

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvorna različica doktorske disertacije.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is an original PDF file of doctoral thesis.

When citing, please refer as follows:

Ramšak, V. 2013. Numerično modeliranje tokov onesnažil med okoljskimi segmenti. Doktorska disertacija. = Numerical modelling of pollutant fluxes between environmental segments. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (Mentor Žagar, D.).

<http://drugg.fgg.uni-lj.si>

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidatka:

VANJA RAMŠAK, univ. dipl. inž. grad.

**NUMERIČNO MODELIRANJE TOKOV ONESNAŽIL
MED OKOLJSKIMI SEGMENTI**

Doktorska disertacija štev.: 234

**NUMERICAL MODELLING OF POLLUTANT FLUXES
BETWEEN ENVIRONMENTAL SEGMENTS**

Doctoral thesis No.: 234

Soglasje k temi doktorske disertacije je dala Komisija za doktorski študij UL
na 29. redni seji, dne 13. junija 2012.
Za mentorja je bil imenovan doc. dr. Dušan Žagar.

Ljubljana, 9. december 2013

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- doc. dr. Dušan Žagar,
- prof. dr. Matjaž Četina,
- prof. dr. Boris Kompare,
- izr. prof. dr. Milena Horvat, IJS.

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 20. redni seji, dne 20. aprila 2011.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Četina,
- izr. prof. dr. Milena Horvat, IJS,
- prof. dr. Boris Kompare,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 3. redni seji, dne 25. septembra 2013.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- doc. dr. Dušan Žagar, mentor,
- prof. dr. Matjaž Četina,
- izr. prof. dr. Milena Horvat, IJS,
- prof. dr. Boris Kompare,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 5. redni seji, dne 27. novembra 2013.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **VANJA RAMŠAK**, univ. dipl. inž. grad., izjavljam, da sem avtorica doktorske disertacije z naslovom **NUMERIČNO MODELIRANJE TOKOV ONESNAŽIL MED OKOLJSKIMI SEGMENTI**.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 9. december 2013

.....
(podpis)

Doktorska disertacija:

**NUMERIČNO MODELIRANJE
TOKOV ONESNAŽIL MED
OKOLJSKIMI SEGMENTI**

Doctoral Dissertation:

**NUMERICAL MODELLING OF
POLLUTANT FLUXES BETWEEN
ENVIRONMENTAL SEGMENTS**

Vanja Ramšak

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 532: 519.87:504.054: (262.3)(26.04)(043.3)

Avtor: Vanja Ramšak, univ.dipl.inž.grad.

Mentor: doc. dr. Dušan Žagar

Naslov: Numerično modeliranje tokov onesnažil med okoljskimi segmenti

Obseg in oprema: 190 str., 16 pregl., 70 sl., 91 en.

Ključne besede: transport sedimentov, gibalna količina ladijskega vijaka, valovi, histereza lebdečih plavin, izmenjava plinov med vodo in zrakom, model izmenjave plinov, model PCFLOW3D, Tržaški zaliv, Koprski zaliv

Izvleček: Obravnavamo numerično modeliranje privzdigovanja in transporta sedimenta ter tokov onesnažil med sedimentom, vodo in zrakom. Ti procesi so pomemben del masnih bilanc sedimenta in onesnažil v vodnem okolju. Na privzdigovanje sedimenta imajo vpliv tokovi in valovi, v plitvih zalivih pa tudi pomorski promet. Izdelali smo nov model, ki iz podatkov o plovbi in značilnostih ladij izračuna strižne hitrosti ob dnu zaradi delovanja ladijskega vijaka. Obstoječi tridimenzionalni matematični model PCFLOW3D smo nadgradili z vmesniki za povezovanje z modelom valovanja SWAN. Na območju Tržaškega in Koprškega zaliva smo z nadgrajenim modelom PCFLOW3D izvedli simulacije s kombinacijami različnih dejavnikov (tokovi, valovi, plovba) na privzdigovanje sedimenta. Rezultati simulacij kažejo, da je v običajnih meteoroloških razmerah najpomembnejši dejavnik plovba, saj so lokalne strižne hitrosti ob dnu v obravnavanih primerih za red velikosti večje od drugih vplivov. Z novim modelom je mogoče ovrednotiti vpliv različnih plovil na dno in ob danih koncentracijah onesnažil izračunati njihov vnos v vodni stolpec zaradi meteoroloških dejavnikov in plovbe. Meritve lebdečin plavin na reki Idrijci v nestacionarnih pogojih za ovrednotenje histereze lebdečih plavin in nadaljnje ovrednotenje transporta živega srebra v porečjih Idrijce in Soče proti Tržaškemu zalivu zaradi velikih logističnih težav niso dale pričakovanih rezultatov. Z izpopolnjeno metodo Gårdfeldt in modelom izmenjave plinov smo izračunali izmenjavo živega srebra med vodo in ozračjem v Sredozemskem morju. Zelo visoki rezultati v primerjavi z drugimi izvedenimi študijami nakazujejo, da imajo pomembno vlogo pri izmenjavi procesi v mejni plasti, ki jih doslej ni bilo mogoče modelirati ali da so na območju Sredozemlja prisotni razmeroma veliki, doslej nepoznani viri živega srebra.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDK: 532: 519.87:504.054: (262.3)(26.04)(043.3)

Author: Vanja Ramšak,

Supervisor: Assist. Prof. Dušan Žagar, Ph.D.

Title: Numerical modelling of pollutant fluxes between environmental segments

Notes: 190 p., 16 tab., 70 fig., 91 eq.

Key words: sediment transport, ship's propeller momentum, waves, suspended sediment hysteresis, evasion, gas exchange model, PCFLOW3D model, Gulf of Trieste, Koper Bay

Abstract: This doctoral dissertation focuses on numeric modelling of sediment resuspension and transport as well as pollutant fluxes between the sediment, water and air. These processes are an important part of the mass balance of the sediments and pollutants in the aquatic environment. Sediment resuspension is influenced by sea currents and waves, in shallow bays also by maritime traffic. We developed a new model that calculates shear velocities at the sea bottom using information on navigation and the ship's characteristics. The existing three-dimensional mathematical model PCFLOW3D was upgraded with the interface to couple with the wave model SWAN. With it we performed numerous simulations in which we combined different sediment resuspension forcing factors: currents, waves, and navigation. The simulation results show that the most important factor in ordinary meteorological conditions is navigation since the bottom shear velocities were locally by an order of magnitude higher than the ones caused by other forcing factors. With the new model it is also possible to estimate the influence of different vessels on the bottom. In addition we measured the suspended sediments / studied the hysteresis effect on the river Idrijca and tried to estimate the transportation of mercury in the catchment of the Idrijca and the Soča towards the Gulf of Trieste. However, no reliable results could be obtained due to several organisational difficulties. With the use of the improved Gårdfeldt method and GEM we calculated the annual evasion of mercury in the Mediterranean Sea. The obtained high results compared with the results of other studies show that either the processes in the boundary layer, which have not yet been modelled, play a very important role in mercury evasion, or that there are large amounts of mercury in the Mediterranean that have so far not been discovered.

ZAHVALA

Za izdatno pomoč pri izdelavi doktorske disertacije se zahvaljujem mentorju doc., dr. Dušanu Žagarju, ki bi se mu posebej rada zahvalila tudi za njegovo potrpežljivost in razumevanje.

Pomemben člen pri nastajanju tega dela je tudi moja družina, zato bi se rada zahvalila predvsem Domnu, pa seveda Luku in Gaji, ki sta bila sicer fascinirana nad tem, kaj dela mama, vendar bi včasih najraje videla, da ne bi sedela toliko časa za računalnikom.

Posebna zahvala pa gre viš.pred.mag. Marku Perkoviču iz Fakultete za pomorstvo in promet, za podatke o potovanju in parametrih ladje, ter Maji Jaromel iz ARSO za podatke o valovanju.

KAZALO VSEBINE

IZJAVA O AVTORSTVU	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	3
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION	4
ZAHVALA	5
1 UVOD	1
1.1 SPLOŠNA PROBLEMATIKA.....	1
1.2 DOSEDANJE DELO	6
1.3 HIPOTEZA IN CILJI NALOGE.....	14
2 METODOLOGIJA	17
2.1 OSNOVE GIBANJA SEDIMENTOV	17
2.1.1 Karakteristični parametri.....	17
2.1.2 Hitrost usedanja delcev	21
2.1.3 Račun lebdečih plavin	22
2.1.4 Vpliv tokov, valovanja in propulzije ladijskega vijaka.....	24
2.2 OPIS MODELA SWAN	27
2.3 VPLIV CURKA ZA LADIJSKIM VIJAKOM.....	30
2.3.1 Oblikovanje in koncept curka za ladijskim vijakom	30
2.3.2 Analiza toka	33
2.3.3 Semi – empirične enačbe curka za vijakom	35
2.3.4 Hitrost toka ob dnu zaradi curka vijaka.....	39
2.4 VPLIV VEGETACIJE NA TRANSPORT SEDIMENTOV	40

2.4.1 Hidravlični upor	40
2.4.2 Resuspendiranje sedimentov	41
2.5 POJAV HISTEREZE TRANSPORTA SEDIMENTOV	41
2.6 IZMENJAVA HLAJNIH SNOVI MED VODO IN ZRAKOM.....	43
2.6.1 GEM (gas exchange model) – model izmenjave plinov	44
2.7 OPIS MODELA IN POSAMEZNIH MODULOV PCFLOW3D	45
2.7.1 Hidrodinamični modul	46
2.7.2 Transportno dispezijski modul.....	50
2.7.3 Sedimentacijski modul.....	50
2.7.4 Biogeokemični modul.....	54
2.8 UPORABA TEORIJE CURKA ZA LADIJSKIM VIJAKOM V MODELU PCFLOW3D	56
2.8.1 Uporaba teorije gibalne količine za ladijskim vijakom pri računu porazdelitve hitrosti	56
3 RAZISKOVALNO DELO.....	59
3.1 MODEL ZA IZRAČUN PRIDNENIH HITROSTI ZARADI PLOVBE IN SKLAPLJANJE MODELOV	59
3.1.1 Tržaški zaliv.....	61
3.2.1.1 Podatki	62
3.2.1.2 Račun in rezultati.....	69
3.1.2 Koprski zaliv.....	93
3.1.2.1 Podatki	94
3.1.2.2 Račun in rezultati.....	98
3.1.3 Diskusija	123
3.2 MERITVE IN UMERJANJE REČNEGA TRANSPORTA PLAVIN	124
3.2.1 Merilna oprema.....	126

3.3 RAČUN IZMENJAVE ŽIVEGA SREBRA MED VODO IN ZRAKOM V SREDOZEMSKEM MORJU, METODA GÅRDFELDT IN SOD. (2003)	129
3.3.1 Podatki.....	130
3.3.2 Račun in rezultati	137
4 ZAKLJUČKI IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO.....	141
4.1 ZAKLJUČKI	141
4.2 NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO	143
5 POVZETEK.....	144
6 SUMMARY.....	146
7 VIRI.....	148

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematični prikaz razpršitve curka, ki brizga iz odprtine (povzeto po Albertson in sod., 1950, str. 640).	31
Slika 2: Karakteristike Gaussove normalne porazdelitvene krivulje (povzeto po Albertson in sod., 1950, str. 643).	36
Slika 3: Skica območja oblikovanja toka (povzeto po Albertson in sod., 1950, str. 644).	36
Slika 4: Skica območja oblikovanega toka (Albertson in sod., 1950, str. 646).	38
Slika 5: Osnovna struktura modela PCFLOW3D brez biogeokemičnega modula (povzeto po Žagar in sod., 2007, str. 67).	54
Slika 6: Biogeokemični modul modela PCFLOW3D (povzeto po Žagar in sod., 2005, str. 2393).	55
Slika 7: Lokalni in globalni koordinatni sistem.	58
Slika 8: Definijsko območje Tržaškega zaliva in njegova globina.	62
Slika 9: Ladja za razsuti tovor v stanju polnega balasta (Perkovič in sod., 2011, str. 69).	63
Slika 10: Geometrija in dimenzije ladje za razsuti tovor (Perkovič in sod., 2011, str. 70).	63
Slika 11: Pot ladje v Tržaškem zalivu (http://www.darrinward.com/lat-long/).	65
Slika 12: Hitrostno polje v Tržaškem zalivu, v površinskem sloju po 3 urah.	70
Slika 13: Hitrostno polje v Tržaškem zalivu, na globini 11 m po 3 urah.	71
Slika 14: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov τ_{aubc} v Tržaškem zalivu; burja 10 m/s, smer 60°.	72
Slika 15: Višina valovanja v Tržaškem zalivu, izračunana z modelom SWAN.	73
Slika 16: Perioda valovanja v Tržaškem zalivu, izračunana z modelom SWAN.	74
Slika 17: Višina valovanja v Tržaškem zalivu, izračunana na podlagi Bretschneiderjevih enačb.	75
Slika 18: Perioda valovanja v Tržaškem zalivu, izračunana na podlagi Bretschneiderjevih enačb.	76
Slika 19: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi valov τ_{aubTOT} (SWAN) v Tržaškem zalivu.	77

Slika 20: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi valov τ_{aubTOT} (Bretschneider) v Tržaškem zalivu.	78
Slika 21: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Tržaškem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva valov (SWAN).....	79
Slika 22: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Tržaškem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva valov (Bretschneider).	80
Slika 23: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 70 s.	81
Slika 24: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 70 s; izrez - povečano.....	82
Slika 25: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; vektorji 70 s; izrez - povečano.....	83
Slika 26: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 770 s.	84
Slika 27: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 770 s; izrez - povečano.....	85
Slika 28: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; vektorji; 770 s; izrez - povečano.....	86
Slika 29: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (70 s).	87
Slika 30: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (70 s); izrez - povečano.	88
Slika 31: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (770 s).	89
Slika 32: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov in valov (SWAN) τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu.	90
Slika 33: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Tržaškem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov in valov (SWAN).....	91
Slika 34: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (SWAN) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (70 s).....	92
Slika 35: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (SWAN) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (770 s).....	93
Slika 36: Definijsko območje in batimetrija Koprškega zaliva.	94
Slika 37: Pot ladje v Koprskem zalivu (http://www.darrinward.com/lat-long/).....	95

Slika 38: Hitrostno polje v Koprskem zalivu, v površinskem sloju po 3 urah.	98
Slika 39: Hitrostno polje v Koprskem zalivu, na globini 11 m po 3 urah.	99
Slika 40: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov τ_{aubC} v Koprskem zalivu.	100
Slika 41: Višina valovanja v Koprskem zalivu, izračunana na podlagi Bretschneiderjevih enačb.	101
Slika 42: Perioda valovanja v Koprskem zalivu, izračunana na podlagi Bretschneiderjevih enačb. ..	102
Slika 43: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi valov τ_{aubTOT} (Bretschneider) v Koprskem zalivu.	103
Slika 44: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi valov τ_{aubTOT} (konstantni vrednosti) v Koprskem zalivu.	104
Slika 45: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 300 s.	105
Slika 46: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 300 s; izrez - povečano.	106
Slika 47: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; vektorji; 300 s.	107
Slika 48 : Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 900 s.	108
Slika 49: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; vektorji; 900 s.	109
Slika 50: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 300 s.	110
Slika 51: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} ob dnu v Koprskem zalivu; vpliv hitrosti za ladijskim vijakom; 300 s.	111
Slika 52: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 900 s.	112
Slika 53: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} ob dnu v Koprskem zalivu; vpliv hitrosti za ladijskim vijakom; 900 s.	113
Slika 54: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov in valov (Bretschneider) τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu.	114
Slika 55: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov in valov (konstantni vrednosti) τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu.	115

Slika 56: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (Bretschneider) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 300 s.....	116
Slika 57: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 300 s.	117
Slika 58: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (Bretschneider) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 900 s.....	118
Slika 59: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 900 s.	119
Slika 60: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Koprskem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov, valov (Bretschneider) in hitrosti za ladijskim vijakom; 300 s.....	120
Slika 61: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Koprskem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov, valov (konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom; 300 s.....	121
Slika 62: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Koprskem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov, valov (Bretschneider) in hitrosti za ladijskim vijakom; 900 s.....	122
Slika 63: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Koprskem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov, valov (konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom; 900 s.....	123
Slika 64: Merilno mesto; most v Idriji ob Bači.	125
Slika 65: Merilno mesto; most v Idriji ob Bači.	125
Slika 66: ADMP; montiran na trimaranu.	127
Slika 67: Merilnik serije Solitax sc s komunikacijskim vmesnikom SC1000.	127
Slika 68: Merilnik OBS3+.....	128
Slika 69: Merilnik HOBO U20 Water level.	128
Slika 70: Delitev Sredozemskega morja na podobmočja.	130

LIST OF FIGURES

Figure 1: Schematised representation of a diffusing jet from an orifice (adapted from Albertson et al., 1950, pp. 640).	31
Figure 2: Characteristics of the Gaussian normal probability curve (adopted from Albertson et al., 1950, pp. 643).	36
Figure 3: Definition sketch for the zone of flow establishment (adapted from Albertson et al., 1950, pp. 644).	36
Figure 4: Definition sketch for the zone of established flow (adapted from Albertson et al., 1950, pp. 646).	38
Figure 5: Basic structure of the PCFLOW3D model without the biogeochemical module (adapted from Žagar et al., 2007, pp. 67).	54
Figure 6: Biogeochemical module of the PCFLOW3D model (adapted from Žagar et al., 2005, pp. 2393).	55
Figure 7: Local and global coordinate system.....	58
Figure 8: Definition area of the Gulf of Trieste and its depth.....	62
Figure 9: Bulk carrier in full ballast conditions (Perkovič et al., 2011, pp. 69).....	63
Figure 10: Geometry and dimension of bulk carrier (Perkovič et al., 2011, pp. 70).....	63
Figure 11: Ship's path in the Gulf of Trieste (http://www.darrinward.com/lat-long/).	65
Figure 12: Velocity field in the Gulf of Trieste in the surface layer after 3 hours.....	70
Figure 13: Velocity field in the Gulf of Trieste on 11 m depth after 3 hours.	71
Figure 14: Distribution of bottom shear-stress due to currents τ_{abc} in the Gulf of Trieste; bora wind 10 m/s, direction 60°	72
Figure 15: Wave height in the Gulf of Trieste, computed with the model SWAN.....	73
Figure 16: Wave period in the Gulf of Trieste, computed with the model SWAN.....	74
Figure 17: Wave height in the Gulf of Trieste, computed based on Bretschneider's equations.....	75

Figure 18: Wave period in the Gulf of Trieste, computed based on Bretschneider's equations.	76
Figure 19: Distribution of bottom shear-stress due to waves τ_{aubTOT} (SWAN) in the Gulf of Trieste.	77
Figure 20: Distribution of bottom shear-stress due to waves τ_{aubTOT} (Bretschneider) in the Gulf of Trieste.....	78
Figure 21: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Gulf of Trieste; shear stress due to waves (SWAN).....	79
Figure 22: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Gulf of Trieste; strižne napetosti zaradi vpliva valov (Bretschneider).	80
Figure 23: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 70 s.....	81
Figure 24: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 70 s; cut-out - enlarged.	82
Figure 25: Velocity field behind ship's propeller; vectors; 70 s; cut-out - enlarged.....	83
Figure 26: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 770 s.....	84
Figure 27: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 770 s; cut-out - enlarged.	85
Figure 28: Velocity field behind ship's propeller; vectors; 770 s; cut-out - enlarged.....	86
Figure 29: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (70 s).	87
Figure 30: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (70 s); cut-out - enlarged.....	88
Figure 31: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (770 s).	89
Figure 32: Distribution of bottom shear-stress due to currents and waves (SWAN) τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste.....	90
Figure 33: Suspended sediment cocentration Sd_{bot} at the bottom (SWAN) in the Gulf of Trieste; shear stress due to currents and waves (SWAN).....	91
Figure 34: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (SWAN) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (70 s).	92
Figure 35 : Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (SWAN) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (770 s).	93

Figure 36: Definition area of the Bay of Koper and its depth.	94
Figure 37: Ship's path in the Koper Bay (http://www.darrinward.com/lat-long/).	95
Figure 38: Velocity field in the Koper Bay in the surface layer after 3 hours.	98
Figure 39: Velocity field in the Koper Bay on 11 m depth after 3 hours.	99
Figure 40: Distribution of bottom shear-stress due to currents τ_{aubc} in the Koper Bay.	100
Figure 41: Wave hight in the Koper Bay, computed based on Bretschneider's formulas.	101
Figure 42: Wave period in the Koper Bay, computed based on Bretschneider's formulas.	102
Figure 43: Distribution of bottom shear-stress due to waves τ_{aubTOT} (Bretschneider) in the Koper Bay.	103
Figure 44: Distribution of bottom shear-stress due to waves τ_{aubTOT} (constant values) in the Koper Bay.	104
Figure 45: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 300 s.	105
Figure 46: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 300 s; cut-out - enlarged.	106
Figure 47: Velocity field behind ship's propeller; vectors; 300 s.	107
Figure 48: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 900 s.	108
Figure 49: Velocity field behind ship's propeller; vectors; 900 s.	109
Figure 50: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 300 s.	110
Figure 51: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; due to velocities behind ship's propeller; 300 s.	111
Figure 52: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 900 s.	112
Figure 53: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; due to velocities behind ship's propeller; 900 s.	113
Figure 54: Distribution of bottom shear-stress due to currents and waves (Bretschneider) τ_{aubTOT} in the Koper Bay.	114

Figure 55: Distribution of bottom shear-stress due to currents and waves (constant values) τ_{aubTOT} in the Koper Bay.....	115
Figure 56: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (Bretschneider) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 300 s.	116
Figure 57: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (constant values) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 300 s.	117
Figure 58: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (Bretschneider) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 900 s.	118
Figure 59: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (constant values) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 900 s.	119
Figure 60: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; shear stress due to currents, waves (Bretschneider) and velocities behind ship's propeller; 300 s.....	120
Figure 61: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; shear stress due to currents, waves (constant values) and velocities behind ship's propeller; 300 s.	121
Figure 62: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; shear stress due to currents, waves (Bretschneider) and velocities behind ship's propeller; 900 s.....	122
Figure 63: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; shear stress due to currents, waves (constant values) and velocities behind ship's propeller; 900 s.	123
Figure 64: Measuring site; bridge in "Idrija pri Bači".....	125
Figure 65: Measuring site; bridge in "Idrija pri Bači".....	125
Figure 66: ADCP; mounted on the threemaran.	127
Figure 67: Measuring instrument from Solitax sc series, with the communications device SC1000.	127
Figure 68: Measuring instrument OBS3+.	128
Figure 69: Measuring instrument HOBO U20 Water level.....	128
Figure 70: Division of Mediterranean sea into subareas.	130

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Podatki o ladji.....	64
Preglednica 2: Podatki o plovbi v Koprskem zalivu (Perkovič; osebni vir).....	66
Preglednica 3: Parametri plovbe.....	67
Preglednica 4: Parametri ladje.....	96
Preglednica 5 : Maksimalne strižne napetosti pri različnih vplivnih dejavniki, v različnih časovnih korakih.....	122
Preglednica 6: Prostorska razporeditev posameznih jakosti vetra (12 urna) za posamezna območja Sredozemlja; pomlad.....	131
Preglednica 7: Prostorska razporeditev posameznih jakosti vetra (12 urna) za posamezna območja Sredozemlja; poletje.....	132
Preglednica 8: Prostorska razporeditev posameznih jakosti vetra (12 urna) za posamezna območja Sredozemlja; jesen.....	132
Preglednica 9: Prostorska razporeditev posameznih jakosti vetra (12 urna) za posamezna območja Sredozemlja; zima.....	133
Preglednica 10: Povprečne vrednosti DGM , glede na sezono in območje; z avtorji (N =število meritev).	135
Preglednica 11: Povprečne vrednosti T_w, Sc_{Hg}, H' in DGM za posamezna območja Sredozemlja; pomlad.....	135
Preglednica 12: Povprečne vrednosti T_w, Sc_{Hg}, H' in DGM za posamezna območja Sredozemlja; poletje.....	136
Preglednica 13: Povprečne vrednosti T_w, Sc_{Hg}, H' in DGM za posamezna območja Sredozemlja; jesen.....	136
Preglednica 14: Povprečne vrednosti T_w, Sc_{Hg}, H' in DGM za posamezna območja Sredozemlja; zima.....	136
Preglednica 15: Izračunana izmenjava živega srebra med vodo in zrakom v Sredozemlju.....	137

Preglednica 16: Letni vtoki in iztoki živega srebra v Sredozemlju. 138

LIST OF TABLES

Table 1: Ship's data.....	64
Table 2: Shipping data in the Bay of Koper (Perkovič; personal communication).....	66
Table 3: Shipping parameters.....	67
Table 4: Ship's parameters.....	96
Table 5: Maximum shear stresses due to different forcing factors, in different time steps.....	122
Table 6: Spatial distribution of wind strenght (12 hours) for subareas of the Mediterranean; spring.	131
Table 7 : Spatial distribution of wind strenght (12 hours) for subareas of the Mediterranean; summer.	132
Table 8: Spatial distribution of wind strenght (12 hours) for subareas of the Mediterranean; autumn.	132
Table 9: Spatial distribution of wind strenght (12 hours) for subareas of the Mediterranean; winter.	133
Table 10: Average values of DGM , according to season and region; with authors (N=number of measurements).....	135
Table 11: Average values of Tw, Sc_{Hg}, H' and DGM for subareas of the Mediterranean; spring.	135
Table 12: Average values of Tw, Sc_{Hg}, H' and DGM for subareas of the Mediterranean; summer. ..	136
Table 13: Average values of Tw, Sc_{Hg}, H' and DGM for subareas of the Mediterranean; autumn. ..	136
Table 14: Average values of Tw, Sc_{Hg}, H' and DGM for subareas of the Mediterranean; winter.	136
Table 15: Calculated evasion of Mercury in the Mediterranean.	137
Table 16: Annual inflows and outflows of Mercury in the Mediterranean.	138

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

a	referenčna globina nad dnom
A	faktor, ki ga dobimo iz Weibullove porazdelitve hitrosti vetra nad oceanom
$A_{d,p}$	vršna amplituda valovanja
APd	aplicirana moč
ADMP	akustični Dopplerjev merilnik hitrosti
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
b	eksponent pretočne krivulje
B	Schmidtovo število CO ₂ v morski vodi pri 20°C
BGK	biogeokemični modul
c_b	koncentracija rinjenih plavin
c_p	specifična toplota pro konstantnem tlaku
c_x	hitrost propagacije v x smeri
c_y	hitrost propagacije v y smeri
c_σ	hitrost propagacije v σ prostoru
c_θ	hitrost propagacije v θ prostoru
C	empirična konstanta
C'	Chezy-jev koeficient, odvisen od zrnivosti plavin
C_a	referenčna koncentracija
C_{ae}	ravnotežna koncentracija
C_{bot}	koncentracija plavin ob dnu
C_s	koncentracija lebdečih plavin

CFD	računska dinamika tekočin (Computational Fluid Dynamics)
CO ₂	ogljikov dioksid
D_*	parameter zrna
D_h	koeficient horizontalne turbulentne difuzije
D_p	premer ladijskega vijaka
D_s	reprezentativni premer zrna
D_v	koeficient vertikalne turbulentne difuzije
D_0	premer krožnega turbulentnega curka oziroma odprtine
D_{16}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 16 % zrn
D_{50}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 50 % zrn
D_{84}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 84 % zrn
D_{90}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 90 % zrn
<i>DGM</i>	raztopljeno plinasto živo srebro (dissolved gaseous mercury)
<i>DMHg ((CH₃)₂Hg)</i>	dimetil živo srebro
$E(\sigma, \theta)$	gostota energije
f	Coriolisov parameter
f_w	koeficient trenja
Fe	privetrišče (fetch length)
FGG	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
g	gravitacijski pospešek
GEM	model izmenjave plinov (gas exchange model)
h	globina vode/debelina obravnavanega sloja
h_a	gladina vode v površinskem sloju
H	celotna globine vode

H'	Henryjeva konstanta za elementarno živo srebro
H_w	višina vala
Hg	živo srebro
Hg^0	elementarno živo srebro
Hg^{2+}	nemetilirano živo srebro
HD	hidrodinamični modul
HDG	usmerjenost ladje (heading)
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
k_s	hrapavost dna
k_w	hitrost izmenjave plinov
K_T	koeficient potiska vijaka
K_r	koeficient reakcije med reaktantom in produktom
L'	valovna dolžina
LAT/LON	geografska širina oziroma dolžina
M_i^a	masa vtoka oziroma iztoka v/iz posamezne celice zaradi advekcije na stični ploskvi i med opazovanima celicama
M_i^d	masa vtoka oziroma iztoka v/iz posamezne celice ob dnu zaradi difuzije
M_T^S	masa vtoka v posamezno celico zaradi usedanja delcev
M_r	masa reaktanta
M_w	molarna teža vode
MODB	Mediterranean Oceanic Database
$MMHg (CH_3Hg^+)$	monometil živo srebro
n	hitrost rotacije vijaka
n_g	Manningov koeficient hrapavosti

N	število horizontalnih slojev, gledano v z smeri
N_h	koeficient horizontalne turbulentne viskoznosti
N_v	koeficient vertikalne turbulentne viskoznosti
$N(\sigma, \theta)$	gostota akcije
NIB	Nacionalni inštitut za biologijo
p	tlak zunaj curka
p_a	atmosferski tlak
P	inštalirana moč motorja
PM	Pierson – Moskowitz
PNJ	Pierson-Neumann-James
q_s	pretok sedimentov na meter širine
Q	pretok vode
r	radij od izvora (v ravnini vijaka)
R	plinska konstanta
R_b	hidravlični radij po Vanoni-Brooksu
s	specifična gostota
S	naklon
$S(\sigma, \theta)$	izvorni člen, kar se tiče gostote energije
$S_{in}(\sigma, \theta)$	rast valov zaradi vetra
$S_{nl3}(\sigma, \theta)$	nelinearen transfer energije valov zaradi tri valovne interakcije
$S_{nl4}(\sigma, \theta)$	nelinearen transfer energije valov zaradi štiri valovne interakcije
$S_{ds,w}(\sigma, \theta)$	razpad valov zaradi penjenja
$S_{ds,b}(\sigma, \theta)$	trenje ob dnu
$S_{ds,br}(\sigma, \theta)$	lom valov induciran z globino

Sc_{Hg}	Schmidtovo število živega srebra
Sd_{bot}	koncentracija lebdečih plavin ob dnu
SMB	Sverdrup-Munk-Bretschneider
SOG	hitrost ladje (speed over ground)
SRC	izvorno/ponorni člen
ST	sedimentacijski modul
SWAN	valovni model (Simulating Waves Nearshore)
t	čas
T	transportni parameter
T_r	reducirana perioda valovanja
T_w	temperatura vode na površini v stopinjah Kelvina
T_w	perioda valovanja
TD	transportno-disperzijski modul
TGM	živo srebro v zraku (total gaseous mercury)
u	komponenta hitrosti v smeri x
\bar{u}	povprečna hitrost po vertikali
u_b	hitrost delcev rinjenih plavin
\bar{u}_a	efektivna hitrost delcev
u_*	skupna strižna hitrost ob dnu
$u_{*,cr}$	kritična strižna hitrost ob dnu
$u_{b,w}$	strižna hitrost ob dnu
$u_{b,w,x}$	strižna hitrost ob dnu v smeri x
$u_{b,w,y}$	strižna hitrost ob dnu v smeri y
$u_{*,x}$	strižna hitrost v smeri x

$u_{*,y}$	strižna hitrost v smeri y
u'_*	strižna hitrost ob dnu
u'_{*x}	strižna hitrost ob dnu, v x smeri
u'_{*y}	strižna hitrost ob dnu v y smeri
$u_{*,crs}$	kritična strižna hitrost ob dnu za začetek suspenzije
u_w	hitrost vetra
u_{10}	hitrost vetra normalizirana na višino 10 m nad morjem
U	po vertikali povprečena hitrosti v smeri x
$U_{d,p}$	vršna hitrost valovanja
v	komponenta hitrosti v smeri y
v_x	hitrost v smeri gibanja
v_r	srednja hitrost po času, v smeri r
v_z	srednja hitrost po času, v smeri z
v_ϕ	srednja hitrost po času, v smeri ϕ
v'_r	fluktuacija hitrosti, v smeri r
v'_z	fluktuacija hitrosti, v smeri z
v'_ϕ	fluktuacija hitrosti, v smeri ϕ
v_{max}	hitrost na osi toka
$v_{b,max}$	maksimalna hitrost za ladijskim vijakom ob dnu
V	po vertikali povprečena hitrosti v smeri y
V_0	iztočna hitrost
w_b	komponenta hitrosti v smeri z ob dnu kontrolnega volumna
w_s	hitrost usedanja delcev
w_t	komponenta hitrosti v smeri z na vrhu kontrolnega volumna

\tilde{w}	intenziteta vertikalne turbulence
w'	vertikalna komponenta hitrosti vrtincev
WAM	wave modelling
x	osna razdalja od izvora (od ravnine vijaka)
x_0	razdalja od odprtine do konca območja oblikovanja toka
z	vertikalna koordinata
z_b	globina (razdalja vijaka do dna)
z_s	višina vodne gladine
Z	parameter suspenzije
Z'	modificiran parameter suspenzije
α	konstanta
β	koeficient povezan z difuzijo sedimentnih delcev
δ_b	višina saltacij
ϵ_f	koeficienta mešanja tekočine oziroma difuzije
ϵ_s	mešanje oziroma difuzija delcev plavin
ζ	kota gladine v obravnavanem času
κ	Von Kármánova konstanta
μ	dinamična viskoznost tekočine
ν	kinematična viskoznost
ρ_s	gostota plavin
ρ_w	gostota vode
σ	standardna deviacija hitrosti
τ	turbulentna strižna napetost

τ_{aubC}	strižna napetost ob dnu zaradi tokov
τ_{aubW}	strižna napetost ob dnu zaradi valov
τ_{aubTOT}	skupna strižna napetost ob dnu
τ_{bx}	strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v smeri x
τ_{by}	strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v smeri y
$\tau_{b,w}$	strižne napetosti ob dnu
τ_{wx}	strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v smeri x
τ_{wy}	strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v smeri y
φ	poroznost
ϕ	faktor, ki opisuje vpliv delcev plavin na strukturo turbulence v tekočini
Δ	višine oblik dna
ΔM_i	sprememba mase produkta (Hg^0 , Hg^{2+} ali CH_3Hg^+) v danem Δt
Φ	kot med smerjo valov in toka

1 UVOD

1.1 SPLOŠNA PROBLEMATIKA

Aktivno kroženje onesnažil med posameznimi okoljskimi segmenti predstavlja velik okoljski problem, saj se transport onesnažil pogosto vrši tudi izven območja njihovih primarnih in sekundarnih virov. S stališča ogroženosti okolja velja za enega izmed največjih svetovnih problemov onesnaženost s toksičnimi kovinami. Med njimi sta najnevarnejši svinec in živo srebro zaradi množične uporabe in visoke strupenosti. Onesnažila so lahko med transportom vezana tudi na delce plavin in zaradi sorpcijskih procesov prehajajo v raztopino ali obratno. Poleg tega je zelo pomembna izmenjava volatilnih onesnažil med vodo in zrakom (Cossa in sod., 1997; Gårdfeldt in sod., 2003; Žagar in sod., 2007; 2005; Andersson in sod., 2011; 2007).

Porazdelitev lebdečih plavin v vodnem stolpcu, njihovo usedanje in resuspendiranje imajo pri modeliranju transporta, disperzije in procesov pretvorb živega srebra v vodnem okolju pomembno vlogo (Rajar in Četina, 1997), saj se večina živega srebra pojavlja v partikularni obliki, torej vezano na suspendirane delce (Širca, 1996; Horvat in sod., 1999). Cirkulacija (tokovi) vode in valovi pomembno vplivajo na privzdigovanje (resuspendiranje) in, predvsem na območju blizu dna vodnih teles, tudi na transport sedimenta. Turbulentni tokovi povzročajo turbulentno strižno napetost τ_t , valovi pa oscilatorno gibanje vode ob dnu. Tako zaradi tokov kot vpliva valov se na plitvih območjih povečajo pridnene strižne napetosti, ki povzročajo privzdigovanje in transport sedimentov (Žagar, 1999; Rajar in sod., 2000; Rajar in sod., 2004; Wang in sod., 2007; Wang in Pinaridi, 2002). V plitvih vodah so pogosto prisotni relativno močni tokovi, zaradi medsebojnega vpliva pa se spremenijo značilnosti valovanja in hitrosti tokov ter posledično tudi pridnene strižne napetosti. Širjenje sedimentov v morju je odvisno od cirkulacije, privzdigovanje (resuspendiranje) pa od kombiniranih strižnih napetosti zaradi toka in valov (Wang in sod., 2007). Pri sedimentu ločimo tri oblike gibanja delcev, kotaljenje, poskakovanje in gibanje suspendiranih delcev. Prva dva procesa imenujemo premeščanje rinjenih plavin, zadnjega pa transport lebdečih plavin. Z vidika prehajanja onesnažil med posameznimi okoljskimi segmenti je zanimivo predvsem gibanje lebdečih plavin, saj se premeščanje rinjenih plavin vrši tik ob dnu in je torej količina sproščenega onesnažila v vodnem stolpcu običajno zanemarljivo majhna. Gibanje delcev nastopi, ko je trenutna sila tekočine na delec večja od trenutne sile upora, ki je povezana s težo potopljenega delca in koeficientom trenja. Pri turbulentnih pogojih toka se pojavljajo krajevne in časovne fluktuacije hitrosti. Ob hkratnem upoštevanju naključne velikosti, oblike in pozicije delca začetek gibanja torej ni zgolj determinističen, ampak tudi stohastičen proces. Z

večanjem pridnene strižne hitrosti se (sprva kotaleči) delci gibljejo vzdolž dna z bolj ali manj stalnimi saltacijami (poskoki), ko pa pridnene strižne hitrosti narastejo do vrednosti primerljivih s hitrostjo usedanja delca (w_s), posamezni delci preidejo v suspenzijo. Bagnold (1966) je ugotovil, da delci ostanejo v suspenziji, če imajo turbulentni vrtinci prevladujočo vertikalno komponento hitrosti, ki presega vrednost hitrosti usedanja delcev.

Pri proučevanju naravnih vodotokov je potrebno poznavanje transporta sedimentov, saj so aluvialne struge načrtovane za prenos določenega pretoka vode in sedimentov. Pri določanju količine lebdečih plavin v reki se pogosto uporabljajo sedimentne pretočne krivulje, kjer je ugotovljen efekt histereze, kar pomeni, da so koncentracije lebdečih plavin različne pri enakih pretokih ob naraščajoči oziroma padajoči fazi poplavnega hidrograma (Ahanger in sod., 2008; Lopes in Ffolliot, 1993; Browlie, 1981). Pojav histereze je bil že večkrat proučevan, vendar še ni ustreznih računskih metod za izračun pretoka lebdečih plavin pri nestalnih pogojih toka, prav zaradi tega je potrebno problem reševati s pomočjo meritev. Onesnaženost okolja z živim srebrom je v bližini virov, npr. rudnikov, še vedno pereč problem. Koncentracije v sedimentu na dnu in lebdečih plavinah so v porečju reke Idrijce in v Tržaškem zalivu zelo visoke in ne kažejo znatnega znižanja, čeprav idrijski rudnik ne deluje že dve desetletji. V sedimentu in na aluvialnih ravninah reke Idrijce, kjer se izvajajo meritve, so kljub zaprtju idrijskega rudnika koncentracije živega srebra še vedno visoke (Gosar, 1997; Biester in sod., 2000; Horvat in sod., 2003a; Ogrinc in sod., 2007), visokovodni dogodki pa prispevajo kar 80 % k transportu sedimentov in živega srebra (Žagar, 1999). Pri tem se je potrebno zavedati, da je poznavanje sedimentne pretočne krivulje osnova, na kateri temelji račun transporta plavin in živega srebra. Enoznačne povezave med pretokom vode in plavin lahko pomembno prispevajo k napačnim izračunom skupne količine transportiranih sedimentov in onesnažil.

V priobalnem morju so mehanizmi privzdigovanja in transporta isti, drugačni pa so vzroki, ki do obeh pojavov privedejo. Cirkulacija v Tržaškem zalivu, ki vpliva na širjenje sedimentov, je pogojena s sinoptičnimi vremenskimi razmerami in s cirkulacijo severnega Jadrana (Zavatarelli in Pinardi, 2003), kjer je energijsko najbolj izdaten vir cirkulacije burja. Med burjo je pri dnu prisoten vhodni tok v vseh letnih časih (Malačič in Petelin, 2009). Tokovi med močno burjo nad stabilno stratificirano vodno maso povzročajo dvig vode blizu vzhodnega, zaprtega roba Tržaškega zaliva, vodni stolpec pa se v nekaj urah skoraj popolnoma premeša (Querin in sod., 2007). V Tržaškem zalivu so bile izvedene simulacije cirkulacije (Četina, 1992), kot tudi disperzije, transporta sedimenta in izmenjave živega srebra med vodo in zrakom ter med vodo in sedimentom (Širca in sod., 1996; Rajar in sod., 2004; Žagar, 1999; Ramšak, 2007; Martinčič, 2011). Narejena je bila študija primerjave dveh modelov (PCFLOW3D in ECOMSED), ki imata različni zasnovi, uporabljata različne robne pogoje, resuspendiranje, pridnene strižne napetosti in širjenje sedimenta pa izračunavata po Van Rijnu (1999). Rezultati kažejo razmeroma dobro ujemanje simulacij cirkulacije, medtem ko je ujemanje rezultatov simulacij transporta sedimentov nekoliko slabše (Žagar in sod., 2012).

Valove v priobalnem območju je neprimerno težje napovedati kot valove na odprtem morju, še posebej v polodprtih zalivih z zapleteno geografijo območja in topografijo dna. V takih primerih se dobro obnesejo samo kompleksni modeli ob dovolj natančni napovedi meteoroloških pogojev. Najpogosteje je v uporabi model SWAN (Delft University of Technology, Nizozemska), primarno razvit za napovedi valov v plitvi vodi (Booij in sod., 1999; Ris in sod., 1999). SWAN upošteva Stokesov tok, interakcije med valovi in vpliv tokov na valove. V Tržaškem zalivu je bil iz podatkov za veter, tokove in valove, ki se vzorčijo na boji Morske Biološke Postaje Piran, razvit tudi model valovanja na osnovi nevronske mreže (Sirnik 2011). Prednost slednjega pred kompleksnimi modeli, kot je npr. SWAN, sta predvsem preprosta uporaba in možnost neposredne napovedi izhodnih spremenljivk iz vrednosti meteoroloških in hidrodinamičnih količin s spletne strani ARSO. Model na osnovi nevronske mreže pa še ni bil preverjen v dovolj dejanskih vremenskih situacijah, da bi ga smeli brez zadržkov uporabljati kot orodje za napovedovanje vetrnih valov.

V notranjosti plitkih zalivov je lahko pomorski promet (ladijski manevri in asistenca vlačilcev) poglaviten dejavnik za resuspendiranje sedimentov, ki prispeva k visokim koncentracijam suspendirane snovi bolj kot tokovi in valovi v nevihtnem vremenu (Žagar in sod., 2012). Če predpostavimo, da se curek za ladijskim vijakom širi v neomejeno mirujočo tekočino, potem na robu izvora zaradi skoka hitrosti prihaja do velikih strižnih napetosti, ki povzročijo turbulenten tok, ki se širi v mirujočo tekočino. Zaradi onesnaženosti z nikljem je pomembno poznavanje gibanja privzdignjenega sedimenta v Koprskem zalivu in privzdigovanje z živim srebrom onesnaženega sedimenta v osrednjem in severnem delu Tržaškega zaliva (Covelli in sod., 2001). Ladijski promet v severnem Jadranu zaradi ekonomskega razvoja stalno narašča, predvsem se večja število kontejnerskih ladij, ladij Ro-Ro in potniških ladij, pri čemer želijo pristanišča povečati tudi njihovo oskrbovanje (Luka Koper, 2010; PS Prostor, 2009). Leta 2005 je bilo celotno število plovil, ki so prispela v Trst okoli 3800, v Luko Koper pa okoli 2600 (Perkovič in sod., 2008). Promet v pristaniščih naj bi se povečal, po najbolj optimističnih napovedih celo podvojil, saj se pristanišča povečujejo s priveznimi, skladiščnimi in pretovornimi sredstvi (Perkovič in sod., 2011).

Gibanje vode tako v celinskem kot morskem okolju vpliva na potopljeno vegetacijo (makrofite), ki prav tako vplivajo na gibanje vode in posledično na dinamiko sedimentov, tako na območju vegetacije ob dnu, kot izven tega območja (Madsen in sod., 2001). Pri proučevanju medsebojnega vpliva med gibanjem vode, dinamiko sedimentov in potopljeno vegetacijo obravnavamo štiri področja, vpliv vodnega gibanja na vegetacijo, vpliv vegetacije na gibanje vode, vpliv vegetacije na sedimentacijo znotraj z vegetacijo poraščenih območij in odnos med resuspendiranjem sedimentov in vegetacijo. Vegetacija zniža hitrost toka tako v morju kot v rekah in potokih (Madsen in sod. 2001), poleg tega pa prihaja tudi do znižanja valovne energije v jezerih in morju, kar na eni strani povzroči povečanje stopnje usedanja znotraj območij z vegetacijo na dnu, na drugi strani pa zmanjša potencialno resuspendiranje. Povečana stopnja usedanja in zmanjšana stopnja resuspendiranja zmanjšata kalnost

vode in povečata dostopnost svetlobe, kar povzroči nadaljnjo razmnoževanje in rast makrofitov (Doyle, 2000).

Poleg prenosa sedimentov v suspenzijo predstavlja pomemben tok snovi v vertikalni smeri tudi difuzija na meji med sedimentom in vodo, ki se pogosto opisuje z enostavno oziroma Fickovo difuzijo. Za določanje difuzijskih tokov med sedimentom in vodo se običajno uporablja prirejena oblika 1. Fickovega zakona (Covelli in sod., 1999; Ogrinc in sod., 2007), v kateri je upoštevana tudi poroznost φ . Difuzijski tokovi v Tržaškem zalivu so bili izračunani na podlagi meritev koncentracij celokupnega raztopljenega živega srebra v pornih vodah sedimenta, kjer je bilo opazno izrazito sezonsko spreminjanje teh vrednosti (Covelli in sod., 1999). Enačbe za določanje difuzijskih tokov živega srebra med sedimentom in vodo so bile vgrajene tudi v matematični model PCFLOW3D, ki tokove računa na osnovi koncentracij živega srebra v pornih vodah sedimenta in v sloju vode ob dnu (Martinčič, 2011). Na izmenjavo onesnažil med sedimentom in vodo ne vpliva samo difuzija, ampak tudi drugi procesi, ki vplivajo na povečanje oziroma zmanjšanje bentoških tokov med sedimenti in vodo (npr. kompaktacija in konsolidacija sedimenta ter bioturbacija).

Zakovitosti prehajanja med posameznimi okoljskimi segmenti veljajo za vsa onesnažila, zaradi velike sposobnosti prehajanja med segmenti, toksičnosti in značaja globalnega onesnažila pa je na pomembnem mestu živo srebro (Hg), ki je bilo preučevano v številnih dosedanjih študijah, ki so se osredotočale na vpliv živega srebra na človeka (Bernhard, 1988; UNEP-MAP, 1986, 1998, 2001). Zaradi biokemijskih pretvorb ter hlapljivosti večine oblik živega srebra velik del le tega aktivno kroži med oceani, ozračjem in kopnim (Cossa in sod., 1996; Mason in sod., 1994; Fitzgerald in Mason, 1996; Rolfhus in Fitzgerald, 2001; Gårdfeldt in sod., 2003; Andersson in sod., 2007, 2011; Žagar in sod., 2007; Rajar in sod., 2007). Morja, jezera in reke pokrivajo več kot 70 % zemeljskega površja, zaradi česar prejmejo največji del tega onesnaženja (odlaganje oz. depozicija). Poleg klasične kovinske oblike se živo srebro v naravi nahaja tudi v obliki ionov in organskih ter anorganskih spojin, Hg^0 (elementarno živo srebro), Hg^{2+} (nemetilirano živo srebro), CH_3Hg^+ ($MMHg$ – monometil živo srebro) in $(CH_3)_2Hg$ ($DMHg$ - dimetil živo srebro), ki aktivno krožijo med vodo, kopnim in ozračjem (Horvat in sod., 2003; Knap, 2004). Za ljudi je najbolj nevarna oblika $MMHg$ (mono-metil živo srebro), za katero smo najbolj dovzetni pri prehranjevanju z morskimi ribami in ribjimi izdelki (Rolfhus in Fitzgerald, 1995). Ciljni organ zastrupitve z živim srebrom oziroma z njegovo toksično obliko $MMHg$ je osrednji živčni sistem. Svetovna javnost se je nevarnosti zastrupitve z živim srebrom zavedela šele po katastrofi v mestu Minamata na Japonskem okoli leta 1957, ko je umrlo več kot 1200 ljudi, predvsem ribičev in njihovih družin, 13000 pa jih je ostalo trajno prizadetih (Irukayama, 1966; Rajar in sod., 2004). Prav zaradi tega razloga je, potrebno za določitev vpliva $MMHg$ na ljudi in ekosistem poznati porazdelitev, transport in dinamiko živega srebra oziroma $MMHg$ v vodnih ekosistemih (Horvat in sod., 1999; WHO-IPCS, 1990, 1991; Porcela in sod., 1995).

Vnos živega srebra v okolje poteka po naravni in antropogeni poti. Naravni vnos poteka z razplinjanjem zemeljske skorje, vulkanskimi emisijami in izhlapevanjem iz površinskih vod ter cinabaritnih območij. Glavni antropogeni viri vnosa živega srebra v okolje so rudarjenje in predelovanje živosrebrove rude, izgorevanje fosilnih goriv, industrijska poraba in uporaba živega srebra za amalgamacijo pri pridobivanju zlata in srebra. Tako naravno kot antropogeno kroženje živega srebra sta odvisna od izmenjave z ozračjem. V ozračju pride do fizikalnih in kemičnih sprememb, nato pa se živo srebro z mokrim ali suhim odlaganjem izloči iz zraka. Količina izpuščenega antropogenega živega srebra se je močno povečala med in po industrijski revoluciji. Ocenjen izpust živega srebra v atmosfero je 8900 ton/leto, od tega iz naravnih virov 80 – 600 ton/leto iz antropogenih virov pa 2000 ton/leto (Mason in sod., 2012). Elementarno živo srebro, kot tisto vezano na delce, se lahko transportirata daleč od vira, preden pride do depozicije (Pirrone in sod., 2003). Večina površinskih voda je zaradi slabe topnosti nasičena z raztopljenim plinastim živim srebrom (*DGM* – dissolved gaseous mercury) (Schroeder in Munthe, 1998). Del *DGM* se z morske površine vrne nazaj v atmosfero; ocenjeno je bilo, da emisija živega srebra iz oceana prispeva 96 % (2000 - 2900 ton/leto) k skupni emisiji živega srebra iz površinskih vod v atmosfero (Mason in sod., 2012; UNEP/MAP 2013). Vidimo torej lahko, da predstavlja izmenjava živega srebra med vodo in zrakom (evasion) pomemben del biogeokemičnega kroženja živega srebra in da oceani predstavljajo velik sekundarni vir atmosferskega živega srebra. Poleg tega izmenjava med vodo in zrakom predstavlja največji ponor površinskega oceanskega živega srebra (Mason in Gill, 2005). Stopnja izmenjave živega srebra med vodo in zrakom je odvisna od razmer na določenem območju, tako za plitva območja, kot je Sredozemsko morje, velja, da je stopnja izmenjave visoka in znaša okrog 60 – 190 ng/m²/d (Gårdfeldt in sod., 2003; Andersson in sod., 2007; UNEP/MAP 2013). Tok živega srebra z morske površine je odvisen od formacije *DGM*, ki prehaja iz vode v atmosfero, koncentracije celokupnega plinastega živega srebra *TGM* (total gaseous mercury) v zraku in oceanografskih in atmosferskih parametrov, kot so hitrost vetra, gostota vode, temperatura in slanost.

Poleg prehajanja med sedimentom in vodo se hlapna onesnažila izmenjujejo tudi med vodo in zrakom (evasion), kar lahko opišemo z modeli izmenjave plinov (Gas exchange models - GEM). Prvega je na podlagi poskusov razvil Wannikhof (1992), pogosto pa se uporablja tudi model Nightingale in sod. (2000). Tokovi živega srebra med vodo in zrakom se merijo z uporabo plinske komore (Andersson in sod., 2007; Ferrara in sod., 2000; Gårdfeldt in sod., 2003) in kontinuiranim ravnotežnim sistemom, ki temelji na principu obratnega toka (Andersson in sod., 2008) ter izračunavajo s pomočjo že omenjenih modelov izmenjave plinov, ki imajo različno parametrizacijo hitrosti izmenjave plinov. Modeli izmenjave plinov so že bili vključeni v atmosferske in vodne matematične modele, ki so zmožni izračuna izmenjave živega srebra prek morske gladine (Hedgecock in sod., 2005; Kallos in sod., 2001; Žagar in sod., 2007). Količina prehajanja živega srebra med vodo in zrakom v Sredozemlju je najpomembnejši člen masne bilance Hg v Sredozemskem morju (Rajar in sod., 2007). Primerjava med

računi pa kaže na razmeroma slabo poznavanje posameznih členov masne bilance, saj so odstopanja precejšnja – znašajo do 40 t oz. 50 % celotne količine izmenjave (Andersson in sod., 2007; Rajar in sod., 2007; Žagar in sod., 2007). Napake lahko povzročajo napačne predpostavke pri modeliranju ali pa so posledica kemijskih procesov tik nad morskno gladino, ki še niso povsem raziskani. Eden takšnih mehanizmov je lahko reakcija med bromom in živim srebrom v mejni plasti med vodo in zrakom (Holmes in sod., 2010; Soerensen in sod., 2010). V tem primeru je večje izhajanje živega srebra iz vode lahko posledica večje depozicije reaktivnega živega srebra, ki je posledica vezave živega srebra na halogene elemente v mejni plasti in takojšnjega usedanja ob hkratnih svetlobno-induciranih procesih redukcije v površinski vodni plasti.

Številne študije na območju porečja Idrijce in Soče ter Tržaškega zaliva in celotnega Sredozemskega morja kažejo poleg prehajanja med okoljskimi segmenti tudi veliko sposobnost pretvorb, ustrezna orodja za poglobljeno poznavanje in simulacijo teh procesov pa so še v razvoju (Sirnik, 2011; Horvat in sod., 1999,; Horvat in sod., 2003; Horvat in sod., 2003a; Horvat in sod., 2003b; Žagar in sod., 2007; Rajar in sod., 2007; Kotnik in sod., 2007; Andersson in sod., 2007).

1.2 DOSEDANJE DELO

Modeliranje z modelom PCFLOW3D. Za modeliranje živega srebra v naravnem okolju je bilo uporabljenih že več nič- ali eno-dimenzijskih modelov, ki dajejo zadovoljive rezultate v rekah in nekaterih jezerih v vertikalni smeri. Dober primer 1D modela je bil razvit in uporabljen za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v reki Carson v Nevadi (Caroll in sod., 2000, Caroll in Warwick, 2001). Omenjeni model upošteva tako fizikalne procese transporta oz. disperzije kot tudi procese pretvorbe živega srebra. Model je bil v nekoliko spremenjeni in dopolnjeni obliki uporabljen tudi za modeliranja transporta in procesov pretvorb na rekah Idrijci in Soči (Žagar in sod., 2006).

Za simulacijo transporta in pretvorb živega srebra v Tržaškem zalivu je bil leta 1996 na FGG izdelan dvodimenzionalni stacionarni matematični model STATRIM, ki je bil eden prvih večdimenzionalnih modelov transporta in pretvorb živega srebra v svetovnem merilu (Širca, 1996). Rezultati dvodimenzionalnega modela so bili vzpodbudni (Širca in Rajar, 1997), vendar je model potreboval nadgraditev. Zato je bil na FGG razvit (Četina, 1992) in nadgrajen (Žagar, 1999; Rajar in sod., 2000; Rajar in sod., 2004; Žagar in sod., 2007) nelinearni tridimenzionalni baroklini matematični model PCFLOW3D. Sprva je bil sestavljen le iz treh modulov in sicer hidrodinamičnega, transportnega in sedimentacijskega modula (Rajar in Četina, 1997). Uporabljen je bil za matematično modeliranje hidromehanike in transporta konservativnih onesnažil v morskem in celinskem okolju, tako je bilo izvedeno 3D modeliranje transporta in disperzije hranila v Bohinjskem jezeru, 2D modeliranje

kroženja živega srebra v Tržaškem zalivu ter dolgotrajne 3D simulacije disperzije radioaktivnih onesnažil v Japonskem morju (Rajar in sod., 1997). Kasneje je bil nadgrajen z novima moduloma za račun transporta lebdečih plavin in živega srebra v morskem okolju, izvedene so bile simulacije več primerov (Žagar, 1999).

Osnovni model, brez dodanega biogeokemičnega (BGK) modula, je bil uporabljen za modeliranje številnih praktičnih problemov disperzije onesnažil (Četina in sod., 2000; Rajar in Četina, 1997; Rajar in sod., 1997; Rajar in Širca, 1996, 1998; Rajar in sod., 2004a, b, c; Rajar in sod., 2000). BGK modul je bil izpopolnjen v okviru projekta MERCYMS za potrebe simulacij transporta in pretvorb živega srebra v Sredozemskem morju (Žagar in sod., 2007).

Model PCFLOW3D je bil kasneje nadgrajen še z dvema pelagičnima modeloma za nižji del prehranjevalne verige in uporabljen za simulacije v Tržaškem zalivu in Sredozemskem morju (Sirnik, 2011). Nadgrajenega modela v izvedenih simulacijah nismo uporabili, saj še ni bil preverjen na dovolj podatkih in ker bi bilo potrebno okoljske spremenljivke modelirati v realnem času in v model vgraditi vse pomembne zunanje pogoje. Zaradi zapletenosti uporabe pelagičnih modelov in znatno daljšega računskega časa smo uporabili model PCFLOW3D, ki ima vgrajen opisani BGK modul.

Modeliranje izmenjave hlapnih snovi med vodo in zrakom. Za določanje povezave med prenosom plinov in hitrostjo vetra ter določanje pretoka plinov med oceanom in zrakom iz razlike med koncentracijami v zraku in vodi je bilo opravljenih veliko raziskav (Deacon, 1980; Wanninkhof, 1992; Nightingale in sod., 2000). Na osnovi poskusov v vetrovniku je bila predpostavljena kvadratna odvisnost med izmenjavo plinov in hitrostjo vetra (Wanninkhof, 1992). Ta odvisnost nima fizikalnega ozadja, vendar pa predstavlja zadovoljivo ujemanje z eksperimentalnimi rezultati. Predlagana odvisnost je pogosto uporabljena v modelih izmenjave plinov in podobna parametrizacijam, ki so jih predlagali drugi avtorji (Liss in Merlivat, 1986; Wanninkhof, 1992; Wanninkhof in McGillis, 1999; McGillis in sod., 2001; Nightingale, 2000).

Izmenjava elementarnega živega srebra predstavlja najpomembnejši del v izmenjavi med vodo in zrakom.

Pri modeliranju volatilnih snovi smo se podrobneje posvetili živemu srebru, nadaljnje modeliranje je opisano za to kovino.

Za račun izmenjave živega srebra med vodo in zrakom je bilo doslej izdelanih več teorij oz. modelov in sicer:

- Dvoslojni model izmenjave plina (Stumm in Morgan, 1981), v katerem predpostavimo dve tanki mirujoči plasti, ena je v vodi, druga pa v zraku, preko katerih prihaja do izmenjave plinov.
- Model izmenjave plinov (Wanninkhof, 1992), kjer je dvoslojni model (Liss in Slater, 1974) dopolnjen z empiričnimi podatki o hitrosti vetra, pridobljenimi s poskusi v vetrovniku. Količina izmenjave plina med vodo in zrakom je odvisna predvsem od hitrosti vetra.
- Model Liss in Merlivat (1986), katerega empirične povezave temeljijo na eksperimentalnih rezultatih (Wanninkhof, 1992).
- Model, ki ga je predlagal Smethie (1985) in temelji na analizi podatkov o izmenjanem plinu, ki so bili dobljeni s pomočjo metode računa deficita radona v ekvatorialnem Atlantiku.

Ti modeli temeljijo na prehajanju plinov neposredno preko površine morja, ki je najlažji za razumevanje in najbolj poznan proces izmenjave.

Pri modelih za izmenjavo plinov med vodo in zrakom bi bilo potrebno upoštevati tudi vpliv mehurčkov, ki ne vplivajo le na izmenjavo plinov, ampak tudi na izmenjavo delcev. Eden od razlogov, da modeli za izmenjavo plinov še niso dovolj izpopolnjeni, je verjetno prav v tem, da je slabo opisan vpliv mehurčkov na izmenjavo (Žabkar, 2002).

Za določitev količine izmenjanega živega srebra med vodo in zrakom je bilo na podlagi naštetih modelov izmenjave plinov opravljenih več študij, ki so dale različne rezultate. Najnižjo količino izmenjanega živega srebra med vodo in zrakom, za Sredozemsko morje, 26 t so napovedali Cossa in sod. (1997) in Cossa in Coquery (2004), vendar je ta vrednost pridobljena samo na podlagi izračunane vrednosti za Zahodno Sredozemlje. Pirrone in sod. (2001) so na podlagi predlaganih vrednosti za poletje (30 t) in zimo (80 t) določili skupno vrednost 110 t. S pomočjo GEM in meritev DGM so Gårdfeldt in sod. (2003) izračunali vrednost 66 ton, ki je precej bližje tudi izračunani vrednosti s pomočjo modela RAMS-Hg (Žagar in sod., 2007), ki znaša za leto 2004 50 t. Napovedi z upoštevanjem zmanjšanja emisij pa nakazujejo upad, saj naj bi izmenjava leta 2010 znašala 47 t, leta 2020 pa 45 t. Rajar in sod. (2007). Andersson in sod. (2007) so na podlagi Nightingalove enačbe predpostavili letno količino izmenjanega živega srebra v Sredozemlju, ki znaša 77 t. Razlike med študijami so posledica uporabe različnih metod, različnih vhodnih podatkov in še ne povsem pojasnjene dinamike kroženja živega srebra v vodnem okolju (Žagar in sod., 2013).

Modeliranje propulzije ladijskega vijaka. Pri modeliranju vpliva propulzije ladijskega vijaka, je potrebno poznati hitrostno polje za ladijskim vijakom, ki je predvsem zaradi erozije morskega dna pomembno pri načrtovanju morskih objektov, prav tako pa je pomembno zaradi resuspendiranja

sedimentov. Curek za ladijskim vijakom je zapletena oblika toka, z osnimi, rotacijsko/tangencialnimi in radialnimi komponentami hitrosti, prav zato je večina študij namenjena razvoju enačb, s katerimi curek podrobno opišemo (Fuehrer in Römisch, 1977; Blaauw in van de Kaa, 1978; Berger in sod., 1981; Verhey, 1983; Hamill, 1987; Kee in sod., 2006; Lam in sod., 2010).

Za proučevanje problemov mehanike tekočin je večkrat uporabljena računska dinamika tekočin (Computational Fluid Dynamics – CFD), ki je relativno cenejša od eksperimentalnih študij (Lam in sod., 2006). Vendar je pri uporabi CFD modelov problem, da ni univerzalnega CFD modela, ki bi ga lahko uporabili v vseh različnih primerih. Največkrat se CFD modeli, brez izboljšave že obstoječih enačb, uporabljajo pri proučevanju ladijskega curka v povezavi s problemom erozije morskega dna (Dargahi, 2003; Brovchenko in sod., 2007).

Osnova za vsa nadaljnja modeliranja ladijskega curka je oblikovana v Albertson in sod. (1950), kjer je za proučevanje hitrostnega polja znotraj curka uporabljen ravninski vodni curek na osnovi osne teorije gibalne količine. Poleg tega je bilo za proučevanje velikosti hitrosti znotraj curka za ladijskim vijakom opravljenih več poskusov na fizičnih modelih. Na podlagi raziskav (Albertson in sod., 1950) se ravninski vodni curek tako deli na dve območji, območje oblikovanja toka in območje že oblikovanega toka.

Uporaba ravninskega curka ob upoštevanju teorije osne gibalne količine ima nekaj pomanjkljivosti, ki so vodile k modificiranju teoretičnih enačb, da bi le-te upoštevale tudi značilnosti ladijskega vijaka. Da bi odpravili napake v obstoječi teoriji, so bile opravljene dodatne raziskave in izpopolnitve enačb (Oebius in Schuster, 1975; Blaauw in van de Kaa, 1978; Verhey, 1983; Robakiewicz, 1978; Hamill, 1987).

Osnova za modeliranje hitrostnega polja za ladijskim vijakom je napovedovanje iztočne hitrosti curka, od katere je odvisna točnost celotnega izračuna. Hamill (1987) je teoretične enačbe teorije osne gibalne količine za račun iztočne hitrosti izboljšal s pomočjo poskusov z rotirajočim ladijskim vijakom namesto z ravninskim vodnim curkom, tako je enačba za iztočno hitrost temeljila na podrobnih meritvah dveh vijakov. Podobne poskuse je na dveh dodatnih vijakih izvedel tudi Stewart (1992) in predlagal enačbe iztočne hitrosti, kjer uporabljeni koeficienti temeljijo na geometrijskih karakteristikah vijakov.

Dolžina območja oblikovanja toka naj bi po Berghu in Cenderwallu (1981) temeljila na porazdelitvenih profilih osne komponente hitrosti v smeri osi curka. Prvi so definirali konec območja oblikovanja toka Albertson in sod. (1950), ki so ugotovili, da porazdelitev hitrosti v vsakem prečnem prerezu znotraj potopljenega curka sledi splošni Gaussovi normalni porazdelitveni funkciji.

Za porazdelitev osne hitrosti na osnovi iztočne hitrosti V_0 je bilo razvitih več enačb (Albertson, 1950; Hamill, 1987; Stewart 1992; McGarvey, 1996).

V območju že oblikovanega toka je predlagano (Albertson in sod., 1950), da je pojevanje maksimalne hitrosti potopljenega curka proporcionalno oddaljenosti od iztočne ravnine. Opravljene so bile nadaljnje preiskave razmerja med upadanjem maksimalne hitrosti in osno razdaljo od vijaka (Fuehrer in Römisch, 1977; Blaauw in van de Kaa, 1978; Berger in sod., 1981; Verhey, 1983). S predlaganim se je strinjala večina raziskovalcev, ki so proučevali curek za ladijskim vijakom (Fuehrer in Römisch, 1977; Hamill 1987; Stewart 1992, McGarvey, 1996).

Vpliv curka oziroma hitrosti za ladijskim vijakom je bil proučevan tudi že v Tržaškem zalivu v okviru študije, ki se je ukvarjala z vplivom ladijskega prometa tako na varnost kot na okolje (Perkovič in sod., 2011). V tej študiji, so bile na podlagi enačb za račun hitrosti za ladijskim vijakom (Moffat in Nichol, 2005; Albertson in sod., 1950) opravljene simulacije, ki so v primeru velike ladje z intruzivnim manevrom dale oceno privzdignjenega sedimenta in oceno varnosti ter ob povečanju prometa potrebne ukrepe za nižanje privzdigovanja sedimenta in ukrepe ob nevarnosti. Poskusi, kako opisati erozijo dna zaradi curka za ladijskim vijakom, so se osredotočili na vpliv osne komponente hitrosti, tako so rotacijsko/tangencialne in radialne komponente hitrosti znotraj curka v večini primerov zanemarjene (Brewster, 1997; Petersson in sod., 1996; McGarvey, 1996).

Na območju Koprškega zaliva je v teku projekt "Vpliv cirkulacije v široko odprtih zalivih in pomorskega prometa na transport sedimenta", ki se glede pomorskega prometa osredotoča predvsem na vpliv curka za ladijskim vijakom in posledično privzdigovanje sedimenta. Za proučevanje hitrostnega polja za vijakom smo uporabil ravninski vodni curek, analiza pa je temeljila na osni teoriji gibalne količine. V vsaki točki potovanja ladje lahko na podlagi podatkov, posredovanih s Fakultete za pomorstvo in promet, dobimo realno sliko gibanja ladje (časovni potek gibanja po celicah numerične mreže, hitrost in smer ladje, smer ladijskega vijaka, globino od vijaka do dna in aplicirano moč) in izračunamo hitrostno polje, ki se ustvari za gibajočo se ladjo. Iz hitrostnega polja ob dnu je mogoče izračunati pridnene strižne napetosti, ki vplivajo na resuspendiranje sedimenta. Vpliv ladijskega prometa na resuspendiranje sedimentov oziroma na problem erozije dna je bil v Tržaškem zalivu že obravnavan (Perkovič in sod., 2011). Podana je groba ocena količine aktiviranih lebdečih plavin v primeru potovanja velike intruzivne ladje, ki za celotno območje znaša največ 15 ton (približno 2,4 tone privzdignjenega in približno 12 ton narinjenega sedimenta).

Modeliranje valovanja. Prve napovedi velikosti valovanja segajo v čas 2. svetovne vojne, ko sta se razvili dve metodi, ki sta si precej podobni, Pierson-Neumann-James (PNJ) metoda, ki je zaradi svoje praktičnosti bila sprva precej bolj uporabljena, in Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB) metoda, ki je manj empirična. Z razvojem zmogljivejših računalnikov je metoda PNJ postajala vse manj primerna za uporabo, zaradi tega se je pospešeno razvijala metoda SMB. Metoda SMB temelji na teoriji vodnih

valov zaradi vetra, rezultat modeliranja pa sta spekter valov in količina energije, ki ustreza posamezni frekvenci vala.

Velik del modeliranja valov predstavljajo statistika in empirične enačbe, s pomočjo katerih iz značilnih vrednosti vetra in geografije območja napovemo značilne vrednosti valov. Med statističnimi metodami sta najpogosteje uporabljani Gumbelova in Weibullova, empirično modeliranje pa se vrši na podlagi valovnih spektrov, PM (Pierson – Moskowitz) spekter za razvito in JONSWAP (Joint North Sea Wave project) spekter za nerazvito morje. Slednjega, ki je v osnovi model trenja, so razvili Hasselmann in sod. (1973).

Ločimo t.i. vetrne modele valovanja prve, druge in tretje generacije. V modelih prve generacije so procesi med spremenljivkami opisani samo s preprostimi linearnimi enačbami; rezultati so pogosto nerealni. Pri modelih druge generacije je že poenostavljeno upoštevana nelinearnost procesov med spremenljivkami, pri modelih tretje generacije pa se upošteva fizikalno ozadje razvoja valov. Modeli tretje generacije zmorejo natančno opisati nelinearno nihanje gladine v dveh dimenzijah (Komen, 2004). Na osnovi modelov tretje generacije in na osnovi napovedi vetrovnega polja lahko dobro napovemo valovanje na površini globokih oceanov - WAM (WAMDI Group, 1988; Komen in sod., 1994). Vendar pa teh modelov ne moremo realistično uporabiti za modeliranje v obalnih morjih. Modeli temeljijo na ravnotežni enačbi energije oziroma spektralne akcije.

V zadnjem času se največ uporablja kombinacija spektralne analize in numeričnih modelov, med katerimi se najpogosteje uporabljajo modeli končnih razlik. Za aplikacijo modelov na velikih območjih je potrebno uporabiti enega izmed dveh pristopov, Lagrangeov ali Eulerjev. Bolj pogosto je v uporabi Eulerjev pristop, kjer je razvoj valov formuliran na mreži. To tehniko uporabljajo modeli valovanja globokega oceana in plitvega morja. Vsi relevantni procesi generacije, propagacije in disipacije so vključeni kot izvori oziroma ponori v osnovni enačbi. WAM je zmožen hitrega prilagajanja spremembam vhodnih spremenljivk in je eden redkih, ki napoveduje ekstremne pojave (v obalnem inženirstvu je npr. pomemben 100-letni val).

Valove v priobalnem območju je precej težje napovedati kot valove na odprtem morju, še posebej jih je težko napovedati v polodprtih zalivih z zapleteno geografijo območja in topografijo dna. V takih primerih je potrebno uporabiti dovolj kompleksne fizikalne modele, poleg tega je potrebna še dovolj natančna meteorološka napoved. Za račun valov v obalnih območjih s plitvo vodo je bil razvit valovni model tretje generacije SWAN (Simulating Waves Nearshore) (Delft University of Technology, Nizozemska) (Booij in sod., 1999; Ris in sod., 1999). Model fizikalno upošteva razvoj valov v dveh dimenzijah, valovni spekter pa se prilagaja spremembam vrednosti vhodnih spremenljivk.

Iz podatkov oceanografske boje Morske Biološke Postaje Piran je bil na UL FGG razvit tudi empirični model valovanja za Tržaški zaliv. Uporabljena je bila metoda ANFIS, ki temelji na kombinaciji mehke

logike in nevronske mreže. Model valovanja ponuja možnost napovedi povprečne in vršne periode valov, povprečne in maksimalne višine valov, srednje smeri potovanja valov in razpršenosti valov pri vršni periodi, in sicer za tri ure vnaprej od časa meteorološke napovedi (Sirnik, 2011). Za razširitev možnosti uporabe empiričnega modela za Tržaški zaliv bi bilo v prihodnje potrebno pridobiti podatke z več merilnih mest, za zanesljivo napoved 2D polja valov po celotnem Tržaškem zalivu pa bi poleg tega morali uporabiti še kombinacijo empiričnega in fizikalnih modelov.

V modelu PCFLOW3D so vgrajene empirične enačbe za določitev višine in periode valovanja po celotni površini definicijskega območja v vsakem časovnem koraku (Ippen 1966 po Bretschneider, 1952). Bretschneiderjeve enačbe pa so uporabne le za globoko vodo, velike hitrosti vetra in dolga privetrisča, pri pogojih, ki nastopajo v Tržaškem zalivu pa precenijo višino in periodo valovanja. Zato je potrebno za nadaljnje študije, povezane z valovanjem, v model vgraditi druge empirične enačbe ali uporabiti rezultate bolj sofisticiranih modelov valovanja (Tofil, 2013).

SWAN (http://swanmodel.sourceforge.net/online_doc/swanuse/swanuse.html) je valovni model tretje generacije, kjer so procesi generacije, propagacije in disipacije modelirani po eksplicitni metodi. Z modelom je bilo opravljenih veliko raziskav v realnih terenskih pogojih, ki so pokazali dobro ujemanje rezultatov (Booj in sod. 1992; Palmsten, 2001; Rogers in sod., 2003; Zijlema in sod., 2010). Uporablja se lahko tudi za preprečevanje katastrof ob obalah (Wornom in sod., 2001). Model SWAN se pogosto uporablja za modeliranje valov v priobalni območjih. Primeren je za povezavo z modelom PCFLOW3D, kjer lahko rezultate simulacij modela SWAN uporabimo kot vhodni podatek, za kar pa potrebujemo vmesnik.

Oblikovanje histereze lebdečih plavin. Razmerje med koncentracijo lebdečih plavin in pretokom oziroma pojav histereze (različne koncentracije lebdečih plavin pri enakem vodnem pretoku na rastoči oziroma padajoči veji poplavnega hidrograma) je zabeležen in proučevan pojav (Allen in Collinson, 1974; Graf in Suszka, 1985; Song in Graf, 1997).

Na pojav oblikovanja histereze plavin vpliva več dejavnikov, med njimi je formiranje oblik na dnu, sipin (Allen in sod., 1974; Ten Brinke in sod., 1999) in tlakovane plasti (armoured bed) (Beschta, 1987). Sipine se običajno oblikujejo v rekah s peščenim dnom, v rekah z gramoznim dnom pa se pojavlja tlakovana plast. V rekah, ki vsebujejo tako pesek kot gramoz, je nastanek sedimentne histereze odvisen od oblikovanja sipin in tlakovane plasti (Reid in sod., 1985; Kuhnle, 1992).

Za upoštevanje nestalnosti toka sta Graf in Suszka (1985) definirala brezdimenzijski parameter: procentualni dvig v prostornini plavin med nestalnim in ekvivalentnim stalnim tokom je direktno proporcionalen temu parametru. Poleg tega sta ugotovila, da je količina plavin v suspenziji pri pogojih nestalnega toka vedno večja od prostornine, izračunane ob pogoju ekvivalentnega stalnega toka.

Williams (1989) je sistematično proučeval razmerje med pretokom vode in koncentracijo lebdečih plavin in dognal, da obstaja 5 običajnih razredov, v katere razvrščamo histerezne zanke: z enojno vrednostjo, sourne, protiurne, z enojno vrednostjo z dodatkom zanke in z zanko v obliki osmice. Najpogostejše so sourne histerezne zanke, za katere sta značilni velika stopnja transporta plavin pred maksimalno vrednostjo pretoka in manjše stopnje transporta plavin ob upadanju pretoka.

Enega redkih terenskih preizkusov so izvedli Picouet in sod. (2000), ki so na podlagi podatkov na dveh merskih postajah reke zgornji Niger med letno poplavo odkrili pojav sourne histereze v razmerju med pretokom vode in koncentracijo lebdečih plavin.

Poleg poskusov na terenu so bili opravljeni tudi poskusi v laboratoriju, kjer so Lee in sod. (2004) izvedli serijo poskusov v kanalu. Z uporabo različnih vtočnih hidrogramov so proučevali transport lebdečih plavin pri pogojih nestalnega toka. Rezultati so pokazali časovni zamik med vrhovi pretočnih in sedimentnih hidrogramov, ki je znašal 6 do 15 % trajanja pretočnega hidrograma. Izkazalo se je tudi, da sta skupni transport lebdečih plavin in vrh transporta sedimentov, izmerjena med poskusi z nestalnim tokom, večja od ustreznih vrednosti, napovedanih s pomočjo ekvivalentnega poskusa s stalnim tokom. Poleg tega je bila v stopnji transporta sedimentov opažena značilna protiurna histereza. Poskuse v laboratorijskem žlebu so opravili tudi Ahanger in sod. (2008). Ob pogojih nestalnega toka in pri več različnih vtočnih hidrogramih je bila vidna izrazita sourna histereza v pretoku lebdečih plavin pri različnih vrednostih pretoka vode. Ob uporabi različnih nizov laboratorijskih podatkov so izvedli tudi regresijsko analizo, na podlagi katere so bile oblikovane enačbe, za rastočo in padajočo vejo hidrograma. Laboratorijski poskusi so dali dobre rezultate, tako v napovedi časovnega vrha in vrha pretoka sedimentov. Meritve pretokov in koncentracij lebdečih plavin so dobra podlaga za proučevanje in izdelavo modela histereze koncentracij lebdečih plavin in napovedovanje koncentracij onesnažil v suspenziji v različnih meteoroloških in hidroloških situacijah. Z redkimi izjemami (npr. Picouet in sod., 2000) takšne raziskave doslej na naravnih vodotokih še niso bile izvedene. Izračuni z upoštevanjem histereze lahko izboljšajo tudi masne bilance sedimenta in onesnažil v porečjih in na končnih destinacijah transporta (npr. porečji Idrijce in Soče in Tržaški zaliv). Kljub temu, da je bil pojav histereze že večkrat proučevan, še ni na voljo neposrednih računskih metod za izračun pretoka lebdečih plavin pri nestalnih pogojih toka.

Modeliranje vpliva vegetacije na privzdigovanje sedimenta. Pri modeliranju vpliva vegetacije nas zanima predvsem vpliv vegetacije na gibanje vode oziroma sedimentov. Vpliv vegetacije na gibanje vode je bil proučevan tako v celinskem kot tudi v morskem vodnem okolju. Na območju rasti v tekočih vodah vegetacija znižuje hitrost toka (Madsen in Warncke, 1983; Newall in Huges, 1995), isto so pokazale tudi študije v morskem okolju (Fonseca in Kenworthy, 1987; Gambi in sod., 1990; Koch, 1993; Worcester, 1995). Do znižanja hitrosti toka znotraj vegetacijskega območja pride tudi v obalnih

območjih jezer, kjer se poleg tega zniža tudi valovna energija (Losee in Wetzel, 1988, 1993), isti pojav pa lahko opazimo tudi v priobalnem morju (Heller, 1987; Fonseca in Cahalan, 1992; Koch, 1996). Znižanje hitrosti tokov in valovanja na območjih z vegetacijo tudi poveča stopnjo sedimentacije (Eletrius, 1975; Haslam, 1978; Harlin in sod., 1982; Almasi in sod., 1987; Fonseca, 1996) in zmanjša možnosti za resuspendiranje (James in Barko, 1991, 1995; Fonseca in Cahalan, 1992). Povečana stopnja sedimentacije in znižana stopnja resuspendiranja znižata kalnost in povečata dostopnost svetlobe, ki pospešuje nadaljnjo rast in razmnoževanje vegetacije (Doyle, 2000).

Na podlagi omenjenih študij in rezultatov modeliranja je bilo ugotovljeno, da obstaja kompleksna interakcija med hidrodinamiko, dinamiko sedimenta in vegetacijo, saj hidravlično in sedimentno okolje vplivata na vegetacijo, le-ta pa ima direkten povratni vpliv na fizično okolje. Kljub kompleksnosti problema je bila opisana večina osnovnih interakcij, vendar pa obstaja le malo študij, ki bi zagotovile numerične podatke, na podlagi katerih bi se interakcije ovrednotile. Nadaljnje raziskave bi omogočile oblikovanje koeficientov vsaj za enostavne modele interakcije med hidrodinamiko, dinamiko sedimentov in vegetacijo. Kljub razlikam v interakciji vode in sedimenta z vegetacijo v celinskem in morskem vodnem okolju pa so študije pokazale komplementarne rezultate, zato bi bilo mogoče problem v različnih okoljih obravnavati po enakih metodah.

1.3 HIPOTEZA IN CILJI NALOGE

Brez dobrega poznavanja tokov onesnažil med okoljskimi segmenti ni mogoče uspešno modelirati procesov prenosa in pretvorb onesnažil v vodnem okolju. Izboljšano poznavanje tokov med segmenti prispeva k splošnemu poznavanju biogeokemijskega kroženja onesnažil v naravnem okolju in prispeva k razvoju modelov na tem področju.

Osredotočili smo se na gibanje onesnažil v vodnem okolju, predvsem na prehajanje med okoljskimi segmenti: na sproščanje in transport sedimentov v rekah in morju ter na izmenjavo volatilnih onesnažil med vodo in zrakom. Da bi lahko čim boljše simulirali obnašanje sedimentov v plitvih zalivih (npr. Tržaški zaliv, Koprski zaliv), je potrebno upoštevati številne dejavnike, ki vplivajo na sediment (cirkulacija, valovanje, ladijski promet, morebitna vegetacija na dnu).

Dosedanje raziskave na področju prenosa in pretvorb onesnažil kažejo, da je prav izboljšanje poznavanja procesov prehajanja onesnažil med okoljskimi segmenti ključno za nadaljnji razvoj modelov na tem področju. Boljše poznavanje kroženja onesnažil med posameznimi segmenti je zelo pomembno tudi za razumevanje celotnega biogeokemijskega cikla posameznih onesnažil, predvsem živega srebra. V disertaciji povezujemo znanja o cirkulaciji vode, valovanju ter privzdigovanju in

prenosu lebdečih plavin. Predlagamo uporabo različnih modelov in njihovih povezav. Izdelane povezave med cirkulacijskim modelom (PCFLOW3D) in modelom valovanja (SWAN) lahko znatno pripomorejo k zanesljivejšemu računu privzdigovanja in transporta sedimentov in onesnažil. Takšna povezava doslej še ni bila narejena. Zelo pomembna so tudi nova znanja o transportu sedimentov v plitvih zalivih zaradi vpliva gibalne količina ladijskih vijakov. Z izdelavo modela pridnenih hitrosti zaradi plovbe v Tržaškem in Koprskem zalivu in vmesnika za pripravo vhodnih podatkov je mogoče modelirati kombinirane vplive tokov, valov in plovbe na privzdigovanje sedimenta v plitvih območjih, ki je pomembno tako s stališča vzdrževanja plovnih poti kot tudi prenosa onesnažil med sedimentom in vodo. Pomemben prispevek k poznavanju procesov prehajanja onesnažil med okoljskimi segmenti predstavlja tudi izboljšava modula za izmenjavo onesnažil med vodo in zrakom z uvedbo nove parametrizacije vpliva vetra.

Izboljšana in umerjena modelska orodja bodo prispevala k novim spoznanjem o procesih in količini onesnažil, ki se giblje med posameznimi okoljskimi segmenti in bodo posredno omogočila nadaljnji razvoj modelov prenosa in pretvorb onesnažil v vodnem okolju.

Glavni cilj predlagane doktorske disertacije je torej izboljšanje poznavanja tokov onesnažil med okoljskimi segmenti in izboljšava modelov za simulacije prenosa in pretvorb plavin in onesnažil v naravnem okolju.

Cilji doktorske disertacije so:

- Izboljšava numeričnega modela PCFLOW3D z vgradnjo gibalne količine za ladijskim vijakom, ki bo omogočila iz znanih podatkov o ladijskih manevrih izvršiti simulacije vpliva ladijskega vijaka na sediment.
- Izdelava vmesnika med numeričnim modelom površinskega valovanja SWAN in sedimentacijskim modulom modela PCFLOW3D; lastnosti valovanja bomo vključili v sedimentacijski modul in izvedli kombinirane simulacije vpliva tokov, valovanja in plovbe na privzdigovanje sedimenta. Z izboljšanim modelom PCFLOW3D, sklopljenim z modelom valovanja, bomo izboljšali rezultate simulacij transporta sedimentov v plitvih zalivih, kot sta Tržaški in Koprski zaliv.
- Izboljšanje modela izmenjave plinov na podlagi meritev in različnih parametrizacij vpliva vetra in izvedba simulacije izmenjave živega srebra med vodo in zrakom. Rezultate bomo primerjali z meritvami v Sredozemlju. Izmenjava onesnažil med vodo in zrakom predstavlja pomemben dejavnik pri kroženju živega srebra. Izboljšave v modelih izmenjave so pomembne za nadaljnji razvoj modelov prenosa in pretvorb onesnažil v morju in ozračju.

- Meritve pretokov in koncentracij lebdečih plavin so dobra podlaga za proučevanje in izdelavo modela histereze koncentracij lebdečih plavin na reki Idrijci; napovedovanje koncentracij v različnih meteoroloških in hidroloških situacijah doslej na naravnih vodotokih še ni bilo izvedeno.

Sklapljanje cirkulacijskega modela z modelom valovanja ter hkratno upoštevanje vpliva ladijskega prometa na dnu plitvih zalivov še ni bilo izvedeno. Dodatna novost v modeliranju tokov onesnažil med okoljskimi segmenti je spremenljiva parametrizacija vpliva vetra na izmenjavo volatilnih snovi med vodo in zrakom, ki doslej še ni bila vgrajena v podobne modele. Pregled trenutnega stanja kaže, da je bil nastanek histereze koncentracij lebdečih plavin pri enakih pretokih doslej proučevan le v laboratorijskem okolju (Ahanger in sod., 2008), le redko pa v naravnem vodotoku.

Z izboljšanimi in umerjenimi modeli bomo lahko bolj točno napovedovali tokove onesnažil med posameznimi okoljskimi segmenti, kar hkrati predstavlja napredek v modeliranju transporta in pretvorb onesnažil v vodnem okolju, kakor tudi prispevek k celovitemu poznavanju biogeokemijskega cikla onesnažil, predvsem živega srebra.

2 METODOLOGIJA

2.1 OSNOVE GIBANJA SEDIMENTOV

Gibanje delcev sedimenta se začne, ko je trenutna sila tekočine na delce večja od trenutne sile upora, ki je povezana s koeficientom trenja in težo potopljenega delca. Pri turbulentnem toku pride do krajevnih in časovnih fluktuacij hitrosti, poleg tega je potrebno hkrati upoštevati naključno velikost, obliko in lego delca, zato začetek gibanja ni zgolj determinističen, ampak tudi stohastičen proces. Z večanjem strižne hitrosti ob dnu, se sprva kotaleči se delci gibljejo vzdolž dna z bolj ali manj stalnimi saltacijami (poskoki), ko te hitrosti narastejo do vrednosti hitrosti usedanja delca w_s , posamezni delec preide v suspenzijo in v njej ostane, če imajo turbulentni vrtinci prevladujočo vertikalno komponento, ki je večja od hitrosti usedanja delcev.

Pri sedimentu ločimo tri oblike gibanja delcev, kotaljenje, poskakovanje in gibanje suspendiranih delcev (transport lebdečih plavin). V nadaljevanju opisane karakteristike gibanja lebdečih plavin, saj je za prehajanje onesažil pomembno predvsem gibanje lebdečih plavin, kjer je pomemben del računa definicija referenčne koncentracije kot robnega pogoja pri dnu. Empirične enačbe za transport lebdečih plavin so povzete po van Rijn (1984; 1986 in 1993).

2.1.1 Karakteristični parametri

Transport rinjenih plavin in referenčna koncentracija pri dnu sta določena s parametrom zrna D_* :

$$D_* = D_{50} \cdot \left[\frac{(s-1) \cdot g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (2.1)$$

kjer je:

D_{50} velikost zrna,

$s = \rho_s / \rho$ specifična gostota, kjer sta ρ_s gostota delcev plavin in ρ vode

g gravitacijski pospešek,

ν kinematična viskoznost

in transportnim parametrom T :

$$T = \frac{(u'_*)^2 - (u_{*,cr})^2}{(u_{*,cr})^2} \quad (2.2)$$

kjer je:

u'_* strižna hitrost ob dnu, odvisna od karakteristike zrn v posameznih smereh

$$u'_{*x} = \left| \left(\frac{\sqrt{g}}{C'} \right) \cdot \bar{u}_x \right| \quad (2.3)$$

$$u'_{*y} = \left| \left(\frac{\sqrt{g}}{C'} \right) \cdot \bar{u}_y \right| \quad (2.4)$$

\bar{u} povprečna hitrost po vertikali

C' Chezy-jev koeficient, odvisen od zrnivosti plavin

$$C' = 18 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot R_b}{3 \cdot D_{90}} \right) \quad (2.5)$$

R_b hidravlični radij po Vanoni-Brooksu (van Rijn, 1984), ki ga običajno lahko aproksimiramo z globino H ,

$u_{*,cr}$ kritična strižna hitrost ob dnu, izračunana po Shieldsu (van Rijn, 1984).

Za opis transporta lebdečih plavin je definiran parameter suspenzije, ki opisuje vpliv navzgor delujočih tekočinskih sil turbulence in navzdol delujočih gravitacijskih sil:

$$Z = \frac{w_s}{\beta \kappa u_*} \quad (2.6)$$

kjer je:

w_s hitrost usedanja delcev,

β koeficient, povezan z difuzijo sedimentnih delcev,

κ Von Kármánova konstanta,

u_* skupna strižna hitrost ob dnu

$$u_* = (gdS)^{0,5} \quad (2.7)$$

S naklon

Uvedemo tudi modificiran parameter suspenzije Z' :

$$Z' = Z + \varphi \quad (2.8)$$

kjer je:

φ skupni korekcijski faktor, ki zajema vse ostale vplive

Z večanjem vrednosti strižne hitrosti ob dnu se delci gibljejo vzdolž dna z bolj kot ne stalnimi poskoki (saltacijami), ko pa vrednost strižne hitrosti postane primerljiva z vrednostjo hitrosti usedanja delcev, lahko delci preidejo v suspenzijo. Po Bagnoldu (1966) naj bi delci ostali v suspenziji samo, ko imajo turbulentni vrtinci dominantno vertikalno komponento hitrosti, ki presega hitrost usedanja delcev. Kritično vrednost za začetek suspenzije lahko zapišemo kot:

$$\tilde{w} = \sqrt{(\overline{w'})^2} \geq w_s \quad (2.9)$$

kjer je:

\tilde{w} intenziteta vertikalne turbulence,

w' vertikalna komponenta hitrosti vrtincev.

Zgornji pogoj velja ob predpostavki, da je vertikalna komponenta hitrosti enakega velikostnega razreda kot intenziteta vertikalne turbulence. Podrobne študije turbulence v mejni plasti toka so podale podrobne informacije o vertikalni porazdelitvi intenzitete turbulence (Hinze, 1975), ki ima tako maksimalno vrednost enakega velikostnega razreda, kot je vrednost strižne hitrosti ob dnu, tako za hidravlično gladke in hrapave pogoje toka. Torej velja:

$$\tilde{w} = u_* \quad (2.10)$$

Na podlagi te enakosti lahko pogoj za začetek suspenzije sedaj napišemo kot:

$$\frac{u_{*,crs}}{w_s} = 1 \quad (2.11)$$

kjer je:

$u_{*,crs}$ kritična strižna hitrost ob dnu za začetek suspenzije

Drug kriterij za začetek suspenzije je podal Engelund (1965), ki temelji na precej grobi analizi stabilnosti:

$$\frac{u_{*,crs}}{w_s} = 0,25 \quad (2.12)$$

Eksperimentalne študije, opravljene v laboratoriju Delft Hydraulics (Delft Hydraulics, 1982) lahko predstavimo kot:

$$\frac{u_{*,crs}}{w_s} = \frac{4}{D_*} \text{ za } 1 < D_* \leq 10 \quad (2.13)$$

$$\frac{u_{*,crs}}{w_s} = 0,4 \text{ za } D_* > 10 \quad (2.14)$$

Kriterij Bagnolda naj bi definiral zgornjo mejo, pri kateri se začne oblikovati profil koncentracije, zgornja dva kriterija pa naj bi definirala vmesno fazo.

2.1.2 Hitrost usedanja delcev

Končno hitrost usedanja nesferičnih delcev lahko zapišemo kot:

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{(s-1)gD_s^2}{\nu} \quad 1 < D_s \leq 100\mu m \quad (2.15)$$

$$w_s = 10 \frac{\nu}{D_s} \left\{ \left[1 + \frac{0,01(s-1)gD_s^3}{\nu^2} \right]^{0,5} - 1 \right\} \quad 100 < D_s < 1000\mu m \quad (2.16)$$

$$w_s = 1,1[(s-1)gD_s]^{0,5} \quad D_s \geq 1000\mu m \quad (2.17)$$

kjer je:

D_s reprezentativni premer zrna, običajno manjši od D_{50} .

Zaradi prisotnosti okoliških delcev se hitrost usedanja zmanjšuje s povečanjem koncentracije plavin v vodi. Ta proces je precej pomemben, saj se že pri enoodstotnih koncentracijah plavin hitrost usedanja delcev zmanjša za okrog 10 %, tako so v literaturi opisane enačbe hitrosti usedanja v suspenziji tekočina – sediment (Richardson in Zaki, 1954; Oliver, 1961).

Za porazdelitev koeficienta mešanja tekočine oziroma difuzije ϵ_f se običajno uporabi parabolično - konstantna porazdelitev (van Rijn, 1984):

$$\epsilon_f = \kappa u_* h \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad \frac{z}{h} < 0,5 \quad (2.18)$$

$$\epsilon_f = 0,25 \kappa u_* h \quad \frac{z}{h} \geq 0,5 \quad (2.19)$$

kjer je:

κ Von Kármánova konstanta,

u_* s tokom povezana strižna hitrost pri dnu,

h globina vode,

z vertikalna koordinata.

Običajno je mešanje oziroma difuzija delcev plavin ϵ_s povezana s koeficientom mešanja tekočine za čisto tekočino z naslednjo formulo:

$$\epsilon_s = \beta\phi\epsilon_f \quad (2.20)$$

kjer je:

β faktor, ki opisuje razliko med difuzijo diskretnega delca plavin in difuzijo tekočinskega delca; naj bi bil konstanten po globini

ϕ faktor, ki opisuje vpliv delcev plavin na strukturo turbulence v tekočini

2.1.3 Račun lebdečih plavin

Vpeljan je pojem *referenčna globina* a , ki je povezana z višino oblik dna, pod to globino je transport vseh sedimentnih delcev v obliki rinjenih plavin q_b , tako lahko definiramo referenčno koncentracijo c_a kot:

$$q_b = c_b u_b \delta_b = c_a \bar{u}_a a \quad (2.21)$$

kjer je:

c_b koncentracija rinjenih plavin,

u_b hitrost delcev rinjenih plavin,

δ_b višina saltacij,

\bar{u}_a efektivna hitrost delcev,

a referenčna globina nad dnom.

Referenčno globino določimo v odvisnosti od višine oblik dna Δ oziroma iz hrapavosti dna (k_s oz. D_{90}), če oblike dna niso znane:

$$\begin{aligned} a &= 0,5 \cdot \Delta \\ a &= k_s = 3 \cdot D_{90} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Referenčna globina mora presegati 1 % celotne globine vode H , običajne privzete vrednosti pa se gibljejo med:

$$0,01 \cdot H \leq a \leq 0,1 \cdot H \quad (2.23)$$

Referenčna koncentracija C_a na referenčni globini a je enaka ravnotežni koncentraciji C_{ae} , za katero je podanih več empiričnih načinov določitve. Po podrobni primerjavi med posameznimi metodami in izvršenimi meritvami, opisani v literaturi (Garcia in Parker, 1991), je najustreznejša metoda, ki jo je predlagal van Rijn (1984). Enačba za referenčno koncentracijo ima obliko:

$$C_{ae} = 0,015 \cdot \frac{D_{50} \cdot T^{1.5}}{a \cdot D_*^{0.3}} \quad (2.24)$$

kjer je:

T transportni parameter,

D_* parameter zrna,

a referenčna globina.

Koncentraciji C_a oziroma C_{ae} sta brezdimenzijski količini (m^3/m^3), ki ju je potrebno pomnožiti z gostoto plavin (ρ_s), da dobimo koncentracije ob dnu v kg/m^3 .

Resuspendiranje delcev je možno samo v območju, kjer je transportni parameter pozitivno predznačen, torej kjer strižne napetosti ob dnu presegajo kritične strižne napetosti. Kadar je transportni parameter T negativno predznačen, poteka ob dnu proces usedanja materiala. Koncentracije plavin ob dnu C_{bot} izračunamo iz rešitve enačbe (2.24). Koncentracija je odvisna od vtoka lebdečih plavin, resuspendiranja z dna in transporta plavin zaradi advekcije in disperzije v prejšnjih časovnih korakih računa. Na osnovi bilance lebdečih plavin tik ob dnu (na referenčni globini a) v dveh sosednjih časovnih korakih izračunamo še količino in z upoštevanjem poroznosti oz. zbitosti materiala na dnu tudi debelino odnesenega oziroma odloženega materiala.

V vseh kontrolnih volumnih izračunamo masno bilanco vtoka in iztoka plavin po prostoru in času. Račun poteka po posameznih stolpcih od zgoraj navzdol. Upoštevana je advekcija in disperzija na

vseh stičnih ploskvah s sosednjimi celicami ter usedanje iz zgornje celice in v spodnjo celico. Količino lebdečih plavin v celici ob dnu primerjamo z maso, izračunano iz razlike empirično določene ravnotežne koncentracije C_{ae} in koncentracije v isti celici v prejšnjem časovnem koraku. Usedanje lebdečih plavin se pojavlja, kadar je ravnotežna koncentracija presežena, v nasprotnem primeru pa se z dna resuspendira tolikšna količina sedimenta, da je v celici dosežena ravnotežna koncentracija (Žagar in sod., 1999).

2.1.4 Vpliv tokov, valovanja in propulzije ladijskega vijaka

Vpliv tokov, valovanja in propulzije ladijskega vijaka na transport sedimentov opišemo s pomočjo strižnih hitrosti oziroma napetosti ob dnu, ki vplivajo na gibanje sedimentov.

Za upoštevanje vpliva valovanja na strižne napetosti ob dnu moramo poznati višino vala H_s in periodo valovanja T_w , ki ustreza višini, po celotni površini definicijskega območja v vsakem časovnem koraku. Ti dve količini lahko določimo na podlagi statistike ali empiričnih enačb, na podlagi značilnih vrednosti vetra in geografije območja. Med statističnimi metodami sta najpogosteje uporabljani Gumbelova in Weibullova porazdelitev, pri empiričnem valovanju pa si pomagamo z valovnimi spektri, kot sta PM spekter za razvito in JONSWAP spekter za nerazvito morje. V zadnjem času se največ uporablja kombinacija spektralne analize in numeričnih valov, primera sta npr. modela valov WAM, ki se predvsem uporablja za napoved valov v srednje velikih merilih na odprtem morju, in SWAN, ki je model tretje generacije za napovedovanje valov v priobalnem območju.

Če poznamo hitrost vetra in privetrišče, ki je definirano kot razdalja med opazovano točko in najbližjo obalo v smeri, od koder piha veter, lahko na podlagi enačb (Ippen in sod., 1966) določimo višino in periodo valovanja:

$$H_w = 0,0555 \cdot \sqrt{u_w^2 \cdot Fe} \quad (2.25)$$

$$T_w = 0,5 \cdot \sqrt[4]{u_w^2 \cdot Fe} \quad (2.26)$$

kjer je:

H_w višina vala v čevljih,

u_w hitrost vetra v vozlih,

Fe privetrišče (fetch length) v navtičnih miljah,

T_w perioda valovanja v sekundah.

Na podlagi izračunanih parametrov, ki opisujejo vpliv valovanja, lahko izračunamo strižne napetosti ob dnu zaradi valovanja (van Rijn, 1991):

- najprej iterativno določimo *valovno dolžino*

$$\left[\frac{L'}{T_w} - \bar{u} \cdot \cos\Phi \right]^2 = \frac{g \cdot L'}{2\pi} \tanh \frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L'} \quad (2.27)$$

kjer je:

L' valovna dolžina,

\bar{u} hitrost v izbrani vertikali, povprečena po globini,

Φ kot med smerjo valov in toka,

h debelina obravnavanega sloja.

- sledi račun *reducirane periode valovanja* T_r

$$T_r = \frac{T_w}{1 - \frac{\bar{u} \cdot T_w \cdot \cos\Phi}{L'}} \quad (2.28)$$

- in *vršne hitrosti valovanja* $U_{d,p}$ ter *vršne amplitude valovanja* $A_{d,p}$

$$U_{d,p} = \frac{\pi \cdot H_w}{T_r \cdot \sinh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L'}\right)} \quad (2.29)$$

$$A_{d,p} = \frac{U_{d,p} \cdot T_w}{2\pi} \quad (2.30)$$

- izračunamo še *koeficient trenja* f_w , ki je odvisen od režima toka in znaša

$$f_w = 2 \cdot \left(\frac{U_{d,p} \cdot A_{d,p}}{\nu} \right)^{-0,5} \quad \text{laminarni tok} \quad (2.31)$$

$$f_w = 0,09 \cdot \left(\frac{U_{d,p} \cdot A_{d,p}}{\nu} \right)^{-0,2} \quad \text{hidravlično gladek turbulentni tok} \quad (2.32)$$

$$f_w = \exp \left[-6 + 5,2 \cdot \left(\frac{A_{d,p}}{3 \cdot D_{90}} \right)^{-0,19} \right] \quad \text{hidravlično hrapav turbulentni tok} \quad (2.33)$$

- *strižne napetosti* $\tau_{b,w}$ oziroma *strižno hitrost ob dnu* $u_{b,w}$ izračunamo po enačbah

$$\tau_{b,w} = 0,25 \cdot \rho \cdot (U_{d,p})^2 \cdot f_w \quad (2.34)$$

$$u_{b,w,x} = \sqrt{\frac{\tau_{b,v,x}}{\rho}} \quad (2.35)$$

$$u_{b,w,y} = \sqrt{\frac{\tau_{b,v,y}}{\rho}} \quad (2.36)$$

V enačbah valovanja (2.28 in 2.29) smer propagacije valovanja ni podana, zato pri razstavljanju strižne hitrosti ob dnu na komponente upoštevamo kar valovanje v smeri vetra.

Za določitev skupne strižne napetosti ob dnu je potrebno izračunati celokupno strižno hitrost ob dnu u_* . Strižno hitrost za posamezno koordinatno smer najprej izračunamo po kvadratnem zakonu, ki je prikazan v enačbah 2.37 in 2.38, nato pa vrednosti vektorsko seštejemo v celokupno strižno hitrost u_* (Žagar, 1999):

$$u_{*,x} = \sqrt{g \cdot n_g^2 \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2}} \quad (2.37)$$

$$u_{*,y} = \sqrt{g \cdot n_g^2 \cdot V \cdot \sqrt{U^2 + V^2}} \quad (2.38)$$

kjer je:

$u_{*,x}, u_{*,y}$ strižne hitrosti v smereh x in y

g gravitacijski pospešek

n_g Manningov koeficient hrapavosti

U, V po vertikali povprečni hitrosti v smereh x in y

Na podlagi enačb za potek računa strižnih napetosti ob dnu zaradi valovanja, ki so podane (2.25- 2.38) in navedene v literaturi (Žagar, 1997), le te izračunamo, nato pa jih vektorsko seštejemo s strižnimi napetostmi zaradi tokov in vpliva curka.

Na strižne napetosti ob dnu oziroma na stopnjo transporta sedimentov znatno vpliva tudi curek za ladijskim vijakom oz. gibalna količina, ki se ustvarja za premikajočo se ladjo. Ladijska propulzija in asistenca vlačilcev lahko v področju plitvin s svojimi propulzijskimi sredstvi povzročijo privzdigovanje sedimentov. Proces širjenja curka za izvorom je opisan v več študijah, ki obravnavajo teorijo potopljenega curka (Blaauw in van de Kaa, 1978; Schokking, 2002; Blokland, 1994; van Veldhoven, 2002). Pomeben prispevek v poznavanju vpliva curka za ladijskim vijakom je tudi študija (Perkovič in sod., 2011), ki v osnovi proučuje vpliv povečanja ladijskega prometa v Tržaškem zalivu na varnost in okolje, podaja pa tudi osnove izračuna hitrosti in vpliva na dno curka zaradi ladijskega vijaka.

Pri računu je upoštevan vpliv superpozicije, kar pomeni, da lahko izračunane strižne hitrosti zaradi tokov in valov v vsakem kontrolnem volumnu ob dnu vektorsko seštejemo z izračunanimi hitrostmi zaradi gibalne količine za premikajočo se ladjo. Na podlagi teh, z zgoraj podanimi enačbami za račun strižnih hitrosti zaradi tokov in valov ter v naslednjem poglavju podanimi enačbami za račun hitrosti za ladijskim vijakom, izračunamo strižne napetosti zaradi hkratnega vpliva tokov, valov in curka ladijskega vijaka.

2.2 OPIS MODELA SWAN

Valove lahko modeliramo na različne načine, s pomočjo empiričnih metod in modelov vetrnih valov prve, druge in tretje generacije. Pri simulacijah z empiričnimi metodami je problem v kvaliteti rezultatov, saj te metode temeljijo na preteklem nizu podatkov, ki je običajno prekratek in vsebuje premalo zapisov ekstremnih pojavov za kakovostno napoved. V zadnjem času so v uporabi

kompleksni modeli tretje generacije, ki upoštevajo fizikalno ozadje razvoja valov in lahko natančno opišejo nelinearno nihanje v dveh dimenzijah.

Primer takšnega modela je model vetrnih valov tretje generacije, SWAN (Simulating Waves Nearshore), ki so ga razvili na Tehnološki Univerzi v Delftu na Nizozemskem (Delft University of Technology), primarno za simulacije valov v plitvi vodi. Model temelji na dvodimenzijski valovni enačbi ravnotežja akcije, ob upoštevanju generacije energijske gostote in členov disipacije zaradi vetra, penjenja, lomljenja valov zaradi globine, trenja ob dnu in prerazporeditve energije vala zaradi interakcije val – val. V modelu so upoštevani tudi propagacija v geografskem prostoru, premik relativne frekvence zaradi odstopanja v globini in refrakcija zaradi spremenljivega dna in tokov. Za razliko od ostalih modelov tretje generacije je v modelu SWAN numerična shema propagacije implicitna, kar pomeni bolj ekonomične račune v plitvi vodi.

Vse informacije o gladini morja so zajete v varianci spektra valov oziroma gostoti energije $E(\sigma, \theta)$, ki razporeja energijo valov preko relativne frekvence σ (opazovane iz določene referenčne točke, ki se giblje skupaj z hitrostjo toka) in smerjo propagacije valov θ (smer normale na hrbet vala vsake spektralne komponente). Običajno modeli valovanja določajo razvoj gostote akcije $N(\sigma, \theta)$, definirane kot $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$, ki jo upoštevamo med propagacijo v prisotnosti ambientalnih tokov, medtem ko gostota energije takrat ni upoštevana (Whitman, 1974).

Razvoj spektra valov lahko opišemo z ravnotežno enačbo spektralne akcije v kartezičnih koordinatah (Hasselmann in sod., 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2.39)$$

kjer je:

$\frac{\partial}{\partial t} N$ lokalna stopnja spremembe gostote akcije s časom,

$\frac{\partial}{\partial x} c_x N, \frac{\partial}{\partial y} c_y N$ propagacije akcije v geografskem prostoru,

c_x, c_y hitrost propagacije v x oziroma y smeri,

$\frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N$ premikanje relativne frekvence zaradi sprememb v globini in tokovih,

c_σ hitrost propagacije v σ prostoru,

$\frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N$ refrakcija, povzročena zaradi globine in tokov,

c_θ hitrost propagacije v θ prostoru,

$S = S(\sigma, \theta)$ izvorni člen, kar se tiče gostote energije, predstavlja vpliv generacije, disipacije in interakcije val – val.

Izrazi za hitrost propagacije v σ in θ prostoru so podane v linearni teoriji valovanja (Whitman, 1974; Dingemans, 1997).

V plitvi vodi k členu S prispeva 6 procesov:

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl3}(\sigma, \theta) + S_{nl4}(\sigma, \theta) + S_{ds,w}(\sigma, \theta) + S_{ds,b}(\sigma, \theta) + S_{ds,br}(\sigma, \theta) \quad (2.40)$$

kjer je:

$S_{in}(\sigma, \theta)$ rast valov zaradi vetra,

$S_{nl3}(\sigma, \theta), S_{nl4}(\sigma, \theta)$ nelinearen transfer energije valov zaradi tri oz. štiri valovne interakcije,

$S_{ds,w}(\sigma, \theta)$ razpad valov zaradi penjenja,

$S_{ds,b}(\sigma, \theta)$ trenje ob dnu,

$S_{ds,br}(\sigma, \theta)$ lom valov induciran z globino.

Posamezni procesi in enačbe, ki jih opisujejo, so podani v literaturi (Holthuisen in sod., 1989; Ris in sod., 1999).

Valovni modeli tretje generacije so zaradi prisotnosti več časovnih meril numerično zahtevni, zato je bilo predlaganih več numeričnih postopkov, ki omogočajo bolj ekonomičen račun (WAMDI Group, 1988; Hargreaves in Annan, 2001) in numerično stabilnost pri relativno velikih časovnih korakih (Hersbach in Janssen; 1999, Booij in sod; 1999). Rešitev za stacionarno stanje dobimo v modelu SWAN z iterativnim postopkom, kjer je pomembna formulacija in uporaba kriterija prekinitve. V modelu sta opravljeni dve diskretizaciji in sicer diskretizacija v geografskem in diskretizacija v spektralnem prostoru, kakor je podrobno opisano v literaturi (Booij in sod., 1999).

Robni pogoji v modelu SWAN, tako v geografskem kot spektralnem prostoru v celoti absorbirajo energijo valov, ki zapuša računsko domeno ali prečka obalo. Energijo vala, ki prihaja, mora vzdolž odprtih geografskih robov predpisati uporabnik (Booij in sod., 1999).

Opisani valovni model SWAN se za simulacije valovanja uporablja na ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje) in NIB (Nacionalni inštitut za biologijo). V okviru sodelovanja na projektu "Vpliv

cirkulacije v široko odprtih zalivih in pomorskega prometa na transport sedimenta" nam ARSO zagotavlja podatke, ki jih lahko prek izdelanega vmesnika vključimo v model PCFLOW3D ter tako upoštevamo vpliv valovanja na privzdigovanje sedimentov.

2.3 VPLIV CURKA ZA LADIJSKIM VIJAKOM

Napovedi hitrosti znotraj curka ladijskega vijaka so zaradi možne erozije dna velikega pomena pri načrtovanju pomorskih zgradb. Pojav je opisan v literaturi (Whitehouse, 1998; Sumer in Fredsøe, 2002; Gaythwaite, 2004) in na podlagi raziskav je bilo ugotovljeno, da je napoved hitrosti znotraj curka ladijskega vijaka prvi korak pri poznavanju erozije dna, ki ga povzroči curek ladijskega vijaka.

Rotirajoči ladijski vijak vsrkava vodo, jo pospešuje ter jo nato dolvodno od ladijskega vijaka izpusti. Ta izpust vode je tok z veliko hitrostjo, ki lahko, če je nenadzorovan, izpodjeda morsko dno. V neomejenem območju se hitrost toka zmanjšuje proporcionalno z razdaljo od vijaka, s tem da v gibanje spravi okoliško vodo, če pa je curek omejen, se velika hitrost curka ne bo znižala na ta način, ampak bo povzročila škodo na sosednjem območju. Kot je opisal Hamill (1987), pride do erozije morskega dna, kadar je gibanje curka omejeno z dnom.

Curek za ladijskim vijakom je zapletena oblika toka z osno (v smeri toka), rotacijsko/tangencialno in radialno komponento hitrosti. Za oblikovanje enačb, ki opisujejo curek za ladijskim vijakom, se običajno uporabljajo eksperimentalne študije (Fuehrer in Römisch, 1977; Blaauw in van de Kaa, 1978; Berger in sod., 1981; Verhey, 1983; Hamill, 1987; Kee in sod., 2006; Lam in sod., 2010).

Curek ladijskega vijaka torej povzroča strižne hitrosti ob dnu, ki lahko povečajo skupno pridno strižno napetost, od te pa je odvisno privzdigovanje oziroma resuspendiranje sedimentov. V notranjosti plitvih zalivov je lahko pomorski promet in s tem vpliv curka za ladijskim vijakom (Malačič in sod., 2010), glavni vplivni dejavnik za resuspendiranje sedimentov, onesnaženih s strupenimi kovinami. Med temi kovinami so predvsem nikelj, kadmij in živo srebro, le-to pa, ko preide v prehranjevalno verigo, pomeni veliko nevarnost za zdravje ljudi na koncu prehranjevalne verige (Horvat in sod., 1999).

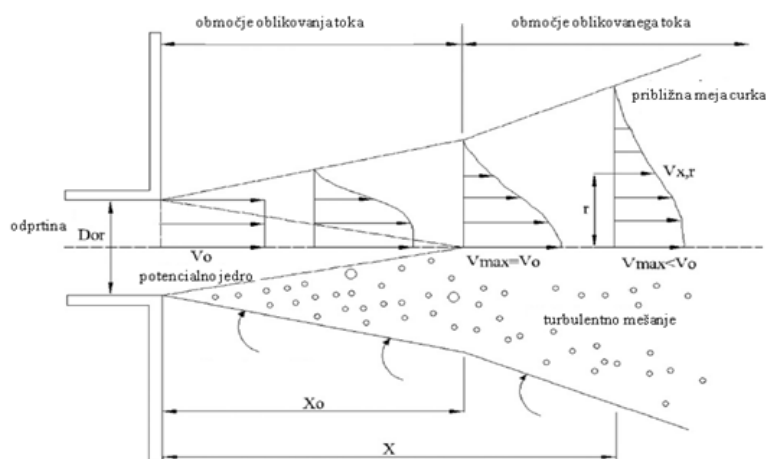
2.3.1 Oblikovanje in koncept curka za ladijskim vijakom

Princip delovanja propelerja je, da prenosna gred prenaša vrtilni moment vijaku, ki ga pretvarja v potisno – aksialno silo. Vijak to potisno silo zagotavlja s povečevanjem vzvratne gibalne količine

tekočine, v katero je potopljen, zaradi tega tekočina na vijak vpliva z naprej usmerjeno (reakcijsko) silo, ki je uporabljena za propulzijo. To je osnovni koncept, na katerem temeljijo vse teorije propulzije vijakov (Stewart, 1992).

Magnituda hitrosti curka za ladijskim vijakom se od začetne ravnine, ki je takoj dolvodno od curka vijaka (iztočna ravnina), vzdolž longitudinalne osi manjša (Blaauw in van de Kaa, 1978; Hamill, 1987; Stewart, 1992; McGarvey, 1996).

Osnova za vse raziskave na področju curka za ladijskim vijakom je študija Albertsona (in sod., 1950), ki je za proučevanje hitrostnega polja znotraj curka uporabil ravninski vodni curek, ki temelji na teoriji gibalne količine v smeri toka. Proučevanje potopljenega curka bazira na opazovanjih ravninskega curka iz odprtine, kot je prikazano na sliki 1.



Slika 1: Shematični prikaz razpršitve curka, ki brizga iz odprtine (povzeto po Albertson in sod., 1950, str. 640).

Figure 1: Schematised representation of a diffusing jet from an orifice (adapted from Albertson et al., 1950, pp. 640).

Študija je temeljila na naslednjih predpostavkah:

1. Hidrostatični raspored tlakov po celotnem toku.
2. Proces razpršitve je dinamično podoben v vseh pogojih.
3. Longitudinalno komponento hitrosti znotraj območja razpršitve lahko v vsakem prečnem prerezu aproksimiramo z Gaussovo verjetnostno porazdelitveno funkcijo.

Razlika med hitrostjo curka in hitrostjo okoliške tekočine močno poveča stopnjo nestabilnosti, poleg tega se kinetična energija prihajajočega toka enakomerno pretvarja v turbulentno kinetično energijo, le-ta pa enakomerno disipira skozi viskozno strižno napetost. Vendar pa takšna pretvorba energije ni omejena samo na bližino odprtine, iz katere brizga curek, saj vsaka redukcija kinetične energije obvezno pomeni zmanjšanje hitrosti toka (Albertson in sod., 1950).

Ugotovljeno je bilo, da lahko ravninski curek delimo na dve območji, območje oblikovanja toka in območje oblikovanega toka. V območju oblikovanja toka je maksimalna hitrost konstantna, medtem ko se porazdelitev bočno širi, v tem delu je prisotno izrazito potencialno jedro, katerega bočni del se zaradi turbulentnega mešanja med jedrom in okoliško tekočino krči. V območju oblikovanega toka prične maksimalna hitrost vzdolž rotacijske osi padati, pričetek gibanja okoliške tekočine pa je odvisen od zmanjšanja hitrosti curka. Proces razpršitve se na tej točki nadaljujejo brez velikih sprememb (Stewart in sod., 1991). Poleg tega je ravninski curek osno simetričen, kar pomeni, da je celoten curek zrcalen glede na središčno os (Hamill, 1987). Naklon razpršitve v območju oblikovanja toka naj bi bil manjši kot naklon v območju oblikovanega toka (Albertson in sod., 1950).

Teorija gibalne količine v smeri toka, na kateri temeljijo tudi študije, ki jih je opravil Albertson (in sod., 1950), temelji na naslednjih predpostavkah:

1. Vijak je predstavljen kot idealen aktuatorski disk enakovrednega premera.
2. Disk je sestavljen iz neskončnega števila vrtečih se lopatic, ki se vrtijo z neskončno hitrostjo.
3. V smeri toka je debelina diska zanemarljiva.
4. Disk je potopljen v idealno tekočino brez motenj.
5. Vsi elementi tekočine, ki prečkajo disk, so podvrženi enakemu povečanju tlaka.
6. Energija, ki jo prejme disk, se prenese na tekočino brez povzročitve efektov vrtenja.

V praksi so značilnosti hitrosti curka za ladijskim vijakom precej bolj zapletene, kot so predstavljene z ravninskim vodnim curkom. Uporaba teorije gibalne količine v smeri gibanja oziroma poenostavljenega ravninskega vodnega curka namesto rotirajočega curka za vijakom ima naslednje pomanjkljivosti:

1. Teorija gibalne količine v smeri toka upošteva samo karakteristike toka v smeri gibanja, kljub temu, da sta v curku prisotni še rotacijska in radialna komponenta hitrosti, ki bi ju bilo potrebno upoštevati (Quarain, 1994).
2. Predpostavke, ki pravijo, da je disk sestavljen iz neskončnega števila lopatic, ki rotirajo z neskončno hitrostjo, uporabljene v teoriji gibalne količine v osni smeri, niso primerne za uporabo pri realnih curkih za vijakom (Hamill in sod., 2004).
3. Zaradi pesta, ki z jaškom povezuje vijak, je vzorec toka vzdolž rotacijske osi curka za vijakom različen od enostavnega potopljenega curka (Berger in sod., 1981; Verhery, 1983).

Zaradi teh pomanjkljivosti je bilo za modificiranje teoretičnih enačb opravljenih več študij (Oebius in Schuster 1975; Blaauw in van de Kaa, 1978; Berger in sod., 1981; Verhey, 1983; Robakiewicz, 1987; Hamill, 1987), v katerih so vključene tudi lastnosti vijaka.

2.3.2 Analiza toka

Za analizo toka oziroma zapis osnovnih enačb gibanja obravnavamo krožni turbulentni curek premera D_0 , ki z enakomerno hitrostjo V_0 brizga iz odprtine v mirujočo tekočino,

Izpeljavo enačb začnemo z Reynoldsovimi enačbami za stalen osno simetričen tok v cilindričnem sistemu (r, ϕ, z) , ob upoštevanju približkov mejne plasti, saj je debelina curka v transverzalni smeri majhna. Enačbe lahko napišemo kot (Rajaratnam, 1976):

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \quad (2.41)$$

$$- \left(\frac{\partial}{\partial r} \overline{v_r'^2} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{v_r' v_z'} + \frac{\overline{v_r'^2}}{r} - \frac{\overline{v_\phi'^2}}{r} \right)$$

$$v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} + \frac{v_r v_\phi}{r} = \nu \left(\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r^2} + \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial z^2} \right) \quad (2.42)$$

$$- \left(\frac{\partial}{\partial r} \overline{v_r' v_\phi'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{v_\phi' v_z'} + 2 \frac{\overline{v_r' v_\phi'}}{r} \right)$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (2.43)$$

$$- \left(\frac{\partial}{\partial r} \overline{v_r' v_z'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{v_z'^2} + \frac{\overline{v_r' v_z'}}{r} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} r v_r + \frac{\partial}{\partial z} r v_z = 0 \quad (2.44)$$

kjer je:

v_r, v_z, v_ϕ srednje hitrosti po času, v smereh r, z in ϕ ,

v'_r, v'_z, v'_ϕ fluktuacije hitrosti, v smereh r, z in ϕ .

Za krožne curke brez vrtinčenja je $v_\phi = 0$, tako iz enačb izpadejo vsi členi, ki vsebujejo v_ϕ in njene odvode. Poleg tega so gradienti v radialni smeri precej večji od tistih v smeri osi, $v_z \gg v_r$. Ob pogoju, da je Reynoldsovo število šobe večje od nekaj tisoč, lahko predpostavimo, da so viskozne napetosti veliko manjše od ustreznih turbulentnih strižnih napetosti. Poleg tega so normalne turbulentne napetosti približno enake v radialni in periferni smeri (Wyganski in Fielder, 1969). Ob teh predpostavkah in ureditvi lahko enačbo gibanja zapišemo kot:

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\overline{rv'_r v'_z}) \quad (2.45)$$

kjer je:

p tlak zunaj curka.

Oсно razdaljo v smeri gibanja označimo z x , tako so hitrosti v smeri gibanja in radialni smeri v_x in v_r in lahko enačbe gibanja zapišemo kot:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial r\tau}{\partial r} \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} rv_x + \frac{\partial}{\partial r} rv_r = 0 \quad (2.47)$$

kjer je:

τ turbulentna strižna napetost, ki je enaka: $\tau = -\rho \overline{v'_r v'_z}$.

V večini praktičnih primerov je kvocient dp/dx približno 0, zato obravnavamo tokove z ničelnim gradientom tlakov, s tem pogojem se enačba 2.46 še dodatno poenostavi:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial r\tau}{\partial r} \quad (2.48)$$

Enačbi 2.47 in 2.48 tako predstavljata poenostavljeni enačbi gibanja za krožni curek.

Pri razpršitvi krožnega curka v mirujočo tekočino iste vrste, z ničelnim gradientom tlakov, jasno vidimo, da se ohranja pretok gibalne količine curka v osni smeri (smeri toka), vendar pa to želimo izraziti še z enačbami. Enačbo 2.48 pomnožimo z ρr in jo integriramo po r , v mejah od 0 do ∞ , tako po ureditvi dobimo:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\infty} 2\pi r dr \rho v_x^2 = 0 \quad (2.49)$$

Enačba 2.49 kaže, da je stopnja spremembe toka gibalne količine v smeri toka enaka nič oziroma da se tok gibalne količine v smeri toka ohranja.

Po ureditvi dobimo enačbo 2.50, po kateri je stopnja zmanjševanja kinetične energije enaka stopnji produkcije turbulence:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\infty} 2\pi r dr v_x \frac{\rho v_x^2}{2} = - \int_0^{\infty} 2\pi r dr \tau \frac{\partial v_x}{\partial r} \quad (2.50)$$

2.3.3 Semi – empirične enačbe curka za vijakom

Na podlagi eksperimentov je bilo predlagano, da porazdelitev hitrosti v smeri gibanja (vzdolžna smer) opišemo z dvema simetričnima polovicama Gaussove porazdelitvene funkcije (Albertson in sod., 1950):

$$\frac{v_x}{v_{max}} = \exp\left(-\frac{r^2}{2(Cx)^2}\right); \quad r^2 = y^2 + z^2 \quad (2.51)$$

kjer je:

v_x hitrost v smeri gibanja,

C empirična konstanta,

v_{max} hitrost na osi toka,

x osna razdalja od izvora (od ravnine vijaka),

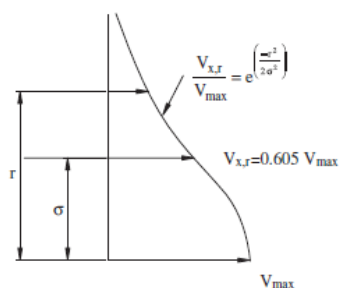
r radij od izvora (v ravnini vijaka).

Gaussova krivulja porazdelitve hitrosti je odvisna od dveh parametrov, empirične konstante in hitrosti v smeri gibanja (slika 2). Pogoji dinamične podobnosti zahtevajo, da je v vsakem prečnem prerezu, ne glede na iztočno hitrost, kot razpršitve curka konstanten:

$$\frac{\sigma}{x} = C \tag{2.52}$$

kjer je:

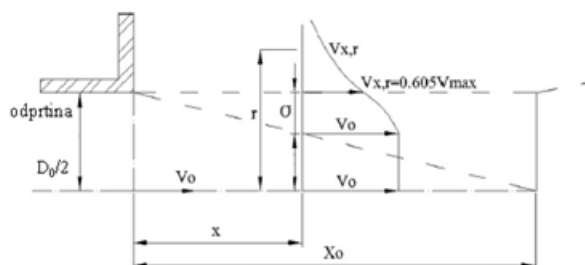
σ standardna deviacija hitrosti.



Slika 2: Karakteristike Gaussove normalne porazdelitvene krivulje (povzeto po Albertson in sod., 1950, str. 643).

Figure 2: Characteristics of the Gaussian normal probability curve (adopted from Albertson et al., 1950, pp. 643).

Območje oblikovanja toka. Porazdelitev v_x v vsakem prečnem prerezu lahko predstavimo kot prvo aproksimacijo krivulje dveh simetričnih polovic Gaussove porazdelitvene funkcije, ki sta povezani z ravno črto skozi središče (slika 3) (Albertson in sod., 1950).



Slika 3: Skica območja oblikovanja toka (povzeto po Albertson in sod., 1950, str. 644).

Figure 3: Definition sketch for the zone of flow establishment (adopted from Albertson et al., 1950, pp. 644).

Meja območja oblikovanja toka je enaka:

$$\frac{x_0}{D_0} = \frac{1}{2C} \quad (2.53)$$

kjer je:

x_0 razdalja od odprtine do konca območja oblikovanja toka,

D_0 premer odprtine,

C konstanta.

Konstanto C oziroma razmerje $\frac{x_0}{D_0}$ so predlagali različni avtorji, ki tako navajajo naslednje vrednosti:

- Alberston in sod. (1950): $\frac{x_0}{D_0} = 6,2$; $C = 0,081$
- Fuehrer in sod. (1987): $\frac{x_0}{D_0} = 2,6$; $C = 0,192$
- Blaauw in van de Kaa (1978): $C = 0,19$ (odprti vijaki); $C = 0,17$ (zaščiteni vijaki)
- Verhery (1983): $\frac{x_0}{D_0} = 2,77$
- Hamill (1987): $\frac{x_0}{D_0} = 2$
- Stewart (1992): $\frac{x_0}{D_0} = 3,25$

V praksi se uporablja poenostavljena oblika porazdelitve hitrosti znotraj območja oblikovanja toka:

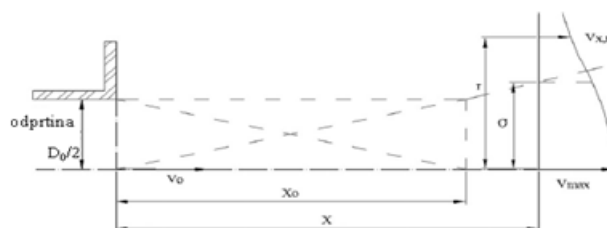
$$\frac{v_{x,r}}{v_{max}} = \exp \left[-\frac{(r + Cx - D_0/2)^2}{2(Cx)^2} \right] \quad (2.54)$$

V območju oblikovanja toka je $v_{max} = v_0$, zato je porazdelitev hitrosti iz iztočne ravnine do konca območja oblikovanja toka za potopljen curek enaka:

$$\frac{v_{x,r}}{v_0} = \exp \left[-\frac{(r + Cx - D_0/2)^2}{2(Cx)^2} \right] \quad (2.55)$$

Območje oblikovanega toka. V območju, kjer je turbulentni tok popolnoma razvit, je pri potopljenem curku zmanjšanje maksimalne hitrosti proporcionalno oddaljenosti od iztočne ravnine:

$$\frac{v_{max}}{v_0} = \frac{1}{2C} \frac{D_0}{x} \quad (2.56)$$



Slika 4: Skica območja oblikovanega toka (Albertson in sod., 1950, str. 646).

Figure 4: Definition sketch for the zone of established flow (adopted from Albertson et al., 1950, pp. 646).

Tako je hitrost na določeni razdalji izračunana po enačbi:

$$\frac{v_{x,r}}{v_0} = \frac{1}{2C} \frac{D_0}{x} \exp \left[-\frac{r^2}{2(Cx)^2} \right] \quad (2.57)$$

Na podlagi študij so različni avtorji predlagali enačbe za oceno maksimalne hitrosti curka za vijakom z uporabo različnih koeficientov:

- Fuerher in Römisch (1987): $\frac{v_{max}}{v_0} = 2,6 \cdot \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-1,0}$
- Blaauw in van de Kaa (1978): $\frac{v_{max}}{v_0} = 2,8 \cdot \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-1}$
- Berger in sod. (1981): $\frac{v_{max}}{v_0} = 1,025 \cdot \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-0,6}$
- Verhey (1983): $\frac{v_{max}}{v_0} = 1,275 \cdot \left(\frac{x}{D_0}\right)^{-0,7}$

Rotacijsko/tangencialne in radialni komponenti hitrosti znotraj curka sta manj pomembni od vzdolžne komponente hitrosti, zato ju običajno zanemarimo. Poleg tega je bilo na tej problematiki opravljenih malo raziskav, ki bi dale enačbe, potrebne za izračun.

2.3.4 Hitrost toka ob dnu zaradi curka vijaka

Ob upoštevanju samo območja oblikovanega toka lahko določimo maksimalno vrednost hitrosti, ki se oblikuje za ladijskim vijakom ob dnu $v_{b,max}$.

Hitrost na razdalji $x_{max} = \frac{h}{c}$ je enaka:

$$\frac{v_{b,max}}{v_0} = \frac{e^{-1/2}}{2 \cdot h/D_0} \approx \frac{0,303}{h/D_0} \quad (2.58)$$

Enačba nam pove, da hitrost pada z globino.

Moffat in Nichol (2005) navajata enačbo za hitrost na dnu:

$$\frac{v_{b,max}}{v_0} = \alpha \cdot \frac{D_0}{z_b} \quad (2.59)$$

kjer je:

α konstanta, ki ima vrednost med 0,25 in 0,75 (Moffat in Nichol, 2005), Maynord (1988) pa podaja vrednosti 0,22 za odprte vijake in 0,3 za zaščitene, cevne vijake,

z_b globina (razdalja vijaka do dna)

Na osnovi teorije in predpostavk (Blaauw in van de Kaa, 1978) lahko iztočno hitrost vijaka v_0 izračunamo kot:

$$v_0 = 1,6 \cdot n \cdot D_0 \cdot \sqrt{K_T} \quad (2.60)$$

kjer je:

n hitrost rotacije vijaka, ki je enaka številu obratov vijaka na minuto

D_0 premer curka pri maksimalnem krčenju, do katerega lahko pride na iztočni ravnini v primeru nezaščenega vijaka))

K_T koeficient potiska vijaka

V primeru zaščenega vijaka je premer curka pri maksimalnem krčenju enak:

$$D_0 = D_P \quad (2.61)$$

v primeru odprtega vijaka pa je premer curka enak:

$$D_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot D_P \quad (2.62)$$

kjer je:

D_P premer ladijskega vijaka.

Kadar vrednost koeficienta potiska ni znana, za račun iztočne hitrosti vijaka v_0 uporabimo empirično formulo, ki temelji na inštalirani moči motorja P :

$$v_0 = 1,15 \cdot \left(\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2} \right)^{1/3} \quad (2.63)$$

kjer je:

P inštalirana moč motorja

ρ_w gostota vode.

2.4 VPLIV VEGETACIJE NA TRANSPORT SEDIMENTOV

2.4.1 Hidravlični upor

Kljub temu, da je vpliv vegetacije na tok vode pomemben pri upravljanju z vodo, je njegovo poznavanje še vedno zelo omejeno. Ta vpliv se v Chezy-Mannigovih enačbah rutinsko opiše s pomočjo Manningovega koeficienta hrapavosti n_G , vendar pa njegova določitev temelji bolj na subjektivnih izkušnjah kot pa na objektivnih meritvah. Na podlagi poskusov v naravi (Dawson in Robinson, 1984) je bilo ugotovljeno, da se n_G v z vegetacijo poraslih rekah giblje med 0,03 in 0,3, na njegovo vrednost pa vplivata tako pretok, kot vegetacija. V splošnem je razvidno obratno sorazmerje med pretokom in koeficientom n_G , razen v primeru visokovodnih dogodkov, ko vegetacijo tok odnese ali poleže, hkrati pa se prerazporedijo sedimenti na dnu. Študije so pokazale tudi odvisnost

koeficienta hrapavosti od sezonske rasti, različnih vrst in oblike rasti vegetacije (Westlake in Dawson, 1988).

2.4.2 Resuspendiranje sedimentov

Kot je opisano v poglavju 2.1, mora biti sediment najprej erodiran, potem pa pod določenimi pogoji pride do resuspendiranja. Resuspendiranje delcev je odvisno tudi od dela vodnega stolpca, ki ga zavzema vegetacija. Ko vegetacija zavzema celoten vodni stolpec, so hitrosti vodnega toka zmanjšane do te mere (Ward in sod., 1984; Fonseca in Fisher, 1986), da lahko pride do akumulacije sedimenta. V obratnem primeru, ko je globina vode višja od maksimalne višine vegetacije, oslabitve hitrosti niso tako izrazite in lahko pride tudi do resuspendiranja (Ward in sod., 1984).

Resuspendiranje sedimentov znotraj ali izven območij poraščenih z vegetacijo na dnu lahko povzroči izločanje nutrientov v vodni stolpec (Wainright, 1990). Depozicija in resuspendiranje sedimenta znotraj območij z vegetacijo na dnu sta odvisni od hidrodinamičnih pogojev, katerim je vegetacija izpostavljena (Koch in Gust, 1999). V času ekstremnih dogodkov lahko pride do uničenja velikih količin vodne vegetacije, kar lahko privede do resuspendiranja velikih količin sedimenta, ki je v normalnih pogojih »zaščiten« z vegetacijo (Roblee in sod., 1991).

Gibanje vode ima velik vpliv na rast vegetacije, saj je pri nizkih do srednjih hitrostih tipično tako njeno obilje kot raznolikost, pri večjih hitrostih pa se njena rast zmanjša. Zaradi tega vegetacija (makrofiti na dnu) znižuje hitrost vode, tako v območju z vegetacijo na dnu kot v območjih, ki so povezana s takšnim dnom, kar povzroči povečano sedimentacijo in zmanjšano kalnost vode.

Za račun vpliva vegetacije na resuspendiranje sedimentov imamo ustrezno metodologijo, vendar nimamo potrebnih podatkov o vegetaciji. Vgradnjo v model PCFLOW3D smo odložili za toliko časa, da bodo ustrezni podatki na voljo.

2.5 POJAV HISTEREZE TRANSPORTA SEDIMENTOV

Stopnjo transporta sedimentov je potrebno obravnavati kot spremenljivko, ki vpliva na procese tvorbe rečnega dna (Garde in Ranga Raju, 1994). Pretočne krivulje plavin, ki predstavljajo povezavo med pretokoma plavin in vode, se pogosto uporabljajo za določanje koncentracije plavin v rekah. Takšno povezavo največkrat dobimo z regresijsko analizo, vendar pa sta Lopes in Ffolliott (1993) v povezavi med koncentracijo sedimenta in toka reke odkrila dodatno nezanesljivost zaradi pojava histereze. To

pomeni, da imamo lahko več različnih koncentracij sedimenta pri istem pretoku (običajni sta dve vrednosti - za podan pretok vode v naraščajoči oziroma padajoči veji hidrograma) (Brownlie, 1981).

Sedimentne pretočne krivulje nam podajo razmerje med pretokom vode in koncentracijo sedimentov (statistično razmerje med koncentracijo lebdječih plavin in pretokom vode). Te pretočne krivulje imajo običajno eksponentni zakon v obliki (Syvitski in sod., 2000):

$$C_s = aQ^b \quad (2.64)$$

kjer je:

C_s koncentracija lebdječih plavin

Q pretok vode

a koeficient pretočne krivulje

b eksponent pretočne krivulje

Podobno lahko pretok lebdječih plavin zapišemo kot:

$$Q_s = aQ^{b+1} \quad (2.65)$$

Pri pogojih stalnega enakomernega toka je razmerje med pretokom vode in globino vode ter koncentracijo plavin enotno, pri nestalnem toku pa to ne velja več, saj se oblikuje histerezna zanka. Na podlagi raziskav je bilo ugotovljeno, da obstaja pet običajnih razredov, kamor lahko razvrstimo posamezno zanko.

Če predpostavimo, da je pretok sedimentov na meter širine q_s odvisna spremenljivka, lahko funkcijsko razmerje zapišemo kot:

$$q_s = f_1(U, h, \rho, \Delta\rho_s, g, \mu, d, \Delta h/\Delta t, S) \quad (2.66)$$

kjer je:

U povprečna hitrost toka

h globina vode

ρ masna gostota tekočine

$$\Delta\rho_s = (\rho_s - \rho) \quad (2.67)$$

ρ_s masna gostota delcev plavin

g gravitacijski pospešek

μ dinamična viskoznost tekočine

d premer delcev plavin

$\Delta h/\Delta t$ stopnja spremembe globine

S črta nagiba skupne energije

Na samem merilnem mestu je tako potrebno opraviti meritve globine in temperature vode ter koncentracije sedimentov. Na podlagi teh podatkov tako izračunamo pretok vode Q ter ostale člene enačbe (2.66). Za oblikovanje histereze so torej potrebne meritve koncentracije sedimentov pri različnih pretokih, poleg tega pa je pomembna tudi zgodovina poplavnih dogodkov: pri zaporednih poplavnih valovih je transport največji pri prvem dogodku. Poleg zahtevnih meritev, še posebno v naravnih rečnih koritih, je zahteven tudi sam račun oziroma določanje histereze, ki jo lahko oblikujemo na podlagi meritev s pomočjo regresijske analize (Ahanger in sod., 2008).

2.6 IZMENJAVA HLAPNIH SNOVI MED VODO IN ZRAKOM

Pri študijah globalnega biogeokemičnega kroženja živega srebra je ena glavnih negotovosti v določevanju izmenjave plinov med atmosfero in oceani. Tudi za poznavanje vloge oceanov v atmosferski kemiji in izračunih povezanih s podnebjem in podnebnimi spremembami, je potrebna čim bolj natančna kvantifikacija tega procesa.

Hitrost vetra ni edini dejavnik, ki vpliva na hitrost izmenjave plinov. Nanjo vplivajo tudi turbulenca na meji voda-zrak, stabilnost mejnih plasti in mehurčki. Nekateri izmed teh parametrov niso povezani s hitrostjo vetra, zato bi bilo napačno, če bi pri hitrosti izmenjave plinov upoštevali samo hitrost vetra.

Plinska izmenjava živega srebra med površinsko vodo in atmosfero je najpomembnejši mehanizem v procesu prehajanja živega srebra med morskou vodo in zrakom (Mason in sod., 1994). Za izračun izmenjave živega srebra med vodo in zrakom smo izdelali dva modela, ki temeljita na modelu izmenjave plinov (GEM). Prvi je del BGK modula v modelu PCFLOW3D, ki je opisan v poglavju 2.7,

druga metoda pa uporablja isti model izmenjave plinov na podlagi ročnega računa, ki je bil predstavljen v literaturi (metoda Gårdfeldt, Gårdfeldt in sod., 2003) in uporabljen tudi v nekaterih študijah izmenjave živega srebra v Tržaškem zalivu. Kljub temu, da je uporabljen podoben pristop, ki temelji na isti metodi, so razlike med uporabo matematičnega modela in ročnega računa velike (Ramšak, 2007; Ramšak in sod., 2013).

2.6.1 GEM (gas exchange model) – model izmenjave plinov

Uporabljeni model izmenjave plinov (GEM) je na podlagi poskusov v vetrovniku razvil Wanninkhof (1992). Podrobneje je opisan v Gårdfeldt in sod. (2003), temelji pa na dvoslojnim modelu (Liss in Slater, 1974), dopolnjenim z empiričnimi podatki. Hitrost izmenjave plinov je bila določena za CO₂, v raziskavi pa smo uporabili enačbe, prirejene za račun izmenjave živega srebra, kot je opisano v Gårdfeldt in sod. (2003). Pri računu hitrosti izmenjave plinov (enačba 2.69) smo upoštevali Schmidtovo število za elementarno živo srebro (Sc_{Hg}), ki predstavlja razmerje med kinematično viskoznostjo vode in difuzijo Hg^0 in je odvisno od površinske temperature vode. Vrednosti Sc_{Hg} izračunamo s pomočjo metode Wilke-Chang, ki je opisana v Reid in sod. (1987) (Gårdfeldt; osebni vir). Na osnovi enačb, ki so opisane v Ramšak (2007) in podatkov o posameznih členih, ki v teh enačbah nastopajo, lahko določimo vrednost Sc_{Hg} pri podani temperaturi vode.

Za račun izmenjave živega srebra med vodo in zrakom potrebujemo podatke o koncentracijah raztopljenega elementarnega živega srebra v vodi in zraku (DGM in TGM), temperaturi vode (T_w) in hitrosti vetra (u), za izračun pa uporabimo enačbo:

$$Hg_{evasion} = k_w(DGM - TGM/H'(T_w)) \quad (2.68)$$

kjer je:

DGM dissolved gaseous mercury – raztopljeno plinasto živo srebro, ki je v površinskih vodah v glavnem prisotno kot elementarno plinasto živo srebro

TGM total gaseous mercury - živo srebro v zraku,

k_w hitrost izmenjave plinov po Wanninkhofu (1992)

$$k_w = Au_{10}^2 (Sc_{Hg}/B)^{-0,5} \quad (2.69)$$

- A faktor, ki ga dobimo iz Weibullove porazdelitve hitrosti vetra nad oceanom; enak je 0,31 za merjene podatke vetra oziroma 0,39 za časovno povprečne vrednosti vetra,
- u_{10} hitrost vetra, normalizirana na višino 10 m nad morjem,
- Sc_{Hg} Schmidtovo število elementarnega živega srebra,
- B Schmidtovo število CO_2 v morski vodi pri $20^\circ C$,
- H' Henryjeva konstanta za elementarno živo srebro, ki je odvisna od lastnosti vode; Andersson in sod., 2007 predlagajo naslednjo povezavo:

$$H' = \frac{M_w (\exp^{-2708,4/T_w + 15,1515})}{R \rho_w} \quad (2.70)$$

kjer je:

- M_w molarna teža vode,
- T_w temperatura vode na površini v stopinjah Kelvina,
- R plinska konstanta,
- ρ_w gostota vode.

Metodo Gårdfeldt smo uporabili pri ročnem računu izmenjave živega srebra med vodo in zrakom v Sredozemlju, kar doslej še ni bilo izvedeno. Dosedanje opravljene napovedi izmenjave temeljijo na kratkotrajnih merjenih podatkih o vetru (Andersson in sod., 2001) ali so izvedene kot simulacije s povezanima modeloma RAMS-Hg in PCFLOW3D (Žagar in sod., 2007).

2.7 OPIS MODELA IN POSAMEZNIH MODULOV PCFLOW3D

Na katedri za mehaniko tekočin UL FGG je bil razvit tridimenzionalni model PCFLOW3D. Sestavljajo ga štirje moduli: hidrodinamični modul (HD), transportno-disperzijski modul (TD), sedimentacijski modul (ST) in biogeokemični modul (BGK). Hidrodinamika temelji na enačbah plitvih voda, v smeri z pa uporabljamo hidrostatično aproksimacijo. Med zunanjimi dejavniki, ki vplivajo na hidrodinamične količine, lahko v modelu PCFLOW3D upoštevamo veter, plimovanje, pritoke rek, pretoke preko ožin in notranje sile zaradi gradientov temperature in slanosti ter posledično

gradientov gostote vode. Račun hidrodinamičnih količin poteka po metodi končnih volumnov, račun transporta in disperzije onesnažil pa lahko izvedemo na dva načina, z Eulerjevo metodo končnih razlik ali z Lagrangeovo metodo sledenja delcev. Model je bil uporabljen pri številnih praktičnih problemih modeliranja hidrodinamike, toka in transporta ter disperzije onesnažil pri nas in v tujini (Rajar, 2000; Rajar in Četina, 1997; Rajar in Širca, 1996, 1998; Rajar in sod., 1997, 2000, 2004a,b,c, 2007; Žagar in sod., 2006, 2007, 2012). Podrobnejši opis modela in dosedanega modeliranja z modelom PCFLOW3D najdemo v literaturi. Razvoj modela in primeri simulacij so opisani v Četina (1992), Četina in sod. (2000), Kovšca (2007), Rajar in Četina (1997a, b), Rajar in sod. (1997, 2000, 2004), Žagar in sod. (2007) in Sirkic (2011). Vgrajene modele turbulence z enačbami podrobno opisuje Dorić (2007a), navodila za uporabo modela pa Četina in sod. (1999).

2.7.1 Hidrodinamični modul

Najprej izračunamo komponente hitrosti po posameznih smereh, u , v , w in debelino vrhnjega sloja h_a , račun temelji na kontinuitetni enačbi za posamezni sloj in dinamični enačbi v vseh treh smereh. Vrednosti izračunanih komponent hitrosti nato uporabimo za reševanje advekcijsko - disperzijske enačbe, ki določa porazdelitev temperature in slanosti, prav tako te komponente uporabimo tudi v modulu BGK za račun ostalih skalarjev. Rezultate HD modula torej lahko uporabimo kot vhodne podatke v ostalih modulih. Neenakomerna porazdelitev temperature in slanosti vpliva na gostoto vode in posredno na hitrostno polje, zato se pri računu komponent hitrosti v naslednji iteraciji upošteva spremenjena gostota vode. Osnovne enačbe, kontinuitetno in dinamične, povprečimo po času, integriramo znotraj posameznih slojev debeline h in upoštevamo hidrostatično razporeditev tlakov, ter tako dobimo naslednje enačbe.

Kontinuitetna enačba za posamezni sloj debeline h , z izjemo površinskega:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + w_t - w_b = 0 \quad (2.71)$$

kjer so:

u, v komponenta hitrosti v smereh x in y ,

w_t, w_b komponenta hitrosti v smeri z na vrhu oziroma dnu kontrolnega volumna,

h debelina posameznega sloja.

Dinamične enačbe v smereh x, y in z ob upoštevanju hidrostatične aproksimacije:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(huw)}{\partial z} = +fvh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} + \frac{1}{\rho}\tau_{wx} - \frac{1}{\rho}\tau_{bx} + \quad (2.72)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hN_v \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(hvw)}{\partial z} = -fuh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} + \frac{1}{\rho}\tau_{wy} - \frac{1}{\rho}\tau_{by} + \quad (2.73)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hN_v \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$p = p_a + g \int_z^{z_s} \rho dz \quad (2.74)$$

kjer je:

$f = 2\Omega \sin\theta$ Coriolisov parameter (Ω ... kotna hitrost Zemlje, θ ... zemljepisna širina),

t čas,

p_a atmosferski tlak,

z_s višina vodne gladine,

N_h koeficient horizontalne turbulentne viskoznosti,

N_v koeficient vertikalne turbulentne viskoznosti,

ρ gostota,

τ_{wx}, τ_{wy} strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v smereh x in y ,

τ_{bx}, τ_{by} strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v smereh x in y .

Kinematični robni pogoj za površinski sloj:

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} = - \sum_{K=1}^N \left(\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} \right) \quad (2.75)$$

kjer je:

N število horizontalnih slojev, gledano v z smeri,

h_a gladina vode v površinskem sloju.

Advekcijsko-difuzijski enačbi za temperaturo in slanost:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hT)}{\partial t} + \frac{\partial(huT)}{\partial x} + \frac{\partial(hvT)}{\partial y} + \frac{\partial(hwT)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial(hR)}{\rho c_p \partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hs)}{\partial t} + \frac{\partial(hus)}{\partial x} + \frac{\partial(hvs)}{\partial y} + \frac{\partial(hws)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial(hR)}{\partial t} \right)_{površje} \end{aligned} \quad (2.77)$$

kjer je:

T temperatura,

s slanost,

D_h koeficient horizontalne turbulentne difuzije,

D_v koeficient vertikalne turbulentne difuzije ,

R penetracija kratkovalovnega sevanja preko vodne gladine,

c_p specifična toplota pri konstantnem tlaku

Enačba stanja kaže, da je gostota odvisna od porazdelitve temperature T , slanosti s in koncentracije snovi C :

$$\rho = \rho(T, s, C) \quad (2.78)$$

Podane enačbe predstavljajo hidrodinamični modul modela PCFLOW3D, z njimi pa lahko v različnih pogojih in ob upoštevanju različnih zunanjih sil simuliramo 3D cirkulacijo. Spremenljiva gostota omogoča tudi simulacije stratificiranega stanja.

Vpliv turbulence opišemo s tako imenovanimi 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. Model PCFLOW3D omogoča več kombinacij horizontalnega in vertikalnega modela turbulence. Možnosti so naslednje (Rodi, 1993):

- model s konstantno viskoznostjo (horizontalno in/ali vertikalno),
- Smagorinsky horizontalno,
- Smagorinsky vertikalno,
- Koutitas vertikalno,
- Mellor-Yamada vertikalno.

Podrobnejši opis naštetih modelov turbulence z enačbami najdemo v Dorić (2007a) in v Kovšca (2007).

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 R_i , natančne enačbe za gostotno in toplotno stratifikacijo pa so opisane v Četina (1992).

Za reševanje enačb v modelu PCFLOW3D uporabimo metodo kontrolnih volumnov, izpeljanko numerične metode končnih razlik s fiksno pravokotno mrežo v x, y in z smeri. Za diskretizacijo enačb v posamezni smeri uporabimo eno izmed numeričnih shem. Na voljo sta dve možnosti, QUICK in HIBRIDNA shema (Četina, 1992).

Vpliv zunanjih sil na gibanje vode znotraj modeliranega območja modeliramo s štirimi vrstami robnih pogojev, ki so opisani že v Četina (1992):

- *Robni pogoj na odprtem robu* je pomemben predvsem pri modeliranju odprtih območij. V modelu PCFLOW3D lahko na odprtem robu uporabimo ukleščeni (»clamped«), kontinuitetni ali

radiacijski robni pogoj, poleg tega pa lahko podamo tudi fiksne ali spremenljive hitrosti ter 1D ali 2D plimne krivulje.

- *Vtoke rek v morje* modeliramo tako, da definiramo vtočno celico, v kateri predpišemo pritek mase in gibalne količine; podamo komponenti hitrosti vtoka v x in y smeri ter slanost in temperaturo vtočne vode, model PCFLOW3D pa nato iz dimenzij vtočne celice sam določi pretok reke.
- *Na gladini* je potrebno podati faktor trenja zaradi vetra, od katerega je odvisno, koliko energije vetra se prenese na površinski sloj vode.
- *Na dnu* predpišemo Manningov koeficient trenja med vodo in sedimenti.

2.7.2 Transportno disperzijski modul

Osnovna enačba transportno-disperzijskega modula je advekcijsko-difuzijska enačba, zapisana za koncentracijo nekonservativnega onesnažila C :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} + \frac{\partial(hwC)}{\partial z} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + SRC \end{aligned} \quad (2.79)$$

kjer je:

C koncentracija nekonservativnega onesnažila,

SRC izvorno/ponorni člen, odvisen od vrste onesnažila oziroma procesov, ki jih želimo opisati (pri konservativnih onesnažilih odpade).

Zgornja enačba se od advekcijsko-difuzijskih enačb za temperaturo in slanost razlikuje predvsem po dodatnem izvorno-ponornem členu, v katerem lahko zajamemo procese pretvorb onesnažil in (na robovih) tudi tokove med okoljskimi segmenti

2.7.3 Sedimentacijski modul

S sedimentacijskim modulom določamo vrednost transporta in disperzije nekohezivnih sedimentov. Modul je zasnovan podobno kot 3D sedimentacijski modul Lin in Falconer (1996), sedimentacijsko hitrost pa določamo po Van Rijnu (1993).

Osnovne predpostavke, ki morajo biti izpolnjene pri računu transporta in koncentracij lebdečih plavin, so:

- sediment na dnu je sestavljen iz enakega materiala kot lebdeče plavine, na razpolago je neomejena količina sedimenta, resuspendiranje je zato vedno mogoče in na dnu nikoli ne naletimo na trdno podlago,
- dno je sestavljeno iz nesprijetih delcev, erozija ni odvisna od kohezivskih sil,
- odnašanje oziroma nanašanje materiala ob dnu je dovolj majhno, da ne vpliva na debelino spodnjega sloja v tolikšni meri, da bi se spremenile lastnosti toka,
- koncentracija lebdečih plavin je dovolj majhna, da ne vpliva na lastnosti vode (gostota, viskoznost) in toka, vpliva pa na hitrost usedanja delcev.

Osnovna tridimenzionalna advekcijsko-disperzijska enačba za račun lebdečih plavin v posameznem sloju debeline h se lahko zapiše v obliki:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}[(w - W_s)hC] &= \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.80)$$

kjer je:

C koncentracija lebdečih plavin,

W_s hitrost usedanja delcev (sedimentacijska hitrost).

Zgradba enačbe (2.80) je nekoliko drugačna od zgradbe enačb (2.76) in (2.77), saj tretji člen enačbe, ki izraža advekcijo v vertikalni smeri, vsebuje tudi izvorni člen, izražen s hitrostjo usedanja delcev W_s . Enačba je zapisana brez splošnega izvorno/ponornega člena, saj je ta v konkretnem primeru zajet v robnem pogoju ob dnu.

Enačbo rešujemo enako kot enačbe transportno-disperzijskega modula, način reševanja je podrobneje opisan v poglavju 2.2.1 in v literaturi (Četina, 1992). Poleg ostalih parametrov potrebujemo še razporeditev hitrosti usedanja delcev plavin W_s (privzamemo empirično rešitev za hitrost usedanja delcev, opisano v van Rijn, 1993) in enačbe robnih pogojev, ki so podrobneje opisane v literaturi (Žagar, 1999).

Pri transportu plavin v jezerih ali morju, kjer je razmerje med globino in ostalima dvema dimenzijama izrazito majhno, sta turbulentna viskoznost in difuzija v vertikalni smeri za točnost računa bistveno pomembnejši od istih količin v horizontalni smeri. Vertikalni koeficient turbulentne

viskoznosti/difuzije mora biti zato določen čim bolj natančno. V opisanem modelu je D_h konstanten, D_v pa lahko računamo po Koutitasu ali parabolično-konstantni porazdelitvi, kot je opisano v Žagar (1999).

Hitrost usedanja delcev W_s določimo s pomočjo empiričnih enačb (van Rijn, 1984; van Rijn, 1986; van Rijn 1993), ki so podane v poglavju 2.1.

Pri reševanju osnovne enačbe za transport lebdečih plavin (2.80) moramo predpisati štiri vrste robnih pogojev. Za robni pogoj na odprtem robu in robni pogoj ob obali veljajo iste enačbe in predpostavke kot pri osnovnem modelu PCFLOW3D, ki so v literaturi (Četina, 1992) že podrobneje opisane. Preostala robna pogoja pa sta opisana v nadaljevanju, podrobneje pa v Žagar (1997):

- *Prosta gladina.* Na prosti gladini je neto pretok v vertikalni smeri enak nič, torej mora biti izpolnjena enačba:

$$\left[W_s \cdot C + D_v \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{\zeta} = 0 \quad (2.81)$$

kjer je:

ζ kota gladine v obravnavanem času.

- *Robni pogoj ob dnu.* Robni pogoj ob dnu predstavlja splošni izvorno/ponorni člen za plavine. Na oziroma ob dnu lahko prihaja do dveh procesov povezanih, s plavinami. Prvi je usedanje plavin, kadar so strižne hitrosti ob dnu manjše od kritičnih, torej je transportni parameter $T \leq 0$, so v vodi prisotne lebdeče plavine. Do drugega procesa pa prihaja, kadar so strižne hitrosti ob dnu večje od kritičnih, $T > 0$, to je resuspendiranje že usedlih delcev. Kako izračunamo hitrost usedanja delcev in koncentracije ob dnu, je opisano v poglavju 2.1.

Iz rezultatov, prikazanih v Žagar (1999), je razviden pomen pravilnega upoštevanja porazdelitve temperature po globini v modelu. To še posebej velja za modeliranje biokemijskih procesov, saj se nekateri, za kvaliteto vode pomembni procesi, dogajajo prav ob dnu, kjer so razlike v koncentracijah plavin in na njih vezanih snovi največje.

Za račun debeline odnešenega oziroma nanešenega materiala v vsakem kontrolnem volumnu izračunamo masno bilanco vtoka in iztoka plavin po prostoru in času. Usedanje lebdečih plavin se pojavlja, kadar je ravnotežna koncentracija presežena, v nasprotnem primeru pa se z dna resuspendira tolikšna količina sedimenta, da je v celici dosežena ravnotežna koncentracija.

Vplive advekcije, disperzije, usedanja delcev iz celice nad obravnavano izračunamo iz enačb, ki so podane v literaturi (Žagar, 1997). Tako dobimo vrednosti mase vtoka zaradi različnih vplivov, ki jih uporabimo za račun mase plavin, ki prehaja iz obravnavane celice v obravnavanem časovnem koraku v celico pod njo zaradi usedanja delcev:

$$M_b^s = C_0 \cdot V_{cell} + M_W^a - M_E^a + M_S^a - M_N^a + M_B^a - M_T^a + M_W^d - M_E^d + M_S^d - M_N^d + M_B^d - M_T^d \quad (2.82)$$

kjer je:

M_i^a masa vtoka oziroma iztoka v/iz posamezne celice zaradi advekcije na stični ploskvi i med opazovanima celicama

M_i^d masa vtoka oziroma iztoka v/iz posamezne celice ob dnu zaradi difuzije,

M_T^s masa vtoka v posamezno celico zaradi usedanja delcev.

Masa plavin v posamezni celici ob dnu, izračunana iz ravnotežne koncentracije ob dnu, znaša:

$$M^e = C_{ae} \cdot V_{cell} \quad (2.83)$$

kjer je:

C_{ae} izračunana ravnotežna koncentracija v celici,

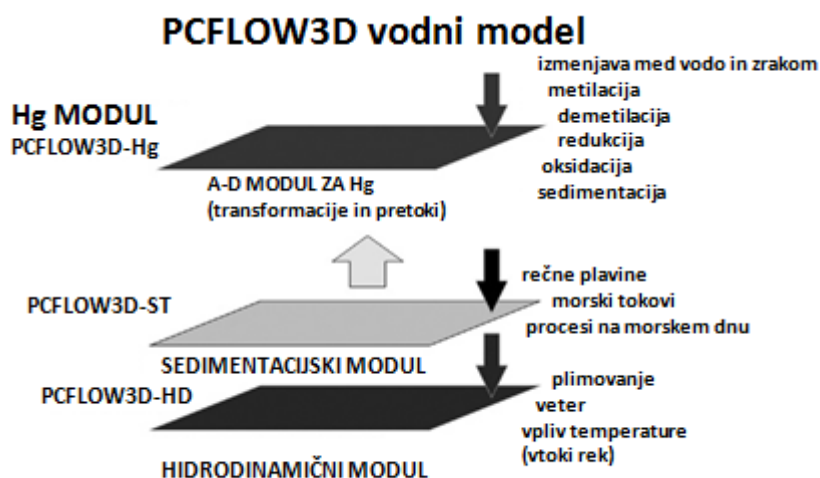
C_0 koncentracija v celici v prejšnjem časovnem koraku,

V_{cell} volumen obravnavane celice.

Masa resuspendiranega oziroma odloženega materiala je enaka razliki ($M^e - M_b^s$), izračunani v celici ob dnu, debelino erozije oziroma nanosa, ki ima negativni predznak, v obravnavani celici v posameznem časovnem koraku pa izračunamo po enačbi, ki upošteva gostoto plavin, poroznost oziroma zbitost ter površino celice. Na podlagi teh podatkov in enačbe lahko izračunamo debelino erozije oziroma nanosa, pozitiven predznak pomeni erozijo, negativen predznak pa nanos materiala (Žagar, 1997).

Potek reševanja transportno-disperzijske enačbe za lebdeče plavine (2.80) ob upoštevanju ustreznih robnih pogojev je enak poteku reševanja iste enačbe za temperaturo, slanost ali koncentracijo poljubnega polutanta, pri čemer so uporabljeni tudi isti podprogrami. Razlika je le v advekcijskih

koeficientih končnih algebrajskih enačb, kjer je v vertikalni smeri upoštevana tudi hitrost usedanja delcev, kot je razvidno iz enačbe (2.80).



Slika 5: Osnovna struktura modela PCFLOW3D brez biogeokemičnega modula (povzeto po Žagar in sod., 2007, str. 67).

Figure 5: Basic structure of the PCFLOW3D model without the biogeochemical module (adapted from Žagar et al., 2007, pp. 67).

Na sliki 5 je prikazana osnovna struktura modela PCLOW3D, s tremi osnovnimi moduli, brez BGK modula.

2.7.4 Biogeokemični modul

Z biogeokemičnim modulom, katerega delovanje je prikazano na sliki 6, določamo koncentracije treh zvrsti živega srebra (elementarno Hg^0 , divalentno Hg^{2+} in monometil živo srebro CH_3Hg^+ oz. $MMHg$) v vodnem stolpcu. Na osnovi hidrodinamičnih količin (polj hitrosti), izračunanih s hidrodinamičnim modulom, lahko izračunamo transport zaradi advekcije in disperzije vsake izmed oblik živega srebra, prav tako pa lahko simuliramo nekatere procese pretvorb. Pri tem lahko upoštevamo izmenjavo s sedimentom na dnu, izmenjavo z atmosfero, metilacijo, demetilacijo, redukcijo in oksidacijo (Žagar in sod., 2007).

Reakcije med temi zvrstmi modeliramo s preprostimi transformacijskimi enačbami:

$$\Delta M_i = K_r \cdot M_r \cdot \Delta t \quad (2.84)$$

kjer je:

ΔM_i sprememba mase produkta (Hg^0 , Hg^{2+} ali CH_3Hg^+) v danem Δt ,

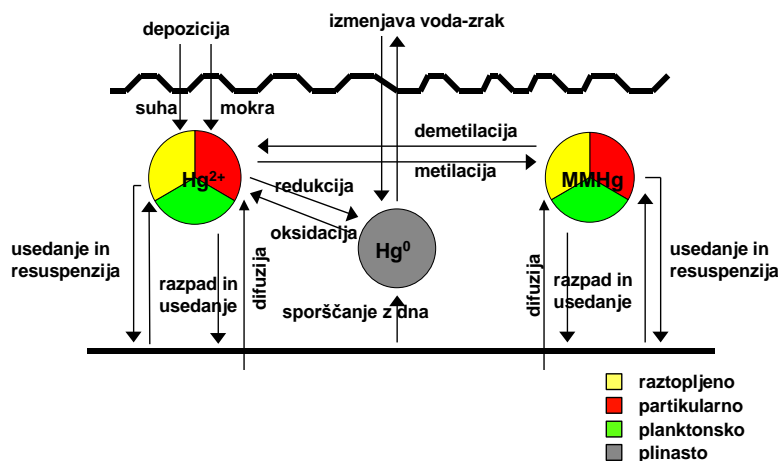
M_r masa reaktanta,

K_r koeficient reakcije med reaktantom in produktom.

Koeficienti reakcij so spremenljivke v prostoru in času, ki izražajo vpliv zunanjih dejavnikov, biotskih in abiotskih, na procese pretvorb med zvrstmi živega srebra. Ker so ti vplivi še slabo raziskani, se vrednosti v literaturi (Carroll in sod., 2000; Rolffhus in Fitzgerald, 2004) gibljejo v širokih mejah.

V BGK modul je vgrajen pod-modul za izmenjavo volatilnih snovi med vodo in zrakom. V tem modulu se izmenjava med vodo in zrakom obravnava kot (a) izmenjava elementarnega živega srebra med zrakom in (b) usedanje različnih divalentnih oblik živega srebra iz zraka. Izmenjava živega srebra med vodo in zrakom (evazion) predstavlja pomembnejši del celokupne izmenjave med vodo in zrakom.

BIOGEOKEMIČNI MODUL



Slika 6: Biogeochemični modul modela PCFLOW3D (povzeto po Žagar in sod., 2005, str. 2393).

Figure 6: Biogeochemical module of the PCFLOW3D model (adopted from Žagar et al., 2005, pp. 2393).

2.8 UPORABA TEORIJE CURKA ZA LADIJSKIM VIJAKOM V MODELU PCFLOW3D

2.8.1 Uporaba teorije gibalne količine za ladijskim vijakom pri računu porazdelitve hitrosti

Da bi lahko opisali vpliv propulzije ladijskega vijaka na privzdigovanje sedimentov, je potrebno v model PCFLOW3D vnesti polje hitrosti ob dnu za ladijskim vijakom. Na takšen način lahko upoštevamo vpliv strižnih napetosti ob dnu, ki nastanejo za gibajočo se ladjo in izračunamo skupne strižne napetosti ob dnu, od katerih je odvisno privzdigovanje sedimentov.

Na osnovi enačb, opisanih v poglavju 2.3, smo izdelali model, ki na podlagi podatkov o potovanju ladje ter parametrov ladje in plovbe, ki so natančneje opisani v poglavju 4.2, izračuna hitrostno polje za ladijskim vijakom. Hitrosti izračunamo v (lokalnem) koordinatnem sistemu vezanem na ladjo in jih glede na lokacijo in smer gibanja ladje (curka) s transformacijsko matriko pretvorimo v (globalni) koordinatni sistem numerične mreže, ki jo uporablja model PCFLOW3D. Model smo izdelali z orodjem Matlab, ki izračuna in zapiše v izhodno datoteko koordinate točk v numerični mreži, njihove indekse, globino vode in prične hitrosti v smeri koordinatnih osi x in y .

Na osnovi aplicirane moči (APd), gostote vode (ρ_0) in premera vijaka (D_p) najprej izračunamo izhodno hitrost na vijaku u_{0Ap} , po enačbi, ki je odvisna od tega, ali imamo zaščiten (ducted) vijak:

$$u_{0Ap} = 1,17 \cdot \left(\frac{APd}{\rho_0 \cdot D_p^2} \right)^{1/3} \cdot 10 \quad (2.85)$$

ali nezaščiten (non-ducted) vijak:

$$u_{0Ap} = 1,48 \cdot \left(\frac{APd}{\rho_0 \cdot D_p^2} \right)^{1/3} \cdot 10 \quad (2.86)$$

Nato je potrebno na podlagi parametra porazdelitve (c) določiti razdaljo, na kateri pride do vzpostavitve oblikovanega toka (x_0):

$$x_0 = \frac{D_p}{2C} \quad (2.87)$$

Izračunamo hitrost curka za ladijskim vijakom v območju oblikovanja toka ($x \leq x_0$):

$$v_{yz} = u_{0Ap} \cdot \exp \left[-\frac{\left(\sqrt{y^2 + z^2} + Cx - \frac{D_0}{2}\right)^2}{2(Cx)^2} \right] \quad (2.88)$$

oziroma v območju že oblikovanega toka ($x > x_0$), kjer je x razdalja od ladje v smeri osi:

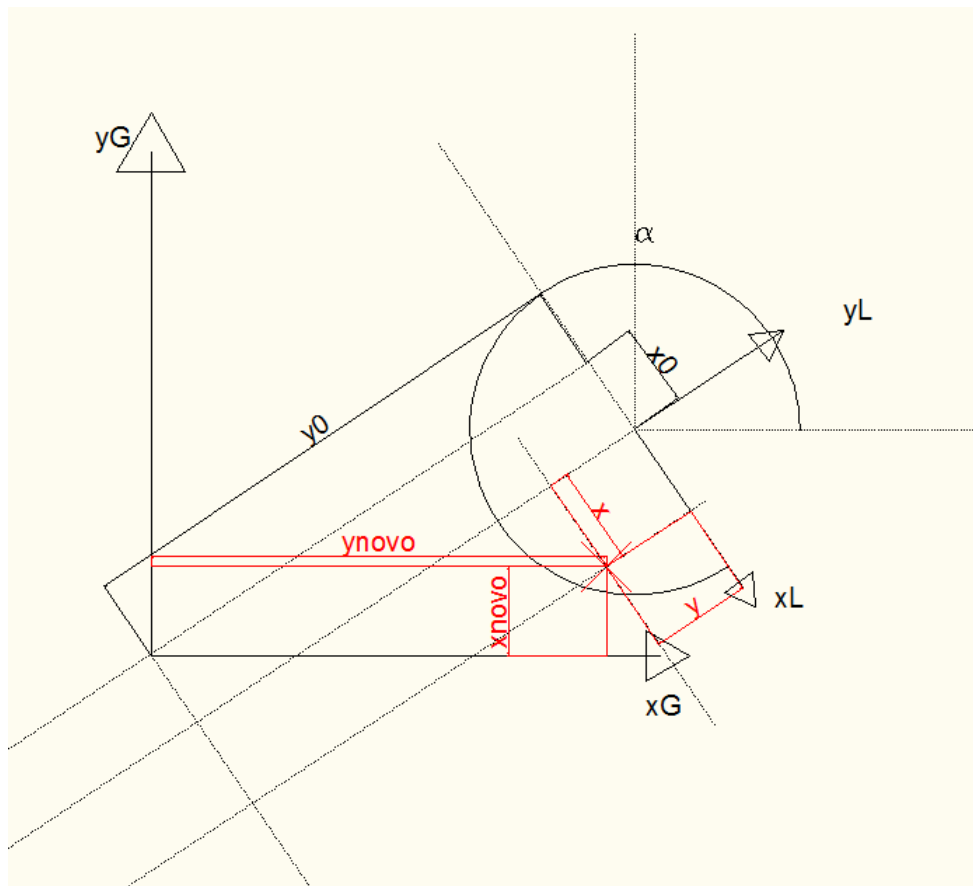
$$v_{yz} = u_{0Ap} \cdot \frac{D_p}{2Cx} \cdot \exp \left[-\frac{y^2 + z^2}{2(Cx)^2} \right] \quad (2.89)$$

Hitrostno polje za ladjo najprej izračunamo v koordinatnem sistemu ladje, kar pomeni, da je smer x v smeri gibanja ladje, os y pa je pravokotna na njo, izhodišče pa je v točki, kjer se ladja trenutno nahaja. Os z je v vertikalni smeri, z izhodiščem v ravnini ladijskega vijaka, s pozitivnim predznakom navzgor in negativnim navzdol. Točke, v katerih izračunavamo hitrost, podajamo glede na (globalni) koordinatni sistem računske domene. Izhodišče je običajno v spodnjem levem kotu numerične mreže, os x je horizontalna, os y pa vertikalna. V tem primeru izvedemo transformacijo točk z zasukom in pomikom koordinatnega sistema:

$$x_{novo} = (x + x_0) \cdot \sin\alpha - (y + y_0) \cdot \cos\alpha \quad (2.90a)$$

$$y_{novo} = (x + x_0) \cdot \cos\alpha + (y + y_0) \cdot \sin\alpha \quad (2.90b)$$

Na osnovi metode najmanjših kvadratov je nato na podlagi novih koordinat točk x_{novo} in y_{novo} določeno, v kateri celici numerične mreže računamo pridnene hitrosti, določena je tudi globina vode v tej celici in indeks pridnenega sloja. Za določitev strižnih hitrosti ob dnu in privzdigovanja sedimenta določamo samo hitrost ob dnu. Izračunano hitrostno polje za ladijskim vijakom predstavlja velikost hitrosti v posameznih točkah, smer pa izračunamo iz kota med lokalnim in globalnim koordinatnim sistemom.



Slika 7: Lokalni in globalni koordinatni sistem.

Figure 7: Local and global coordinate system.

Na podlagi podatkov o globini vode, lokaciji ter parametrih plovbe in lastnosti premikajoče se ladje tako izračunamo pridreno hitrostno polje, ki ga povzroči curek ladijskega vijaka. Rezultat modela je torej hitrostno polje ob dnu za ladijskim vijakom v vsaki celici numerične mreže. V izhodni datoteki so vsi potrebni podatki za simulacijo privzdigovanja sedimentov zaradi plovbe s sedimentacijskim modulom modela PCFLOW3D. V izhodni datoteki podamo indekse celic ob dnu v numerični mreži, koordinati sredine celice v globalnem koordinatnem sistemu, globino vode v celici $z(i, j)$ ter komponenti pridrenih hitrosti v koordinatnih smereh, $u(i, j)$ in $v(i, j)$.

Za račun transporta sedimentov bi bilo potrebno izračunati celotno 3D hitrostno polje za ladijskim vijakom, vendar pa je model PCFLOW3D omejen s hidrostatično aproksimacijo in pri razmeroma velikih vertikalnih hitrostih ne deluje. Zato smo se v disertaciji omejili na račun pridrenih hitrosti in vpliva plovbe na resuspendiranje sedimenta z dna.

3 RAZISKOVALNO DELO

Z izpopolnjenimi modeli smo izvedli simulacije na območju Sredozemskega morja, kjer smo se osredotočili na tokove sedimenta in onesnažil, predvsem živega srebra, med okoljskimi segmenti. Upoštevali smo vpliv posameznih dejavnikov, tokov, valovanja, vpliva curka za ladijskim vijakom ter njihove kombinacije, na privzdigovanje sedimentov, tako v Tržaškem, kot Koprskem zalivu, na območju reke Idrijce pa nas je zanimal pojav histereze koncentracije lebdečih plavin. Tokove onesnažil med posameznimi okoljskimi segmenti je potrebno obravnavati sočasno, saj lahko le tako dobimo ustrezno sliko dogajanja z onesnažili na nekem območju. V disertaciji sicer ne obravnavamo istega območja pri vseh metodah in simulacijah, vendar pa pokažemo tehniko in način modeliranja, ki je uporabna povsod.

3.1 MODEL ZA IZRAČUN PRIDNENIH HITROSTI ZARADI PLOVBE IN SKLAPLJANJE MODELOV

Privzdigovanje (resuspendiranje) sedimentov je v morskem okolju, predvsem na plitvejših območjih, odvisno od cirkulacije in od valovanja, kadar pa so prisotna plovila, tudi od propulzije ladijskega vijaka. Predvsem na območju in v bližini luk in pristanišč so pogosti ladijski manevri, ki v plitvem, priobalnem morju lokalno povzročajo večje privzdigovanje sedimenta in višje koncentracije lebdečih plavin od najbolj neugodnih vremenskih pogojev (Malačič in sod., 2010; Žagar in sod., 2012). Sedimenti so lahko tudi močno onesnaženi z različnimi vrstami onesnažil, med katerimi so še posebej pomembne strupene kovine (Hg, Ni, Cd, Cr). Plovba in manevriranje ladij lahko močno prispeva k motnosti in resuspendiranju sedimenta. Enega od pomembnih ciljev naloge predstavlja prav to, da ugotovimo, kakšen je vpliv plovbe in ga kvantificiramo – določimo pridnene hitrosti za curkom, ki ga povzroči ladijski vijak. Kvantitativno nekoliko manj pomembno je valovanje, ki pa, še posebej v neugodnih vremenskih razmerah, povzroča na plitvih območjih večje oscilatorne strižne napetosti ob dnu, kot tokovi (Žagar, 1999).

Kombiniran vpliv ladijske propulzije, valovanja in tokov na resuspendiranje sedimentov smo reševali tako, da smo izvedli hidrodinamične simulacije, ki so nam dale hitrostno polje na definicijskem območju, na podlagi katerih smo izračunali strižne napetosti ob dnu zaradi tokov. Na podlagi že

opisanih enačb (v poglavjih 2.1 in 2.3) izračunamo pridnene hitrosti u in v za ladijskim vijakom, iz višine vala H_w in periode valovanja T_w pa oscilatorne strižne hitrosti zaradi valovanja. Iz vseh strižnih hitrosti nato z vektorskim seštevanjem izračunamo strižne hitrosti in napetosti ob dnu zaradi posameznega in skupnih vplivov vseh vsiljevanj. Tako s kombinacijami različnih vplivov upoštevamo različne kombinacije posameznih dejavnikov na resuspendiranje sedimentov. Kombinacije so naslednje:

- vpliv cirkulacije (tokov),
- vpliv valov
- vpliv hitrosti za ladijskim vijakom
- vpliv cirkulacije in valov skupaj
- vpliv cirkulacije, valov in hitrosti za ladijskim vijakom skupaj

Za vsako kombinacijo izračunamo skupne strižne napetosti ob dnu in na podlagi le-teh izvedemo še simulacije privzdigovanja sedimentov.

Potek računa je enak za oba proučevana primera, tako za Tržaški kot za Koprski zaliv, razlika je le v numerični mreži in robnih pogojih.

- **Hidrodinamične simulacije**

Hidrodinamične simulacije so osnova za poznavanje cirkulacije v zalivu, na podlagi katere lahko izračunamo vpliv tokov na resuspendiranje sedimentov. Pri modeliranju smo uporabili tako imenovani kvazi-stacionarni pristop (Žagar, 1999; Rajar in sod., 2000), ki znatno skrajša čas računa, pri enakomernem vetru pa po določenem času dosežemo skoraj stacionarno stanje, ki zadošča za nadaljnje simulacije.

Z modelom PCFLOW3D smo izračunali hitrostna polja, ki so osnova za izvedbo nadaljnjih simulacij (z izjemo simulacije, ki smo jih izvedli brez vpliva tokov).

- **Modeliranje valovanja**

Parametri valovanja so izračunani po metodi Bretschneider (Ippen in sod., 1966 po Bretschneider, 1952) in z umerjenim in preverjenim modelom SWAN (osebni vir Maja Jeromel, ARSO). Model SWAN izračunava značilno višino in periodo valovanja, poleg tega pa tudi smer valovanja in valovno dolžino.

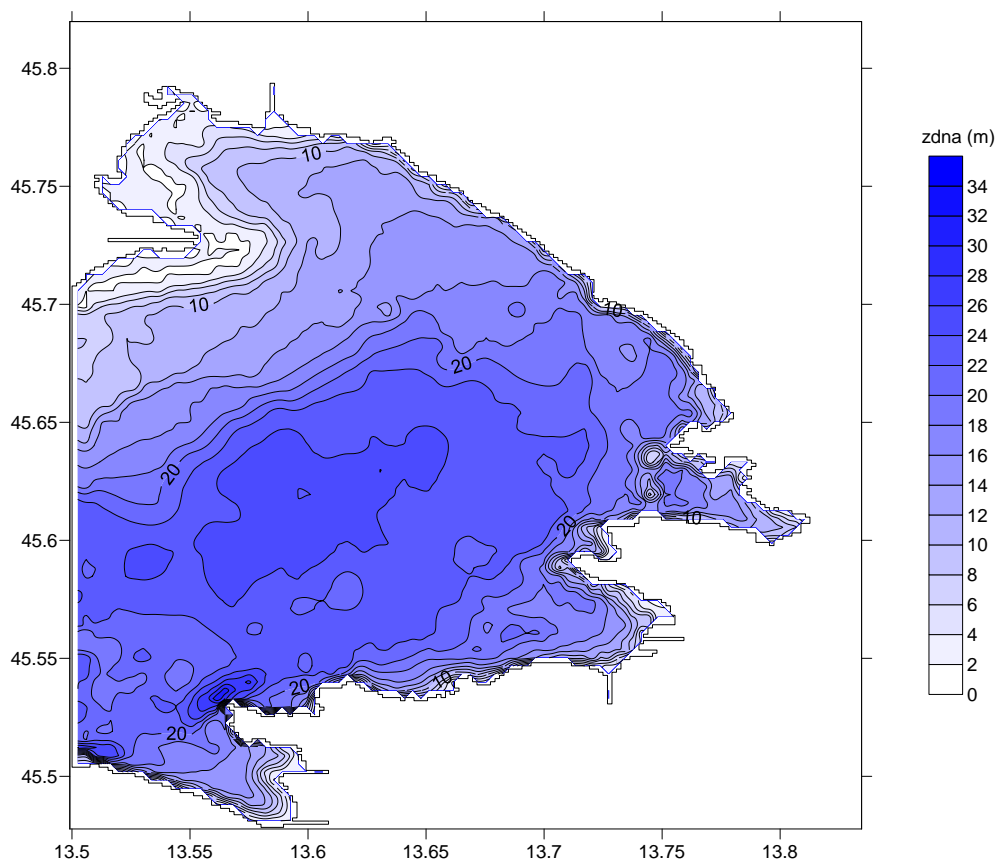
- **Modeliranje vnosa gibalne količine**

Vnos gibalne količine ladijskega vijaka ladje med manevriranjem smo izvedli z vnosom pridnenih hitrosti za ladijskim vijakom, na podlagi katerih so bile izračunane pripadajoče pridnene strižne napetosti.

Podatki, potrebni za račun, morajo biti podani časovno dovolj podrobno, torej v takšnem časovnem intervalu, da ladja ne "preskoči" nobene celice. Najprej v vsakem časovnem koraku oziroma točki, v kateri se ladja trenutno nahaja, določimo oddaljenost ladje od izhodišča numerične mreže. Hitrosti za ladijskim vijakom izračunamo v lokalnem koordinatnem sistemu ladje, kot je opisano v poglavju 2.6.1. V vsakem časovnem koraku oziroma v vsaki točki potovanja ladje imamo drug lokalni koordinatni sistem in v njem hitrosti toka, ki jih za sabo ustvarja premikajoča se ladja. Na podlagi podatkov o ladji (moči, trenutnem položaju) in računske domene najprej izračunamo hitrosti za ladjo v lokalnem koordinatnem sistemu na izbranih razdaljah od vijaka v smeri curka - osi (x) - in pravokotno na os curka (y), ter na izbrani globini dna (z), pri čemer je lokalna globina nič v ravnini vijaka. Izračunano hitrostno polje pridnenih napetosti je torej podano glede na položaj ladje in smer ladijskega vijaka (curka). Nato opravimo transformacijo lokacij in hitrosti, ki je opisana v poglavju 2.6.1. V drugem koraku dobimo podatke o pridnenih komponentah hitrosti u in v v koordinatnem sistemu numerične mreže.

3.1.1 Tržaški zaliv

Pri simulacijah smo uporabili numerično mrežo, kjer smo definicijsko območje po globini razdelili na 31 slojev neenakomerne debeline, debelina zgornjih 25 slojev znaša 1 m, pri dnu pa so sloji debelejši, do 4,4 m v najglobljem delu zaliva. V horizontalni smeri smo območje razdelili v enakomerno mrežo 177 x 256 celic, velikost posamezne celice znaša približno 150×150 metrov. Definijsko območje in batimetrija zaliva sta prikazani na sliki 9.



Slika 8: Definijsko območje Tržaškega zaliva in njegova globina.

Figure 8: Definition area of the Gulf of Trieste and its depth.

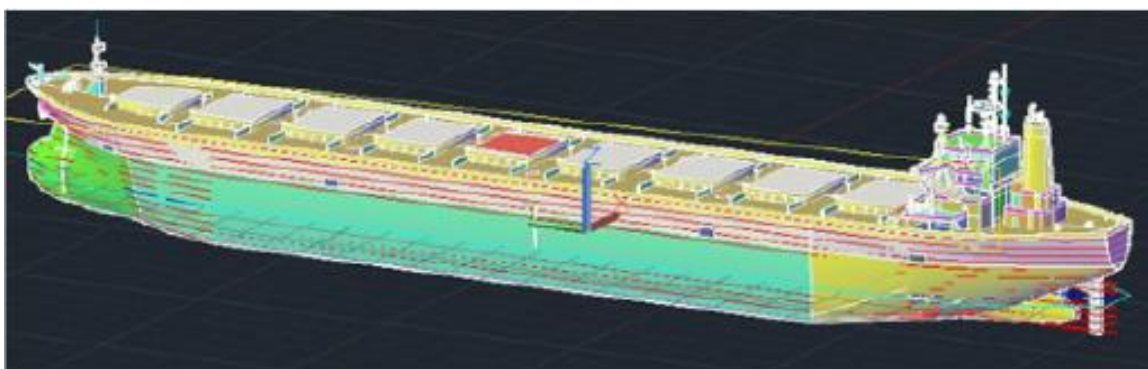
3.2.1.1 Podatki

Veter; v simulacijah, kjer upoštevamo vpliv vetra, smo vzeli konstantno velikost in smer vetra, ki znašata 10 m/s in odklon 60° od severa. To je primer homogene burje, razmeroma močnega vetra, ki se pogosto pojavlja na tem območju. Burja prispeva največ k energiji vetra na območju Tržaškega zaliva, poleg tega pa je med obdobji burje največji transport plavin (Žagar in sod., 2012)

Vtoki rek; temperatura in slanost; pri simulacijah zanemarimo plimovanje in vtoko rek, simuliramo dobro premešano zimsko stanje; temperatura 10°C in slanost 35 PSU. Plimovanja in vtokov rek ne upoštevamo, da je mogoče razločiti vplive obravnavanih vsiljevanj (tokov zaradi vetra, vetrnih valov in plovbe) med seboj in od drugih vplivov, ki niso predmet te študije.

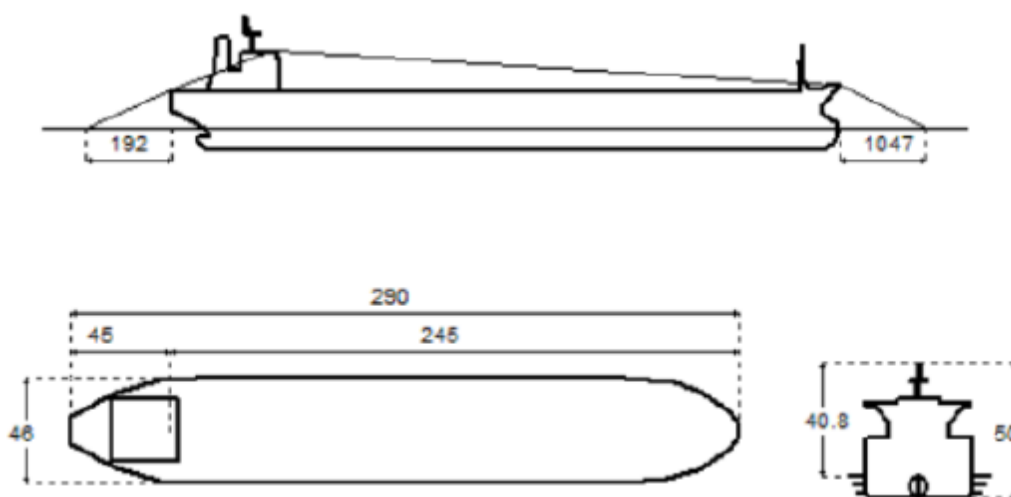
Valovi; parametre valovanja lahko izračunamo s podatki o jakosti o smeri vetra ter podani geometriji, po metodi Brettschneider (Ippen in sod., 1966) in z umerjenim in preverjenim modelom SWAN (osebni vir Maja Jeromel, ARSO).

Parametri ladje; za račun hitrosti za curkom ladijskega vijaka smo upoštevali tipsko ladjo, ki zapuša Tržaški zaliv in sicer smo upoštevali najslabši možni primer (worst case), to je, ko ladja za razsuti tovor (slika 9) v stanju polnega balasta zapuša pristanišče. Zanimale so nas namreč maksimalne možne strižne napetosti ob dnu, ki nastanejo zaradi vpliva propulzije ladijskega vijaka. S pomočjo že postavljenega modela lahko nato račun vpliva izvedemo za izplutje oziroma vplutje na podlagi podatkov o realni plovbi ladij. V preglednici (1) so podani podatki o ladji, nekateri od njih pa so prikazani na sliki 10.



Slika 9: Ladja za razsuti tovor v stanju polnega balasta (Perkovič in sod., 2011, str. 69).

Figure 9: Bulk carrier in full ballast conditions (Perkovič et al., 2011, pp. 69).



Slika 10: Geometrija in dimenzije ladje za razsuti tovor (Perkovič in sod., 2011, str. 70).

Figure 10: Geometry and dimension of bulk carrier (Perkovič et al., 2011, pp. 70).

Preglednica 1: Podatki o ladji.

Table 1: Ship's data.

Ladja za razsuti tovor (bulk carrier)		
Izpodriv (full ballast)	D	76800 ton
Dolžina čez vse	LOA	290,0 m
Dolžina med navpičnicami	LBP	278,0 m
Širina ladje	B	46 m
Višina trupa	H	25,5 m
Višina nadgradnje	H _{max}	40,8 m
Ugrez na krmi	T _a	9,3 m
Premer vijaka	D _p	8,9 m
Največja moč motorja	P _{MENG}	12271 kW

Pot ladje; za določitev vpliva gibalne količine na transport sedimentov je potrebno poznati pot ladje po Tržaškem zalivu. Pot je prikaza na sliki 11, koordinate poti pa so podane v preglednici 3. Pot ladje je izračunana iz podatkov, ki nam jih je zagotovila Fakulteta za pomorstvo in promet (Perkovič, osebni vir), izbrali pa smo fiktivno plovbo, saj ladja na začetku ne uporablja samo svojih pogonskih sredstev, ampak ji asistirajo vlačilci, katerih vpliva nismo upoštevali. Na podlagi izpisa podatkov o potovanju ladje (preglednica 2) smo glede na začetni položaj ladje ter hitrost in smer plovbe določili pot in lokacijo v posameznih časovnih korakih (interval 70 s).

Podatki, ki smo jih dobili s Fakultete za pomorstvo in promet, so podani v časovnem intervalu 1 s v preglednici 2. Vseh podatkov nismo uporabili, zato so v nadaljevanju opisani in prikazani samo podatki, ki smo jih uporabili za račun. Razpoložljivi podatki predstavljajo izplutje ladje iz Koprškega zaliva s pomočjo vlačilcev, ki na začetku obračajo in vlečejo ladjo. Plutje traja od časa 0 s do 5252 s, ko je ladja že izven Koprškega zaliva. Za Tržaški zaliv smo prevzeli podatke, ki so bili na voljo za Koprski zaliv, saj podatkov za Tržaški zaliv ni bilo, vendar smo plovno pot priredili glede na dejanske razmere. Podana sta dva izseka podatkov, na začetku, ko še asistirajo vlačilci in del, kjer ladja začne pluti povsem sama, to je pri času 2862 s. Pri našem računu smo upoštevali podatke, ko ladja pluje že brez asistencije vlačilcev.



Slika 11: Pot ladje v Tržaškem zalivu (<http://www.darrinward.com/lat-long/>).

Figure 11: Ship's path in the Gulf of Trieste (<http://www.darrinward.com/lat-long/>).

Podatki, ki jih potrebujemo za svoj račun in jih s tem razlogom tudi podrobneje predstavljamo so:

- Time; čas,
- LAT/LON; geografska širina oziroma dolžina,
- Distance; prevožena pot od začetka plovbe,
- Dolžina D48/Širina D48; Gauss-Krugerjeve koordinate,
- HDG (heading); usmerjenost ladje (glede na sever),
- SOG (speed over ground); hitrost ladje, glede na dno (ta zanima nas),
- Draft; ugrez,
- APd (applied power); aplicirana moč,
- Direction; smer curka (glede na sever).

Preglednica 2: Podatki o plovbi v Koprskem zalivu (Perkovič; osebni vir).

Table 2: Shipping data in the Bay of Koper (Perkovič; personal communication).

Exercise: BC_ballast_dep_two tugs_1.nti					propellr pitch ratio			1,05	
Own ship BC (Bulk carrier 2 (Dis.76800t) bl.)					prpeller D			8,9 m	
Time interval: 00:00:00 - 01:27:32; Step - 00:00:01									
TIME	LAT	LON	pos_east	pos_north	distance	COG			SOG
s	°	°	m	m	m	°			m/s
	g.dolzina	g.sirina	dolzina	sirina	prevozena pot	dolžina D48	širina D48	course	speed over ground
0	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
1	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
2	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
3	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
4	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
5	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
6	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
7	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
8	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
9	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
10	45,5649	13,7412	6214,49	4877,54	0	5401746,7	5047482,5	92	0,002
2862	45,5620	13,7034	3275,67	4551,62	3710,35	5398795	5047203,7	273	2,867
2863	45,5620	13,7034	3272,81	4551,75	3713,22	5398792,2	5047203,9	273	2,874
2864	45,5620	13,7033	3269,93	4551,89	3716,09	5398789,3	5047204,1	273	2,877
2865	45,5620	13,7033	3267,06	4552,04	3718,97	5398786,4	5047204,3	273	2,882
2866	45,5620	13,7033	3264,18	4552,2	3721,86	5398783,5	5047204,5	273	2,884
2867	45,5620	13,7032	3261,3	4552,36	3724,75	5398780,6	5047204,7	273	2,891
2868	45,5620	13,7032	3258,41	4552,52	3727,64	5398777,8	5047204,9	273	2,895
2869	45,5620	13,7032	3255,52	4552,7	3730,54	5398774,9	5047205,1	274	2,901
2870	45,5620	13,7031	3252,62	4552,88	3733,45	5398772	5047205,4	274	2,909
2871	45,5620	13,7031	3249,72	4553,08	3736,35	5398769,1	5047205,6	274	2,908
2872	45,5620	13,7030	3246,81	4553,29	3739,26	5398766,1	5047205,9	274	2,913

HDG	LOG	RUD	ROT	rpm_port_cmd	RPM L	propulsion_fx
°	m/s	°	°/min		rpm	t
heading	speed over water	odklon krmila	sprememba kurza	komanda moči 10=100%	vtljlaji	potisk
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
89	0,002	0	0	0	0	0
278	2,852	0	9	6	42	67,1
278	2,858	0	8	6	42	67
279	2,862	0	8	6	42	67
279	2,866	0	8	6	42	67
279	2,869	0	8	6	42	66,5
279	2,876	0	8	6	42	66,8
279	2,879	0	8	6	42	66,7
279	2,886	0	8	6	42	66,4

Se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 2

279	2,893	0	8	6	42	67
280	2,893	0	8	6	42	67
280	2,899	0	8	6	42	66,6

depth m	draft_ap m	depth_ap m	Shaft distance from bottom zb	aplaid power	direction
globina	ugrez	globina pod kobilico	m	Apd	
0	0	0	-4,88	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
15	9,29	5,71	10,12	0	269
17,85	9,38	8,39	12,97	3310,4555	98
17,85	9,38	8,4	12,97	3310,4555	98
17,85	9,38	8,4	12,97	3310,4555	99
17,85	9,38	8,4	12,97	3310,4555	99
17,85	9,38	8,4	12,97	3310,4555	99
17,86	9,38	8,4	12,98	3310,4555	99
17,86	9,38	8,4	12,98	3310,4555	99
17,86	9,38	8,4	12,98	3310,4555	99
17,86	9,38	8,4	12,98	3310,4555	99
17,86	9,38	8,41	12,98	3310,4555	100
17,86	9,38	8,41	12,98	3310,4555	100

V preglednici (3) so prikazani parametri, ki so dejansko potrebni za račun hitrosti za ladijskim vijakom, ki jo izvedemo z novo izdelanim modelom v okolju Matlab.

Preglednica 3: Parametri plovbe.

Table 3: Shipping parameters.

Korak	Čas (s)	Geogr.širina (°)	Geogr.dolžina (°)	Širina D48 (m)	Dolžina D48 (m)	HDG (°)	Hitrost (m/s)	Ugrez (m)	Pot (m)
0	0	45,618904	13,776477	5404594,55	5053438,05	330	0,002	0	
1	70	45,618905	13,776476	5404594,48	5053438,17	330	0,387	9,3	0,14
2	140	45,619238	13,776193	5404572,95	5053475,46	330	0,753	9,31	43,2
3	210	45,619542	13,775880	5404549,04	5053509,60	325	0,595	9,31	84,88
4	280	45,619918	13,775415	5404513,48	5053551,98	320	0,948	9,32	140,2
5	350	45,620373	13,774747	5404462,12	5053603,35	315	1,116	9,32	212,84
6	420	45,620847	13,773916	5404398,14	5053657,03	310	1,275	9,33	296,36
7	490	45,621157	13,772773	5404309,59	5053692,81	292	1,453	9,34	391,86

Se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 3

8	560	45,621747	13,770044	5404097,77	5053761,63	288	1,700	9,34	614,59
9	630	45,622036	13,768409	5403970,79	5053795,66	285	2,087	9,36	746,04
10	700	45,622291	13,766366	5403811,96	5053826,53	281	2,532	9,37	907,85
11	770	45,622505	13,763924	5403621,87	5053853,25	278	2,922	9,38	1099,81

Pot v x (m)	Pot v y (m)	Apd (kW)	Smer (°)	Alfa °	x_{0M} (m)	y_{0M} (m)	x_{0L} (m)	y_{0L} (m)
0,00	0,00	0,0000	150	300	21625,09	15328,31	-2462,16	26392,03
-0,07	0,12	1206,4342	150	300	21625,02	15328,43	-2462,30	26392,03
-21,53	37,29	77,2118	150	300	21603,49	15365,72	-2505,36	26392,03
-23,91	34,14	2084,7183	145	305	21579,58	15399,86	-237,29	26509,96
-35,56	42,38	2084,7183	140	310	21544,02	15442,24	2018,79	26429,76
-51,36	51,36	2084,7183	135	315	21492,66	15493,61	4241,97	26153,24
-63,98	53,69	2084,7183	130	320	21428,68	15547,29	6421,71	25684,01
-88,55	35,77	2263,3153	112	338	21340,13	15583,07	13948,71	22442,52
-211,83	68,83	3079,5798	108	342	21128,31	15651,89	15257,51	21414,84
-126,97	34,02	3079,5798	105	345	21001,33	15685,92	16225,92	20586,98
-158,84	30,87	3310,4555	101	349	20842,50	15716,79	17460,66	19404,97
-190,09	26,72	3310,4555	98	352	20652,41	15743,51	18260,34	18464,55

Račun poteka na naslednji način: v prvem koraku v vsakem časovnem koraku oz. točki, kjer se ladja nahaja v določenem trenutku, glede na zemljepisni širino in dolžino določimo pripadajoče koordinate v Gauss-Kruegerjevem koordinatnem sistemu (širina D48 in dolžina D48). Podatek o prevoženi poti uporabimo za račun opravljene poti v posameznem časovnem koraku, glede na podatek o smeri ladje HDG določimo prevoženo pot v x in y smeri in določimo koordinati lokacije za novo točko. Postopek ponavljamo, dokler ladja ne izpluje iz zaliva. Takšen postopek je uporabljen v našem primeru, ko imamo fiktivno plovbo ladje in želimo simulirati pot, ko ladja že od začetka plovbe pluje samo z lastnimi pogonskimi sredstvi. Potrebno je določiti tudi oddaljenost ladje do izhodišča v koordinatnem sistemu numerične mreže x, y (kjer je x vzhod, y sever), to sta razdalji x_{0M} in y_{0M} .

Izračunamo tudi razdaljo od izhodišča ladijskega koordinatnega sistema do izhodišča numerične mreže (x_{0L} in y_{0L}) in kot med koordinatnima sistemoma ladje in numerične mreže α , ki ga izračunamo na podlagi smeri curka, saj iz teh podatkov izvedemo transformacijo koordinat in komponent pridnenih hitrosti.

Podatki o sedimentu:

$$D_{16} = 1,7 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$D_{50} = 7 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$D_{84} = 23 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$D_{90} = 30 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$$

kjer so:

D_{16} premer zrna plavin, od katerega je manjših 16 % zrn,

D_{50} premer zrna plavin, od katerega je manjših 50 % zrn,

D_{84} premer zrna plavin, od katerega je manjših 84 % zrn,

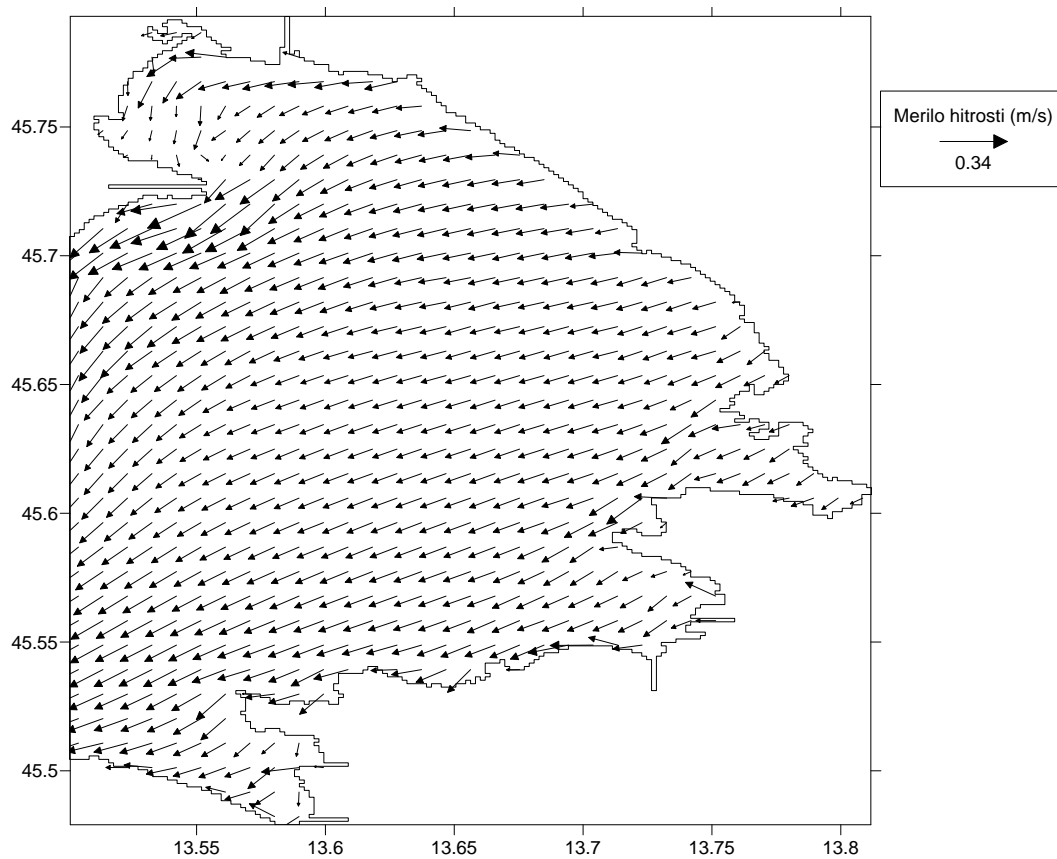
D_{90} premer zrna plavin, od katerega je manjših 90 % zrn,

ρ_s gostota plavin.

3.2.1.2 Račun in rezultati

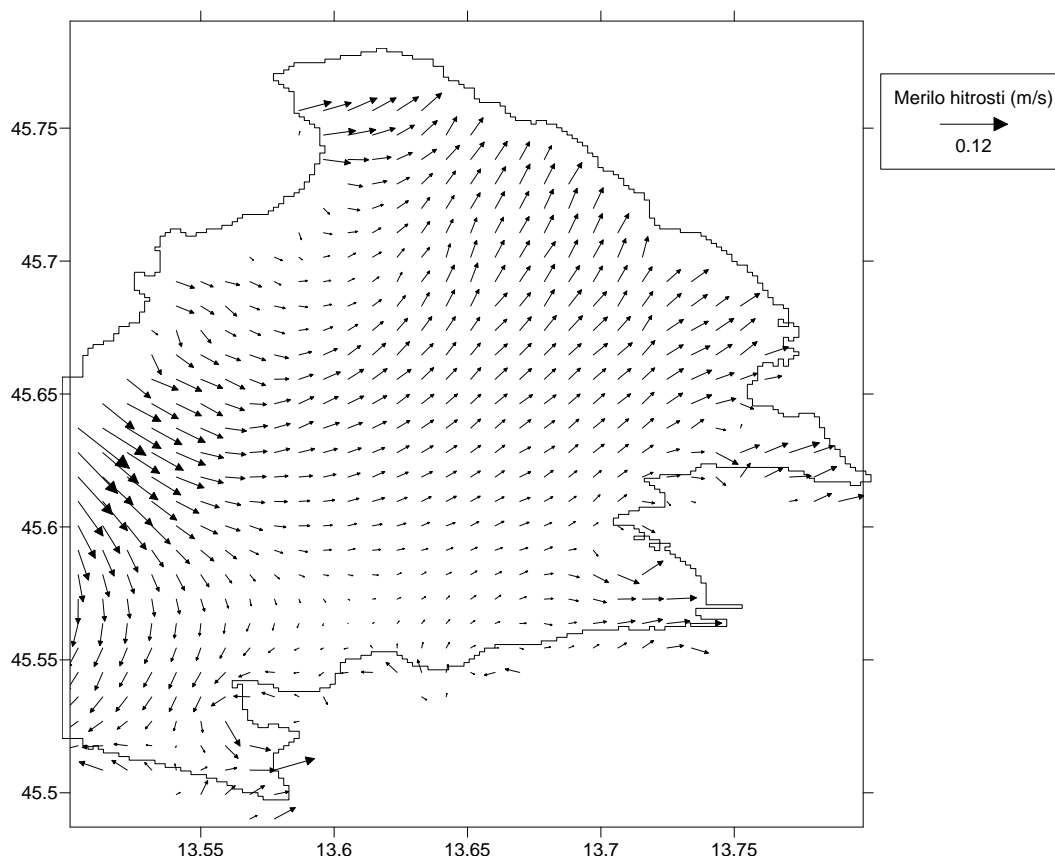
- **Hidrodinamične simulacije**

Na slikah 12 in 13 prikazujemo hitrostna polja v Tržaškem zalivu ob danih pogojih (burja z jakostjo 10 m/s, ki piha pod kotom 60° glede na sever, uklešččen robni pogoj na odprtem robu, uporabljena modela turbulence pa sta Smagorinsky horizontalno in Mellor-Yamada vertikalno. Na slikah so prikazana hitrostna polja po 3-urni simulaciji, ko se ob močnem vetru že razvijejo tokovi po celotnem vodnem telesu. Prikazujemo površinski sloj in sloj na globini 11 m, saj je tu prisoten povratni tok, še vedno pa je dovolj velika površina prereza.



Slika 12: Hitrostno polje v Tržaškem zalivu, v površinskem sloju po 3 urah.

Figure 12: Velocity field in the Gulf of Trieste in the surface layer after 3 hours.



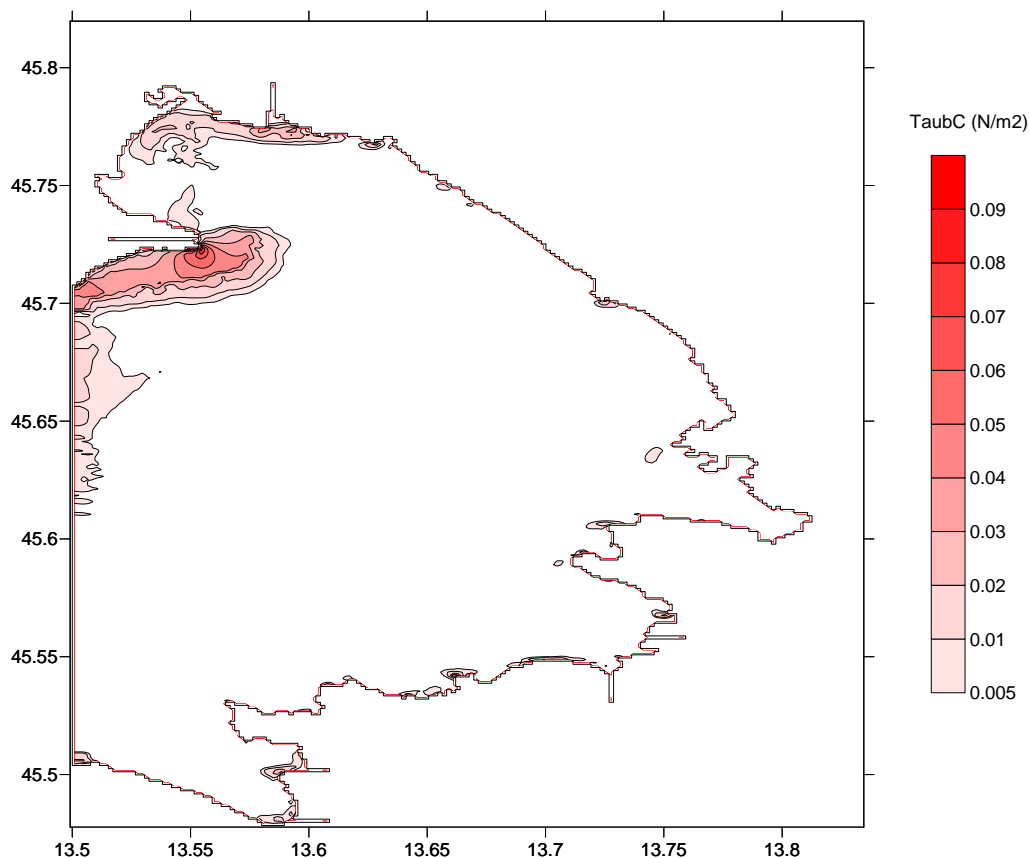
Slika 13: Hitrostno polje v Tržaškem zalivu, na globini 11 m po 3 urah.

Figure 13: Velocity field in the Gulf of Trieste on 11 m depth after 3 hours.

Ob močni burji so hitrosti v površinskem sloju Tržaškega zaliva obrnjene v smeri vetra, ki prek strižnih napetosti na gladini povleče za sabo celoten površinski sloj vode. Na globini 10,5 m se kaže kompenzacijski tok, ki je usmerjen v notranjost zaliva.

- **Modeliranje vpliva tokov na resuspendiranje sedimentov**

Pri modeliranju vpliva tokov na resuspendiranje sedimentov smo na podlagi rezultatov hidrodinamičnih simulacije izvedli račun strižnih napetosti ob dnu τ_{aubTOT} oziroma τ_{aubC} . V tem primeru smo upoštevali samo vpliv vetra, burje jakosti 10 m/s iz smeri 60° , vse druge možne vplive na resuspendiranje pa smo zanemarili. Kritične strižne napetosti, ki pri izbranih parametrih sedimenta znašajo približno $0,3 \text{ N/m}^2$, niso nikjer presežene, saj maksimalni τ_{aubC} znaša $0,09 \text{ N/m}^2$; resuspendiranje materiala z dna se zaradi tokov ob močni burji ne začne, kar so pokazali tudi rezultati prejšnjih študij (Žagar, 1999; Rajar in sod., 2000).

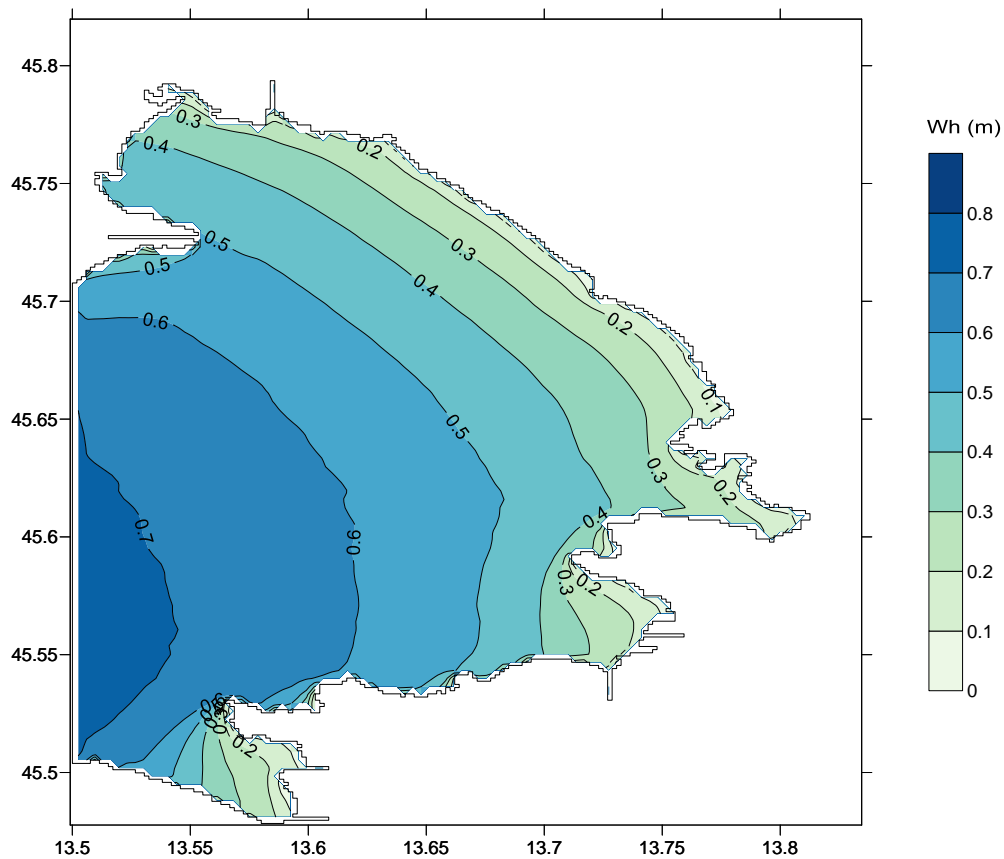


Slika 14: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov τ_{aubC} v Tržaškem zalivu; burja 10 m/s, smer 60° .

Figure 14: Distribution of bottom shear-stress due to currents τ_{aubC} in the Gulf of Trieste; bora wind 10 m/s, direction 60° .

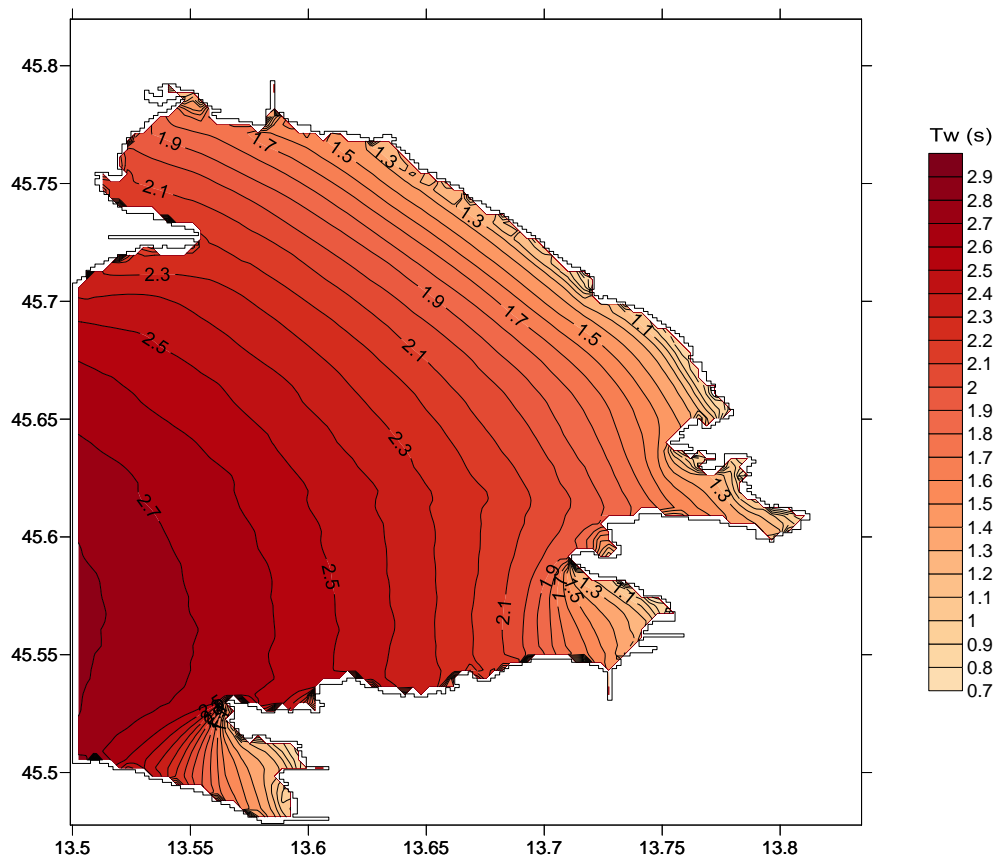
- **Modeliranje valovanja**

Višina valovanja in perioda, izračunana z modelom SWAN (sliki 15 in 16), se gibljeta med 0,1 in 0,8 m oz. med 1,5 in 2,7 sekundami. Približne enačbe po metodi Bretschneider dajejo znatno višje rezultate, saj je višina valovanja med 0,2 in 2,2 m (slika 18), perioda pa od 1,9 do 3,6 sekunde (slika 18). Bretschneiderjeva metoda očitno parametre valovanja preceni, saj so enačbe primerne za globoko vodo in popolnoma razvito valovanje. Razvidno je tudi, da model SWAN upošteva nekatere pojave, ki jih s preprostimi približnimi enačbami ni mogoče zajeti (uklon, odboj, naraščanje v plitvini in sipanje valov). Zato so izolinije višine in periode valovanja gladke in uklonjene, ob obali so vrednosti nižje.



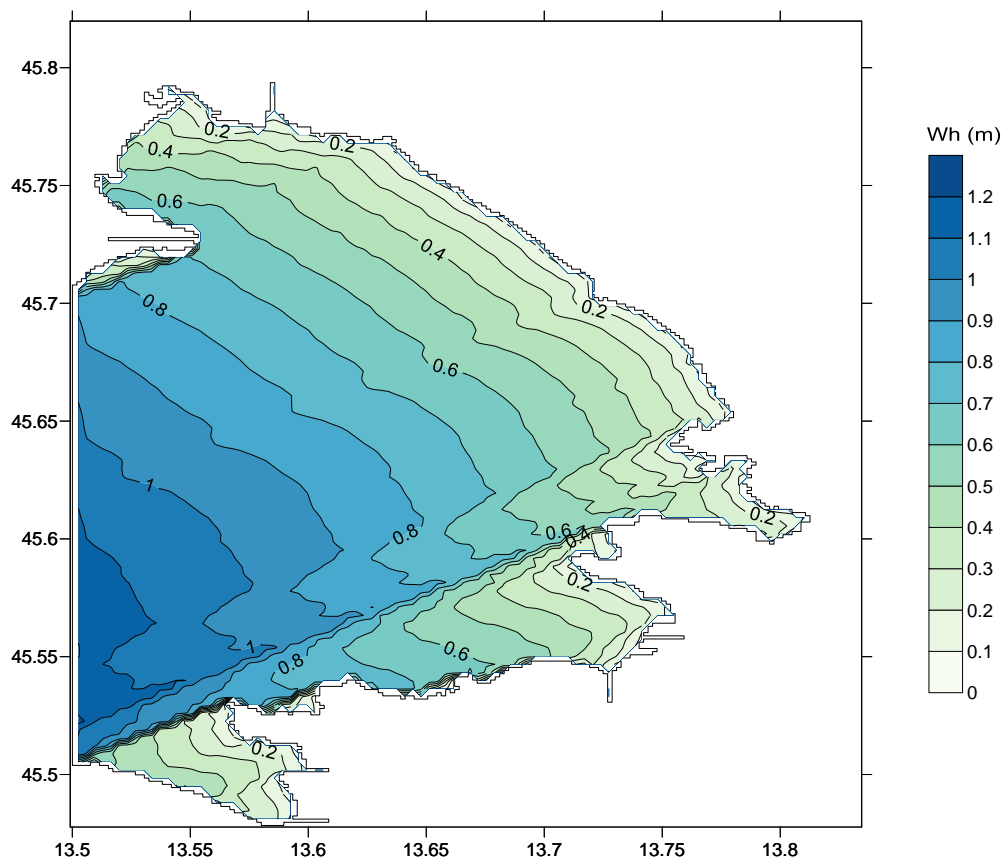
Slika 15: Višina valovanja v Tržaškem zalivu, izračunana z modelom SWAN.

Figure 15: Wave height in the Gulf of Trieste, computed with the model SWAN.



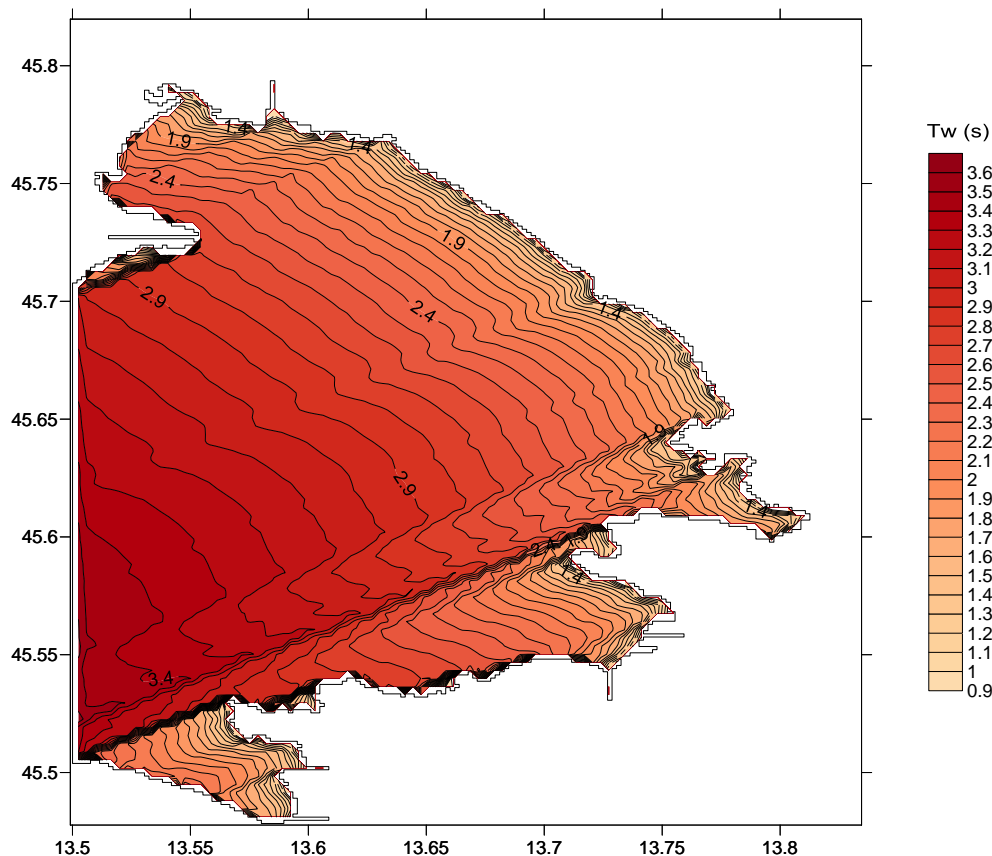
Slika 16: Perioda valovanja v Tržaškem zalivu, izračunana z modelom SWAN.

Figure 16: Wave period in the Gulf of Trieste, computed with the model SWAN.



Slika 17: Višina valovanja v Tržaškem zalivu, izračunana na podlagi Bretschneiderjevih enačb.

Figure 17: Wave height in the Gulf of Trieste, computed based on Bretschneider's equations.



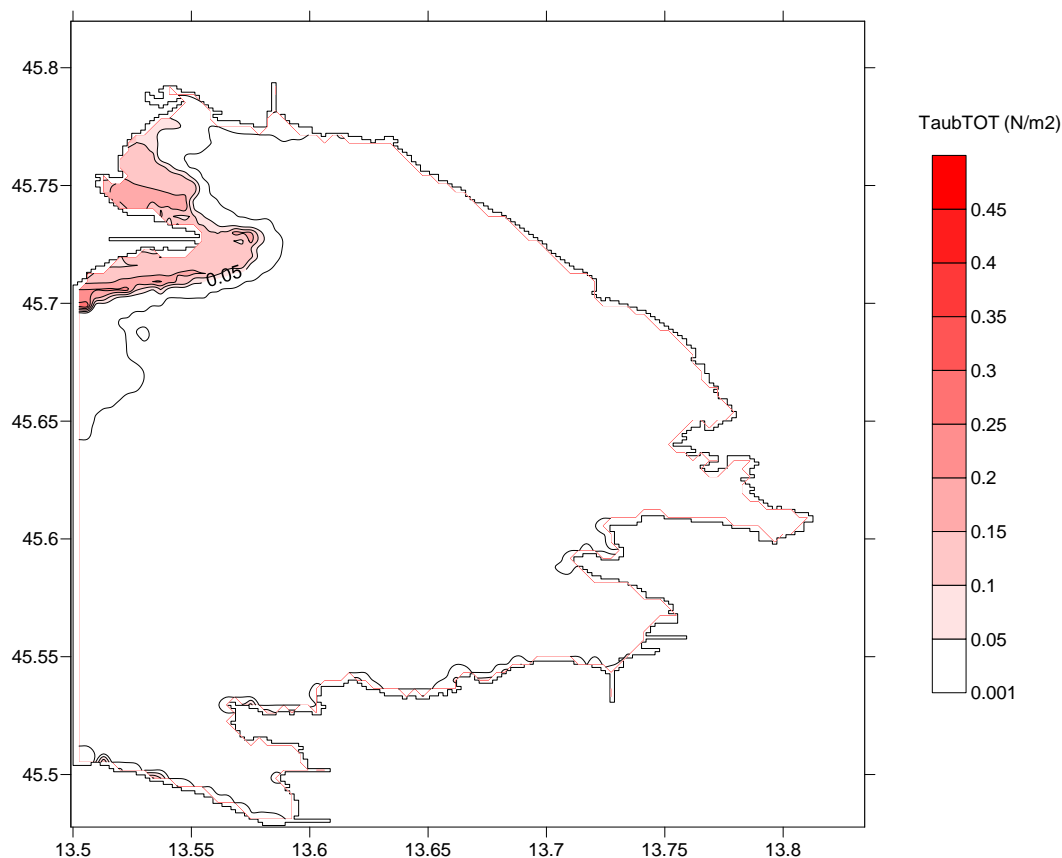
Slika 18: Perioda valovanja v Tržaškem zalivu, izračunana na podlagi Bretschneiderjevih enačb.

Figure 18: Wave period in the Gulf of Trieste, computed based on Bretschneider's equations.

Vsekakor predstavlja uporaba parametrov valovanja izračunanih, z modelom SWAN, precejšen napredek v primerjavi s parametri, določenimi s katerokoli empirično metodo. Tak način sklapljanja med modelom valovanja in sedimentacijskim modelom je bil v tej nalogi uporabljen prvič. V sodelovanju z ARSO in NIB, kjer se vzpostavlja operativni model valovanja na osnovi modelov TSPOM in SWAN (Ličer in sod., 2012), bo mogoče v prihodnje pridobiti podatke o valovanju iz meteoroloških napovedi. Na ta način bo mogoče znatno izboljšati tudi rezultate simulacij resuspendiranja sedimenta na območju Tržaškega in Koprškega zaliva.

- **Modeliranje vpliva valov na resuspendiranje sedimentov**

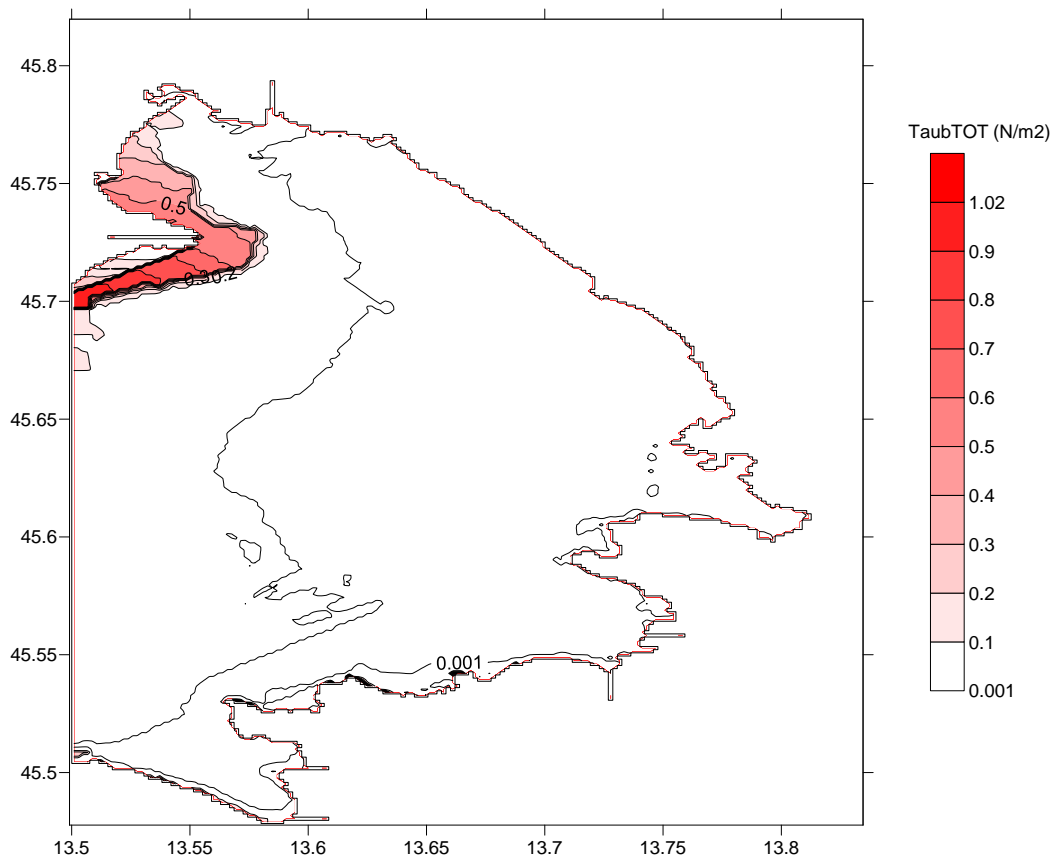
Valove smo simulirali z modelom SWAN in z Bretschneiderjevimi enačbami. Iz višine in periode valov (pri modelu SWAN pa tudi smeri in valovne dolžine) smo z modelom PCFLOW3D izvedli simulacije strižnih napetosti ob dnu. Simulacije so bile izvedene samo z upoštevanjem valovanja in ničnim poljem tokov.



Slika 19: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi valov τ_{aubTOT} (SWAN) v Tržaškem zalivu.

Figure 19: Distribution of bottom shear-stress due to waves τ_{aubTOT} (SWAN) in the Gulf of Trieste.

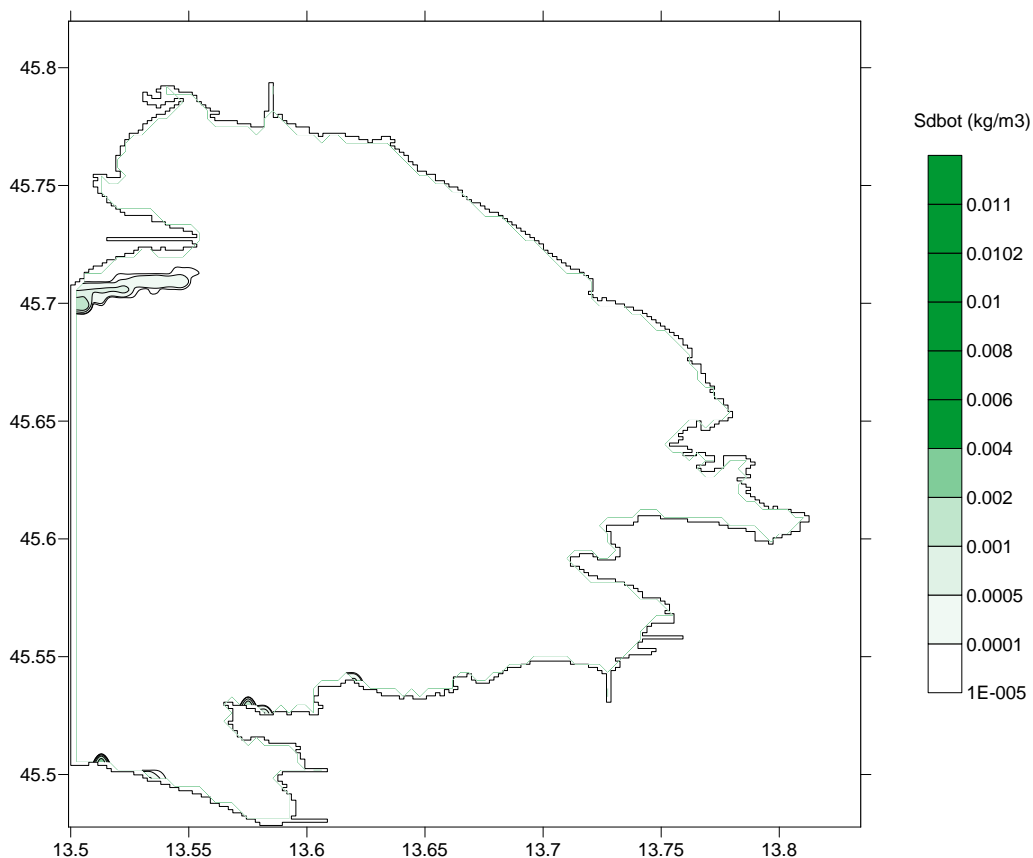
Velikosti strižnih napetosti ob dnu pri simulacijah z valovanjem iz modela SWAN dajejo približno polovične vrednosti τ_{aubTOT} oziroma τ_{aubW} ($\max \tau_{aubTOT}(SWAN) = 0,45 \text{ N/m}^2$) v primerjavi z Bretschneiderjevimi enačbami ($\max \tau_{aubTOT}(SWAN) = 1,02 \text{ N/m}^2$) (sliki 19 in 20), kar pomeni, da so bile dosedanje simulacije resuspendiranja materiala z dna, izvedene z modelom PCFLOW3D (Žagar, 1999; Rajar in sod., 2000; Rajar in sod, 2004) močno precenjene. V prihodnje je za podobne simulacije nujno uporabljati približne enačbe, ki dajejo boljše rezultate ali pa, najbolje, valovanje predhodno izračunati z modelom SWAN in prek že izdelanega vmesnika pripraviti vhodne podatke za model PCFLOW3D.



Slika 20: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi valov τ_{aubTOT} (Bretschneider) v Tržaškem zalivu.

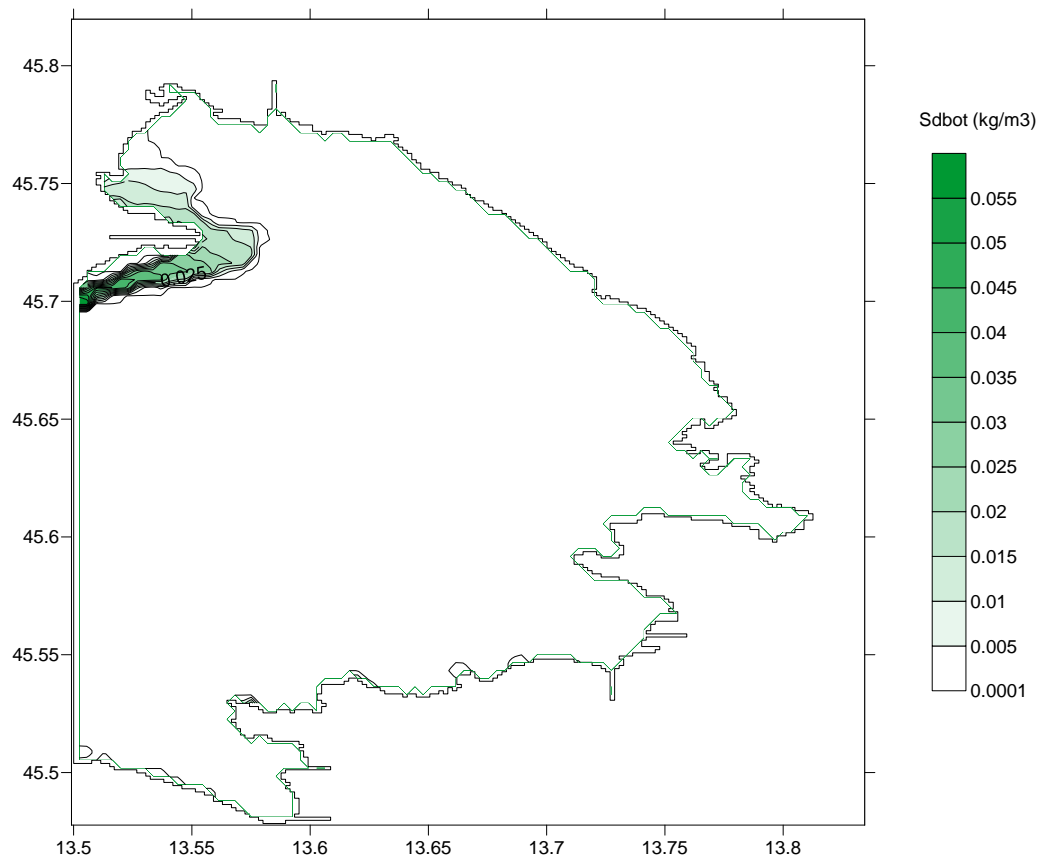
Figure 20: Distribution of bottom shear-stress due to waves τ_{aubTOT} (Bretschneider) in the Gulf of Trieste

Z modelom PCFLOW3D smo izračunali tudi koncentracije lebdečih plavin (ob istih lastnostih sedimenta – kritične strižne napetosti približno $0,3 \text{ N/m}^2$) v spodnjem sloju, torej ob dnu Sd_{bot} . Tudi koncentracije so v primeru uporabe Bretschneiderjevih enačb precejšene ($\max Sd_{bot}(Bret) = 0,055 \text{ kg/m}^3$ in $Sd_{bot}(SWAN) = 0,011 \text{ kg/m}^3$), hkrati pa so izolinije koncentracij izrazito nepravilnih oblik, kar je razvidno iz slik 21 in 22.



Slika 21: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Tržaškem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva valov (SWAN).

Figure 21: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Gulf of Trieste; shear stress due to waves (SWAN).

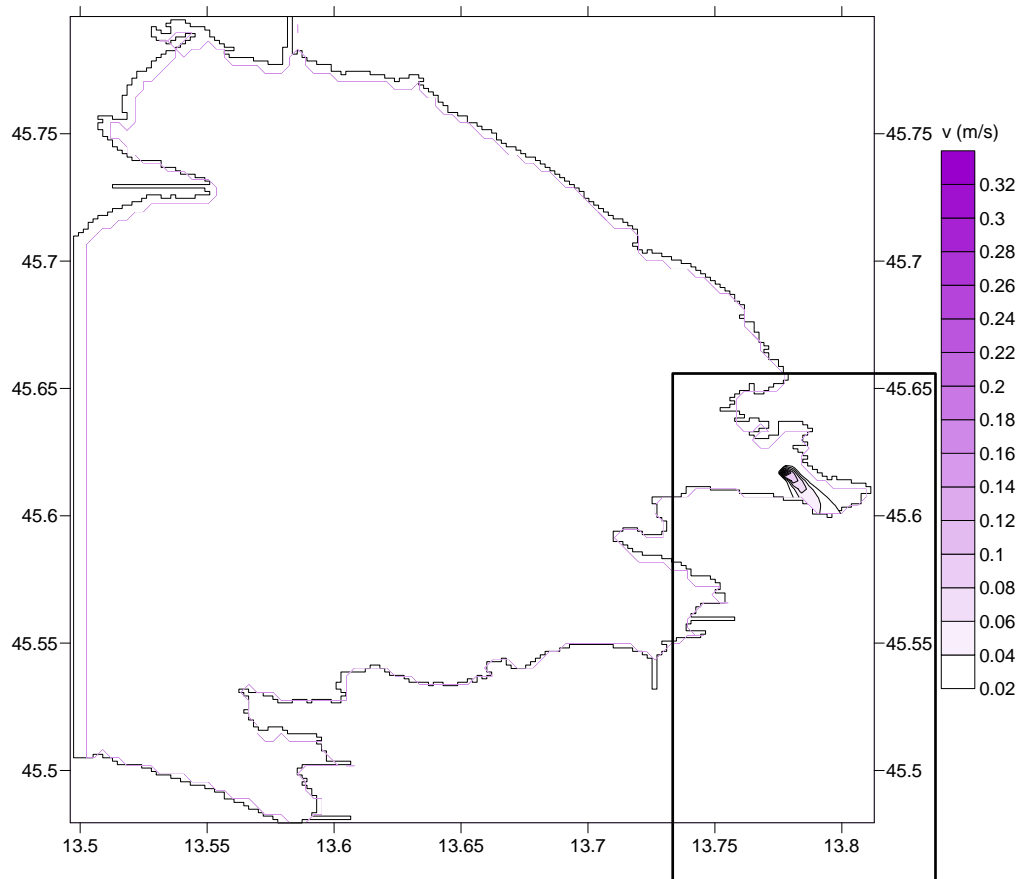


Slika 22: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Tržaškem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva valov (Bretschneider).

Figure 22: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Gulf of Trieste; shear stress due to waves (Bretschneider).

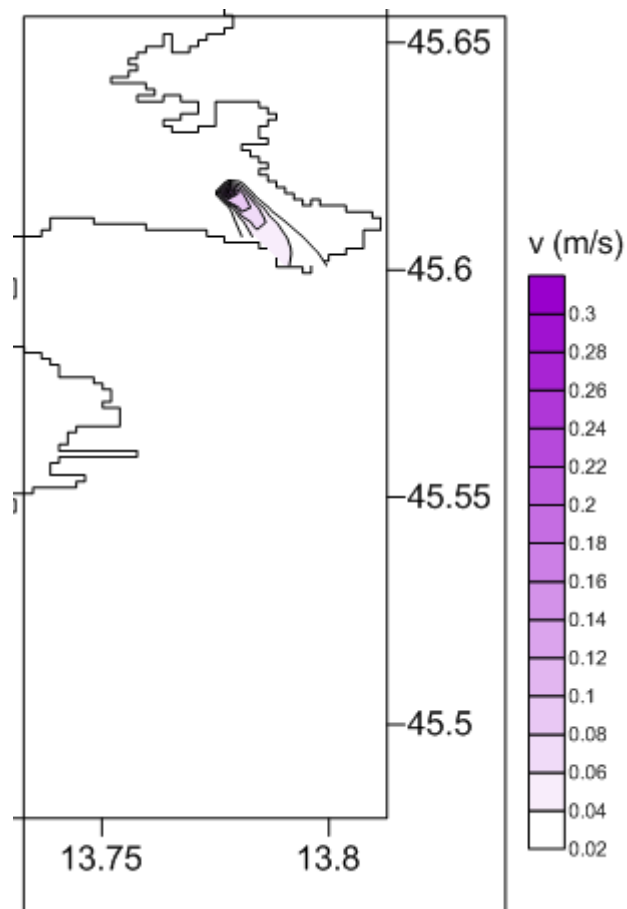
- **Račun hitrosti za curkom ladijskega vijaka**

Na podlagi parametrov smo izračunali hitrostna polja za ladijskim vijakom. Na sliki 23 in 25 so prikazane absolutne hitrosti (jakosti) v začetni in končni točki simulacije, na slikah 24 in 26 pa so hitrosti prikazane vektorsko. Hitrosti so usmerjene v smeri curka za ladijskim vijakom in dosežajo velikost do 0,3 m/s.



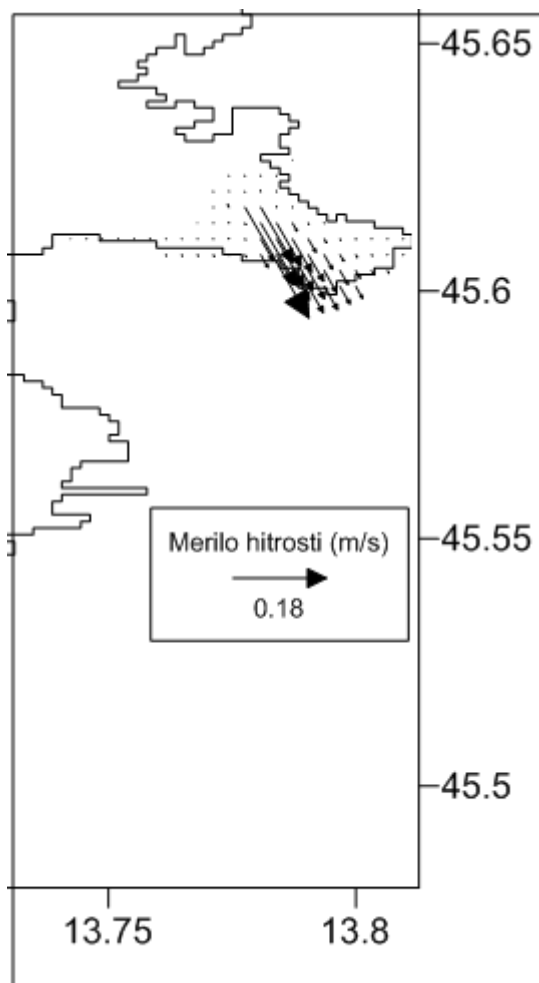
Slika 23: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 70 s.

Figure 23: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 70 s.



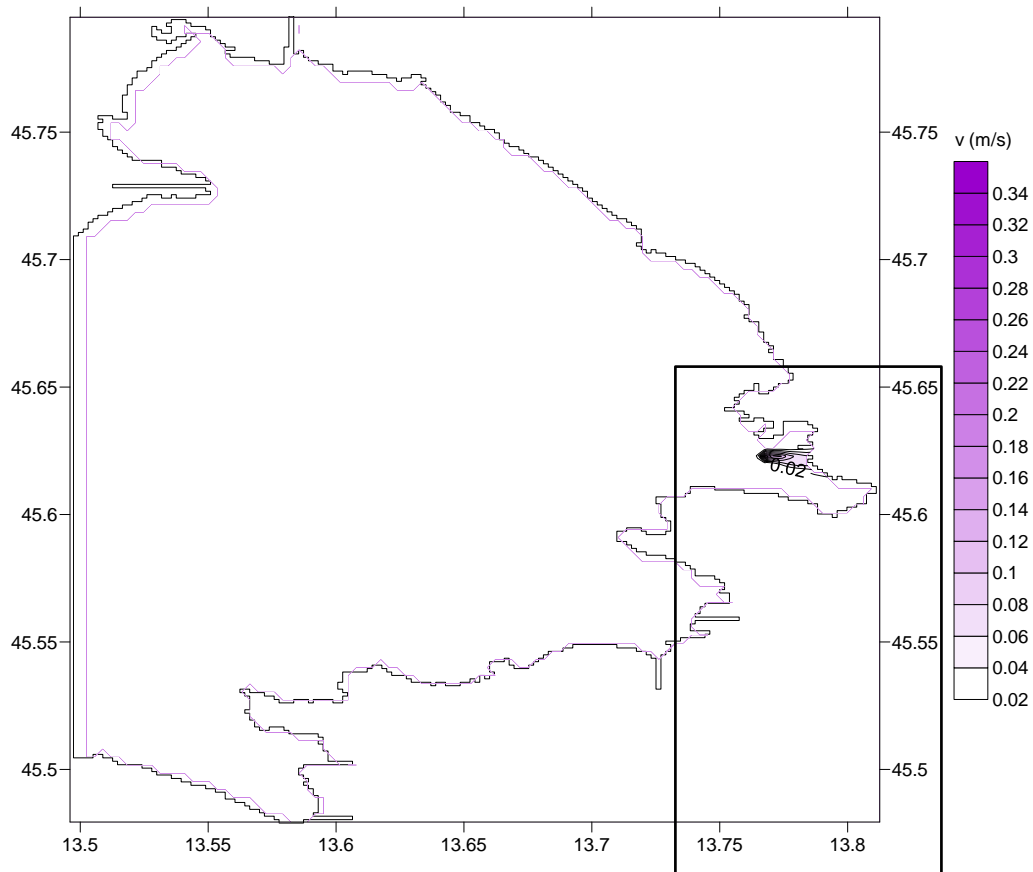
Slika 24: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 70 s; izrez - povečano.

Figure 24: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 70 s; cut-out - enlarged.



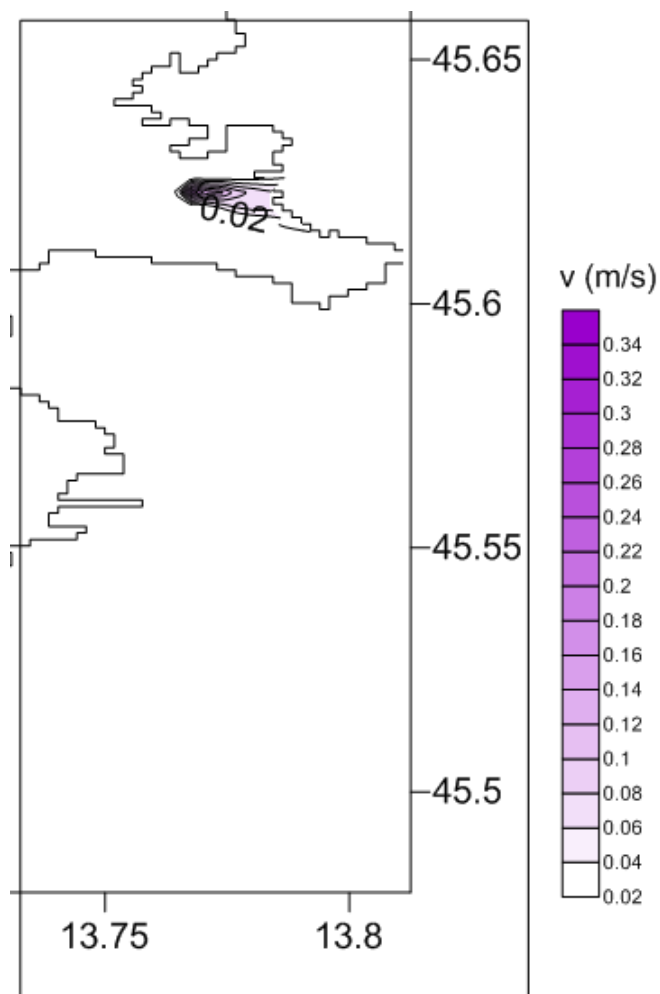
Slika 25: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; vektorji 70 s; izrez - povečano.

Figure 25: Velocity field behind ship's propeller; vectors; 70 s; cut-out - enlarged.



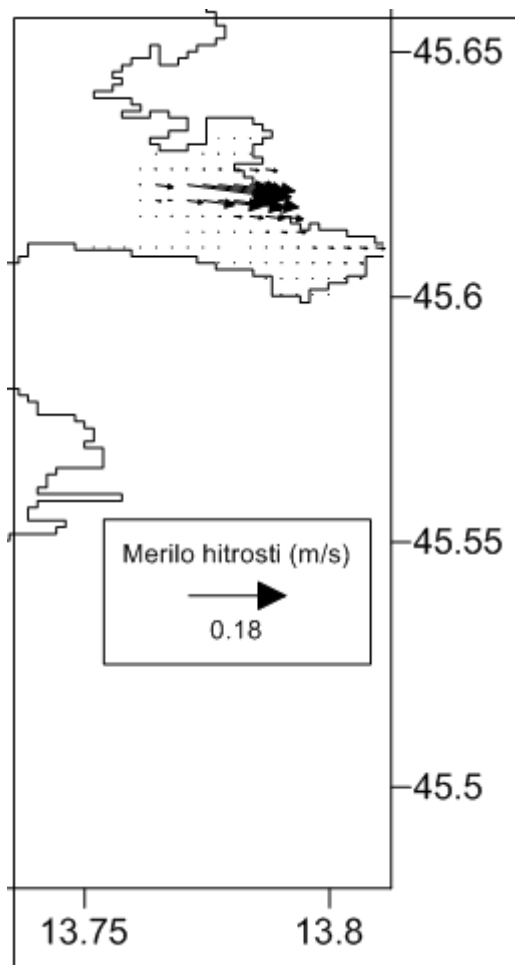
Slika 26: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 770 s.

Figure 26: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 770 s.



Slika 27: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 770 s; izrez - povečano.

Figure 27: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 770 s; cut-out - enlarged.



Slika 28: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; vektorji; 770 s; izrez - povečano.

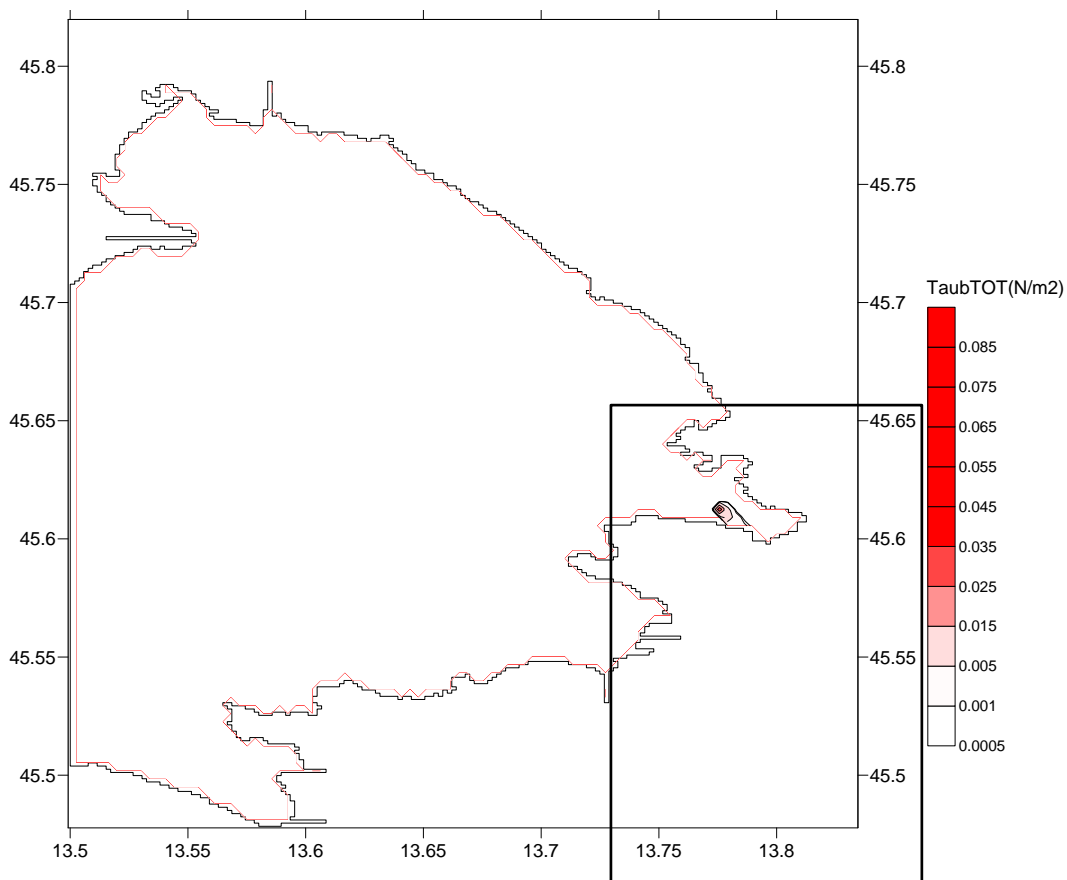
Figure 28: Velocity field behind ship's propeller; vectors; 770 s; cut-out - enlarged.

- **Modeliranje vpliva hitrosti za ladijskim vijakom na resuspendiranje sedimentov**

Vpliv propulzije ladijskega vijaka smo upoštevali tako, da smo v model PCFLOW3D dodali polje pridnenih hitrosti, ki jih premikajoča se ladja ustvarja za sabo. V prvem primeru smo upoštevali ničelno tokovno polje zaradi drugih vsiljevanj (cirkulacija, valovanje).

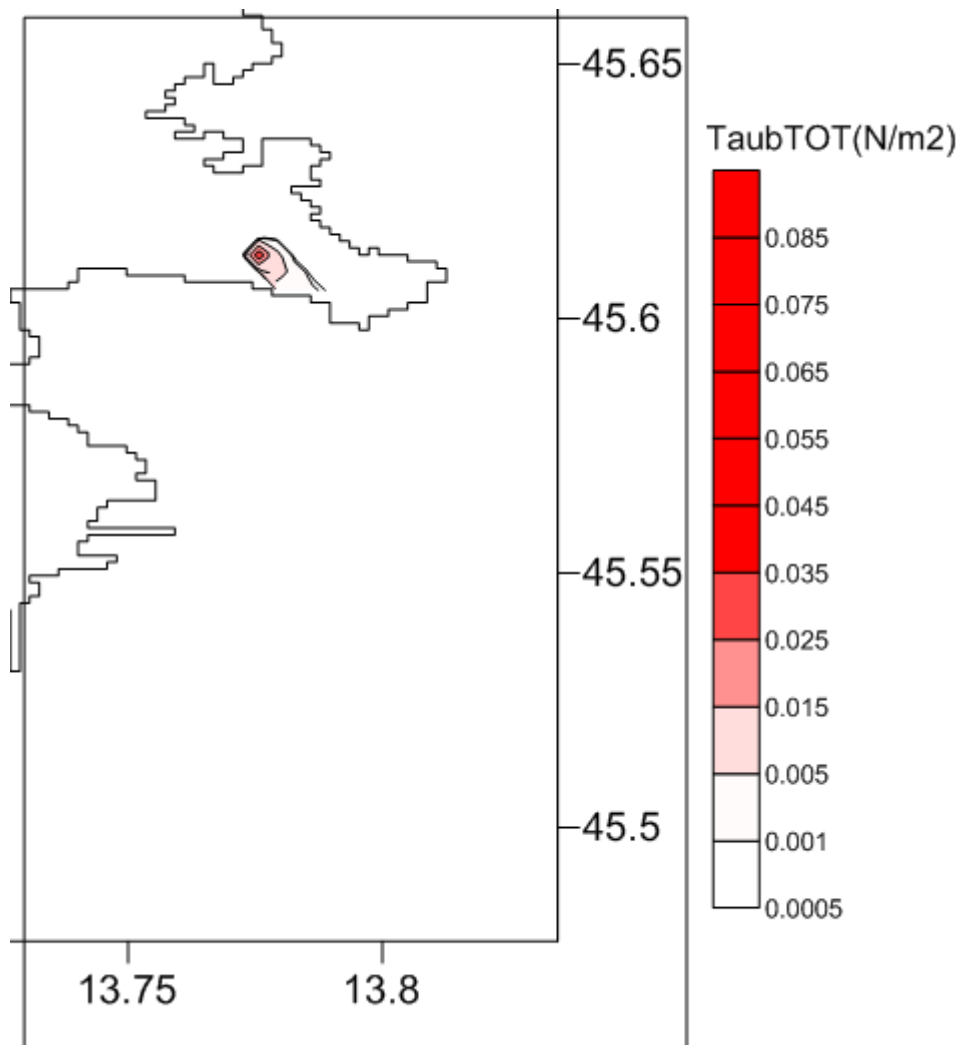
Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu (slike 29, 30 in 31) kažejo, da so strižne napetosti ob dnu zaradi plovbe na plovnih poteh z zadostno globino za velike ladje vsaj za red velikosti večje od skupnih strižnih napetosti zaradi tokov in valov na istem območju. Burja z jakostjo 10 m/s kaže, da imajo v severnem delu Tržaškega zaliva, kjer je globina majhna, valovi pomembno vlogo pri resuspendiranju sedimentov, saj maksimalna strižna napetost ob dnu zaradi vpliva ladijskega vijaka pri času 770 s znaša $\tau_{aubTOT} = 0,089 \text{ N/m}^2$. To je sicer enakega velikostnega reda kot strižne napetosti zaradi vpliva tokov ($0,09 \text{ N/m}^2$), vendar pa so precej, skoraj 5 krat manjše od tistih, povzročenih s strani valovanja

($0,45 \text{ N/m}^2$). Do resuspendiranja sedimentov zaradi vpliva ladijskega vijaka ne pride, saj kritične strižne napetosti ob dnu niso presežene.



Slika 29: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (70 s).

Figure 29: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (70 s).

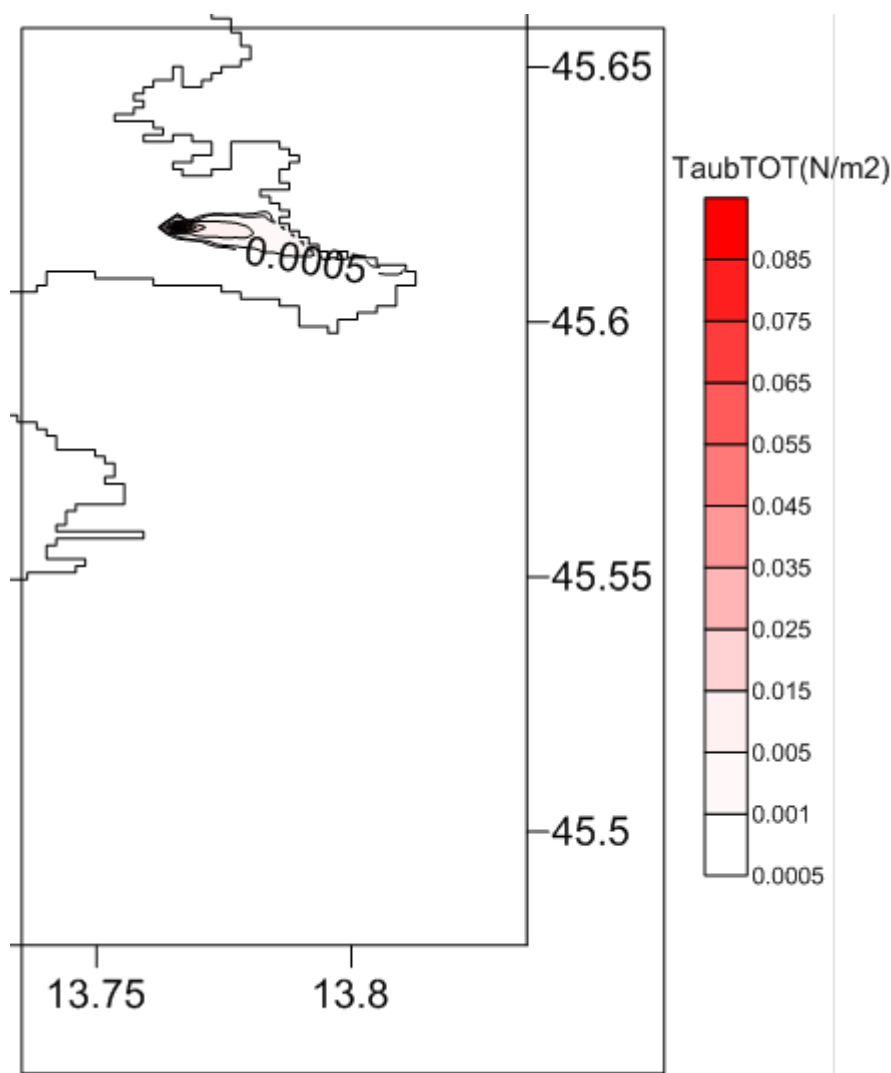


Slika 30: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (70 s); izrez - povečano.

Figure 30: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (70 s); cut-out - enlarged.

Vendar je pri tem potrebno poznati obravnavano območje, saj v primeru valovanja do maksimalnih strižnih napetosti pride v severnem plitvem delu, v primeru plovbe pa na mestu, kjer se nahaja ladja.

V vsakem primeru je vpliv valovanja velik samo v plitvi vodi, vijak pa seže veliko globlje, v našem primeru je plovba omejena na območje, do kamor vpliv zaradi valovanja ne seže, zato je direktna primerjava možna pri simulacijah, kjer modeliramo hkratni vpliv tokov, valov in curka za ladijskim vijakom.



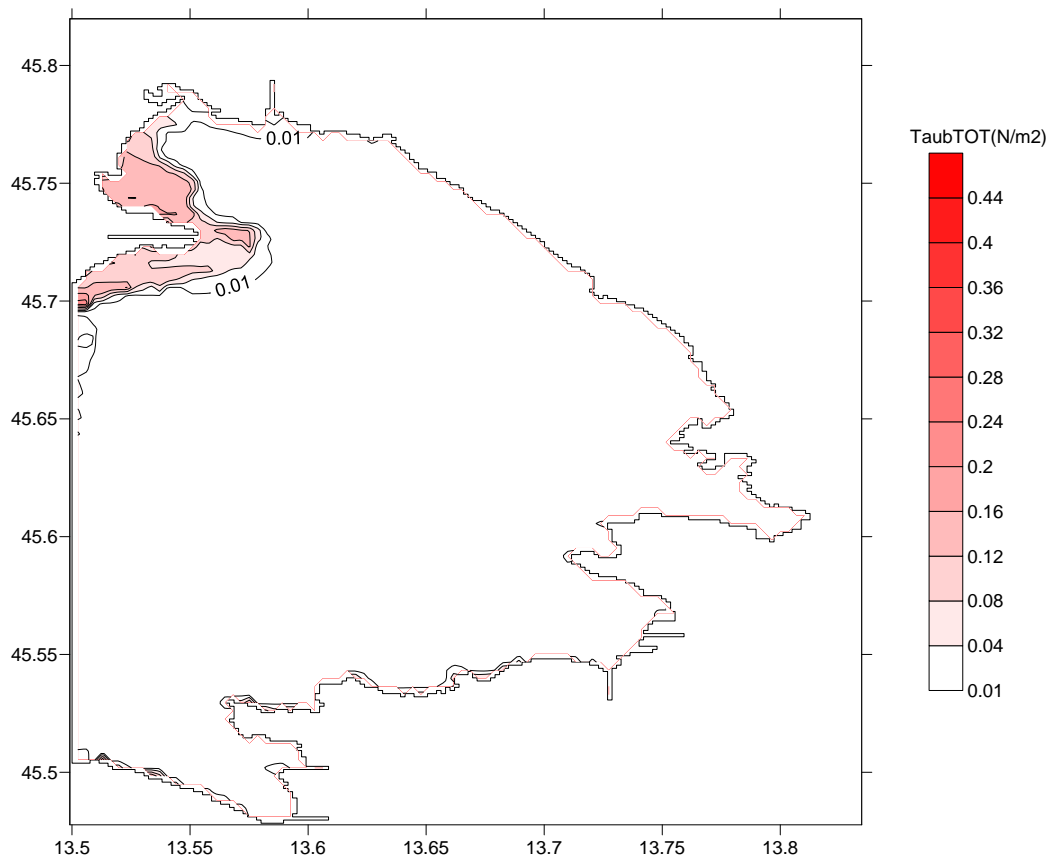
Slika 31: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (770 s).

Figure 31: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (770 s).

- **Modeliranje skupnega vpliva tokov in valov na resuspendiranje sedimentov**

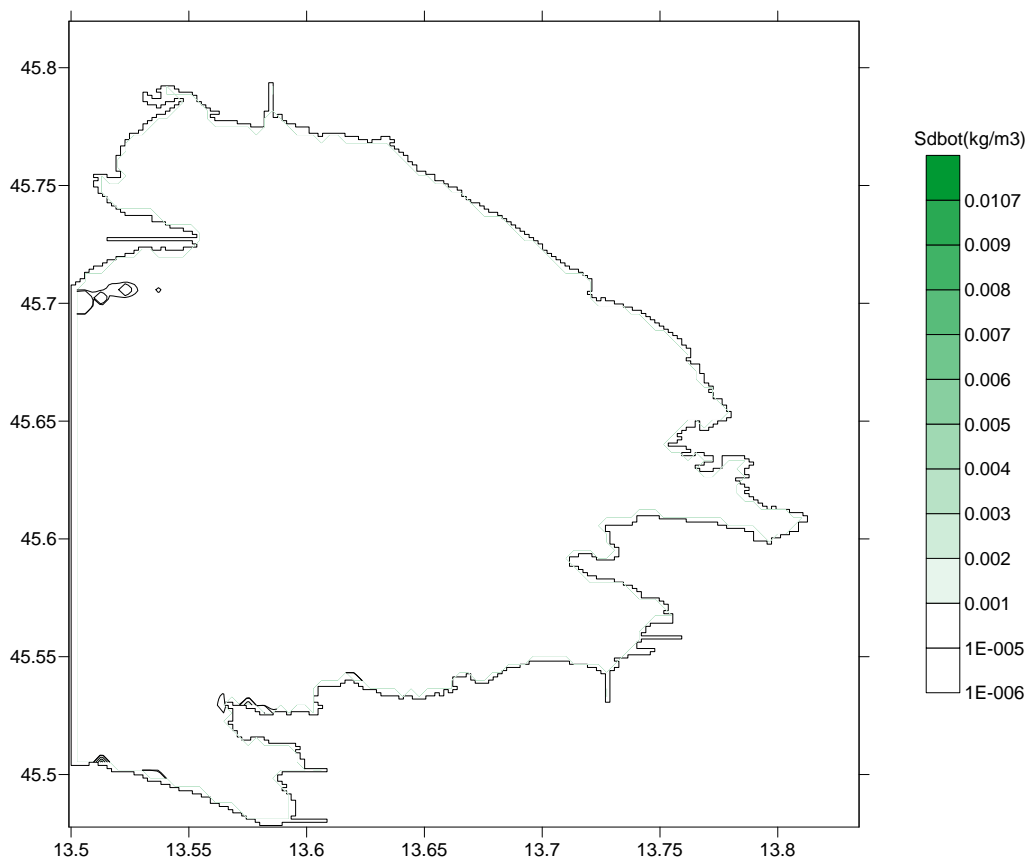
Princip računa skupnega vpliva tokov in valovanja je v tem, da pridnenim strižnim hitrostim tokov vektorsko prištejemo oscilatorne strižne hitrosti zaradi valovanja. Iz modela dobimo kot rezultat strižne napetosti ob dnu zaradi tokov τ_{aubC} in strižne napetosti ob dnu zaradi valovanja τ_{aubW} ter njuno vektorsko vsoto τ_{aubTOT} . Prikazujemo rezultate, kjer smo kot vhodni podatek uporabili valovanje iz modela SWAN in hidrodinamične količine, ki smo jih izračunali v točki hidrodinamične simulacije. Strižne napetosti zaradi kombiniranega vpliva tokov in valov ($\max \tau_{aubTOT} (tokovi + valovi) = 0,448 \text{ N/m}^2$) (slika 32), so malo manjše od pridnenih strižnih napetosti zaradi vpliva valov,

izračunanih s pomočjo modela SWAN ($\max \tau_{aubTOT} (SWAN) = 0,45 \text{ N/m}^2$), do česar pride pri vektorskem seštevanju nasprotno usmerjenih vektorjev. Tudi koncentracija lebdečih plavin je v primeru skupnega vpliva tokov in valov na ($\max Sd_{bot} (tokovi + valovi) = 0,0107 \text{ kg/m}^3$) (slika 33), je manjša od tiste izračunane pri vplivu samo valovanja z modelom SWAN ($\max Sd_{bot} (SWAN) = 0,011 \text{ kg/m}^3$).



Slika 32: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov in valov (SWAN) τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu.

Figure 32: Distribution of bottom shear-stress due to currents and waves (SWAN) τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste.

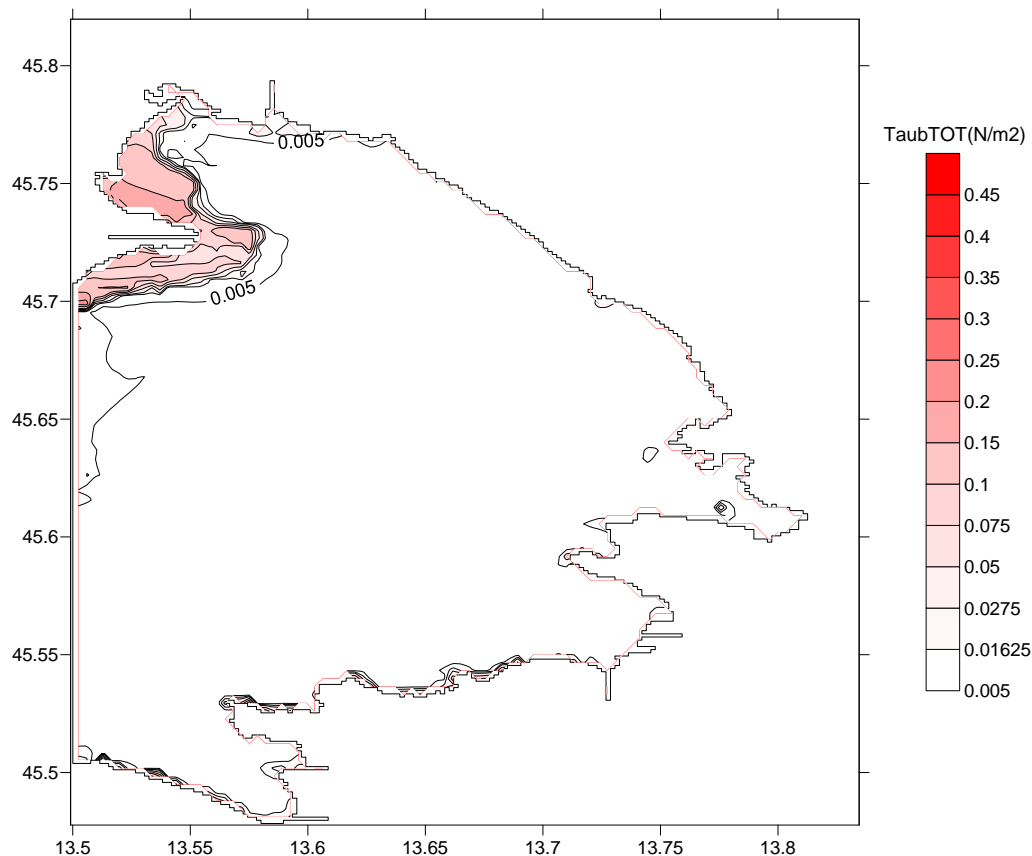


Slika 33: Koncentracija lebdečih plavin S_{dbot} na dnu v Tržaškem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov in valov (SWAN).

Figure 33: Suspended sediment cocentration S_{dbot} at the bottom (SWAN) in the Gulf of Trieste; shear stress due to currents and waves (SWAN).

- **Modeliranje vpliva tokov, valovanja in hitrosti za ladijskim vijakom na resuspendiranje sedimentov**

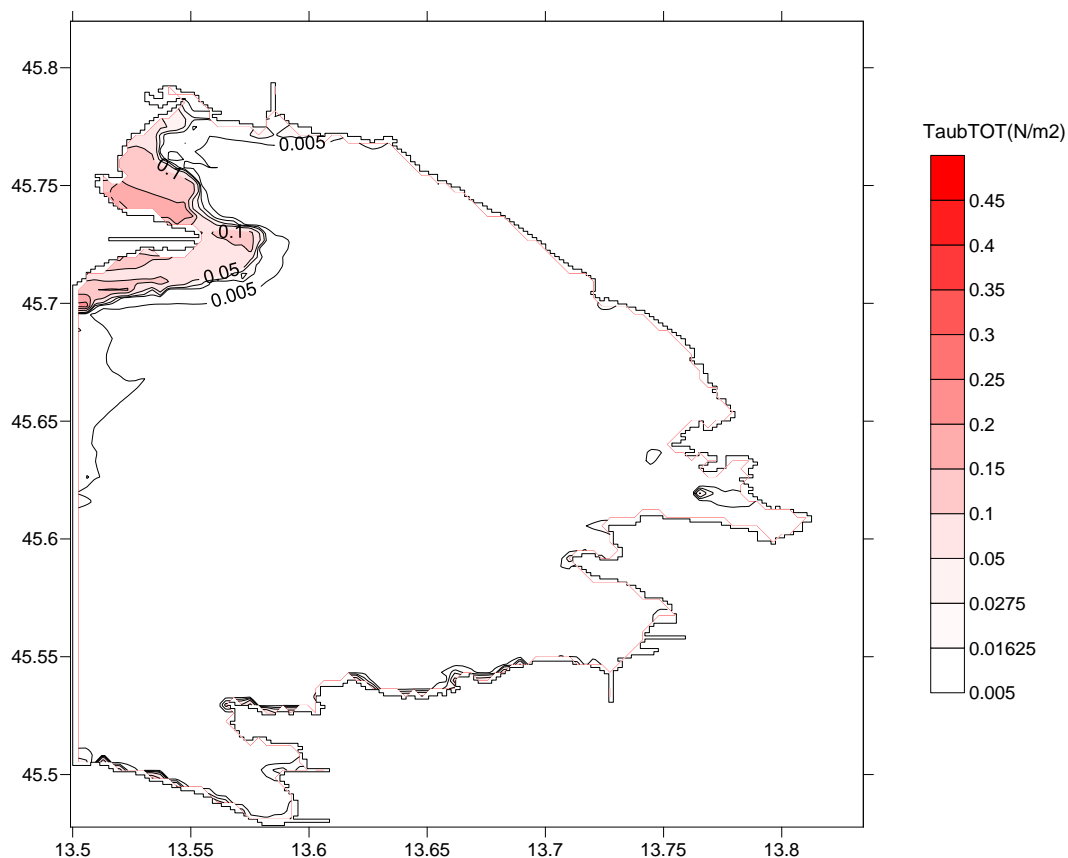
Kot zadnjo smo z modelom PCFLOW3D opravili simulacijo vpliva vseh treh dejavnikov na resuspendiranje sedimentov: tokov, valovanja (SWAN) in hitrosti za ladijskim vijakom. Izračunali smo vrednosti skupnih strižnih napetosti ob dnu in koncentracije lebdečih plavin ob dnu. Povprečne koncentracije lebdečih plavin namreč ne moremo računati, ker nimamo podanega hitrostnega polja zaradi vpliva ladijskega vijaka po globini, ampak samo na dnu.



Slika 34: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (SWAN) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (70 s).

Figure 34: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (SWAN) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (70 s).

Iz primerjave slik (34 in 35), ki prikazujeta porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi delovanja vseh treh vplivnih faktorjev je razvidno, da maksimalna strižna napetost nastopi v severnem delu zaliva in je pogojena s strani valovanja $\tau_{aubW} = 0,448 \text{ N/m}^2$ po 70 s in je enaka tudi po 770 s. Maksimalna strižna napetost ob dnu zaradi vpliva curka za ladijskim vijakom pa je največja v okolici točke, kjer se nahaja ladja in znaša $\tau_{aubC} = 0,09 \text{ N/m}^2$ po 70 s oziroma $\tau_{aubC} = 0,111 \text{ N/m}^2$ po 770 s, kar je skoraj 5 krat manj kot τ_{aubW} in τ_{aubTOT} ($0,448 \text{ N/m}^2$). Če pogledamo lokalno, to je na mesto plovbe, je za dva reda velikosti večji vpliv plovbe, ker so maksimalne strižne napetosti zaradi vpliva valovanja $\tau_{aubW} < 0,001$, tiste zaradi vpliva propulzije pa $\tau_{aubC} = 0,09 \text{ N/m}^2$ pri 70 s oziroma $\tau_{aubC} = 0,111 \text{ N/m}^2$ pri 770 s. Pomen kombiniranih simulacij je v tem, da lahko hkrati upoštevamo vse vplivne dejavnike, kar doslej še ni bilo narejeno.

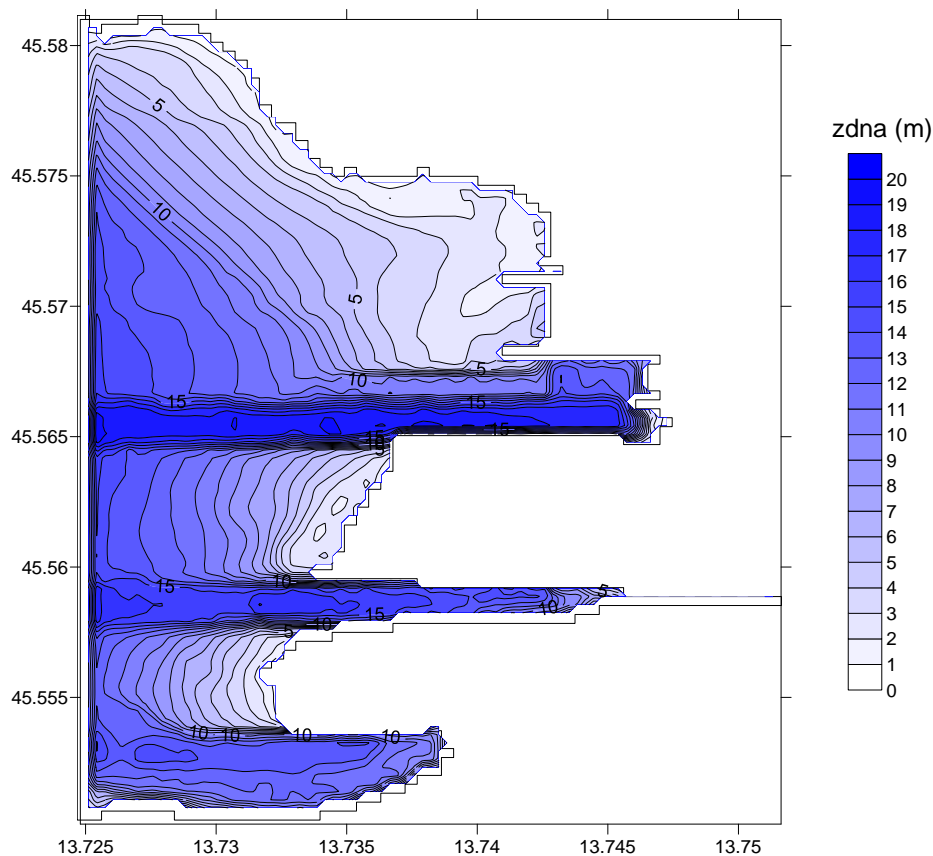


Slika 35: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (SWAN) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Tržaškem zalivu (770 s).

Figure 35 : Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (SWAN) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Gulf of Trieste (770 s).

3.1.2 Koprski zaliv

V Koprskem zalivu smo definicijsko območje opisali z numerično mrežo, ki ima po globini 22 slojev enakomerne debeline 1 m. V horizontalni ravnini je območje razdeljeno z mrežo 60x93 celic resolucije 35,4x37,3 m.



Slika 36: Definijsko območje in batimetrija Koprskega zaliva.

Figure 36: Definition area of the Bay of Koper and its depth.

3.1.2.1 Podatki

Veter; v simulacijah, kjer upoštevamo veter, smo vzeli konstantno velikost in smer vetra, ki znašata 10 m/s in odklon 60° od severa.

Vtoki rek; temperatura in slanost; pri simulacijah zanemarimo plimovanje in vtoke rek, simuliramo dobro premešano zimsko stanje; temperatura 10°C in slanost 35 PSU. Plimovanja in vtokov rek ne upoštevamo, da je mogoče razločiti vplive obravnavanih vsiljevanj (tokov zaradi vetra, vetrnih valov in plovbe) med seboj in od drugih vplivov, ki niso predmet te študije.

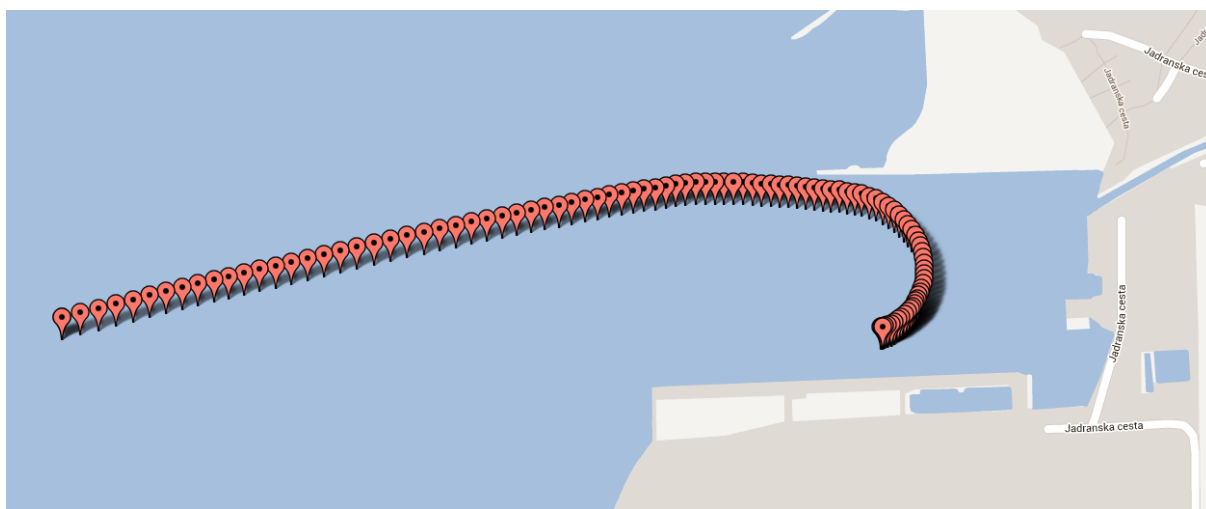
Valovi; parametre valovanja lahko izračunamo s podatki o jakosti o smeri vetra ter podani geometriji. Za izračune vpliva valovanja smo uporabili dva načina: Bretschneiderjeve enačbe in konstantno višino vala $W_h = 20$ cm ter periodo vala $T_w = 1,3$ s, kar predstavlja srednje vrednosti, izračunane z modelom SWAN na tem območju. Konstantne vrednosti smo uporabili, ker model SWAN še ni prilagojen uporabljeni numerični mreži v Koprskem zalivu, zaliv pa je razmeroma majhen in so v njem možni

številni valovni pojavi (uklon, odboji, sipanje...), ki jih brez zanesljivega valovnega modela le težko opišemo

Parametri ladje; za račun hitrosti za curkom ladijskega vijaka smo tako, kot že v primeru Tržaškega zaliva upoštevali tipsko ladjo, ki zapuša Koprski zaliv. Najslabši možni primer (worst case) je, ko ladja za razsuti tovor v stanju polnega balasta zapuša pristanišče. Podatki o ladji, so podani v preglednici (2) in prikazani na slikah (9, 10) v poglavju 3.1.1.1.

Pot ladje; za določitev vpliva gibalne količine na transport sedimentov, je potrebno poznati pot ladje po Koprskem zalivu, ki je prikazana na sliki 37, koordinate poti pa so podane v preglednici 2. Pot ladje smo izračunali iz podatkov, ki nam jih je zagotovila Fakulteta za pomorstvo in promet (Perkovič, osebni vir), izbrali smo jo fiktivno, saj ladja na začetku izplutja ne uporablja samo svojih pogonskih sredstev, ampak ji asistirajo vlačilci, vplive katerih nismo upoštevali. Na podlagi izpisa podatkov o potovanju ladje (preglednica 2), smo glede na začetni položaj ladje, hitrost ladje in smer plovbe, določili pot po posameznih časovnih korakih (20 s). Podatki o poti ladij, ki nam jih je zagotovila Fakulteta za pomorstvo in promet (Perkovič in sod., 2011) so opisani in predstavljeni že pri primeru Tržaškega zaliva (preglednica 2).

V preglednici (4) so podani parametri, ki jih potrebujemo za račun hitrosti za ladijskim vijakom. Parametre smo izračunali na način, ki je opisan že pri primeru Tržaškega zaliva (poglavje 3.1.1.1).



Slika 37: Pot ladje v Koprskem zalivu (<http://www.darrinward.com/lat-long/>).

Figure 37: Ship's path in the Koper Bay (<http://www.darrinward.com/lat-long/>).

Preglednica 4: Parametri ladje

Table 4: Ship's parameters

Korak	Čas (s)	Geogr.širina (°)	Geogr.dolžina (°)	Širina D48 (m)	Dolžina D48 (m)	HDG (°)	Hitrost (m/s)	Ugrez (m)
1	20	45,564924	13,741163	5401746,75	5047482,50	80	0,4	9,3
2	40	45,564944	13,741239	5401752,73	5047484,55	71	0,504	9,31
3	60	45,564993	13,741368	5401762,84	5047489,93	62	0,637	9,31
4	80	45,565068	13,741509	5401774,04	5047498,07	54	0,742	9,32
5	100	45,565159	13,741653	5401785,42	5047507,96	49	0,726	9,31
6	120	45,565323	13,741850	5401801,09	5047525,99	41	0,516	9,3
7	140	45,565327	13,741854	5401801,35	5047526,38	34	0,513	9,3
8	160	45,565412	13,741913	5401806,15	5047535,79	27	0,568	9,31
9	180	45,565519	13,741966	5401810,45	5047547,60	20	0,693	9,31
10	200	45,565651	13,742006	5401813,83	5047562,25	13	0,809	9,31
11	220	45,565805	13,742014	5401814,73	5047579,35	3	0,897	9,32
12	240	45,565971	13,741977	5401812,13	5047597,82	352	0,966	9,32
13	260	45,566139	13,741891	5401805,66	5047616,62	341	1,02	9,32
14	280	45,566305	13,741766	5401796,19	5047635,21	333	1,065	9,32
15	300	45,566462	13,741598	5401783,42	5047652,78	324	1,11	9,32
16	320	45,566610	13,741402	5401768,32	5047669,55	318	1,149	9,33
17	340	45,566738	13,741162	5401749,85	5047683,98	308	1,194	9,33
18	360	45,566844	13,740890	5401728,76	5047696,16	300	1,242	9,33
19	380	45,566911	13,740580	5401704,69	5047703,98	288	1,292	9,33
20	400	45,566944	13,740246	5401678,69	5047708,10	279	1,341	9,33
21	420	45,566971	13,739898	5401651,56	5047711,43	277	1,391	9,33
22	440	45,566998	13,739536	5401623,42	5047714,88	277	1,442	9,34
23	460	45,567021	13,739162	5401594,22	5047717,95	276	1,494	9,34
24	480	45,567045	13,738775	5401564,06	5047721,12	276	1,54	9,34
25	500	45,567065	13,738377	5401533,02	5047723,84	275	1,579	9,34
26	520	45,567081	13,737969	5401501,21	5047726,06	274	1,61	9,34
27	540	45,567092	13,737553	5401468,75	5047727,76	273	1,639	9,34
28	560	45,567092	13,737129	5401435,71	5047728,34	271	1,665	9,34
29	580	45,567061	13,736703	5401402,38	5047725,42	265	1,687	9,34
30	600	45,567013	13,736267	5401368,23	5047720,63	262	1,767	9,35
31	620	45,566963	13,735806	5401332,19	5047715,56	262	1,875	9,35
32	640	45,566909	13,735315	5401293,82	5047710,17	262	1,999	9,35
33	660	45,566838	13,734796	5401253,19	5047703,00	260	2,128	9,36
34	680	45,566764	13,734245	5401210,02	5047695,39	260	2,255	9,36
35	700	45,566685	13,733662	5401164,35	5047687,34	260	2,379	9,36
36	720	45,566602	13,733047	5401116,23	5047678,85	260	2,506	9,37
37	740	45,566514	13,732399	5401065,53	5047669,91	260	2,636	9,37
38	760	45,566422	13,731721	5401012,40	5047660,55	260	2,753	9,37
39	780	45,566327	13,731014	5400957,11	5047650,80	260	2,862	9,38
40	800	45,566228	13,730284	5400899,90	5047640,71	260	2,952	9,38
41	820	45,566126	13,729530	5400840,90	5047630,31	260	3,028	9,38
42	840	45,566005	13,728781	5400782,24	5047617,84	258	2,963	9,38
43	860	45,565911	13,728195	5400736,37	5047608,09	258	2,897	9,38
44	880	45,565668	13,726686	5400618,11	5047582,95	258	2,734	9,37
45	900	45,565662	13,726651	5400615,40	5047582,37	258	2,735	9,37

Se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 4

Pot (m)	Pot v x (m)	Pot v y (m)	Apd (kW)	Smer (°)	Alfa °	x _{OM} (m)	y _{OM} (m)	x _{OL} (m)	y _{OL} (m)
0,04	0,04	0,01	1206,4342	260	181	1303,25	1622,64	-1565,22	-1371,68
6,36	5,98	2,06	1206,4342	251	190	1309,23	1624,69	-1766,85	-1109,94
17,82	10,12	5,38	1206,4342	242	199	1319,34	1630,07	-1930,19	-819,88
31,66	11,20	8,13	1206,4342	234	208	1330,54	1638,21	-2039,35	-543,27
46,74	11,38	9,89	15,3262	229	216	1341,92	1648,10	-2094,01	-363,46
70,62	15,67	18,02	260,5900	221	221	1357,59	1666,13	-2148,10	-68,49
71,09	0,26	0,39	698,1680	214	229	1357,85	1666,52	-2140,90	193,81
81,66	4,80	9,42	1915,7729	207	236	1362,65	1675,93	-2111,90	453,27
94,23	4,30	11,81	2084,7183	200	243	1366,95	1687,74	-2053,49	707,27
109,26	3,38	14,64	2084,7183	193	250	1370,33	1702,39	-1967,01	952,25
126,38	0,90	17,10	2084,7183	183	257	1371,23	1719,49	-1788,89	1279,36
145,04	-2,60	18,48	2084,7183	172	267	1368,63	1737,96	-1530,57	1597,19
164,92	-6,47	18,80	2084,7183	161	278	1362,16	1756,76	-1217,58	1859,89
185,78	-9,47	18,59	2084,7183	153	289	1352,69	1775,35	-967,74	2011,24
207,50	-12,77	17,57	2084,7183	144	297	1339,92	1792,92	-662,92	2137,87
230,07	-15,10	16,77	2084,7183	138	306	1324,82	1809,69	-458,39	2195,45
253,51	-18,47	14,43	2084,7183	128	312	1306,35	1824,12	-93,63	2241,70
277,86	-21,09	12,18	2084,7183	120	322	1285,26	1836,30	194,92	2232,91
303,17	-24,07	7,82	2084,7183	108	330	1261,19	1844,12	629,60	2143,59
329,49	-26,00	4,12	2263,3153	99	342	1235,19	1848,24	930,86	2018,71
356,83	-27,14	3,33	2263,3153	97	351	1208,06	1851,57	973,40	1984,99
385,18	-28,14	3,45	2263,3153	97	353	1179,92	1855,02	945,05	1984,99
414,54	-29,20	3,07	2263,3153	96	353	1150,72	1858,09	950,19	1968,20
444,86	-30,15	3,17	2263,3153	96	354	1120,56	1861,26	919,87	1968,20
476,02	-31,04	2,72	2263,3153	95	354	1089,52	1863,98	922,92	1951,84
507,91	-31,81	2,22	2263,3153	94	355	1057,71	1866,20	924,95	1935,44
540,41	-32,46	1,70	2263,3153	93	356	1025,25	1867,90	926,09	1919,00
573,46	-33,04	0,58	2859,6959	91	357	992,21	1868,48	959,45	1885,51
606,92	-33,33	-2,92	3079,5798	85	359	958,88	1865,56	1117,82	1774,89
641,40	-34,14	-4,80	3079,5798	82	5	924,73	1860,77	1174,70	1713,96
677,80	-36,05	-5,07	3079,5798	82	8	888,69	1855,70	1138,30	1713,96
716,54	-38,36	-5,39	3079,5798	82	8	850,32	1850,31	1099,56	1713,96
757,80	-40,63	-7,16	3079,5798	80	8	809,69	1843,14	1117,45	1674,54
801,64	-43,17	-7,61	3079,5798	80	10	766,52	1835,53	1073,61	1674,54
848,01	-45,67	-8,05	3079,5798	80	10	720,85	1827,48	1027,24	1674,54
896,87	-48,12	-8,48	3310,4555	80	10	672,73	1818,99	978,38	1674,54
948,36	-50,71	-8,94	3310,4555	80	10	622,03	1810,05	926,89	1674,54
1002,30	-53,12	-9,37	3310,4555	80	10	568,90	1800,69	872,95	1674,54
1058,45	-55,30	-9,75	3310,4555	80	10	513,61	1790,94	816,80	1674,54
1116,54	-57,21	-10,09	3310,4555	80	10	456,40	1780,85	758,71	1674,54
1176,45	-59,00	-10,40	879,4906	80	10	397,40	1770,45	698,80	1674,54
1236,42	-58,66	-12,47	22,8776	78	10	338,74	1757,98	696,84	1649,13
1283,32	-45,88	-9,75	0,0447	78	12	292,87	1748,23	649,94	1649,13
1404,22	-118,26	-25,14	617,6900	78	12	174,61	1723,09	529,04	1649,13
1406,99	-2,71	-0,58	698,1680	78	12	171,90	1722,51	526,27	1649,13

Podatki o sedimentu: so enaki kot v primeru Tržaškega zaliva.

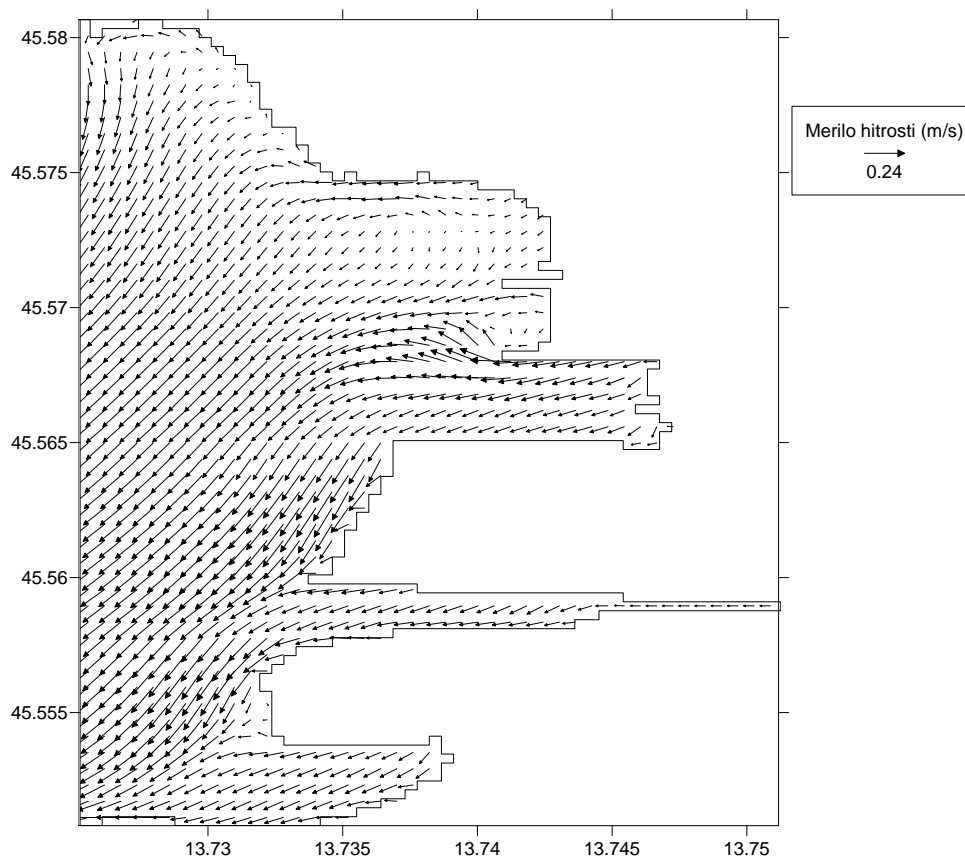
3.1.2.2 Račun in rezultati

Vpliv propulzije ladijskega vijaka, valovanja in tokov na resuspendiranje sedimentov smo simulirali na enak način kot v primeru Tržaškega zaliva, zato postopka tu ne opisujemo.

- **Hidrodinamične simulacije**

Simulacije smo izvedli na enak način, kot v primeru Tržaškega zaliva, tako smo tudi tu na podlagi simulacij dobili sliko hitrostnega polja.

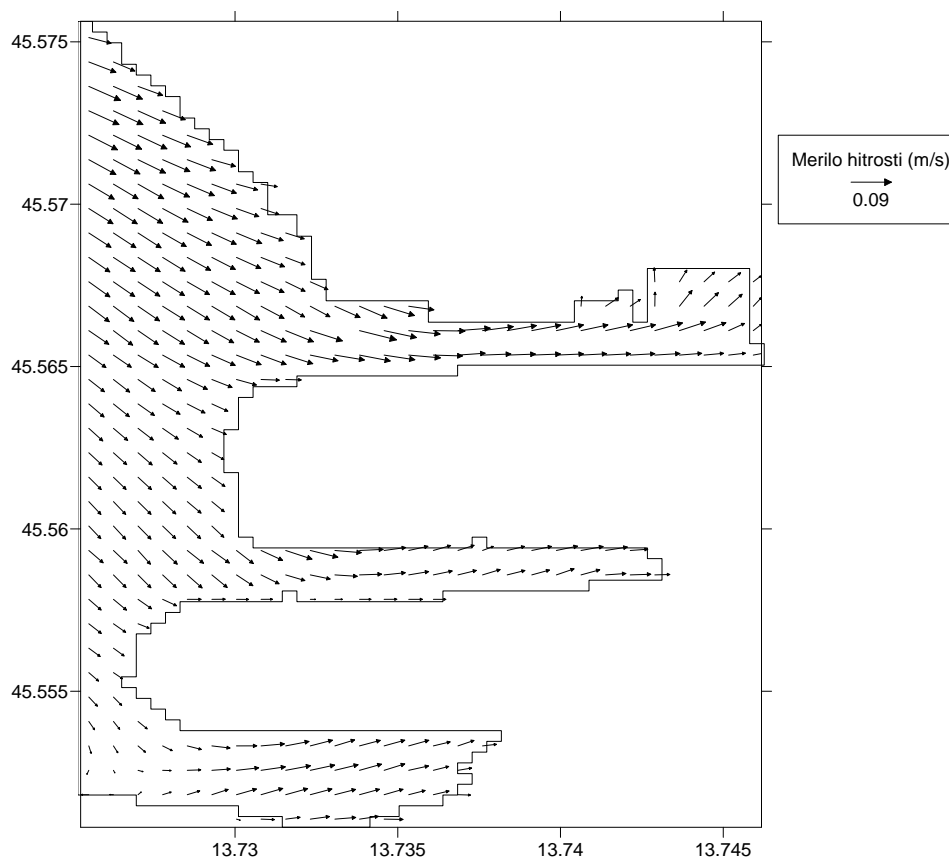
Na slikah 38 in 39 so prikazana hitrostna polja, ki so rezultat simulacij z burjo (10 m/s; 60°) v Koprskem zalivu in kažejo tipično cirkulacijo znotraj zaliva po 3 urah na različnih globinah.



Slika 38: Hitrostno polje v Koprskem zalivu v površinskem sloju po 3 urah.

Figure 38: Velocity field in the Koper Bay in the surface layer after 3 hours.

Enako kot v primeru Tržaškega zaliva je tudi tukaj smer toka v površinskem sloju usmerjena v smeri vetra, v sloju na globini 10,5 m pa se kaže nasprotno usmerjen kompenzacijski tok.

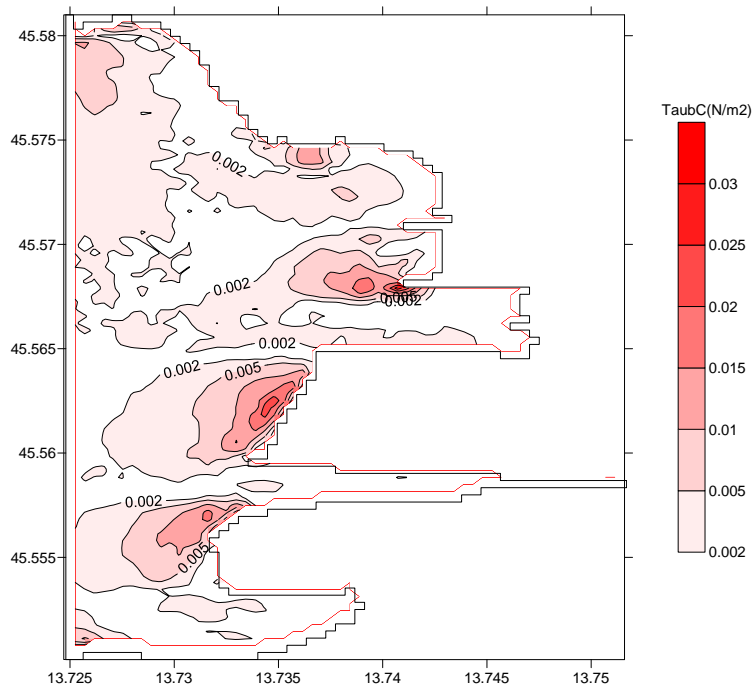


Slika 39: Hitrostno polje v Koperskem zalivu na globini 11 m po 3 urah.

Figure 39: Velocity field in the Koper Bay on 11 m depth after 3 hours.

- **Modeliranje vpliva tokov na resuspendiranje sedimentov**

Pri modeliranju vpliva tokov na resuspendiranje sedimentov smo na podlagi rezultatov hidrodinamičnih simulacije izvedli račun strižnih napetosti ob dnu τ_{aubTOT} oziroma τ_{aubC} . V tem primeru smo upoštevali samo vpliv tokov zaradi vetra (burje jakosti 10 m/s iz smeri 60°). Kritične strižne napetosti (0,3 N/m²) niso nikjer presežene, saj je maksimalna strižna napetost ob dnu $\tau_{aubC} = 0,028$ N/m².

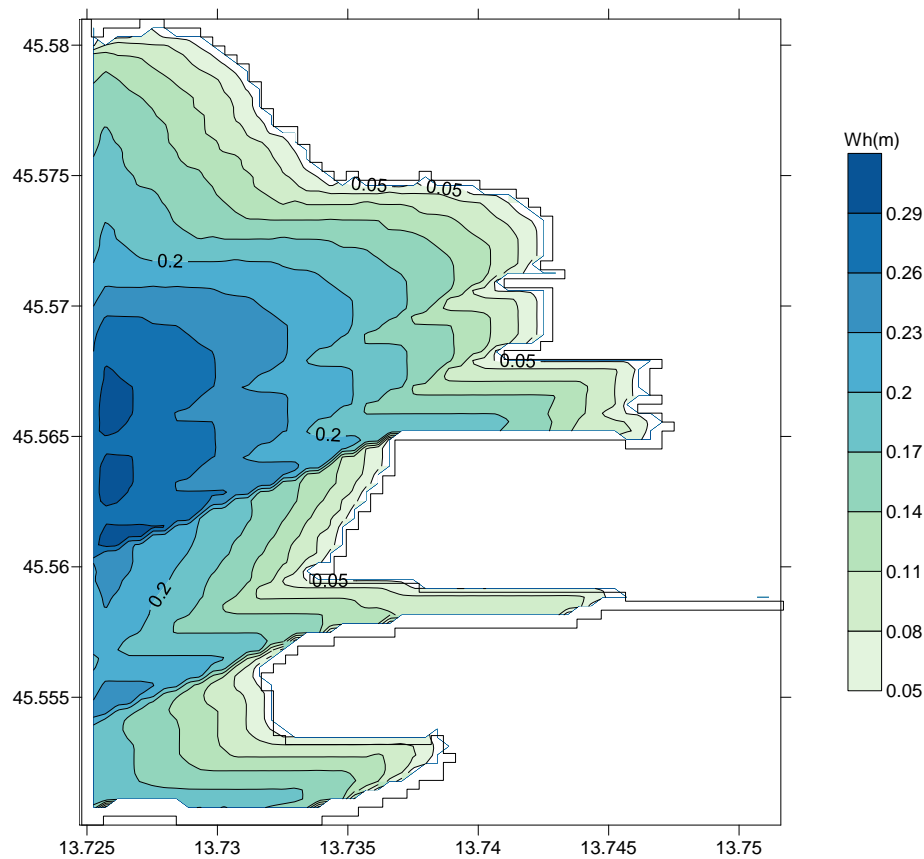


Slika 40: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov τ_{aubC} v Koprskem zalivu.

Figure 40: Distribution of bottom shear-stress due to currents τ_{aubC} in the Koper Bay.

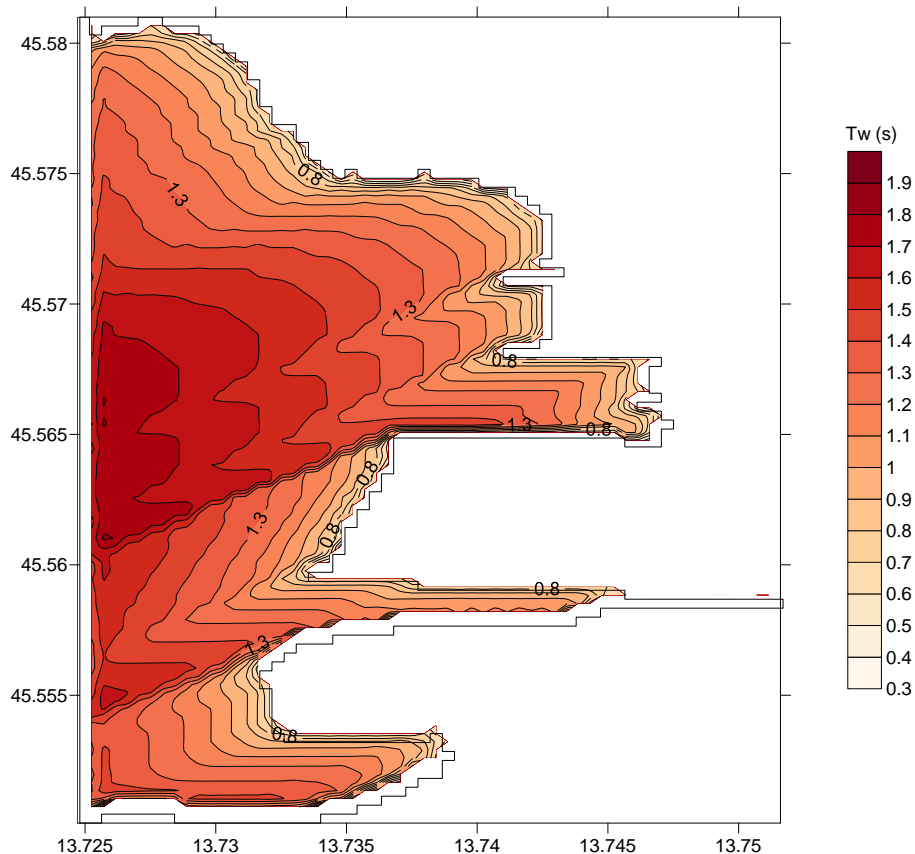
- **Modeliranje valovanja**

Na slikah 41 in 42 je prikazana višina in perioda valovanja v Koprskem zalivu, izračunana s pomočjo Bretschneiderjevih enačb.



Slika 41: Višina valovanja v Koprskem zalivu, izračunana na podlagi Bretschneiderjevih enačb.

Figure 41: Wave hight in the Koper Bay, computed based on Bretschneider's formulas.

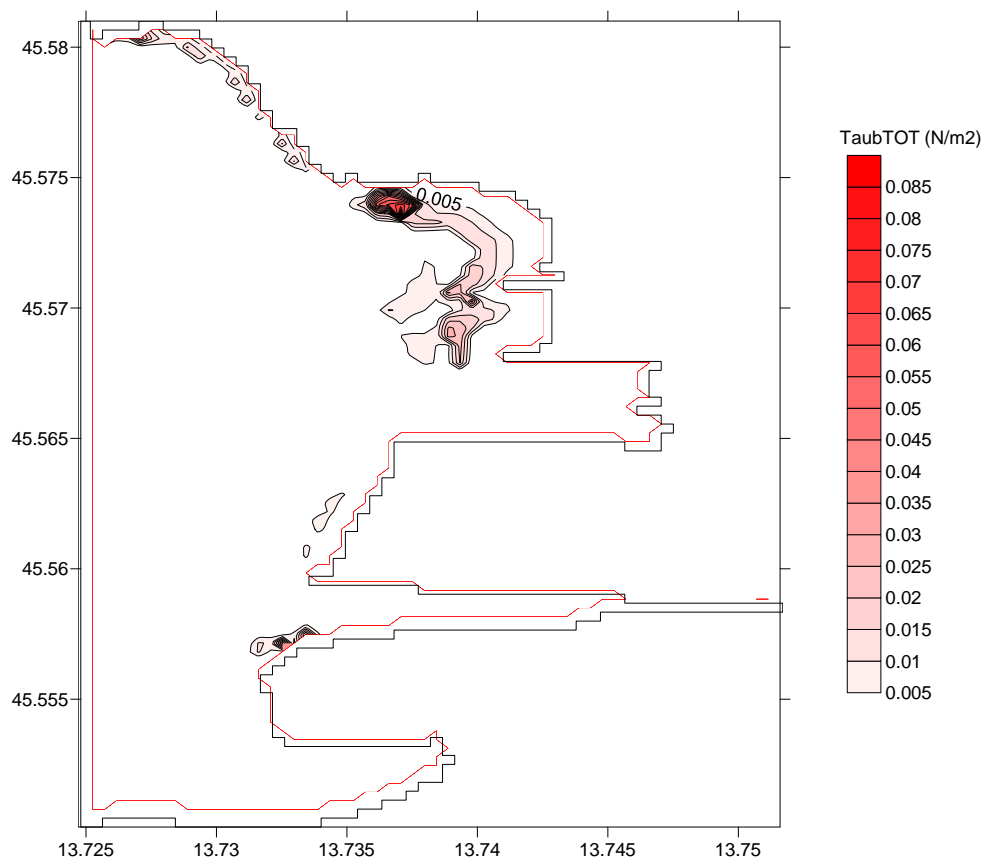


Slika 42: Perioda valovanja v Koprskem zalivu, izračunana na podlagi Bretschneiderjevih enačb.

Figure 42: Wave period in the Koper Bay, computed based on Bretschneider's formulas.

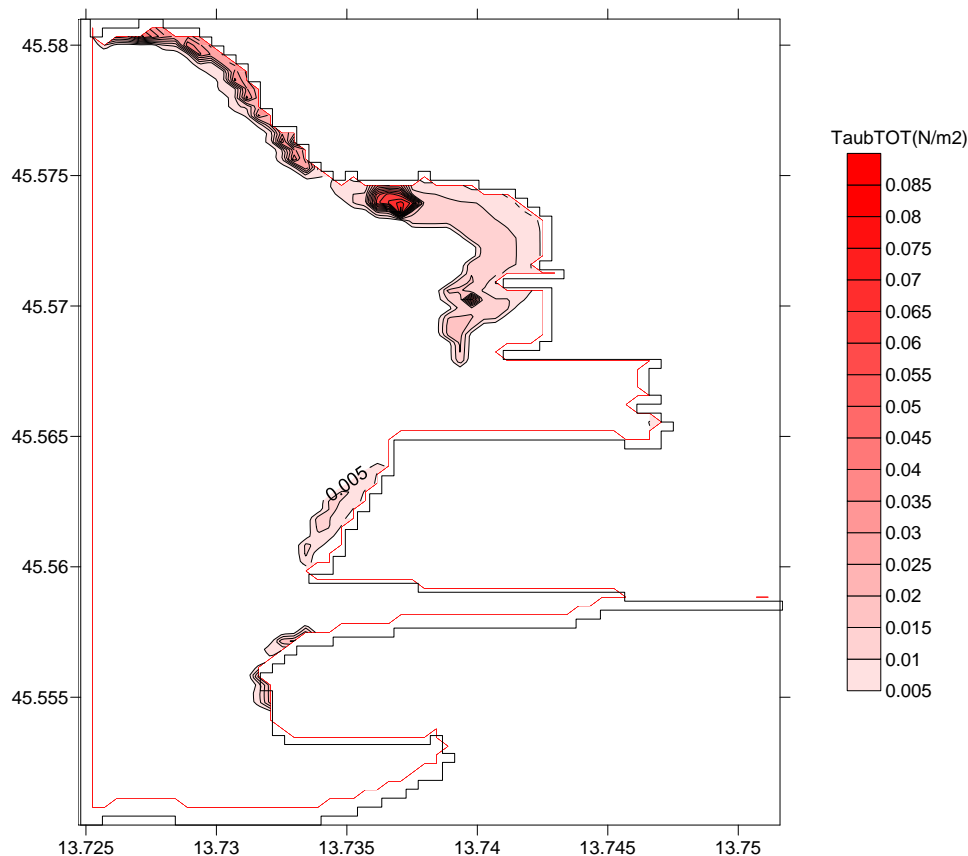
- **Modeliranje vpliva valov na resuspendiranje sedimentov**

Valovanje smo modelirali na dva načina, po Bretschneiderjevih enačbah in s konstantnima vrednostima višine in periode valovanja. Simulacije z modelom PCFLOW3D smo v tem primeru izvedli samo z valovanjem in ničnim poljem tokov. Na slikah (43 in 44) vidimo, da so valovi, izračunani s konstantnima vrednostima, v plitvih delih ob obali zaliva bolj neugodni, saj so strižne napetosti ob dnu večje. Maksimalni strižni napetosti sta sicer v obeh primerih enakega velikostnega razreda in znašata $\tau_{aubTOT}(konst.) = 0,083 \text{ N/m}^2$ in $\tau_{aubTOT}(Bret.) = 0,089 \text{ N/m}^2$. Kritična strižna napetost ($0,3 \text{ N/m}^2$) tako v nobenem primeru ni presežena, zato do resuspendiranja sedimenta ne pride.



Slika 43: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi valov τ_{aubTOT} (Bretschneider) v Koprskem zalivu.

Figure 43: Distribution of bottom shear-stress due to waves τ_{aubTOT} (Bretschneider) in the Koper Bay.



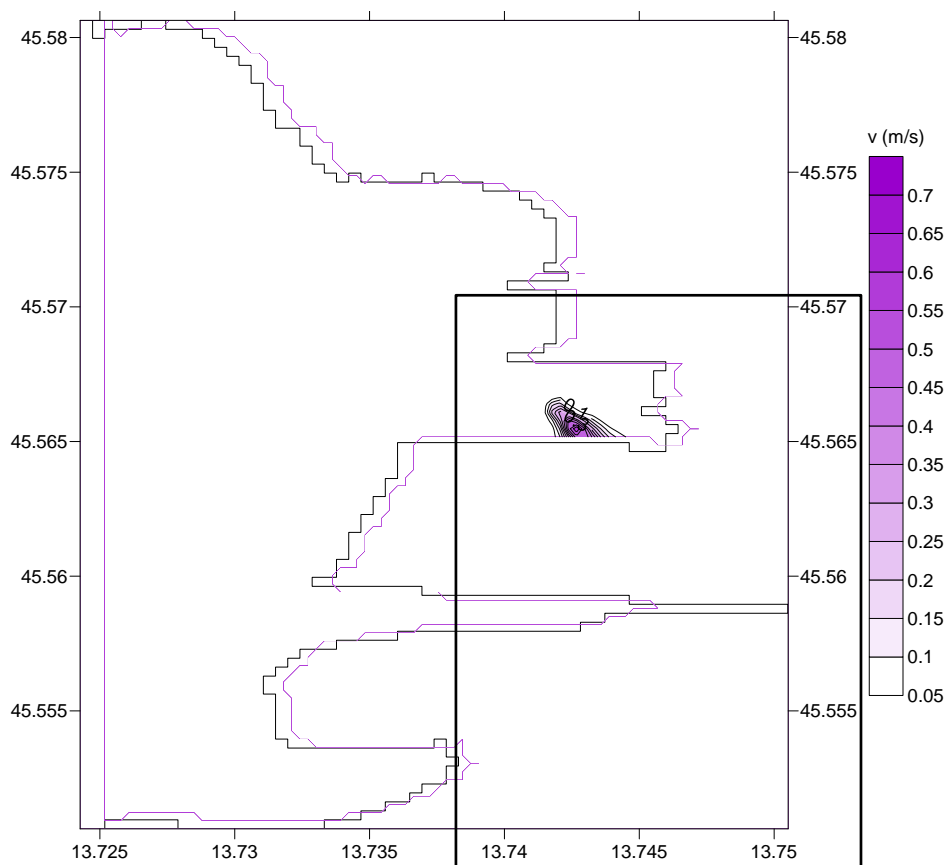
Slika 44: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi valov τ_{aubTOT} (konstantni vrednosti) v Koprskem zalivu.

Figure 44: Distribution of bottom shear-stress due to waves τ_{aubTOT} (constant values) in the Koper Bay.

- **Račun hitrosti za curkom ladijskega vijaka**

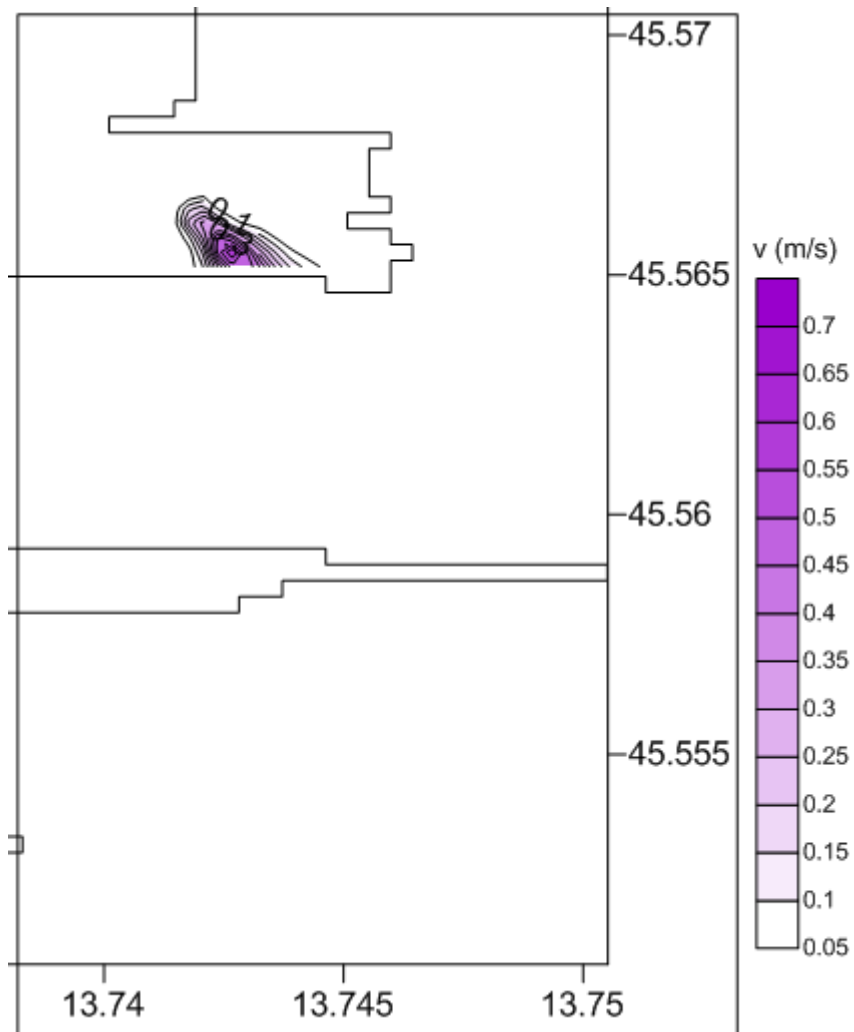
Po enakem postopku kot že v prejšnjem primeru Tržaškega zaliva smo izračunali hitrostno polje za ladijskim vijakom tudi za Koprski zaliv.

Iz slik (46 in 48) vidimo, da največje hitrosti toka dosežejo 0,65 m/s. Izotahe (sliki 46 in 48) in vektorski sliki hitrosti (47 in 49) so podane za časa 300 s in 900 s po začetku simulacij.



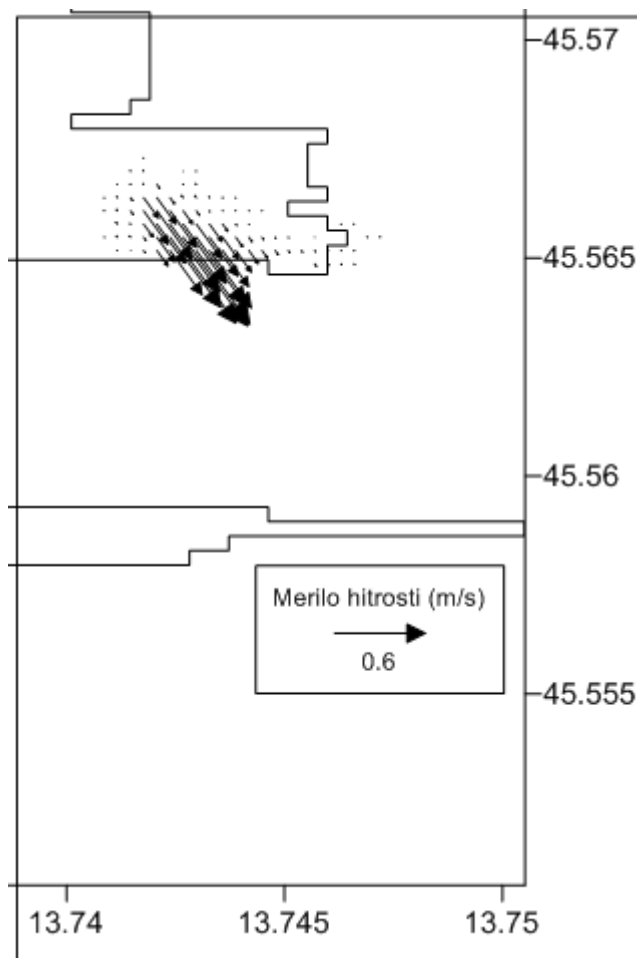
Slika 45: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 300 s.

Figure 45: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 300 s.



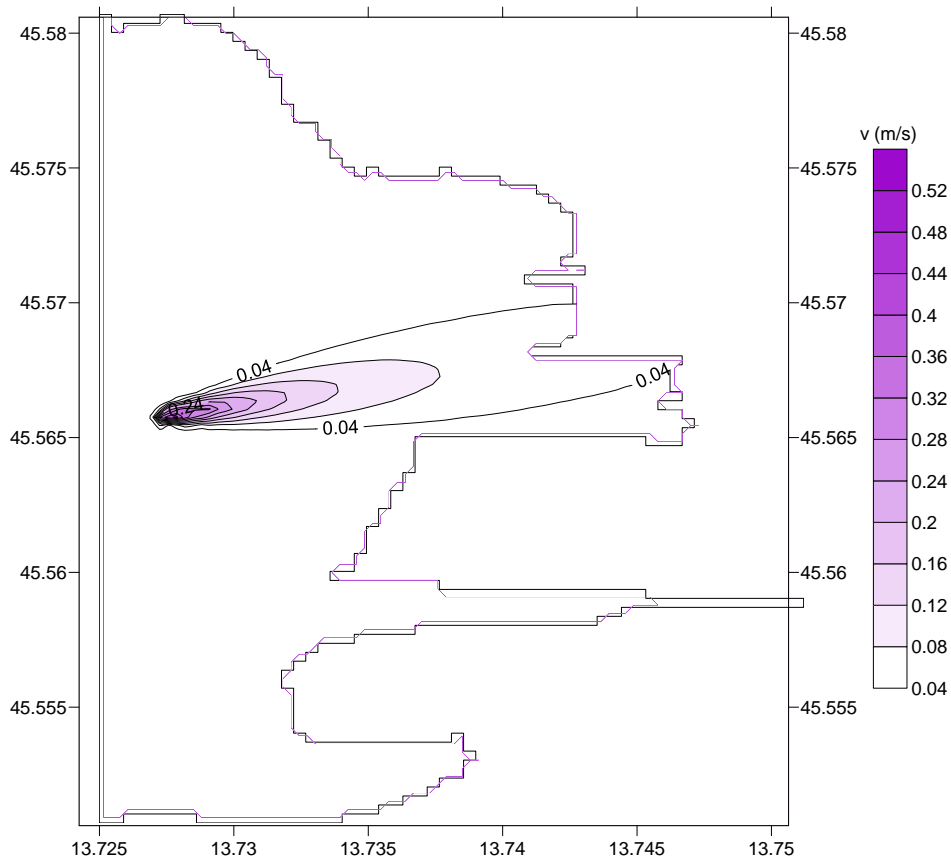
Slika 46: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 300 s; izrez - povečano.

Figure 46: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 300 s; cut-out - enlarged.



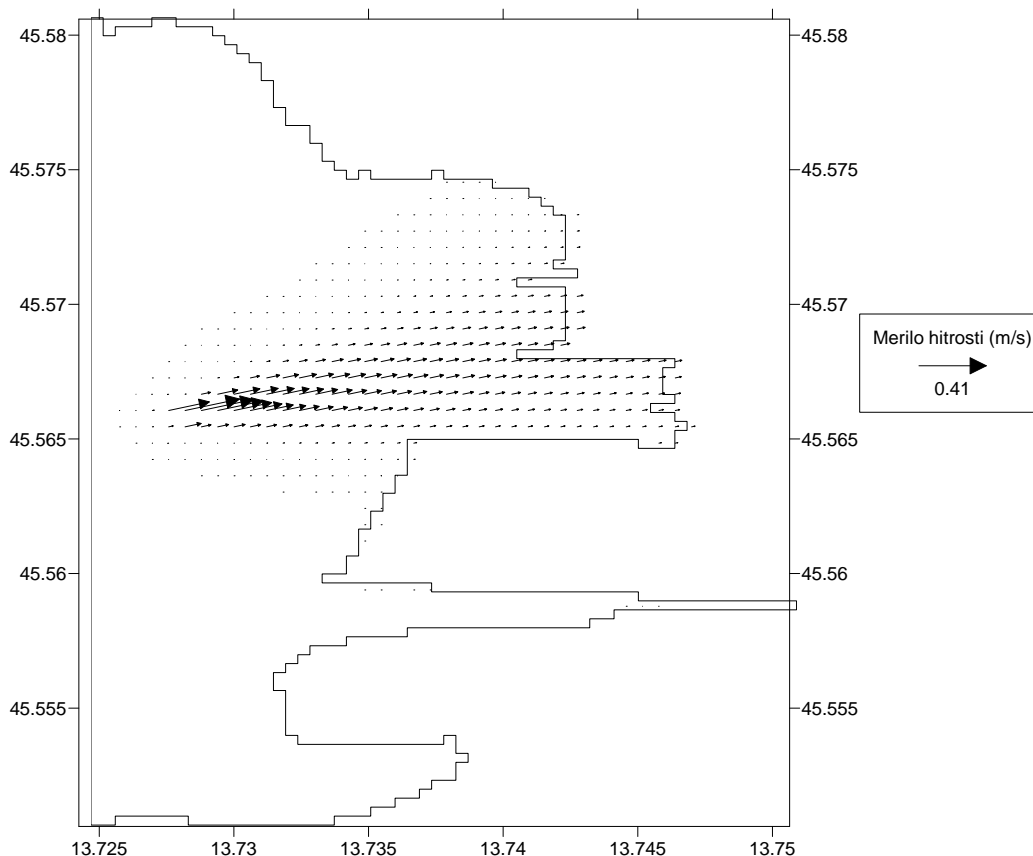
Slika 47: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; vektorji; 300 s.

Figure 47: Velocity field behind ship's propeller; vectors; 300 s.



Slika 48 : Hitrostno polje za ladijskim vijakom; izotahe; 900 s.

Figure 48: Velocity field behind ship's propeller; isovels; 900 s.



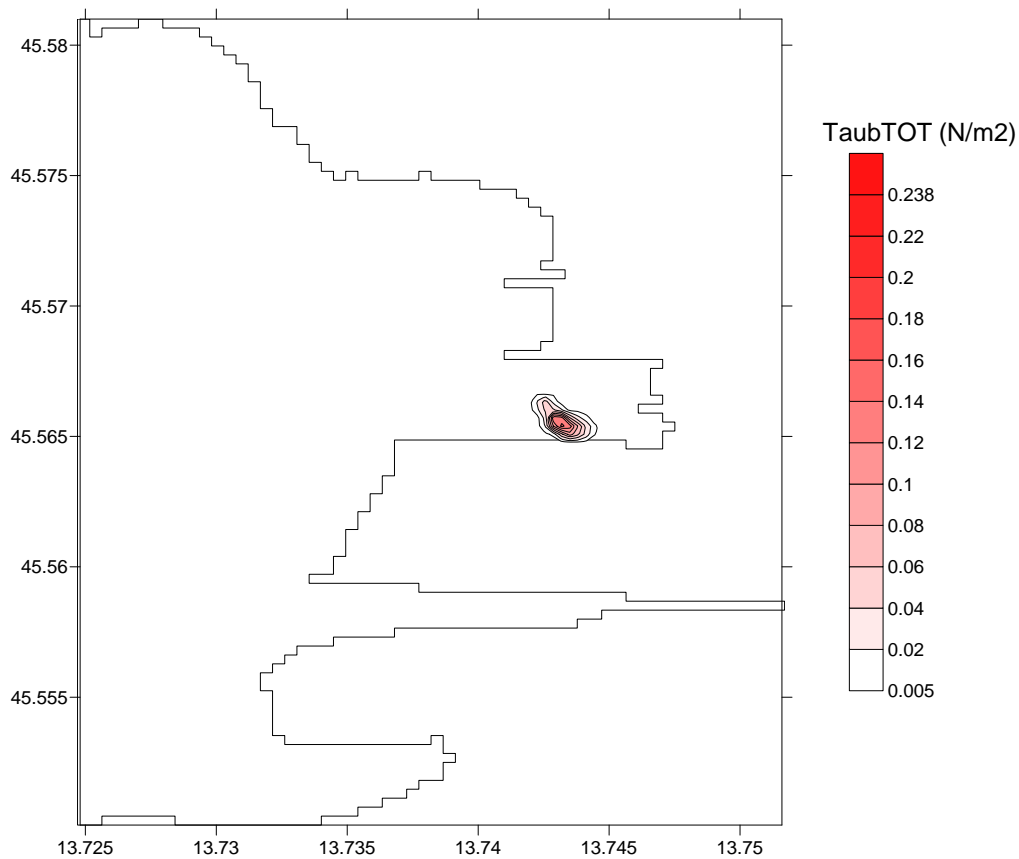
Slika 49: Hitrostno polje za ladijskim vijakom; vektorji; 900 s.

Figure 49: Velocity field behind ship's propeller; vectors; 900 s.

- **Modeliranje vpliva hitrosti za ladijskim vijakom na resuspendiranje sedimentov**

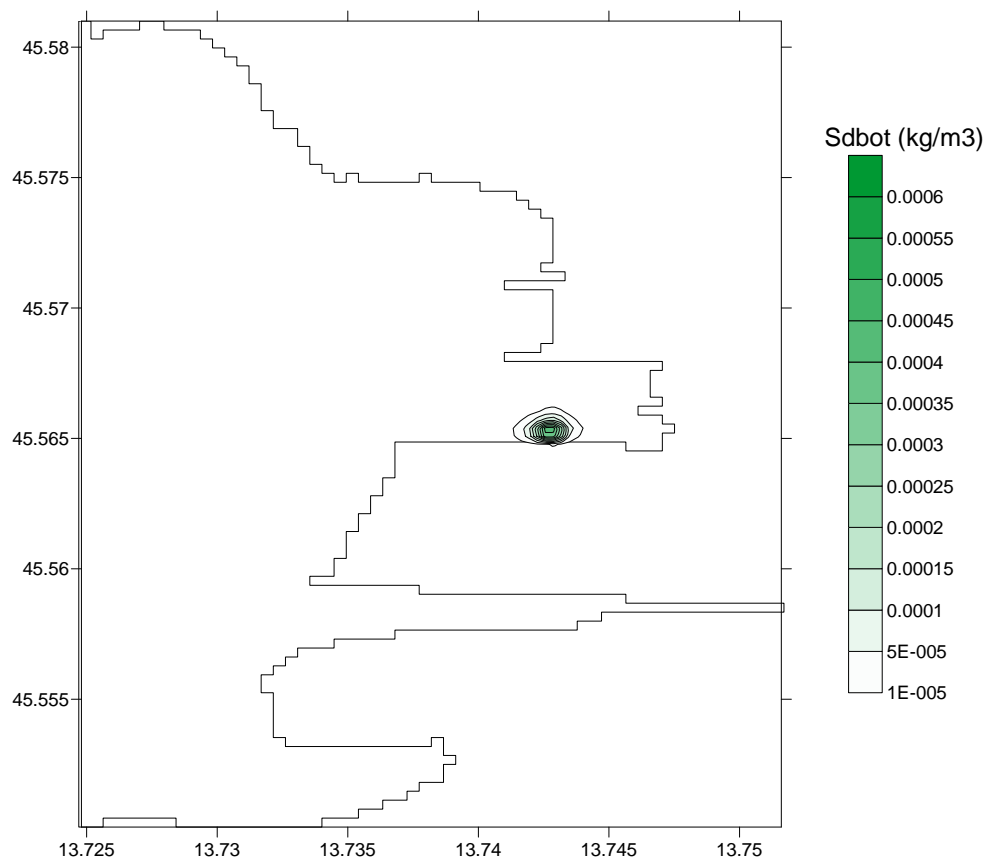
Vpliv propulzije ladijskega vijaka smo upoštevali na enak način kot v primeru Tržaškega zaliva.

Na slikah (50 in 52) je prikazana porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva ladijskega vijaka, na slikah 51 in 43 pa je prikazana koncentracija lebečih plavin ob dnu. Vrednosti τ_{aubTOT} , znašajo $0,238 \text{ N/m}^2$ (300 s) oziroma $0,444 \text{ N/m}^2$ (900 s), kjer je tudi presežena kritična strižna napetost ($0,3 \text{ N/m}^2$), torej lahko pride do resuspendiranja sedimentov. Vrednost Sd_{bot} je po 300 s enaka $0,0006 \text{ kg/m}^3$, po 900 s pa $0,0012 \text{ kg/m}^3$.



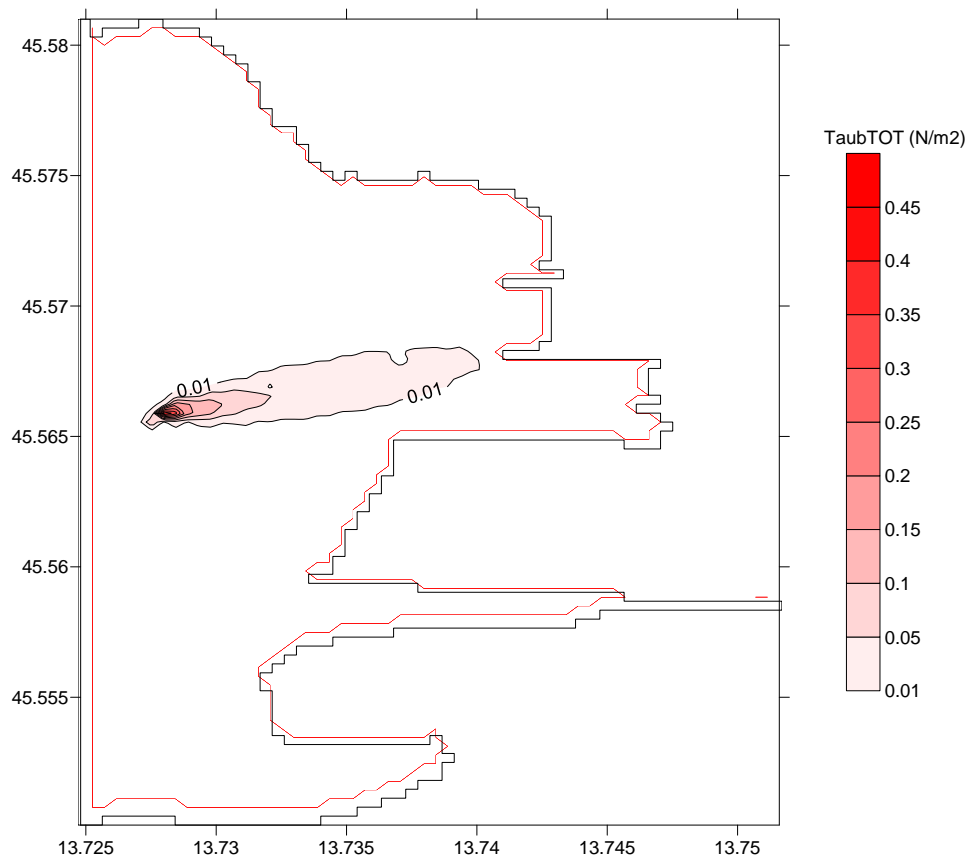
Slika 50: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 300 s.

Figure 50: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 300 s.



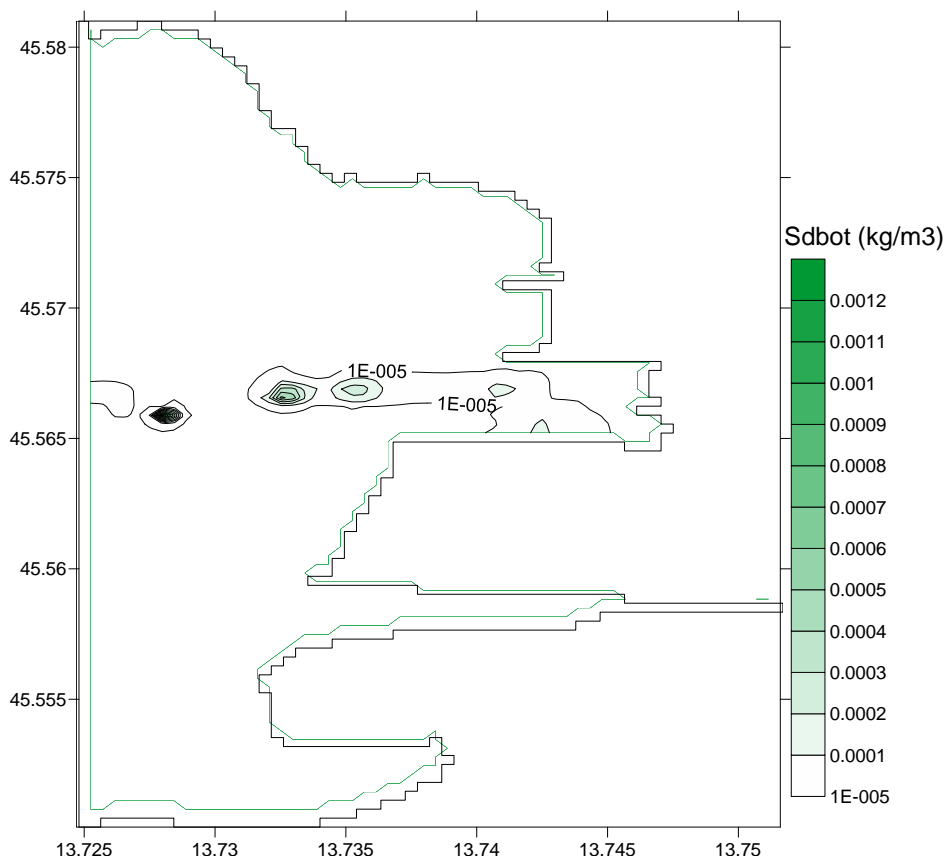
Slika 51: Koncentracija lebdečih plavin S_{dbot} ob dnu v Koprskem zalivu; vpliv hitrosti za ladijskim vijakom; 300 s.

Figure 51: Suspended sediment concentration S_{dbot} at the bottom in the Koper Bay; due to velocities behind ship's propeller; 300 s.



Slika 52: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 900 s.

Figure 52: Distribution of bottom shear-stress due to velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 900 s.

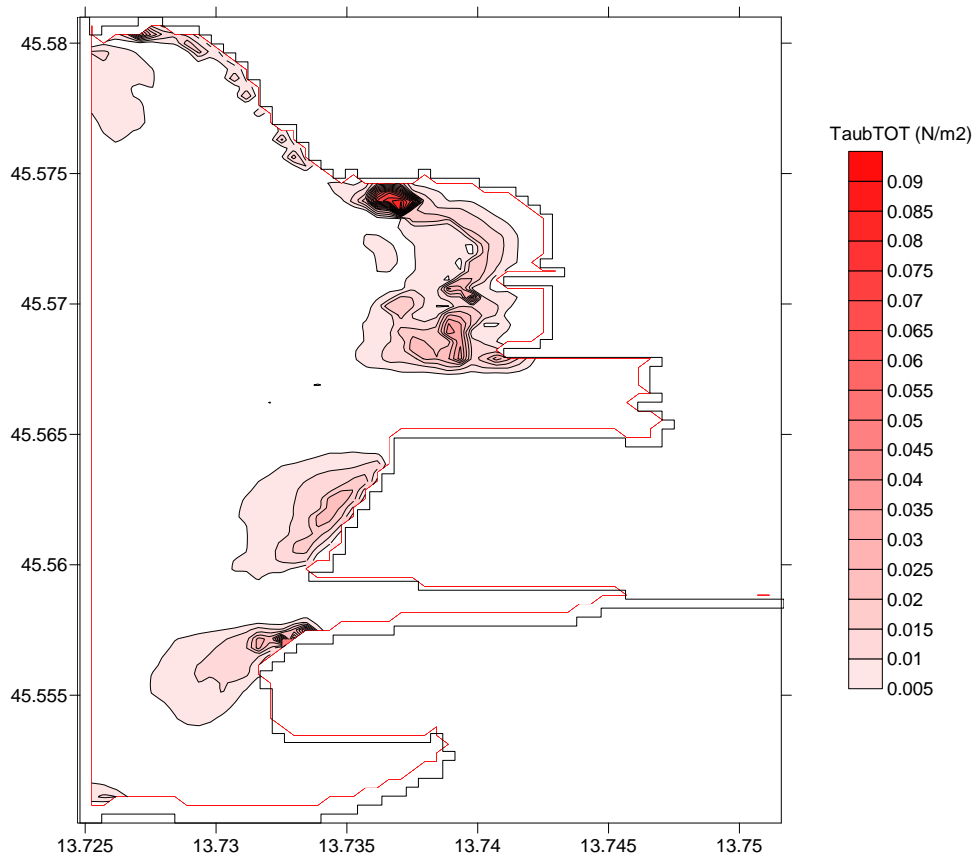


Slika 53: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} ob dnu v Koprskem zalivu; vpliv hitrosti za ladijskim vijakom; 900 s.

Figure 53: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; due to velocities behind ship's propeller; 900 s.

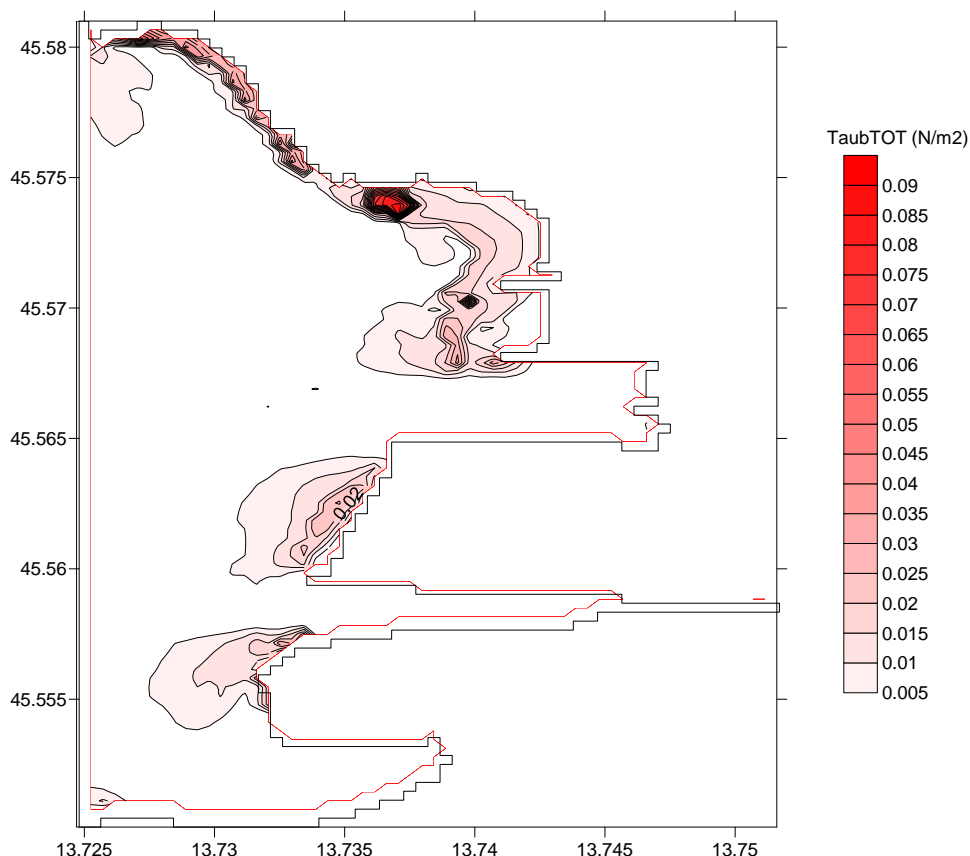
- **Modeliranje skupnega vpliva tokov in valov na resuspendiranje sedimentov**

Pri modeliranju smo uporabili parametre valovanja, dobljene na podlagi Bretschneiderjevih enačb in konstantni vrednosti višine in periode valovanja. Vpliv valovanja močno poveča strižne napetosti ob dnu, sploh v plitvih delih zaliva, kar je bilo opazno že v prejšnjih simulacijah v Koprskem zalivu (Žagar in sod., 2012). Največje strižne napetosti ob dnu so v primeru skupnega delovanja tokov in valov v primeru uporabe Bretschneiderjevih enačb $0,097 \text{ N/m}^2$, približno enake so tudi ob uporabi konstantnih vrednosti valovanja, $0,092 \text{ N/m}^2$, kar je skoraj 2 krat manjše od tistih pri vplivu ladijskega vijaka, kjer znašajo od $0,238 \text{ N/m}^2$ do $0,444 \text{ N/m}^2$. Vidimo, da pri modeliranju skupnega vpliva ni velike razlike med velikostjo in porazdelitvijo strižnih napetosti ob dnu izračunanih na podlagi Bretschneiderjevih enačb oziroma s konstantnimi vrednostmi valovanja (sliki 54 in 55). Modeliranje skupnega vpliva tokov in valov tako kaže, da ne pride do resuspendiranja sedimentov, saj so strižne napetosti ob dnu premajhne.



Slika 54: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov in valov (Bretschneider) τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu.

Figure 54: Distribution of bottom shear-stress due to currents and waves (Bretschneider) τ_{aubTOT} in the Koper Bay.

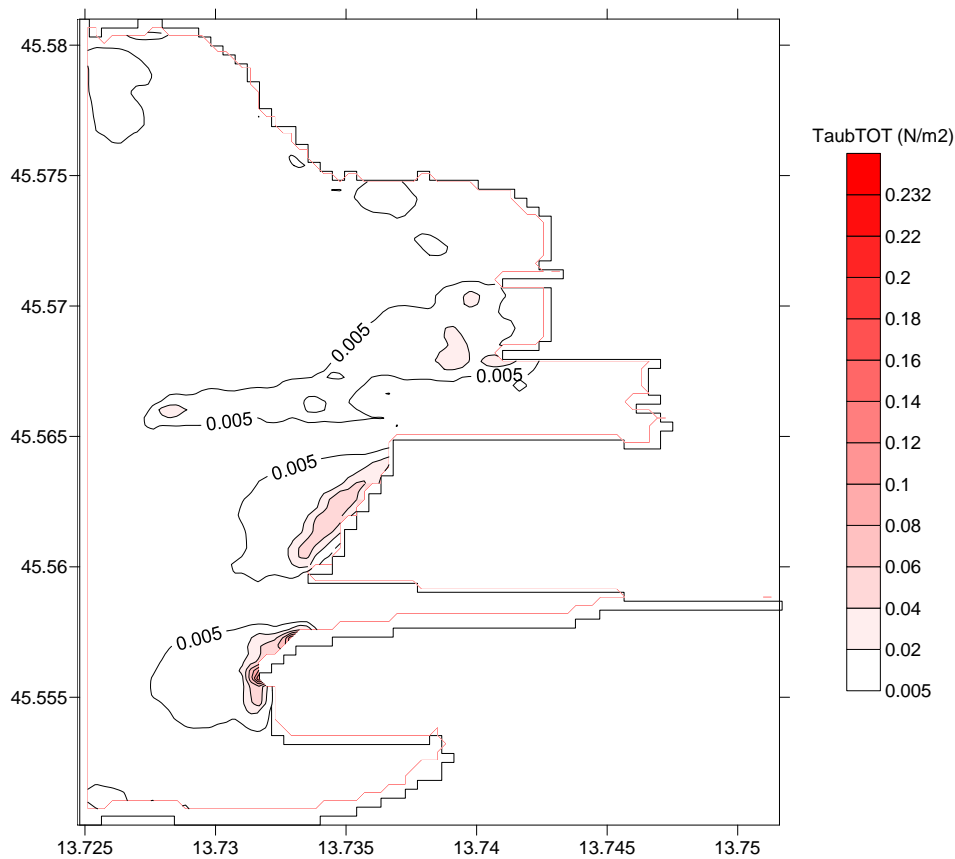


Slika 55: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi tokov in valov (konstantni vrednosti) τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu.

Figure 55: Distribution of bottom shear-stress due to currents and waves (constant values) τ_{aubTOT} in the Koper Bay.

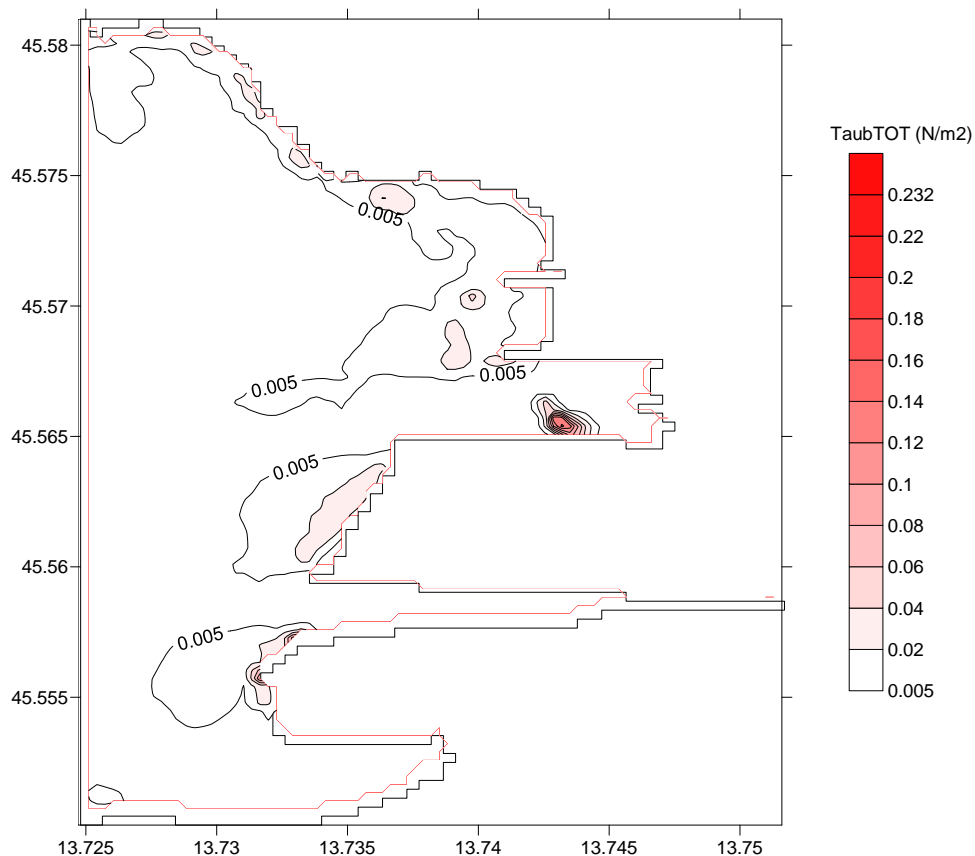
- **Modeliranje vpliva tokov, valovanja in hitrosti za ladijskim vijakom na resuspendiranje sedimentov**

Kot zadnje smo opravili simulacijo z modelom PCFLOW3D ob upoštevanju vpliva vseh treh dejavnikov: tokov, valovanja (Bretschneider in konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom. Vpliv plovbe na resuspendiranje sedimentov je najbolj očiten v zadnjem računskem koraku (900 s), ko skupna strižna napetost, pri obeh načinih računa vpliva valovanja (Bretschneider in konstantni vrednosti) ob dnu ($0,532 \text{ N/m}^2$) preseže kritično strižno napetost (sliki 58 in 57). Na slikah 56 in 57 je prikazana porazdelitev strižnih napetosti ob dnu po 300 s plovbe, kjer v obeh primerih kritična strižna napetost ob dnu ni presežena, saj maksimalna napetost ob dnu v obeh primerih znaša $\tau_{aubTOT} = 0,232 \text{ N/m}^2$. Po 900 s, ko je presežena kritična strižna napetost ob dnu, pride tudi do resuspendiranja sedimentov. Takšno modeliranje skupnega vpliva je novost na področju modeliranja sedimentov in doslej še ni bilo uporabljeno.



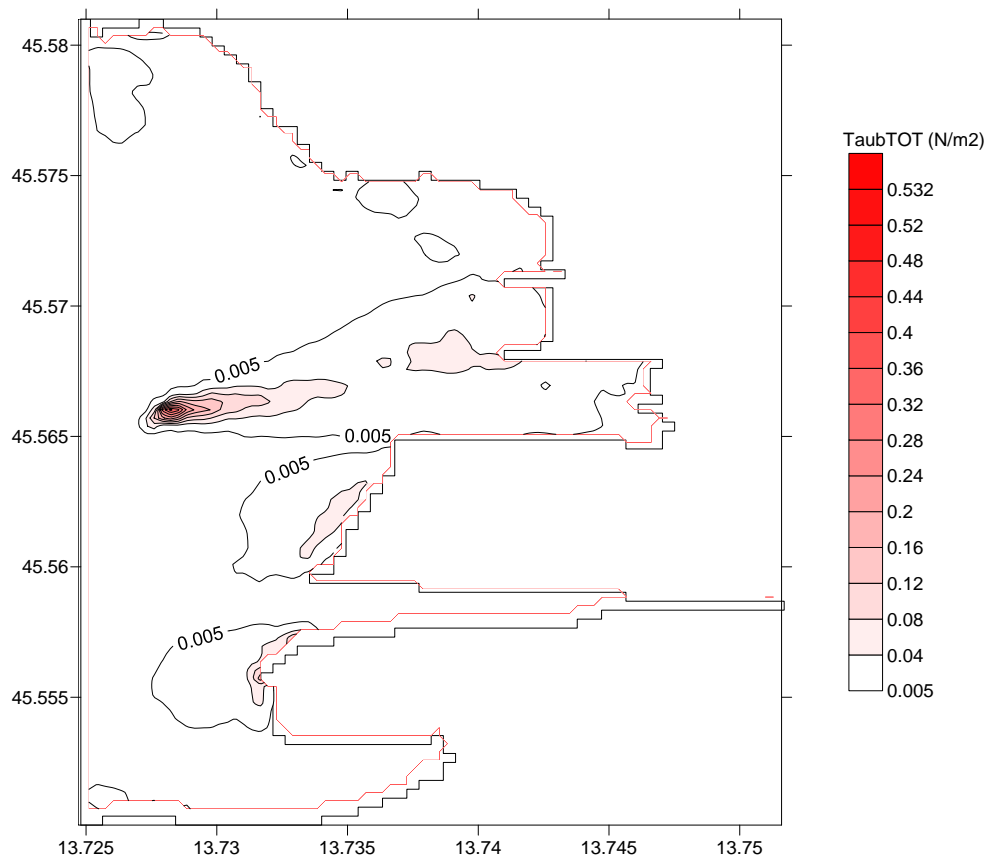
Slika 56: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (Bretschneider) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 300 s.

Figure 56: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (Bretschneider) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 300 s.



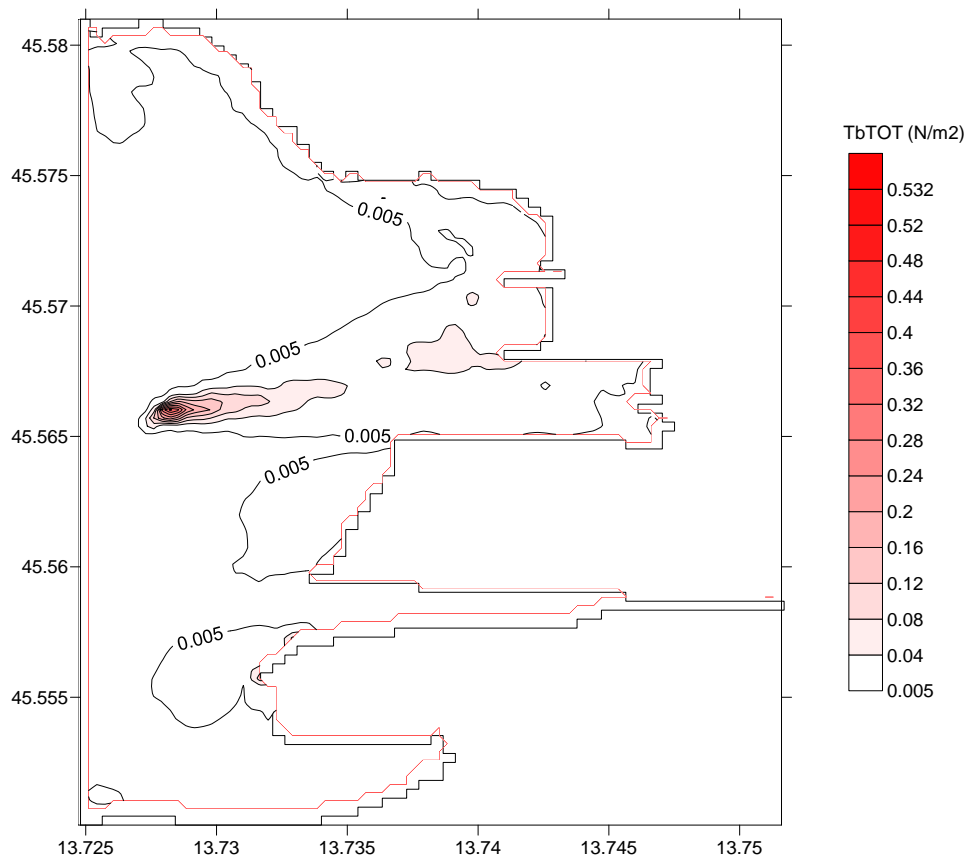
Slika 57: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 300 s.

Figure 57: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (constant values) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 300 s.



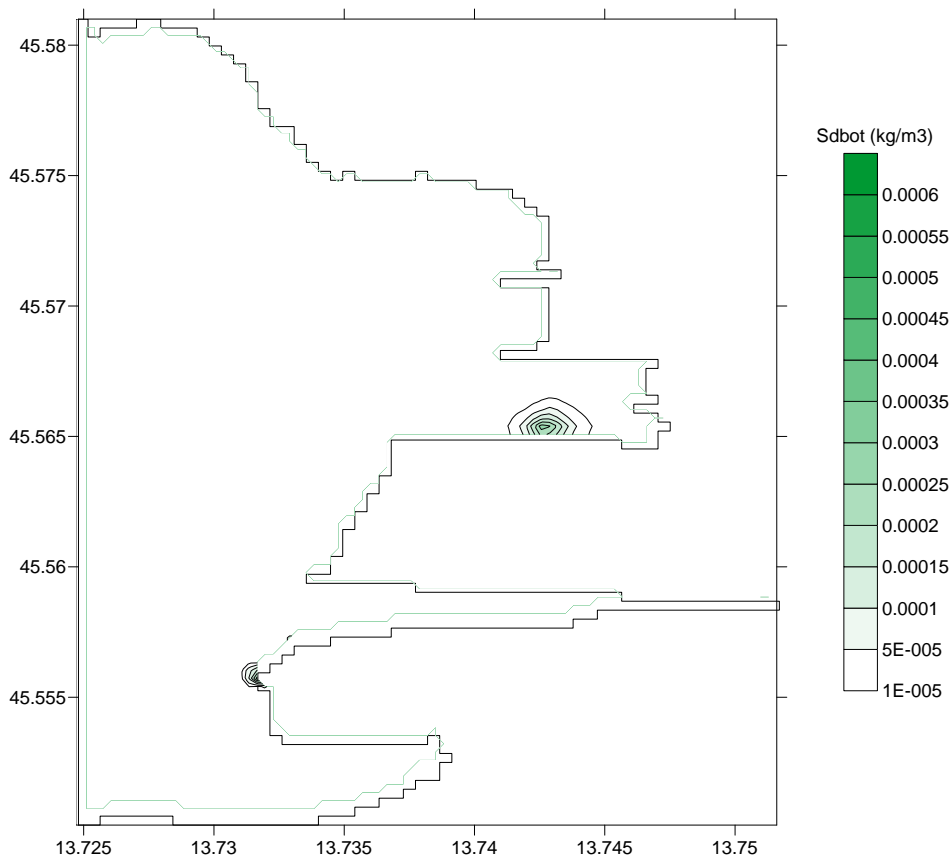
Slika 58: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (Bretschneider) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 900 s.

Figure 58: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (Bretschneider) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 900 s.



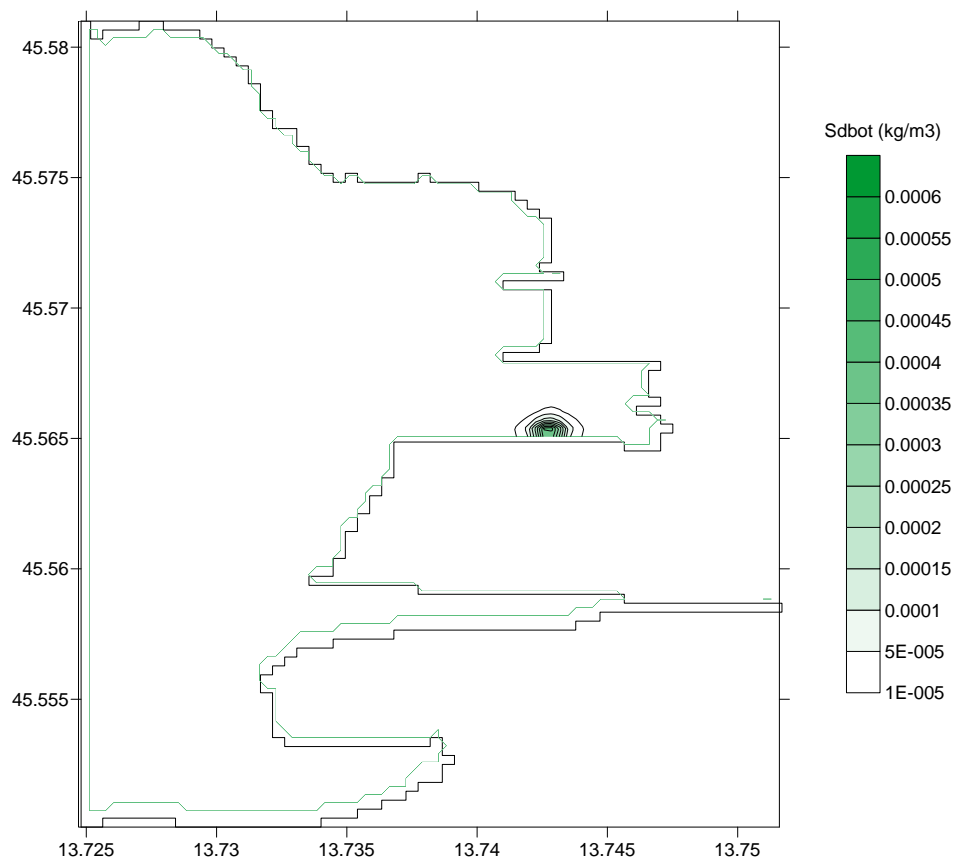
Slika 59: Porazdelitev strižnih napetosti ob dnu zaradi vpliva tokov, valov (konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom τ_{aubTOT} v Koprskem zalivu; 900 s.

Figure 59: Distribution of bottom shear-stress due to currents, waves (constant values) and velocities behind ship's propeller τ_{aubTOT} in the Koper Bay; 900 s.



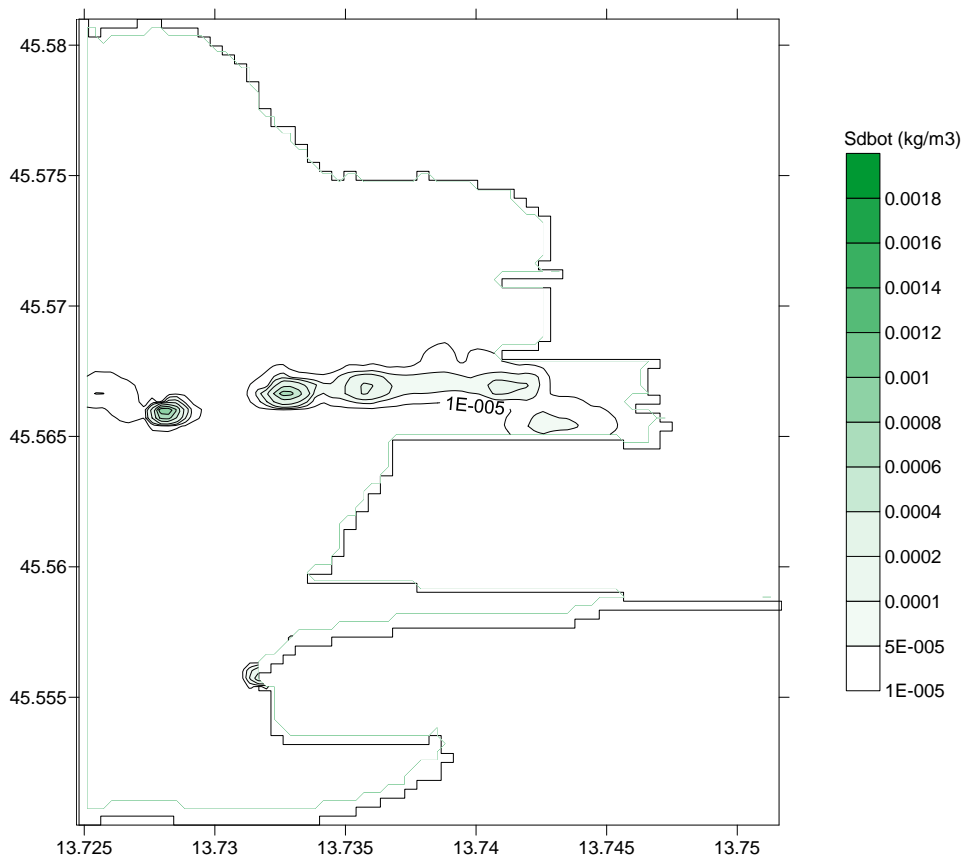
Slika 60: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Koprskem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov, valov (Bretschneider) in hitrosti za ladijskim vijakom; 300 s.

Figure 60: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; shear stress due to currents, waves (Bretschneider) and velocities behind ship's propeller; 300 s.



Slika 61: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Koprskem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov, valov (konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom; 300 s.

Figure 61: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; shear stress due to currents, waves (constant values) and velocities behind ship's propeller; 300 s.



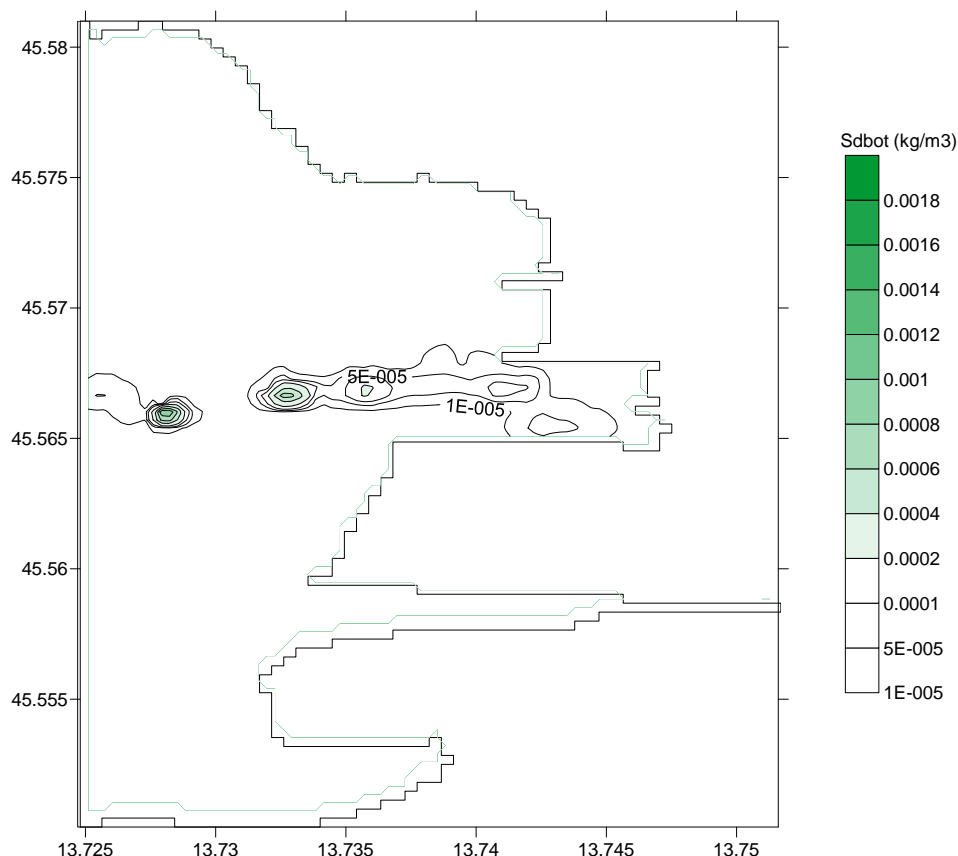
Slika 62: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Koprskem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov, valov (Bretschneider) in hitrosti za ladijskim vijakom; 900 s.

Figure 62: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; shear stress due to currents, waves (Bretschneider) and velocities behind ship's propeller; 900 s.

Preglednica 5 : Maksimalne strižne napetosti pri različnih vplivnih dejavniki, v različnih časovnih korakih.

Table 5: Maximum shear stresses due to different forcing factors, in different time steps.

Vplivni dejavniki	$\tau_{aubTOT} \max$	
	(N/m ²)	
Tokovi	0,028	
Valovi	0,089 (Bret.)	0,083 (konst.)
Vijak	0,238 (300 s)	0,444 (900 s)
Tokovi in valovi	0,097 (Bret.)	0,092 (konst.)
Tokovi, valovi in vijak	0,232 (Bret.; 300 s)	0,232 (konst.; 300 s)
	0,532 (Bret.; 900 s)	0,532 (Bret.; 900 s)



Slika 63: Koncentracija lebdečih plavin Sd_{bot} na dnu v Koprskem zalivu; strižne napetosti zaradi vpliva tokov, valov (konstantni vrednosti) in hitrosti za ladijskim vijakom; 900 s.

Figure 63: Suspended sediment concentration Sd_{bot} at the bottom in the Koper Bay; shear stress due to currents, waves (constant values) and velocities behind ship's propeller; 900 s.

3.1.3 Diskusija

Na podlagi rezultatov simulacij vpliva tokov, valov, kombinacije tokov in valov, vijaka ter kombinacije vseh dejavnikov lahko na slikah porazdelitve strižnih napetosti ob dnu razberemo, da je v danih razmerah najpomembnejši vpliv pridnenih hitrosti zaradi plovbe, saj so strižne hitrosti ob dnu na delu, kjer se nahaja ladja in s tem delujoč ladijski vijak, v obeh obravnavanih primerih za red velikosti večje od vseh drugih vplivov.

Do enakih zaključkov kot pri strižnih napetostih ob dnu lahko pridemo tudi pri koncentraciji lebdečih plavin, saj so te na mestu, kjer se nahaja ladja, največje, kar je seveda posledica velikih strižnih napetosti. To je pomembno za zasipavanje plovnih poti in za okoljsko stanje v zalivu .

Že v predhodnih študijah (Malačič in Petelin, 2009; Žagar in sod., 2012) se je izkazalo, da je lahko v notranjosti plitvih zalivov pomorski promet poglaviten dejavnik resuspenzije sedimentov, ki prispeva

k visokim koncentracijam suspendirane snovi bolj kot tokovi in valovi v nevihtnem vremenu. To so pokazale tudi meritve motnosti vode ob dnu v notranjosti Koprškega zaliva (Malačič in sod., 2010). Tudi izvedene simulacije potrjujejo to hipotezo.

Sediment v obeh zalivih je onesnažen s strupenimi kovinami, v severnem delu Tržaškega zalivu predvsem živim srebrom, ki pa je v nižjih koncentracijah prisotno tudi na drugih območjih. V Koprškem zalivu je sediment onesnažen tudi z nikljem, kadmijem in kromom. Onesnažila z resuspendiranjem prehajajo v vodni stolpec, nekatera (Hg) tudi v prehranjevalno verigo. V severnem delu Tržaškega zaliva, kjer je največje onesnaženje s Hg, simulacij nismo izvedli. Tudi tam so plovne poti (ladjedelnica v Trziču), precej pa je tudi manjših plovil (ribištvo, marikultura, potniški transport), ki pa v razmeroma plitvem delu zaliva nedvomno prispevajo k privzdigovanju sedimenta in onesnažil. Zato je tudi za okoljsko stanje severnega dela zaliva pomembno, da je z izboljšanim modelom mogoče ovrednotiti vpliv plovbe na privzdigovanje sedimenta in na delce vezanih onesnažil.

Še pomembnejše od primerjave med meteorološko pogojenimi strižnimi napetostmi ob dnu in vplivom plovbe pa je, da je mogoče na podlagi izračunanih kumulativnih strižnih napetosti ob dnu v času vplutja oziroma izplutja različni vrst ladij z modelom vpliva curka ladijskega vijaka in izpopolnjenim modelom PCFLOW3D ovrednotiti vpliv različnih tipov plovil med izplutjem ali vplutjem. Na osnovi takšnih izračunov bo mogoče ovrednotiti relativni vpliv različnih plovil na morsko dno in (vsaj) kvalitativno oceniti tudi količino onesnažil, ki se med različnimi ladijskimi manevri sprosti iz sedimenta. Niti simulacije vpliva ladijskega vijaka na strižne napetosti ob dnu niti kumulativno ovrednotenje vpliva posameznih tipov plovil doslej še niso bile izvedene v naravnem okolju in z realnimi podatki o sedimentu, plovilu in parametrih plovbe.

3.2 MERITVE IN UMERJANJE REČNEGA TRANSPORTA PLAVIN

Pojav histereze pri transportu lebdečih plavin je bil že večkrat izpostavljen, vendar pa še ni računskih metod za pravilno določitev koncentracij lebdečih plavin pri nestalnih pogojih toka. Na rekah Idriji in Soči je onesnaženje z živim srebrom še vedno pereč problem, saj so koncentracije v sedimentu na dnu in lebdečih plavinah razmeroma visoke in ne kažejo znatnega znižanja. Na podlagi dosedanjih študij (Ahanger in sod., 2008; Picouet in sod., 2000; Allen in Collinson, 1974; Graf in Suszka, 1985; Song in Graf, 1997; Brownlie, 1981) je bilo ugotovljeno, da se večina živega srebra transportira vezanega na delce lebdečih plavin. Visokovodni dogodki prispevajo kar 80 % k transportu sedimentov in živega srebra. Za pravilen izračun transporta Hg z vplivnega območja idrijskega rudnika bi bilo

potrebno določiti povezavo med pretoki in koncentracijo lebdečih plavin tudi v nestacionarnih razmerah.

Za meritve pretokov in koncentracij lebdečih plavin na reki Idrijci smo izbrali most v kraju Idrija pri Bači (sliki 64 in 65). Na mostu (dolžina 65 m) prek Idrijce smo lahko neovirano izvajali meritve. Ta odsek reke smo izbrali, ker je relativno raven, s stabilnim dnom in ker je v bližini vodomerna postaja Hotešček, s katero lahko umerimo izmerjene pretoke.



Slika 64: Merilno mesto; most v Idriji ob Bači.

Figure 64: Measuring site; bridge in "Idrija pri Bači".



Slika 65: Merilno mesto; most v Idriji ob Bači.

Figure 65: Measuring site; bridge in "Idrija pri Bači".

3.2.1 Merilna oprema

Za meritve pretoka smo uporabili ADMP, akustični Dopplerjev merilnik hitrosti (slika 66), ki deluje na podlagi Dopplerjevega pojava. Merimo hitrost toka v različnih globinah po principu razlike med oddano in sprejeto frekvenco signala. Za potrebe meritev pretoka rek se uporablja frekvenčno območje od 500 do 2000 kHz. Hitrost vode se meri posredno, preko v vodi raztopljenih delcev, globina se izračuna iz časa potovanja signala od merilnika do dna struge in nazaj. Pri meritvah smo uporabili pristop, ki je alternativen standardni metodi s pomočjo premikajočega se čolna (dinamične meritve), pri kateri sistem ADMP-ja potrebuje referenco (dno reke), na katero lahko naveže hitrosti vode. Uporabili smo stacionarno merilno programsko opremo SonTek, ADMP pa deluje s fiksne dvignjene pozicije (statične meritve) in zbira podatke vsakih 40 sekund. S statičnim pristopom meritev izvajamo stacionarno iz izbrane pozicije na merskem profilu tako, da inštrument vsakih pet sekund izmeri vrednosti hitrosti po vertikalnem profilu na vsakih 20 cm globine. V intervalu 40 sekund tako dobimo osem hitrostnih vertikalnih profilov na merski poziciji. V turbulentnem toku dolžino meritve običajno podaljšamo do dve minuti. S tem dobimo boljša povprečja oscilacij pretokov in hkrati boljše rezultate. Po uspešno izvedeni meritvi na eni lokaciji se s čolničkom, kjer je montiran ADMP, nato premaknemo na naslednjo pozicijo, v našem primeru 1 m oddaljeno od prejšnje. Razdalje med merskimi pozicijami morajo biti ustrezno majhne. Velja pravilo, da v enem merskem profilu izmerjen pretok naj ne bi bil večji od 10 % celotno izmerjenega pretoka celotnega prečnega profila. Protokol stacionarne meritve je podoben protokolom meritve s klasičnimi propelerskimi merilci hitrosti in ustreza ISO merskim tehnikam določanja hitrostnih polj za integriranje pretokov po metodi hitrost-površina.

Takšna metoda merjenja ima veliko prednosti (Vidmar in sod., 2011):

- Enostavna za uporabo in razumevanje, metodologija meritve je enaka tradicionalnim tehnikam, negotovost pretokov pa lahko izračunamo s pomočjo metod ISO in USGS (Kiang in sod., 2009).
- Možna je kontrola izmerjenih podatkov že med samo meritvijo. Če pride do motnje ali prekinitve meritve v posamičnem profilu, se le-ta lahko ponovi.
- Meritve so možne tudi v zelo zaraščeni strugi.
- Možna sta profiliranje tokov in izdelava izotah, da z izmerjenimi podatki preverimo 3D hidravlične modele (Rajar in sod., 2011).
- Meritve so možne tudi v turbulentnih tokovih, ker s povprečenjem izničimo pulzacije hitrosti.
- Meritve so možne pri nizkih vodostajih, ko zaradi premajhne hitrosti vode dinamične metode ne moremo uporabiti.
- Meritve nad rangom instrumenta. Pod neko globino vode inštrument ne meri več hitrosti, ker Dopplerjev odboj že zelo opeša. Hitrosti do dejanskega dna lahko dodamo kasneje z znanimi

podatki o geometriji struge. Krivuljo spodnjega dela hitrostnega profila vertikale podaljšamo z uporabo parabolične funkcije z eksponentom 1/6.



Slika 66: ADMP; montiran na trimaranu.

Figure 66: ADCP; mounted on the threemaran.

Koncentracijo lebdečih plavin lahko merimo na več načinov, lahko se meri kontinuirano z avtomatskim prenosnim vakuumskim vzorčevalnikom tekočin Manning, s katerim tako dobimo vzorce, ki jih kasneje analiziramo v laboratoriju. Za monitoring suspendiranega materiala so primerni merilniki motnosti, npr. Solitax sc (slika 67) ali OBS 3+ (slika 68), kjer je merjeni parameter motnost tekočine, ki služi kot posredna meritev pri določanju vsebnosti suspendiranega materiala. Rezultati se ustrezno izvednotijo in nato izračunajo vsebnosti suspendiranega materiala.

Poleg meritev pretoka in koncentracije lebdečih plavin smo za boljše poznavanje dogajanja na merilnem mestu izvajali tudi kontinuirane meritve zračnega tlaka in globine vode. Meritve smo izvajali s pomočjo merilnika HOB0 U20 Water level logger (absolutni tlačni senzor) (slika 69).



Slika 67: Merilnik serije Solitax sc s komunikacijskim vmesnikom SC1000.

Figure 67: Measuring instrument from Solitax sc series, with the communications device SC1000.



Slika 68: Merilnik OBS3+.

Figure 68: Measuring instrument OBS3+.



Slika 69: Merilnik HOBOTRACK U20 Water level.

Figure 69: Measuring instrument HOBOTRACK U20 Water level.

Pri meritvah je prišlo do nepričakovanih težav, saj bi morali opraviti zvezne meritve prek nekajmesečnega obdobja, ob visokovodnih dogodkih pa še dodatne podrobne meritve pretoka in koncentracij lebdjećih plavin. Pri realizaciji teh meritev so se v povezavi z logističnimi težavami zaradi oddaljenosti kraja meritev pojavile še nepričakovane težave z merilnimi inštrumenti, predvsem z zagotavljanjem energije za napajanje (neprimernost sončnih celic zaradi lokacije v grapi, hitro praznjenje akumulatorjev) in z izredno hitro zarastjo stekla na merilniku motnosti (npr. Solitax sc) z algami v vodi. Kljub velikim naporom in pogostim terenskim obiskom merilnega mesta smo v času, namenjenemu meritvam in umerjanju, dobili premalo dovolj kvalitetnih podatkov, ki bi jih bilo mogoče uporabiti za ovrednotenje rezultatov.

Z meritvami bomo nadaljevali, ko bomo uspeli zagotoviti ustrezno opremo. Zavedamo se namreč, da je določitev povezave med koncentracijami lebdjećih plavin in pretokom ključna za poznavanje transporta živega srebra z vplivnega območja idrijskega rudnika po porečjih Idrijce in Soče v Tržaški zaliv in da brez kvalitetnih meritev ni mogoče ovrednotiti tega pojava in izboljšati poznavanja živosrebrovega cikla na tem območju.

3.3 RAČUN IZMENJAVE ŽIVEGA SREBRA MED VODO IN ZRAKOM V SREDOZEMSKEM MORJU, METODA GÅRDFELDT IN SOD. (2003)

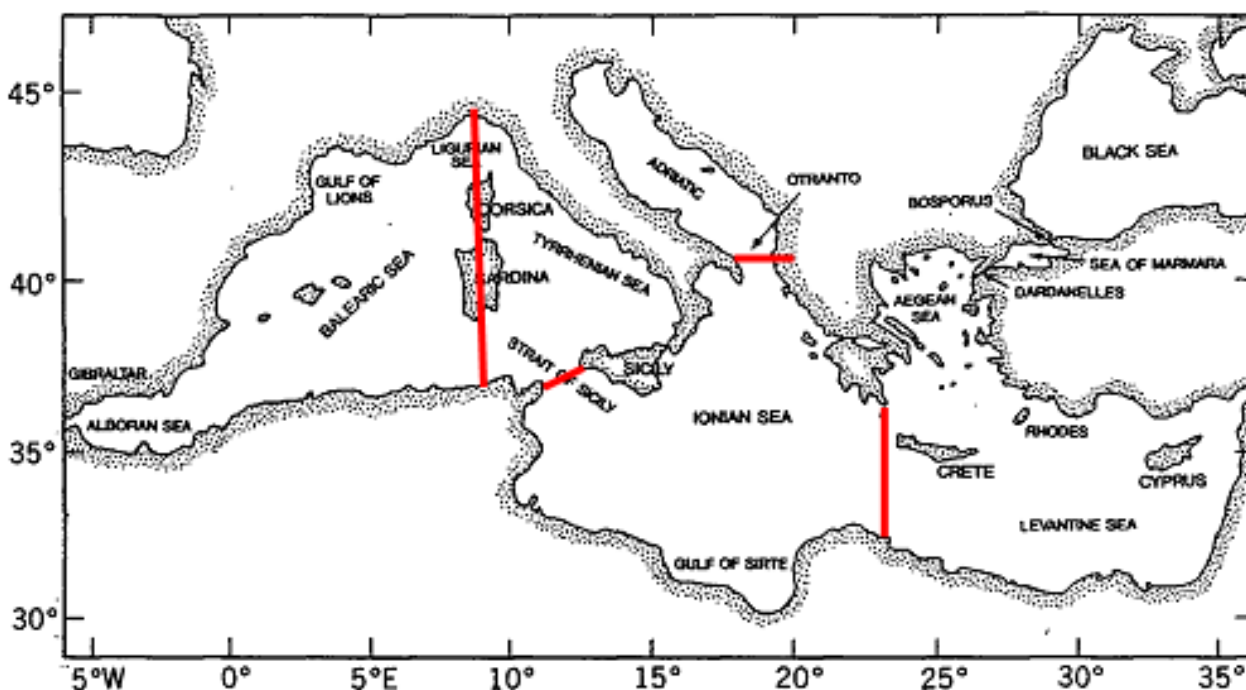
Na območju Sredozemskega morja, je onesnaženje z živim srebrom tako iz naravnih kot antropogenih virov veliko, poleg tega pa lahko živo srebro prepotuje velike razdalje, preden pride do depozicije (Pirrone in sod., 2003). Izmenjava živega srebra med vodo in zrakom ima velik vpliv pri biogeokemičnem kroženju živega srebra (Mason in Sheu, 2002), poleg tega izmenjava predstavlja največje izgube v masni bilanci živega srebra v Sredozemlju (Žagar in sod., 2005), ki je bila na podlagi novih podatkov izboljšana (Rajar in sod., 2007; Žagar in sod., 2013). Vendar pa masna bilanca kljub izboljšavam še vedno ostaja precej odprta, saj naj bi iz Sredozemlja otekala večja količina živega srebra, kot pa doteka vanj. Enak primanjkljaj živega srebra v masni bilanci je bil opažen že v primeru Tržaškega zaliva (Ramšak, 2007; Ramšak in sod., 2013), zato je bil pri simulacijah za zaprtje masne bilance dodan dotok iz sedimenta. Poleg tega pa je pomembna tudi izmenjava živega srebra med vodo in zrakom, ki je obravnavana v nadaljevanju.

Zanesljiv model za račun izmenjave živega srebra med vodo in zrakom je torej pomemben člen pri izboljšanju masne bilance na vseh območjih, torej tudi na proučevanem območju Sredozemskega morja. Metoda Gårdfeldt je bila že uporabljena na primeru Tržaškega zaliva (Ramšak in sod., 2007), kjer smo dobili razmeroma dobre rezultate, zato smo isto metodo uporabili tudi na večjem območju, Sredozemskem morju.

Sredozemlje je zelo heterogeno glede oceanografskih in klimatskih pogojev, imamo tudi dva tipična meteorološka režima (Rajar in sod., 2007; Žagar in sod., 2007; Barnier in Boukthir, 200; Zavatarelli in Mellor, 1995), zato pri simulacijah ne moremo uporabiti niti letno povprečenih meritev, niti letno povprečenega modeliranja. Sredozemlje se tudi geografsko deli na dve območji, Vzhodno in Zahodno Sredozemlje, ki ju povezuje Sicilska ožina. Zahodni del sestavljajo Tirensko, Alboransko in Balearsko morje, vzhodni del pa je hidrografske bolj zapleten in se deli na Jadransko, Jonsko, Egejsko in Levantinsko morje (Vzhodno morje). Zaradi te delitve in raznolikosti klimatskih pogojev je za zagotavljanje dobrih podatkov meritve potrebno izvajati na več različnih lokacijah. Ena izmed značilnosti obravnavanega območja je tudi naravna onesnaženost z živim srebrom, saj se pod Sredozemskim morjem nahaja cinabaritni pas, poleg tega je zaradi spodrivanja Afriške plošče pod Evrazijsko prisotna močna tektonska aktivnost. Sredozemlje je eno izmed najbolj obremenjenih območij z živim srebrom na svetu, saj se tu na 1 % zemeljskega površja nahaja 65 % svetovnih zalog živega srebra. Vsi ti viri so zgoščeni na le nekaj območjih: Almaden (Španija), Idrija (Slovenija), Monte Amiata (Italija), Izmir in Konya (Turčija) ter Ismailia (Tunizija). Obalno področje je precej gosto poseljeno in večina industrijskih regij je locirana prav na obalnem pasu. Antropogeni izpusti zaradi izgorevanja fosilnih goriv, produkcije cementa in klor – alkalne industrije so kljub znižanju še

vedno visoki. Območje Sredozemlja ni samo pod vplivom živega srebra, sproščenega v bližini, ampak je tudi pod vplivom z živim srebrom bogatih zračnih mas, ki prihajajo iz severne in severovzhodne Evrope. To je še posebej pomembno, saj lahko elementarno in partikularno živo srebro potuje daleč od vira, preden pride do depozicije (Pirrone in sod., 2003).

Za potrebe 'ročnega' računa, ki smo ga izvedli po metodi Gardfeldt in sod. (2003) z Wannikhofovimi (1992) modelom izmenjave plinov in programskim orodjem MS excel smo Sredozemsko morje razdelili na pet območij in sicer na Zahodno, Tirensko, Jonsko, Levantinsko in Jadransko morje (slika 70), poleg geografske delitve pa smo naredili še sezonsko delitev. Koledarsko leto smo razdelili na štiri sezone: pomlad, poletje, jesen in zimo.



Slika 70: Delitev Sredozemskega morja na podobmočja.

Figure 70: Division of Mediterranean sea into subareas.

3.3.1 Podatki

- Podatki o hitrosti in trajanju vetra

Veter je najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na gibanje vode in disperzijo onesnažil, pa tudi na izmenjavo živega srebra med vodo in zrakom (Žagar in sod., 2007; Andersson in sod., 2007; Gardfeldt in sod., 2003).

Podatki o vetru so prostorsko in časovno podani v matrikah, ki smo jih pridobili iz atmosferskega modela RAMS-Eta in jih transformirali na ustrezno numerično mrežo za model PCFLOW3D (Žagar in sod., 2007). Za časovno obdobje 14,5 dni v vsaki sezoni smo dobili matrike (v 12 urnih intervalih) jakosti komponent vetra v posamezni celici numerične mreže. Matrike so podane za vsako izmed štirih tipičnih sezon, za časovni okvir, v katerem so se izvajale tudi meritve; pomlad: 26.4 do 10.5.; poletje: 19.7. do 2.8.; jesen: 20.10. do 3.11.; zima: 19.1. do 2.2. Matrike vetra smo za posamezno sezono razdelili na pet območij Sredozemskega morja (slika 70), nato pa veter po jakosti razdelili v razrede in za vsakega izmed teh razredov določili število celic na gladini, v katerih piha veter določene jakosti (preglednice 6 – 9). Jakosti vetra manjše od 4 m/s smo razvrstili v razred od 0 do 4m/s, saj po literaturi (Wannikhof, 1992) privzamemo, da je pri manjših hitrostih vetra izmenjava živega srebra med vodo in zrakom konstantna in majhna, kot je opisano v literaturi (Gardfeldt in sod, 2003; Andersson in sod., 2008; Ramšak, 2007; Ramšak in sod., 2013). Število celic rangiranega vetra je podano za krajše časovno obdobje, zato smo račune s podatki preglednic 6 – 9 ciklično ponavljali, da smo zajeli celotno sezono, kar je dovoljeno, če so izbrani tipični sezonski podatki.

Preglednica 6: Prostorska razporeditev posameznih jakosti vetra (12 urna) za posamezna območja Sredozemlja; pomlad.

Table 6: Spatial distribution of wind strenght (12 hours) for subareas of the Mediterranean; spring.

Število celic (12h)					
Jakost [m/s]	Zahodno morje	Tirensko morje	Jonsko morje	Jadransko morje	Levantinsko morje
0-4	3222	1345	4438	1051	7537
4-5	1773	706	2250	421	2701
5-6	1709	746	2061	322	1923
6-7	1328	600	1654	262	1221
7-8	914	450	1326	216	704
8-9	701	300	982	208	303
9-10	571	210	521	74	123
10-11	387	183	262	46	66
11-12	264	174	153	34	28
12-13	177	79	56	4	11
13-14	146	61	13	0	0
14-15	115	17	0	0	0
15-16	52	0	0	0	0
16-17	8	0	0	0	0
17-18	2	0	0	0	0

Preglednica 7: Prostorska razporeditev posameznih jakosti vetra (12 urna) za posamezna območja Sredozemlja; poletje.

Table 7 : Spatial distribution of wind strenght (12 hours) for subareas of the Mediterranean; summer.

Število celic (12h)					
Jakost [m/s]	Zahodno morje	Tirensko morje	Jonsko morje	Jadransko morje	Levantinsko morje
0-4	8064	3175	8397	1722	6063
4-5	1515	669	3108	330	3517
5-6	940	507	1367	269	2597
6-7	423	281	679	166	1527
7-8	210	154	119	92	629
8-9	133	59	34	36	199
9-10	64	26	11	15	65
10-11	19	0	1	7	17
11-12	0	0	0	0	2

Preglednica 8: Prostorska razporeditev posameznih jakosti vetra (12 urna) za posamezna območja Sredozemlja; jesen.

Table 8: Spatial distribution of wind strenght (12 hours) for subareas of the Mediterranean; autumn.

Število celic (12h)					
Jakost [m/s]	Zahodno morje	Tirensko morje	Jonsko morje	Jadransko morje	Levantinsko morje
0-4	3382	1436	6825	905	8389
4-5	1293	705	1905	355	2219
5-6	1178	614	1652	384	1412
6-7	1090	604	1242	314	975
7-8	1031	498	1012	249	656
8-9	1062	409	621	187	424
9-10	794	259	266	116	293
10-11	652	201	128	62	176
11-12	459	97	61	32	66
12-13	163	27	4	21	5
13-14	74	16	0	9	1
14-15	65	5	0	4	0
15-16	42	0	0	0	0
16-17	47	0	0	0	0

Se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 8

17-18	33	0	0	0	0
18-19	3	0	0	0	0

Preglednica 9: Prostorska razporeditev posameznih jakosti vetra (12 urna) za posamezna območja Sredozemlja; zima.

Table 9: Spatial distribution of wind strenght (12 hours) for subareas of the Mediterranean; winter.

Jakost [m/s]	Število celic (12h)				
	Zahodno morje	Tirensko morje	Jonsko morje	Jadransko morje	Levantinsko morje
0-4	4027	1853	3335	1117	3552
4-5	1347	619	1671	383	1787
5-6	1467	460	1701	319	1600
6-7	1111	404	1535	288	1613
7-8	853	348	1436	230	1444
8-9	686	316	1259	165	1123
9-10	571	268	936	92	960
10-11	453	222	616	38	758
11-12	311	167	443	6	564
12-13	234	112	397	0	377
13-14	153	54	167	0	254
14-15	51	38	93	0	237
15-16	53	10	51	0	119
16-17	33	0	50	0	131
17-18	13	0	26	0	84
18-19	2	0	0	0	10
19-20	3	0	0	0	3

Opisana tehnika upoštevanja prostorsko spremenljivega vetra, ki je bila sedaj predstavljena in uporabljena prvič, predstavlja napredek v primerjavi z računi po metodi Gårdfeldt in sod. (2003), ki so bili opravljeni v Tržaškem zalivu s krajevno povprečnim vetrom (Ramšak, 2007; Ramšak in sod., 2013).

- **Podatki o temperaturi vode in Schmidtovem številu za živo srebro**

Pri izmenjavi živega srebra med vodo in zrakom pomembno vlogo igra tudi temperatura vode (T_w), saj sta od nje odvisna tako Schmidtovo število živega srebra (Sc_{Hg}) kot tudi Henryjeva konstanta (H').

Podatke o temperaturi vode (kot tudi o slanosti in batimetriji) smo pridobili iz baze podatkov Mediterranean Oceanic Database (MODB, <http://modb.oce.ulg.ac.be/>). Podatki o temperaturi vode so povprečeni za površinski sloj v obravnavanih območjih (slika 70).

Schmidtovo število je razmerje med kinematično viskoznostjo vode in difuzijo elementarnega živega srebra, ki ga izračunamo s pomočjo metode Wilke-Chang, ki je opisana v Reid in sod. (1987) in temperature vode (Gårdfeldt, osebni vir).

Henryjeva konstanta je brezdimenzijski parameter, ki predstavlja porazdelitveni koeficient za elementarno živo srebro med vodo in zrakom. Izračunamo jo po enačbi 2.70 v odvisnosti od temperature vode, ki se sezonsko in krajevno spreminja in od drugih konstant in parametrov (molarna teža vode, plinska konstanta, gostota), ki se ne spreminjajo glede na sezono.

Podatki so podani v preglednicah od 11 do 14, razdeljeni glede na sezono in območje Sredozemlja.

- **Podatki o koncentracijah DGM**

Podatke o koncentracijah DGM smo pridobili iz več različnih virov (Andersson in sod., 2007; Fantozzi in sod., 2007; Ferrara in sod., 2003; Gardfeldt in sod., 2003; Horvat in sod., 2003; Kotnik in sod., 2007; Lanzillotta in sod., 2002; Lanzillotta in Ferrara, 2001; Monperrus in sod., 2007). Podatkov iz drugih, starejših virov zaradi nezanesljivosti nismo uporabili; glavni razlog je pomembno izboljšanje analitičnih merskih metod v zadnjem desetletju in posledično znatno nižjih rezultatov meritev kot v devetdesetih letih (npr. primerjava meritev Cossa in sod., 1995 in Kotnik in sod., 2007). Podatke o koncentracijah DGM smo glede na lokacijo in čas izvajanja meritve povprečili po sezonah in območjih (preglednica 10).

- **Podatki o koncentracijah TGM**

Podatke o koncentracijah TGM (kot tudi o vrednosti depozicije, ki pri metodi Gårdfeldt ni upoštevana) smo povzeli iz rezultatov modela RAMS-Hg, s katerim so bili v okviru projekta MERCYMS simulirani atmosferski procesi transporta in pretvorb Hg na območju Sredozemlja (IASA; Kallos in sod., 2001; Voudouri in sod., 2001, 2004). Uporabili smo vrednosti za za obdobja, v katerih imamo tudi podatke o vetru (preglednice 11-14).

Preglednica 10: Povprečne vrednosti *DGM*, glede na sezono in območje; z avtorji (N=število meritev).

Table 10: Average values of *DGM*, according to season and region; with authors (N=number of measurements).

	pomlad		poletje		jesen		zima	
	<i>DGM</i> (pg/l)	N	<i>DGM</i> (pg/l)	N	<i>DGM</i> (pg/l)	N	<i>DGM</i> (pg/l)	N
Zahodno m.	21,2±2,8 ^{a,j}	3	26,2±22,4 ^{a,c,d,e,f,h,i,j}	77	40,0 ^a	1	20,0 ^a	1
Tirensko m.	30,3±24,0 ^{e,j,k}	26	21,9±22,1 ^{c,d,e,f,h,i}	74	48,0±29,6 ^{b,c,d,e}	43	27,8±22,2 ^d	11
Jonsko m.	40,0 ^g	0	65,7±35,5 ^b	17	60,3±51,7 ^{a,c,f}	28	40,0 ^g	0
Jadransko m.	23,00±6,03 ^{c,j}	6	45,1±19,0 ^{b,c,e,f,h,i,j}	41	28,0±11,2 ^{a,c}	8	25,0 ^g	0
Levantinsko m.	25,0 ^g	0	32,3±17,1 ^{c,e,f,h}	19	30,0 ^g	0	25,0 ^g	0

^a Monperrus et al., 2007

^b Kotnik, osebni vir

^c Andersson et al., 2007

^d Lanzillotta et al., 2002

^e Fantozzi et al., 2007

^f Horvat et al., 2003

^g calculated based on other seasons

^h Gardfeldt et al., 2003

ⁱ Ferrara et al., 2003

^j Kotnik et al., 2007

Preglednica 11: Povprečne vrednosti T_w , Sc_{Hg} , H' in *DGM* za posamezna območja Sredozemlja; pomlad.

Table 11: Average values of T_w , Sc_{Hg} , H' and *DGM* for subareas of the Mediterranean; spring.

	T_w (°C)	Sc_{Hg}	H'	<i>TGM</i> (ng/m ³)	<i>DGM</i> (pg/l)
Zahodno m.	17,4	453,8	0,2615	2,22	21
Tirensko m.	17,5	451,5	0,2627	2,31	30
Jonsko m.	18,3	433,7	0,2678	2,40	23
Jadransko m.	16,6	473,0	0,2563	0,15	40
Levantinsko m.	19,3	412,7	0,2751	2,36	25

Preglednica 12: Povprečne vrednosti T_w, Sc_{Hg}, H' in DGM za posamezna območja Sredozemlja; poletje.

Table 12: Average values of T_w, Sc_{Hg}, H' and DGM for subareas of the Mediterranean; summer.

	T_w (°C)	Sc_{Hg}	H'	TGM (ng/m ³)	DGM (pg/l)
Zahodno m.	23,1	342,4	0,3027	2,45	26
Tirensko m.	23,7	332,8	0,3074	2,30	22
Jonsko m.	25,1	311,6	0,3180	2,29	45
Jadransko m.	22,8	347,4	0,3002	2,06	66
Levantinsko m.	24,9	316,0	0,3163	2,48	32

Preglednica 13: Povprečne vrednosti T_w, Sc_{Hg}, H' in DGM za posamezna območja Sredozemlja; jesen.

Table 13: Average values of T_w, Sc_{Hg}, H' and DGM for subareas of the Mediterranean; autumn.

	T_w (°C)	Sc_{Hg}	H'	TGM (ng/m ³)	DGM (pg/l)
Zahodno m.	18,6	427,4	0,2699	2,11	40
Tirensko m.	18,9	421,1	0,2721	2,25	48
Jonsko m.	20,9	380,9	0,2865	2,19	28
Jadransko m.	16,6	473,0	0,2566	2,23	60
Levantinsko m.	21,4	371,8	0,2902	2,19	30

Preglednica 14: Povprečne vrednosti T_w, Sc_{Hg}, H' in DGM za posamezna območja Sredozemlja; zima.

Table 14: Average values of T_w, Sc_{Hg}, H' and DGM for subareas of the Mediterranean; winter.

	T_w (°C)	Sc_{Hg}	H'	TGM (ng/m ³)	DGM (pg/l)
Zahodno m.	14,1	539,2	0,2400	2,11	20
Tirensko m.	14,1	539,2	0,2400	2,09	20
Jonsko m.	15,7	495,8	0,2502	2,08	25
Jadransko m.	12,4	589,6	0,2291	1,98	40
Levantinsko m.	16,2	483,0	0,2539	2,07	25

3.3.2 Račun in rezultati

Sredozemsko morje smo razdelili na 5 območij (Zahodno, Tirensko, Jadransko in Jonsko morje, slika 70), koledarsko leto pa na 4 sezone, pomlad (april, maj, junij), poletje (julij, avgust, september), jesen (oktober, november, december) in zimo (januar, februar, marec). Za vsako posamezno sezono smo na podlagi rangiranega vetra (preglednice 6- 9) za vsak razred jakosti vetra izračunali hitrost izmenjave plinov (po enačbi 2.69). Na podlagi enačbe 2.69, smo nato za vsak razred najprej izračunali izmenjavo živega srebra, nato izmenjavo za celotno obdobje meritev (14,5 dni), na koncu za celotno sezono, ki traja 91 dni. Vrednosti smo sešteli in dobili sezonsko izmenjavo živega srebra med vodo in zrakom za posamezno območje. Sezonske rezultate smo sešteli in dobili letno vrednost izmenjave za posamezna območja, po seštevku le teh, pa še letno izmenjavo živega srebra med vodo in zrakom za celotno Sredozemsko morje. Tak način računa s krajevno spremenljivim vetrom doslej še ni bil uporabljen.

Izračunana skupna letna količina izmenjave živega srebra med vodo in zrakom za celotno Sredozemlje znaša 93,5 t. Iz vrednosti za posamezna območja, ki so podane v preglednici 15 vidimo, da ima največji doprinos k celoletni vrednosti Jonsko morje, 26,02 t, kar se tiče sezon pa se največ izmenjave med vodo in zrakom izvrši jeseni, 30,30 t. Že na podlagi podatkov, podanih v preglednicah prejšnjega poglavja lahko vidimo, da so jeseni v vodi najvišje koncentracije *DGM*, ki znatno vplivajo na količino izmenjave živega srebra med vodo in zrakom. Jonsko morje sicer ni največje območje, vendar se tam zaradi visokih vrednosti parametrov v računih pojavi največja izmenjava živega srebra med vodo in zrakom.

Preglednica 15: Izračunana izmenjava živega srebra med vodo in zrakom v Sredozemlju.

Table 15: Calculated evasion of Mercury in the Mediterranean.

območje	Hg evasion (t)				letna izmenjava Hg/območje
	sezona				
	Jesen	Zima	Pomlad	Poletje	
Zahodno m.	12,51	3,47	4,20	3,04	23,22
Tirensko m.	5,50	1,49	3,03	1,15	11,16
Jadransko m.	3,28	1,53	1,80	2,53	9,14
Jonsko m.	5,71	7,53	4,69	8,09	26,02
Levantinsko m.	3,31	9,07	4,12	7,02	23,51
letna izmenjava Hg/sezono	30,30	23,08	17,84	21,82	
letna izmenjava Hg za celotno Sredozemlje					93,05

Pomembno je, da se zavedamo, da te izračunane vrednosti (preglednica 10) temeljijo na meritvah, ki so nam bile dostopne. Meritev je razmeroma malo in verodostojnost rezultatov bi bila z več meritvami večja. Ko bodo na voljo novi podatki, je mogoče račun ponoviti, saj je model za račun že postavljen.

Izračunana letna izmenjava živega srebra v Sredozemskem morju 93,5 t presega vrednosti, ki jih predlagajo Andersson in sod. (2007), 77,11 t in vrednost modelnih simulacij (Žagar in sod., 2007), 50 t. Razlike teh količin so razmeroma velike, saj znašajo približno 50 t oziroma približno 50 % skupne količine.

V masno bilanco živega srebra v Sredozemskem morju, ki jo je podal Rajar in sod. (2007), smo dodali količino letne izmenjave živega srebra med vodo in zrakom, izračunano po opisani metodi. V preglednici 16 so podani podatki iz literature (Rajar in sod., 2007), dopolnjeni z rezultati izvedenega računa, primerjavo pa smo izvršili tudi s sveže objavljenimi podatki (Žagar in sod., 2013). Po naših izračunih je letni odtok živega srebra iz Sredozemskega morja (izmenjava med vodo in zrakom, ožini Gibraltar in Dardanele, iznos z ribami in akumulacija v sediment) večji od vtoka (ožini, vtoki rek, točkovni viri, depozicija in viri zaradi tektonske aktivnosti) za približno 50 t. Masna bilanca je slabše »zaprta« kot v vseh drugih izvedenih izračunih, razlika med vtoki in iztoki znaša od 8,2 tone (Rajar in sod., 2007) do 4,8 ton (Žagar in sod., 2013).

Preglednica 16: Letni vtoki in iztoki živega srebra v Sredozemlju.

Table 16: Annual inflows and outflows of Mercury in the Mediterranean.

Vir	Vtok (+) Iztok (-)			
	naš račun (metoda Gårdfeldt)	Žagar in sod., 2007	Andersson in sod., 2007	Žagar in sod., 2013
Depozicija	+ 23,14	+ 23,14	+ 23,14	+ 38
Izmenjava med vodo in zrakom	- 93,05	- 50	- 77,11	- 68
Reke	+ 13,05	+ 13,05	+ 13,05	+ 13
Ribarjenje	- 0,24	- 0,24	- 0,24	- 0,3
Točkovni viri	+ 2,51	+ 2,51	+ 2,51	+ 2,5
Privzdigovanje sedimenta	- 11,04	- 11,04	- 11,04	- 25
Akumulacija v sediment	-	-	-	+ 19
Tektonsko pogojeni viri	+ 16,06	+ 16,06	+ 16,06	+ 15
Dardanele	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,2
Gibraltar (vtok)	+ 9,04	+ 9,04	+ 9,04	+ 7,3
Gibraltar (iztok)	- 10,74	- 10,74	- 10,74	- 6,5
Razlika (iztok - vtok)	51,21	8,16	35,27	4,8

Na podlagi vseh objavljenih masnih bilanc Hg v Sredozemskem morju vidimo, da je izmenjava z atmosfero največji izvor in največji ponor živega srebra. Prav izmenjava Hg med vodo in zrakom oz. tokovi med okoljskima segmentoma so najbolj verjeten vzrok za »primanjkljaj« živega srebra v Sredozemlju. Če držijo vrednosti, objavljene v Andersson in sod. (2007) ali Rajar in sod. (2007), so v Sredozemlju razmeroma veliki dodatni izvori Hg, ki jih ne poznamo. Ti bi morali biti seveda še znatno večji, če je količina izmenjave v skladu z našimi izračuni.

Glede na primerjavo izmenjave Hg med vodo in zrakom v Tržaškem zalivu, izvedeno po metodi Gårdfeldt in sod. (2003) in modelnimi simulacijami ter opisani v Ramšak (2007) in Ramšak in sod. (2013), je skoraj dvakrat višja količina pri ročnem računu pričakovana. Tudi v obeh predhodnih študijah v Tržaškem zalivu, kjer je bil uporabljen račun v MS excelu po metodi Gårdfeldt in sod. (2003), je odstopanje podobno (ročni račun 134 kg, model PCFLOW3D 78 kg). Z uporabljenimi metodami pa ni bilo mogoče zajeti dveh procesov, ki zelo verjetno bistveno prispevata k drugačnim vrednostim izmenjave med vodo in zrakom:

1. Osiromašenje DGM v zgornjih slojih morja je proces, ki je dobro viden pri modelnih simulacijah (Žagar in sod., 2007). Procesu z meritvami ni bilo mogoče potrditi, saj iz doslej izvedenih meritev ni mogoče izračunati gradienta koncentracij v zgornjih nekaj metrih morja. Za potrditev pojave predlagamo vsaj tri sočasne meritve DGM v površinskem sloju morja (1, 5 in 10 m globoko). Če bodo meritve potrdile večji gradient koncentracij v zgornjih plasteh morja, potem je v nadaljnjih računih po metodi Gårdfeldt in sod. (2003) potrebno upoštevati nižje koncentracije DGM na površini, s čimer se bo količina izhajanja Hg iz vode v zrak bistveno znižala.
2. Procesi v mejni plasti med vodo in zrakom, kjer se zaradi brominske atmosfere kemije vrši pretvorba elementarnega Hg^0 v reaktivno Hg^{2+} , slednje pa se v zelo kratkem času usede nazaj na morsk gladino. Številni avtorji (Holmes in sod., 2010; Holmes in sod., 2009; Holmes in sod., 2006; Soerensen in sod., 2010) in nekateri modeli (Žagar in sod., 2013) že delno upoštevajo omenjene procese, zato je zelo verjetno, da je dodatni izvor Hg kar neposredna in takojšnja depozicija reaktivnega Hg^{2+} iz mejne plasti. V tem primeru je potrebno od izračunane količine izmenjave (izhajanja Hg^0) depozicijo iz mejne plasti odšteti. Poskus takšnega ovrednotenja masne bilance je opisan v Žagar in sod. (2013), kjer so količine usedanja znatno višje od vseh doslej objavljenih vrednosti.

Dodaten razlog za nižje vrednosti izhajanja Hg iz Sredozemlja (Žagar in sod., 2007) so lahko sezonsko povprečeni parametri v modelu PCFLOW3D in uporabljeni model turbulence (Mellor in Yamada, 1982), ki podceni turbulentno difuzijo in mešanje na morski površini. Tudi to je lahko eden od vzrokov za osiromašenje zgornjih slojev morja z DGM, kar posledično privede do prenizke izmenjave živega srebra med vodo in zrakom.

Dodatno možnost povečane depozicije predstavljajo nove informacije o depoziciji. Heimbürger in sod., (2011) predlagajo, da na območju Sredozemlja prevladuje suha depozicija, ki je atmosferski modeli (npr. Rams-Hg) večinoma ne upoštevajo.

4 ZAKLJUČKI IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

4.1 ZAKLJUČKI

V disertaciji prikazujemo modeliranje prehajanja onesnažil med okoljskimi segmenti. Problematika je izredno široka, zato smo se pri onesnažilih osredotočili na živo srebro, ki kljub prenehanju delovanja rudnika živega srebra v Idriji še vedno predstavlja okoljski problem tako na območju reke Idrijce in Soče kot tudi v Tržaškem zalivu. Zaradi značaja globalnega onesnažila in transporta na velike razdalje ter tudi naravnih in antropogenih virov predstavlja živo srebro problem tudi v Sredozemskem morju. Problematiki Hg v okolju so posvečene številne študije, ki predstavljajo izhodišče raziskovalnega dela, opisanega v disertaciji. Podrobneje smo obravnavali prehajanje Hg med vodo in ozračjem v morskem okolju (Sredozemsko morje) ter resuspendiranje sedimentov v morskem okolju (Tržaški in Koprski zaliv) in v celinskih vodah (reka Idrijca). Resuspendiranje sedimentov je pomembno tudi kot vir drugih na delce plavin vezanih onesnažil, hkrati pa je privzdigovanje sedimenta ob plovbi problem zaradi zasipavanja plovnih poti, predvsem na plitvih območjih v bližini luk in pristanišč.

V disertaciji predlagamo tri pomembne novosti, ki doslej še niso bile uporabljene. Izdelali smo model, ki na osnovi podatkov o plovbi in računskem območju izračuna dejanske pridnene hitrosti in jih uporabi za račun strižnih napetosti ob dnu. Povezali smo sedimentacijski modul modela PCFLOW3D z modelom valovanja tretje generacije SWAN in pokazali, da je uporaba modelov valovanja nujna za doseganje kvalitetnih rezultatov sedimentacijskega modela. Izvedli smo simulacije izmenjave Hg med vodo in zrakom po novi metodi in pokazali na nekatere pomanjkljivosti dosedanjega modeliranja in izračunov.

Da bi čim boljše razumeli in modelirali obnašanje onesnaženih sedimentov v plitvih zalivih, kot sta Tržaški in Koprski zaliv, smo nadgradili model PCFLOW3D z vmesniki za povezovanje z modelom valovanja SWAN. Izdelali smo tudi povsem nov model, ki iz podatkov o plovbi in ladji izračuna pridnene hitrosti zaradi curka ladijskega vijaka. S tako izpopolnjenimi modelnimi orodji smo z modelom PCFLOW3D izvedli številne simulacije, v njih pa smo kombinirali vplive različnih dejavnikov na privzdigovanje sedimenta.

Izvedli smo hidrodinamične simulacije ob značilnem vetru in dobili sliko cirkulacije v obeh obravnavanih zalivih. Upoštevali smo vpliv valovanja, dobljen s simulacijami z modelom valovanja SWAN in na osnovi preprostih Bretschneiderjevih enačb, ki so bile že vgrajene v model PCFLOW3D. Izkazalo se je, da poenostavljene enačbe znatno precenijo parametre valovanja, zato za nadaljnje

simulacije vpliva valovanja priporočamo uporabo (rezultatov) modela SWAN. Takšno povezovanje hidrodinamičnega in sedimentacijskega modela z modelom valovanja je bilo v okviru naših raziskav izvedeno prvič.

Nov model za izračun gibalne količine (pridnenih hitrosti) zaradi vpliva ladijskega vijaka je prvo tovrstno orodje, ki omogoča izračun vpliva plovbe na dno v realnih definicijskih območjih (naravnem okolju z realno topografijo in neravnim dnem ter realnimi podatki o sedimentu) in z upoštevanjem vseh parametrov plovbe in ladje. Izvedli smo 5 različnih tipov simulacij, glede na dejavnike, ki povzročajo privzdigovanje sedimenta: tokovi, valovanje, tokovi in valovanje skupaj, vpliv ladijskega vijaka ter skupni vpliv tokov, valovanja in ladijskega vijaka. Takšne simulacije so bile izvedene prvič, z njimi pa smo potrdili hipotezo, da ima od naštetih dejavnikov največji vpliv na resuspendiranje sedimentov plovba, saj so strižne napetosti zaradi plovbe na plitvih območjih vsaj za velikostni razred večje od skupnega vpliva tokov in valov v tipičnih meteoroloških razmerah. Za simulacije transporta sedimenta bi potrebovali polni 3D hidrodinamični model, z razpoložljivimi orodji pa je mogoče simulirati strižne napetosti ob dnu in privzdigovanje sedimenta.

Pomembna pridobitev novega modela za račun vpliva curka ladijskega vijaka je, da je mogoče z njim ovrednotiti vpliv različnih tipov plovil med izplutjem ali vplutjem na podlagi izračunanih kumulativnih strižnih napetosti ob dnu v celotnem času manevriranja plovila na plitvem priobalnem območju. Tako bo mogoče ovrednotiti relativni vpliv različnih plovil na morsko dno in na osnovi koncentracij onesnažil, vezanih na delce plavin, oceniti tudi količino onesnažil, ki se med različnimi ladijskimi manevri sprostijo iz sedimenta.

V model PCFLOW3D smo želeli vključiti tudi vpliv vegetacije ob dnu na resuspendiranje sedimentov, vendar nam to zaradi težav pri modeliranju žal ni uspelo.

Proučevanje pojava histereze oz. povezave med (nestalnimi) pretoki in koncentracijo lebdečih plavin na reki Idrijci se je zaključilo brez pričakovanih rezultatov zaradi velikih logističnih težav in pomanjkanja časa za kvalitetne meritve. Zavedamo se, da je za račun transporta Hg iz vplivnega območja idrijskega rudnika ključen podatek prav povezava med pretoki in količino Hg, zato bomo z meritvami nadaljevali, ko bomo zagotovili ustrezno opremo in odpravili logistične težave.

V Sredozemskem morju smo na osnovi Wannikhofovega modela izmenjave plinov (GEM) in dostopnih meritev s pomočjo modela Gardfeldt in sod (2003) v orodju MS Excel izvedli račun izmenjave živega srebra med vodo in zrakom. Simulacije smo izvedli z rangiranim vetrom po posameznih celicah računskega območja, kar doslej še ni bilo izvedeno.

V letni masni bilanci Hg za Sredozemlje je prav izmenjava z zrakom največji člen, zato si številni avtorji prizadevajo za čim bolj natančno določitev. Izračunana letna količina živega srebra, ki iz morja izhaja v zrak, znaša 93 ton in znatno presega večino dosedanjih izračunanih vrednosti. Iz primerjave z

modelskimi simulacijami in izračuni drugih avtorjev sklepamo, da je izračunana količina precenjena. Hkrati pa smo ugotovili nekaj možnih vzrokov: (1) podcenjeni dodatni viri Hg, ki lahko izvirajo iz geotektonskih virov; (2) upoštevana premajhna turbulentna difuzija in mešanje vrhnjih plasti v modelu PCFLOW3D in (3) atmosferska oksidacija Hg^0 ob prisotnosti broma v mejni plasti in takojšnja neposredna depozicija, ki lahko predstavlja izdaten dodatni vir Hg v vrhnjem sloju morja.

4.2 NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

Z dopolnjenim in izboljšanim modelom PCFLOW3D lahko na podlagi strižnih napetosti ob dnu računamo samo resuspendiranje sedimentov, ne pa tudi transporta. Model ima vgrajeno hidrostatično aproksimacijo in zato z njim ni mogoče upoštevati razmeroma velikih vertikalnih hitrosti, ki nastajajo za ladijskim vijakom. Za simulacije transporta potrebujemo polni 3D model. Rešitev je v nadgradnji modela PCFLOW3D ali v uporabi drugega hidrodinamičnega in transportno-disperzijskega modela in ustreznih vmesnikov.

Za določitev pravilne količine izhajanja živega srebra iz Sredozemskega morja v ozračje predlagamo dodatne meritve gradientov koncentracij v vrhnjih plasteh morja in spodnji plasti ozračja. Na osnovi teh meritev bo mogoče ugotoviti, ali so razlike v izračunanih količinah posledica neustreznih modelov turbulence v modelu PCFLOW3D ali pa je vzrok v znatno večji takojšnji depoziciji Hg iz mejne plasti.

Za določitev histereze oz. povezave med pretoki in koncentracijami lebdečih plavin na reki Idrijci je potrebno izvesti kontinuirane meritve koncentracij lebdečih plavin in pretokov. V okviru raziskav, ki so opisane v disertaciji, nam zaradi logističnih težav in neustrezne opreme ni uspelo dobiti zadovoljivih rezultatov. Z meritvami je potrebno nadaljevati, ko bo na razpolago ustrezna oprema.

5 POVZETEK

V nalogi obravnavamo numerično modeliranje tokov plavin in onesnažil med sedimentom, vodo in zrakom. Med onesnažili smo se osredotočili na živo srebro, globalno onesnažilo, ki se pogosto transportira izven območja primarnih virov in zaradi visoke toksičnosti predstavlja problem za okolje in zdravje ljudi. Pri prehajanju Hg med okoljskimi segmenti in procesih pretvorb ima velik vpliv porazdelitev lebdečih plavin v vodnem stolpcu, njihovo usedanje in resuspendiranje, saj se večina živega srebra pojavlja v partikularni obliki.

Na resuspendiranje imajo velik vpliv cirkulacija vode in valovi, saj se zaradi njihovega (lahko hkratnega) delovanja povečajo strižne napetosti ob dnu, od katerih je odvisno privzdigovanje sedimenta. V notranjosti plitvih zalivov, kot sta Tržaški in Koprski zaliv, ima na privzdigovanje sedimenta velik vpliv tudi pomorski promet, saj curek za ladijskim vijakom povzroča še dodatno povečanje strižnih napetosti ob dnu.

Pri določanju pretoka lebdečih plavin v rekah se uporabljajo sedimentne pretočne krivulje, ki so v nestacionarnih razmerah histerezne. Enoznačna povezava med pretokom vode in plavin je lahko vzrok razmeroma velikih napak pri računu transporta plavin in nanje vezanih onesnažil. Tudi zarast dna v celinskem in morskem vodnem okolju lahko vpliva na gibanje vode in na transport sedimentov, zato je potrebno tudi temu dejavniku nameniti ustrezno pozornost.

Zelo pomemben del kroženja onesnažil je tudi izmenjava med vodo in zrakom, saj lahko onesnažila v plinasti obliki, predvsem živo srebro, prepotujejo velike razdalje od izvora, preden pride do usedanja.

V nalogi smo zbrali ustrezne metode, postopke in enačbe, s katerimi smo izboljšali obstoječe modele in izdelali nove vmesnike. Izvedli smo številne simulacije na območju Koprskega in Tržaškega zaliva ter Sredozemskega morja. Na območju Tržaškega in Koprskega zaliva smo raziskali vpliv posameznih dejavnikov in njihovih kombinacij (tokovi, valovi, ladijski vijak) na resuspendiranje onesnaženih sedimentov. Obstoječi tridimenzionalni matematični model PCFLOW3D smo nadgradili z vmesniki za povezovanje z modelom valovanja SWAN. Izdelali smo tudi povsem nov model, ki iz podatkov o plovbi in ladji izračuna strižne napetosti ob dnu zaradi curka ladijskega vijaka. S tako izpopolnjenimi modelnimi orodji smo izvajali simulacije, v katerih smo kombinirali različne vplive na privzdigovanje sedimenta. Rezultati simulacij so pokazali, da ima v danih razmerah najpomembnejši vpliv plovba, saj so strižne hitrosti ob dnu zaradi plovbe lokalno za red velikosti višje od vseh drugih vplivov na obeh obravnavanih območjih. Izpopolnjeni modeli in vmesniki imajo veliko praktično uporabnost, saj bo mogoče z njimi brez dodatnih posegov v orodja ovrednotiti vpliv različnih tipov plovil na dno pri vplutju ali izplutju in plovbi v bližini pristanišč. Ob poznavanju režima plovbe v severnem, z živim srebrom onesnaženim delom zaliva, bo mogoče ovrednotiti tudi vpliv plovbe v tem delu zaliva. Ob

poznavanju koncentracij onesnažil v sedimentu bo mogoče ovrednotiti tudi njihove tokove pri plovbi. Z vključitvijo rezultatov valovanja modela SWAN se je natančnost računa strižnih napetosti zaradi valovanja izboljšala.

Proučevanje pojava histereze na reki Idrijci se je zaključilo brez pričakovanih rezultatov zaradi velikih logističnih težav in pomanjkanja časa za kvalitetne meritve.

V Sredozemskem morju smo na osnovi Wannikhofovega modela izmenjave plinov (GEM) in dostopnih meritev z izpopolnjeno metodo Gårdfeldt in z rangiranim vetrom po posameznih celicah računskega območja izvedli račun izmenjave živega srebra med vodo in zrakom. V letni masni bilanci Hg za Sredozemlje je prav izmenjava z zrakom največji člen, zato si številni avtorji prizadevajo za čim bolj natančno določitev. Izračunana letna količina živega srebra, ki iz Sredozemskega morja izhaja v zrak, znaša 93 ton in znatno presega večino doslej izračunanih vrednosti. Iz primerjave z rezultati modelov in izračuni drugih avtorjev sklepamo, da smo z izračuni precenili dejansko količino, podajamo pa nekaj možnih vzrokov za razmeroma veliko odstopanje od rezultatov drugih avtorjev. Predvsem iz geotektonskih virov lahko izvirajo dodatne, doslej nepoznane količine Hg; modelne študije temeljijo na modelih turbulence, ki lahko podcenijo mešanje v zgornjih plasteh morja, kjer so zato koncentracije Hg nižje od dejanskih; halogenska oksidacija Hg^0 v mejni plasti in takojšnja neposredna depozicija lahko predstavlja izdaten dodatni vir Hg v vrhnjem sloju morja.

6 SUMMARY

This doctoral dissertation deals with numerical modelling of sediments and with pollutant fluxes between the sediment, water and air. The focus of our study was mercury, due to its high toxicity and the fact that it can be transported far from its primary source. The distribution of suspended sediments in the water compartment their accumulation and resuspension, have a big influence on Hg fluxes between environmental compartments and Hg transformation processes.

Water circulation and waves are an important forcing factor on sediment resuspension since they increase the bottom shear stress on which resuspension depends. Another forcing factor on resuspension, especially inside shallow bays such as the Gulf of Trieste and Koper Bay, is maritime traffic, as the jets behind ship propellers cause an increase in bottom shear velocities.

When assessing suspended sediment fluxes in rivers, we use hysteresis sediment rating curves. It is important to use this kind of a rating curve to determine sediment transport because hysteresis effect can have a big impact on the accuracy of the obtained results. Aquatic vegetation is also an important factor that must not be neglected when evaluating water and sediment fluxes.

Evasion is an important segment in a pollutant cycle since pollutants, especially mercury, can (in their gaseous form) travel long distances before deposition.

In order to improve the existing models and develop new interfaces we gathered appropriate methods, procedures and equations. We carried out numerous simulations in Koper Bay, the Gulf of Trieste and the Mediterranean Sea. In Koper Bay and the Gulf of Trieste we studied the influence of different forcing factors (currents, waves, propulsion) and their combinations on polluted sediment resuspension. The existing three-dimensional mathematical model PCFLOW3D was upgraded with the interface to couple with the wave model SWAN. For computation of bottom shear velocities based on the velocities behind a ship's propeller, we developed a completely new model, which uses data on the manoeuvring ship. With this new model we performed simulations in which we assessed the influence of different forcing factors on sediment resuspension. The results have shown that maritime traffic is the most important factor – bottom shear stresses in both studied cases were locally a magnitude higher than when using other factors. With the knowledge on ships' manoeuvring, we can assess the influence of maritime traffic in a mercury-polluted area. Using the data from the SWAN wave model the accuracy of calculated bottom shear stresses has significantly risen.

The study on the effect of hysteresis on the river Idrijca did not give any reliable results due to unexpected logistic difficulties and lack of time to perform high-quality measurements.

In the Mediterranean Sea we calculated the evasion of mercury based on the Wannikhof's gas exchange model (GEM) and the available data. We used the improved method primarily developed by Gårdfeldt, with winds divided into classes according to their strength. Based on the annual mass balance of Hg for the Mediterranean Sea it is evident that evasion is the biggest sink, therefore an accurate number is very important. We calculated the annual evasion of mercury for the Mediterranean Sea to 93 tons, which is much larger than all the other calculated values. When comparing with the values obtained by different authors it is evident that our calculated value for evasion is over-estimated and this may be due to the following reasons: geo-tectonic sources can account for additional unknown quantities of Hg; modelling studies are based on turbulence models, which can underestimate mixing in the upper sea layers and that can cause lower Hg concentrations than the actual values; halogen oxidation of Hg^0 in the marine boundary layer and immediate re-deposition can represent an additional source of Hg in the surface layer of the sea.

7 VIRI

Ahanger, M.A., Girdhari, L.A., Mohd A.L. 2008. Experimental study of sediment transport hysteresis. *Journal of Hydraulic Research* 46, 5: 628-635.

Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A., Rouse, H. 1950. Diffusion of a submerged jets. *Transcript of the A.S.C.E.*, 2409, 115: 639-697.

Allen, J.R.L., Collinson, J.D. 1974. The superimposition and classification of dunes formed by unidirectional aqueous flows. *Sedimentary Geology* 12: 169-178.

Almasi, M. N., Hoskin, C. M., Milo, J. Reed, J. K. 1987. Effects of natural and artificial *Thalassia* on rates of sedimentation. *Journal of Sedimentary Petrology* 57: 901-906.

AMAP/UNEP, 2013. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland 263 pp.

Andersson, M., Sommar, J., Gårdfeldt, K., Jutterström, S. 2011. Air-sea exchange of volatile mercury in the North Atlantic Ocean. *Marine Chemistry* 125: 1-7.

Andersson, M., Gårdfeldt, K., Wängberg, I., Sprovieri, F., Pirrone, N. 2007. Seasonal and daily variation of mercury evasion at coastal and off-shore sites at the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 104: 214-226.

Bagnold, R.A. 1966. An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics Geological Survey Professional Paper 422-I.

Berger, W., Felkel, K., Hager, M., Oebius, H., Schale, E. 1981. Courant provoqué par les bateaux protection des berges et solution pour éviter l'érosion du lit du Haut Rhin. *Proceedings of the 25th Congress on P.I.A.N.C.*, Edinburgh. Section I-1.

Bergh, H., Cederwall, K., 1981. Propeller Erosion in Harbours. Stockholm, Sweden, TRITA-VBI- 107. Hydraulics Laboratory, Royal Institute of Technology.

Bernhard, M., 1988. Mercury in the Mediterranean. Nairobi, UNEP Regional Seas Reports and Studies 98. UNEP, 141pp.

Beschta, R.L. 1987. Conceptual models of sediment transport in streams. In: Thorne, C.R., Bathurst, J.C., Hey, R.D. (eds), Chichester UK, *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers* Wiley and Sons: 318-319.

Blaaderen, E.A. van 2006. Modelling bow-thrusters induced flow near a Quay wall. M.Sc. Thesis, Delft: University of Technology.

Biester, H., Gosar, M., Müller, G. 1999. Mercury speciation in tailings of the Idrija mercury mine. *Journal of Geochemical Exploration* 65:195–204.

Biester, H., Gosar, M., Covelli, S. 2000. Mercury speciation in sediments affected by dumped mining residues in the drainage area of the Idrija mercury mine, Slovenia. *Environmental Science and Technology* 34(16): 3330–6.

Bilby, R. 1977. Effects of a spate on the macrophyte vegetation of a stream pool. *Hydrobiologia* 56: 109–112.

Blaauw, H.G., Kaa, E.J., van de 1978. Erosion of Bottom and Sloping Banks Caused by the Screw Race of Manoeuvring Ships, Delft Hydraulics Laboratory, Netherlands, Publication 202.

Blokland, T. 1994. In situ tests of current velocities and stone movements caused by a propeller jet against a vertical quay wall, Rotterdam public works.

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *Journal of Geophysical Research* 104, C4: 7649-7666.

Booij, N., Holthuijsen, L. H., Lange, P. H. M. de 1992. The penetration of short-crested waves through a gap, in *Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering*: 1044–1052, American Society of Civil Engineers.

Boukthir, M., Barnier, B. 2000. Seasonal and inter-annual variations in the surface freshwater flux in the Mediterranean Sea from the ECMWF reanalysis project. *Journal of Marine Systems* 24: 343–354.

Bretschneider, C., L. 1952. The generation and decay of wind waves in deep water. *Transactions of the American Geophysical Union*, 33: 381-389.

Brewster, P.M. 1997. Modelling the Wash from a Ship's Propeller. Thesis submitted to the Queen's University of Belfast for the degree of Doctor of Philosophy.

Brovchenko, I., Kanarska, J., Maderich, V., Terletska, K. 2007. 3D non-hydrostatic modelling of bottom stability under impact of the turbulent ship propeller jet. *Acta Geophysica* 55 (1): 47–55.

Brownlie, W.R. 1981. Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels. California Institute of Technology, Pasadena CA. Report KH-R-43A, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Division of Engineering and Applied Science.

Butcher, R. W. 1933. Studies on the ecology of rivers. I. On the distribution of macrophytic vegetation in the rivers of Britain. *Journal of Ecology* 21: 58–91.

Caroll, R.W.H., Warwick, J.J., Heim, K.J., Bonzongo, J.C., Miller, J.R., Lyons, W.B. 2000. Simulation of mercury transport and fate in the Carson river; Nevada. *Ecological Modelling* 125, 2/3: 225-278.

Cossa, D., Coquery, M. 2004. The Mediterranean mercury anomaly, a geochemical or a biological issue. *Handbook of Environmental Chemistry, Review Series in Chemistry. The Mediterranean* (Saliot, a., Editor), 5.

Cossa, D., Martin, J.-M., Takayanagi, K., Sanjuan, J. 1997. The distribution and cycling of mercury species in the western Mediterranean. *Deep-Sea Research II* 44 (34): 721–740.

Cossa, D., Coquery, M., Gobeil, C., Martin, J.-M. 1996. Mercury fluxes at the ocean margins. In: Baeyens, W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O. (Eds.), *Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, NATO ASI Series, 2: 229–247.

Covelli, S., Faganeli, J., Horvat, M., Brambati, A. 2001. Mercury contamination of coastal sediments as the result of long-term cinnabar mining activity – Gulf of Trieste, northern Adriatic sea. *Applied Geochemistry* 16: 541–558.

Covelli S., Faganeli J., Horvat M., Brambati A. 1999. Porewater distribution and benthic flux measurements of mercury and methylmercury in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 48: 415–428.

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

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

Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju. Doktorska disertacija, mentor prof. dr. R. Rajar. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo.

Dargahi, B. 2003. Three-dimensional modelling of ship-induced flow and erosion. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water and Maritime Engineering*, Issue WM2: 193–204.

Dawson, F. H., Robinson, W. N. 1984. Submersed macrophytes and the hydraulic roughness of a lowland chalkstream. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 22: 1944–1948.

Deacon, E. L. 1980. Sea-air gas transfer: The wind speed dependance. *Boundary Layer Meteorol.*, 21: 31-37.

Delft Hydraulics 1982. Initiation of Motion and Suspension; Development of Concentration Profiles in a Steady, Uniform Flow without Initial Sediment Load. Report M1531-III.

Dingemans, M.W. 1997. Water wave propagation over uneven bottoms. Part 1 - linear wave propagation, *Advanced Series on Ocean Engineering*, 13, World Scientific, 471 p.

Dizdarevič, T., Gantar, L., Zelenc, M. 2002. Ocena izgub živega srebra v okolje v času 500-letnega odkopavanja in predelave Hg rude. Report, Mercury mine in Idrija, 6 pp.

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

Doyle, R. D. 2000. Effects of Navigation on Aquatic Plants: Effects of Sediment Resuspension and Deposition on Plant Growth and Reproduction. Upper Mississippi River – Illinois Waterway System Navigation Study, ENV Report, In press.

Eleuterius, L. N. 1975. Submergent vegetation for bottom stabilization. *Estuaries Research* 2: 439–456.

Engelund, F. 1965. A Criterion for the Occurrence of Suspended Load La Houille Blanche, 8, France.

Fantozzi, L., Ferrara, R., Frontini, F.P., Dini, F. 2007. Factors influencing the daily behaviour of dissolved gaseous mercury concentrations in the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 107: 4-12.

Ferrara, R., Ceccarini, C., Lanzillotta, E., Gårdfeldt, K., Sommar, J., Horvat, M., Logar, M., Fajon, V., Kotnik, J. 2003. Profiles of dissolved gaseous mercury concentration in the Mediterranean seawater. *Atmospheric Environment* 37 (Supplement 1): S85–S92.

Fitzgerald, W.F., Mason, R.P. 1996. The global mercury cycle: Oceanic and anthropogenic aspects. In: Baeyens, W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O. (Eds.), *Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, NATO ASI Series 2: 85–108.

Fonseca, M. 1996. The role of seagrasses in nearshore sedimentary processes: a review. In Nordstrom, K. & C. T. Roman (eds), *Estuarine Shores: Evolution, Environments and Human Alterations*. London, John Wiley & Sons: 261–286.

Fonseca, M. S., Cahalan, J. A. 1992. A preliminary evaluation of wave attenuation by four species of seagrass. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 35: 565–576.

Fonseca, M. S., Kenworthy, W. J. 1987. Effects of current on photosynthesis and distribution of seagrasses. *Aquatic Botany* 27: 59–78.

Fonseca, M., S., Fisher, J., S. 1986. A comparison of canopy friction and sediment movement between four species of seagrass with reference to their ecology and restoration. *Marine Ecology Progress Series* 29: 15–22.

French, T. D., Chambers, P. A. 1996. Habitat partitioning in riverine macrophyte communities. *Freshwater Biology* 36: 509–520.

Fuehrer, M., Pohl, H., Römisch, K. 1987. Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protection of various constructions. In: *Proceedings of P.I.A.N.C., Bulletin* 58.

Fuehrer, M., Römisch, K. 1977. Effects of modern ship traffic on islands and ocean waterways and their structures. In: *Proceedings of 24th Congress P.I.A.N.C., Leningrad, Sections 1-3*.

Gambi, M. C., Nowell, A. R. M., Jumars, P. A. 1990. Flume observations on flow dynamics in *Zostera marina* (eelgrass) beds. *Marine Ecology Progress Series* 61: 159–169.

Garcia, M., Parker, G. 1991. Entrainment of bed sediment into suspension. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 4, pp. 414-435.

Gaythwaite, J. 2004. *Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring and Repair of Vessels*. ASCE Publications, ISBN: 0784407266, 531 pages.

Gårdfeldt, K., Sommar, J., Ferrara, R., Ceccarini, C., Lanzillotta, E., Munthe, J., Wängberg, I., Lindqvist, O., Pirrone, N., Sprovieri, F., Pesenti, E., Strömberg, D. 2003. Evasion of mercury from coastal and open waters of the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. *Atmospheric Environment* 37 Supplement 1: S73-S84.

Gnamuš, A., Zupan, M., Šajn, R. 2001. Mercury and methylmercury in soil and vegetation of various polluted areas in Slovenia. *RMZ Materials and Geoenvironment* 48(1): 94–108.

Gosar, M. 1997. Mercury in sediments and air as a reflection of Idrija mineralization and mining, Doctoral dissertation, University of Ljubljana, Faculty of Natural Science and Engineering, Department of Geology; [in Slovenian]. 125 pp.

Gosar, M., Pirc, S., Šajin, R., Bidovec, M., Mashyanov, N.R., Sholupov, S. 1997a. Distribution of mercury in the atmosphere over Idrija, Slovenia. *Environmental Geochemistry and Health* 19(3): 101–10.

Graf, W.H., Suszka, L. 1985. Unsteady flow and its effect on sediment transport. Melbourne, 21st IAHR Congress: 539–544.

Hamill, G.A., McGarvey, J.A., Hughes, D.A.B. 2004. Determination of the efflux velocity from a ship's propeller. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering* 157 (2): 83–91.

Hamill, G.A. 1987. Characteristics of the screw wash of manoeuvring ship and the resulting bed scour. Thesis submitted to the Queen's University of Belfast for the degree of Doctor of Philosophy.

Hargreaves, J.C., Annan, J.D. 2001. Comments on "Improvement of the short-fetch behavior in the wave ocean model (WAM)". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18: 711-715.

Harlin, M. M., Thorne-Miller, B., Boothroyd, J. C. 1982. Seagrasssediment dynamics of a flood-tidal delta in Rhode Island (USA). *Aquatic Botany* 14: 127–138.

Haslam, S. M. 1978. *River Plants: The Macrophytic Vegetation of Watercourses*. Cambridge University Press, Cambridge: 396 pp.

Heimbürger, L.-E., Migon, C., Cossa, D., 2011. Impact of atmospheric deposition of anthropogenic and natural trace metals on Northwestern Mediterranean surface waters: A box model assessment. *Environmental Pollution* 159: 1629-1634.

Heller, D. Y. 1987. Sediment transport through seagrass beds. M.S. Thesis, University of Virginia, Charlottesville: 112 pp.

Hersbach, H., Janssen, P.A.E.M. 1999. Improvement of the short-fetch behavior in the wave ocean model (WAM). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 16: 884-892.

Hines, M.E., Horvat, M., Faganeli, J., Bonzongo, J.-C.J., Barkey, T., Major, E.B. 2000. Mercury biogeochemistry in the Idrija River, Slovenia, from above the Mine into the Gulf of Trieste. *Environmental Research* 83: 129–39.

Hinze, J.O. 1975. *Turbulence*. McGraw Hill Book Company.

Holmes, C.D., Jacob, D.J., Corbitt, E.S., Mao, J., Yang, X., Talbot, R., Slemr, F. 2010. Global atmospheric model for mercury including oxidation by bromine atoms. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion* 10: 19845-19900.

Holmes, C.D., Jacob, D.J., Mason, R.P., Jaffe, D.A. 2009. Sources and deposition of reactive gaseous mercury in the marine atmosphere. *Atmospheric Environment* 43: 2278-2285.

Holmes, C.D., Jacob, D.J., Yang, X. 2006. Global lifetime of elemental mercury against oxidation by atomic bromine in the free troposphere. *Geophysical research letters* 33: L20808.

Holthuijsen, L.H. 2007. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press.

Holthuijsen, L.H., Booij, N., Herbers, T.H.C. 1989. A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering* 13: 23-54.

Horvat, M., Kotnik, J., Covelli, S., Piani, R., Gibičar, D., Logar, M. 2003. Mercury speciation in an estuary influenced by past mercury mining activities. *Geochimica Cosmochimica Acta* 67: A158.

Irukayama, K. 1966. The Pollution of Minamata Bay and Minamata disease. Pergamon, Oxford. In: *Proceedings of Third IAWPR Conference; Munich*, 3: 153 – 165.

James, W. F., Barko, J. W. 1991. Influences of submersed aquatic macrophytes on zonation of sediment accretion and composition, Eau Galle Reservoir, Wisconsin. Technical Report A-91-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 23 pp.

James, W. F., Barko, J. W. 1995. Wind-induced sediment resuspension and export in Marsh Lake, western Minnesota. Technical Report W-95-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS: 54 pp.

Kallos, G., Voudouri, A., Pytharoulis, I., Kakaliagou, O., 2001. Modelling Framework for Atmospheric Mercury over the Mediterranean Region: Model Development and Applications. In: Margenov, S., Wasniewski, J., Yalamov, P., (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, ICLSSC, LNSC, 2179: 281-290.

Kee, C., Hamill, G.A., Lam, W., Wilson, P. 2006. Investigation of the velocity distributions within a ship's propeller wash. In: *The Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco: 451–456.

Knap, A. 2004. Simulacija transporta in procesov pretvorb živega srebra v rekah Idrijci in Soči z uporabo 1D modela MeRiMod. Seminarška naloga. Ljubljana, UL FGG.

Keulen, M., van 1997. *Water Flow in Seagrass Ecosystems*. PhD Dissertation, Murdoch University, Australia: 260 pp.

Kiang, J., E., Cohn, T., A., Mason R., R., 2009. *Quantifying Uncertainty in Discharge Measurements: A New Approach*, U.S. Geological Survey.

Koch, E. W., Gust, G. 1999. Water flow in tide and wave dominated beds of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Marine Ecology Progress Series* 184: 63–72.

Koch, E. W. 1996. Hydrodynamics of a shallow *Thalassia testudinum* bed in Florida, U.S.A. In Kuo, J., R. C. Phillips, D. I. Walker & H. Kirkman (eds), *Seagrass Biology: Proceedings of an International Workshop*: 105–109.

Koch, E. W. 1994. Hydrodynamics, diffusion-boundary layers and photosynthesis of the seagrasses *Thalassia testudinum* and *Cymodocea nodosa*. *Marine Biology* 118: 767–776.

Koch, E. W. 1993. Hydrodynamics of flow through seagrass canopies: biological, physical and geochemical interactions. Ph.D. Dissertation, Univ. South Florida, St. Petersburg, 123 pp.

Komen G, 2004. The Wave Modelling (WAM) Group, a historical perspective. Dostopno na:

[http://champs.cecs.ucf.edu/Library/Conference Papers/pdfs/The%20Wave%20perspective.pdf](http://champs.cecs.ucf.edu/Library/Conference%20Papers/pdfs/The%20Wave%20perspective.pdf)

Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P. A. E. M. 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, New York, 532 pp.

Kotnik, J., Fajon, V., Gibičar, D., Logar, L., Horvat, M., Ogrinc, N., Amouroux, D., Monperrus, M., Sprovieri, F., Pirrone, N. 2007. Mercury speciation in surface and deep waters of the Mediterranean and Adriatic Seas. *Marine Chemistry* 107: 13-30.

Kotnik, J. 2003. The role of Isonzo River suspended matter in transferring mercury compounds into the Gulf of Trieste. Report, IJS: 102 pp.

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

Kuhnle, R.A. 1992. Bed load transport during rising and falling stages on two small streams. *Earth Surface Processes and Landforms* 17(2): 191–197.

Lam, W.H., Hamill, G., Song, Y.C., Robinson, D., Raghunathan, S. 2011. A review of the equations used to predict the velocity distribution within a ship's propeller jet. *Ocean Engineering* 38 (1): 1-10.

Lam, W., Hamill, G.A., Robinson, D.J., Raghunathan, S. 2010. Observations of the initial 3d flow from a ships propeller. *Ocean Engineering* 37: 1380–1388.

Lam, W., Hamill, G.A., Robinson, D.J., Raghunathan, S., Kee, C. 2006. Simulations of a ship's propeller wash. In: *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco: 457–462.

Lanzillotta, E., Ceccarini, C., Ferrara, R. 2002. Photo-induced formation of dissolved gaseous mercury in coastal and offshore seawater of the Mediterranean basin. *Science of the Total Environment* 300: 179–187.

Lanzillotta, E., Ferrara, R. 2001. Daily trend of dissolved gaseous mercury concentration in coastal seawater of the Mediterranean basin, *Chemosphere* 45: 935-940.

Lee, K.T., Liu, Y.L., Cheng, K.H. 2004. Experimental investigation of bed load transport processes under unsteady flow conditions. *Hydrological Processes* 18(13): 2439–2454.

Ličer, M., Žagar, D., Jeromel, M., Vodopivec, M. 2012. Numerični modeli za določanje stanja morja v Jadranskem morju = Numerical models for determining sea state in the Adriatic Sea. *Ljubljana, Ujma* 26: 164-167.

Lin, B., Falconer, R.A. 1996. Numerical Modelling of 3D Suspended Sediment for Estuarine and Coastal Waters. *Journal of Hydraulic Research* 4: 435–455.

Liss, P., Merlivat, L. 1986. Air–sea exchange rates: introduction and Synthesis. In: Buat-Menard, P. (Ed.), *The role of Air–Sea Exchange in Geochemical Cycling*. Dordrecht, D Reidel Publishing Company, : 113–127.

Liss, P.S., Slater, P.G. 1974. Flux of gases across the air-sea interface. *Nature* 247: 181-184.

Lopes, V.L., Ffolliott, P.F. 1993. Sediment rating curves for a clearcut ponderosa pine watershed in Northern Arizona. *Water Resources Bulletin* 29(3): 369–382.

Losee, R. F., Wetzel, R. G. 1993. Littoral flow rates within and around submersed macrophyte communities. *Freshwater Biology* 29: 7–17.

Losee, R. F., Wetzel, R. G. 1988. Water movement within submersed littoral vegetation. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 23: 62–66.

Luka Koper d.d. 2010. Living with the Port, National Spatial Plan = Živeti s pristaniščem, Luka Koper, Koper. Državni prostorski načrt.

Madsen, J.D., Chambers, P.A., James, W.F., Koch, E.W., Westlake, D.F. 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes *Hydrobiologia* 444 (1-3): 71-84.

Madsen, T. V., Søndergaard, M. 1983. The effects of current velocity on the photosynthesis of *Callitriche stagnalis* Scop. *Aquatic Botany* 15: 187–193.

Madsen, T. V., Warncke, E. 1983. Velocities of currents around and within submerged aquatic vegetation. *Archiv für Hydrobiologie* 97: 389–394.

Malačič, V., Petelin, B., Žagar, D., Bajt, O., Ramšak, A., Vodopivec, M., Čermelj, B. 2010. Cirkulacija in okoljske razmere v Koprskem zalivu in Luki Koper: okoljska študija 4, (Poročila MBP - Morska biološka postaja, 120). Piran: Morska biološka postaja, Nacionalni inštitut za biologijo, 35 str.

Mason, R.P., Choi, A.L., Fitzgerald, W.F., Hammerschmidt, C.R., Lamborg, C.H., Soerensen, A.L., Sunderland, E.M. 2012. Mercury biogeochemical cycling in the ocean and policy implications. *Environmental Research*, 119:101-117.

Mason, R.P., Sheu, G.-R. 2002. Role of the ocean in the global mercury cycle. *Global Biogeochemical Cycles* 16 (4), 40–1–40–14.

Mason, R.P., Fitzgerald, W.F., Morel, F.M.M., 1994. The biogeochemical cycling of elemental mercury: Anthropogenic influences. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 3191-3198.

Maynard, S.T. 1998. Bottom shear stress from propeller jets, Ports '98, sponsored by ASCE and U.S. Section of the Permanent International Association of Navigation Congresses.

McGarvey, J.A. 1996. The influence of the rudder on the hydrodynamics and the resulting bed scour, of a ship's screw wash. Thesis submitted to the Queen's University of Belfast for the degree of Doctor of Philosophy.

McGillis, W.R., Edson, J.B., Hare, J.E., Fairall, C.W. 2001. Direct covariance air–sea CO₂ fluxes. *Journal of Geophysical Research* 106 (C8): 16729–16745.

Mellor, G.L., Yamada, T., 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 20/4, 851-875.

MODB (Mediterranean Oceanic Database), WWW stran, <http://modb.oce.ulg.ac.be/>.

Moffatt and Nichol 2005. Kitimat LNG Import Terminal, Vancouver, BC, Canada, Propeller Wash Study, Revised, Moffatt and Nichol, 19 pp.

Monperrus, M., Sprovieri, F., Pirrone, N. 2007 Mercury speciation in surface and deep waters of the Mediterranean and Adriatic Seas. *Marine Chemistry* 107: 13–30.

Newall, A. M., Hughes, J. M. R. 1995. Microflow environments of aquatic plants in flowing water wetlands. In: Hughes, J. M. R. & A. L. Heathwaite (eds), *Hydrology and Hydrochemistry of British Wetlands* Wiley, Chichester: 363–381.

Nightingale, P.D., Malin, G., Law, C.S., Watson, A.J., Liss, P.S., Liddicoat, M.I., Boutin, J., Upstill-Goddard, R.C. 2000. In situ evaluation of air-sea gas exchange parametrization using novel conservative and volatile tracers. *Global Biogeochemical Cycles* 14 (1): 373-387.

Oebius, H., Schuster, S. 1975. Modelversuche zur frage der beschadigung von flussohlen durch die schiffahrt versuchsanstalt fur wasserbau und schiffbau, Berlin, VWS-Bericht 743/75.

Ogrinc, N., Monperrus, M., Kotnik, J., Fajon, V., Vidimova, K., Amouroux, D., Kocman, D., Tessier, E., Žižek, S., Horvat, M. 2007. Distribution of mercury and methylmercury in deep-sea surficial sediments of the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 107: 31-48.

Oliver, D.R. 1984. The Sedimentation Suspension of Closely-Sized Spherical Particles. *Chemical Engineering and Science* 15: 230-242.

Pacyna, E.G., Pacyna, J.M., Sundseth, K., Munthe, J., Kindbom, K., Wilson, S., Steenhuisen, F., Maxson, P. 2010. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020. *Atmospheric Environment* 44: 2487-2499.

Palmsten, M., L., 2001. Application of the SWAN wave model to a high-energy continental shelf, Master thesis, University of South Florida.

Perkovič, M., Batista, M., Jankowski, S. 2011. Vpliv predvidenega povečanja ladijskega prometa na varnost in okolje Tržaškega zaliva. Portorož, UL, Fakulteta za pomorstvo in promet, študija.

Perkovič, M., Suban, V., Borovničar, T., Kobeja, V., Gućma, L. 2008. Možnosti maritimnih operacij v podaljšanih bazenih 2 in 3, pogodba št. 464004/45-11809 : projektna dokumentacija. Portorož, UL, Fakulteta za pomorstvo in promet: 111 str.

Petersson, P., Larson, M., Jonsson, L. 1996. Measurements of the velocity field downstream of an impeller. *Journal of Fluids Engineering, ASME* 118 (3): 602-610.

Phillips, O.M., 1960. On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part 1, *Journal of Fluid Mechanics* 9: 193-217.

Picouet, C., Hingray, B., Olivery, J.C. 2000. Lumped conceptual modeling of suspended sediment transport in african tropical rivers: The upper niger and bani river basins. *Revue des sciences de l'eau* 13(4): 463-481.

Pirrone, N., Ferrara, R., Hedgecock, I.M., Kallos, G., Mamane, Y., Munthe, J., Pacyna, J.M., Pytharoulis, I., Sprovieri, F., Voudouri, A., Wängberg, I. 2003. Dynamic processes of mercury over the Mediterranean region: results from the Mediterranean Atmospheric Mercury Cycle System (MAMCS) project. *Atmospheric Environment* 37 (Supplement 1): S21-S39.

Porcela, D., Huckabee, J., W., Wheatley, B. 1995. Mercury as a global pollutant. Proceedings of the Third International Conference, Whistler, Canada, 1994. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995. Reprinted from Water Air and Soil Pollution 80: 1-4.

Prosser, M.J. 1986. Propeller Induced Scour, BHRA Project RP A01415. The Fluid Engineering Centre, Canfield.

PS Prostor d.o.o. 2009. National Spatial Plan, Sustainable Development Objectives of the Port of Koper for the International Traffic, Public Exposure = Državni prostorski načrt za celovito prostorsko ureditev pristanišča za mednarodni promet v Kopru, Javna razgrnitev - Povzetek za javnost, , PS Prostor d.o.o., Urbanizem, projektiranje nizkih gradenj in krajinsko načrtovanje, Pristaniška ulica 12, Koper, Koper.

Qurrain, R. 1994. Influence of the sea bed geometry and berth geometry on the hydrodynamics of the wash from a ship's propeller. Thesis submitted to the Queen's University of Belfast for the degree of Doctor of Philosophy.

Rajar, R., Četina, M., Širca, A., Krzyk, M., Vidmar, A., 2011. Calibration of a 3D Model with Measurements in a fully 3D Flow in the Sava River, Brisbane, Australia. Proceedings of the 34th IAHR World Congress.

Rajar, R., Četina, M., Horvat, M., Žagar, D. 2007. Mass balance of mercury in the Mediterranean Sea. Marine Chemistry 107: 89–102.

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

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

Rajar, R., Četina, M., Žagar, D., Petkovšek, G. 2004c. Three-dimensional simulations of mercury cycling in the Mediterranean Sea. RMZ - Materials and Geoenvironment 51/2: 1324-1327.

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

Rajar R, Širca A. 1998: Three-dimensional modelling of thermal pollution of the River Sava and its reservoirs. V: Holz, K.P. (ur.), Bechteler, W. (ur.), Wang, S.S.Y. (ur.), Kawahara, M. (ur.). *Advances in Hydrosience and Engineering* (). Proceedings of 3rd int. Conf. on Hydrosience and Engineering, Aug 31-Sept 3, Cottbus, Germany: 123 str.

Rajar, R., Četina, M. 1997a. Hydrodynamic and water quality modelling: An experience. *Ecological Modelling* 101: 195-207.

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

Rajar R, Širca A. 1996: Modelling of dispersion of of radioactive pollutants in the Japan Sea. *Acta Hydrotechnica*, 14: 12.

Rajaratnam, N. 1976. *Turbulent Jets*, Elsevier Scientific, Amsterdam: 305p.

Ranga Raju, K.G., Asawa, G.L. 1977. Viscosity and surface tension effects on weir flow. *J. Hydr. Div. ASCE* 103(10), 1227–1231.

Reid, I., Frostick, L.E., Layman, J.T. 1985. The incidence and nature of bedload transport during flood flows in coarsegrained alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms* 10(1): 33–44.

Richardson, Y.F., Zaki, W.N., 1954. Sedimentation and Fluidization, Part I. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 32: 35-53.

Rijn, L. C. van 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, Aqua publications, Amsterdam.

Rijn, L. C. van 1990. *Principles of Fluid Flow and Surface Waves in Rivers, Estuaries, Seas and Oceans*. Aqua Publications, Amsterdam: 335 str.

Rijn, L. C. van 1986. Sediment transport, part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112, 6: 433-455.

Rijn, L. C. van 1984. Mathematical modeling of suspended sediment in non-uniform flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110, 11: 1613-1641.

Ris, R.C., Booij, N., Holthuijsen, L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions: part II-verification. *Journal of Geophysical Research* 104, C4: 7667-7681.

Ris, R.C. 1999. Model convergence of SWAN in the Westerschelde estuary. WL|Delft Hydraulics, Report H3496.

Robakiewicz, W. 1987. Bottom erosion as an effect of ship propeller action near the harbour quays. In: Proceedings of P.I.A.N.C., Bulletin 58: 89–106.

Roblee, M. B., Barber, T. R., Carlson, P. R., Durako, M. J., Fourqurean, J. W., Muehlstein, L. K., Porter, D., Yarbro, L., Zieman, R. T., Zieman, J. C. 1991. Mass mortality of the tropical seagrass *Thalassia testudinum* in Florida Bay (U.S.A.). *Marine Ecology Progress Series* 71: 297–299.

Rogers, W., E., Hwang, P., A., Wang, D., W. 2003. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications. *Journal of Physical Oceanography* 33: 366–389.

Rolfhus, K. R., Fitzgerald, W.F. 2004. Mechanisms and temporal variability of dissolved gaseous mercury production in coastal seawater. *Marine Chemistry* 90: 125-136.

Rolfhus, K.R., Fitzgerald, W.F. 2001. The evasion and spatial/ temporal distribution of mercury species in Long Island Sound, CT-NY. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65: 407–418.

Rolfhus, K.R., Fitzgerald, W.F. 1995. Linkages between atmospheric mercury deposition and the methylmercury content of marine fish. *Water Air and Soil Pollution* 80: 291-297.

Salomons, W. 2004. EUROCAT – European catchment changes and their impact on the coast Final Report IVM. Amsterdam: Institute for Environmental Studies: 57 pp.

Schokking, L.A. 2002. Bowthruster-induced Damage, M.Sc. Thesis, T U Delft.

Schroeder, W.H., Munthe, J. 1998. Atmospheric mercury—An overview. *Atmospheric Environment* 32: 809-822.

Sirnik, N. 2011. Modeliranje hidrodinamičnih, oceanografskih in okoljskih spremenljivk ter koncentracij živega srebra v morskem okolju. Doktorska disertacija. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer.

Soerensen, A.L., Skov, H., Jacob, D.J., Soerensen, B.T., Johnson, M.S., 2010. Global Concentrations of Gaseous Elemental Mercury and Reactive Gaseous Mercury in the Marine Boundary Layer. *Environmental Science and Technology* 44: 7425-7430.

Song, T., Graf, W.H. 1997. Experimental study of bedload transport in unsteady open-channel flow. *International Journal of Sediment Research* 12(3): 63–71.

Stewart, D.P.J. 1992. Characteristics of a ships screw wash and the influence of Quay wall proximity. Thesis submitted to the Queen's University of Belfast for the degree of doctor of philosophy.

Sumer, B.M., Fredsøe, J. 2002. The Mechanics of Scour in the Marine Environment. World Scientific Publisher: 552 pages.

Syvitski, J.P.M., Morehead, M.D., Bahr, D.B., Mulder, T. 2000. Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. *Water Resources Research* 36(9): 2747–2760.

Širca, A., Rajar, R., Harris, R., Horvat, M. 1999a. Mercury transport and fate in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic) — a two-dimensional modelling approach. *Environ Model Software* 14:645–655.

Širca, A., Horvat, M., Rajar, R., Covelli, S., Žagar, D., Faganeli, J. 1999b. Estimation of mercury mass balance in the Gulf of Trieste. *Acta Adriatica* 40(2): 75–85.

Ten Brinke, W.B.M., Wilbers, A.W.E., Wesseling, C. 1999. Dune growth, decay and migration rates during a largemagnitude flood at sand and mixed sand-gravel bed in the dutch rhine river system. *All Special Publication - Interanational Assoiciation of Sedimentologists* 28: 15–32.

Tolman, H. L. 1991. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents, *Journal of Physical Oceanography* 21:782–797.

Tofil, T., 2013. Vpliv parametrizacije vetrnih valov na strižne napetosti pri dnu, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo.

UNEP–MAP, 2001. Protecting the Mediterranean from land-based pollution. UNEP, Athens: 47 pp.

UNEP–MAP, 1998. Atmospheric input of mercury to the Mediterranean Sea. UNEP, Athens: 77 pp.

UNEP–MAP, 1986. Co-ordinated Mediterranean pollution monitoring and research programme (MED POL – PHASE I). Final Report 1975–1980. UNEP, Athens: 276 pp.

Verhey, H.J. 1983. The Stabilitiy of Bottom and Banks Subjected to Velocities in the Propeller Jet behind Ships, Delft Publications 303, Delft Hydraulics Laboratory, Netherlands.

Vidmar, A., Čotar, A., Globevnik, L., Brilly, M. 2011. Hidravlične lastnosti reke Save v Brežicah - meritve ekstremnih pretokov. V: 22. Mišičev vodarski dan 2011, Maribor, 06. december. Zbornik referatov, (Mišičev vodarski dan). Maribor: Vodnogospodarski biro: 203-208.

Voudouri, A., Kallos, G. 2004. New developments on RAMS–Hg model. Proceedings of the 27th ITM of NATO/CCMS on Air Pollution Modelling and its Application: 438–445.

Wainright, S. C. 1990. Sediment to water fluxes of particulate material and microbes by resuspension and their contribution to the planktonic food web. *Marine Ecology Progress Series* 62: 271–281.

WAMDI Group 1988. The WAM model—A third generation ocean waveprediction model, *Journal of Physical Oceanography* 18: 1775–1810.

Wang, X.H., Pinardi, N., Malačič, V. 2007. Transport and resuspension due to combined motion of wave and current in the northern Adriatic Sea during a Bora event in January 2001: a numerical modelling study. *Continental Shelf Research*. 27:613-633.

Wang, X., H., Pinardi, N., 2002. Modeling the dynamics of sediment transport and resuspension in the Northern Adriatic Sea. *Journal of Geophysical Research* 107 (C12).

Wanninkhof, R., McGillis, W.R. 1999. A cubic relationship between air-sea CO₂ exchange and wind speed. *Geophysical Research Letters* 26 (13): 1889-18892.

Wanninkhof, R. 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research* 97 (C5: 7373-7382).

Ward, L. G., Kemp, W. M., Boynton, W. R. 1984. The influence of waves and seagrass communities on suspended particulates in an estuarine embayment. *Marine Geology* 59: 85-103.

Westlake, D. F., Dawson, F. H. 1988. The effects of autumnal weed cuts in a lowland stream on water levels and flooding in the following spring. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 23: 1273-1277.

Westlake, D. F. 1967. Some effects of low-velocity currents on the metabolism of aquatic macrophytes. *Journal of Experimental Botany* 13: 187-205.

Whitehouse, R. 1998. *Scour in Marine Structures: A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford Publisher.

Whitham, G.B. 1974. *Linear and nonlinear waves*, Wiley, New York: 636 p.

WHO-IPCS. *Environmental Health Criteria 101 – Methylmercury*, WHO, Geneva, 1990.

WHO-IPCS. *Environmental Health Criteria 118 – Inorganicmercury*, WHO, Geneva, 1991.

Williams, G., P. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology* 111(1-4): 89-106.

Worcester, S. E. 1995. Effects of eelgrass beds on advection and turbulent mixing in low current and low shoot density environments. *Marine Ecology Progress Series* 126: 223-232.

Wornom, S., F., Welsh, D., J., S., Bedford, K., W. 2001. On coupling the SWAN and WAM wave models for accurate nearshore wave predictions, *Coastal Engineering Journal*, 43, 3: 161-201.

Wynanski, I., Fiedler, H. 1969. Some measurements in the self-preserving jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 38:577-612.

Zavatarelli, M., Mellor, G. 1995. A numerical study of the Mediterranean Sea Circulation. *Journal of Physical Oceanography* 25: 1384–1414.

Zijlema, M. 2010. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids. *Coastal Engineering* 57: 267–277.

Žagar, D., Sirnik, N., Četina, M., Horvat, M., Kotnik, J., Ogrinc, N., Hedgecock, I., M., Cinnirella, S., De Simone, F., Gencarelli, C., N., Pirrone, N., 2013. Mercury in the Mediterranean Part 2: Processes and mass balance. *Environmental Science and Pollution Research*.

Žagar D., Ramšak V., Petelin B., Malačič V. 2012. Sediment transport modelling in the Koper Bay (Northern Adriatic, Slovenia). Poslano v objavo na Mednarodni konferenci IAHR, München.

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, 1: 64-88.

Žagar, D., Knap, A., Warwick, J.J., Rajar, R., Horvat, M., Četina, M. 2006. Modelling of mercury transport and transformation processes in the Idrijca and Soča river system. *Science of the Total Environment* 368, 1:149-63.

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., Širca, A. 2001. Mass balance and sediment transport modelling of mercury in the Gulf of Trieste. *RMZ Materials and Geoenvironment* 48(1):179– 85.

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.

<http://www.darrinward.com/lat-long/>.

<http://modb.oce.ulg.ac.be/>