v model vgrajenih transportnih enačb.

Uporabimo tisti model, ki ga je glede na želeno natančnost smiselno uporabiti in ki je v preteklosti pri podobnih problemih že dal zadovoljive rezultate. Vsi modeli, ki so opisani v nadaljevanju, se uporabljajo za izračun koeficientov turbulentne viskoznosti, koeficiente turbulentne difuzije pa dobimo tako, da izračunano vrednost delimo z neko konstanto, Prandtlovim oz. Schmidtovim številom.

V modelu PCFLOW3D so vgrajene naslednje metode oz. modeli za določanje turbulentne difuzije in viskoznosti:

- Konstantne vrednosti turbulentnih koeficientov v vertikalni in/ali horizontalni smeri lahko včasih uporabimo pri velikih vodnih telesih, kot so jezera in morja; to je model brez transportnih enačb. Natančnost je običajno zadostna za preliminarne oz. približne izračune, pogoj pa so pravilno izbrane oz. ocenjene vrednosti koeficientov (Rajar in sod., 1997).
- Model Smagorinski je poenostavljen model z dvema transportnima enačbama, za izračun turbulentnih koeficientov v horizontalni smeri, N_h in D_v , ki ga običajno uporabljamo v kombinaciji s Koutitasovim modelom ali modelom Mellor-Yamada za vertikalno smer. Podrobnejši opis modela in uporabe v Tržaškem zalivu je v diplomski nalogi opisala Kovšca (2007).
- Koutitasov model je model z eno transportno enačbo, ki je namenjen izračunu vertikalnih koeficientov turbulence. Običajno ga uporabljamo v kombinaciji s konstantnimi vrednostmi ali z modelom Smagorinski v horizontalni smeri, primeren je v situacijah, kjer je glavna gonilna sila veter. Po Koutitasovi metodi se predpostavi parabolično porazdelitev vertikalnega koeficienta turbulentne viskoznosti N_v po globini, z vrednostjo nič ob dnu in na površini ter maksimalno vrednostjo na globini, ki je odvisna od hitrosti vetra na gladini in največje globine vode v opazovani vertikali. Podrobnosti je opisal Četina (1992).
- Model Mellor-Yamada je model z dvema transportnima enačbama, ki omogoča izračun koeficientov turbulence v vertikalni smeri. Z njim nadomestimo Koutitasov model za račun vertikalnih vrednosti koeficientov turbulence. Model je glede na število uporabljenih enačb podoben modelu "k-ε", njegova prednost pa je v tem, da lahko določamo red polinoma uporabljenih enačb in tako vplivamo na hitrost in natančnost računa. Običajno se uporablja v kombinaciji z modelom Smagorinski, ki izračuna koeficiente v horizontalni smeri (Mellor in Yamada, 1982).

Pri modeliranju procesov v naravnem okolju je vpliv stratifikacije oz. vzgonskih efektov zelo pomemben. Vertikalna koeficienta turbulentne viskoznosti N_v oz. difuzije D_v , se lahko v primeru stabilne stratifikacije bistveno zmanjšata. V modelu je stopnja stratifikacije opisana z Richardsovim številom Ri , natančne enačbe za gostotno in toplotno stratifikacijo pa je opisal Četina (1992).

2.1.1.3 Metoda reševanja

Za reševanje enačb uporabimo metodo kontrolnih volumnov, izpeljanko numerične metode končnih razlik. Definijsko območje razdelimo po vertikali na posamezne sloje (vsi, razen površinskega, imajo konstantno debelino, ki je lahko od sloja do sloja različna), v horizontalni smeri pa na mrežo celic. Numerična mreža je premaknjena v horizontalni in vertikalni smeri. Spremenljivke P , ρ , s in C računamo v središču kontrolnega volumna, hitrosti u , v in w pa na premaknjenih pozicijah, kar zagotavlja boljše rezultate.

Diferencialne enačbe nato spremenimo v diferenčne, tako da jih integriramo znotraj kontrolnih volumnov, za diskretizacijo v posamezni smeri uporabimo izbrano numerično shemo. V modelu PCFLOW3D sta na voljo dve numerični shemi:

- Upwind je shema gorvodnih razlik – enostavna interpolacijska shema prvega reda točnosti
- Quick je kompleksnejša shema drugega reda točnosti, ki povzroča manjšo napako zaradi numerične difuzije, kot shema Upwind.

Pomembna je pravilna izbira števila in debeline slojev, teoretično bi bilo najbolje računati s čim več zelo tankimi enako debelimi sloji, vendar pa bi takšni računi hitro prekoračili zmoglosti razpoložljivih procesorjev. Prav tako je pomembna tudi pravilna izbira optimalnega časovnega koraka (ustrezne dolžine), s pomočjo katerega zagotovimo numerično stabilnost in zadovoljivo točnost simulacij.

Pri prekratkem časovnem koraku je namreč skupni čas simulacij nesprejemljivo dolg, numerične napake iz posameznih časovnih korakov pa se seštevajo in lahko precej vplivajo na končno točnost računa, navzgor pa je časovni korak računa zaradi stabilnosti uporabljene numerične metode omejen z naslednjim pogojem (Courant-Friedrich-Levy):

$$\Delta t \leq \frac{h_{\min}^2}{2 \cdot N_v} \quad (2.13)$$

kjer je:

h_{\min} debelina najtanjšega sloja

N_v koeficient turbulentne viskoznosti v vertikalni smeri

Enačba 2.13 velja v primeru, ko se koeficienti turbulentne viskoznosti računajo po Koutitasu in so po celem sloju enaki. Pri tem je lahko Courantovo število tudi mnogo večje od 1 (do 15).

Pri modelu turbulence Mellor-Yamada pa so vertikalni koeficienti v posameznih celicah istega sloja različni in je ponavadi Δt potrebno zmanjšati, sicer postane metoda hitro nestabilna in je potrebno vsaj približno izpolniti Courant-Friedrich-Levyjev pogoj, pri tem je Courantovo število lahko makismalno 3 do 5.

Pri modeliranju se običajno računa z 10 do 25 sloji, kar je odvisno od vrste obravnavanega problema, globine vode, točnosti vhodnih podatkov in zahtevane točnosti računa.

2.1.2 Transportno – disperzijski modul

2.1.2.1 Osnovna enačba

Osnovna enačba transportno – disperzijskega modula je adveksijsko-disperzijska enačba, zapisana za koncentracijo nekonservativnega polutanta C , z dodanim izvorno – ponornim členom:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} + \frac{\partial(hwC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + SRC \end{aligned} \quad (2.14)$$

kjer je:

Ckoncentracija nekonservativnega polutanta

SRCizvorno – ponorni člen, odvisen od vrste polutanta oz. procesov, ki jih želimo opisati; pri konservativnih polutantih odpade

Osnovni model PCFLOW3D vsebuje dve advekcijsko-disperzijski enačbi (2.10, 2.11), ki sta bili prvotno namenjeni računu transporta in disperzije temperature in slanosti, dveh aktivnih konservativnih polutantov. Temperatura in slanost nato preko enačbe stanja (2.4) vplivata na gostoto in posredno na hidrodinamične količine. Enačbi lahko uporabimo tudi za račun transporta in disperzije poljubnega konservativnega polutanta, vendar samo v primeru, če enačbi še nista bili uporabljeni za račun temperature in slanosti. Zato so bile v model naknadno vgrajene dodatne advekcijsko-disperzijske enačbe (2.14) za simulacijo treh dodatnih polutantov (Žagar, 1999), ki smo jih lahko uporabili tudi za simulacije celokupnega fosforja in fekalnih koliformnih bakterij.

2.1.2.2 Metoda reševanja

Advekcijsko – disperzijsko enačbo za aktivne polutante rešujemo sočasno z enačbami hidrodinamičnega modula, saj izračunana porazdelitev temperature, slanosti in/ali poljubnega polutanta, ki lahko vpliva na gostoto vode, hkrati vpliva na hidrodinamične količine. Za pasivne polutante pa enačbo rešujemo v okviru transportno – disperzijskega modula, pri čemer sta nam na voljo dve metodi; metoda kontrolnih volumnov (MKV) in metoda sledenja delcev (MSD), ki sta podrobneje opisani v literaturi (Četina, 1992; Širca, 1996).

2.1.3 Sedimentacijski modul (modul za transport plavin)

V model PCFLOW3D je vgrajen tudi sedimentacijski modul, ki ga v diplomski nalogi nismo uporabili in ga podrobneje ne opisujemo. Opisan je v literaturi (Žagar, 1999).

2.1.4 Biogeokemični modul

Modul je bil v osnovi prirejen za simulacijo procesov pretvorb nekaterih zvrsti živega srebra (Hg^0 – elementarno živo srebro, Hg^{2+} – nemetilirano oz. divalentno živo srebro, MMHg (CH_3Hg^+) – monometil živo srebro) v različnih oblikah: raztopljenega v vodi, vezanega na delce plavin ali na plankton. Modul upošteva osnovne biogeokemične procese pretvorb (metilacijo, demetilacijo, redukcijo in oksidacijo), izmenjavo med vodo in zrakom ter med vodo in sedimentom. Enačbe v BGK modulu so sicer razmeroma enostavne. Koeficienti reakcij pa so odvisni od okoljskih parametrov ter spremenljivi v prostoru in času, tako da je mogoče z njimi opisati procese pretvorb v naravnem okolju (Rajar in sod., 2007; Žagar in sod., 2005, 2007).

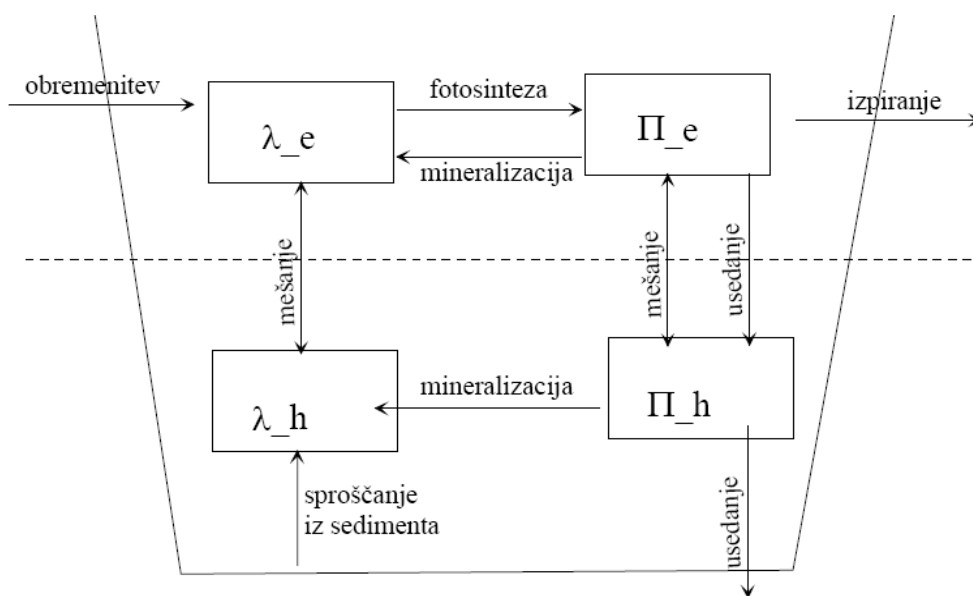
Enačbe so v nespremenjeni obliki (vendar brez upoštevanja koeficientov pretvorb oz. izvorno – ponornega člena) uporabne tudi za vse vrste konservativnih polutantov, zato smo lahko z njimi računali tudi transport celokupnega fosforja in fekalnih koliformnih bakterij.

2.2 Imbodenov model

Imbodenov limnološki model (Imboden, 1974) sloni na bilanci fosforja kot omejitvenega faktorja rasti alg in s tem evtrofikacije jezera. Opisan je s štirimi enačbami, ki povezujejo procese fotosinteze in respiracije fito- in zooplanktona v epilimniju in hipolimniju. Čeprav model sodi v skupino poenostavljenih konceptualnih limnoloških modelov, pa je bila njegova uporabnost vsestranskost potrjena v praksi tudi pri nas (Rismal, 1980; Rismal in Kompare, 1993).

Ker se v morju odvijajo podobni biokemični procesi kot v jezeru, smo Imbodenov model uporabili za korekcijo oz. izboljšanje rezultatov, ki smo jih dobili z modelom PCFLOW3D.

Model upošteva dve obliki fosforja, tj. topni anorganski fosfor in netopni – partikularni organski (alge) fosfor, ter slojevanje jezera na epilimnij in hipolimnij (slika 1).



Slika 1: Shema Imbodenovega modela (Rismal, 1980)

Epilimnij predstavlja plast vode nad termoklino oz. slojem, kjer temperatura zelo hitro upada z globino, hipolimnij pa plast vode pod termoklino.

2.2.1 Spremenljivke in parametri modela

Spremenljivke, ki so prikazane na sliki 1 in jih model uporablja med izračunom:

λ_etopni anorganski fosfor v epilimniju
 λ_htopni anorganski fosfor v hipolimniju
 Π_epartikularni organski (alge) fosfor v epilimniju
 Π_hpartikularni organski (alge) fosfor v hipolimniju

Vhodni podatki za model so naslednji:

Z_eglobina epilimnija
 q_shidravlična obremenitev
 L_tobremenitev s fosforjem
 ghitrost usedanja
 αhitrost fotosinteze
 Ssproščanje fosforja iz sedimenta

Parametri, ki jih Imbodenov model izračuna:

ΔO_2padeč koncentracije kisika v hipolimniju
 L_{t_dop}maksimalna dopustna letna obremenitev s fosforjem
 R_p% koncentracije fosforja, ki se akumulira v sedimentu

3 HRANILA, FOSFOR (P) IN FEKALNE KOLIFORMNE BAKTERIJE (FC)

Hidrodinamika in transport hranil ter fekalnih koliformnih bakterij do sedaj v Tržaškem zalivu še nista bila modelirana hkrati. Zato sta v nadaljevanju opisani obe obravnavani onesnaževali (celokupni fosfor in fekalne koliformne bakterije). Na to temo je na razpolago veliko literature, tu pa smo se omejili le na najpomembnejše razlage.

3.1 Hranila

Na osnovi današnjega znanja iz literature lahko povzamemo, da je za življenje potrebnih 27 elementov, H, Li, K, Mg, Ca, V, Cr, Mo, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, B, C, Si, N, P, As, O, S, Se, F, J, ki jih imenujemo biološko pomembni ali esencialni elementi. Imenujemo jih tudi nutrienti ali hranila, ker jih organizmi aktivno privzemajo in so potrebni za njihovo rast. O, H, C, N, Ca, P, S, K in Mg so makronutrienti, ostali pa mikronutrienti. Glavne sestavine organizmov so C, H, O, N, P ter S in sestavljajo približno 95 % biosfere (Faganeli, 2007). Esencialni elementi so tisti, ki jih organizmi prevzemajo z aktivnim transportom, neesencialni pa so tisti, katerih porazdelitev je odvisna od geokemičnih procesov (Kukovec, 2006).

Izmenjavo elementov v naravi med neživim delom ekosistema (atmosfera, prstjo, vodo) in organizmi oziroma globalno ali regionalno kroženje elementov imenujemo biogeokemično kroženje elementov. Stalna izmenjava elementov obsega njihove tokove, večina med njimi sledi zaprtim krogom, ki jih imenujemo biogeokemični krogi. Ti so sestavljeni iz različnih območij zadrževanja, ki predstavljajo fizikalno, kemijsko ali biološko homogeno obliko snovi v naravi. Tokovi med njimi predstavljajo prehod snovi v času v smeri od izvora snovi do ponora. Tok snovi v območje zadrževanja označujemo kot vnos, iz območja zadrževanja pa iznos. V biogeokemičnih kroženjih večkrat ločimo globalna in lokalna kroženja. Globalna kroženja obsegajo predvsem biogene elemente, ki so sestavine organizmov, zraka in vode (C, N, O, H, S), lokalna pa predvsem elemente z večjim rezidenčnim časom (manjšo gibljivostjo): P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, B, Cl, Mn, Fe itd.) (Faganeli, 2007). V morju je med C, N in P

povezava Redfieldovo razmerje. Raziskave vsebnosti C, N in P v morski vodi in morskem fitoplanktonu so pokazale, da je povprečno molsko razmerje C:N:P v morski vodi 1017:15:1 in v fitoplanktonu 106:16:1 (Kukovec, 2006).

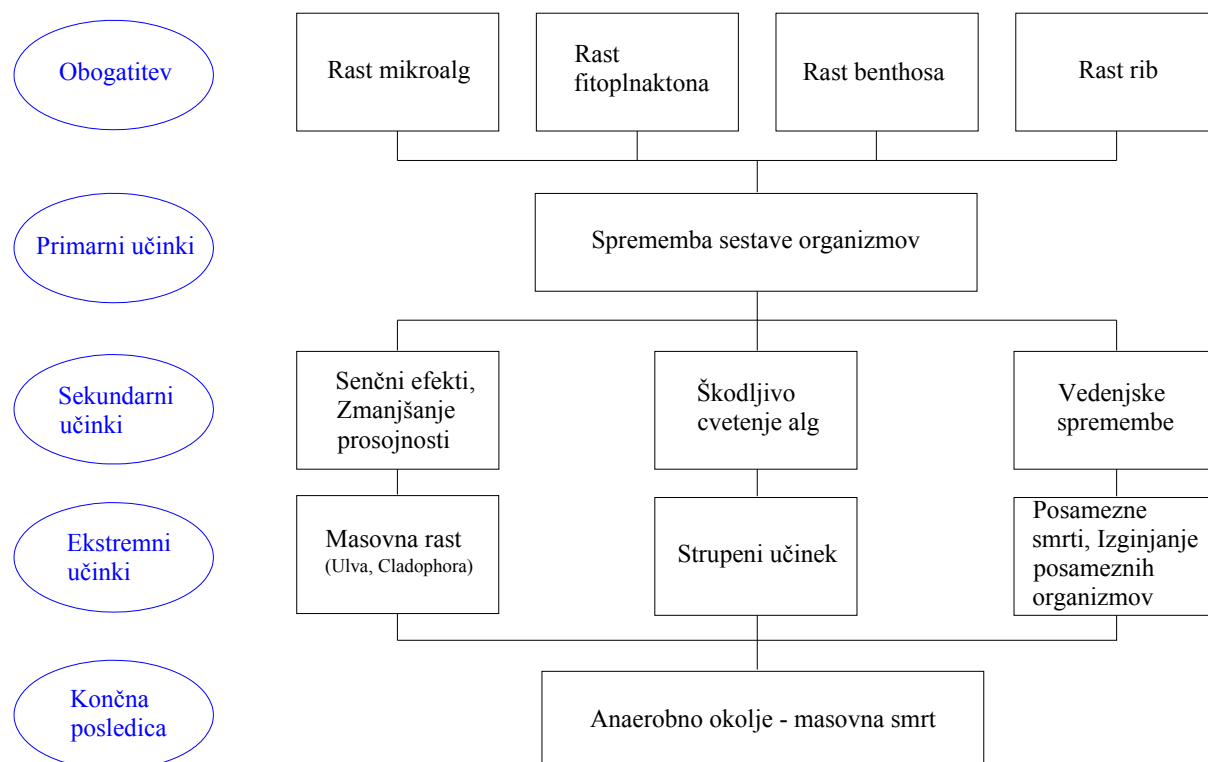
Hranila so v ekosistemskem modeliranju običajno mišljene anorganske snovi, na podlagi katerih lahko modrozeleni in zelene bakterije in rastline proizvedejo v procesu fotosinteze organsko snov. Tej fazi pretvorbe pravimo primarna produkcija. Na podlagi tako proizvedene (rastlinske) biomase pa se lahko hranijo rastlinojede živali, z njimi pa mesojede in vsejede živali. Tej fazi pretvorbe pravimo sekundarna produkcija. Osnovna anorganska hranila v fazi fotosinteze so anorganski ogljik kot CO_2 iz atmosfere ali iz karbonatov, amonijev ion NH_4^+ in nitratni ion NO_3^- , v redkih primerih tudi atmosferski dušik N_2 ter fosfatni ion PO_4^{3-} , ki jih lahko rastline uporabljajo preko fotosinteze za produkcijo žive snovi in energije.

Hranila v morju izvirajo iz naravnega krogotoka, v zadnjih nekaj stoletjih pa je vedno močnejši antropogeni vpliv, saj se povečuje vnos hranil iz direktnih industrijskih, kmetijskih in kanalizacijskih izpustov, vnos hranil z rekami, zaradi depozicije snovi iz ozračja ter zaradi izpiranja naravnih, kmetijskih in urbanih območij. Povečana količina hranil ima lahko pozitivne, negativne ali strupene učinke, odvisno od koncentracij in prisotnega razmerja v ekosistemu (Crouzet in sod., 1999).

V oceanografiji se izraz nutrienti uporablja izključno za N, P in Si. Glavne sestavine (C, S, O, H), vključene v biološke procese, so v morski vodi prisotne v velikih količinah in njihova uporaba povzroči le neznatne spremembe koncentracij. N, P in Si pa se porabljajo v bioloških procesih dokler ne postajajo omejitveni. Nadaljnja rast organizmov je nato omejena v skladu z Liebigovim pravilom, ki pravi, da je rast organizma pri stalni svetlobi in temperaturi odvisna od elementa prisotnega v najnižji koncentraciji. Esencialni elementi v sledovih (Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Mo) v splošnem ne omejujejo rasti, ker jih organizmi le malo uporabljajo, izjemi sta Fe in Mn v nekaterih morjih (Kukovec, 2006).

V vodnem okolju sta najbolj pomembni hranili fosfor in dušik, saj če ju je preveč, posledično povzročata eutrofikacijo. Eutrofikacija je proces, kjer vodna telesa, kot npr. jezera, morja ali reke prejmejo presežek hranil, ki stimulirajo prekomerno rast alg oziroma cvetenje alg. To pa

povzroči zmanjšanje koncentracije kisika v vodi, ki se porabi za razkroj odmrlih ostankov alg, kar lahko zaradi prenizkih koncentracij ali celo odsotnosti v vodi raztopljenega molekularnega kisika (anoksij) vodi tudi do umiranja drugih organizmov v vodi (bentoški organizmi in ribe). Shematski prikaz od obogatitve vodnih teles s hranili pa do posledice le tega je prikazan na sliki 2.



Slika 2: Ilustracija procesa obogatitve s hranili in posledica le te na morsko okolje (Crouzet in sod., 1999)

Razlika med vplivom izpustov slabo prečiščenih kanalizacijskih odpadkov, ki negativno vplivajo na ekosistem morja, in ko tega vpliva na ekosistem morja ni več, je vidna na slikah 3 in 4.



Slika 3: V izlivnem območju Rižane na zmesi kanalizacijskih odplak raste morska solata (foto: Lean Fonda)



Slika 4: Stanje v Koprskem zalivu izven izlivnega območja Rižane (foto: Ugo Fonda)

Ker je to prvi poskus modeliranja hranil in seveda tudi celokupnega fosforja v Tržaškem zalivu in ker modeliranje celotnega, zelo kompleksnega kroženja hranil v vodnem okolju presega zmožnosti modela PCFLOW3D, smo se odločili, da bomo začeli z modeliranjem transporta brez upoštevanja biogeokemičnih procesov pretvorb razen sedimentacije, ki smo jo naknadno upoštevali z Imbodenovim modelom pri korekciji oz. izboljšanju rezultatov modela PCFLOW3D in tudi brez upoštevanja sovisnosti fosforja z drugimi hranili. Procese in druga hranila bo mogoče v model postopoma dodajati kasneje, med drugim tudi na osnovi dognanj in simulacij, izvedenih v okviru te diplomske naloge.

3.2 Fosfor

Fosfor je eden izmed osnovnih biogenih elementov in je zaradi ključnega pomena v celičnem metabolizmu (ATP, ADP, fosfoproteinih, fosfolipidih) ter reprodukcije (DNA, RNA) bistven za vse žive organizme. V površinskih vodah je biodosegljiv fosfor običajno prisoten kot fosfat, oz. pravilneje fosfatni ion (PO_4^{3-}). Najpogostejše oblike so ortofosfati, kondenzirani fosfati (polifosfati) in organsko vezan (partikularni) fosfor. Fosfati pridejo v površinske vode na različne načine. Velike količine kondenziranih fosfatov pride v vode s čistilnimi sredstvi (detergenti), saj so ena njihovih glavnih sestavin. Ortofosfati se kot umetna gnojila izpirajo s kmetijskih površin. Organsko vezani fosfati pa nastajajo pri bioloških procesih (Panjan, 2004).

Fosfor je nujen za prenos energije v rastlinah in živalih, saj je prisoten v molekuli ATP (adenozintrifosfat), v kateri je shranjena energija za življenje. Vloga fosforja je v molekuli ključna, saj se z odcepitevijo fosfatnega iona sprosti energija, ki je potrebna za življenje. Tako nastane molekula ADP (adenozindifosfat). Molekula ATP se v živem organizmu obnaša kot nekakšna baterija, ki jo lahko napolnimo. Rastline to naredijo s fotosintezo, živali in ljudje pa s celičnim dihanjem. Tako je krog ATP – ADP – ATP sklenjen (Bergman, 2007).

Kot mejno hranilo ga imenujemo tudi zato, ker se navadno pojavlja v najmanjših koncentracijah v sorazmerju s koncentracijami ostalih hranil (Liebigovo pravilo). Zaradi tega je tudi omejujoče hranilo v vodnih sistemih. To pomeni, da če je porabljen ves fosfor, se bo npr. ustavila celotna rast fitoplanktona, ne glede na količino dušika in ostalih hranil, prisotnih v vodi. Rast fitoplanktona se bo nadaljevala le, če bomo fitoplanktonu zopet zagotovili potreben fosfor (Liebig's law of the minimum, 2007). Prekomerne koncentracije fosforja, v primeru, ko je le-ta omejitveno hranilo, lahko hitro povzročijo povečano rast alg (cvetenje) in vodnih rastlin. Kot rezultat le tega se pojavi veliko škodljivih posledic (npr. eutrofikacija).

Fosforjev krog ali cikel (slika 5) je zelo podoben dušikovemu. Z odmiranjem alg se generira organski fosfor, ki se nato spremeni v raztopljeno anorgansko obliko, katero lahko alge uporabijo za primarno produkcijo. Tako je koncentracija organskega fosforja odvisna od

Kljub temu, da je fosfor v površinskih vodah običajno dosegljiv kot fosfat, smo se na podlagi razpoložljivih podatkov odločili, da bomo modelirali celokupni fosfor, ki vključuje ortofosfate, kondenzirane fosfate (polifosfate) ter organsko vezan (partikularni) fosfor.

Poleg modeliranja transporta celokupnega fosforja smo poskusili modelirati tudi transport fekalnih koliformnih bakterij z upoštevanjem njihove umrljivosti. Ker smo pri celokupnem fosforju modelirali transport, je isti transportni model tako rekoč pripravljen tudi za modeliranje transporta fekalnih koliformnih bakterij. Poleg tega je numerična mreža na območju Koprškega zaliva dovolj gosta; za določitev možnega vpliva na kvaliteto vode je namreč zanimivo predvsem bližnje območje, ne pa celoten Tržaški zaliv, na bližnjem območju pa imamo hkrati tudi dovolj podatkov o hidrodinamiki iz simulacij transporta celokupnega fosforja.

3.3 Fekalne koliformne bakterije (FC)

Fekalne koliformne bakterije so zbirka relativno neškodljivih mikroorganizmov, ki živijo v velikem številu v črevesju človeka, toplokrvnih in mrzlokrvnih živali in pomagajo pri prebavi hrane. Prisotnost fekalnih koliformnih bakterij v vodnih okoljih kaže, da je voda onesnažena s fekalijami, ki jih je izpustil človek kot odpadno vodo. Poleg odpadne vode pa lahko v vodo pridejo z odtekanjem iz kmetijskih površin in z meteorno vodo. Čeprav fekalne koliformne bakterije same po sebi niso nevarne, nam kažejo možno prisotnost drugih patogenih bakterij in virusov, ki pa so zdravju nevarni (Hrenović, 2007).

Iz celotne zbirke bakterij je bakterija *Escherichia coli* najbolj zanesljiv pokazatelj fekalnega onesnaženja v vodi (USEPA, 2007). Umrljivost fekalnih koliformnih bakterij, ki smo jo upoštevali pri transportu le teh, je določena na podlagi študije umrljivosti bakterij *Escherichia coli*. Ker v meritvah, ki jih izvaja ARSO v okviru monitoringa kopalnih voda, ni točno določeno, katere bakterije iz celotne zbirke vzorčijo, smo se odločili, da umrljivost bakterij *Escherichia coli* v morski vodi posplošimo za celotno zbirko fekalnih koliformnih bakterij.

Anorganska (dušik in fosfor) in organska hranila pozitivno vplivajo na obstoj fekalnih koliformnih bakterij v morski vodi, saj se z njimi življenje fekalnih koliformnih bakterij nekoliko podaljša (Carlucci in Pramer, 1959). Kljub obilju hranil v morski vodi pa na drastično zmanjšanje števila fekalnih koliformnih bakterij vplivajo temperatura, sončno sevanje (UV), slanost in pH. Ob kombinaciji temperature in sončnega sevanja je 90 % umrljivost fekalnih koliformnih bakterij poleti dosežena od 1,5 do 4,5 krat prej kot pa pozimi, ko je temperatura nižja in tudi jakost sončnega sevanja je bistveno manjša. Vpliv sončnega sevanja na umrljivost je do globine 30 m. Kar pomeni, da sončno sevanje vpliva na Tržaški zaliv prav do dna. Optimalni pH za preživetje fekalnih koliformnih bakterij je med 6 in 7 oz. malo pod to mejo (Šolić in Krstulović, 1992). V normalni morski vodi je pH vrednost enaka 8. Pri morski vodi, ki ima pH vrednost 9, je % preživetih fekalnih koliformnih bakterij skoraj enak 0. Pri morski vodi, ki ima pH vrednost 5, pa je % preživetih fekalnih koliformnih bakterij skoraj 60. Na umrljivost fekalnih koliformnih bakterij vpliva tudi slanost z osmotskim efektom, katerega posledica je, da se v morsko vodo iz celic fekalnih koliformnih bakterij izloči voda in s tem povzroči dehidracijo celic in na koncu smrt. Večja in hitrejša umrljivost celic je pogojena z večjo slanostjo vode (Carlucci in Pramer, 1959). Na umrljivost fekalnih koliformnih bakterij najbolj vpliva vzajemni vpliv sončnega sevanja, temperature in slanosti (Šolić in Krstulović, 1992).

V morju lahko fekalne koliformne bakterije predstavljajo problem na območjih t.i. kopalnih voda. Opis kopalne vode je predstavljen v poglavju 4.3.

Za modeliranje transporta fekalnih koliformnih bakterij smo obe simulaciji izvedli za poletne razmere, saj je takrat kopalna sezona na vrhuncu in tudi morje je razmeroma mirno, kar vpliva na manjšo disperzijo fekalnih koliformnih bakterij v vodi in bi zato presežek fekalnih koliformnih bakterij lahko v tem času najmočneje vplival na kvaliteto kopalne vode. Drugo simulacijo transporta in koncentracije fekalnih koliformnih bakterij smo izvedli prav tako za poletje, vendar smo vključili tramontano, ki predstavlja nenaden pojav, običajno po daljšem obdobju lepega vremena in lahko povsem spremeni sliko tokov po celotnem Tržaškem zalivu, s tem pa tudi porazdelitev koncentracije v vodi prisotnih bakterij.

4 PODATKI

V diplomski nalogi smo za modeliranje transporta celokupnega fosforja in fekalnih koliformnih bakterij uporabili veliko različnih podatkov, ki jih model PCFLOW3D potrebuje za delovanje. Ker je raznolikost in količina podatkov velika, se je zbiranje in urejanje podatkov ter priprava le teh v obliko, ki jo model PCFLOW3D zahteva za delovanje, izkazalo za enega izmed zahtevnejših delov pri izdelavi diplomske naloge.

V diplomski smo uporabili naslednje podatke (v oklepaju je napisan vir podatkov):

- **skupni podatki:** hitrost in smer sezonskega vetra (Širca, 1996; Žagar, 1999; Ramšak, 2006), pretoki Soče in Rižane (ARSO), temperatura in slanost Soče in Rižane (Žagar, 1999; Ramšak, 2006), temperatura in slanost Tržaškega zaliva oz. Koprškega zaliva (Žagar, 1999);
- **podatki za modeliranje celokupnega fosforja:** koncentracija celokupnega fosforja v Soči in Rižani ter začetna koncentracija celokupnega fosforja v Tržaškem zalivu (ARSO);
- **podatki za modeliranje fekalnih koliformnih bakterij:** hitrost in smer dnevnega in nočnega vetra (ARSO), hitrost in smer tramontane (Obalna oceanografska boja Piran, 2007), število fekalnih koliformnih bakterij v Rižani in na kopališčih v Koprskem zalivu ter plimovanje (ARSO).

4.1 Definijsko območje

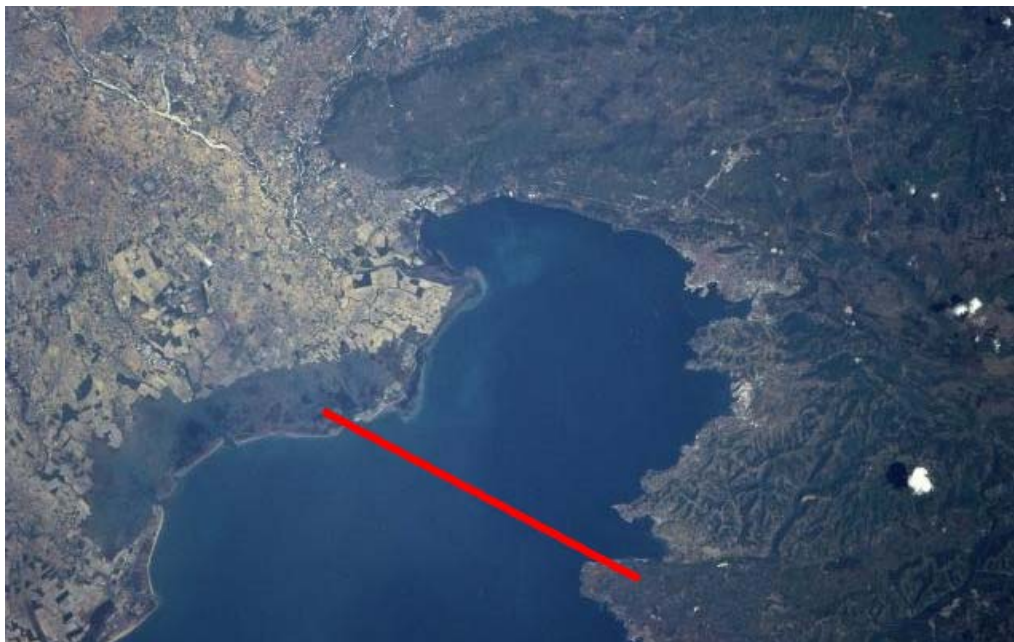
Definijsko območje modeliranja je bil celoten Tržaški zaliv, katerega del je tudi Koprski zaliv. Na tem območju smo izvedli vse simulacije hidrodinamike za kasnejši račun transporta celokupnega fosforja in simulacije fekalnih koliformnih bakterij, medtem ko se na območju Koprškega zaliva nahajajo kopališča, kjer smo ugotavljali možnost vpliva fekalnih koliformnih bakterij na kvaliteto kopalnih voda. Mejna črta definijskega območja je na povezavi Grado – Savudrija (slika 6).

Tržaški zaliv

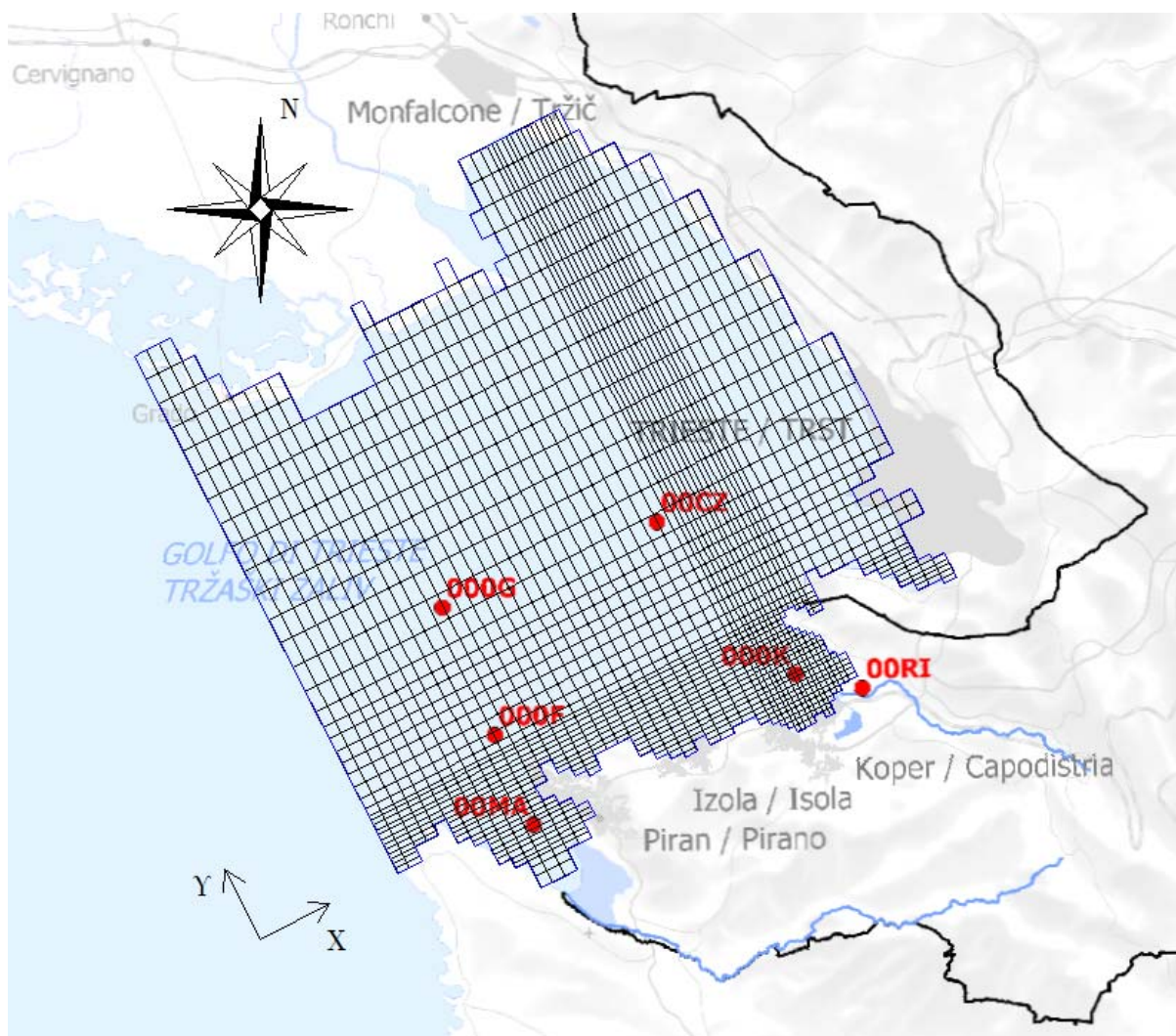
Tržaški zaliv je plitev zaliv v skrajnem severnem delu Jadranskega morja, del Beneškega zaliva, ki si ga delijo Italija, Slovenija in Hrvaška. Omejuje ga 21 km dolga navidezna črta med Gradežem na italijanski in Savudrijo na hrvaški obali, površina je okoli 550 km², povprečna globina 16 m, najgloblja točka pa 37,5 m in se nahaja 300 m od Rta Madone proti severovzhodu. Ker je to najgloblja točka slovenskega morja je dobila ime podvodni Triglav. Z izjemo nizkih otočkov, ki zapirajo Gradeško laguno na italijanski strani, v njem ni otokov in čeri. Vzhodna obala, kjer ležita Trst in slovensko primorje, je razčlenjena, najgloblje so vrezani Miljski, Koprski in Piranski zaliv (Tržaški zaliv, 2007).

Koprski zaliv

Koprski zaliv je 18 km² velik zaliv v severnem delu Jadranskega morja, del Tržaškega zaliva, ki je na severni strani omejen z Debelim rtičem, na južni pa z Rtom Madona. Koprski zaliv leži v celoti v Sloveniji. Ob njem ležijo Ankaran, Koper in Izola. Najpomembnejši pritok je reka Rižana. Od leta 1785, ko je bilo mesto Koper še na otoku, se je zaradi nasipavanja površina zaliva zmanjšala za približno 4 km².



Slika 6: Tržaški zaliv, ki je z navidezno črto Grado – Savudrija ločen od Beneškega zaliva (Wikipedija, 2007)



Slika 7: Numerična mreža modela

Pri simulacijah smo uporabili numerično mrežo, ki je prikazana na sliki 7, kjer smo definicijsko območje, Tržaški zaliv, po globini razdelili na 26 slojev. Vrhnja sloja sta debeline 0,5 m, ostali pa po 1 m. Na površini so sloji tanjši, saj na ta način lahko boljše zajamemo vpliv vetra in dotokov sladke vode iz Soče in Rižane. Ostali sloji so enakomerne debeline zaradi točnejšega podajanja batimetrije in možne kasnejše nadgraditve modela s pretvorbami, ki zahtevajo podrobnejšo vertikalno delitev definicijskega območja ob dnu. Hkrati slojev ne sme biti preveč, saj se z naraščanjem števila slojev poveča število celic in s tem tudi čas računanja. Sloji so prikazani na sliki 8.

	Sloj	Globina
Površina		0m
	27	0,5m
	26	1m
	25	2m
	24	3m
	23	4m
	22	5m
	21	6m
	20	7m
	19	8m
	18	9m
	17	10m
	16	11m
	15	12m
	14	13m
	13	14m
	12	15m
	11	16m
	10	17m
	9	18m
	8	19m
	7	20m
	6	21m
	5	22m
	4	23m
	3	24m
Dno	2	25m

Slika 8: Sloji porazdeljeni po globini, ki smo jih uporabili v modelu PCFLOW3D

V model PCFLOW3D kot vhodni podatek dejansko vstavimo 28 slojev, vendar sta 2 neaktivna, po eden nad površino in pod dnom. Tako je v bistvu v modelu uporabljenih samo 26 aktivnih slojev.

V smeri X imajo celice dimenzijo od 600 do 240 m, v smeri Y pa od 1200 m do 240 m. Tako smo dobili celice z dimenzijami od 1200×600 m na italijanski strani zaliva, kjer je opis hitrostnega polja ter koncentracij polutanta lahko manj natančen, do celic z dimenzijami 240×240 m v Koprskem zalivu, ki mora biti najbolj natančno definiran zaradi vtoka Rižane, kopališč in ker je za nas najbolj zanimiv vpliv onesnaženja na bližnja območja. Horizontalna mreža je bila že uporabljena pri modeliranju razlitja nafte (Žagar, 1994; Galuf, 2005). Zaradi lažjega računanja, ker želimo imeti odprti rob vzporeden z izbranim lokalnim koordinatnim sistemom, je koordinatni sistem protiurno zarotiran za 27° glede na smeri neba (slika 7).

4.2 Monitoring kakovosti morja v Tržaškem zalivu

Osnovni namen rednega spremljanja kakovosti voda – monitoringa je priprava zanesljivih podatkov o kakovosti in obremenjenosti voda z onesnaževali. Informacije, ki nastajajo v okviru monitoringa, omogočajo oblikovanje enotnih kriterijev za zbiranje, obdelovanje, shranjevanje in posredovanje informacij v domačem in mednarodnem prostoru (ARSO, 2003a). V diplomski smi pokazali, da je mogoče rezultate monitoringa uporabiti tudi kot vhodne podatke za modeliranje.

Morska biološka postaja Piran (MBP) opravlja redni monitoring kakovosti morja od leta 1988. Do danes se je program monitoringa večkrat spremenil; zmanjševalo se je število merjenih parametrov in število vzorcev istega parametra na določenih globinah ter število vzorčevanj. Premajhno število mesečnih vzorčenj (v letu 1997 deset vzorčenj in leta 2002 samo devet vzorčenj) totalnega fosforja (preglednica 2) kot tudi ostalih parametrov, ki so naštetih na naslednji strani, je vzrok, ki onemogoča celovit pogled na sezonsko dinamiko fizikalnih, kemijskih in bioloških parametrov, posebej še, če upoštevamo, da se biološki procesi v morju odvijajo hitro (red velikosti od nekaj ur do dni) (ARSO, 2003a). V letih 2003 in 2004 se je v določenih točkah število mesečnih vzorčenj zopet povečalo na dvanajst. Do leta 2003 je MBP izvajala dva monitoringa:

- Monitoring kakovosti morja
- Monitoring kakovosti morja in kontrola onesnaženja

Z letom 2003 se je program monitoringa bistveno spremenil. Od takrat se monitoring izvaja po dveh uredbah in pripadajočih pravilnikih. Zato Nacionalni inštitut za biologijo (NIB), Morska biološka postaja Piran (MBP) vsako leto, od leta 2003 naprej, izvaja dva monitoringa:

- Monitoring kakovosti morja, brakičnih voda in voda za življenje in rast morskih školjk in morskih polžev
- Monitoring kakovosti morja in kontrola onesnaženja s kopnega

Na vseh merilnih mestih oz. točkah, ki so omenjena v nadaljevanju, se merijo naslednji parametri, in sicer temperatura, slanost, prosojnost, pH, raztopljen kisik in biokemijska potreba po kisiku (BPK₅), nitrit (NO₂-N), nitrat (NO₃-N), amoniak (NH₄-N), celotni dušik (TotN), ortofosfat (PO₄-P), celokupni fosfor (TotP) in silicij (SiO₄-Si), detergenti (DET), težke kovine, fitoplanktonska biomasa (klorofil a – Chl a), fekalne koliformne bakterije (FC), koncentracije metalotioneinov, poškodbe DNA in trofični index (TRIX) (ARSO, 2003a; ARSO, 2003b; ARSO, 2004b).

Že od leta 1988 je naročnik vseh meritev Ministrstvo za okolje in prostor (MOP), ARSO, ki je tudi posredovala potrebne podatke za izdelavo diplomske naloge.

4.2.1 Monitoring kakovosti morja, brakičnih voda in voda za življenje in rast morskih školjk in morskih polžev

Monitoring kakovosti morja za leti 2001 in 2002 so izvajali na petih merilnih mestih jugovzhodnega dela Tržaškega zaliva, ki so prikazana na sliki 9 na naslednji strani: 00CZ, 000G, 000F, 000K in 00MA (ARSO, 2003a). Od leta 2003 naprej MBP izvaja Monitoring kakovosti morja, brakičnih voda in voda za življenje in rast morskih školjk in morskih polžev. S spremembo monitoringa se je spremenila tudi mreža merilnih mest, ki sedaj v programu monitoringa kakovosti morja od leta 2003 obsega osnovna, dodatna in referenčna merilna mesta (brez točke 000G). V slovenskem delu Tržaškega zaliva so določili eno osnovno (00CZ), eno referenčno (000F) in dve dodatni merilni mesti (000K in 00MA). Osnovno merilno mesto značilno za ugotavljanje kemijskega stanja določenega vodnega telesa in v primeru postaje 00CZ, ki leži sredi Tržaškega zaliva, meji tudi na teritorialne vode druge države – Italije. Referenčno merilno mesto (000F) je na najmanj onesnaženem območju

obalnega morja – v južnem delu Tržaškega zaliva, kjer je vpliv sladkovodnih pritokov s kopnega najmanjši – in predstavlja referenčno točko za določanje meril za ugotavljanje kemijskega stanja površinskih voda. Dodatni merilni mesti sta na območjih obalnega morja, ki so pod vplivom enega ali več točkovnih ali razpršenih virov onesnaženja. Merilno mesto 000K leži v Koprskem zalivu, v neposredni bližini pristanišča – Luka Koper in izliva reke Rižane, v katero se stekajo komunalne in nekatere industrijske odplake po primarnem, mehanskem čiščenju. Merilno mesto 00MA leži v Piranskem zalivu na vhodu v portoroško marino (ARSO, 2003b; ARSO, 2004b).



Slika 9: Položaj merilnih mest, ki smo jih uporabili v diplomu (IzVRS)

Za potrebe diplomske naloge smo se pri Monitoringu kakovosti morja, brakičnih voda in voda za življenje in rast morskih školjk in morskih polžev omejili le na Monitoring kakovosti morja, saj nas zanimajo le merilna mesta 00CZ, 000G, 000F, 000K in 00MA, kjer smo rezultate modela za celokupni fosfor primerjali z meritvami na merilnih mestih.

4.2.2 Monitoring kakovosti morja in kontrola onesnaženja s kopnega

Z Monitoringom kakovosti morja in kontrolo onesnaženja s kopnega, ki je razdeljen na Monitoring za zaščito zdravja ljudi – Compliance monitoring ter Monitoring okolja in trend monitoring, se izvajajo meritve kemijskega onesnaženja v sedimentu in organizmih, žarišča onesnaženja ter obremenitev (ARSO, 2003b; ARSO, 2004b). Žarišča onesnaženja obsegajo kemijska onesnaženja – rečna ustja ter območja podvodnih izpustov. Merjena mesta so izlivna območja rek Rižane (00RI), Badaševce (00BA), Drnice (00DN) in Dragonje (00DR) ter podvodni izpust čistilne naprave Piran (00PO) in podvodni izpust čistilne naprave Izola (00IO). Pod obremenitve spadajo komunalne odpadne vode. Odpadne vode so vzorčili na iztoku črpališča v Izoli (00IA), komunalne čistilne naprave (KČN) v Koprju (00KB) in Piranu (00PA) ter iztoku usedalnika maščob tovarne »Delamaris« v Izoli (00DE). Podatki vzorčenja odpadnih voda so znani le za leti 2001 in 2002, za izpuste v letu 2001, 2002 in 2003, za reke pa so podatki vzorčenja znani za vsa štiri leta.

Za potrebe diplomske naloge smo se pri Monitoringu kakovosti morja in kontroli onesnaženja s kopnega omejili le na žarišča onesnaženja (slika 9), natančneje rečna ustja, in sicer Rižano (00RI). V primerjavi z ostalimi rekami, ki se iztekajo v Koprski zaliv, količinsko največ celokupnega fosforja v zaliv prinese Rižana, v katero se iztekajo tudi odplake iz KČN Koper (ARSO, 2003b). Zaradi tega smo se odločili, da upoštevamo samo vpliv Rižane, kljub temu da se zavedamo, da tudi ostale našete komunalne odpadne vode doprinesejo k zajetnemu onesnaženju zaliva.

4.2.3 Meritve na merilnih mestih, ki smo jih uporabili v diplomu

Položaj vseh v diplomu uporabljenih merilnih mest (preglednica 1) v zalivu je prikazan na sliki 9 v poglavju 4.2.1. Meritve so se na morskih merilnih mestih izvajale na različnih globinah (preglednica 3).

Preglednica 1: Merilna mesta (poleg morskih je poleg še edino žarišče rečnega onesnaženja)

Koda postaje	Vzorčevalno mesto	Geodetska koordinata X	Geodetska koordinata Y	Globina (m)	Odd. Od obale (m)	Merilno mesto
000K	Koprski zaliv	47699	400271	16	1300	Obalna
000F	Odprte vode	45150	386780	21	3000	Referenčna
000G	Tržaški zaliv	50897	384529	22		Referenčna
00CZ	Tržaški zaliv	54592	394164	24	3500	Referenčna
00MA	Piranski zaliv	41106	388443	16	1500	Obalna
00RI	Rižana	47036	403232			Rečno ustje

Preglednica 2: Prikaz števila meritev za celokupni fosfor na posameznem merilnem mestu na določeni globini in na edinem uporabljenem žarišču rečnega onesnaženja

Element	Merilno mesto	Globina (m)	2001	2002	2003	2004
TotP	00CZ	0	10	9	12	12
		5	10	9	12	12
		10	10	9	12	12
		15	10	9	12	12
		20	10	9	12	12
		24	10	9	12	12
	000G	0	10	9		
		5	10	9		
		10	10	9		
	000F	0	10	9	12	12
		5	10	9	12	12
		10	10	9	12	12
		15	10	9	12	12
		21	10	9	12	12
	000K	0	10	9	4	4
		5	10	9	4	4
		10	10	9	4	4
	00MA	16	10	9	4	4
		0	10	9	4	4
		5	10	9	4	4
		10	10	9	4	4
	00RI	16	10	9	4	4
				4	4	1

Preglednica 3: Prikaz merilnih mest in globin, na katerih so se izvajale meritve

Globine (m)	00CZ	000G	000F	000K	00MA
0	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x
10	x	x	x	x	x
15	x		x		
16				x	x
20	x				
21			x		
22		x			
24	x				

4.3 Kopalna voda

Nekatera morska kopališča, prikazana na sliki 10 na naslednji strani, ki smo jih uporabili za primerjavo z rezultati modela pri modeliranju fekalnih koliformnih bakterij, so del kopalne vode na našem morju, zato na kratko podajamo obrazložitev pojma in pomen kopalnih voda.

Predpisi v Sloveniji ločijo dve vrsti kopanih voda na površinskih vodah, in sicer kopalne vode na naravnih kopališčih in kopalne vode na območjih kopalnih voda, kjer se običajno kopa večje število ljudi in kopanje ni prepovedano (ARSO, 2005c).

Področje upravljanja kopalnih voda urejata dve direktivi. Prva, Direktiva Sveta z dne 8. decembra 1975 o kakovosti kopalnih voda 76/160/EGS, je v uporabi od leta 1976, druga pa od leta 2006. Nova, imenovana Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2006/7/ES, bo staro v celoti nadomestila v letu 2014. Kopalna sezona na morju traja od 15. junija do 30. septembra. V tem času se redno spremlja skupne koliformne bakterije, koliformne bakterije fekalnega izvora, barve, mineralna olja, fenole, prosojnost in pa vidne nečistoče. Ostale parametre se spremlja po potrebi. Vsak vzorec naj bi ustrezal zahtevam o kakovosti kopalne vode, ki so podane s Pravilnikom o minimalnih higienskih zahtevah in drugih zahtevah za kopalne vode (Ur. l. RS, št. 73/03, 96/06). Pravilnik podaja higienske zahteve tako za kopalne vode v naravnih kopališčih kot tudi na območjih kopalnih voda. Te zahteve so v veliki meri povzete pa kopalni direktivi 76/160/EGS, v letu 2008 bodo v nacionalni pravni red prenesene tudi zahteve nove kopalne direktive (ARSO, 2006a).

Razlika med evropsko in nacionalno zakonodajo je v mejnih vrednostih. Evropska zakonodaja predpisuje minimalne zahteve, nacionalna zakonodaja pa lahko predpisuje strožje zahteve, ki so lahko različne za posamezno državo članico EU. Razlika med mikrobiološkimi zahtevami po kopalni direktivi 76/160/EGS in slovenski zakonodaji je vidna v preglednici 4 na naslednji strani (ARSO, 2007a).

Preglednica 4: Primerjava med mikrobiološkimi zahtevami po kopalni direktivi 76/160/EGS in slovenski zakonodaji (ARSO, 2007a)

Naziv parametra	Enota	Direktiva 76/160/EGS		Vrednosti iz Pravilnika o minimalnih higienskih in drugih zahtevah za kopalne vode	
		Mejna vrednost	Priporočena vrednost	Mejna vrednost	Priporočena vrednost
Skupne koliformne bakterije	št./100ml	10000	500	2000	500
Koliformne bakterije fekalnega izvora	št./100ml	2000	100	500	100
Streptokoki fekalnega izvora (enterokoki)	št./100ml	-	100	200	100

Na slovenski obali se monitoring kopalnih voda izvaja na 13-ih kopališčih. Za potrebe diplomske naloge smo se omejili na 5 kopališč (slika 10 in preglednica 5), do katerih bi lahko segal vpliv fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane.



Slika 10: Položaj 5-ih kopališč na slovenski obali (IzVRS)

Preglednica 5: Seznam uporabljenih kopališč (ARSO)

Ime kopališča	Geodetska koordinata Y	Geodetska koordinata X
Naravno kopališče RKS MZL Debeli rtič	50016	399593
Kopališče Adria Ankaran	48735	401379
Mestno kopališče Koper	45879	400849
Kopališče Žusterna	45536	399717
Plaža Simonov zaliv	44009	394483

Podatke o količini fekalnih koliformnih bakterij na teh kopališčih smo dobili iz meritev, ki jih pod okriljem MOP in Ministrstva za zdravje (MZ) izvaja ARSO, in sicer od leta 2004 naprej, torej le za zadnja tri leta. Število vzorčenj na kopališčih je prikazano v preglednici 6.

Preglednica 6: Število vzorčenj na posameznem kopališču (ARSO)

Parameter	Kopališče	2004	2005	2006
FC	Naravno kopališče RKS MZL Debeli rtič	9	9	9
	Kopališče Adria Ankaran	9	9	0
	Mestno kopališče Koper	9	9	0
	Kopališče Žusterna	9	9	9
	Plaža Simonov zaliv	9	9	9

Za vsako kopališče smo za vsako leto izračunali povprečno število fekalnih koliformnih bakterij (preglednica 7), kar smo uporabili pri primerjavi podatkov, ki smo jih dobili z modelom PCFLOW3D.

Preglednica 7: Prikaz povprečnega števila fekalnih koliformnih bakterij na posameznem kopališču

Kopališče	2004	2005	2006	Povprečje vseh let	Standardna deviacija
	FC (št./100ml)	FC (št./100ml)	FC (št./100ml)	FC (št./100ml)	FC (št./100ml)
Naravno kopališče RKS MZL Debeli rtič	31	65	37	44	18
Kopališče Adria Ankaran	137	168		153	22
Mestno kopališče Koper	14	8		11	4
Kopališče Žusterna	24	20	35	27	7
Plaža Simonov zaliv	20	57	71	49	26

4.4 Podatki za modeliranje

V prejšnjih poglavjih smo opisali način pridobivanja podatkov in kratek opis le-teh. V nadaljevanju so predstavljeni dejanski vhodni podatki, ki so bili uporabljeni za simulacije in podatki meritev, uporabljeni za primerjavo z rezultati modeliranja.

4.4.1 Tržaški zaliv

4.4.1.1 Veter

Veter je najpomembnejši faktor, ki vpliva na gibanje vode in s tem tudi na disperzijo polutantov. Podnebje Tržaškega zaliva je sredozemsko, vendar je redno pod vplivom hladnih zračnih mas iz bližnjega alpskega območja. V hladnejši sezoni, od pozne jeseni do pomladi, občasno piha močna, sunkovita burja, iz smeri NNE do E. Drugi karakteristični občasni veter, jugo, ki je manj intenziven in bolj enakomeren, piha iz smeri SE do SSW. Zaradi svoje nenadnosti in moči je tramontana najbolj neugoden veter, ki lahko piha v zalivu. Je veter, ki ga imenujejo tudi severnik, piha za hladno fronto iz severne smeri (N) in je običajno prehodnega značaja. Piha v vseh letnih obdobjih in je kratkotrajen. Lahko je tako močan, da je nevaren za plovbo. Običajno po nekaj urah preide v burjo.

Za sezonske simulacije transporta celokupnega fosforja smo uporabili sezonski povprečni veter, za modeliranje fekalnih koliformnih bakterij pa t.i. dnevni in nočni veter, ki v poletnem času izmenično piha nad zalivom. V simulacije fekalnih koliformnih bakterij smo vključili tudi tramontano, saj bi lahko s svojim nenadnim pojavom in veliko močjo pomembno vplivala na porazdelitev koncentracij fekalnih koliformnih bakterij v kopališčih.

4.4.1.1.1 Sezonski veter

Na postaji Beli Križ nad Portorožem je urne meritve hitrosti in smeri vetra v letih od 1975 do 1990 izvajal Hidrometeorološki zavod, sedaj Agencija RS za okolje (ARSO). Žal je bila postaja Beli Križ leta 1990 zaradi ekonomskih razlogov opuščena in se meritve od takrat naprej izvajajo na letališču v Portorožu, ki je zaradi svoje lege bistveno manj ugodno za opis vetrovnih razmer v širši okolici. Tako smo pri simulacijah uporabili dejanski merjeni veter s postaje Beli Križ za leto 1988, ki je bilo kot referenčno leto že večkrat uporabljeno za simulacije hidrodinamike in transporta onesnaževal v Tržaškem zalivu (Širca in Rajar, 1997; Žagar, 1999; Ramšak, 2006).

Smer in hitrost sezonskih vetrov (preglednica 8), sta bili za postajo Beli Križ določeni s pomočjo metode VECTRA (Širca, 1996), na osnovi urnih vrednosti smeri in hitrosti vetra za obdobje med letoma 1975 in 1990, ki jih je posredovala ARSO.

Preglednica 8: Smer in hitrost povprečnih sezonskih vetrov v Tržaškem zalivu (Žagar, 1999)

Sezona	Smer (°)	Hitrost (m/s)
Zima (jan., feb., mar.)	66,6	2,2
Pomlad (apr., maj., jun.)	101,6	1,1
Poletje (jul., avg., sep.)	64,7	1,0
Jesen (okt., nov., dec.)	69,8	2,3

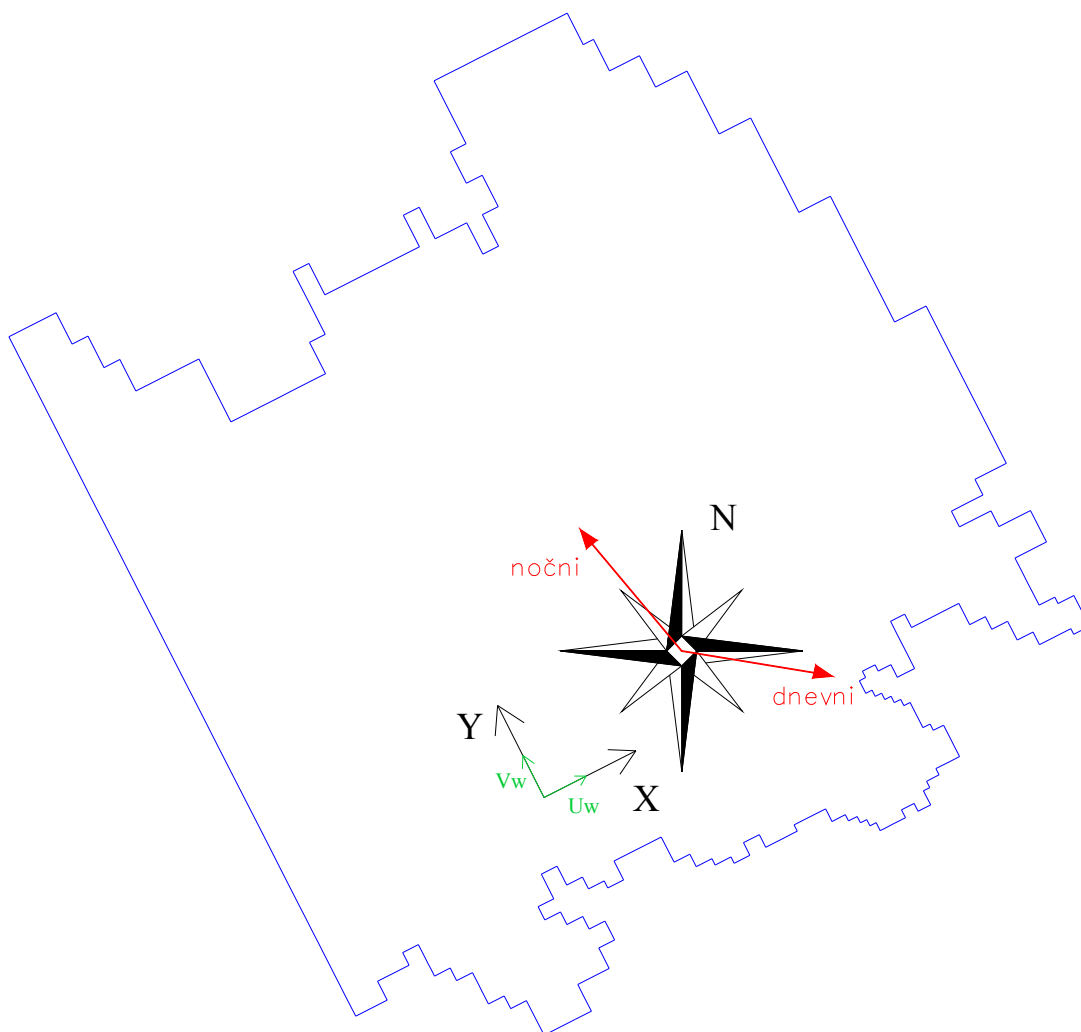
4.4.1.1.2 Dnevni in nočni veter

Na podlagi meteoroloških podatkov za leto 1988 smo za poletje izračunali približno povprečno jakost vetra, ki za oba dela dneva znaša 3,5 m/s, in pa smer pihanja, ki znaša podnevi 280°, ponoči pa 140°. Takšne razmere so bile nad zalivom le v krajših časovnih obdobjih, ki niso presegala 10 dni. Čas upadanja in naraščanja vetra smo ocenili na 4 ure, polno moč pa na 8 ur. Torej piha dnevni veter s polno močjo od 10 do 18 ure, nočni od 22 do 6 ure zjutraj, vmes pa linearno upada in narašča po 4 ure. Veter razdeljen po komponentah je viden v preglednici 9 na naslednji strani.

Ker je koordinatni sistem protiurno zarotiran za 27° , je zato za model potrebno smeri za nočni veter popraviti na 167° , za dnevnega pa 307° (slika 11).

Preglednica 9: Veter po komponentah za model

Čas (h)	Uw (m/s)	Vw (m/s)
8:00	0	0
10:00	3,12	-1,59
18:00	3,12	-1,59
20:00	0	0
22:00	-0,79	3,41
6:00	-0,79	3,41
8:00	0	0



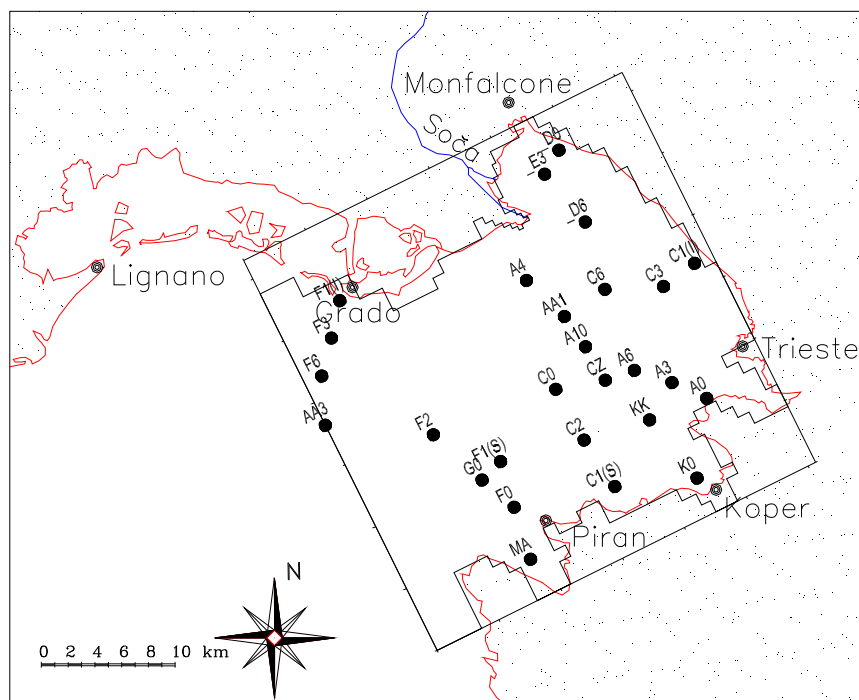
Slika 11: Smer nočnega in dnevnega vetra prikazan na obrisu numerične mreže

4.4.1.1.3 Tramontana

Na podlagi lestvice najmočnejših tramontan merjenih na obalni oceanografski boji Piran (Obalna oceanografska boja Piran, 2007) smo za vhodni podatek modela privzeli, da tramontana 2 uri narašča in nato s polno močjo 14 m/s piha 4 ure. To se pravi, da je skupni čas pihanja tramontane 6 ur. Za smer smo na podlagi podatkov z boje izbrali 315°.

4.4.1.2 Temperatura in slanost v zalivu

Za simulacije je bilo potrebno za vsako sezono zagotoviti podatke o porazdelitvi temperatur in slanosti v vseh točkah računske mreže. V celotnem zalivu so bile sredi posameznih letnih časov (februar, maj, avgust, november) v letih 1994 in 1995 izmerjene temperature in slanosti sočasno v 27 točkah zaliva (slika 12), v 5 metrskih intervalih po globini.



Slika 12: Definijsko območje modeliranja in merske točke v Tržaškem zalivu (Žagar, 1999)

Najprej so bile iz podatkov meritve z linearno interpolacijo izračunane temperature in slanosti pod merskimi točkami v vsakem sloju. Nato je bila nad vsakim slojem z uporabo trikotne mreže napeta ploskev temperatur in slanosti z orodjem Quicksurf, s katerim so bile tudi izvrednotene celotne matrike temperatur in slanosti v vsaki celici definicijskega območja za vse štiri sezone (Žagar, 1999).

Temperaturo in slanost v vsaki celici za vse štiri sezone smo prilagodili numerični mreži, ki je prikazana na sliki 7 v poglavju 4.1.

Izkušnje z gostotnimi gibanji (Rajar in sod., 1997) so pokazale, da je potrebno "glajenje" matrik temperatur in slanosti, dobljenih z interpolacijami meritev, sicer se pri simulacij lahko pojavijo težave s stabilnostjo numerične sheme. Glajenje matrike smo izvedli tako, da smo poleg gostotnega gibanja upoštevali še veter in vtoka Soče ter Rižane in simulirali cirkulacijo, dokler nismo na celotnem definicijskem območju dosegli pričakovanih hitrosti. Postopek je podrobneje opisal Žagar (1999).

Čeprav podatki monitoringa, ki ga izvaja ARSO na petih merilnih mestih v zalivu, vsebujejo tudi temperaturo in slanost, smo v diplomu uporabili podatke iz prejšnjih nalog (Žagar, 1999; Ramšak, 2006) zaradi večjega števila merskih točk in meritev.

4.4.1.3 Plimovanje v Koprskem zalivu

Vpliva plimovanja v celoletni simulaciji celokupnega fosforja nismo upoštevali, ker ima dnevno nihanje morja na tako dolgo simulacijo le majhen vpliv. Plimovanje smo upoštevali le pri modeliranju fekalnih koliformnih bakterij, saj je njegov vpliv na kratkotrajne simulacije znaten. Vpliv plimovanja na gibanje vode v zalivu pri simulacijah s 3D modelom smo upoštevali tako, da smo za Koprski zaliv iz tabel prognoziranja morja za leti 2006 (ARSO, 2006b) in 2007 (ARSO, 2007b) za frekvenco 12 h za vse tri poletne mesece izračunali povprečno poletno amplitudo, ki znaša ± 45 cm.

4.4.1.4 Začetne koncentracije celokupnega fosforja v zalivu

Za določanje koncentracij celokupnega fosforja v Koprskem zalivu smo uporabili podatke iz meritev, ki jih izvaja MBP za ARSO. ARSO je podatke od leta 2001 pa do vključno leta 2004 tudi posredovala. Meritve so se izvajale na petih merilnih mestih, in sicer 00CZ, 000G, 000F, 00K ter 00MA.

Koncentracije celokupnega fosforja so bile izmerjene v $\mu\text{mol P/l}$, tako da jih je bilo treba preračunati v mg/l . V nadaljevanju smo za vsako točko za posamezno globino izračunali povprečno koncentracijo celokupnega fosforja za vsa 4 leta in nato izmed vseh točk skupno povprečje koncentracij celokupnega fosforja za določeno globino (preglednica 10). Kjer se globine meritev med posameznimi točkami niso ujemale, smo podatke interpolirali.

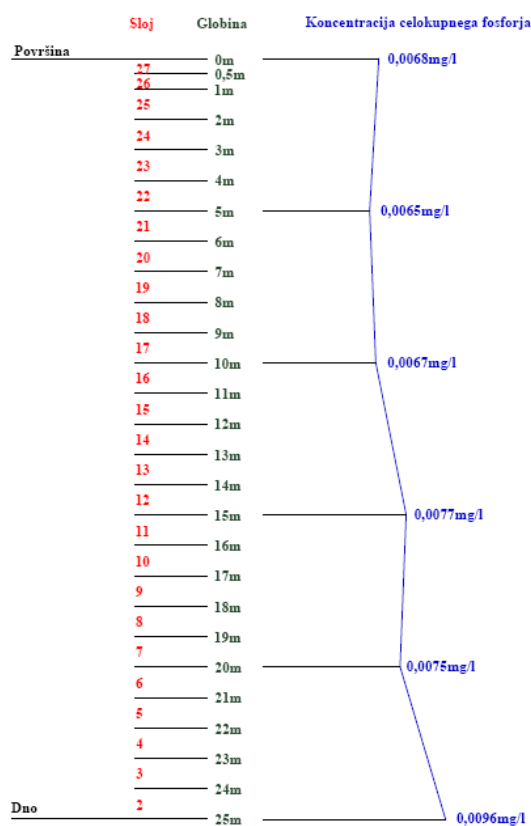
Preglednica 10: Prikaz povprečja koncentracij celokupnega fosforja za določeno globino

	0m (mg/l)	5m (mg/l)	10m (mg/l)	15m (mg/l)	20m (mg/l)	24m (mg/l)
00CZ	0,0063	0,0066	0,0059	0,0062	0,0072	0,0098
000G	0,0062	0,0059	0,0066			0,0094
000F	0,0062	0,0062	0,0066	0,0066	0,0078	
000K	0,0081	0,0072	0,0073	0,0094		
00MA	0,0069	0,0066	0,0072	0,0088		
Povprečje	0,0068	0,0065	0,0067	0,0077	0,0075	0,0096

Ker je potrebno v vhodnih podatkih za izračun simulacij z modelom PCFLOW3D podati koncentracije za vsak sloj posebej, smo morali povprečne koncentracije interpolirati po globini, da smo dobili koncentracije celokupnega fosforja za vsak sloj (preglednica 11 in slika 13), saj so se meritve izvajale le na globinah, ki so prikazane v preglednici 3 v poglavju 4.2.3.

Preglednica 11: Koncentracija celokupnega fosforja v posameznem sloju kot vhodni podatek za model

Sloji	Globina (m)	Konc. P (mg/l)
27	0 - 0,5	0,00680
26	0,5 - 1	0,00674
25	1 - 2	0,00668
24	2 - 3	0,00662
23	3 - 4	0,00656
22	4 - 5	0,00650
21	5 - 6	0,00654
20	6 - 7	0,00658
19	7 - 8	0,00662
18	8 - 9	0,00666
17	9 - 10	0,00670
16	10 - 11	0,00690
15	11 - 12	0,00710
14	12 - 13	0,00730
13	13 - 14	0,00750
12	14 - 15	0,00770
11	15 - 16	0,00766
10	16 - 17	0,00762
9	17 - 18	0,00758
8	18 - 19	0,00754
7	19 - 20	0,00750
6	20 - 21	0,00792
5	21 - 22	0,00834
4	22 - 23	0,00876
3	23 - 24	0,00918
2	24 - 25	0,00960



Slika 13: Prikaz začetnega stanja koncentracije celokupnega fosforja po globini za celotni Tržaški zaliv

4.4.1.5 Začetno stanje – število fekalnih koliformnih bakterij v Koprskem zalivu

V 15 dnevni simulaciji se ponavlja plimovanje (s periodo 12 h) ter dnevni in nočni veter (s periodo 24 h). V simulaciji smo želeli pokazati možen vpliv vtoka, transporta in odmiranja fekalnih koliformnih bakterij, ki pritekajo v zaliv z Rižano, na kopališča v Koprskem zalivu, kot je razloženo v poglavju 3.3. Za takšno simulacijo, kjer modeliramo povečanje števila bakterij na določenem mestu, je začetno stanje nepomembno, zato smo v celotnem Koprskem oz. Tržaškem zalivu predpostavili začetno koncentracijo 0.

4.4.2 Reki Soča in Rižana

Kot točkovni obremenitvi z onesnaženjem smo upoštevali reki Sočo in Rižano. Kljub temu, da se v Koprski zaliv poleg Rižane izliva še Badaševica, le te nismo upoštevali, saj ima 13-krat manjši pretok od Rižane. V Rižani je pomemben tudi izliv odpadnih vod iz KČN Koper (26 t/leto celokupnega fosforja) (ARSO, 2003b), ki prinese mesečno v zaliv bistveno večjo koncentracijo celokupnega fosforja (110 t/leto) (ARSO, 2003b) od Badaševice (2 t/leto) (ARSO, 2003b). Sočo pri simulacijah upoštevamo, ker ima v primerjavi z Rižano bistveno večji pretok, kar 50-krat večji od Rižane in njen vpliv seže globoko v Tržaški zaliv. Podatke o pretokih Soče in Rižane je posredovala ARSO iz Hidroloških letopisov za leta 2001, 2002 in 2003 ter iz banke hidroloških podatkov za leto 2004.

4.4.2.1 Temperatura in slanost na ustju Soče in Rižane

Na voljo so bile meritve temperature pod zadnjim mostom pred ustjem Soče, ki je manj kot kilometer od izliva Soče, v približno dvotedenskih razmakih med leti 1974 in 1995. Za simulacije, ki smo jih želeli izvesti s 3D modelom, so bile iz podatkov statistično izračunane povprečne sezonske vrednosti (Žagar, 1999; Ramšak, 2006), ki so prikazane v preglednici 12 na naslednji strani.

Preglednica 12: Povprečna sezonska temperatura Soče pod zadnjim mostom pred izlivom (Žagar, 1999)

Sezona	T (°C)
Zima	7,7
Pomlad	12,9
Poletje	16,3
Jesen	9,2

Zaradi plimovanja morja in minimalnega padca Soče v zadnjem kilometru pred izlivom se mešanje sladke in slane vode dogaja že pred izlivom v morje. Po razpoložljivih meritvah je slanost v Soči tik pred izlivom v morje približno 1,7 %, kar pa velja zgolj za meritve ob nizkih in srednjih sezonskih pretokih (Kotnik in Brambati, 2003; Ramšak, 2006).

Na podlagi meritev slanosti na ustju Rižane (Čermelj in Makovec, 2003) znaša slanost v času plime in oseke približno 1,7 %. Ker nismo našli nobenih ustreznih celoletnih rezultatov temperaturnih meritev, ki so se izvajale na ustju Rižane, smo privzeli iste podatke kot za Sočo.

4.4.2.2 Sezonski pretok na ustjih Soče in Rižane

4.4.2.2.1 Sezonski pretok na ustju Soče

Pretoki Soče temeljijo na meritvah, opravljenih na merilni postaji Solkan, tik pred slovensko-italijansko mejo, ki je še vedno edina merska postaja v spodnjem toku Soče, za katero je na voljo dovolj podatkov, da je statistična obdelava sploh mogoča. Med Solkanom in izlivom Soče v Tržaški zaliv dotekata v Sočo dva večja pritoka, Vipava in Ter (Torre). Pretoki za Vipavo, ki so bili merjeni na merilni postaji Miren, so vidni v preglednici 13 na naslednji strani. Hidrologija italijanskega dela Soče je slabše raziskana, saj po razpoložljivih podatkih pretokov redno 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 tem delu ostaja reka Ter, ki se ji odvisno od gladine talne vode, vzdolž toka pretok povečuje ali zmanjšuje in poleti občasno reka Ter sploh ne priteče do sotočja s Sočo (Mosetti, 1983; Širca in sod., 1999). Skupna

prispevna površina porečja Soče nad Solkanom znaša 2235 km², pod Solkanom pa 1065 km², zato je ob pomanjkanju boljših podatkov pretok ob ustju Soče določen kot 1,5-kratni skupni pretok Soče in Vipave (Žagar, 1999; Ramšak, 2006). Zavedamo se, da pretok Soče na ustju zaradi opisanih značilnosti kraškega terena in posledic odvzema vode za namakanje na italijanski strani meje zanesljivo ni točen, vendar do sedaj boljši podatki niso bili nikjer objavljeni.

Ker so bili na razpolago podatki za celokupni fosfor le za leto 2004, smo za isto leto uporabili tudi pretoke za Sočo in Vipavo.

Preglednica 13: Izračun sezonskega pretoka na ustju Soče

Mesec	Soča - Solkan (m ³ /s)	Vipava - Miren (m ³ /s)	Soča + Vipava (m ³ /s)	Soča na ustju (m ³ /s)	Sezonski pretok (m ³ /s)	Sezona
Januar	69,2	22,3	91,5	137,3	153,7	Zima
Februar	73,3	24,5	97,8	146,7		
Marec	98,9	19,1	118	177,0		
April	126	24,1	150,1	225,2	198,9	Pomlad
Maj	126	23,7	149,7	224,6		
Junij	87,4	10,5	97,9	146,9		
Julij	58,8	4,88	63,68	95,5	112,6	Poletje
Avgust	88,5	2,81	91,31	137,0		
September	66,9	3,24	70,14	105,2		
Oktober	176	29,5	205,5	308,3	216,9	Jesen
November	112	17,1	129,1	193,7		
December	75,1	24	99,1	148,7		

4.4.2.2 Sezonski pretok na ustju Rižane

Pretoki Rižane so merjeni le na vodomerni postaji Kubed II, ki je približno 13 km oddaljena od izliva v morje. Pretoke na ustju Rižane smo določili po enakem postopku kot za Sočo. Skupna prispevna površina porečja Rižane nad VP Kubed II znaša 204,5 km², celotna prispevna površina porečja Rižane do izliva pa 230,5 km², zato je pretok Rižane na ustju določen kot 1,13-kratni pretok Rižane na Kubed II, kar je vidno v preglednicah 14 in 15. Postopek je utemeljen in uporabljen že pri prejšnjih simulacijah v Tržaškem zalivu (Širca in sod., 1999; Žagar, 1999; Ramšak, 2006).

Preglednica 14: Mesečni in sezonski povprečni pretoki na ustju Rižane

		Pretoki (m ³ /s)		
2001	Mesec	Rižana Kubed II	Rižana na ustju	Sezonski povprečni na ustju
Zima	Januar	10,4	11,72	7,72
	Februar	2,23	2,51	
	Marec	7,93	8,94	
Pomlad	April	3,27	3,69	1,47
	Maj	0,36	0,41	
	Junij	0,28	0,32	
Poletje	Julij	0,11	0,12	2,83
	Avgust	0,13	0,15	
	September	7,28	8,21	
Jesen	Oktober	1,49	1,68	1,35
	November	1,38	1,56	
	December	0,72	0,81	
2002	Mesec	Rižana Kubed II	Rižana na ustju	Sezonski povprečni na ustju
Zima	Januar	0,81	0,91	3,10
	Februar	6,15	6,93	
	Marec	1,28	1,44	
Pomlad	April	4,68	5,28	4,16
	Maj	3,94	4,44	
	Junij	2,45	2,76	
Poletje	Julij	0,24	0,27	2,54
	Avgust	4,17	4,70	
	September	2,34	2,64	
Jesen	Oktober	5,48	6,18	7,02
	November	9,05	10,20	
	December	4,15	4,68	
2003	Mesec	Rižana Kubed II	Rižana na ustju	Sezonski povprečni na ustju
Zima	Januar	6,13	6,91	3,38
	Februar	2,43	2,74	
	Marec	0,43	0,48	
Pomlad	April	4,17	4,70	1,81
	Maj	0,48	0,54	
	Junij	0,18	0,20	
Poletje	Julij	0,14	0,16	0,13
	Avgust	0,09	0,10	
	September	0,12	0,14	
Jesen	Oktober	1,11	1,25	4,75
	November	6,78	7,64	
	December	4,75	5,35	
2004	Mesec	Rižana Kubed II	Rižana na ustju	Sezonski povprečni na ustju
Zima	Januar	6,3	7,10	6,67
	Februar	5,88	6,63	
	Marec	5,58	6,29	
Pomlad	April	4,89	5,51	4,08
	Maj	5,01	5,65	
	Junij	0,96	1,08	
Poletje	Julij	0,77	0,87	0,41
	Avgust	0,18	0,20	
	September	0,15	0,17	
Jesen	Oktober	3,57	4,02	5,24
	November	4,00	4,51	
	December	6,37	7,18	

Preglednica 15: Povprečni sezonski pretoki na ustju Rižane

	Sezonski povprečni pretoki na ustju (m ³ /s)			
	Zima	Pomlad	Poletje	Jesen
2001	7,72	1,47	2,83	1,35
2002	3,10	4,16	2,54	7,02
2003	3,38	1,81	0,13	4,75
2004	6,67	4,08	0,41	5,24
Povprečje sezona	5,22	2,88	1,48	4,59

Ker imamo na razpolago podatke za celokupni fosfor na izlivu Rižane (00RI) za obdobje od 2001 do 2004, smo tudi sezonske pretoke izračunali iz podatkov za ista leta. Povprečne mesečne pretoke za leta 2001, 2002 in 2003 smo dobili iz hidroloških letopisov (ARSO, 2004a; ARSO, 2005a; ARSO, 2005b), za leto 2004 pa iz banke hidroloških podatkov za leto 2004 (ARSO). Iz povprečnih mesečnih pretokov smo izračunali sezonske povprečne pretoke in jih uporabili v modelu. Prikazani so v preglednici 15.

4.4.2.3 Koncentracija celokupnega fosforja na ustjih Soče in Rižane

4.4.2.3.1 Koncentracija celokupnega fosforja na ustju Soče

Podatke o P (mg/l) smo dobili iz Monitoringa rek za leto 2004 (ARSO). Najbolj dolvodne meritve, ki se izvajajo na Soči, se izvajajo na merilni postaji Solkan. Ker pa se Soči v Italiji priključi še Vipava, ki prinaša znatno količino celokupnega fosforja, smo izračunali skupne sezonske koncentracije celokupnega fosforja na ustju Soče na osnovi podatkov VP Solkan in VP Miren. Izmerjeni podatki so podani v mg/l. Slednje smo pomnožili s srednjim pretokom, ki je bil izmerjen na omenjenih merilnih postajah. Tako smo dobili celokupni fosfor v g/s. Nato smo dobljeni celokupni fosfor v g/s Soče in Vipave za vsak mesec sešteli. Ker je na tem delu Italije, kjer teče Soča veliko kmetijsko obdelovalnih površin in živinoreje, nedvomno v Sočo dotekajo velike količine celokupnega fosforja, ki pa jih je nemogoče izračunati. Zato smo mesečni seštevki celokupnega fosforja Soče in Vipave pomnožili s faktorjem 2, kar po naši oceni predstavlja verjetno vrednost koncentracij celokupnega fosforja na iztoku Soče v morje. Končno koncentracijo celokupnega fosforja na ustju Soče smo dobili tako, da smo skupno ocenjeno količino celokupnega fosforja delili še s pretokom Soče na ustju. Izračuni so

prikazani v preglednicah 16 in 17. Vsekakor bi bilo potrebno za točnejšo oceno oz. ovrednotenje koncentracij celokupnega fosforja na iztoku Soče izvajati ustrezne meritve tudi na italijanski strani.

Preglednica 16: Izračun koncentracije celokupnega fosforja v Soči in Vipavi

Vodotok	Merilno mesto	Datum	P (mg/l)	Qsr (m3/s)	P (g/s)
SOČA	Solkan	29.1.2004	0,033	69,2	2283,6
SOČA	Solkan	25.2.2004	0,053	73,3	3884,9
SOČA	Solkan	16.3.2004	0,025	98,9	2472,5
SOČA	Solkan	20.4.2004	0,026	126	3276
SOČA	Solkan	27.5.2004	0,021	126	2646
SOČA	Solkan	16.6.2004	0,039	87,4	3408,6
SOČA	Solkan	15.7.2004	0,035	58,8	2058
SOČA	Solkan	3.8.2004	0,039	88,5	3451,5
SOČA	Solkan	28.9.2004	0,029	66,9	1940,1
SOČA	Solkan	21.10.2004	0,025	176	4400
SOČA	Solkan	22.11.2004	0,026	112	2912
SOČA	Solkan	2.12.2004	0,076	75,1	5707,6
VIPAVA	Miren	29.1.2004	0,085	22,3	1895,5
VIPAVA	Miren	25.2.2004	0,086	24,5	2107
VIPAVA	Miren	30.3.2004	0,045	19,1	859,5
VIPAVA	Miren	20.4.2004	0,078	24,1	1879,8
VIPAVA	Miren	27.5.2004	0,076	23,7	1801,2
VIPAVA	Miren	16.6.2004	0,049	10,5	514,5
VIPAVA	Miren	15.7.2004	0,151	4,88	736,88
VIPAVA	Miren	17.8.2004	0,153	2,81	429,93
VIPAVA	Miren	28.9.2004	0,178	3,24	576,72
VIPAVA	Miren	21.10.2004	0,085	29,5	2507,5
VIPAVA	Miren	22.11.2004	0,079	17,1	1350,9
VIPAVA	Miren	2.12.2004	0,131	24	3144

Preglednica 17: Izračun sezonskih koncentracij celokupnega fosforja na ustju Soče

Mesec	Soča + Vipava (g/s)	X 2 (g/s)	Pretok Soče na ustju (m3/s)	P na ustju (mg/l)	Sezonske vrednosti P (mg/l)	Sezona
jan.04	4179,1	8358,2	137,3	0,061	0,060	Zima
feb.04	5991,9	11983,8	146,7	0,082		
mar.04	3332	6664	177,0	0,038		
apr.04	5155,8	10311,6	225,2	0,046	0,046	Pomlad
maj.04	4447,2	8894,4	224,6	0,040		
jun.04	3923,1	7846,2	146,9	0,053		
jul.04	2794,88	5589,76	95,5	0,059	0,054	Poletje
avg.04	3881,43	7762,86	137,0	0,057		
sep.04	2516,82	5033,64	105,2	0,048		
okt.04	6907,5	13815	308,3	0,045	0,069	Jesen
nov.04	4262,9	8525,8	193,7	0,044		
dec.04	8851,6	17703,2	148,7	0,119		

4.4.2.3.2 Koncentracija celokupnega fosforja na ustju Rižane

Podatki o količini celokupnega fosforja v Rižani so pridobljeni z merilnega mesta 00RI. Uporabili smo podatke iz meritev od leta 2001 do leta 2004. Ker se merilno mesto 00RI nahaja skoraj na samem ustju Rižane in je zato morebitna napaka pri izračunih majhna, smo podatke s tega merilnega mesta uporabili kot sezonske koncentracije celokupnega fosforja na njenem ustju (preglednica 18).

Preglednica 18: Sezonske koncentracije celokupnega fosforja na ustju Rižane

Merjeno mesto	Datum	P ($\mu\text{mol/l}$)	P (mg/l)	Sezonske vrednosti P (mg/l)	Sezona
00RI	1.3.2001	0,78	0,024	0,018	Zima
00RI	5.3.2002	0,96	0,030		
00RI	19.2.2004	0,02	0,001		
00RI	22.5.2001	3,46	0,107	0,040	Pomlad
00RI	21.5.2002	0,39	0,012		
00RI	10.5.2004	0,02	0,001		
00RI	21.8.2001	25,52	0,791	0,515	Poletje
00RI	27.8.2002	2,56	0,079		
00RI	21.8.2003	38,29	1,187		
00RI	11.8.2004	0,07	0,002		
00RI	22.11.2001	1,47	0,046	0,037	Jesen
00RI	26.11.2002	0,9	0,028		

4.4.2.4 Število fekalnih koliformnih bakterij v Rižani

V obdobju od leta 2001 pa do 2004 je bilo na merilnem mestu 00RI le 12-krat izmerjeno število fekalnih koliformnih bakterij, kar za izvednotenje ustreznih vhodnih podatkov za model nikakor ne zadošča. Zaradi sezonsko spremenljivih razmer smo izmed vseh meritev lahko izbrali le meritve, ki so bile izmerjene v poletnih mesecih (preglednica 19).

Preglednica 19: Prikaz meritev v poletnih mesecih, ki prikazujejo število fekalnih koliformnih bakterij na merilnem mestu 00RI in njihovo skupno povprečje

Datum	Merilno mesto	FC (št./100ml)
21.8.2001	00RI	476000
27.8.2002	00RI	4500
21.8.2003	00RI	2800
11.8.2004	00RI	40900
Povprečje	00RI	131050
Standardna deviacija	00RI	230637

Zaradi velikih razlik v številu koliformnih bakterij pri posameznih meritvah, s tem pa tudi visoke standardne deviacije, so takšni podatki komaj reprezentativni za modeliranje. Da so takšne razlike v meritvah normalne oz. možne, smo se prepričali v poročilu za reko Badaševico (Kompore, 2007). Da bi se prepričali ali take razlike v meritvah močno vplivajo na končni rezultat, smo rezultate modeliranja interpretirali na dva načina. V prvem primeru smo obdržali vse štiri vrednosti, v drugem pa smo pri računu povprečne vrednosti in standardne deviacije obdržali samo srednji dve vrednosti (preglednica 20).

Preglednica 20: Povprečno število fekalnih koliformnih bakterij v poletnih mesecih na merilnem mestu 00RI izračunano brez upoštevanja maksimalne in minimalne vrednosti

Datum	Merilno mesto	FC (št./100ml)
27.8.2002	00RI	4500
11.8.2004	00RI	40900
Povprečje	00RI	22700
Standardna deviacija	00RI	25739

Obe povprečji smo upoštevali pri interpretaciji rezultatov modeliranja fekalnih koliformnih bakterij.

Za bolj točno poznavanje dogajanja bi bilo potrebno izvajati meritve pogosteje, npr. vsak teden ali celo vsak dan v poletni sezoni, česar pa od institucij, zadolženih za zbiranje podatkov o kvaliteti voda ne moremo pričakovati.

5 SIMULACIJE

S podatki opisanimi v prejšnjem poglavju smo izvedli simulaciji transporta celokupnega fosforja in transporta fekalnih koliformnih bakterij z upoštevanjem njihove umrljivosti. Simulacija transporta celokupnega fosforja je potekala preko celega leta, ki smo ga razdelili na 4 sezone oz. letne čase. Pri vsaki sezonski simulaciji transporta celokupnega fosforja smo upoštevali podatke za posamezno sezono. Simulacija transporta fekalnih koliformnih bakterij je potekala samo v poletni sezoni, 15 dni z upoštevanjem tipičnih podatkov za poletje (plimovanja, dnevnega in nočnega vetra), kar zagotavlja kvazi – stacionarne razmere, ki se ponovijo vsakih 24 ur, ko se ponovi slika plimovanja in vetra, nato pa smo dodali še vložek tramontane. Upoštevali smo tudi umrljivost fekalnih koliformnih bakterij zaradi vpliva svetlobe, slanosti, temperature in pH.

Način modeliranja transporta, ki je opisan v nadaljevanju naloge, je bil uporabljen že pri računu transporta živega srebra v Tržaškem zalivu (Žagar, 1999; Rajar in sod., 2000) in pri modeliranju izmenjave živega srebra med vodo in zrakom (Ramšak, 2006).

5.1 Modeliranje celokupnega fosforja

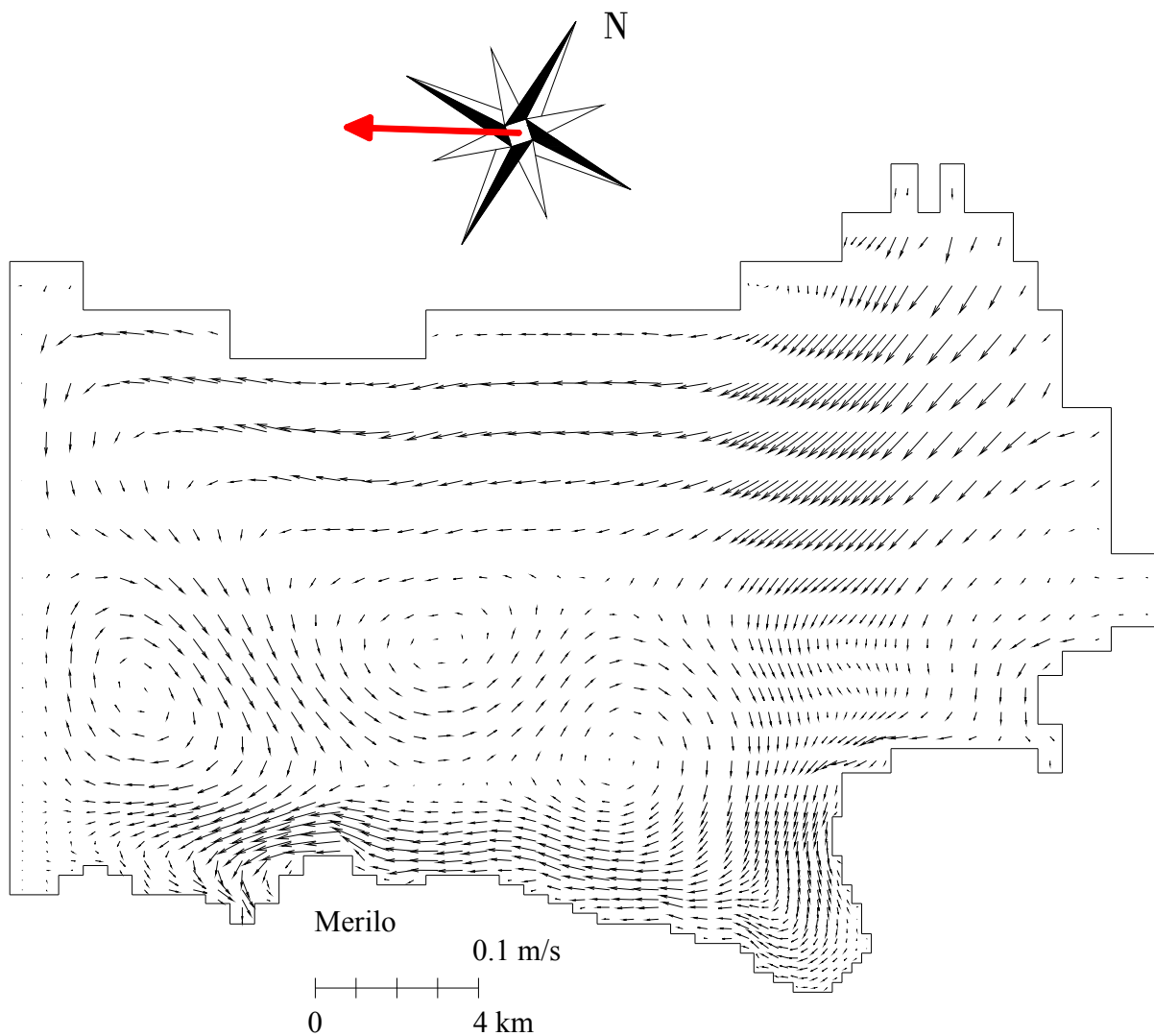
Z zbranimi podatki, ki smo jih predstavili v poglavju 4, smo izdelali scenarij za simulacije. Tipično leto smo razdelili na 4 sekvence oz. sezone, ki bolj ali manj sovpadajo s koledarskimi letnimi časi. Zima zajema januar, februar, marec; pomlad zajema april, maj in junij; poletje vključuje julij, avgust, september; jesen vključuje oktober, november in december. Na začetku posameznih daljših sekvenc smo vse parametre obravnavali kot nestacionarne, torej so se v tem začetnem obdobju spreminjale hitrosti, potek gladine, porazdelitev gostote, temperature in slanosti. V ta namen smo za posamezne sezone računali 4 – dnevno nestacionarno simulacijo, le za zimo je bila simulacija daljša, 8 dnevna. Po tem času, ki je v posameznih sekvencah različen zaradi pretokov Soče in Rižane, hitrosti vetra in začetnih temperaturnih ter slanostnih pogojev v zalivu, se je v modelu vzpostavilo kvazi – stacionarno stanje. Ko so se porazdelitev temperatur in slanosti ter hitrostno polje in potek gladine ustalili, smo vse našteje

parametre fiksirali in jih v nadaljnjem računu upoštevali kot nespremenljive. Začetek nove sekvence (sezone) je pomenil spremembo vetra, obeh dotokov in pri različnih letnih časih tudi temperaturnih in slanostnih razmer v zalivu, zato smo zopet nekaj časa računali vse parametre kot nestacionarne. Postopek je bil že izveden (Žagar, 1999; Ramšak, 2006), le da smo za simulacije poleg že omenjenih parametrov upoštevali še temperaturo in pretok Rižane.

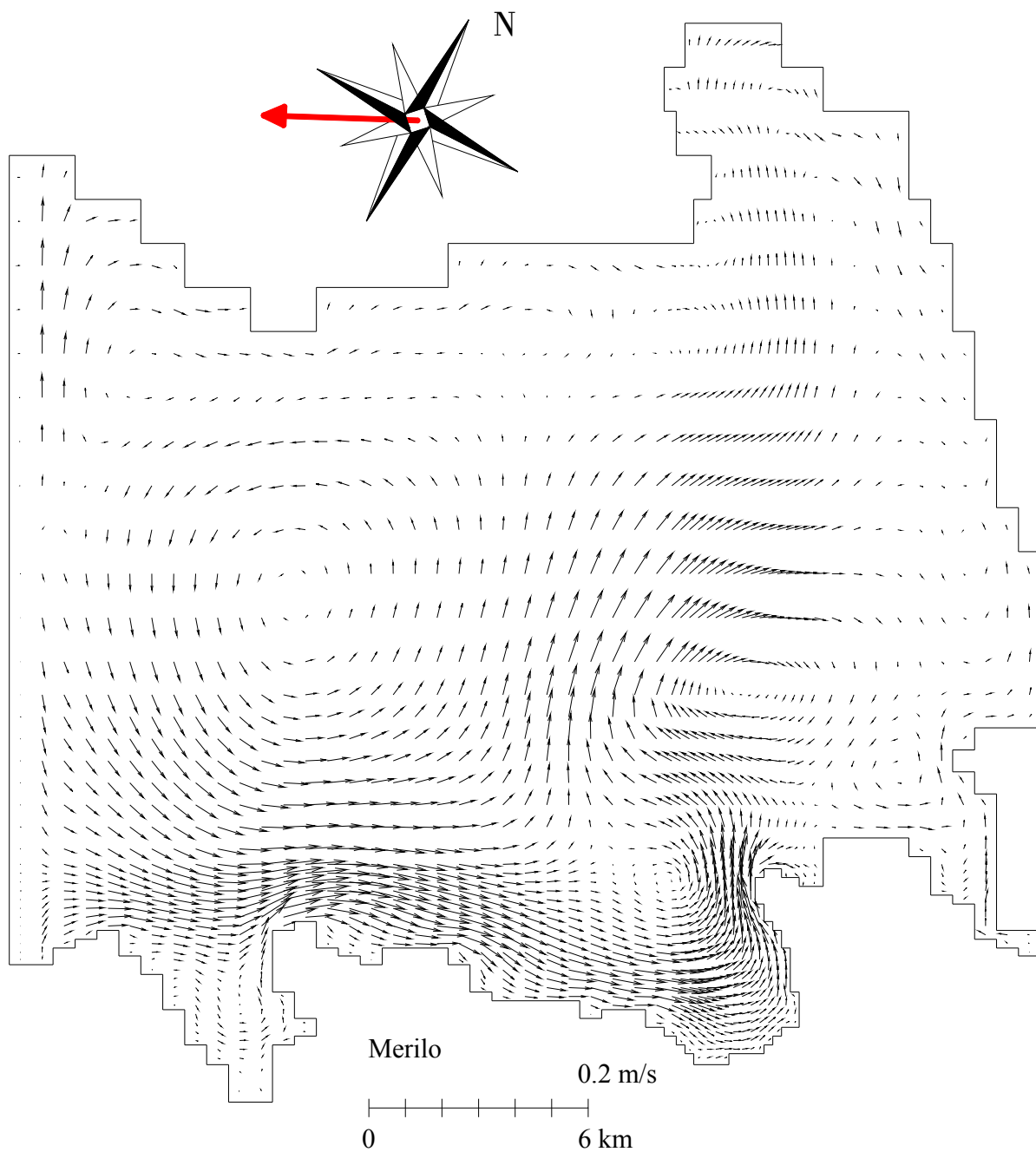
Najprej smo za posamezne sezone izvedli simulacije hidrodinamike (4 in 8 dni, brez računa transporta celokupnega fosforja). Nato smo s temi fiksiranimi hidrodinamičnimi količinami za posamezno sezono izvedli še simulacije transporta celokupnega fosforja, z upoštevanjem začetne koncentracije v Tržaškem zalivu ter koncentraciji celokupnega fosforja, ki pritekajo v zaliv s Sočo in Rižano.

Iz slik od 14 do 21, ki prikazujejo hidrodinamiko, je razvidna cirkulacija v Tržaškem zalivu, hitrosti so ponazorjene s puščicami. Velikost puščice nam kaže velikost vektorja hitrosti, pri čemer je potrebno upoštevati tudi merilo, prikazano pod sliko, s pomočjo katerega lahko odčitamo dejanske velikosti hitrosti in tudi dejanske razdalje. Na slikah je prikazana tudi roža vetrov. Izbrani koordinatni sistem je protiurno zarotiran za 27° glede na smeri neba, rdeča puščica pa prikazuje smer vetra, ki smo ga upoštevali pri izračunu. Na slikah površinskega sloja sta prikazana tudi vtoka Soče in Rižane v morje. Slike od 14 do 21 prikazujejo hitrostna polja v posameznih sezonah in na različnih globinah. Na vseh slikah so prikazane dosežene stacionarne hitrosti ob koncu nestacionarnih simulacij, torej sezonske vrednosti, s katerimi smo v nadaljevanju računali transport.

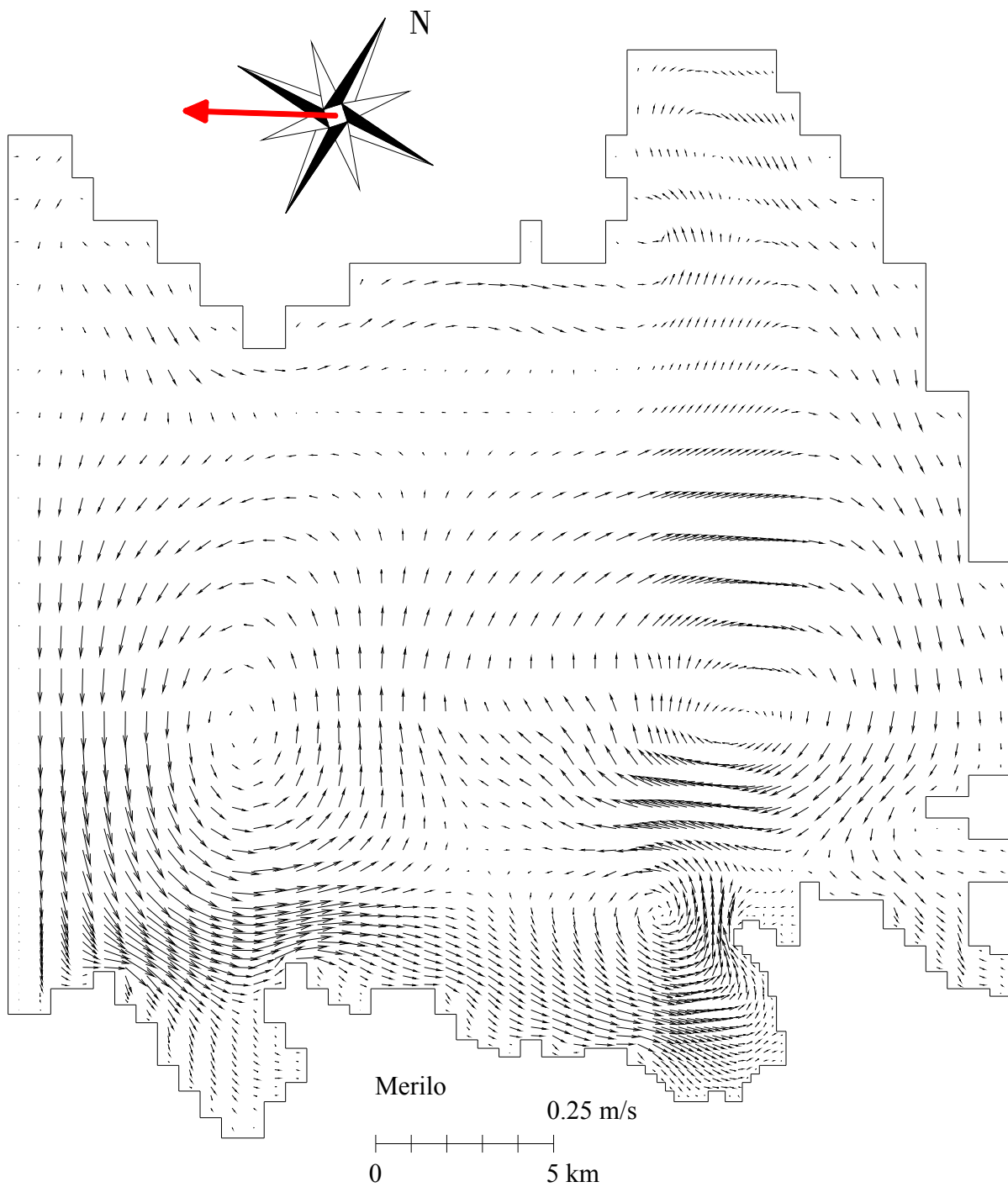
Za boljše ponazoritev delovanja 3D modela smo na primeru poletja prikazali hitrostna polja na različnih globinah oz. v različnih slojih. Na sliki 17, ki prikazuje hitrosti v površinskem sloju, in na slikah od 18 do 21, ki prikazujejo povprečne hitrosti po globini, sta vidna vtoka Soče (vektor hitrosti v celici vtoka je bistveno večji od hitrosti v isti celici v globljih slojih) in Rižane (manjši pretok, vektor hitrosti je komaj opazen). Na površinskem sloju (slika 17) je lepo viden tudi vpliv vetra, saj so vektorji obrnjeni večinoma v smeri vetra, ki je tipičen za poletje.



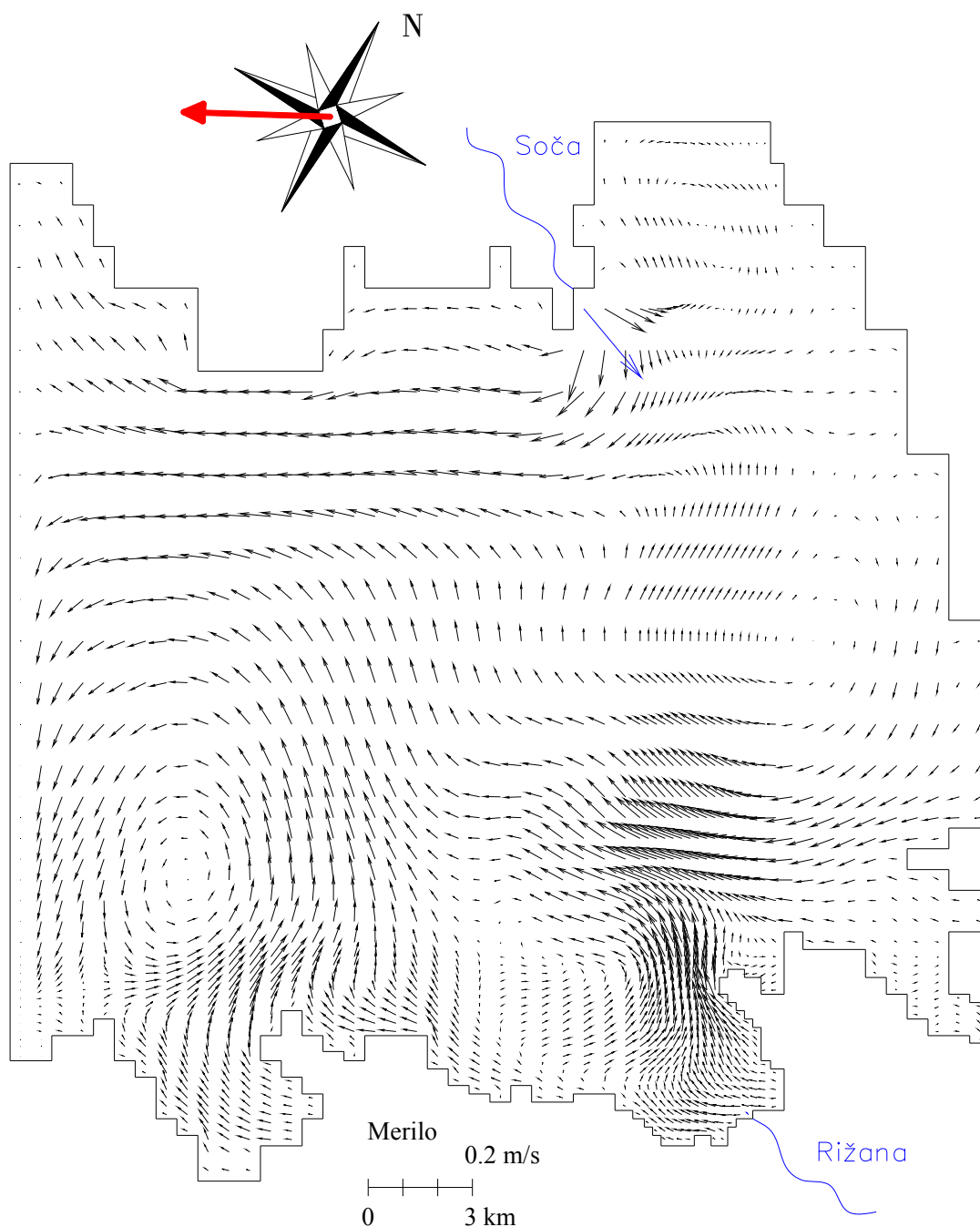
Slika 14: Hitrostno polje na globini 16 m (sloj 10) – Poletje



Slika 15: Hitrostno polje na globini 6 m (sloj 20) – Poletje

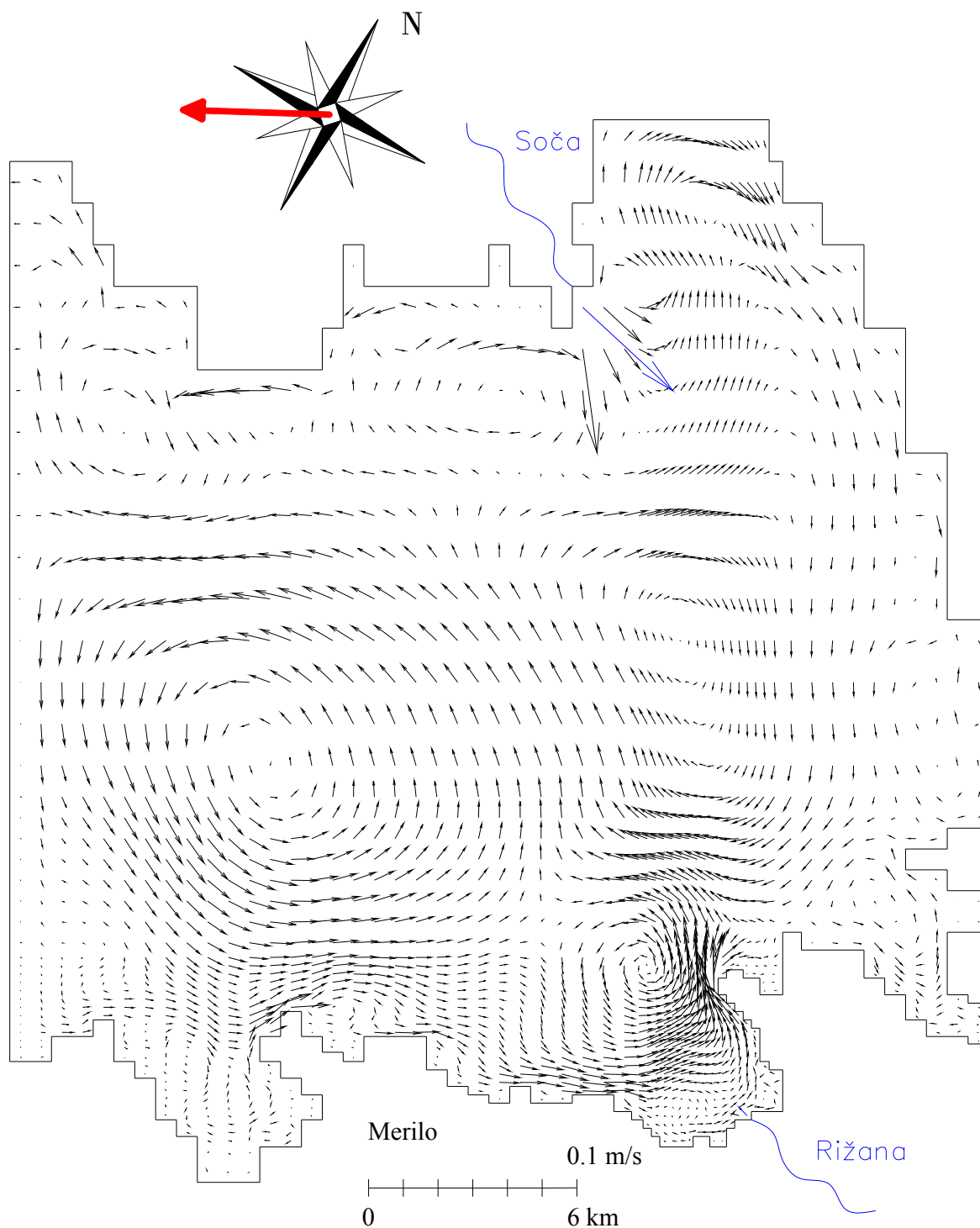


Slika 16: Hitrostno polje na globini 2 m (sloj 24) – Poletje

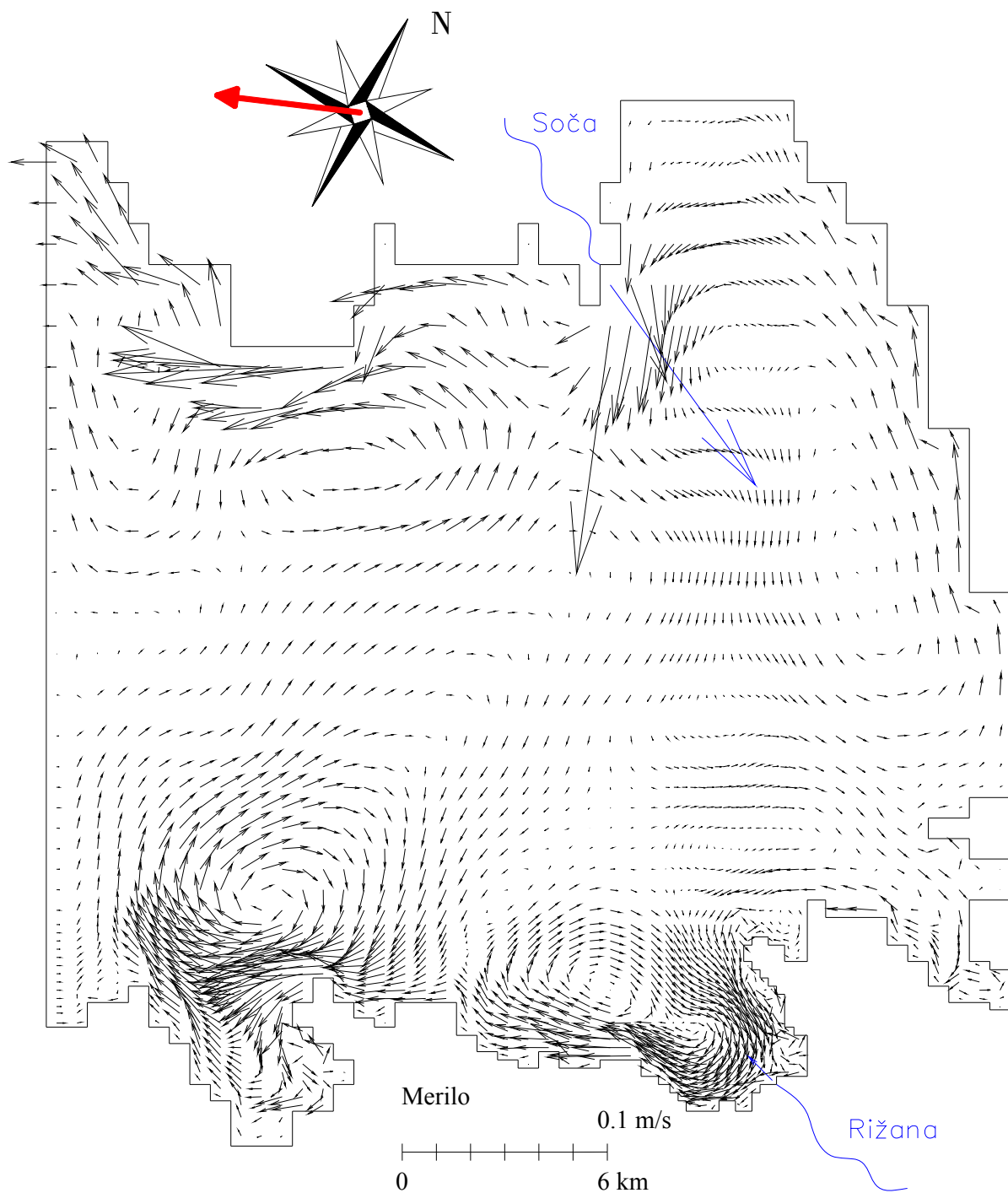


Slika 17: Hitrostno polje na gladini – površinski sloj (sloj 27) – Poletje

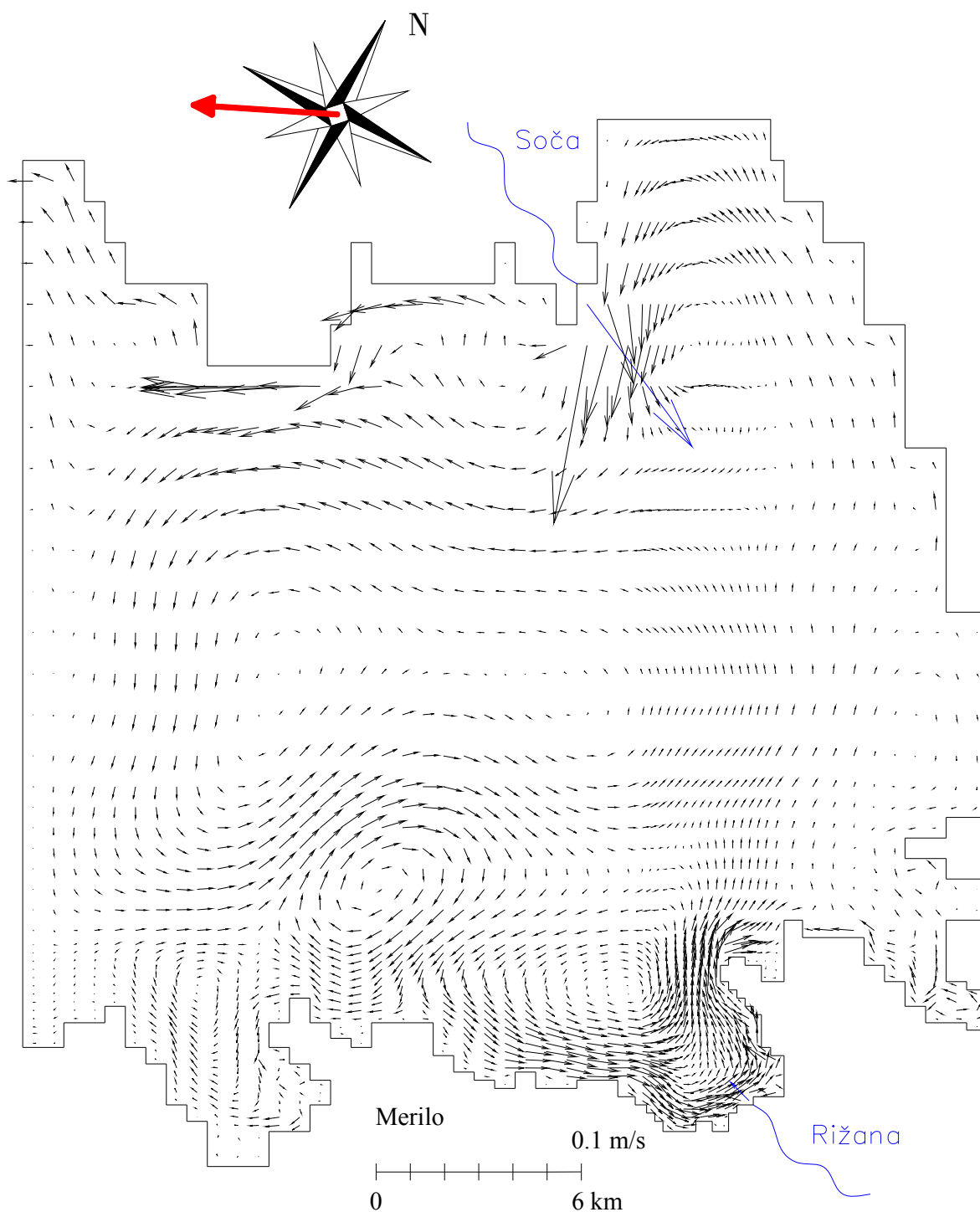
Za boljši prikaz značilnega hitrostnega polja v Tržaškem zalivu so na slikah od 18 do 21 prikazane tudi povprečne hitrosti po globini za posamezne sezone, iz katerih je vidno značilno sezonsko gibanje vode, povprečeno po globini. Spomladi so hitrosti nekoliko višje kot v ostalih sezonah, kar je mogoče pripisati močnejšemu vplivu gostotnih gibanj ob vzpostavljanju poletnih stratificiranih razmer.



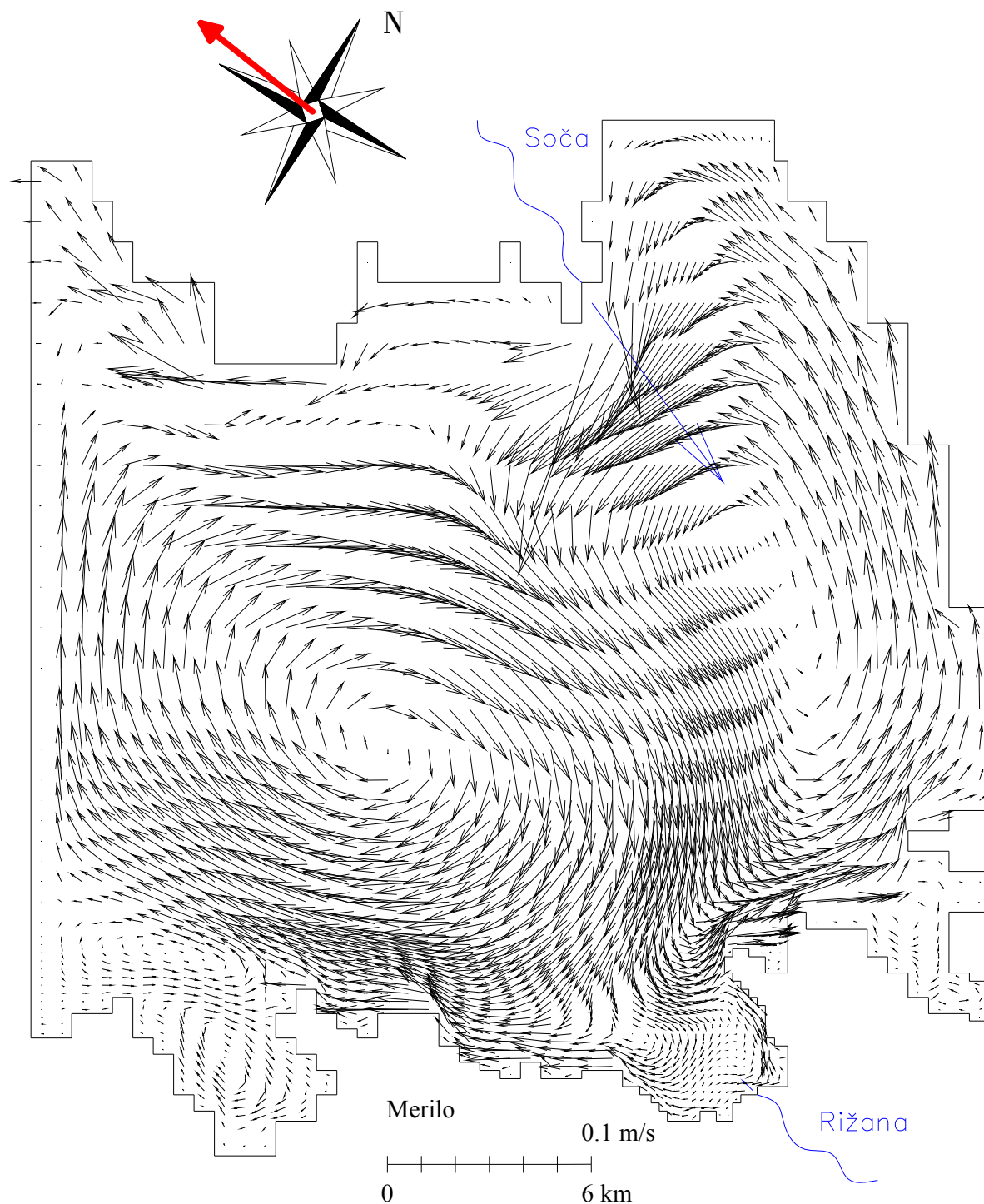
Slika 18: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje



Slika 19: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Jesen

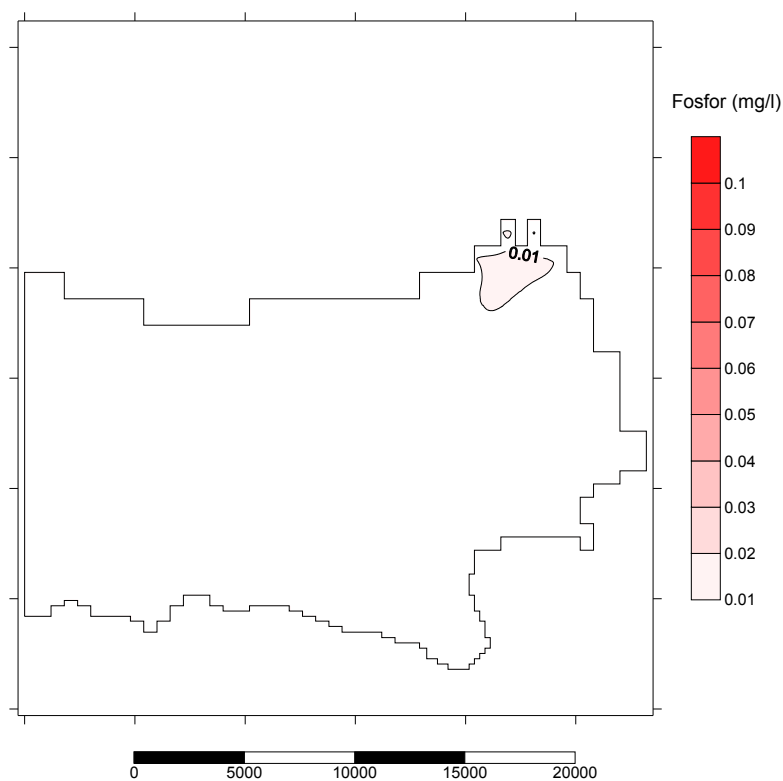


Slika 20: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Zima

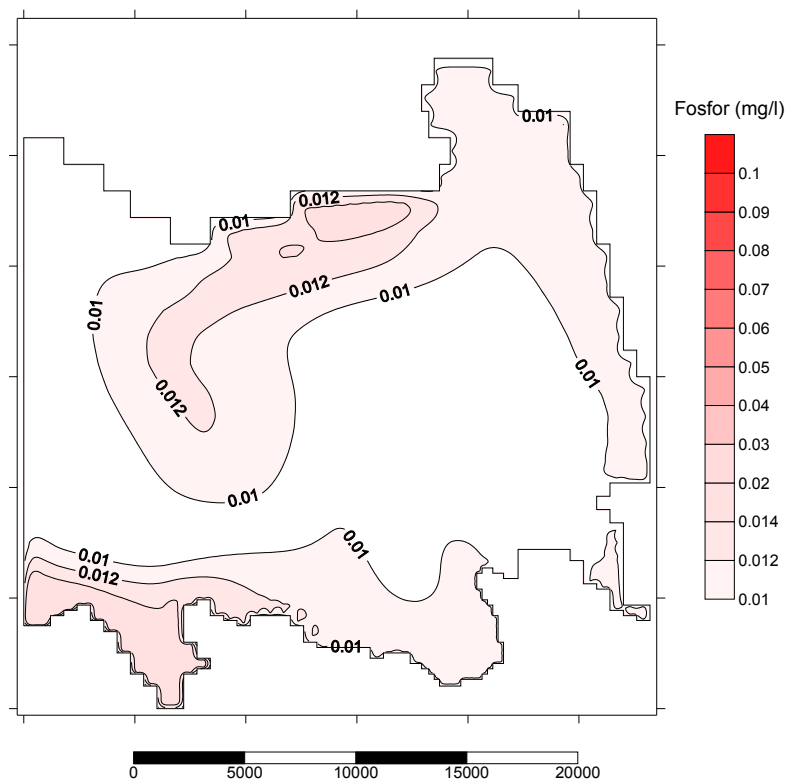


Slika 21: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Pomlad

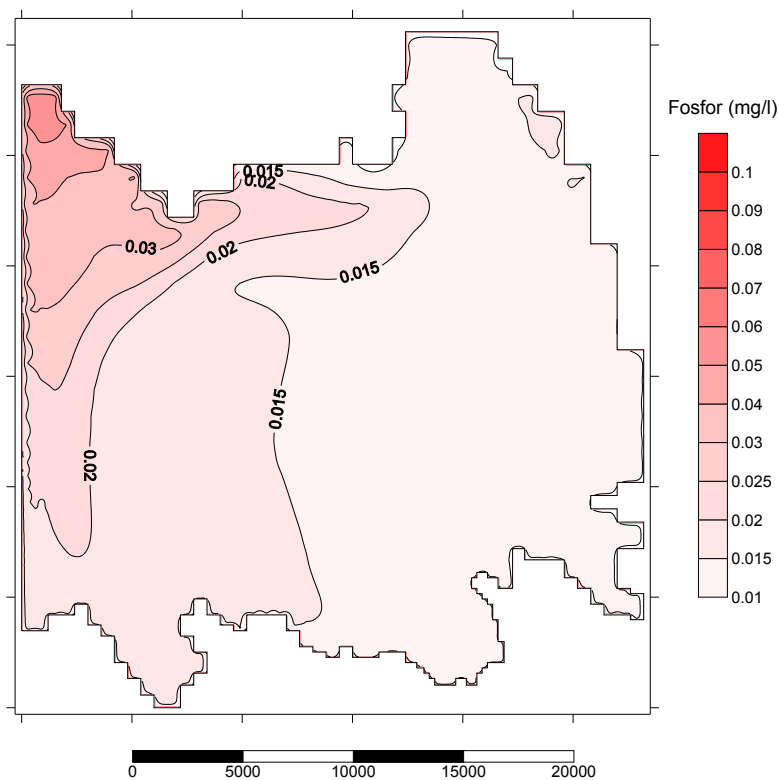
Kot rezultat simulacij transporta z modelom PCFLOW3D smo dobili porazdelitev koncentracij celokupnega fosforja v vsaki sezoni po posameznih slojih. Podrobnejši prikaz porazdelitve koncentracij celokupnega fosforja po slojih za poletje (slike od 22 do 25) je podan za iste sloje, za katere so prikazana tudi hitrostna polja. V ostalih sezonah je prikazan samo površinski sloj, na katerem so razvidne visoke koncentracije celokupnega fosforja na območju, kamor seže vpliv vtoka Soče. Tam so koncentracije celokupnega fosforja v celotnem zalivu najvišje. Ker je pretok Rižane v primerjavi s Sočo več kot 20-krat manjši, je zato tudi količina celokupnega fosforja, ki jo Rižana prinese v zaliv, v primerjavi s Sočo manjša, kar je vidno na slikah koncentracij v površinskem sloju po sezonah (slika od 25 do 28).



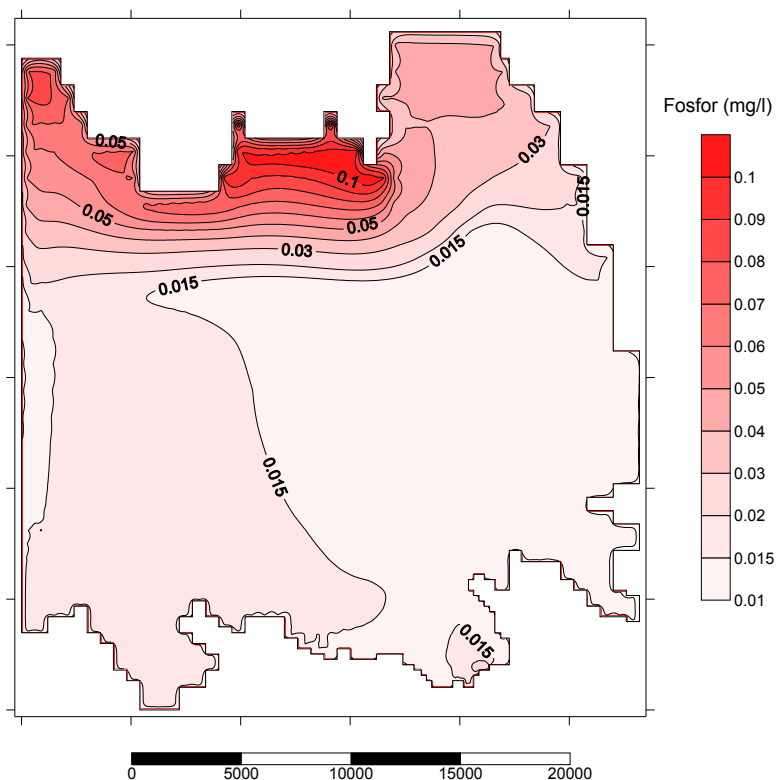
Slika 22: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na globini 16 m (sloj 10) – Poletje



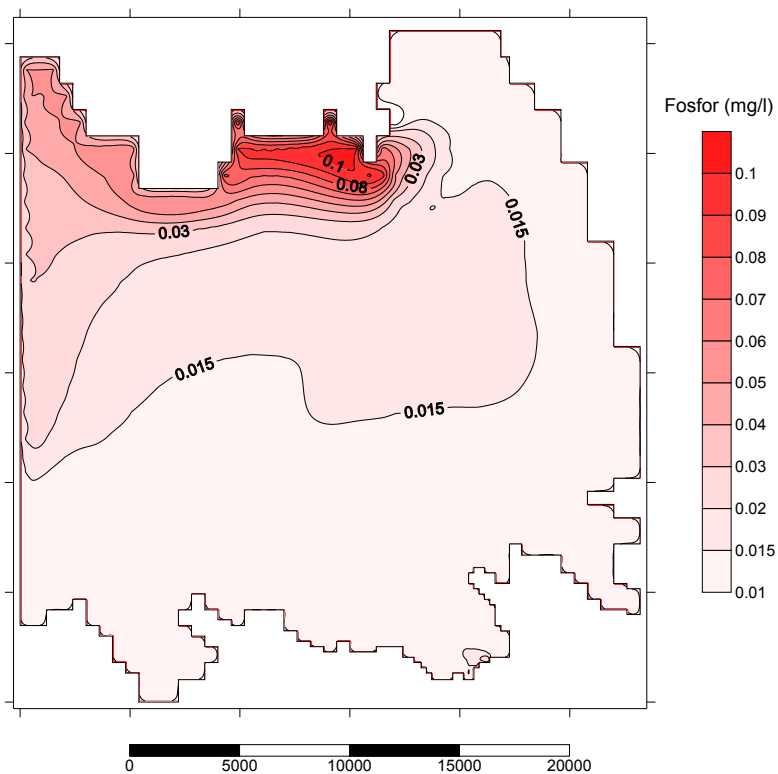
Slika 23: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na globini 6 m (sloj 20) – Poletje



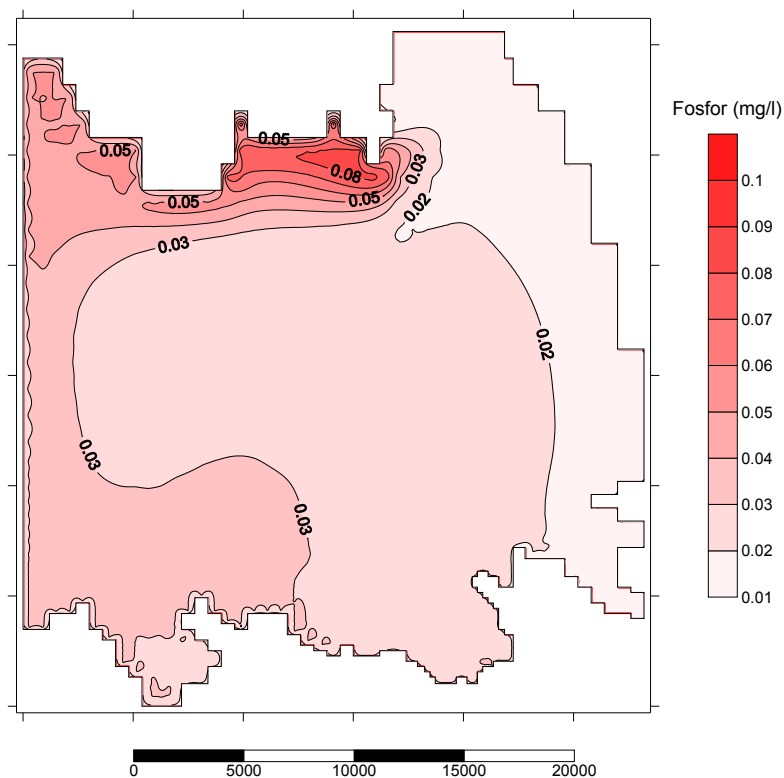
Slika 24: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na globini 2 m (sloj 24) – Poletje



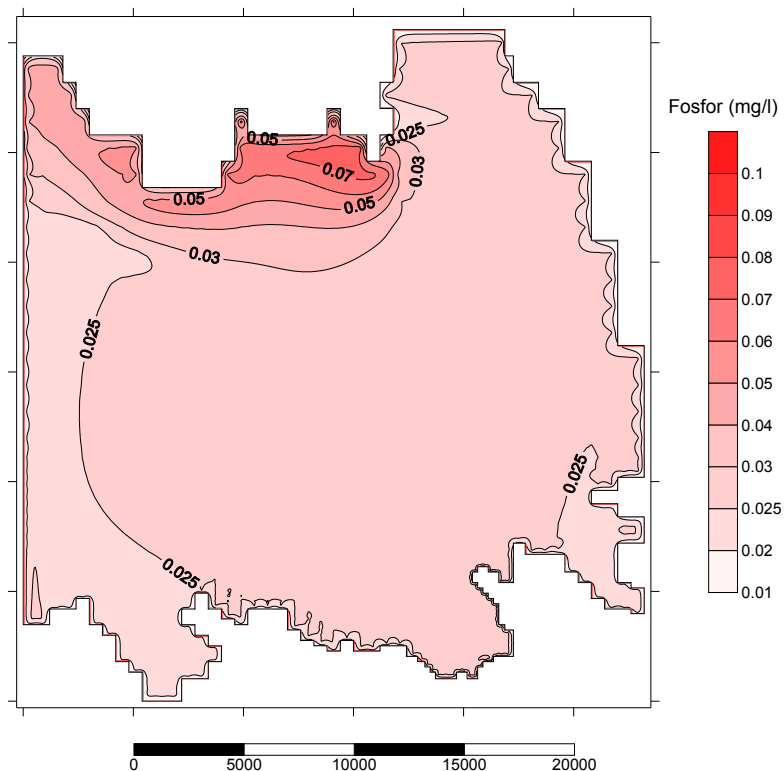
Slika 25: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na globini 0 m – površinski sloj (sloj 27) – Poletje



Slika 26: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na gladini – površinski sloj (sloj 27) – Jesen



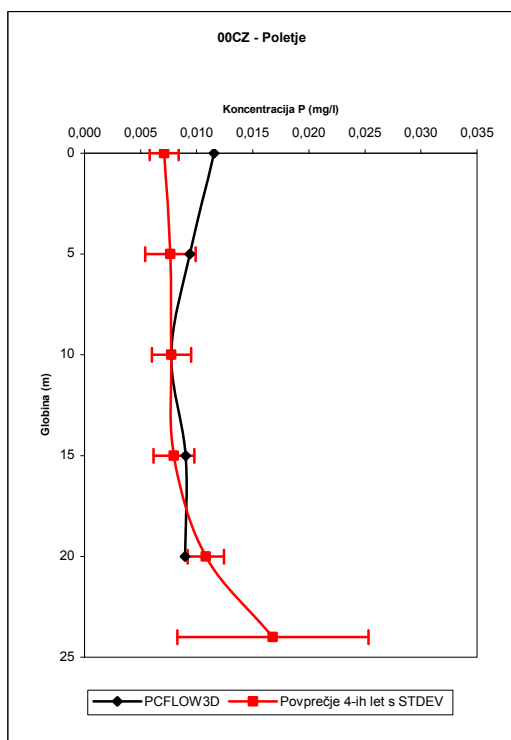
Slika 27: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na gladini – površinski sloj (sloj 27) – Zima



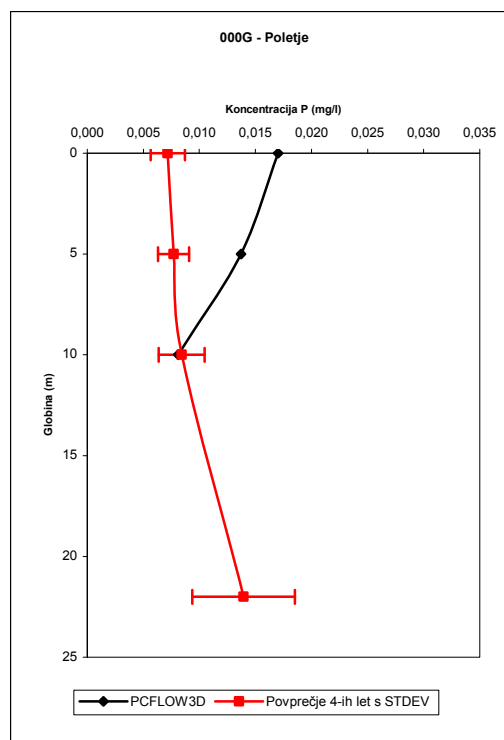
Slika 28: Izračunane koncentracije celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D na gladini – površinski sloj (sloj 27) – Pomlad

Slike od 22 do 28, ki prikazujejo porazdelitve koncentracij celokupnega fosforja po slojih Tržaškega zaliva, so samo kvalitativnega pomena, kvantitativna primerjava rezultatov modela in meritev po profilih pa je prikazana na slikah od 29 do 53, ki prikazujejo porazdelitve koncentracij celokupnega fosforja po profilih za posamezno sezono na 5-ih merilnih mestih, in sicer 00CZ, 000G, 000F, 000K in 00MA. Poleg že omenjenih štirih sezon (poletje, jesen, zima in pomlad) smo na slikah od 49 do 53 prikazali še porazdelitve celokupnega fosforja za poletje II, da bi videli razliko glede poletja, ki v simulacijah predstavlja začetno sezono.

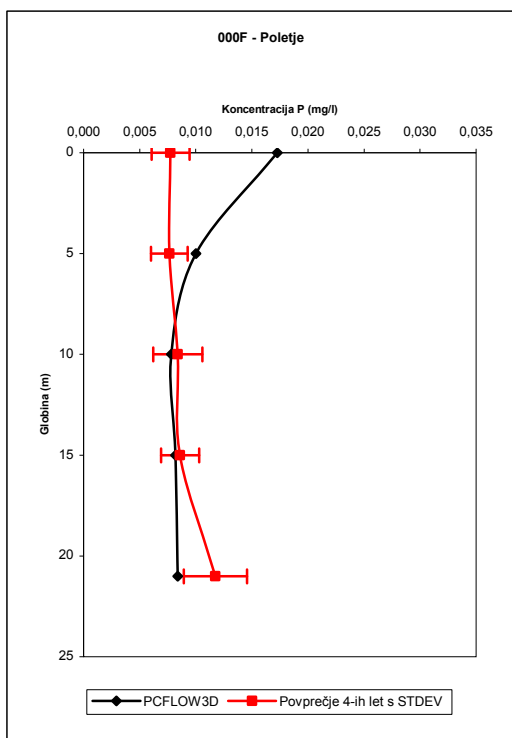
Zaradi razmeroma dobrega ujemanja rezultatov modela PCFLOW3D sta za poletje na slikah od 29 do 33 prikazani samo dve krivulji, in sicer porazdelitev povprečja koncentracij celokupnega fosforja s standardno deviacijo za obdobje od leta 2001 do leta 2004 ter rezultat modela PCFLOW3D. Na slikah od 34 do 53 (jesen, zima, pomlad in poletje II) pa so poleg že omenjenih krivulj prikazane še 4 krivulje korekcije oz. izboljšanje rezultatov modela PCFLOW3D z Imbodenovim modelom. Slike si sledijo po sezonah oz. letnih časih (poletje, jesen, zima, pomlad in poletje II).



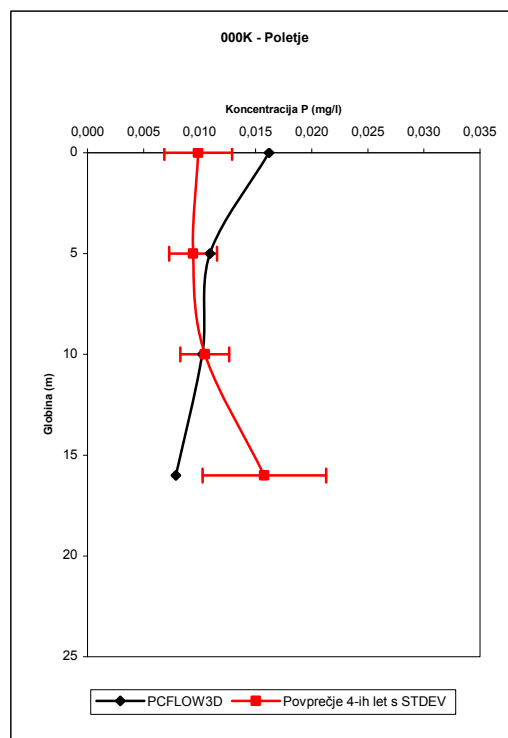
Slika 29: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Poletje



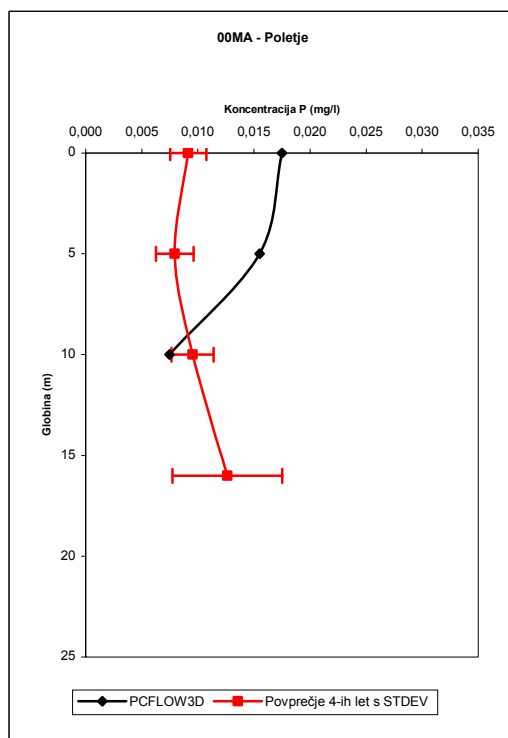
Slika 30: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Poletje



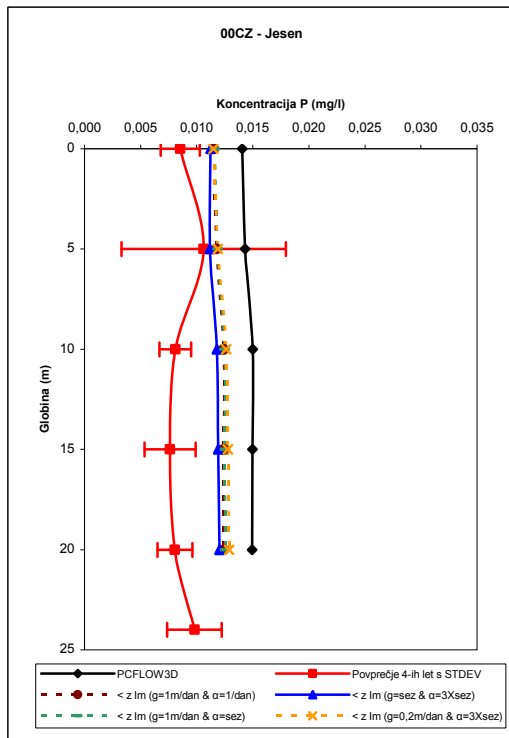
Slika 31: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Poletje



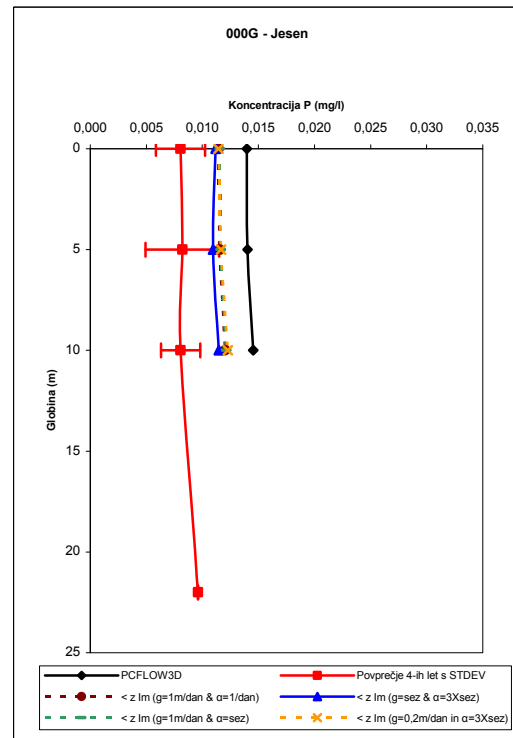
Slika 32: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Poletje



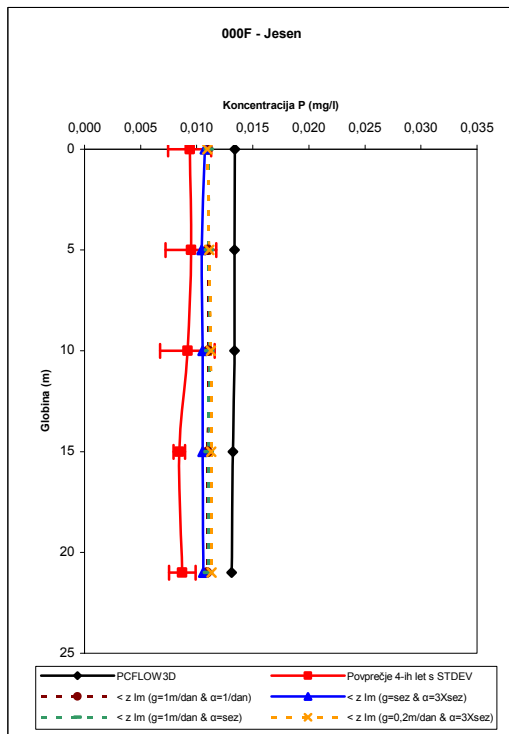
Slika 33: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000MA – Poletje



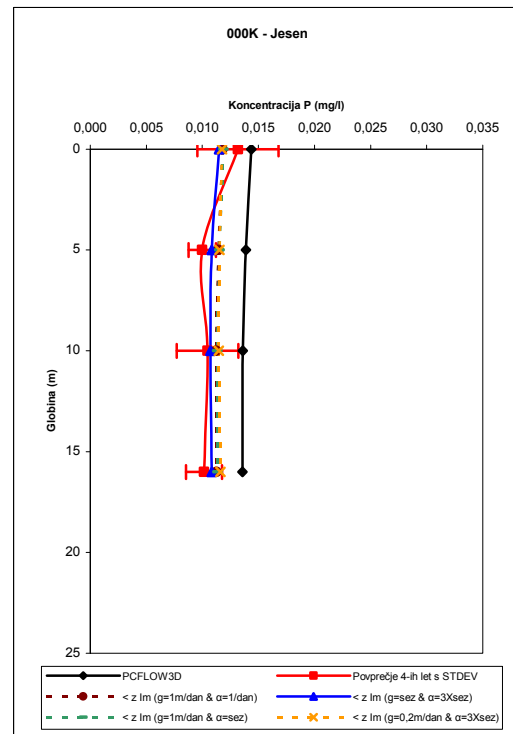
Slika 34: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Jesen



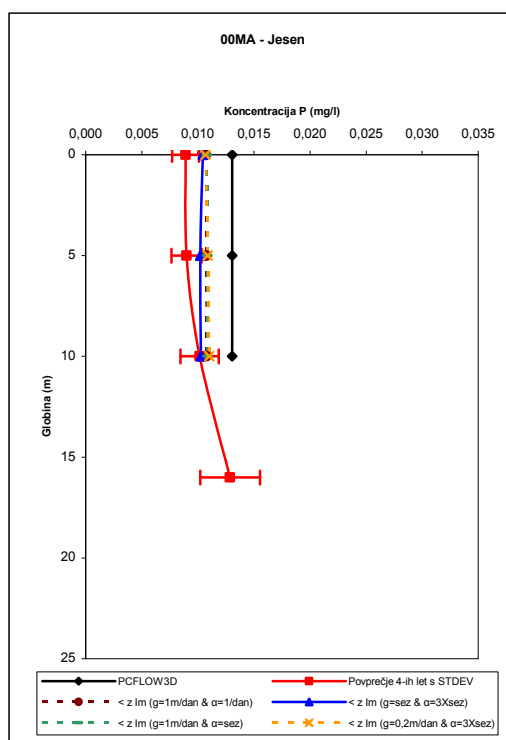
Slika 35: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Jesen



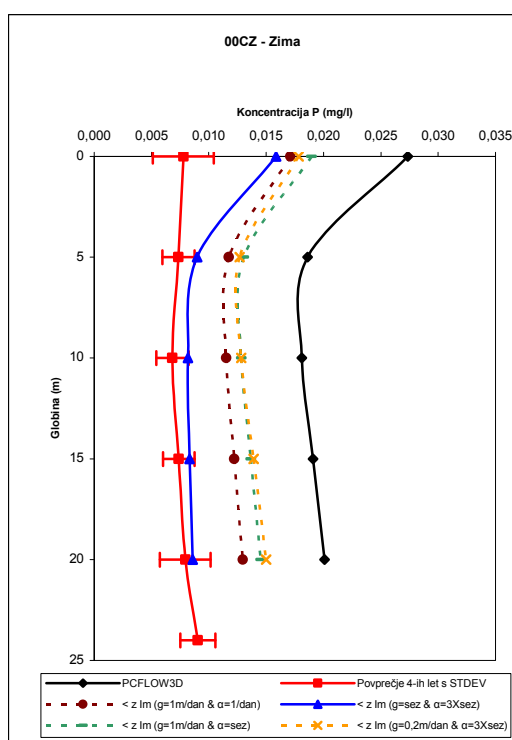
Slika 36: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Jesen



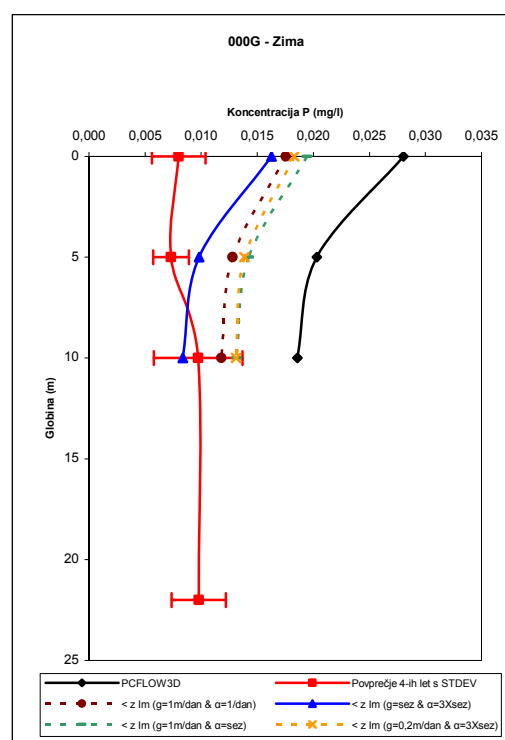
Slika 37: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Jesen



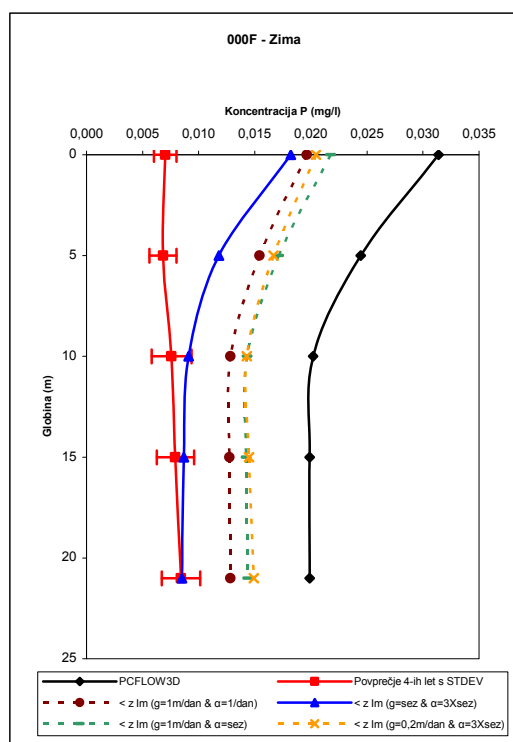
Slika 38: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Jesen



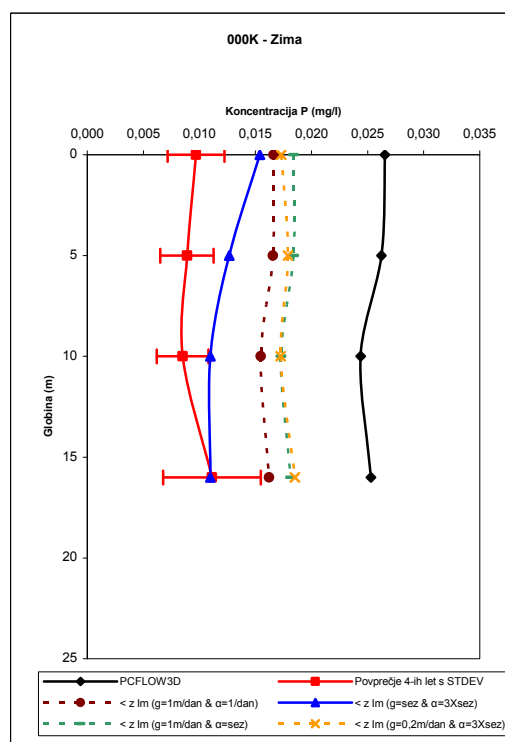
Slika 39: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Zima



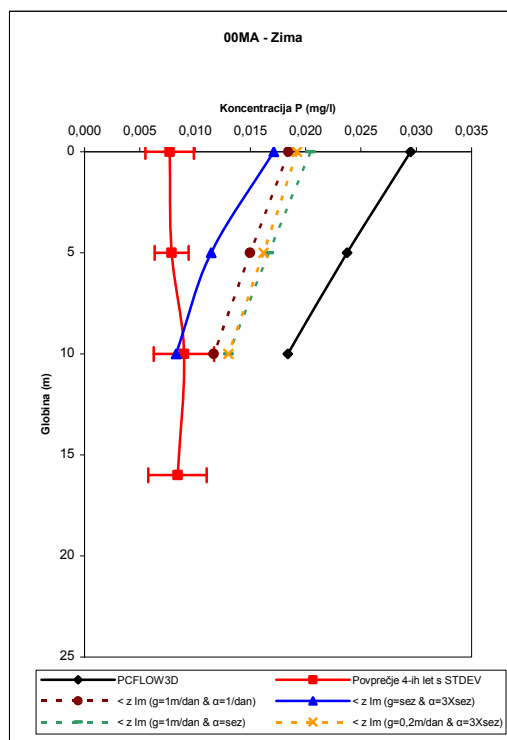
Slika 40: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Zima



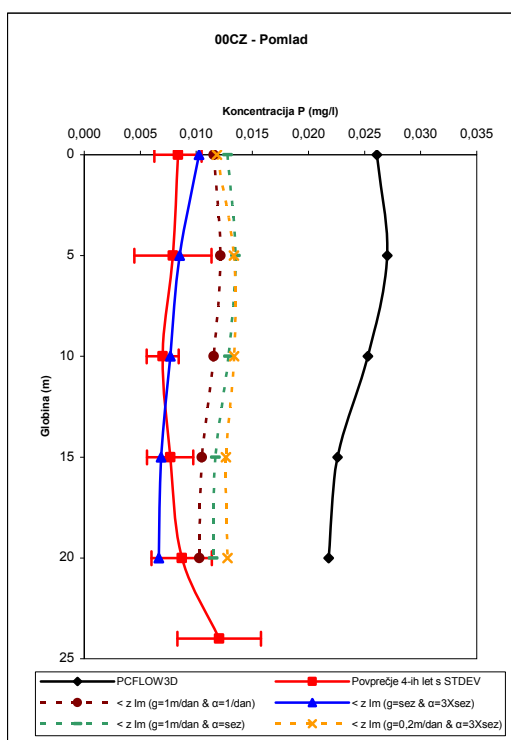
Slika 41: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Zima



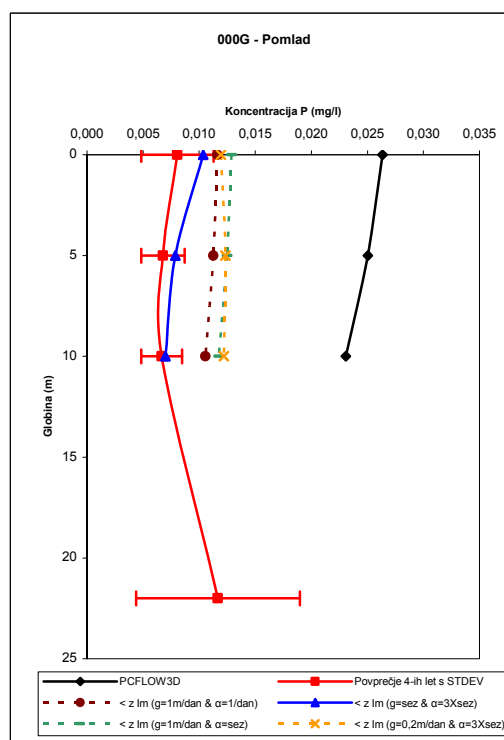
Slika 42: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Zima



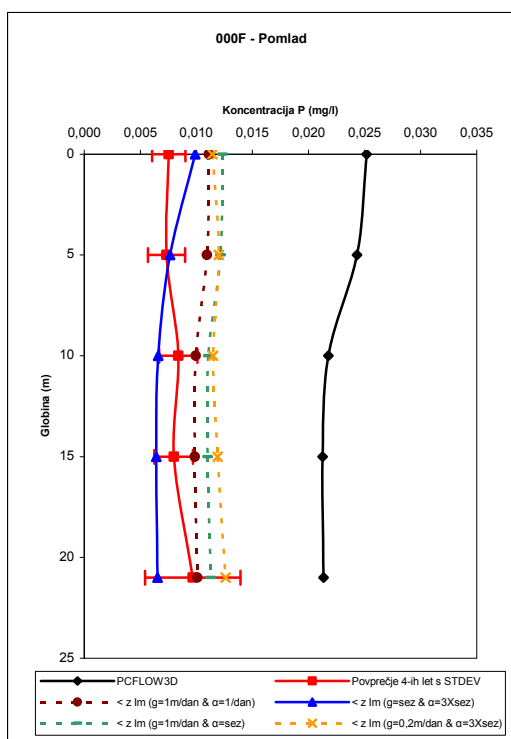
Slika 43: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Zima



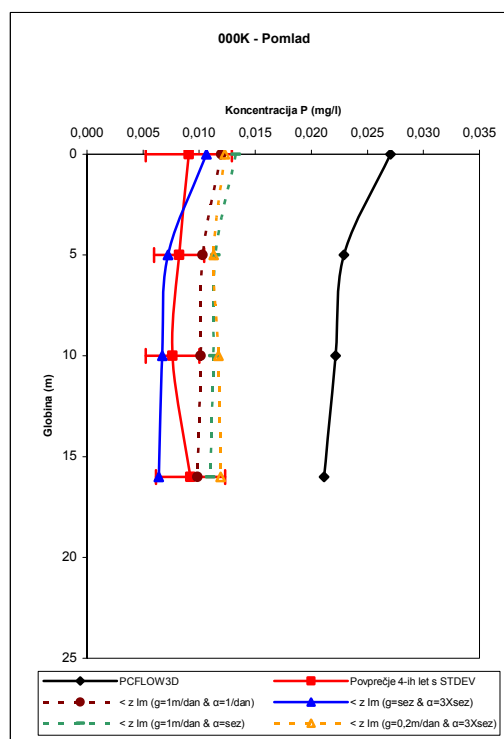
Slika 44: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Pomlad



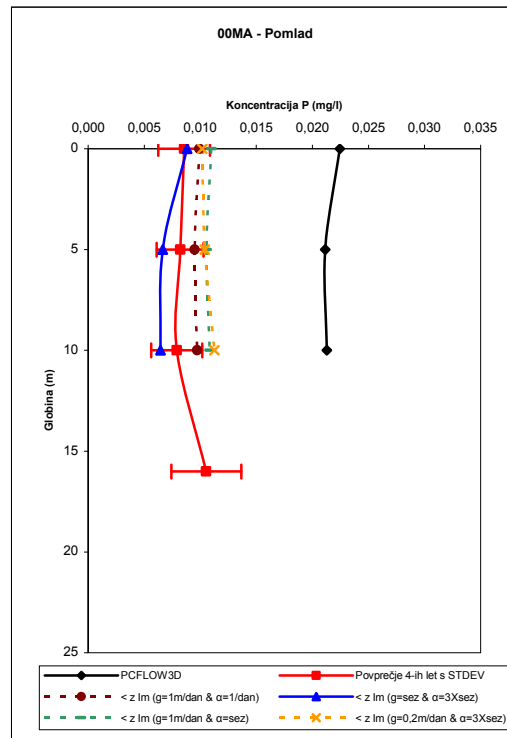
Slika 45: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Pomlad



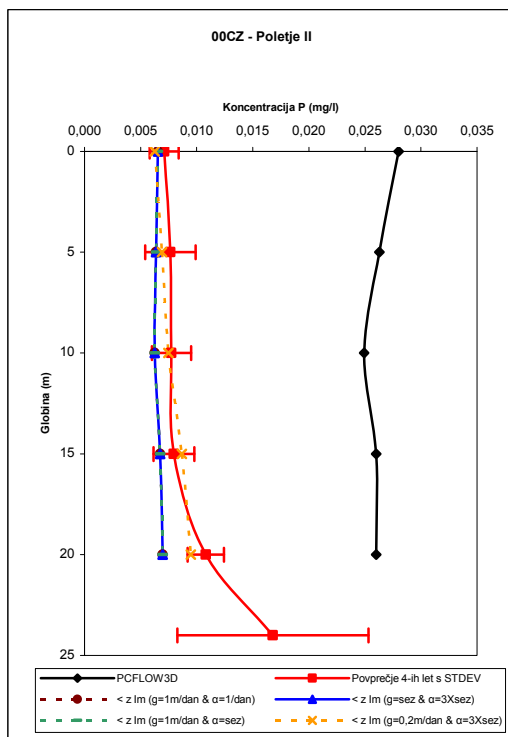
Slika 46: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Pomlad



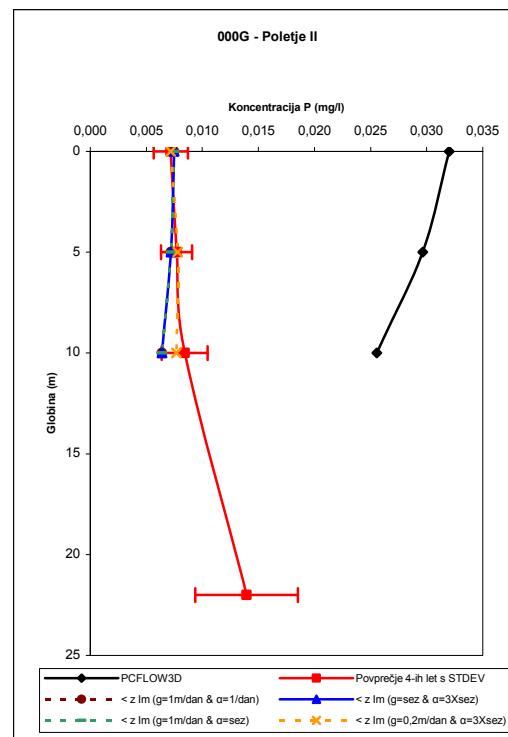
Slika 47: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Pomlad



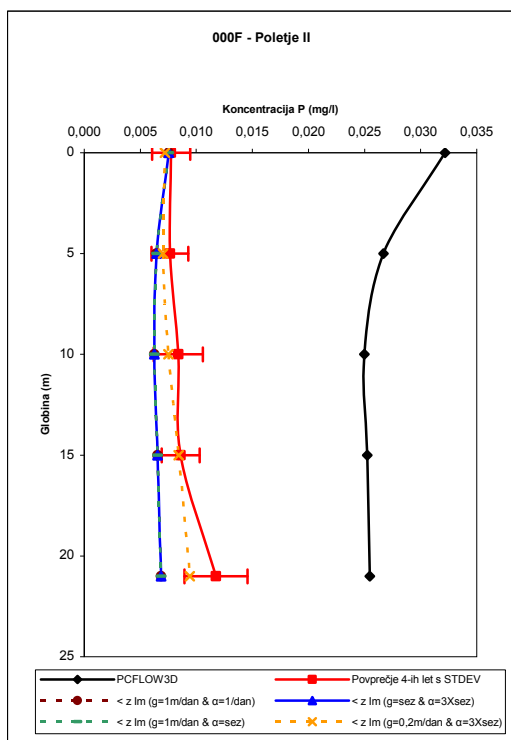
Slika 48: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Pomlad



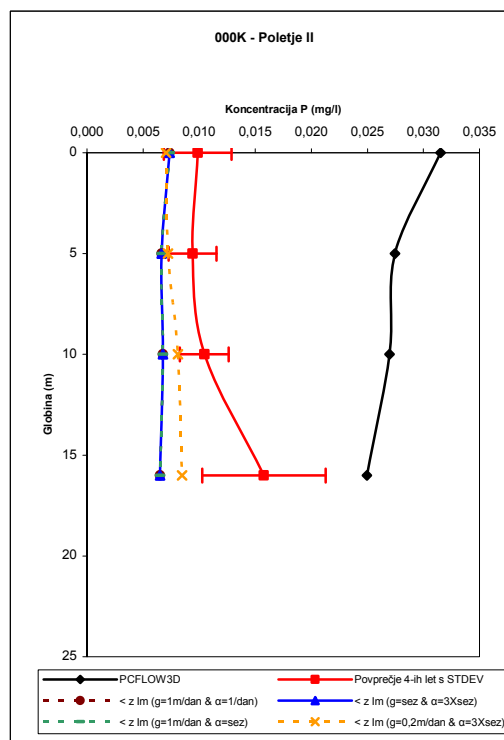
Slika 49: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00CZ – Poletje II



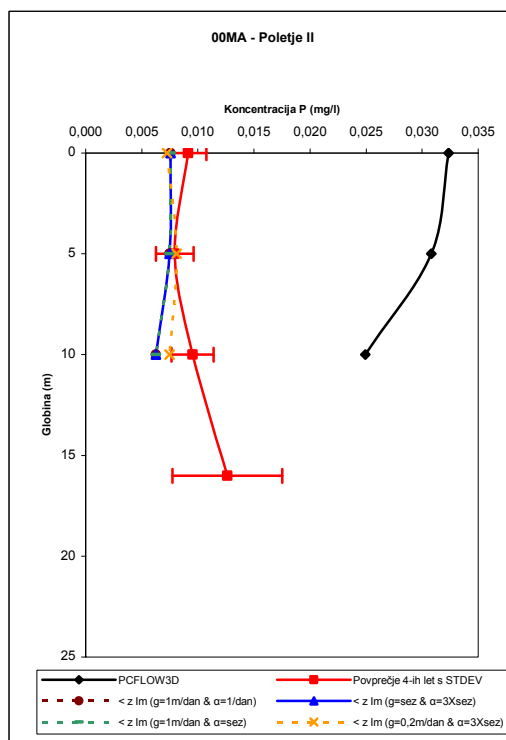
Slika 50: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000G – Poletje II



Slika 51: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000F – Poletje II



Slika 52: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 000K – Poletje II



Slika 53: Koncentracija celokupnega fosforja na merilnem mestu 00MA – Poletje II

Modeliranje transporta celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D smo začeli s poletjem. Rezultati modela se v prvi sezoni (poletje) razmeroma dobro ujemajo s povprečjem meritev (slike 29 do 33), saj v naših simulacijah poletje predstavlja začetno sezono. V naslednjih sezonah (jesen, zima, pomlad in poletje II) pa se ujemanje postopoma slabša, kar je razvidno iz slik od 29 do 53, ki prikazujejo porazdelitve koncentracije celokupnega fosforja, in sicer se rezultati, ki smo jih dobili s pomočjo modela PCFLOW3D po sezonah, vedno bolj razlikujejo od povprečne koncentracije celokupnega fosforja za vsa štiri leta v vseh sezonah na posameznem merilnem mestu. Na vseh slikah je tudi razvidno, da se koncentracija celokupnega fosforja kot rezultat modela PCFLOW3D od površja proti dnu zmanjšuje, kar nakazuje močan vpliv vtoka. Povečanje koncentracije celokupnega fosforja iz sezone v sezono, ki jo kaže model, nakazuje na to, da se celokupni fosfor iz sezone v sezono v zalivu samo kopiči in se istočasno nikamor ne porabi, čeprav vemo, da se v morju odvijajo številni procesi (mineralizacija, odmiranje alg, usedanje, obarjanje itd.).

Zato smo se odločili, da bomo s pomočjo Imbodenovega modela, ki upošteva sedimentacijo, v katero so zajeti tudi ostali procesi, poskušali izboljšati rezultate modela PCFLOW3D in se poskušali približati meritvam.

Imbodenov model enako kot model PCFLOW3D potrebuje za svoje delovanje kar nekaj podatkov in ti so naštetih ter opisani v poglavju 2.2.1. Ker pa je bil model primarno narejen za izračun bilance fosforja v jezerih, mi pa ga uporabljamo za morje, smo morali nekatere parametre oz. vhodne podatke prirediti.

Ker se v Tržaškem zalivu termoklina pojavlja samo poleti, globina termokline pa se v sezoni večkrat spremeni, je pri korekciji rezultatov tudi pri poletnih simulacijah nismo upoštevali. Tako v modelu slojevanja na epilimniji in hipolimniji nismo upoštevali, s pomočjo parametra R_p , ki nam pove % koncentracije fosforja, ki se akumulira v sedimentu, pa smo v celotnem vodnem stolpcu za vsak sloj posebej (slika 8) določili zmanjšanje celokupnega fosforja.

Vhodna parametra hidravlično obremenitev q_s in obremenitev s fosforjem L_t smo izračunali iz podatkov za Sočo in Rižano, saj le ti dve reki v našem primeru predstavljata obremenitev za Tržaški zaliv s celokupnim fosforjem. Dnevno hidravlično obremenitev q_s (preglednica 21) smo izračunali s pomočjo sezonskih pretokov Soče in Rižane (preglednica 13 in 15).

Preglednica 21: Dnevna hidravlična obremenitev q_s po sezonah

qs - hidravlična obremenitev (m/dan)	
Jesen	0,035
Zima	0,025
Pomlad	0,032
Poletje II	0,018
Povprečje za 1 leto	0,027

Prav tako smo za vsako sezono s pomočjo sezonskih pretokov (preglednica 13 in 15) ter sezonskih koncentracij celokupnega fosforja na ustjih Soče in Rižane (preglednica 17 in 18) izračunali dnevno sezonsko obremenitev s celokupnim fosforjem L_t (preglednica 22).

Preglednica 22: Dnevna obremenitev s celokupnim fosforjem L_t po sezonah

Lt - obremenitev s fosforjem (mgP/m²dan)	
Jesen	2,396
Zima	1,470
Pomlad	1,469
Poletje II	1,084
Povprečje za 1 leto	1,605

Hitrost usedanja g in hitrost usedanja α , ki najbolj vplivata na korekcijo, smo določili s poskušanjem, tako da smo dobili najboljše izboljšanje rezultatov. Parametra sta prikazana v preglednici 23 na naslednji strani.

Poleg omenjenih parametrov, ki imata največji vpliv na korekcijo, smo prav tako s poskušanjem poskusili določiti še zadnji vhodni parameter za model in sicer sproščanje fosforja iz sedimenta S in ugotovili, da ima minimalen vpliv na izboljšanje rezultatov. Zaradi zelo majhnega vpliva na izboljšanje rezultatov smo ta parameter zanemarili.

Preglednica 23: Prikaz hitrosti usedanja g in hitrosti fotosinteze α ter pripadajoča krivulja

Krivulja na slikah	Parameter	Vrednosti parametrov po sezonah				
		Jesen	Zima	Pomlad	Poletje II	1 leto
$< z Im (g=1m/dan \ \& \ \alpha=1/dan)$	$g (m/dan)$	1	1	1	1	1
	$\alpha (1/dan)$	1	1	1	1	1
$< z Im (g=1m/dan \ \& \ \alpha=sez)$	$g (m/dan)$	0,5	0,2	0,7	1	1
	$\alpha (1/dan)$	1	1	1	1	1
$< z Im (g=0,2m/dan \ \& \ \alpha=3Xsez)$	$g (m/dan)$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	$\alpha (1/dan)$	1,5	0,6	2,1	3	2,01
$< z Im (g=sez \ \& \ \alpha=3Xsez)$	$g (m/dan)$	0,1	0,3	0,06	0,02	1
	$\alpha (1/dan)$	1,5	0,6	2,1	3	1

Ker se presežek celokupnega fosforja iz sezone v sezono seštevata, smo najprej s povprečnimi letnimi parametri izračunali celoletni (jesen, zima, pomlad in poletje II) % koncentracije celokupnega fosforja R_p , ki se odstrani iz vsakega sloja posebej v vodnem stolpcu. Nato smo celoletni R_p porazdelili po sezonah na osnovi izračunov, ki so bili s sezonskimi vrednostmi izvedeni za posamezno sezono. Tako smo dobili % koncentracije celokupnega fosforja R_p za vsako sezono, ki se odstrani iz vodnega stolpca. Te % smo za vsak sloj za vsako merilno mesto pomnožili z vrednostmi, ki smo jih dobili z modelom PCFLOW3D, in odšteli ter tako dobili nove korigirane oz. izboljšane rezultate modela PCFLOW3D.

Postopek smo ponovili 4 – krat, saj smo do končne krivulje prišli s poskušanjem in poleg že omenjenih sezonskih vhodnih parametrov (q_s in L_i), smo pri vsakem poskusu spreminjali še hitrost usedanja g in hitrost fotosinteze α za vsako sezono posebej. V preglednici 23 so prikazane vrednosti obeh parametrov (g in α), in sicer za vsako sezono ter za celo leto in tudi kateri krivulji pripadajo.

Pri prvem poskusu smo narisali krivuljo $< z Im (g=1m/dan \ \& \ \alpha=1/dan)$, kjer sta hitrosti (g in α) enaki za vse sezone in tudi za celo leto. Pri poletju II se je korigirana krivulja odlično ujemala z meritvami. Ker pri ostalih sezonah ujemanje ni bilo dovolj dobro, smo poskus ponovili in hitrost fotosinteze α spremenili glede na osončenost za posamezno sezono. Vrednosti za g in α za celo leto sta ostali enaki kot pri prvem poskusu. Tako smo dobili krivuljo $< z Im (g=1m/dan \ \& \ \alpha=sez)$, ki je bila le malenkost boljša od prejšnje. Postopek smo ponovili in poleg sezonskih vrednosti α , ki smo jih 3 – krat povečali, smo si izbrali tudi manjšo vrednost parametra g , ki je bila tudi pri tem poskusu enaka za vse sezone. Za celo leto

smo tokrat vrednosti parametrov g in α dobili iz povprečja sezon, saj smo se hoteli prepričati, če sta vrednosti parametra g in α za celo leto dovolj dobri. S tem poskusom smo dobili krivuljo $< z Im (g=0,2m/dan \ \& \ \alpha=3Xsez)$. Po tretjem poskusu smo videli, da se je že koregirana krivulja $< z Im (g=1m/dan \ \& \ \alpha=1/dan)$ (prvi in drugi poskus) pri poletju II dovolj dobro ujemala z meritvami in zato smo pri zadnjem (četrtem) poskusu vrednosti g in α za celo leto pustili kar od prvega in drugega poskusa, kar je vidno tudi v preglednici 23. Ugotovili smo tudi, da ima največji vpliv na % odstranjenega celokupnega fosforja hitrost usedanja g . Zato smo pri zadnjem poskusu poleg hitrosti fotosinteze α tudi hitrosti usedanja g določili sezonske vrednosti, le vrednosti za celo leto sta ostali enaki kot pri prvem in drugem poskusu. Tako smo dobili krivuljo $< z Im (g=sez \ \& \ \alpha=3Xsez)$, ki kaže dokaj dobro ujemanje z meritvami v vseh sezonah na vseh merilnih mestih.

Kot je razvidno iz slik od 34 do 53, smo z Imbodenovim modelom dokaj dobro skorigirali oz. izboljšali rezultate modela PCFLOW3D. Vendar tudi s tem nismo dobili povsem pravih rezultatov, ker model v izračunu ločeno upošteva topni in netopni (partikularni) fosfor, mi pa smo računali samo s celokupnim fosforjem. K nezanesljivosti rezultatov prispevata še hitrost usedanja g in hitrost fotosinteze α , za katera ne moremo podati točnih vrednosti, ker zajemata preveč drugih vplivov (temperatura morja in zraka, osončenost, količina alg v morju, količina celokupnega fosforja itd.) in smo ju zato določili s poskušanjem.

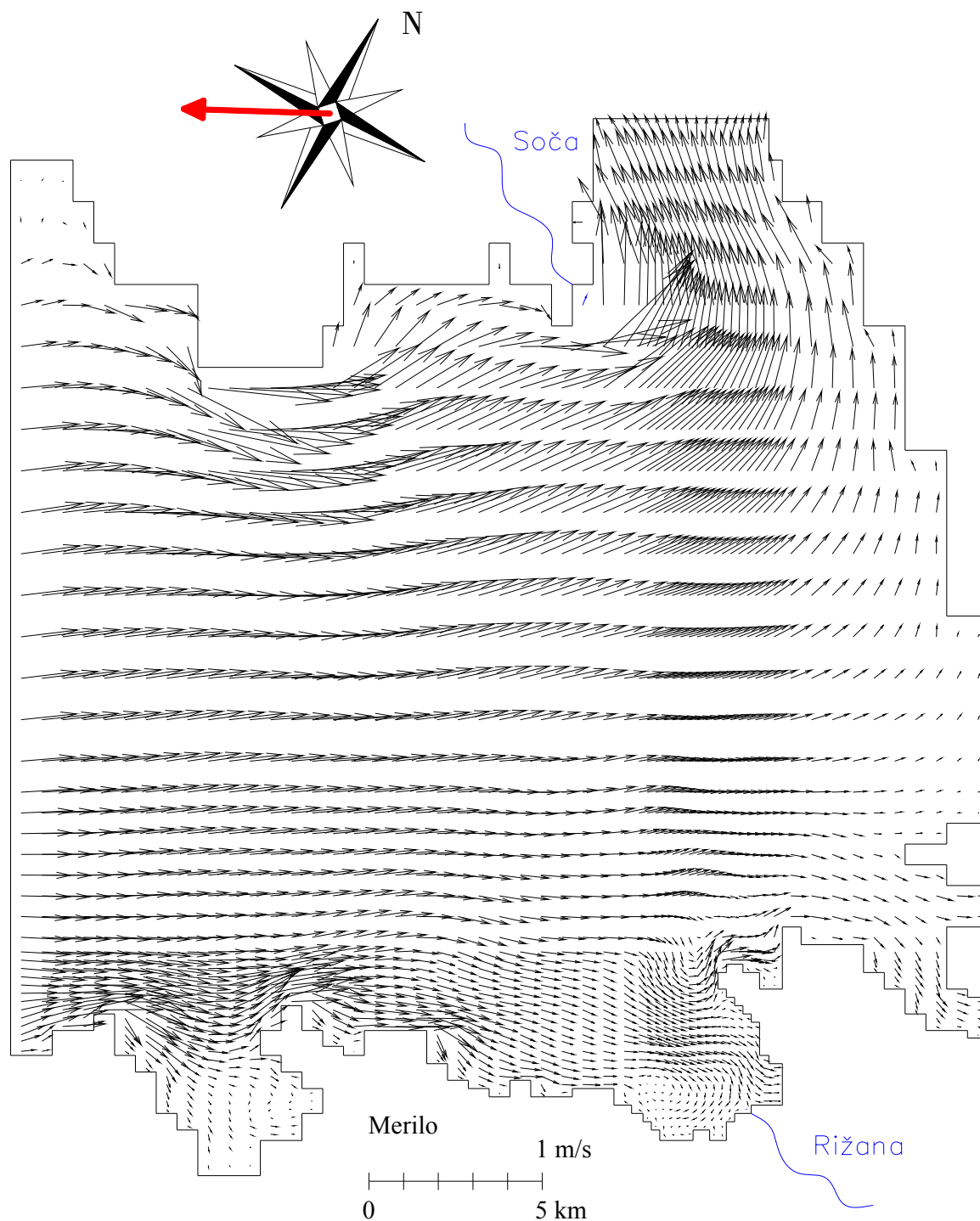
Iz slik od 29 do 53 se torej vidi, da smo z uporabo Imbodenovega modela, ki upošteva sedimentacijo, dokaj dobro izboljšali rezultate modela PCFLOW3D, s katerim smo računali samo transport celokupnega fosforja. S tem smo pokazali, da če bi hoteli samo z modelom PCFLOW3D doseči boljše rezultate, bi bilo potrebno v model vgraditi ustrezni sedimentacijski modul, ki bi upošteval sedimentacijo vsaj na tak način, kot ga upošteva Imbodenov model. Za večjo točnost rezultatov modela PCFLOW3D kot smo jih dobili s korekcijo oz. izboljšanjem z Imbodenovim modelom, bi bilo potrebno poleg vgradnje ustreznega sedimentacijskega modela, v obstoječi biogeokemični modul dodati še nove enačbe izvorno – ponornega člena, ki bi ustrezale procesom pretvorb v fosforjevem krogu.

5.2 Modeliranje fekalnih koliformnih bakterij

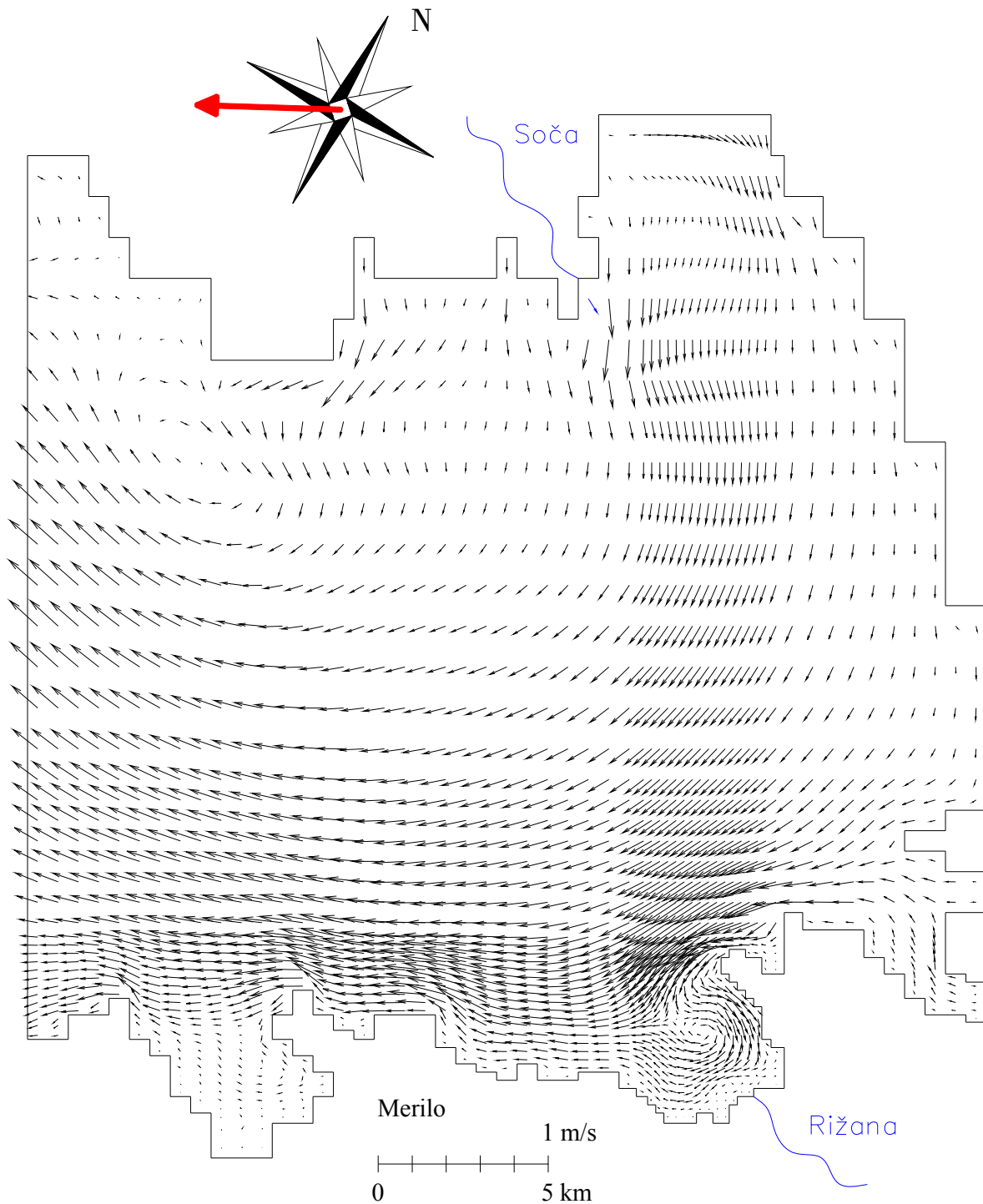
Kot začetni pogoj za modeliranje transporta fekalnih koliformnih bakterij smo uporabili hitrostna polja za poletje, ki so bila uporabljena že pri simulacijah transporta celokupnega fosforja. Hidrodinamiko za kasnejši račun transporta fekalnih koliformnih bakterij smo računali v samostojni simulaciji, ki je obsegala obdobje petih dni. V računu smo kot začetni pogoj uporabili hitrostna polja za poletje v Tržaškem zalivu, kot vsiljevanje pa smo uporabili dnevni in nočni veter ter plimovanje. V tem času se je v modelu vzpostavilo stanje, ki se zaradi plimovanja in vetra približno ciklično ponavlja na vsakih 24 ur. V naslednji simulaciji, v kateri smo računali transport fekalnih koliformnih bakterij, smo uporabili koncentracijo fekalnih koliformnih bakterij, ki jo Rižana prenese v Koprski zaliv in hitrostna polja, ki smo jih iz izračunane hidrodinamike zapisali na vsako uro in jih v simulaciji transporta fekalnih koliformnih bakterij ponavljali v 24-urnih ciklih. Koncentracija fekalnih koliformnih bakterij znaša na vtoku Rižane v zaliv 100 %, mi pa smo tekom simulacije opazovali njeno zmanjšanje zaradi odmiranja fekalnih koliformnih bakterij. Simulacija transporta in odmiranja je obsegala obdobje 15 dni, saj je to statistično najdaljše verjetno obdobje v poletnem času, brez močnejše spremembe vetra. V tem času se je porazdelitev koncentracije fekalnih koliformnih bakterij ob vseh upoštevanih podatkih zaradi plimovanja po zalivu v okviru 24-urnega cikla ustalila. Porazdelitev nas je zanimala predvsem za Koprski zaliv. V zadnji simulaciji smo hkrati simulirali hidrodinamiko in transport fekalnih koliformnih bakterij, ker smo dodali vpliv tramontane. Hkratna simulacija je nujna, saj se ob takem dogodku vsi parametri hitro spreminjajo. Podatke o tramontani, ki smo jih uporabili v tej simulaciji, smo opisali že v poglavju 4.4.1.1.3.

Slike od 54 do 57 prikazujejo hitrostna polja v zadnjem dnevu simulacije hidrodinamičnih količin, po 3, 9-ih, 15-ih in 21-ih urah. Na sliki 58 so prikazana hitrostna polja po 6 urnem pihanju tramontane. Na vseh petih slikah so prikazana globinsko povprečna hitrostna polja, iz katerih je razvidna cirkulacija. V simulaciji brez vpliva tramontane ima plimovanje bistveno večji vpliv kot pa razmeroma šibki vetrovi, zato so hitrosti po globini le malo različne. Hkrati zaradi stratifikacije ne prihaja do močnejšega vertikalnega mešanja, zato lahko za interpretacijo rezultatov uporabimo globinska povprečna hitrostna polja. V zadnji simulaciji

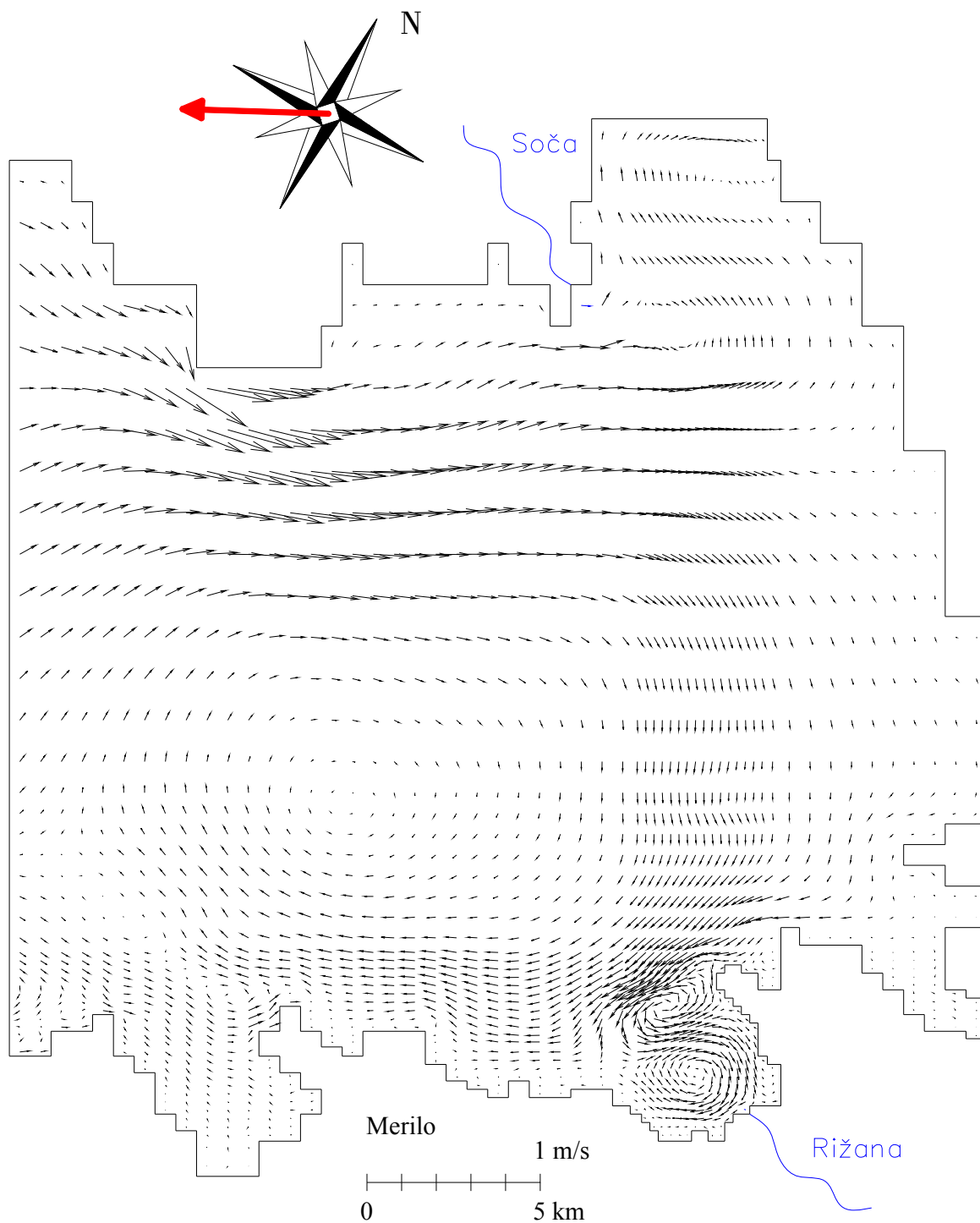
vodo po celotni globini in na celotnem območju zaliva močno premeša tramontana, zato so za interpretacijo prav tako uporabna globinsko povprečna hitrostna polja. Posamezne oznake na slikah so razložene že pri prikazu hitrostnih polj pri modeliranju celokupnega fosforja.



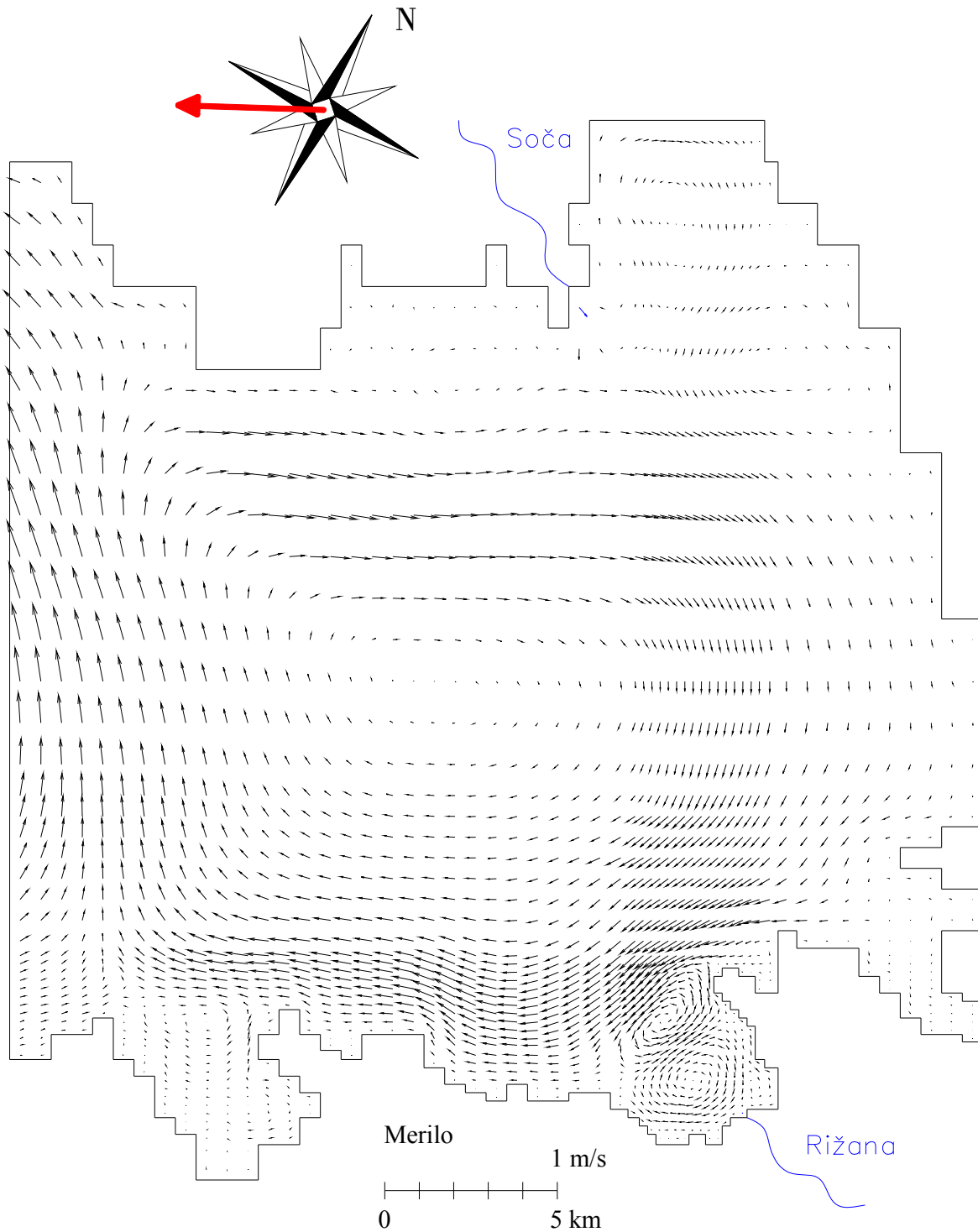
Slika 54: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; 5. dan po 3 urah



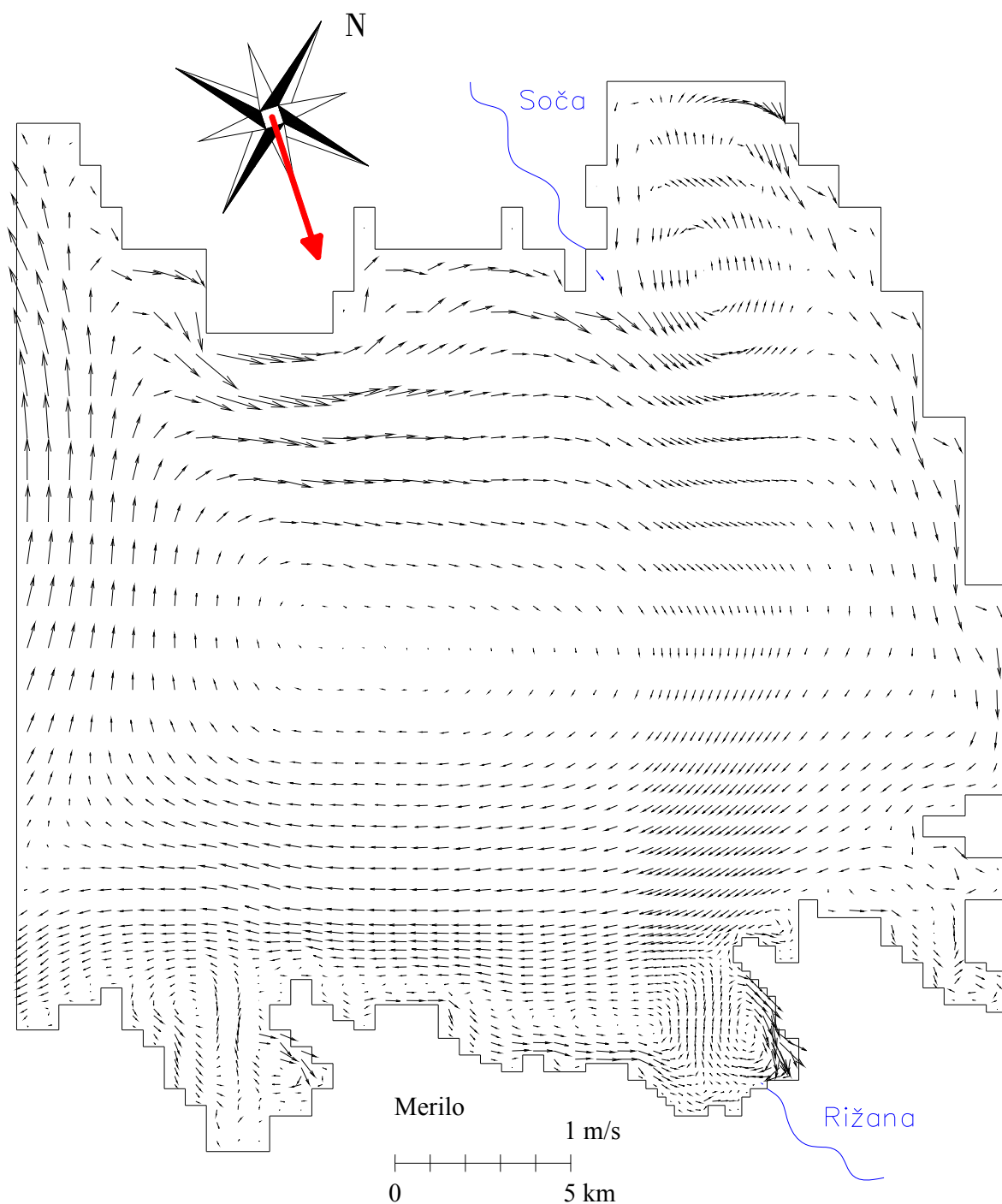
Slika 55: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; 5. dan po 9-ih urah



Slika 56: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; 5. dan po 15-ih urah



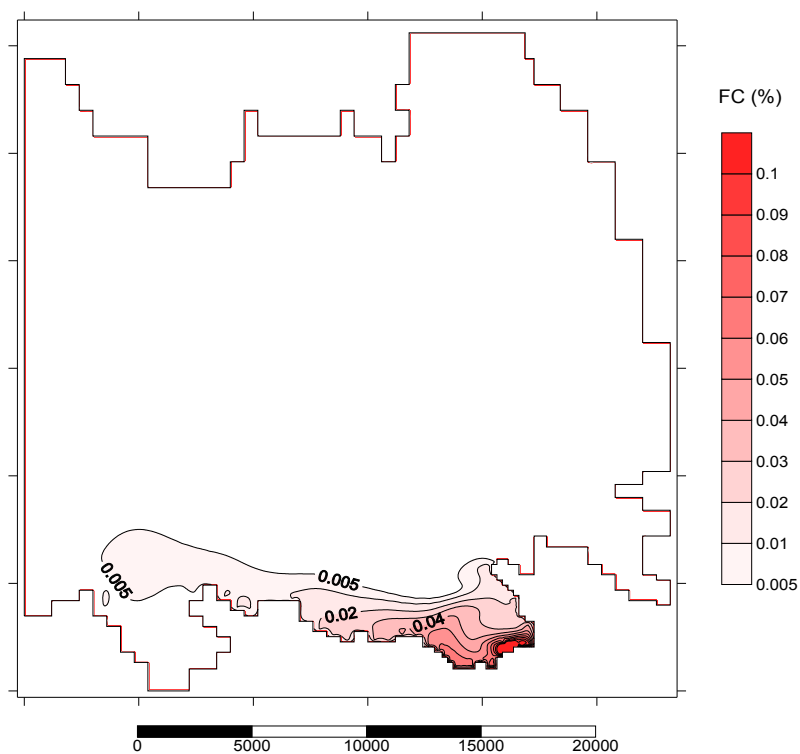
Slika 57: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; 5. dan po 21-ih urah



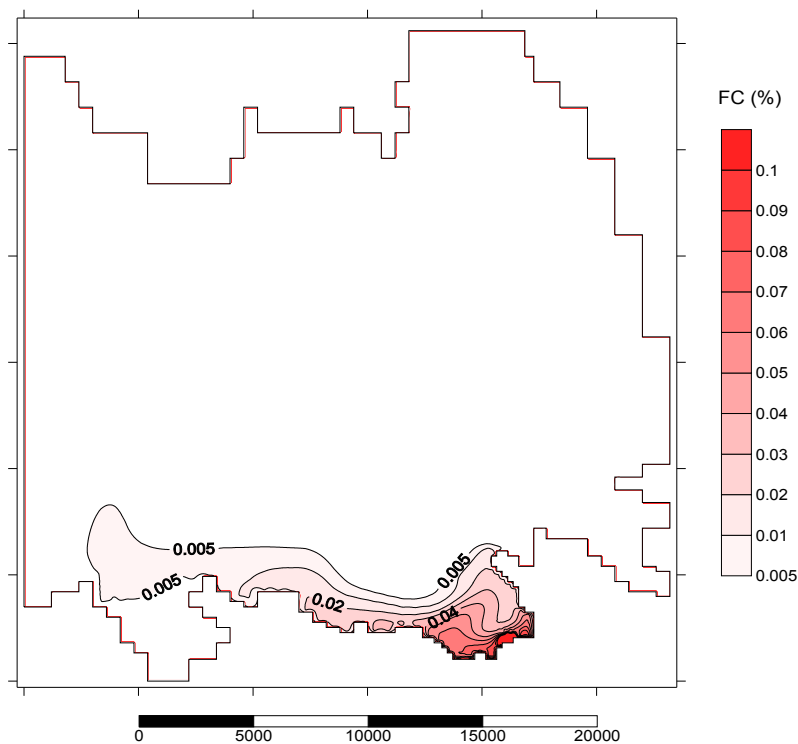
Slika 58: Porazdelitev globinsko povprečnih hitrosti – Poletje; po 6-urnem pihanju tramontane

Slike od 59 do 63 prikazujejo koncentracije fekalnih koliformnih bakterij. Za prikaz smo izbrali 13. (sliki 59 in 60) in 15. dan (sliki 61 in 62) simulacije. Za vsak dan sta prikazani 2 sliki, na katerih smo prikazali še vpliv plimovanja ter dnevnega in nočnega vetra, ob upoštevanju plimnega cikla dolžine 12 ur in vetrnega cikla dolžine 24 ur. Sliki 59 in 61 prikazujeta vpliv oseke in nočnega vetra, sliki 60 in 62 pa vpliv plime in dnevnega vetra. Slika 63 prikazuje porazdelitev koncentracije fekalnih koliformnih bakterij, ki je nastala po 6 urnem pihanju tramontane.

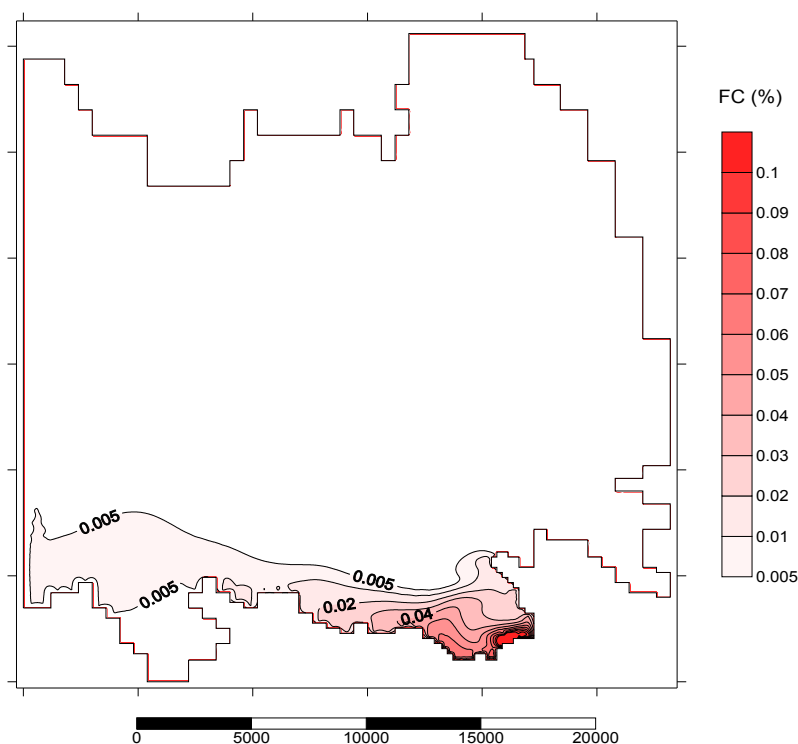
Na vseh slikah (59 do 63) je prikazan tudi vpliv umrljivosti bakterij; v poletnih mesecih se število preživelih fekalnih koliformnih bakterij po 36 urah v morski vodi zmanjša za 90 % (poglavje 3.3). Na slikah je prikazan % preživelih fekalnih koliformnih bakterij z upoštevanim 10 % preživetjem.



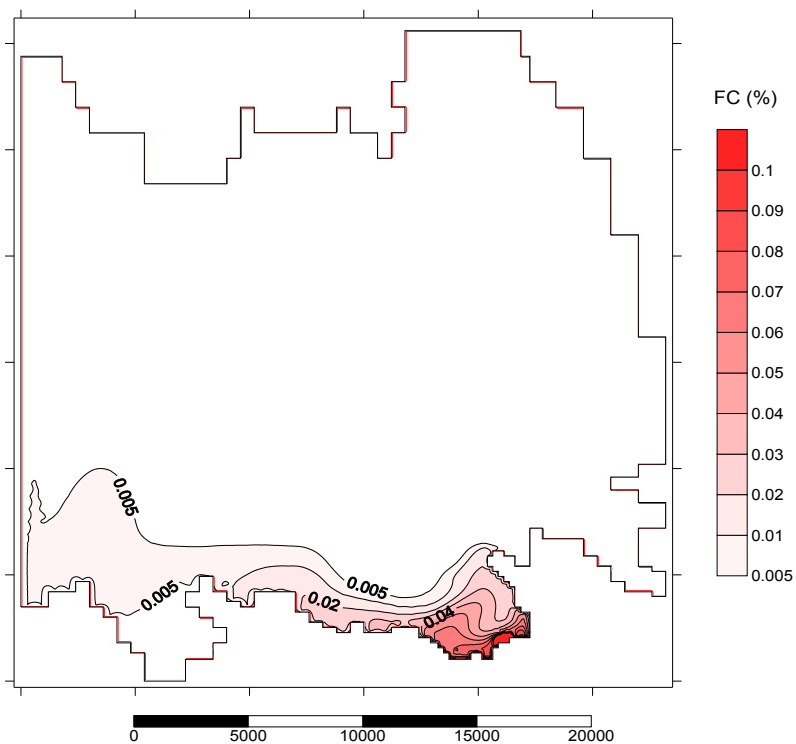
Slika 59: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij za 13. dan z upoštevanjem oseke in nočnega vetra



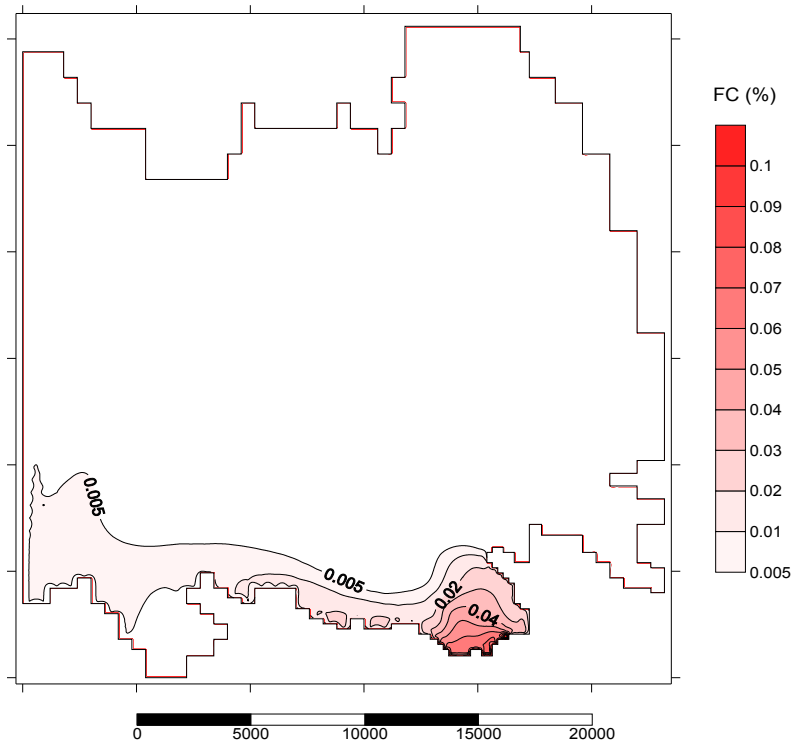
Slika 60: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij za 13. dan z upoštevanjem plime in dnevnega vetra



Slika 61: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij za 15. dan z upoštevanjem oseke in nočnega vetra



Slika 62: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij za 15. dan z upoštevanjem plime in dnevnega vetra



Slika 63: Porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij po 6-urnem pihanju tramontane

Slike od 59 do 63 torej prikazujejo koncentracije oz. število preživetih fekalnih koliformnih bakterij, razvidno je premikanje bakterij po Tržaškem zalivu zaradi plimovanja ter dnevnega in nočnega vetra. Pokaže se tudi, da je porazdelitev fekalnih koliformnih bakterij v površinskem sloju v Koprskem zalivu v 13. in 15. dnevu skoraj identična, saj vsak dan doteka iz Rižane v zaliv približno enaka količina fekalnih koliformnih bakterij in ob kvazi-stacionarnem gibanju vode lahko pričakujemo tudi približno enako razporeditev in število bakterij ob istem času v posameznih dnevih. Ko primerjamo sliko po 6 urnem pihanju tramontane z ostalimi slikami, lahko opazimo, da je tramontana v površinskem sloju nekoliko zmanjšala koncentracijo fekalnih koliformnih bakterij. Razlika je opazna predvsem na območju Koprskega zaliva. V resnici se število fekalnih koliformnih bakterij v zalivu ni zmanjšalo, ampak je ostalo enako, zaradi vertikalnega mešanja, ki ga je povzročila tramontana, pa so se te bakterije drugače porazdelile po globini.

Možni vpliv fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane na kvaliteto kopalnih voda v kopališčih v povprečnih poletnih razmerah in po 6 urnem pihanju tramontane (preglednici 24 in 25) z upoštevanjem povprečnega števila fekalnih koliformnih bakterij izračunanih na dva načina (preglednici 19 in 20) smo iz vrednotili po postopku, opisanem v nadaljevanju.

Preglednica 24 je sestavljena iz stolpca kopališče, stolpca povprečja meritev iz vseh štirih let ([siva barva](#) v preglednici 24) ter skupnih stolpcev A in B. Skupni stolpec A predstavlja izračun vpliva v povprečnih poletnih razmerah, skupni stolpec B pa vpliv po 6 urnem pihanju tramontane. Nadaljnji postopek je razložen za posamezni skupni stolpec. Ker so zaradi daljšega trajanja simulacij fekalne koliformne bakterije razporejene skoraj enakomerno po globini, smo izračunali povprečno vrednost rezultatov modela za posamezno kopališče in dobili % preživelih fekalnih koliformnih bakterij ([svetlomodra barva](#) v preglednici 24). Na podlagi članka (Šolić in Krstulović, 1992) sklepamo, da dlje preživijo bakterije, ki se nahajajo v površinskih slojih (skupaj 1m globine), kjer je nižja slanost. Ker seže vpliv sončne svetlobe do globine 10 m skoraj enakomerno in ker je v površinskem sloju globine 1 m več sladke vode, predpostavimo, da preživijo zgolj tiste bakterije, ki so v tem površinskem sloju. Zato smo izračunali % preživelih fekalnih koliformnih bakterij za posamezno kopališče ([svetlomodra barva](#) v preglednici 24) samo v tem površinskem sloju globine 1 m. Nato smo % preživelih fekalnih koliformnih bakterij pomnožili z ocenjenim povprečnim številom bakterij,

ki jih v Koprski zaliv prinese Rižana (preglednica 19, upoštevamo vse štiri meritve) in dobili število fekalnih koliformnih bakterij v površinskem metru globine ([svetlooranžna barva](#) v preglednici 24), ki so posledica vtoka Rižane. To število smo primerjali s povprečnim izmerjenim številom fekalnih koliformnih bakterij na posameznem kopališču ([siva barva](#) v preglednici 24). Tako smo dobili % možnega vpliva Rižane na posamezno kopališče ([svetlozelena barva](#) v preglednici 24).

Iz preglednice 24 na naslednji strani lahko razberemo, da Rižana s svojim vnosom fekalnih koliformnih bakterij v Koprski zaliv lahko vpliva na kvaliteto vode na vseh kopališčih. Na kopališče Koper, ki je izlivu Rižane najbližji, je seveda možni vpliv največji, vendar pa je izračunani vpliv Rižane na kopališče izredno velik, zato se nam tak rezultat glede na primerjavo z rezultati meritev, ne zdi realen.

Preglednica 24: Prikaz vpliva fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane na izbrana kopališča z upoštevanjem povprečnega števila fekalnih koliformnih bakterij iz vseh meritev v poletnih mesecih

Kopališče	Povprečje vseh let FC (št./100ml)	Poletje (PCFLOW3D) - A			Poletje + tramontana (PCFLOW3D) - B		
		FC (št./100ml) v zg. sloju (1m)	dejanski % preživetih FC	% vpliva Rižane na kopališča	FC (št./100ml) v zg. sloju (1m)	dejanski % preživetih FC	% vpliva Rižane na kopališča
NARAVNO KOPALIŠČE RKS MZL DEBELI RTIČ	44	3	0,02	6	3	0,02	6
KOPALIŠČE ADRIA ANKARAN	153	26	0,04	17	17	0,03	11
MESTNO KOPALIŠČE KOPER	11	13	0,08	117	11	0,07	100
KOPALIŠČE ŽUSTERNA	27	7	0,07	28	7	0,06	26
PLAŽA SIMONOV ZALIV	49	7	0,03	14	6	0,02	12

Preglednica 25: Prikaz vpliva fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane na izbrana kopališča z upoštevanjem povprečnega števila fekalnih koliformnih bakterij v poletnih mesecih brez upoštevanja maksimalne in minimalne vrednosti

Kopališče	Povprečje vseh let FC (št./100ml)	Poletje (PCFLOW3D) - A			Poletje + tramontana (PCFLOW3D) - B		
		FC (št./100ml) v zg. sloju (1m)	dejanski % preživetih FC	% vpliva Rižane na kopališča	FC (št./100ml) v zg. sloju (1m)	dejanski % preživetih FC	% vpliva Rižane na kopališča
NARAVNO KOPALIŠČE RKS MZL DEBELI RTIČ	44	0	0,02	0	0,02	0	
KOPALIŠČE ADRIA-ANKARAN	153	5	0,04	3	0,03	2	
MESTNO KOPALIŠČE KOPER	11	2	0,08	20	0,07	17	
KOPALIŠČE ŽUSTERNA	27	1	0,07	5	0,06	5	
PLAŽA SIMONOV ZALIV	49	1	0,03	2	0,02	2	

Pri ponovnem izračunu možnega vpliva fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane na kopališča smo upoštevali povprečno število fekalnih koliformnih bakterij v poletnih mesecih brez upoštevanja maksimalne in minimalne vrednosti (preglednica 20, upoštevamo samo dve meritvi). Postopek izračuna je enak kot pri preglednici 24, rezultati pa so prikazani v preglednici 25 na prejšnji strani.

Iz preglednic 24 in 25 lahko torej razberemo, da vtok fekalnih koliformnih bakterij v Koprski zaliv iz Rižane v povprečnih poletnih razmerah lahko vpliva na kvaliteto vode na vseh kopališčih, izjema je le kopališče Debeli rtič, na katerega po izračunih vpliv Rižane v takšnih razmerah ne seže. Na kopališče Koper, ki je izlivu Rižane najbližje, je seveda možni vpliv Rižane največji.

Pri primerjavi simulacij z vplivom tramontane in brez njega lahko v prvem primeru opazimo, da se je po pihanju tramontane število fekalnih koliformnih bakterij v tem primeru rahlo zmanjšalo na kopališčih Ankaran in Koper. Na ostalih kopališčih pa je število fekalnih koliformnih bakterij ostalo enako. V drugem primeru pa pri primerjavi simulacij z vplivom tramontane in brez njega lahko opazimo, da se je po pihanju tramontane število fekalnih koliformnih bakterij zmanjšalo skoraj na vseh kopališčih, razen na kopališču Debeli rtič, kjer je število fekalnih koliformnih bakterij ostalo enako.

Iz obeh primerov lahko sklepamo, da tramontana ne vpliva bistveno na kakovost kopalnih voda izbranih kopališč v Koprskem zalivu. Iz nizkih izračunanih % vpliva Rižane na vsa kopališča razen na kopališče Koper lahko sklepamo, da ostali viri onesnaženja bolj vplivajo na kopališča kot pa sama Rižana. Visok % možnega vpliva Rižane na kopališče Koper je bil pričakovan, saj se kopališče nahaja približno 1200 m stran od njenega izliva. Kljub temu, da smo % možnega vpliva Rižane na kopališča računali dvakrat, in sicer z dvema različnima povprečnima številoma fekalnih koliformnih bakterij, ki jih Rižana prinese v zaliv, točnejšega vpliva Rižane na kakovost kopalnih voda na izbranih kopališčih z razpoložljivimi podatki in modelom PCFLOW3D ni mogoče ugotoviti.

6 ZAKLJUČKI IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

6.1 Zaključki

Z matematičnim modelom PCFLOW3D smo izvedli simulaciji transporta hranil (celokupnega fosforja) ter fekalnih koliformnih bakterij. To je bil prvi poskus hkratnega modeliranja hidrodinamike in transporta celokupnega fosforja ter porazdelitve fekalnih koliformnih bakterij v Tržaškem zalivu in tako predstavlja pomemben napredek pri modeliranju parametrov kvalitete morja v Tržaškem zalivu.

Izvedli smo sezonske simulacije transporta celokupnega fosforja z modelom PCFLOW3D, pri čemer smo leto razdelili na 4 sezone oz. sekvence, za katere smo najprej izračunali hidrodinamične količine in jih uporabili pri kvazi – stacionarnem modeliranju transporta celokupnega fosforja. Za končno ugotovitev ali je model (samo hidrodinamični in transportno – disperzijski modul) primeren za modeliranje transporta celokupnega fosforja, smo rezultate modela primerjali z meritvami na petih merilnih mestih v Tržaškem zalivu. Primerjave so pokazale, da se ujemanje rezultatov modela z meritvami iz sezone v sezono slabša. Zato smo za izboljšanje rezultatov modela PCFLOW3D uporabili Imbodenov model, ki upošteva sedimentacijo. Izboljšave so pokazale, da je usedanje celokupnega fosforja očitno zelo pomembno, saj se je bilo mogoče celo samo s korekcijo oz. izboljšanjem rezultatov modela PCFLOW3D z Imbodenovim modelom zelo približati meritvam.

Pri modeliranju fekalnih koliformnih bakterij smo izvedli dve simulaciji, obe za poletno obdobje, ko je kvaliteta kopalnih voda najbolj pomembna. Ponovno smo najprej izračunali hidrodinamične količine, z njimi pa smo izvedli simulacijo transporta fekalnih koliformnih bakterij z upoštevanjem umrljivosti. V prvi simulaciji smo izračunali koncentracije fekalnih koliformnih bakterij po 15-ih dneh tipičnih poletnih razmer, v drugi pa v poletnih razmerah po močnem 6 – urnem pihanju tramontane. V obeh simulacijah smo koncentracije fekalnih koliformnih bakterij izračunali dvakrat, in sicer z upoštevanjem dveh različnih povprečnih števil fekalnih koliformnih bakterij iz Rižane. Rezultate simulacij smo primerjali znotraj

posamezne simulacije, med obema simulacijama in z meritvami na petih kopališčih v Koprskem zalivu. Ugotovili smo, da z modelom lahko ugotovimo možen vpliv Rižane na kakovost kopalne vode na kopališčih in da je možen vpliv Rižane na bližnja kopališča večji, ne moremo pa določiti točnega vpliva Rižane na kopališča, saj je trenutno na voljo premalo podatkov, ki bi jih za takšno ovrednotenje potrebovali. Ugotovili smo tudi, da vpliv tramontane na kakovost kopalne vode na kopališčih nima bistvenega pomena.

Ugotovili pa smo, da model PCFLOW3D v sedanji obliki brez pomembnih dopolnitev ni primerno orodje in ne zadošča za modeliranje procesov pretvorb in usedanja celokupnega fosforja, ki se je v primerjavi meritev in rezultatov modelnih simulacij izkazalo kot zelo pomembno.

6.2 Napotki za nadaljnje delo

Za doseganje boljših rezultatov pri modeliranju transporta celokupnega fosforja bi bilo torej potrebno izpopolniti model PCFLOW3D. V obstoječi biogeokemični modul bi bilo potrebno dodati nove enačbe izvorno – ponornega člena, ki bi ustrezale procesom pretvorb v fosforjevem krogu. Hkrati bi bilo potrebno izboljšati tudi sedimentacijski modul, ki bi tako omogočal simulacijo usedanja celokupnega fosforja na dno.

Meritve na rekah bi bilo potrebno izvajati v manjših časovnih presledkih, s čimer bi dobili na voljo več podatkov, ki bi nam služili po eni strani kot kvalitetnejši vhodni podatki za modeliranje, po drugi strani pa bi lahko rezultate modela primerjali z več meritvami. Podobno bi lahko rekli za monitoring na morju.

Za boljše doseganje rezultatov pri modeliranju transporta fekalnih koliformnih bakterij bi bilo v bodoče treba v računu upoštevati tudi ostale vire onesnaževanja in potem izvesti testne simulacije. Prav tako bi bilo potrebno povečati število meritev na rekah in kopališčih, saj le dve meritvi v sezoni (na rekah) nikakor ne moreta realno pokazati vnosa onesnaženja kakršnekoli oblike v morje.

VIRI

ARSO. Izvajanje monitoringa kakovosti morja v letu 2002. 2003a. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. Letno poročilo: 82 str.

http://www.arso.gov.si/vode/morje/Porocilo_morje_2002.pdf (9. 3. 2007)

ARSO. Kakovost morja in kontrola onesnaženja s kopnega. 2003b. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. Poročilo za leto 2003: 43 str.

http://www.arso.gov.si/vode/morje/Barcelonska_porocilo_2003.pdf (9. 3. 2007)

ARSO. Hidrološki letopis Slovenije 2000. 2004a. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije, II. Del: Površinske vode: 74 str.

http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%c4%8dila/II_A_povrsinske_vode.pdf (16. 2. 2007)

ARSO. Izvajanje monitoringa kakovosti morja, brakičnih voda in voda za življenje in rast morskih školjk in morskih polžev v letu 2003. 2004b. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. Letno poročilo: 72 str.

http://www.arso.gov.si/vode/morje/porocilo_morje2003.pdf (9. 3. 2007)

ARSO. Hidrološki letopis Slovenije 2001. 2005a. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije, II. Del: Površinske vode: 73 str.

<http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%c4%8dila/2001povrsinske.pdf> (16. 2. 2007)

ARSO. Hidrološki letopis Slovenije 2002. 2005b. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije, II. Del: Površinske vode: 80 str.

<http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%c4%8dila/2002povrsinske.pdf> (16. 2. 2007)

ARSO. Kakovost kopalnih voda na naravnih kopališčih in na območjih kopalnih voda v Sloveniji v letu 2004. 2005c. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. Zbirno poročilo: 30 str.

http://www.arso.gov.si/vode/kopalne%20vode/kopalne_vode_2004.pdf (11. 7. 2007)

ARSO. Kakovost kopalnih voda na naravnih kopališčih in na območjih kopalnih voda v Sloveniji v letu 2005. 2006a. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. Zbirno poročilo: 36 str.

http://www.arso.gov.si/vode/kopalne%20vode/kopalne_vode_2005.pdf (11. 7. 2007)

ARSO. Prognozirano plimovanje morja 2006. 2006b. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije: 18 str.

www.arso.gov.si/podrocja/vode/porocila_in_publicacije/plima2006A5.pdf (25. 4. 2007)

ARSO. Kakovost kopalnih voda na naravnih kopališčih in na območjih kopalnih voda v Sloveniji v letu 2006. 2007a. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. Zbirno poročilo: 34 str.

http://www.arso.gov.si/vode/kopalne%20vode/KV_porocilo_2006.pdf (11. 7. 2007)

ARSO. Prognozirano plimovanje morja 2007. 2007b. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije: 18 str.

<http://www.arso.gov.si/vode/morje/plima2007A5.pdf> (25. 4. 2007)

Bergman, J. ATP: The Perfect Energy Currency for the Cell.

<http://www.trueorigin.org/atp.asp> (5. 11. 2007)

Bowie, G. L., Mills, W. B., Porcella, D. B., Campbell, C. L., Pagenkopf, J. R., Rupp, G. L., Johnson, K. M., Chan, P. W. H., Gherini, S. A. in Chamberlin, C. E. 1985. Rates Constants in Kinetic Formulations in Surface Water quality Modelling. USEPA, ORD, Athens, GA.

Carlucci, A. F., Pramer, D. 1959. An Evaluation of Factors Affecting the Survival of *Escherichia coli* in Sea Water. II. Salinity, pH and nutrients. *Applied Microbiology* 8: 247–250.

Crouzet, P., Nixon, S., Rees, Y., Parr, W., Laffon, L., Bogestrand, J., Kristensen, P., Lallana, C., Izzo, G., Bokn, T., Bak, J. 1999. Nutrients in European ecosystems. Environmental assessment report, No. 4: 156 str.

<http://reports.eea.europa.eu/ENVIASSRP04/en/enviassrp04.pdf> (2. 12. 2006)

Čermelj, B., Makovec, T. 2003. Določitev področij somornice za potrebe WFD. Tehnično poročilo št. 54. Piran. Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja Piran: 19 str.

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

Faganeli, J. Osnove varstva okolja – Izbrana poglavja predavanj na univerzitetnem študiju tehnologije prometa. Fakulteta za pomorstvo in promet: 122 str.

<http://www.fpp.edu/~jfaganeli/Varstvo%20okolja.pdf> (30. 9. 2007)

Faganeli, J. 1999. Osnove geomikrobiologije in mikrobne biogeokemije. Študijsko gradivo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. Oddelek za biologijo, Poglavje 5: 41 str.

Galuf, S. 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem. Diploma. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 63 str.

Hrenović, J. Odgovori na postavljena pitanja - Biologija. Botanički zavod. Prirodoslovno – matematički fakultet, Zagreb.

<http://www.biol.pmf.hr/e-skola/odgovori/odgovor258.htm> (2. 7. 2007)

Imboden, D. 1974. Phosphorus model of lake eutrophication. *Limnology and Oceanography* 19: 297–304.

Kompare, B. 2007. Sanacija virov onesnaževanja reke Badaševice - Spremljanje stanja kakovosti reke Badaševice z lokacijo virov onesnaževanja. Končno poročilo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Inštitut za zdravstveno hidrotehniko: 52 str.

Kotnik, J., Brambati, A. 2003. The role of Isonzo River suspended matter in transferring mercury compounds into the Gulf of Trieste. Jožef Stefan Institute and Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine. Final report: 102 str.

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

Kukovec, K. 2006. Frakcionacija stabilnih izotopov ogljika in dušika v fitoplanktonu Tržaškega zaliva. Diploma. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. Oddelek medoddelčnega študija mikrobiologije: 57 str.

Liebig's law of the minimum. Wikipedia, The free Encyclopedia.

http://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_minimum (10. 10. 2007)

Mellor G. L., Yamada T. 1982. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. Reviews of Geophysics and Space Physics 20, No. 4: 851-875.

<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/PAPERS> (18. 3. 2007)

Mosetti, F. 1983: Sintesi sull'idrologia del Friuli – Venezia Giulia. Quaderni dell'ente tutela pesca – Udine, Rivista di Limnologia, No. 6.

Obalna oceanografska boja Piran.

http://buoy.mbss.org/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=27
(25. 4. 2007)

Panjan, J. 2004. Osnove zaščite voda. Študijsko gradivo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Inštitut za zdravstveno hidrotehniko: 82 str.

-
- Rajar, R., Širca, A. 1996. Modelling of dispersion of radioactive pollutants in the Japan Sea. *Acta Hydrotechnica* 14, No. 12: 26 str.
- Rajar, R., Četina, M., Širca, A. 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. *Ecological Modelling* 101: 209–228.
- Rajar, R., Širca, A. 1998. Three-Dimensional Modelling of Thermal Pollution of the River Sava and its Reservoirs. In: Holz, K.P., Bechteler, W., Wang, S.S.Y., Kawahara, M. editors. *Advances in Hydro-science and Engineering. Proc. of 3rd int. Conf. On Hydrosience and Engineering*, August 31-Sept. 3, Cottbus, Germany: 123 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: 109–123.
- Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Hirokatsu, A., Shinichiro, Y., Takashi, T., Horvat, M. 2004. Application of the three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. *Ecological Modelling* 171: 139–155.
- Rajar, R., Četina, M., Horvat, M., Žagar, D. 2007. Mass balance of mercury in the Mediteranean Sea. *Marine Chemistry* 107: 89–102.
- Ramšak, V. 2006. Simulacija izmenjave živega srebra med vodo in zrakom s 3-D modelom PCFLOW3D v Tržaškem zalivu. Diploma. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Hidrotehnična smer: 120 str.
- Rismal, M. 1980. Presoja posameznih metod za sanacijo Blejskega jezera. *Gradbeni vestnik* 29, 2-3: 34–46.
- Rismal, M., Kompare, B. 1993. Metode in rezultati sanacije Blejskega jezera. *EIPOS Nr. 10 – Neue Inhalte, Gewässersanierung und Wasserbau in Slovenien, Referate zum 2. Internationalen EIPOS – Kolloquium*: 114–145.

Širca, A. 1996. Modeliranje hidromehanike in transporta živosrebrovih spojin v Tržaškem zalivu. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

Širca, A., Rajar, R. 1997. Modelling the effect of wind on average circulation and long-term pollutant dispersion in the Gulf of Trieste. *Acta Adriatica* 38, No. 2: 45–59.

Širca, A., Horvat, M., Rajar, R., Covelli, S., Žagar, D., Faganeli, J. 1999. Estimation of mercury mass balance in the Gulf of Trieste. *Acta Adriatica* 40, No. 2: 75–85.

Šolić, M., Krstulović, N. Separate and Combined Effects of Solar Radiation, Temperature, Salinity, and pH on the Survival of Faecal Coliforms in Seawater. *Marine Pollution Bulletin* 24, No. 8: 411–416.

Tržaški zaliv. Wikipedija, prosta enciklopedija.

http://sl.wikipedia.org/wiki/Tr%C5%BEa%C5%A1ki_zaliv (12. 4. 2007)

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 2007. Faecal Bacteria.

<http://www.epa.gov/volunteer/stream/vms511.html> (2. 7. 2007)

Žagar, D. 1994. Matematični model za simuliranje razlitja nafte na morju in njegova aplikacija. Magistrska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

Žagar, D. 1999. Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v morskem okolju. Doktorska disertacija. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 101 str.

Žagar, D., Petkovšek, G., Rajar, R., Sirnik, N., Horvat, M., Četina, M. 2005. Mathematical modelling of mercury transport and transformations in the Mediterranean. V: JUN, Byong-Ho (ur.). Water Engineering for the Future, Choices and Challenges : Proceedings of XXXI IAHR congress: Hydroinformatics, Hydraulic Modelling and Data, Urban and Industrial Flows, Water Quality and Habitat, Coping with Extremes in Water Resources, Coastal Development, Dynamics and Ecosystem Fragility. Seoul: IAHR: 2392–2402.

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: 64–88.

Direktiva Evropskega Parlamenta in Sveta 2006/7/ES.

Direktiva o kopalnih vodah 76/160/EGS.

Pravilnik o minimalnih higienskih zahtevah in drugih zahtevah za kopalne vode. Ur. l. RS, št. 73/03, 96/06.