

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidatka:

Jasna Kovšca

Dopolnitve modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov

Diplomska naloga št.: 2950

Mentor:
prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:
doc. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 24. 4. 2007

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **JASNA KOVŠČA** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
**»DOPOLNITVE MODELA PCFLOW3D ZA SIMULACIJO TOKOV IN ŠIRJENJA
POLUTANTOV«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 05.04.07

Bibliografsko - dokumentacijska stran in izvleček

UDK: 532.5:627.133:519.61/64
Avtor: Jasna Kovšca
Mentor: izr. prof. dr. Matjaž Četina
Somentor: doc. dr. Dušan Žagar
Naslov: Dopolnitve modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov

Obseg in oprema:

Ključne besede: matematični model, tridimenzionalni model, model turbulence, nestalni tok, Tržaški zaliv, plinski terminal, živo srebro

Izvleček

V nalogi je predstavljena nadgradnja tridimenzionalnega baroklinega matematičnega modela PCFLOW3D z novim modelom turbulence Smagorinsky-vertikalno, za katerega je bilo opravljenih več testnih primerov. V modelu PCFLOW3D je vgrajenih več modelov turbulence različnih natančnosti, tako da smo lahko novi model Smagorinsky-vertikalno primerjali z ostalimi vgrajenimi modeli. Z namenom verifikacije rezultatov je bil opravljen dodaten testni primer z uporabo komercialnega programa CORMIX, ki je namenjen predvsem simulaciji širjenja onesnaženja v neposredni bližini iztoka. Program CORMIX lahko simulira le stalni tok, uporablja pa enačbe iz teorije curka. Ugotovili smo, da hitrih iztočnih curkov model PCFLOW3D ne more dobro simulirati, ker so navadno prisotne tudi razmeroma velike *vertikalne* komponente hitrosti, takih tokov pa model PCFLOW3D ne more pravilno simulirati. Na podlagi testnih primerov smo ugotovili, da daje model turbulence Smagorinsky-vertikalno dovolj dobre rezultate za izračune hitrostnih polj, manj točno pa lahko simulira transport in disperzijo polutantov. V nalogi je tudi predstavljena uporaba modela Smagorinsky-vertikalno na konkretni študiji vpliva izgradnje in obratovanja terminala v Tržaškem zalivu na resuspenzijo živega srebra iz sedimenta na dnu. V okviru diplomske naloge je bil izdelan dodaten dolgoročni izračun z modelom PCFLOW3D, pri čemer so bile poleg sezonsko povprečnih vrednosti upoštevane tudi maksimalne vrednosti vplivov vetra in pretoka reke Soče. Izkazalo se je, da je metoda Smagorinsky-vertikalno vsekakor uporabna, bi pa bilo v bodoče potrebno še bolj detajlno preizkusiti vpliv koeficienta C_{smav} na točnost računov.

Bibliographic - documentalistic information and abstract

UDC: 532.5:627.133:519.61/64
Author: Jasna Kovšca
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Matjaž Četina
Cosupervisor: Assist. Prof.Dr. Dušan Žagar
Title: Completion of PCFLOW3D Model for Simulation of Flow and Dispersion of Pollutants
Notes:
Key words: mathematical model, three-dimensional model, turbulence model, unsteady flow, Gulf of Trieste , gas terminal, mercury

Abstract

An upgrade of the three-dimensional baroclinic mathematical model PCFLOW3D with a new turbulence model Smagorinsky-vertical is presented. Several test cases were made to compare this new turbulence model with other turbulence models already built in the PCFLOW3D model. Additional verifications of the test results were performed using the commercial software CORMIX of which main purpose is to simulate the near field areas of pollution inflows. CORMIX is restricted to steady flows only and is based on equations of the jet theory. We discovered that fast inflow jets can not be simulated well with the PCFLOW3D model, because of the relatively large vertical components of speed that are usually present and which the PCFLOW3D model cannot simulate correctly. The results indicate that the Smagorinsky-vertical turbulence model works sufficiently well when simulating hydrodynamic, but is less accurate when simulating pollutant transportation and dispersion. The use of the Smagorinsky-vertikal model is presented on a concrete study of the resuspension of mercury caused by the construction and operation of the gas terminal in the Gulf of Trieste. Finally an additional long-term simulation on the basis of seasonally averaged parameters and a few shorter inserts of strong wind and high discharges of the Soča River is presented. As it is shown, the Smagorinsky-vertical model is by all means fit for use, although a more detailed research of the effect of the C_{smaV} coefficient on the simulation accuracy should be carried out in the future.

Kazalo

1 UVOD	1
2 PCFLOW3D	3
2.1 Splošno o modelu	3
2.2 Zgradba modela	3
2.2.1 Hidrodinamični (HD) modul	3
2.2.2 Transportno disperzijski (TD) modul	14
2.2.3 Sedimentacijski (SD) modul	15
2.2.4 Bio-geokemični (BGK) modul	16
3 RAČUNSKI PRIMERI	17
3.1 Primer ŠKATLA	17
3.1.1 Podatki	18
3.1.2 Umerjanje koeficienta Smagorinsky-vertikalno	18
3.1.3 Rezultati in primerjava metod turbulence	19
3.1.4 Zaključek	21
3.2 Računski primer CORMAL	22
3.2.1 Podatki	22
3.2.2 MODEL CORMIX	23
3.2.3 Rezultati	29
3.2.4 Model PCFLOW3D	36
3.2.5 Zaključki	38
3.3 Računski primer TRŽAŠKI ZALIV	40
3.3.1 Podatki	40
3.3.2 Rezultati in primerjava metod	43
3.3.3 Ugotovitve	45
3.3.4 Dodatni testni izračuni za primer TZB	45
3.3.5 Zaključki	46
3.4 Računski primer plinski terminal v Tržaškem zalivu	47
3.4.1 Opis problema	47

3.4.2 Simulacije transporta in disperzije živega srebra po zalivu	47
3.4.3 Kratkoročna simulacija, primer JUGO	48
3.4.4 Dolgotrajni simulaciji SEK-04 in SEK-11 za terminal na morju - obratovanje	51
3.4.5 Primerjava rezultatov primera SEK-04 in primera SEK-11	58
4 POVZETEK	62
VIRI	65

Kazalo prilog

Priloga A:

Slika 3.1- 1: Numerična mreža za primer ŠKATLA v horizontalni ravnini xy .	69
Slika 3.1- 2: Numerična mreža za primer ŠKATLA v vertikalni ravnini xz , distorzija v z smeri je 4.	70
Slika 3.1- 3: Umerjanje koeficienta Smagorinsky-vertikalno v sloju XY9.	71
Slika 3.1- 4: Hitrostno polje v sloju XY3 po 1h simulacije.	72
Slika 3.1- 5: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY3 izračunane po dveh metodah.	73
Slika 3.1- 6: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY3 za primer KOU in MYU.	74
Slika 3.1- 7: Hitrostno polje v sloju XY5 po 1h.	75
Slika 3.1- 8: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY5.	76
Slika 3.1- 9: Hitrostno polje v zgornjem sloju XY9 po 1h.	77
Slika 3.1- 10: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY9.	78
Slika 3.1- 11: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY9 za primer KOU in MYU.	79
Slika 3.1- 12: Hitrostno polje v prerezu XZ6 po 1h, distorzija v z smeri je 3.	80
Slika 3.1- 13: Izolinije za temperaturo T [°C] v prerezu XZ6.	81
Slika 3.1- 14: Hitrostno polje v prerezu YZ3 (na mestu podvodnega izpusta).	82
Slika 3.1- 15: Izolinije za temperaturo T [°C] v prerezu YZ3.	83

Priloga B:

Slika 3.2 - 1: Numerična mreža za primer CORMAL v ravnini xy , distorzija v y smeri je 1.5.	85
Slika 3.2 - 2: 3D prikaz potovanja iztočnega curka v bližnjem polju za primer CMX01.	86
Slika 3.2 - 3: 3D prikaz potovanja iztočnega curka v bližnjem polju za primer CMX02.	87
Slika 3.2 - 4: 3D prikaz potovanja iztočnega curka v bližnjem polju za primer CMX03.	88

Slika 3.2 - 5: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX01	89
Slika 3.2 - 6: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX01	90
Slika 3.2 - 7: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX02	91
Slika 3.2 - 8: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX02	92
Slika 3.2 - 9: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX03	93
Slika 3.2 - 10: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX03	94
Slika 3.2 - 11: Detajl hitrostnega polja v sloju XY4 na mestu stranskega vtoka.	95
Slika 3.2 - 12: Potek temperature v sloju XY4 za primer C06.	96
Slika 3.2 - 13: Detajl hitrostnega polja v prerezu XZ44 na mestu stranskega vtoka.	97
Slika 3.2 - 14: Detajl hitrostnega polja v sloju YZ25 na mestu stranskega vtoka.	98
Priloga C:	
Slika 3.3 - 1: Numerična mreža za primer <i>Tržaški zaliv</i> .	100
Slika 3.3 - 2: Hitrostno polje v površinskem sloju XY26. Primerjava modelov SMV in KOU.	101
Slika 3.3 - 3: Hitrostno polje srednjih hitrosti. Primerjava modelov SMV in KOU.	102
Slika 3.3 - 4: Hitrostno polje v površinskem sloju XY26. Primerjava modelov SMV in MYQ.	103
Slika 3.3 - 5: Hitrostno polje srednjih hitrosti. Primerjava modelov SMV in MYQ.	104
Slika 3.3 - 6: Detajl hitrostnega polja v površinskem sloju XY26 na mestu vtoka reke Soče.	105
Slika 3.3 - 7: Hitrostno polje v površinskem sloju XY26. Primerjava modelov SMV in KOU.	106
Slika 3.3 - 8: Hitrostno polje v površinskem sloju XY26. Primerjava modelov SMV in MYQ.	107
Slika 3.3 - 9: Detajl hitrostnega polja v površinskem sloju XY26 na mestu vtoka reke Soče.	108
Slika 3.3 - 10: Primerjava rezultatov hitrostnega polja za različne vrednosti koeficienta C_{smaH} .	109
Slika 3.3 - 11: Primerjava rezultatov hitrostnega polja za različne vrednosti koeficienta C_{smaV} (0.01 in 0.0005).	110

Slika 3.3 - 12: Detajl hitrostnega polja v površinskem sloju XY26 na mestu vtoka reke Soče.	111
Slika 3.3 - 13: Primerjava rezultatov hitrostnega polja za vrednost koeficienta $C_{smav} = 0.001$ metode SMV in metode MYQ.	112
Slika 3.3 - 14: Detajl hitrostnega polja v površinskem sloju XY26 na mestu vtoka reke Soče.	113
Priloga D:	
Slika 3.4 - 1: Numerična mreža definicijskega območja za primer JUGO.	115
Slika 3.4 - 2: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju - primer JUGO.	116
Slika 3.4 - 3: Tlorisni prikaz širjenja koncentracije resuspendiranega sedimenta – primer JUGO (sloj XY13).	117
Slika 3.4 - 4: Prikaz širjenja koncentracije resuspendiranega sedimenta – primer JUGO (prez YZ24).	118
Slika 3.4 - 5: Sezonsko povprečni parametri v Tržaškem zalivu za primer SEK-04 ter sezonsko povprečni parametri z vložki maksimalnih vplivov za primer SEK-11.	119
Slika 3.4 - 6: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju za jesensko sezono.	120
Slika 3.4 - 7: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju za poletno sezono.	121
Slika 3.4 - 8: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju pod vplivom visoke vode na Soči, pretok $1371 \text{ m}^3/\text{s}$.	122
Slika 3.4 - 9: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju (debeline 1m) pod vplivom močne burje 6.4 m/s .	123
Slika 3.4 - 10: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju (debeline 1m) pod vplivom močne burje 6.2 m/s .	124
Slika 3.4 - 11: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju pod vplivom visoke vode na Soči, pretok $714 \text{ m}^3/\text{s}$.	125
Slika 3.4 - 12: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-04 (sloj XY26).	126
Slika 3.4 - 13: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (sloj XY26).	127

Slika 3.4 - 14: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-04 (sloj XY16).	128
Slika 3.4 - 15: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (sloj XY16).	129
Slika 3.4 - 16: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala za primer SEK-04 (sloj XY6).	130
Slika 3.4 - 17: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (sloj XY6).	131
Slika 3.4 - 18: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala za primer SEK-04 (prerez YZ24).	132
Slika 3.4 - 19: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (prerez YZ24).	132
Slika 3.4 - 20: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-04 (prerez YZ16).	133
Slika 3.4 - 21: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (prerez YZ16).	133
Slika 3.4 - 22: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-04 (prerez XZ17).	134
Slika 3.4 - 23: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (prerez XZ17).	134
Slika 3.4 - 24: Kvalitativni razpored MeHg po dvodnevem vložku visokovodnega vala na reki Soči (1371 m ³ /s) za primer SEK-11 (prerez XY26).	135

Kazalo preglednic

Preglednica 3.2.1: Vrednost dolžinskih mer za tri primere izračunane s programom CORMIX1	31
Preglednica 3.2.2: Rezultati za tri primere CMX01, CMX02 IN CMX03.	34
Preglednica 3.2.3: Seznam opravljenih izračunov z modelom PCFLOW3D	37
Preglednica 3.3.1: Seznam opravljenih izračunov za primer <i>Tržaški zaliv</i>	40
Preglednica 3.3.2: Seznam opravljenih dodatnih testnih izračunov za primer <i>TZB</i>	45
Preglednica 3.4.1: Vrednosti sezonsko povprečnih parametrov za primer SEK-04.	57
Preglednica 3.4.2: Vrednosti sezonsko povprečnih parametrov ter vložkov za primer SEK-11. Vrednosti vložkov močne burje in visokega pretoka reke Soče so odebeljene.	58

1 UVOD

V današnjem svetu, po več kot stoletnem intenzivnem izkoriščanju naravnih virov in indiferentnosti človeštva za dolgoročna ekološka vprašanja, postaja čista voda vse bolj dragocena dobrina. Države se vse bolj zavedajo pomena zaščite in sanacije vodnih virov in to večkrat postavljajo pred gospodarske interese.

V Evropski skupnosti se je uveljavila Direktiva o vodah (*Water Frame Directive*), ki nalaga vsem članicam in s tem tudi Sloveniji dolžnost, da v zastavljenem roku poskrbijo za izboljšanje stanja vseh voda in morji. V splošnem je ekološka problematika povezana z vrsto različnih dejavnikov, zato je reševanje le teh zelo zahtevno in kompleksno. Z razvojem računalniške tehnologije se razvijajo tudi matematični modeli, ki so postali nepogrešljivo orodje pri analizi in načrtovanju ekoloških ukrepov. Z njimi lahko simuliramo vplive različnih dejavnikov na onesnaženje nekega območja in s preučevanjem posledic le teh, določimo tisti ukrep, ki je za dane razmere, tako iz ekoloških, socialnih in ekonomskih vidikov, najbolj sprejemljiv. S pravilno izbiro in uporabo matematičnega modela lahko zmanjšamo število dragih in zamudnih terenskih meritev na minimum. Matematični model nam tako s pomočjo manjšega števila terenskih meritev, ki so nujno potrebne za umerjanje in verifikacijo modelov, omogoča boljše razumevanje procesov v naravi.

Na Katedri za mehaniko tekočin se v ta namen že od leta 1985 razvija in v praksi uporablja tridimenzionalni model PCFLOW3D. Namenjen je preučevanju procesov v večjih vodnih telesih, kot je to v jezerih in morjih, kjer so horizontalne komponente hitrosti za red velikosti večje od vertikalnih komponent. Uporabljen je bil pri številnih študijah hidrodinamike toka in transporta ter disperzije polutantov tako pri nas kot v tujini. Model se nenehno dopolnjuje in je bil v zadnjih letih poleg hidrodinamičnega in transportnega modula dograjen še s sedimentacijskim in bio-geokemičnim modulom za nekatere polutante (predvsem živo srebro), tako da predstavlja današnja oblika modela PCFLOW3D celostni ekološki matematični model.

V modelu je na izbiro več metod oziroma modelov turbulence za določitev koeficientov turbulentne difuzije in viskoznosti, ki so različnega reda točnosti. Novejši modeli turbulence

so zasnovani ne večjem številu enačb, zato se čas izračuna podaljša, kompleksnejše pa je tudi določevanje robnih pogojev. Model turbulence Smagorinsky, ki se je do nedavnega uporabljal le za izračun koeficientov v horizontalni smeri, sodi med modele srednje točnosti z eno transportno enačbo. Prednost modela Smagorinsky je v tem, da je za ceno nekoliko manjše točnosti, izračun bolj stabilen in hitreje poteka, določanje robnih pogojev pa je manj zahtevno in bolj zanesljivo. Zato so člani Katedre za mehaniko tekočin po analogiji za horizontalno smer uporabo modela Smagorinsky razširili tudi na vertikalno smer. Tako je nastal nov model turbulence Smagorinsky-vertikalno. Glavni cilj moje diplomske naloge je bil, preizkusiti uporabnost in točnost tega modela turbulence.

Podrobnejši cilji diplomske naloge so bili:

- Izdelati več testnih primerov z modelom PCFLOW3D in primerjanje modela turbulence Smagorinsky-vertikalno s preostalimi vgrajenimi modeli turbulence.
- Izdelati testni primer za primerjavo modela PCFLOW3D (z uporabo modela turbulence Smagorinsky-vertikalno) in komercialnega programa CORMIX.
- Prikazati uporabnost modela turbulence Smagorinsky-vertikalno pri študiji vpliva izgradnje in obratovanja plinskega terminala v Tržaškem zalivu na resuspenzijo živega srebra, in opraviti dodatno celoletno simulacijo vpliva obratovanja plinskega terminala na resuspenzijo živega srebra v Tržaškem zalivu za sezonsko povprečne meteorološke razmere s krajšimi vložki močnega vetra in visokih pretokov na reki Soči. Podoben način je bil uporabljen že za račun transporta živega srebra v Tržaškem zalivu (Žagar, 1999).

2 PCFLOW3D

2.1 Splošno o modelu

Model PCFLOW3D se uvršča med integrirane matematične modele za preučevanje kakovosti voda (Water Quality Model). Sestavljen je iz pod-modelov oziroma modulov, ki omogočajo simuliranje različnih fizikalnih, bioloških in kemičnih procesov. Uporabljen je bil že pri več praktičnih problemih disperzije polutantov, tako v Sloveniji kot tudi v tujini (Širca, 1996; Rajar et al., 1997; Rajar in Širca, 1998; Rajar et al., 2000; Rajar et al., 2004). Verificiran in validiran je bil za hidrodinamiko (Rajar et al., 1997, Rajar et al., 2000), za transport plavin (Žagar, 1999).

Model PCFLOW3D je nestacionarni nelinearni baroklini model, ki ga v osnovi sestavljajo hidrodinamični (HD) modul, sedimentacijski modul (SD), transportno-disperzijski (TD) modul in bio-geokemični (BGK) modul. Sistem diferencialnih enačb se rešuje po metodi končnih volumnov. Za izračun koeficientov turbulentne viskoznosti in turbulentne difuzije v horizontalni in vertikalni smeri je vgrajenih več modelov turbulence. Eden od njih je tudi v nadaljevanju naloge preučevani model Smagorinsky-vertikalno. HD modul izračunava polje hitrosti, pri tem pa je vključen tudi sočasen izračun toplote in slanosti. Ta dva parametra vplivata na gostoto vode in to povratno na hitrost toka, zaradi te lastnosti pravimo, da je model baroklini.

2.2 Zgradba modela

2.2.1 Hidrodinamični (HD) modul

Enačbe hidrodinamičnega modula za opis baroklinega toka so zapisane v Kartezijskem koordinatnem sistemu, tako da sta x in y osi v horizontalni in z os v vertikalni smeri. Računsko območje je razdeljeno na več slojev debeline h , ki so med seboj ločeni s horizontalnimi mejnimi ploskvami. Debeline posameznih slojev so lahko različne. Zgornja

plast ima prosti zgornji rob, kar pomeni, da je debelina sloja h_a spremenljivka po času in prostoru, medtem ko imajo vsi ostali sloji fiksno debelino. Posledično imajo nekateri parametri v spodnjih enačbah različno interpretacijo za vrhnji sloj napram ostalim (Rajar in Četina, 1997).

V vsakem kontrolnem volumnu se na podlagi kontinuitetne in treh dinamičnih enačb ter kinematičnega robnega pogoja za vrhnji sloj izračunajo komponente hitrosti u , v , w , tlak p ter gladina vode v površinskem sloju h_a . Izračunane komponente hitrosti se v nadaljevanju uporabijo za reševanje advekcijsko-difuzijske enačbe, ki določa porazdelitev temperature in slanosti. Neenakomerna porazdelitev temperature in slanosti vpliva na gostoto vode in posredno tudi na hitrostno polje, zato se v naslednji iteraciji pri izračunu komponent hitrosti upošteva spremenjena gostota vode.

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

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

pomen oznak:

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

2.2.1.2 Dinamična enačba v x , y in z smeri

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

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(huw)}{\partial z} = -fuh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x}\left(hN_h \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hN_h \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hN_v \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{1}{\rho}\tau_{wy} - \frac{1}{\rho}\tau_{by}$$

$$p = p_a + g \int_z^{z_s} \rho dz$$

Pomen oznak:

- f = $2\omega \sin \varphi$... Coriolisova sila, kjer je ω kotna hitrost zemlje in φ zemljepisna širina
- t čas
- p_a atmosferski tlak
- z_s višina vodne gladine
- N_h koeficient horizontalne turbulentne viskoznost
- N_v koeficient vertikalne turbulentne viskoznost
- ρ gostota
- τ_{wx} strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v x smeri
- τ_{wy} strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v y smeri
- τ_{bx} strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v x smeri
- τ_{by} strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v y smeri

Ker se model PCFLOW3D uporablja predvsem za analizo priobalnih morji in jezer, kjer so vertikalne komponente dimenzij in hitrosti za red velikosti manjše v primerjavi s tistimi v horizontalni smeri, je pri tretji dinamični enačbi uporabljena poenostavitev. Tlak p se izračuna na podlagi hidrostatične enačbe, s tem da je upoštevano spreminjanje gostote po globini.

2.2.1.3 Kinematični robni pogoj za površinski sloj

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

Pomen oznak:

N število horizontalnih slojev, gledano v z smeri

h_a gladina vode v površinskem sloju

2.2.1.4 Adveksijsko–difuzijski enačbi

Enačbi služita za izračun časovne in prostorske porazdelitve temperature T in slanosti s (lahko tudi poljubnega polutanta), zato spadata bolj v transportno-disperzijski modul, ki je opisan v poglavju 2.2.2. V modelu PCFLOW3D sta upoštevani enačbi tudi v hidrodinamičnem modulu, saj je potrebno celoten sistem enačb reševati istočasno, ker porazdelitev temperature in slanosti vpliva na gostoto, ta pa nazaj na hidrodinamične količine, ki so končni rezultat hidrodinamičnega modula (baroklini model).

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

$$\frac{\partial(hs)}{\partial t} + \frac{\partial(hus)}{\partial x} + \frac{\partial(hvs)}{\partial y} + \frac{\partial(hws)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \left(\frac{d(hs)}{dt} \right)_{površje}$$

Pomen oznak:

T temperatura [°C]

s slanost

D_h koeficient vertikalne turbulentne difuzije

D_v koeficient horizontalne turbulentne difuzije

R penetracija kratkovalovnega sevanja preko vodne gladine

C_p specifična toplota

Difuzijska koeficienta sta s koeficientoma turbulentne viskoznosti povezana preko Prandtl-Schmitovega (σ_T) števila, ki se giblje med 0.5 in 10.0. V PCFLOW3D je omogočen vnos različnih vrednosti Prandtl - Schmitovega števila za x , y in z smer.

$$Dh = \frac{Nh}{\sigma_T} \quad Dv = \frac{Nv}{\sigma_T}$$

Izračun lahko zajema tudi vpliv toplotne izmenjave med tekočino in okoliškim zrakom. Ta fizikalni proces je pomemben v simulacijah, ki ponazarjajo časovno dolge procese (več sezonske ali več letne), pri katerih nenehno segrevanje in ohlajanje ozračja povzroča spremembo temperature in posledično gostote vode. Slednje pa povzroča horizontalno in tudi vertikalno gibanje vode (gostotne tokove) ali pa vpliva v določeni meri na njih. V večjih morjih lahko taka časovno spremenljiva razporeditev temperature in gostote povzroči znatna gostotna gibanja vodnih mas (japonsko morje, Rajar et al, 1997). Vpliv toplotne izmenjave med vodo in zrakom je upoštevan v zadnjem členu transportno-disperzijske enačbe in ga moramo upoštevati tudi pri določanju robnih pogojev. V zadnjem členu adveksijsko-disperzijske enačbe za slanost je upoštevan vpliv vtoka oziroma izhlapevanja sladke vode preko površja in vpliv izločanja soli pri zmrzovanju (Rajar in Četina, 1997).

2.2.1.5 Funkcija gostote

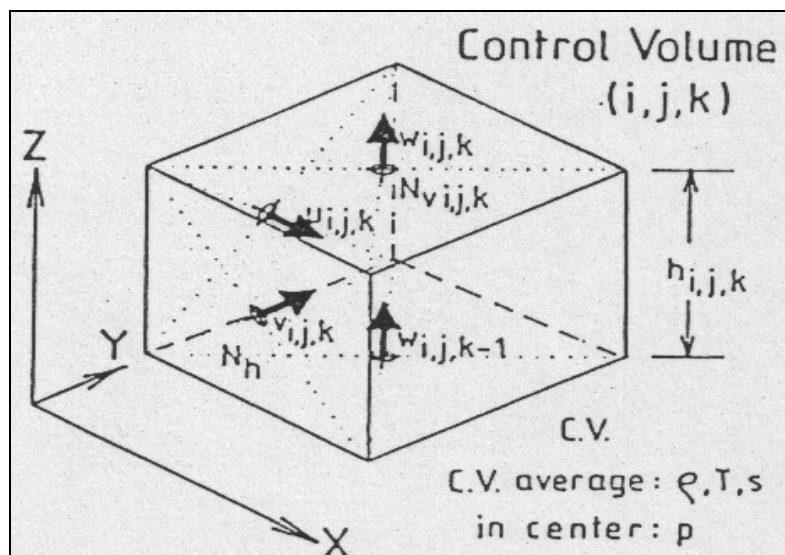
Gostota je odvisna od porazdelitve temperature T , slanosti s in koncentracije poljubnega polutanta C (enačba stanja).

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

2.2.1.6 Metode reševanja

Računsko območje se s pomočjo numeričnih shem diskretizira na kontrolne volumne z dimenzijami Δx in Δy , medtem ko so volumni po višini enaki debelini posameznega sloja h . Reševanje enačb poteka po numerični metodi končnih volumnov, ki je izpeljanka numerične metode končnih razlik.

Numerična mreža je premaknjena v horizontalni smeri. Spremenljivke p , ρ , T , s in C se računajo v središču kontrolnega volumna. Hitrosti u , v in w pa se računajo na premaknjenih pozicijah. Princip je splošno uveljavljen in zagotavlja boljše rezultate kot z računom vseh količin v istih točkah numerične mreže (Četina, 1992).



Diskretizacija računskega področja (aksonometrični pogled) (Četina, 1992)

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

- **HIBRIDNA** shema je kombinacija *centralno-diferenčne* sheme in sheme *gorvodnih razlik* (*UPWIND*). Prva je drugega reda točnosti, a ni primerna za računanje konvekcijskih členov v enačbah. Zato se uporablja v kombinaciji z enostavno interpolacijsko shemo prvega reda točnosti *UPWIND*, pri kateri je privzeto, da je interpolirana vrednost vmesne točke kontrolnega volumna enaka vrednosti v gorvodni točki. Numerična shema *UPWIND* nastopa samo v primerih, ko advekcija proti toku prevlada nad difuzijo, sicer pa poteka račun po *centralno-diferenčni* shemi. *HIBRIDNA* shema se zaradi enostavnosti in stabilnosti, tudi v primerih z bolj zapletenimi robnimi pogoji in geometrijo, še vedno veliko uporablja. Njena glavna pomanjkljivost pa je pojav numerične difuzije, ki lahko v določenih primerih (predvsem pri obravnavanju transportno-difuzijskih procesov) znatno vpliva na rezultate. V preteklosti so bile v PCFLOW3D vgrajene nekatere izboljšane različice *HIBRIDNE* sheme z namenom zmanjšanja numerične difuzije; *NONDIF* in *CONDIF* (Četina 1992).

- *QUICK* (Quadratic Upstream Interpolation Convective Kinematic) shema, je kompleksnejša shema tretjega reda točnost in povzroča bistveno manjšo napako zaradi numerične difuzije kot *HIBRIDNA* shema, zato se v zadnjih letih veliko uporablja. Slabe lastnosti *QUICK* sheme so te, da je programiranje in določanje robnih pogojev zahtevno, ter da se pojavljajo težave s stabilnostjo. Podaljša se tudi računski čas, kar pa v zadnjem času, zaradi razvoja vse zmogljivejših računalnikov, ni več problematično.

2.2.1.7 Problem numerične difuzije

Pri numeričnem reševanju transportnih enačb po metodi končnih razlik se pojavijo težave s t.i. numerično difuzijo. Pri aproksimaciji konvekcijskih členov se v vsaki iteraciji napravi določena napaka, ki se med potekom izračuna povečuje. Napaka predstavlja določen pribitek k koeficientom turbulentne viskoznosti in difuzije, zato se gibalna količina ali kontaminant širijo v večji meri kot je fizikalno realno. Pojavlja se samo pri večdimenzionalnih modelih v primeru, ko se smer toka ne ujema s smerjo ene od koordinatnih osi. Možno jo je zmanjšati z zgoščevanjem numerične mreže (Četina, 1992).

Numerična difuzija povzroča težave predvsem pri metodi končnih razlik oziroma metodi končnih volumnov. Pri reševanju pasivnih polutantov (TD modul), lahko uporabimo metodo sledenja delcev (Širca, 1992), pri katerem se numerična difuzija ne pojavlja.

2.2.1.8 Modeli turbulence

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

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

Model PCFLOW3D se uporablja predvsem za simuliranje procesov v večjih vodnih telesih, kjer so dimenzije v horizontalnih smereh navadno za red velikosti večje od tistih v vertikalni, zato se koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije obravnavajo ločeno za horizontalno in vertikalno ravnino. Vertikalni koeficienti turbulentne viskoznosti N_v oziroma difuzije D_{vT} in D_{vs} so odvisni tudi od vpliva stratifikacije in se lahko v primeru stabilne stratifikacije bistveno zmanjšajo. V modelu je stopnja stratifikacije opisana z Richardsovim številom Ri (Četina, 1992).

Koeficienta turbulentne viskoznosti in difuzije sta med seboj povezana preko Prandtlovega oziroma Schmitovega števila, zato se v modelih turbulence ponavadi izračunava samo koeficient turbulentne viskoznosti.

Osnovna delitev modelov turbulence je na podlagi števila vsebovanih transportnih enačb, s katerimi se določijo karakteristične turbulentne količine.

2.2.1.8.1 Model brez transportnih enačb

Konstantne vrednosti turbulentnih koeficientov podamo v vertikalni in horizontalni smeri, ki jih določimo na podlagi meritev na fizičnem modelu, ali pa z umerjanjem. Model se uporablja predvsem v horizontalni smeri (N_h in D_h), saj v vertikalni smeri ne daje dovolj točnih rezultatov (Četina, 1992). Razmeroma še uporabne rezultate daje za tokove v velikih vodnih telesih, kjer ni bistveno povečanih lokalnih hitrosti.

Z razvojem računalniške tehnologije se na tržišču pojavljajo vse hitrejši in zmogljivejši računalniki. Ker s tem postajajo tudi računsko zelo zahtevni problemi obvladljivejši in se čas računanja skrajšuje, se uporaba modelov brez transportnih enačb opušča.

2.2.1.8.2 Pradtlov model mešalne dolžine

Koeficient turbulentne viskoznosti se določi na podlagi karakteristične dolžine turbulentnega toka, t.i. mešalne dolžine (l_m) in gradienta hitrosti. Mešalna dolžina je odvisna od vrste toka in

se spreminja od primera do primera. Za obravnavo 3D problemov v jezerih in v morjih je model mešalne dolžine slabše obdelan, zato se v modelu PCFLOW3D ne uporablja (Četina, 1992).

2.2.1.8.3 Model z eno transportno enačbo – Koutitas vertikalno

Modeli z eno enačbo se uporabljajo predvsem za izračun koeficientov v vertikalni smeri. Turbulentni tok je izražen s turbulentno kinetično energijo k , ki predstavlja neposredno merilo za intenziteto turbulence. V modelu PCFLOW3D je vgrajen tako imenovan model turbulence Koutitas (Četina, 1992 po Koutitas in O'Connor 1980), ki vsebuje poenostavljeno transportno enačbo za k v vertikalni ravnini:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{N_v}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) - N_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \epsilon = 0$$

σ_k je empirična konstanta, ϵ pa disipacija turbulentne kinetične energije. V večjih vodnih telesih, kot so morja in jezera, kjer je glavna gonilna sila plimovanje in/ali veter, se po Koutitasovi metodi predpostavi parabolično porazdelitev vertikalnega koeficienta turbulentne viskoznosti N_v po globini, z vrednostjo nič ob dnu in na površini ter maksimalno vrednostjo na višini $0.6 H$ (Četina, 1992). Model Koutitas se uporablja v kombinaciji z modelom Smagorinsky v horizontalni smeri. Čeprav je model v osnovi izpeljan za tokove, ki jih inducira veter, se v modelu PCFLOW3D večkrat uporablja tudi za simulacijo tokov zaradi dotokov ali iztokov, saj se tudi v takem primeru pojavijo največje turbulence v osrednjem predelu globine, tako da se lahko upošteva parabolična porazdelitev N_v po vertikali.

2.2.1.8.4 Model z dvema transportnima enačbama – k- ϵ model

Model vsebuje dodatno transportno enačbo, s katero lahko točneje določimo dolžino disipacije l_0 . Model k - ϵ se zelo veliko uporablja na področju 2D in 3D tokov. Vgrajen je v model PCFLOW2D, medtem ko v PCFLOW3D še ni bil vgrajen..

2.2.1.8.5 Model Smagorinsky-horizontalno

Model Smagorinsky je osnovan na eni enačbi. Do sedaj se je v modelu PCFLOW3D uporabljal za izračun nelinearnih turbulentnih koeficientov v horizontalni smeri v kombinaciji s Koutitasovim modelom za vertikalno smer. Pri tem modelu lahko spreminjamo brezdimenzijski koeficient C_{smaH} , s katerim uravnavamo izračun koeficienta turbulentne viskoznost zaradi gradientov hitrosti v horizontalni ravnini. Enačba za horizontalno ravnino je tako:

$$N_h = C_{smaH} \Delta x \Delta y \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Kjer je:

$\Delta x, \Delta y$ dimenzije kontrolnega volumna

C_{smaH} brezdimenzijski koeficient Smagorinsky, ki se določa empirično

Prednost metode Smagorinsky je v tem, da je koeficient C_{smaH} brez-dimenzijska empirična konstanta, iz česar sledi, da je turbulentna viskoznost funkcija gostote lokalne numerične mreže (Δx in Δy) in srednjih gradientov hitrosti v horizontalni ravnini.

V navodilih za uporabo modela POM (Princeton Ocean Model; Mellor, 2004) priporočajo uporabo vrednosti $C_{smaH} = 0.2$, vendar se je pri uporabi modela PCFLOW3D izkazalo, da je potrebno največkrat upoštevati večje vrednosti, cca 0.3 do 1.0.

2.2.1.8.6 Model z dvema transportnima enačbama – Mellor-Yamada

Osnovni model, t.i. model četrte stopnje, vsebuje večje število enačb, s katerimi so izražene hitrosti ter tlaki turbulentnih fluktacij, turbulentna viskoznost, disipacijske dolžine in empirične konstante. Ker je ta model za praktično uporabo preveč kompliciran, so bile izvedene določene poenostavitve in tako so nastali modeli 3, 2.5 in 2 stopnje. Nižja kot je stopnja modela, manjše je število uporabljenih enačb, manjša je natančnost, a hitrejši potek izračuna (Mellor in Yamada, 1982). Model, ki se v praksi največ uporablja (druge stopnje), je tako po številu uporabljenih enačb podoben $k-\epsilon$ modelu. Model Mellor–Yamada je vgrajen v program PCFLOW3D in velja za najbolj točnega, kar pa za sabo prinese tudi bolj zahtevne in

težje določljive robne pogoje. Čeprav model omogoča računanje koeficientov turbulentne viskoznosti tako v horizontalni kot v vertikalni smeri, se v modelu PCFLOW3D uporablja tudi v kombinaciji z enostavnejšim modelom Smagorinsky za horizontalno smer.

2.2.1.8.7 Model turbulence Smagorinsky–vertikalno

Model Smagorinsky, je na področju računalniškega modeliranja turbulentnih tokov v horizontalni ravnini dobro poznan in veliko uporabljen. Trenutno pa je še v fazi preizkušanja, t.i. model Smagorinsky-vertikalno. Po analogiji iz enačbe za horizontalno smer se enačbi za ravnino xz in yz glasita:

$$N_{v,x} = C_{smaV} \Delta x \Delta z \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$N_{v,y} = C_{smaV} \Delta y \Delta z \left(\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Tu je potrebno poudariti, da je PCFLOW3D sicer tridimenzionalni model, saj se upošteva komponente hitrosti v vseh treh smereh, ker pa so komponente hitrosti v vertikalni smeri w skoraj vedno za red velikosti manjše kot v horizontalnih smereh, smo gradiente vertikalne komponente po x in y lahko zanemarili, ne da bi s tem povzročili bistvene netočnosti. Koeficient C_{smaV} je močno odvisen od topografije, zato se ga določa z umerjanjem. Iz primerov, ki so podrobneje opisani v naslednjem poglavju, je razvidno, da sta koeficienta C_{smaH} , in C_{smaV} , v primeru, da sta horizontalne in vertikalne dimenzije celice istega reda velikosti, zelo podobna, močno pa se razlikujeta v primerih, kjer je vertikalna dimenzija celice za red velikosti manjša od horizontalnih dimenzij (npr. Tržaški zaliv).

Model Smagorinsky-vertikalno je najnovejši vgrajeni model, a je še v fazi preizkušanja. Prvi rezultati kažejo, da je model zelo zanesljiv in stabilen in je razmeroma natančen za določanje hitrosti, manj natančen pa je za izračune disperzije polutantov. V nadaljevanju diplomske naloge je opisanih več testnih simulacij, pri katerih smo preverjali ustreznost in točnost modela Smagorinsky-vertikalno na podlagi primerjave z rezultati ostalih vgrajenih modelov in z rezultati komercialnega programa CORMIX.

2.2.2 Transportno disperzijski (TD) modul

Ker je PCFLOW3D baroklini model, sta dve advekcijsko–difuzijski enačbi vsebovani že v HD modulu, saj se pri hidravličnem izračunu upošteva vpliv temperature in slanosti na gostoto vode in posredno na hitrostno polje. Enačbi sta v skoraj enaki obliki uporabni tudi za račun transporta in disperzije poljubnega aktivnega polutanta. Zato je bil model PCFLOW3D dopolnjen s samostojnim TD modulom, v katerem so dodatne advekcijsko-difuzijske enačbe zapisane za koncentracijo poljubnega nekonzervativnega polutanta C . Zadnji člen na desni strani enačbe predstavlja izvorno/ponorni člen, s katerim so opisane biokemične reakcije razgradnje ali nastajanja, ki se vršijo v nekonzervativnih polutantih (Žagar,1999).

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

h	debelina obravnavanega sloja
u, v	horizontalne hitrosti v posameznem sloju
w	vertikalna hitrost
D_h	horizontalni difuzijski koeficient
D_v	vertikalni difuzijski koeficient,
C	koncentracija poljubnega nekonzervativnega polutanta
x, y, z	koordinatne smeri
SRC	izvorno/ponorni člen
t	čas

TD je samostojni modul, ki se za aktivne polutante, ki vplivajo na hidrodinamične količine, rešuje v sklopu s HD. Za pasivne polutante pa enačbo rešujemo v okviru transportno-disperzijskega modula, pri čemer sta na voljo dve različni metodi. Enačbe za izbrani koordinatni sistem lahko izpeljemo namreč na dva načina: Eulerjev in Lagrangeov način. Eulerjev način (metoda končnih volumnov) je bolj razširjen in temelji na preučevanju

kontrolnega volumna, ki je zapolnjen z gibajočo se tekočino (preučujemo vektorska in skalarna polja). Drugi način je Lagrangeov (metoda sledenja delcev), pri katerem preučujemo delce tekočine. V modelu je direktno vgrajena metoda kontrolnih volumnov, medtem ko je metoda sledenja delcev v posebnem programu, vendar model PCFLOW3D daje rezultate v taki obliki, da so kompatibilni za uporabo v metodi sledenja delcev. Obe metodi sta podrobneje opisani v literaturi (Četina, 1992; Širca, 1996)

2.2.3 Sedimentacijski (SD) modul

Poleg raztopljenih snovi se v vodi nahajajo tudi suspendirani delci lebdečih plavin, ki lahko nase vežejo različne polutante in tako posredno vplivajo na kakovost vode. Koncentracija lebdečih plavin vpliva tudi na stopnjo insolacije in s tem na vršitev fotosinteze in drugih bioloških procesov. Sedimentacijski modul, ki omogoča simulacijo transporta nekohezivnih delcev lebdečih plavin, je osnovan na enačbah iz literature (Žagar, 1999 po van Rijn, 1993), na podlagi katerih se določi sedimentacijska hitrost, in na tridimenzionalni adveksijsko-disperzijski enačbi, ki je za posamezni sloj debeline h :

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) + \frac{\partial}{\partial z}((w - W_s)hC) = \frac{\partial}{\partial x}(hD_h \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hD_h \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(hD_v \frac{\partial C}{\partial z})$$

- u, v horizontalne hitrosti v posameznem sloju
- w vertikalna hitrost
- h debelina posameznega sloja
- D difuzijski koeficient
- Ws hitrost usedanja delcev plavin (sedimentacijska hitrost)
- C koncentracija lebdečih plavin
- x,y,z koordinatne smeri

Reševanje transportno-disperzijske enačbe za lebdeče plavine, ob ustreznih robnih pogojih, poteka enako kot reševanje enake enačbe za temperaturo, slanost ali koncentracijo poljubnega polutanta.

Računamo lahko transport plavin v rekah, jezerih in morju, transport polutantov vezanih na delce plavin, pa tudi dolgoročne geomorfološke procese v okolju. Dodan je tudi vpliv valovanja na strižne napetosti ob dnu, saj je prav kombiniran vpliv tokov in valovanja ob močnih vetrovih poglavitni vzrok za resuspendiranje usedlega materiala. Upoštevamo lahko tudi različne hidrodinamične robne pogoje, vgrajeno je usedanje in resuspendiranje delcev ter račun debeline sedimentacije oziroma erozije (Žagar, 1999).

Zaradi velike raznolikosti med posameznimi tipi plavin je potrebno uporabiti različne enačbe, ki opisujejo ustrezen tip plavin. Ta modul zaenkrat ne omogoča simulacije rinjenih plavin ob dnu.

2.2.4 Bio-geokemični (BGK) modul

Zaenkrat je ta modul prirejen samo za simulacijo procesov pretvorb nekaterih komponent živega srebra (Hg^0 , Hg^{II} , $MMHg$), ki je lahko raztopljen v vodi, vezan na delce plavin ali na plankton. Modul upošteva bio-geokemične procese pretvorb (metilacijo, demetilacijo, redukcijo in oksidacijo), izmenjavo med vodo in zrakom ter med vodo in sedimentom. Enačbe v BGK modulu so sicer razmeroma enostavne. Koeficienti reakcij pa so odvisni od okoljskih parametrov ter spremenljivi v prostoru in času, tako da lahko z njimi opišemo procese pretvorb v naravnem okolju.

3 RAČUNSKI PRIMERI

Z namenom preizkušanja novega modela turbulence Smagorinsky-vertikalno in umerjanja koeficienta C_{smav} , sem v sklopu svoje diplomske naloge izvedla več testnih simulacij za HD in TD. Rezultate modela Smagorinsky-vertikalno sem primerjala s tremi modeli turbulence za vertikalno smer, ki so vgrajeni v model PCFLOW3D:

metoda P: Koutitas po *hibridni* numerični shemi (KOU)

metoda M: Mellor–Yamada po numerični shemi Quick (MYQ)

metoda E: Mellor–Yamada po *hibridni* numerični shemi (MYU)

Pri vseh treh metodah, kot tudi pri metodi Smagorinsky-vertikalno, sem za horizontalno smer uporabila model turbulence Smagorinsky-horizontalno.

V računskem primeru CORMAL sem uporabila tudi komercialni program CORMIX, ki omogoča modeliranje transporta in disperzije iztočnih curkov. Zaradi drugačne zasnove in različnih omejitev programa CORMIX in PCFLOW3D primerjava ni dal dobrih rezultatov. Prikazanih pa je nekaj primerov rezultatov in podrobnejša obrazložitev delovanja samega programa CORMIX.

V zadnjem računskem primeru "Terminal v Tržaškem zalivu" pa sem prikazala uporabo modela Smagorinsky-vertikalno za izračun transporta in disperzije živega srebra, ki bi ga povzročila gradnja in obratovanje plinskega terminala v Tržaškem zalivu.

3.1 Primer ŠKATLA

V tem računskem primeru sem primerjala rezultate HD modula. V izračunu je upoštevana ena transportno-disperzijska enačba za toplotno porazdelitev. Obravnavan je bazen pravokotne oblike, v katerega iz podvodne odprtine doteka topla voda. Iztok pa je skozi odprtino v vrhnjem sloju na drugem koncu bazena. Obravnavano računsko območje je razdeljeno na kontrolne volumne konstantnih dimenzij $Dx = 10$ m in $Dy = 7$ m. Število kontrolnih

volumnov v x smeri je $NI = 12$, v y smeri pa $NJ = 7$ (Slika 3.1- 1). Po globini je skupno 8 slojev oziroma 10 računskih z dvema "mrtvima", debeline 1m (Slika 3.1- 2).

3.1.1 Podatki

Dimenzije bazena:	100 m / 35 m / 8 m
Prerez podvodnega izpusta:	10 m × 1 m
Prerez na iztoku iz bazena:	7 m × 1 m
Začetna temperatura vode v kanalu:	10 °C
Temperatura vtočnega curka:	30 °C
Hitrost vtočnega curka:	0.35 m/s
Čas trajanja simulacije:	1h
Časovni interval:	4 s

3.1.2 Umerjanje koeficienta Smagorinsky-vertikalno

Izračun v horizontalni smeri je v vseh primerih potekal po modelu turbulence Smagorinsky s koeficientom za horizontalno smer $C_{SmaH} = 0.2$. Koeficienta za horizontalno in vertikalno smer sta v splošnem različna, saj sta odvisna od dimenzij obravnavanega območja, predvsem od razmerja dimenzij celic v horizontalni in vertikalni smeri (poglavje 2.2.1.8.7). Najprej sem izvedla umerjanje koeficienta za vertikalno smer na podlagi primerjave rezultatov HD po metodi SMV in ostalih treh metodah. Pri tem sem se opirala predvsem na rezultate metode MYQ, ki daje najtočnejše rezultate. Primerjavo sem izvedla na podlagi vizualne ocene hitrostnega polja, splošne oblike toka ter razporeditve temperatur v posameznem prerezu. Primerjava rezultatov HD za različne koeficiente C_{SmaV} v sloju XY9 je prikazana na sliki (Slika 3.1- 3). Pri izbiri koeficienta $C_{SmaV} = 0.4$ je turbulentna viskoznosti in difuzija prevelika, zato je tok manj izrazit in bolj razpršen. Ugotovila sem, da je ujemanje hitrostnega polja metode SMV in MYQ najboljše pri koeficientu $C_{SmaV} = 0.1$. Kljub relativno dobremu ujemanju polja hitrosti, so bila odstopanja pri temperaturah še vedno velika.

3.1.3 Rezultati in primerjava metod turbulence

Naj poudarim, da bo v nadaljevanju največ pozornosti namenjene primerjavi metode SMV z metodo MYQ. Razlog je v tem, da je model turbulence Mellor-Yamada najbolj točen od uporabljenih. Po drugi strani pa je numerična metoda QUICK tudi priznana točnejša od *hibridne* sheme predvsem glede numerične difuzije. Drugi dve metodi pa bosta služili le za oporo in dodatno informacije.

Na slikah, ki prikazujejo hidrodinamiko v bazenu, je s puščicami ponazorjena cirkulacija vode. Velikost puščice nam kaže velikost vektorja hitrosti, pri čemer je potrebno upoštevati tudi merilo prikazano pod sliko. Z njegovo pomočjo lahko odčitamo dejanske velikosti hitrosti in tudi dejanske razdalje. Rezultati temperaturne porazdelitve v posameznih prerezih so ponazorjeni z izolinijami, ki sem jih pripravila s pomočjo grafičnega orodja *Surf*.

3.1.3.1 Prerez XY3, XY5 in XY9

Polje hitrosti:

V prerezu XY3 (*Slika 3.1- 4*) se HD sliki na prvi pogled dobro ujemata, saj so predvsem smeri hitrosti v posameznih točkah zelo podobne. Podrobnejša analiza pa pokaže, da so velikosti posameznih komponent hitrosti pri MYQ metodi tudi do dvakrat večje od tistih pri metodi SMV. Največje razlike se širijo vzdolž levega brega in sprednjega roba bazena. Ker so pri metodi SMV hitrosti toka od mesta izpusta dalje občutno manjše, bi pričakovala, da se bo topla voda zadrževala bolj ob sprednjem robu. Metoda MYU se pričakovano boljše ujema kot metoda SMV. Najslabši so rezultati metode KOU.

Tudi v prerezu XY5 (*Slika 3.1- 7*) je potek toka podoben. Pri obeh metodah (SMV in MYQ) se pojavi izrazitejša cirkulacija vode po robovih bazena, medtem ko je sredinski pas skoraj v mirovanju. Smeri hitrosti so zelo podobne. Po velikostih so odstopanja največja pri komponentah v x smeri, ponekod tudi za več kot faktor dva. Tudi pri metodi MYU so komponente hitrosti manjše kot pri MYQ, najmanjše so pri metodi KOU.

V nivoju XY9 (*Slika 3.1- 9*) je ujemanje še najboljše. Pri obeh metodah se tok iz področja nad vtokom preusmeri proti iztoku iz bazena. Ob levem bregu se pojavi mrtva cona. Smeri se

ujemajo. Nekaj manjših razlik se pojavi le tik nad mestom vtoka, kjer je hitrost pri metodi SMV usmerjena nekoliko bolj v y smeri. Pri velikostih so odstopanja manjša kot v prejšnjih nivojih. Zanimivo je, da doseže metoda SMV enako dobro ali celo boljše ujemanje kot metoda MYU.

V vertikalnem prerezu XZ6 (*Slika 3.1- 12*) so vrednosti hitrosti pri metodi SMV skoraj za polovico manjše, medtem ko se smeri dobro ujemajo. Hitrosti so manjše tudi pri metodi MYU. V vertikalnem prerezu YZ3 (*Slika 3.1- 14*) pa je ujemanje HD zelo dobro.

Potek izolinij in vrednosti temperatur:

V prerezu XY3 poteka pri obeh metodah (SMV in MYQ) transport in disperzija toplote na podoben način (*Slika 3.1- 5*). Tik ob vtoku nastopi temperaturni skok, saj na vtočni curek tople vode bočno pritiska relativno močan tok hladnejše vode, ki preprečujejo širjenje curka vzdolž x osi. Zato so na tem mestu izolinije postavljene zelo na gosto. Pri vrednostih temperatur pa so odstopanja izrazitejša. V prvem kontrolnem volumnu za izpustom ($i=3, j=6, z=3$) znaša vrednost temperature pri metodi MYQ 24.65°C , pri SMV pa le 20.28°C . Tudi pri drugih dveh metodah sta temperaturi nižji. Pri MYU znaša vrednost temperatur 20.52°C in pri KOU 20.26°C (*Slika 3.1- 6*).

V prerezu XY5 (*Slika 3.1- 8*) in prerezu XY9 (*Slika 3.1- 10*) je situacija podobna. Potek izolinij se ujema, medtem ko so temperature pri metodi SMV, kljub manj izraženi hidrodinamiki, za več kot 2°C nižje. Zanimivo je, da so tudi pri drugih dveh metodah MYU in KOU (*Slika 3.1- 11*) vrednosti temperatur nižje in bolj podobne tistim pri metodi SMV.

V vertikalnih prerezih XZ6 (*Slika 3.1- 13*) in YZ3 (*Slika 3.1- 15*) je ujemanje izolinij zelo dobro. V spodnjih plasteh pod mestom iztoka se zadržuje hladna voda, ker se curek tople vode dviga proti površju. Kot je bilo navedeno že pri prejšnjih slikah se pojavijo velike razlike vrednosti temperatur že takoj na vtoku (maksimalno do 4.5°C).

3.1.4 Zaključek

Polja hitrosti se pri metodah SMV in MYQ v glavnem dobro ujemajo. Velikosti hitrosti so pri metodi SMV nekoliko manjše, lokalno tudi za več kot faktor dva. Naj poudarim, da so tudi pri metodi MYU, ki uporablja manj točno *hibridno* numerično shemo, vrednosti hitrosti prav tako manjše od tistih pri metodi MYQ. Posledice odstopanj metode SMV napram metodi MYQ lahko delno pripišem *hibridni* numerični shemi, delno pa tudi modelu Smagorinsky, ki je manj natančen in bolj enostaven od modela Mellor-Yamada.

Na razporeditev temperaturnih izolinij vpliva predvsem hidrodinamika, saj lahko večino odstopanj pripišemo razlikam v velikosti ali smeri hitrosti v posameznih točkah računskega območja.

Največje razlike se pojavijo pri rezultatih transporta in disperzije toplote. Glede na to, da so vrednosti temperatur pri metodi SMV podobne tistim pri metodi MYU in metodi KOU, sklepam, da so odstopanja posledica numerične difuzije. Pri vseh treh metoda je namreč uporabljena *HIBRIDNA* numerična shema, katere glavna pomanjkljivost je ravno numerična difuzija (poglavje 2.2.1.7). Izračunane vrednosti koeficienta turbulentne difuzije so prevelike, zato se toplota v simulacijah hitreje razprši.

Smatramo lahko torej, da je simulacija hitrostnega polja po novi metodi dobro. Ker imamo opravka z baroklinim matematičnim modelom, kar pomeni, da pri izračunu hidrodinamičnih količin porazdelitev temperature vpliva na gostoto in s tem na končni rezultat hidrodinamičnega modula, numerična difuzija vpliva tudi na komponente hitrosti. Ocenjujem, da bi z uporabo kompleksnejše numerične sheme QUICK pri modelu turbulence Smagorinsky-vertikalno, bila tako porazdelitev temperature kot tudi rezultati hitrostnega polja še bolj podobni tistim pri modelu MYQ.

V računskem primeru ŠKATLA daje torej model turbulence Smagorinsky-vertikalno pri modeliranju HD zelo dobre rezultate, ki so primerljivi z rezultati modela turbulence Mellor-Yamada, medtem, ko so za razpored temperature rezultati slabši, v nekaterih prerezih zelo slabi.

3.2 Računski primer CORMAL

Za preverjanje ustreznosti in pravilnosti novega modela turbulence Smagorinsky-vertikalno, vgrajenega v PCFLOW3D, smo uporabili tudi komercialni program CORMIX, ki je namenjen za analizo izpustov onesnaženih voda v vodno telo.

Program CORMIX je bil razvit na Univerzi Cornell v ZDA. Namenjen je predvsem za simulacijo tokov v bližini iztokov, v t.i. bližnjem polju, omogoča pa upoštevanje temperaturnih razlik. Vertikalne komponente hitrosti so lahko razmeroma velike v primerjavi s horizontalnimi – ocenjujemo da do reda 20 ali celo 30% horizontalnih. Program lahko simulira samo stalni tok. Dejanski prečni prerez vodnega telesa pa je potrebno poenostaviti na pravokotni kanal, ki je lahko bočno omejen z bregovi ali tudi neomejen.

PCFLOW3D je namenjen simulaciji tokov v večjih vodnih telesih. Simulira lahko nestalni tok kot tudi vpliv toplotnih razlik v toku. Za detajlne tokove v neposredni bližini iztočnih curkov je delno uporaben. Uporaben je le dokler vertikalne komponente hitrosti ne presežejo cca 10% vrednosti horizontalnih hitrosti, kajti v modelu je dinamična enačba v vertikalni smeri poenostavljena v hidrostatično enačbo (*poglavje 2.2.1.2*). Vendar pa s tem modelom lahko simuliramo tokove v 3D polju popolnoma poljubne oblike.

Zavedali smo se, da PCFLOW3D ne more dobro simulirati hitrih iztočnih curkov. Kljub temu smo izvedli nekaj simulacij istih primerov kot z modelom CORMIX. S tem smo želeli preveriti omejitve programa PCFLOW3D.

3.2.1 Podatki

Obravnavala sem primer prizmatičnega kanala, po katerem teče voda. Vz dolž toka se pod pravim kotom priključi stranski podvodni izpust vode s povišano temperaturo in desetkrat večjo hitrostjo.

Dimenzije kanala: 400 m / 80 m / 5 m

Hitrost toka na začetku kanala: $u_z = 0.15$ m/s, $v_z = 0$ m/s

Pretok na začetku kanala:	$Q_Z = 0.15 \text{ m/s} \times 80 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} = 54 \text{ m}^3/\text{s}$
Hitrost vtočnega curka:	$u_0 = 0 \text{ m/s}, v_0 = -1.5 \text{ m/s}$
Temperatura vtočnega curka:	34 °C, 25 °C, 22 °C
Temperatura vode v kanalu (začetno stanje):	22 °C
Čas trajanja simulacije:	1 h

Ker se programa PCFLOW3D in CORMIX že pri načinu določanja robnih pogojev in vhodnih podatkov razlikujeta, sem pripravo podatkov ter rezultate opisala ločeno.

3.2.2 MODEL CORMIX

CORMIX je softverski program za analizo, napovedovanje in projektiranje izpustov strupenih snovi ali bolj konvencionalnih onesnaženih voda v različna vodna telesa. Vsebuje tri podprograme, ki se glede na obliko izpusta delijo na: CORMIX1, ki služi za analizo potopljenega enojnega izpusta, CORMIX2, ki se uporablja za sistem difuzerjev, in CORMIX3, ki služi za izpuste s prosto gladino (površinski izpusti). Program CORMIX lahko simulira le stalni tok. Zasnovan pa je na enačbah teorije curka.

3.2.2.1 Osnove programa

Opis programa je povzet po priročniku za CORMIX (Jirka and al., 1996).

Lastnosti izpusta se nanašajo na geometrijo odprtine in na karakteristike iztekajočega se curka. Lastnosti toka so podane s pretokom, izračunano gibalno količino toka ter vzgonom oziroma gostotnim tokom. Vzgonski tok ponazarja relativno razliko gostot onesnažene vode in vode glavnega vodnega telesa v kombinaciji z gravitacijskim pospeškom. V programu se glede na hidrodinamične lastnosti toka ločijo dve izraziti področji. V prvem področju, ki je v bližini iztoka, ima na smer curka in stopnjo premešanja močan vpliv geometrija iztočne odprtine. V drugem področju, ko turbulentni curek potuje dalje, stran od izvora, postanejo karakteristike iztoka manj pomembne. Tu na razpršitev in smer curka vpliva predvsem gostotno gibanje in pasivna difuzija kot posledica turbulenc v glavnem toku.

3.2.2.2 Bližnje polje

Iztok iz podvodnega izpusta vzpostavi diskontinuiteto hitrosti med tokom izpusta in tokom okolice, kar povzroča velike strižne napetosti in posledično močno turbulenco. Širina območja, na katerem se vrši to močno turbulentno mešanje, se z oddaljevanjem od mesta izvora v smeri toka povečuje, saj se vanj vključuje vedno več vode zunanjšega, manj turbulentnega toka. V programu so obravnavane tri različne oblike curka. Oblika *popolnega curka*; začetni tok zaradi gibalne količine si lahko predstavljamo kot brizganje z veliko hitrostjo, kar povzroča močno turbulentno mešanje, oblika *vzgonskega curka*; začetnemu gostotnemu toku sledi lokalno vertikalno pospeševanje, kar nato povzroči turbulentno mešanje. V splošnih primerih se pojavi kombinacija toka zaradi gibalne količine in gostotnega toka, t.i. *plavajoči curek*. Zanj je značilno ozko področje turbulentnega toka, v katerem poteka močno mešanje. Na mešanje plavajočega curka v nadaljevanju vpliva tudi tok vodnega telesa, ki postopoma ukrivlja plavajoči curek v smeri glavnega toka, kar povzroča dodatno mešanje. Stratifikacija zavira vertikalni pospešek, kar lahko privede do stanja, ko je plavajoči curek ujet na določeni višini.

3.2.2.3 Daljne polje

Na tem območju se simulira lateralno širjenje že nekoliko premešane segrete vode, ki jo glavni tok odnaša dolvodno. Ta proces je posledica gostotnih tokov, ki se pojavijo zaradi razlike v gostoti med tem, delno premešanim tokom odpadne vode, in glavnim tokom. Upoštevan je tudi pojav pasivne difuzije, ki se pojavi na relativno veliki oddaljenosti od izpusta, kjer postane turbulenca glavnega toka ključni mešalni mehanizem. Pasivna difuzija se širi po širini in višini do interakcije z robom struge.

3.2.2.4 Vhodni podatki primera CORMAL

3.2.2.4.1 Podatki vodnega telesa

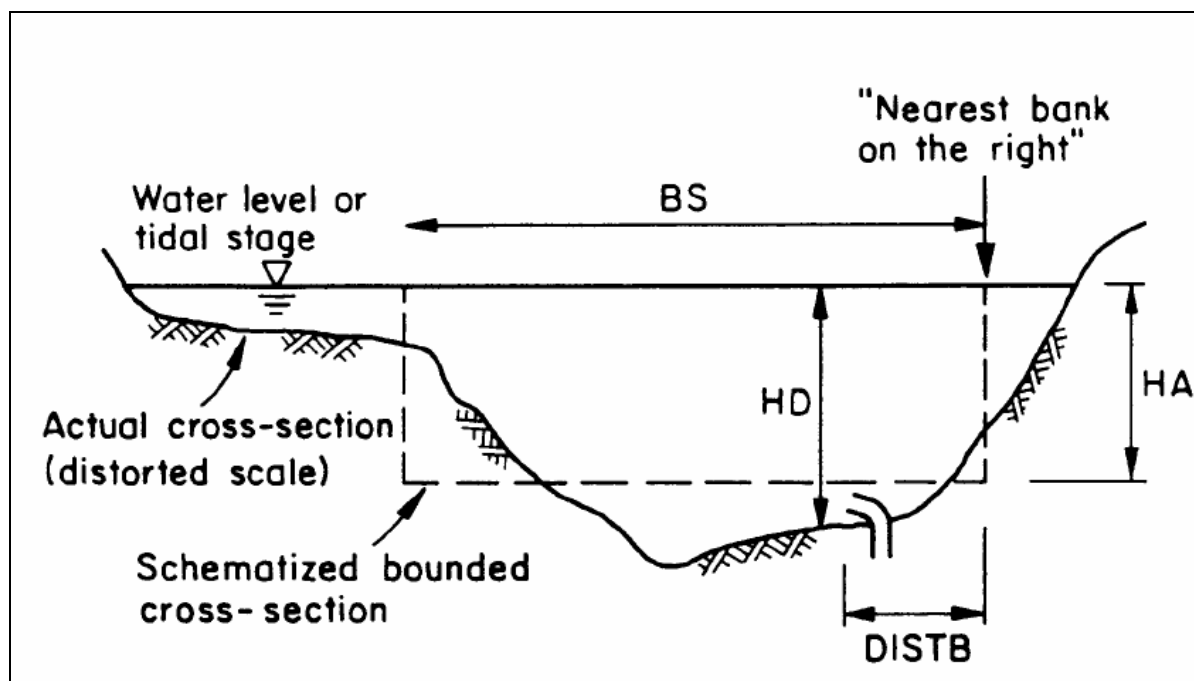
Povprečna globina	HA = 5 m
Globina na vtoku izpusta	HD = 5 m
Širina vodotoka	BS = 80 m
Temperatura	22°C

Hitrost glavnega toka	$u_0 = 0.15 \text{ m/s}$
Izguba toplote preko površja	$15 \text{ W/m}^2/\text{°C}$

Pogoji v vodnem telesu so podani z geometrijskimi in hidrografskimi značilnostmi v okolici izpusta. Meje vodnih teles imajo v primeru interakcije z iztekajočim curkom na mestu izpusta velik vpliv na proces mešanja okoljske in onesnažene vode, zato se pri vnosu podatkov obravnava dva ločena primera, in sicer bočno omejena in neomejena vodna telesa. Če je interakcija mešalnega področja s tem oddaljenim bregom nemogoča, potem tak primer obravnavamo kot neomejen ("unbounded"). Ker bom s programom CORMIX analizirala primer bočnega izpusta v strugi reke, bom podrobneje opisala vnos podatkov samo za primer bočno omejenih vodnih teles.

Program zahteva, da se dejanski prečni prerez vodnega telesa poenostavi na pravokotni kanal. Pri poenostavljanju dejanske geometrije struge vodotoka v prizmatični kanal z enako površino prečnega prereza kot dejanski, je potrebno morebitne plitvine v bližini bregov zanemariti. Pri vnosu podatkov za širino na površini vodotoka (BS) in globino vode (HA) moramo podati vrednosti pravokotnega prečnega prereza, katerega površina je enakovredna dejanski.

Da točneje opišemo lokalne hidrostatične značilnosti, zahteva program specifikacijo dejanske globine vode na mestu izpusta (HD). Na tem mestu pride tudi do kontrole, ki ne dopušča, da bi se lokalna globina razlikovala od povprečne globine za več kot 30%. Ta omejitev je dodana z namenom, da se prepreči napačna uporaba programa v močno spremenljivih rečnih kanalih. Podatek HD vpliva na mešanje v bližnjem polju, medtem ko ima HA večji vpliv na mešanje v oddaljenem polju.



Grafični prikaz priprave vhodnih podatkov za prečni prerez omejenega vodnega telesa (Jirka and al., 1996, str. 29).

Za opis pretočnih lastnosti okolja je potrebno podati pretok Q_a ali hitrost U_a glavnega vodnega toka. Analizi primerov s stoječo vodo se raje izognimo, ker bo program napovedal obnašanje le za bližnje polje, saj za stalni tok v daljnem polju potrebuje podatek o srednji hitrosti toka.

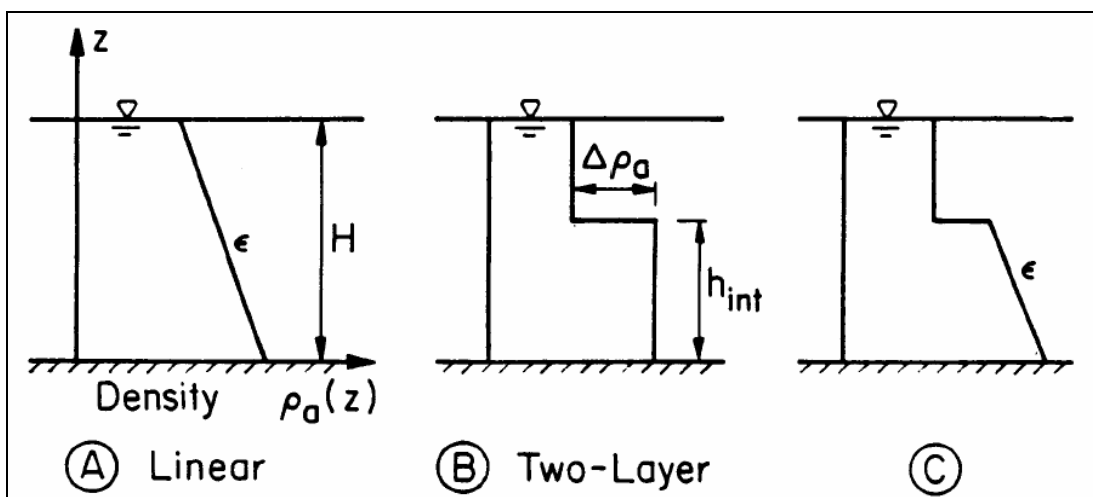
Manningov (n) ali Darcy-Weisbachov koeficient (f) je potrebno vnesti kot mero za opis hrapavosti kanala.

Oblika kanala lahko vpliva na mešanje v oddaljenem polju, saj vsaka nepravilnost povečuje vpliv turbulentne difuzije, ki vpliva na procese pasivnega mešanja. V CORMIX-u je omogočena izbira treh tipov kanala glede na stopnjo meandriranja.

Določitev gostote glavnega toka

Program najprej vpraša ali je voda glavnega toka sladka (fresh water) ali slana (non-fresh). Nato pa zahteva vnos temperature ali gostote vode. V nadaljevanju uporabnik označi ali naj bo gostota enakomerna po celotnem prerezu ali neenakomerna. To je še posebej pomembno

na območju, kjer se curek dviguje (*vzgonski curek*). Za primer, da je razporeditev gostote neenakomerna, program zahteva, da se dejanska (merjena) vertikalna razporeditev poenostavi in določi enega od treh tipov prikazanih na spodnji sliki.



Tipi stratifikacije (Jirka and al., 1996, str. 34).

Tip A je linearno spreminjanje gostote po globini. Tip B je dvoslojni s konstantno gostoto in vmesnim skokom. Tip C pa ima konstantno gostoto na površinskem sloju in linearno spreminjanje gostote v spodnjem sloju, sloja sta med seboj ločena s skokom.

Po izboru tipa stratifikacije je potrebno vstaviti ustrezne gostote (ali temperature) in višino linije, kjer nastopi skok, torej, kjer se gostota občutno spremeni (*HINT*). Če rezultat simulacije pokaže, da se oblak odpadne vode zaustavi na določeni globini, potem je potrebno testiranje več primerov z različnimi tipi stratifikacije in vrednostmi parametrov.

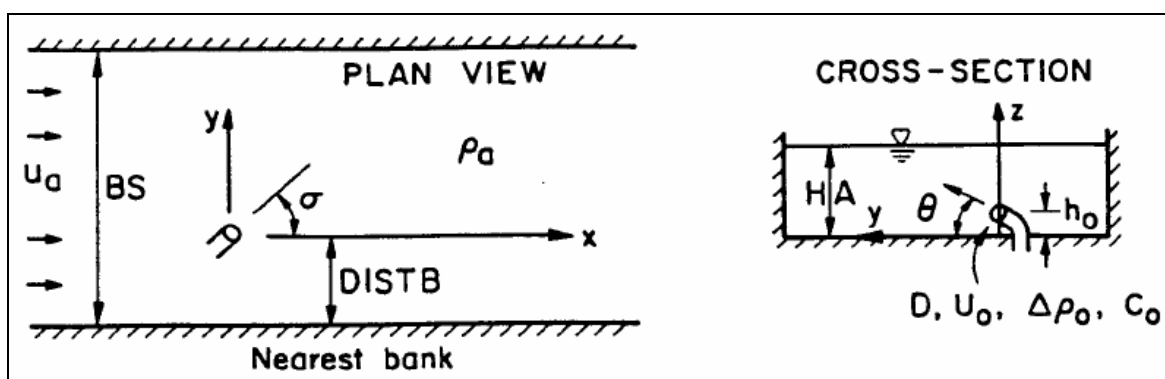
Hitrost vetra

Informacija o hitrosti vetra (program smeri vetra ne upošteva) je bolj kot v bližnjem polju pomembna v daljnem polju, kjer lahko vpliva na obnašanje širjenja oblaka onesnažene vode, toliko bolj, če imamo opraviti z izpustom segrete vode.

3.2.2.4.2 Podatki podvodnega izpusta CORMIX1

Hitrost	$u_0 = 1.50$ m/s
Lega	levi breg

Oddaljenost od brega	$DISTB = 0.1 \text{ m}$
Oddaljenost od dna	$h_0 = 1 \text{ m}$
Premer okrogle odprtine	$D = 1 \text{ m}$
Horizontalni kot izpusta	$SIGMA = 270^\circ$
Vertikalni kot izpusta	$THETA = 0^\circ$
Temperatura	34, 25, 22 [$^\circ\text{C}$]



Grafični prikaz vhodnih podatkov za podvodni izpust (Jirka and al., 1996, str. 36).

Geometrija izpusta

Za določitev referenčnega koordinatnega sistema in orientacije izpusta podprogram *CORMIX1* zahteva specifikacijo šestih podatkov, ki so prikazani na zgornji sliki: lokacija bližjega brega (levi ali desni), oddaljenost od najbližjega brega $DISTB$, polmer izpustne cevi (opomba: pri podatku o prečnem prerezu izpusta je potrebno upoštevati morebiten nastop kontrakcije, ki bi lahko doletel iztekajoči curek na koncu cevne nastavka), višina izpusta h_0 , vertikalni kot izpusta $THETA$ med centralno linijo izpustne cevi in horizontalno ravnino in horizontalni kot izpusta $SIGMA$ merjen nasproti urinega kazalca od smeri toka glavnega vodotoka (x -os) do pravokotne projekcije centralne linije izpusta na horizontalno ravnino.

Z namenom, da se prepreči morebitne nepravilne aplikacije sistema, *CORMIX1* preveri skladnost vnesenih podatkov z naslednjimi kriteriji:

- višina izpusta HO ne sme presežati ene tretjine lokalne globine vode HD ,

- vrednost premera izpustne cevi ne sme presežati vrednosti HD za $THETA > 45^\circ$ in vrednosti $HD/3$ za $THETA < 45^\circ$,
- višina linije, kjer nastopi občutna sprememba gostote $HINT$, mora biti med 40% in 90% HD .

Tok iz izpusta

Za specifikacijo lastnosti toka je potrebno podati tri podatke: pretok Q_0 ali hitrost iztoka U_0 , gostoto ali temperaturo vode in koncentracijo snovi oziroma polutanta, katerega transport preučujemo.

3.2.3 Rezultati

3.2.3.1 Kvalitativni rezultati: opis toka

Opisna sporočila

Opisna sporočila vsebujejo osnovne vnesene informacije, opisujejo ključna računske predpostavke in opozarjajo na pogoje, ki vplivajo na občutljivost analize.

Račun dolžinskih mer

Element programa izračuna tako imenovane dolžinske mere, ki določajo vpliv posameznih hidrodinamičnih procesov, ki se pojavljajo na mestu mešanja iztočne vode z vodo glavnega vodnega telesa. Fizikalni pomen dolžinskih mer je prikazan na spodnji sliki.

Dolžina prehoda curek/oblak [m]: $L_M = M_0^{3/4} / J_0^{1/2}$

Dolžina curek/glavni tok [m]: $L_m = M_0^{1/2} / u_a$

Dolžina oblak/glavni tok [m]: $L_b = J_0 / u_a^3$

Dolžina curek/stratifikacija [m]: $L_m = M_0^{1/4} / \epsilon^{1/4}$

Dolžina oblak/stratifikacija[m]: $L_b = J_0^{1/4} / \epsilon^{3/8}$

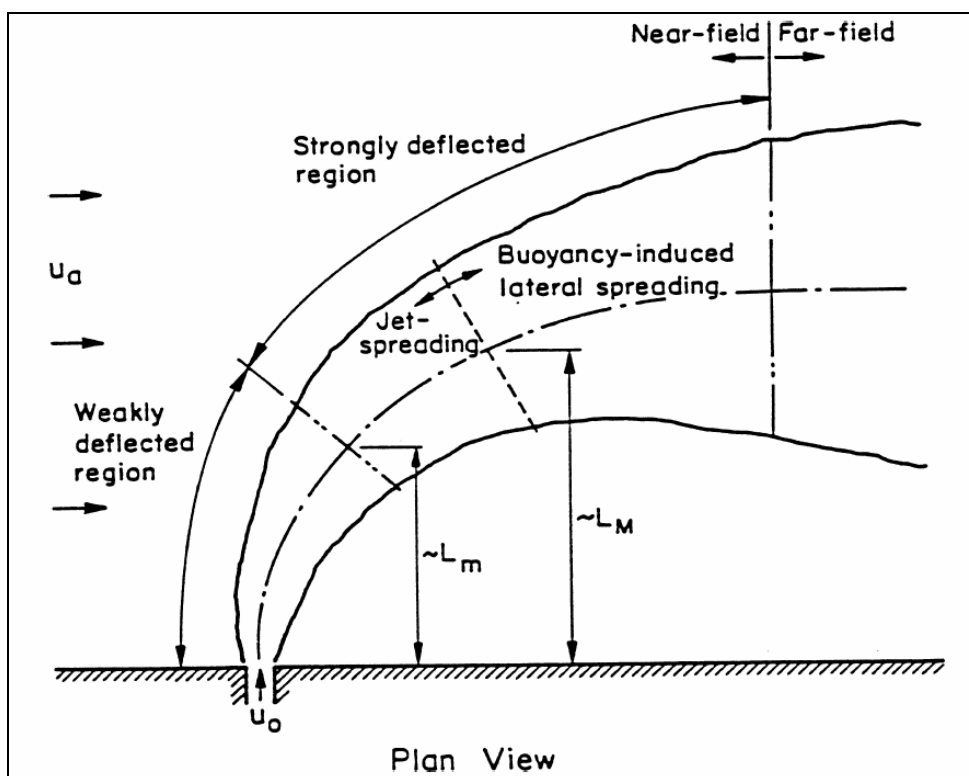
Pomen oznak:

$M_0 = u_0 Q_0$; kinematični vztrajnostni tok (kinematic momentum flux)

$J_0 = g'_0 Q_0$; kinematični vzgonski tok oz. gostotni tok (kinematic buoyancy flux)

ϵ gradient stratifikacije (glej Slika 7) (ambient buoyancy gradient)

$g'_0 = g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a$; pospešek zaradi razlike v gostoti na mestu izpusta



Prikaz fizikalnega pomena dolžinske mere L_M in L_m (Jones et al., 1996, str. 20).

L_m je razdalja od brega do točke, kjer se zgodi prehod iz območja z majhnim v območje z večjim odklonom zaradi vpliva glavnega toka. L_M je razdalja od brega do točke, kjer se zgodi prehod iz območja, kjer je mešanje posledica vztrajnosti toka na območje, kjer mešanje povzroča gostotni tok, zato se na tem območju začne iztočni curek širiti tudi lateralno. L_b ima podoben pomen kot L_m , le da v vertikalni smeri, medtem ko sta L'_m in L'_b povezani s stratifikacijo.

Preglednica 3.2.1: Vrednost dolžinskih mer za tri primere izračunane s programom CORMIX1

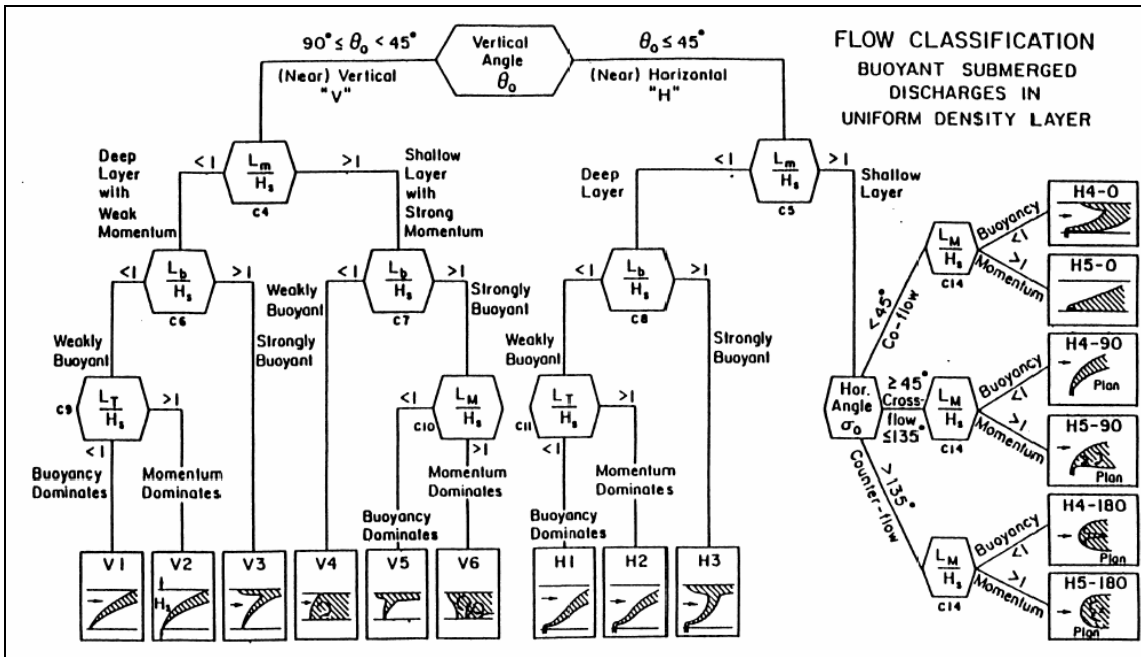
primer	$T_{\text{izt}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	$Q_0 [\text{m}^3/\text{s}]$	$M_0 [\text{m}^4/\text{s}^2]$	$J_0 [\text{m}^4/\text{s}^3]$	$L_M [\text{m}]$	$L_m [\text{m}]$	$L_b [\text{m}]$
CMX01	34	12	1.178	1.767	0.03939	7.72	8.86	11.67
CMX02	25	3	1.178	1.767	0.00840	16.72	8.86	2.49
CMX03	22.01	0.01	1.178	1.767	0.00003	298.87	8.86	0.01

Klasifikacija toka

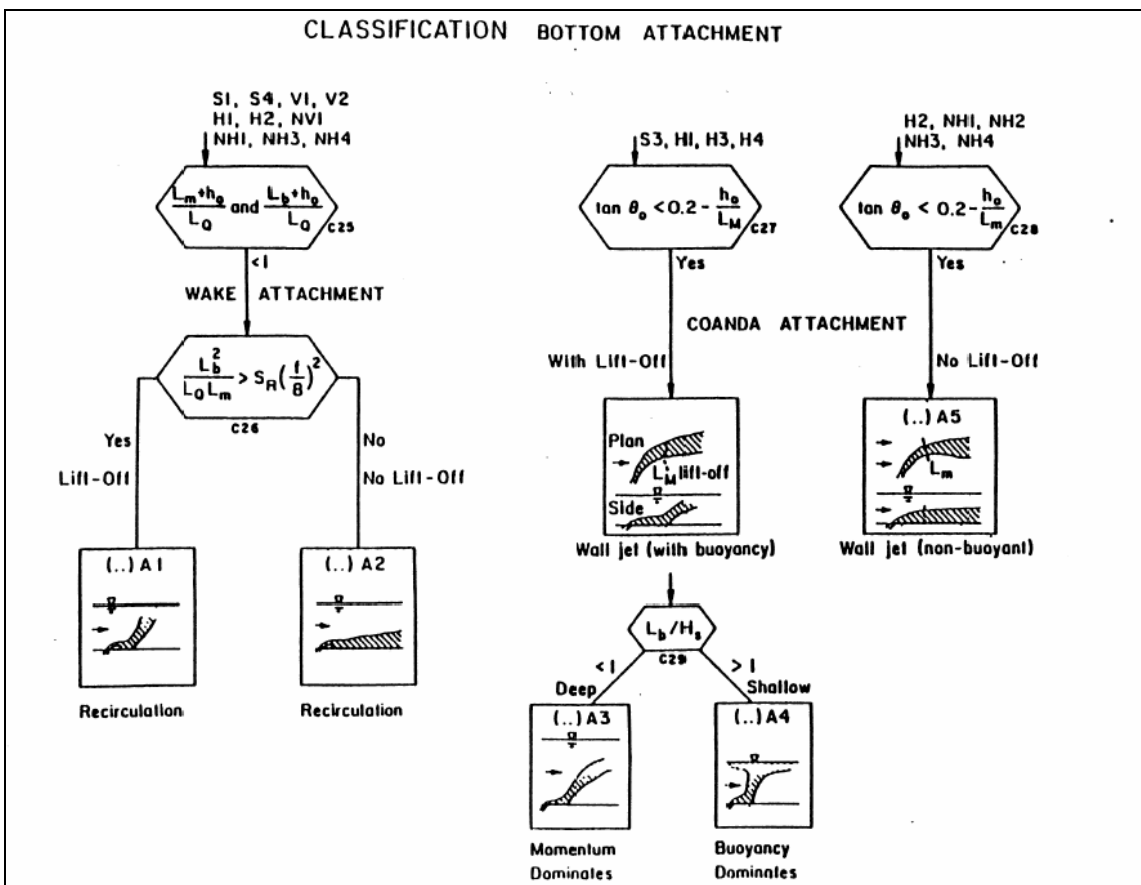
Program na podlagi hidrodinamike toka razvrsti obravnavane primere po razredih. Že samo v podprogramu CORMIX1, kjer so obravnavani podvodni izpusti, je 35 različnih razredov. Vsak razred je podrobno opisan. V grobem so tokovi pri CORMIX1 razdeljeni v štiri kategorije:

- Razred S: Tokovi, ki so ujeti v določenem sloju zaradi vpliva stratifikacije.
- Razred V,H: Tokovi, pri katerih se pojavi pozitiven vzgon.
- Razred NV, NH: Tokovi, pri katerih se pojavi negativen vzgon (curek sili k tlom).
- Razred A: Tokovi, ki se prilepijo na dno zaradi dinamičnega delovanja okoljske vode (*COANDA ATTACHMENT*).

V primeru CMX1, klasifikacija H4-90A4 in CMX2, klasifikacija H4-90A3, se v začetni fazi pojavi t.i. "coanda attachment", kar pomeni, da se iztekajoči curek prilepi na dno, zato je začetni tok v razredu A, na preostalem območju pa v razredu H. V primeru CMX3 je klasifikacija H5-90 in se "coanda attachment" ne pojavi.



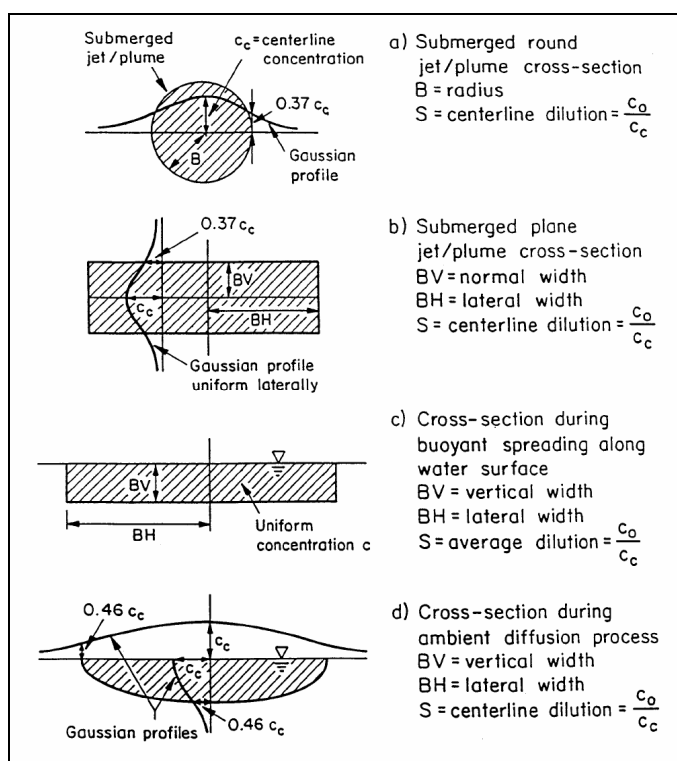
Klasifikacija za tokove, pri katerih se pojavi pozitivne vzgon (Jirka and al., 1996, str. 85)



Klasifikacija tokov, pri katerih se curek takoj za izpustom prilepi na dno (Jirka and al., 1996, str. 87).

3.2.3.2 Kvantitativni rezultati

Rezultati se izpišejo ločeno za vsak simulacijski modul. Moduli, ki se ločijo po procesih v toku, se računajo zaporedno. Rezultati modula so v obliki kontinuiranega toka, ki opisuje spreminjanje koncentracije in prereza curka vzdolž njegove poti. Rezultati vsebujejo podatke o x - y - z poziciji, razredčenju in koncentraciji središčne linije curka ter o širini curka. Razredčenje S je definirano kot razmerje začetne koncentracije na mestu izpusta in koncentracije na obravnavani lokaciji. Pri tem se ne upošteva morebitnega vpliva razpada ali rasti polutanta. V preglednici (*Preglednica 3.2.2*) so podane vednosti parametrov za prvi in zadnji prerez posameznega modula toka.



Predpostavljene oblike prereza curka v posameznih moduli in razporeditev koncentracije (Jirka and al., 1996, str. 63).

Pomen oznak:

- X, Y, Z koordinate središčne osi [m]
- BV vertikalna debelina curka (od sredine do roba) [m]
- BH horizontalna debelina curka (od sredine do roba) [m]
- ZU zgornja meja curka (z-koordinata) [m]

ZL spodnja meja curka (z-koordinata) [m]
 S = C_{zac}/C ; povprečno razredčenje
 C povprečna koncentracija polutanta

Preglednica 3.2.2: Rezultati za tri primere CMX01, CMX02 IN CMX03.

		prerez	X	Y	Z	S	C	B	t[s]				
MOD101	CMX01	prvi	0.00	0.00	0.00	1.00	12.00	0.71					
		zadnji	0.00	0.00	0.00	1.00	12.00	0.71					
	CMX02	prvi	0.00	0.00	0.00	1.00	3.00	0.71					
		zadnji	0.00	0.00	0.00	1.00	3.00	0.71					
	CMX03	prvi	0.00	0.00	0.00	1.00	0.01	0.71					
		zadnji	0.00	0.00	0.00	1.00	0.01	0.71					
MOD110	CMX01	prvi	0.00	0.00	0.00	1.00	12.00	0.51					
		zadnji	9.51	-20.71	2.62	4.90	2.43	2.35	33				
	CMX02	prvi	0.00	0.00	0.00	1.00	3.00	0.51					
		zadnji	31.03	-30.43	1.12	10.70	0.28	3.87	124				
	CMX03	prvi	0.00	0.00	0.00	1.00	0.01	0.51					
		zadnji	15.64	-23.25	0.00	9.00	0.00	5.00	59				NF
		prerez	X	Y	Z	S	C	BV	BH	ZU	ZL	t[s]	FF
MOD132	CMX01	prvi	5.12	-20.71	5.00	/	0.00	0.00	0.00	5.00	5.00		
		zadnji	14.36	-20.71	5.00	8.40	1.43	3.40	9.69	5.00	1.60	65	
MOD131	CMX02	prvi	27.29	-29.92	5.00	10.70	0.28	0.00	0.00	5.00	5.00		
		zadnji	38.78	-31.47	5.00	18.20	0.17	5.00	14.26	5.00	0.00	175	
MOD133	CMX03	prvi	10.64	-25.40	5.00	9.00	0.00	0.00	0.00	5.00	5.00		
		zadnji	20.15	-25.40	5.00	12.50	0.00	5.00	2.96	5.00	0.00	96	
MOD141	CMX01	prvi	14.36	-20.71	5.00	8.40	1.43	3.40	9.69	5.00	1.60		
		zadnji	165.45	1.00	5.00	12.50	0.96	1.23	80.00	5.00	3.77	1053	
	CMX02	prvi	38.78	-31.47	5.00	18.20	0.17	5.00	14.26	5.00	0.00		
		zadnji	277.47	0.10	5.00	24.80	0.12	2.43	80.00	5.00	2.57	1736	
	CMX03	prvi	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		zadnji	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
MOD161	CMX01	prvi	165.45	1.00	5.00	12.50	0.96	1.23	80.00	5.00	3.77		
		zadnji	800.00	1.00	5.00	12.70	0.94	1.24	80.00	5.00	3.76	5202	
	CMX02	prvi	277.47	0.10	5.00	24.80	0.12	2.43	80.00	5.00	2.57		
		zadnji	800.00	0.10	5.00	25.70	0.12	2.52	80.00	5.00	2.48	5152	
	CMX03	prvi	20.15	-25.40	5.00	12.50	0.00	5.00	9.67	5.00	0.00		
		zadnji	800.00	-25.40	5.00	22.80	0.00	5.00	17.59	5.00	0.00	5195	

Bližnje polje

Rezultati programa CORMIX kažejo (*Slika 3.2 - 2, Slika 3.2 - 3, Slika 3.2 - 4*), da se curek, katerega hitrost je desetkrat večja od hitrosti glavnega toka, na začetku relativno malo ukrivi, zato prodira v notranjost glavnega toka. Zanimivo je, da največjo oddaljenost od levega brega po y smeri, kar 30.43 m, doseže curek v primeru CMX02. Pri vseh treh primerih ($\Delta T = 12^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 0.01^{\circ}\text{C}$) se pojavi t.i. *COANDA ATTACHMENT*, to je pojav, ko se curek takoj po iztoku prilepi na dno kanala. V tej prvi fazi je curek ozek in kompakten. Bolj v notranjosti kanala je vpliv glavnega toka vse večji, zato se ukrivljenost povečuje, dokler se ne smer curka popolnoma izravna s smerjo glavnega toka. Takrat prevladajo vzgonske sile, ki povzročijo, da se curek zaradi razlike v gostoti, relativno hitro dvigne na površje in lateralno širi. Otoplitev se po dvigu na površje širi tudi gorvodno (*Preglednica 3.2.2; MOD131, MOD132 in MOD133*).

3.2.3.3 Daljno polje

V tem območju se začne curek intenzivno lateralno širiti. V primeru CMX1 (*Slika 3.2 - 5*) doseže otoplitev desni breg 170 m dolvodno od izpusta. Lateralno širjenje je odvisno predvsem od gostotnih tokov in pasivne difuzije (*poglavje 3.2.2.3*), zato je v primeru CMX2 (*Slika 3.2 - 7*), kjer je temperaturna razlika manjša, desni breg dosežen kasneje. Tudi v primeru CMX3 (*Slika 3.2 - 9*) se tok lateralno širi, a do konca območja ($x = 800$ m) bregova še nista dosežena, saj je temperaturna razlika zanemarljivo majhna. Skleпам, da ima v tem primeru glavni vpliv na širjene turbulenca glavnega toka (pasivna difuzija). Iz prečnih prereзов (*Slika 3.2 - 6, Slika 3.2 - 8, Slika 3.2 - 10*) je razvidno, da toplejši kot je curek, bolj se zadržuje na površju vodotoka.

3.2.4 Model PCFLOW3D

3.2.4.1 Priprava vhodnih podatkov

Obravnavano območje je bilo razdeljeno na kontrolne volumne različnih dimenzij, tako da je bila narejena numerična mreža, ki se na mestu podvodnega izpusta zgosti, tako da so minimalne dimenzije $Dx = 1.5\text{m}$ in $Dy = 1\text{m}$. Prehodi med posameznimi Dx oziroma Dy morajo biti postopni, zato postopno prehajajo na maksimalno vrednost $Dx = 5\text{m}$ in $Dy = 3\text{m}$. Število kontrolnih volumnov v x smeri je $NI = 112$, v y smeri pa $NJ = 45$ (Slika 3.2 - 1). Po globini je skupno 11 slojev oziroma 13 računskih z dvema "mrtvima", ki so naslednjih debelin (od spodaj navzgor): 0.4, 0.4, 0.52333, 0.47667, 0.4, 0.4, 0.4, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5 metra.

Prerez podvodnega izpusta sovпада z dimenzijami danega kontrolnega volumna, zato znaša pretok:

$$Q_0 = Dx \times h \times v_a = 1.5\text{m} \times 0.52333\text{m} \times 1.5\text{m/s} = 1.17749\text{ m}^3/\text{s},$$

kjer je h debelina sloja. Da je izpolnjena kontinuiteta, sta dotok in iztok izenačena, zato je zgornji sloj v začetnem ($I=2$) in končnem ($I=112$) prerezu zaprt, kar pomeni, da so tu hitrosti enake nič. Ploščina vtočne in iztočne odprtine znaša tako:

$$S = 4,5\text{ m} \times 80\text{ m} = 360\text{ m}^2$$

Iz pretoka na koncu kanala Q_K tako dobimo hitrost v končnem prerezu kanala u_k , ki predstavlja robni pogoj na iztoku:

$$Q_K = Q_Z + Q_0 = 54\text{ m}^3/\text{s} + 1.17749\text{ m}^3/\text{s} = 55.17749\text{ m}^3/\text{s}$$

$$u_k = Q_k/S = 0.1532708\text{m/s}$$

Časovni interval DT je 0.2 sekundi, koeficient Smagorinsky za horizontalno smer pa znaša $C_{SmaH} = 0.6$.

3.2.4.2 Rezultati in komentarji

Opravljenih je bilo dvanajst izračunov, a so se do konca izvršili le trije po modelu turbulence SMV. Pokazale so se pomanjkljivosti modela PCFLOW3D, saj so se dokaj hitro pojavile nestabilnosti, tako da je izračun divergiral. Predvidevam, da je nestabilnost nastala predvsem zato, ker so vertikalne komponente hitrosti skoraj istega reda velikosti kot horizontalne. Takih primerov pa model PCFLOW3D ne more zanesljivo simulirati.

V prvih dveh poskusih je do nestabilnosti prišlo tudi pri modelu turbulence SMV, ker je bil koeficient Smagorinsky-vertikalno C_{Smav} še v fazi umerjanja. Izkazalo se je, da je za primer CORMAL najustreznejša vrednost koeficienta $C_{Smav} = 0.3$.

Preglednica 3.2.3: Seznam opravljenih izračunov z modelom PCFLOW3D

primer	metoda	DT	Ch	Cv	T _{izt} [°C]	stabilno
C01	SMV	0.2	0.6	0.03	34	do 29s
C02	SMV	0.2	0.6	0.1	34	do 261s
C03	MYQ	0.2	0.6	-	34	do 161s
C04	MYQ	0.2	0.6	-	25	do 175s
C05	MYQ	0.2	0.6	-	22	do 156 s
C06	SMV	0.2	0.6	0.3	34	1h
C07	MYQ	0.2	0.4	-	28	do 166s
C08	KOU	0.2	0.6	-	25	do 27s
C09	KOU	0.2	1.0	-	22	do 35s
C10	KOU	0.05	0.6	-	25	do 27s
C11	SMV	0.2	0.6	0.3	22	1h
C12	SMV	0.2	0.6	0.3	25	1h

Prerez XY4

V tem sloju se nahaja podvodni izpust. Hitrosti v posameznih celicah so pri vseh treh primerih ($T_{izt} = 34, 25, 22$ °C) zelo podobne. To je pričakovano, saj se primeri razlikujejo le pri podatku o temperaturi vtočnega curka. Manjše razlike pri velikosti in smeri so posledica gostotnih tokov. Curek se že takoj po iztoku preusmeri nazaj in prilepi ob levi breg, tako da

prodira le približno 3,5 m v notranjost glavnega toka (*Slika 3.2 - 11*). Glede na desetkrat večjo hitrost je zelo nenavadno, da curek, zaradi lastne gibalne količine, ne prodira bolj v notranjost glavnega toka.

Topla voda se zadržuje ob levem begu, kar je posledica takojšnje preusmeritve curka ob rob kanala (*Slika 3.2 - 4*). V primeru C06 so vrednosti temperature višje, ker znaša temperatura na iztoku 34 °C, medtem ko je v primeru C12 le 25 °C.

Prerez XZ44

Iz slike (*Slika 3.2 - 13*) je razvidno, da curek tik ob iztoku izpodrine glavni tok, zato se hitrosti glavnega toka nad curkom povečajo. Pojavijo pa se tudi precej velike vertikalne komponente hitrosti.

3.2.5 Zaključki

Že sama oblika rezultatov programa CORMIX se močno razlikuje od tistih v modelu PCFLOW3D, saj se modela razlikujeta že od same zasnove dalje. Za razliko od rezultatov PCFLOW3D, kjer dobimo za vse kontrolne volumne komponente hitrosti kot tudi koncentracije slanosti, temperature ali poljubnega polutanta, se pri modelu CORMIX kot rezultat izračuna podajo koordinate točk središčne linije iztekajočega curka, razsežnosti curka ter koncentracija obravnavanega kontaminanta.

Tako je edini način, da rezultate programa CORMIX primerjamo s modelom PCFLOW3D ta, da poskušamo iz rezultatov temperatur pri PCFLOW3D razbrati potek glavne osi curka tople vode (t.j. točke z najvišjo T vzdolž x , y , in z osi) in primerjamo lego, razpršenost in koncentracijo oziroma vrednost temperature.

Kljub težavam, zaradi neuskkljenosti rezultatov, pa lahko že iz slik hitrostnih polj modela PCFLOW3D vidimo, da se rezultati krepko razlikujejo. V primeru PCFLOW3D se curek takoj po iztoku prilepi na levi breg, medtem ko v primeru CORMIX potuje curek po dnu v notranjost kanala, nato pa se relativno hitro dvigne na površje in se vzdolž glavnega toka lateralno širi.

Kot je že omenjeno na začetku tega poglavja, model PCFLOW3D ni namenjen za simulacijo takih primerov, zato so rezultati skoraj neuporabni. Zanimivo je, da so se pri modelu PCFLOW3D od enajstih zagnanih simulacij zaključile le tri, saj so se tako pri modelu MYQ kot pri KOU pojavile nestabilnosti. Glavni vzrok je v tem, da se pojavijo prevelike vertikalne komponente hitrosti v primerjavi s horizontalnimi.

3.3 Računski primer TRŽAŠKI ZALIV

Z modeli turbulence MYQ, SMV in KOU sta bila za topografijo Tržaškega zaliva obravnavana dva primera:

Primer TZB: simuliranje HD zaradi vpliva vetra Burje. Začetna razporeditev temperature in slanosti je konstantna po slojih. Upoštevan je tudi vpliv dotoka reke Soče.

Primer TZP: simuliranje HD zaradi vpliva gostotnih tokov in vetra značilnih za spomladansko sezono. Začetna temperatura in slanost je podana tridimenzionalno, v vseh celicah področja in je glavni povzročitelj gibanja vode. Upoštevan je tudi vpliv dotoka reke Soče.

Opravljenih je bilo sedem izračunov, od tega se jih je do konca izvršilo šest.

Preglednica 3.3.1: Seznam opravljenih izračunov za primer *Tržaški zaliv*

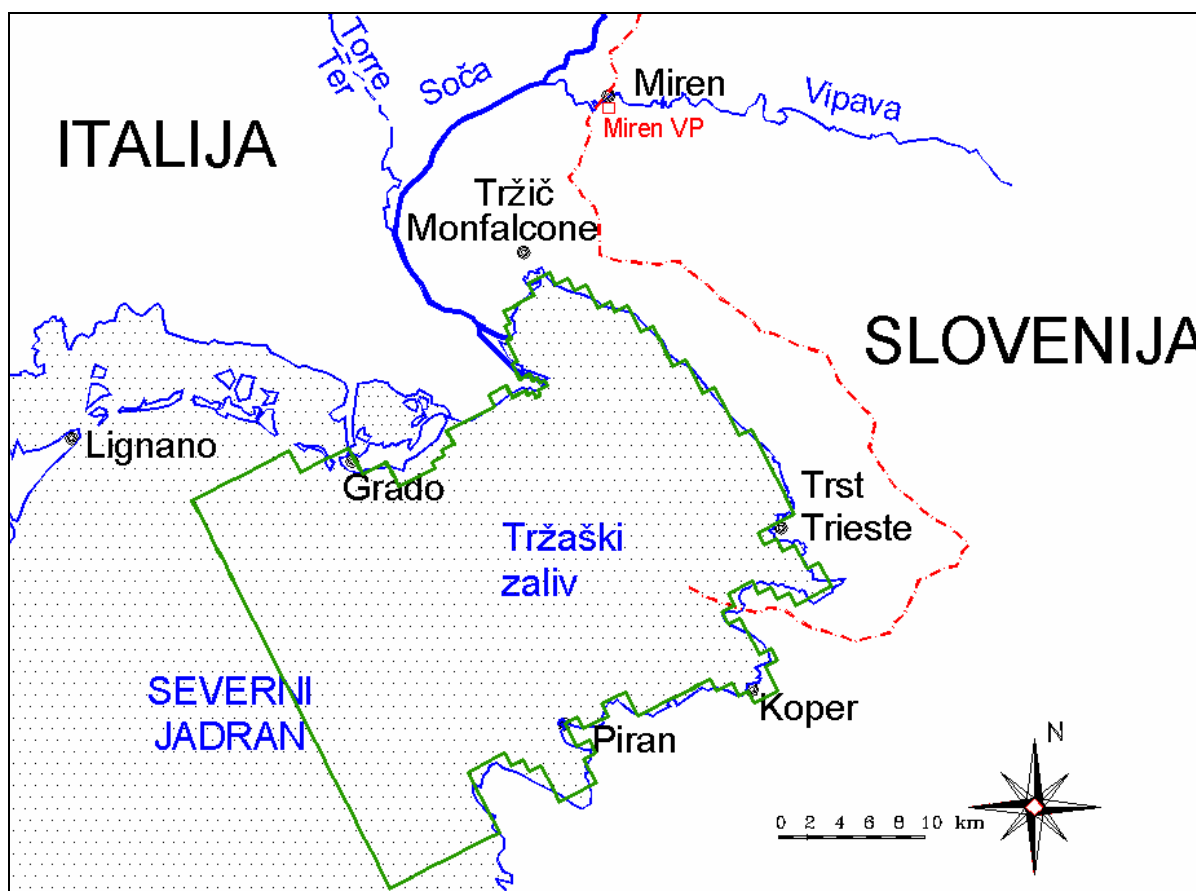
SERIJA	PRIMER	METODA	DT	C_{SmH}	C_{SmV} ali γ	Pran	N_v min/max	Stabilno
TRB	R	KOU	10	1.5	1	1,1,1	2e-4,1.0	3 dni
	S	SMV	10	1.5	0.01	1,1,1	2e-4,1.0	3 dni
	T	MYQ	5	1.5		1,1,1	1e-5,3.0	3 dni
TRP	A	MYQ	30	1.5		1,1,1	5e-5,1.0	2 dni, dalje ne
	B	KOU	30	1.5	1	1,1,1	1e-3,1.0	2 dni
	D	SMV	10	1.5	1	1,1,1	1e-3,5.0	div. takoj
	E	SMV	5	1.5	0.01	1,1,1	2e-4,1.0	2 dni

3.3.1 Podatki

3.3.1.1 Primer TZB

Topografija

Ker ima Tržaški zaliv v grobem obliko pravokotnika, je koordinatni sistem računskega območja iz praktičnih razlogov za 27° nagnjen od osi sever – jug. Tako da znašajo dimenzije računskega področja vzdolž glavnih osi 35100 m × 31500 m × 25 m.



Slika 1: Definijsko območje modeliranja s shematičnim prikazom numerične mreže.

Obravnavano območje je bilo razdeljeno na kontrolne volumne različnih dimenzij, tako da ima numerična mreža, ki se na mestu vtoka reke Soče nekoliko zgosti, minimalne dimenzije $D_x = 315 \text{ m}$ in $D_y = 315 \text{ m}$. Prehodi med posameznimi D_x oz. D_y morajo biti postopni, zato postopno prehajajo na maksimalno vrednost $D_x = 900 \text{ m}$ in $D_y = 900 \text{ m}$. Število kontrolnih volumnov v x smeri je $N_I = 47$, v y smeri pa $N_J = 43$. Po globini je skupno 25 slojev, oziroma 27 računskih z dvema "mrtvima". Vsi sloji so debeline 1m.

Da bi se izognili nestabilnostim na odprtem robu, je računsko področje podaljšano nekoliko v notranjost Severnega Jadrana (iz prvotnih približno 600 km^2 je površina definijskega območja povečana na 800 km^2). *Error! Reference source not found.* prikazuje podaljšano definijsko območje in vertikalno linijo, ki označuje mejo Tržaškega zaliva. V nadaljevanju so vse slike hitrostnih polj in koncentracij v zalivu izrisane le za notranje definijsko območje.

Veter

Hitrost Burje, ki piha iz smeri ENE (69°), je 10 m/s, kar v izbranem koordinatnem sistemu, ki je za 27° nagnjen od smeri sever-jug, po komponentah hitrosti predstavlja:

$$u_{wB} = -9.94 \text{ m/s}$$

$$v_{wB} = 1.06 \text{ m/s.}$$

Soča

Pretok reke Soče znaša $190 \text{ m}^3/\text{s}$. Komponente hitrosti toka v dveh robnih celicah T(I,J,K) so tako:

$$T(31, 32, 26): u_{\text{Soča}} = 0.38 \text{ m/s,}$$

$$v_{\text{Soča}} = -0.38 \text{ m/s}$$

$$T(31, 33, 26): u_{\text{Soča}} = 0.00 \text{ m/s,}$$

$$v_{\text{Soča}} = -0.38 \text{ m/s}$$

Temperatura Soče na vtoku je 12.9°C , slanost pa 17‰ .

Temperatura in slanost

Upoštevan je vpliv stratifikacije, tako da so temperature vode po slojih (od 2 do 26): 11.5, 12.0, 12.5, 13.0, 13.3, 13.5, 13.6, 13.7, 13.7, 13.7, 13.7, 13.7, 13.7, 13.7, 13.8, 13.9, 14.0, 14.15, 14.30, 14.5, 14.65, 14.8, 15.0, 15.4, 16.0°C .

Slanost pa je konstantna in znaša 36.8‰ .

3.3.1.2 Primer TRP

Topografija

Topografija je enaka kot v primeru TZB (poglavje 3.3.1.1).

Veter

Hitrost vetra znaša 1.1 m/s in ima smer 160.1°, kar po komponentah hitrosti predstavlja:

$$u_{wP} = -0.854 \text{ m/s}$$

$$v_{wP} = 0.694 \text{ m/s}$$

Soča

Vpliv reke Soče je enak kot v primeru TZB (poglavje 3.3.1.1) in predstavlja povprečne razmere za spomladansko sezono.

Temperatura in slanost

V primeru TZP so spomladanske temperature in slanosti določene za vsak kontrolni volumen posebej. Temperature se gibljejo od 11.3 do 18.2 °C, slanosti pa od 30 ‰ do 37 ‰.

3.3.2 Rezultati in primerjava metod

Prikazanih je nekaj slik, ki predstavljajo hitrostna polja v površinskem sloju, vse slike so prikazane ob koncu izračuna, v primeru TZB je to po treh, pri TZP pa po dveh dneh. Prikazane so tudi slike srednjih hitrosti, iz katerih je razvidna hidrodinamika vode povprečno po globini.

3.3.2.1 Primer TZB - burja

Iz slik (*Slika 3.3 - 2* in *Slika 3.3 - 3*) je razvidno, da se med metodama SMV in KOU pojavijo določene razlike, po velikostih (do 30%) in smereh (do 20°) hitrosti. Hitrosti so pri SMV manjše. Že takoj na vtoku reke Soče je pri modelu SMV hitrost za tretjino manjša. Splošna hidrodinamika celotnega Tržaškega zaliva pa je podobna. Pri srednjih hitrostih je ujemanje velikosti boljše, pri smereh pa so razlike še vedno prisotne.

Tudi primerjava metod SMV in MYQ (*Slika 3.3 - 4* in *Slika 3.3 - 5*) pokaže, da SMV daje premajhne vrednosti hitrosti. Pri smereh se največja odstopanja (do 25°) pojavijo v okolici vtoka reke Soče. Splošna hidrodinamika celotnega Tržaškega zaliva pa je podobna. Pri srednjih hitrostih je ujemanje po velikosti nekoliko boljše, pri smereh pa se odstopanja ohranjajo.

Na detajlni sliki (*Slika 3.3 - 6*) je vidno, kako hitrosti pri SMV povsod najbolj odstopajo. Če si predstavljamo, kako je usmerjen tok, je tok pri metodi SMV bolj ukrivljen, kar pa bi lahko pripisali napaki pri izbiri koeficienta C_{Smv} . Za model turbulence Koutitas je znano, da daje dokaj zanesljive rezultate za primere, kjer je veter prevladujoči vpliv. Tudi v tem primeru je temu tako, saj se rezultati metode KOU bolje ujemajo z metodo MYQ.

3.3.2.2 Primer TZP – spomladanske razmere

V tem primeru je vpliv vetra veliko manjši, pretok reke Soče pa je nespremenjen, zato je hidrodinamika bolj pod vplivom gostotnih tokov.

Iz spodnje slike (*Slika 3.3 - 7*) je razvidno, da se med modeloma turbulence SMV in KOU pojavijo določene razlike pri velikostih hitrosti, saj so hitrosti pri SMV približno za polovico manjše. Splošna oblika toka, ki se formira, pa je podobna. V tem primeru lahko pričakujem, da bodo rezultati modela KOU manj natančni, saj so razmere v zalivu najbolj pod vplivom gostotnih tokov in dotoka reke Soče, manj pod vplivom vetra.

Ujemanje modelov SMV in MYQ je slabše (*Slika 3.3 - 8*). Pojavijo se večja odstopanja tako pri velikostih, kot pri smereh. Tudi že sama oblika formiranega toka je drugačna. Za razliko od primera TZB, je tokrat tok bolj ukrivljen pri modelu MYQ.

Rezultati kažejo, da se globalni tokovi še zadovoljivo ujemajo z rezultati modela MYQ, ki velja za najbolj zanesljivega. Pri detajlni sliki tokov v bližini izliva reke Soče (*Slika 3.3 - 9*), pa lahko opazimo večja odstopanja smeri in tudi jakosti hitrosti. Pri vseh modelih se formira tok, ki od mesta iztoka reke Soče napreduje navzdol in se ob slovenski obali razcepi na dva dela. Del toka, ki se ob obali preusmeri proti odprtemu robu, pa se pri modelu MYQ "odbije" nazaj v notranjost zaliva.

3.3.3 Ugotovitve

Rezultati računskega primera *Tržaški zaliv kažejo*, da se model Smagorinsky-vertikalno razmeroma dobro obnese tudi pri bolj kompliciranih prerezih, kjer je pravilna izbira koeficienta C_{SmaV} za vertikalno smer še toliko bolj pomembna, saj so dimenzije kontrolnih volumnov v horizontalni ravnini za drugi red velikosti večje od tistih v vertikalni.

V primeru TZB je bilo kljub odstopanjem pri velikostih hitrosti ujemanje splošne oblike toka dobro. Problematici so predeli, kjer se pojavijo večje perturbacije toka, kot je to na mestu vtoka Soče. Tudi če ujemanje ni prav popolno, pa so rezultati primera TZB zadovoljivi in kažejo uporabnost metode Smagorinsky tudi v vertikalni smeri. Seveda pa je stabilnost izračuna in točnost rezultatov pogojena s pravilno izbiro koeficienta C_{SmaV} , pri tem pa tudi z velikostjo časovnega koraka DT.

V primeru TZP so bila odstopanja izrazitejša, čeprav je bil pri modelu SMV uporabljen enak koeficient $C_{SmaV} = 0.01$ kot v prejšnjem primeru. Tudi tu so bila največja odstopanja na področju izliva reke Soče, kar lahko pripišemo dejstvu, da je na tem mestu turbulentni tok najbolj izražen in je napačna izbira koeficientov C_{SmaH} in C_{SmaV} , ki vplivata na izračun koeficientov turbulentne viskoznosti, najbolj vidna.

Pojavila se je potreba po bolj detajlnem preizkusu vpliva koeficientov C_{SmaH} in C_{SmaV} na potek tokov in točnost računov. Zato sem v nadaljevanju opravila dodatne testne primere za primer TZB, kjer sem spreminjala oba koeficienta.

3.3.4 Dodatni testni izračuni za primer TZB

Opravila sem pet testnih izračunov za podatke iz računskega primera TZB. Spreminjala sem koeficient C_{SmaV} in koeficient C_{SmaH} .

Preglednica 3.3.2: Seznam opravljenih dodatnih testnih izračunov za primer TZB

SERIJA	PRIMER	METODA	DT	C_{SmH}	C_{SmV}	Pran	Nv min/max	Stabilno
TRB	V2	SMV	10	1.5	0.001	1,1,1	2e-4,1.0	3 dni
	V3	SMV	10	1.5	0.005	1,1,1	2e-4,1.1	3 dni
	V4	SMV	10	1.5	0.0005	1,1,1	2e-4,1.2	3 dni

	V5	SMV	10	0.8	0.001	1,1,1	2e-4,1.3	3 dni
	V6	SMV	10	1.5	0.0008	1,1,1	2e-4,1.4	3 dni

Koeficient C_{smaH} za horizontalno smer je bil že večkrat uporabljen in umerjen tudi za topografijo Tržaškega zaliva. Primerjava rezultatov hitrosti za primer V2 in V5 (*Slika 3.3 - 10*) pokaže, da zmanjšanje vrednosti koeficienta C_{smaH} ne vpliva bistveno na rezultate.

Iz slike hitrostnega polja (*Slika 3.3 - 11*) je razvidno, da se z izbiro manjšega vertikalnega koeficienta C_{smaH} , vektorji hitrosti povečujejo. Vrednosti so v povprečju nekje dva do tri krat večje, ponekod tudi do pet krat. Po večjem delu zaliva ostajajo smeri vektorjev hitrosti podobne, večja odstopanja pa se pojavijo v okolici vtoka reke Soče. Med največjo (0,01) in najmanjšo (0,0005) vrednostjo koeficienta C_{smaH} , je odstopanje smeri tudi za 40° (*Slika 3.3 - 12*).

Po primerjavi rezultatov metode SMV z MYQ (*Slika 3.3 - 13*) lahko vidimo, da se na mestu vtoka reke Soče hitrosti najboljše ujemajo pri izbiri koeficienta $C_{smaV} = 0.001$. V tem primeru je splošni potek vektorjev hitrosti razmeroma zelo blizu primeru MYQ.

3.3.5 Zaključki

Pravilnost in točnost metode Smagorinsky-vertikalno je v veliki meri odvisna od pravilne izbire koeficienta C_{smaV} . Pravilna izbira koeficienta je težka, najbolj zanesljiva metoda je umerjanje – kadar so le na rapolago rezultati meritev v naravi ali eventualno na fizičnem modelu. Čeprav je v metodi zajet vpliv velikosti dolžinskih korakov DX in DY, pa kaže, da je točnost metode, predvsem pa pravilna izbira koeficienta C_{smaV} odvisna od gostote numerične mreže. V primerih kot je Tržaški zaliv, kjer se gostota numerične mreže spreminja, bi bilo potrebno narediti dodatne raziskave o tem, kako spreminjajoča se gostota numerične mreže vpliva na rezultate.

3.4 Računski primer plinski terminal v Tržaškem zalivu

3.4.1 Opis problema

Slovensko javnost je v minulem letu presenetila novica o načrtu italijanske vlade, da naj bi se v Tržaškem zalivu zgradila dva plinska terminala. Terminala naj bi služila za skladiščenje utekočinjenega plina pripeljanega s tankerji, ki bi ga, pred nadaljnjim transportom po plinovodu, uplinjali s pomočjo morske vode. Pričakovati je več negativnih posledic na okolje. Med samo gradnjo in nato tudi med obratovanjem morskega terminala se bo dvigoval sediment na morskem dnu. To je problematično, saj je morsko dno kontaminirano z večjimi količinami živega srebra, predvsem iz idrijskega rudnika. Pričakovati je torej zvišanje koncentracije živega srebra v vodi in posledično tudi v ribah Tržaškega zaliva in morda celo širšega severnega Jadrana. Načrtovani sta dve lokaciji, ena predvideva izgradnjo terminala na sredini Tržaškega zaliva, druga pa na obali v vasi Žavlje (it. Zaule).

Na zahtevo Ministrstva za okolje in prostor so raziskovalci z IJS in FGG pripravili poročilo o spremembah mobilnosti in reaktivnosti živega srebra v fazi gradnje in obratovanja plinskih terminalov v Tržaškem zalivu in Žavljah. Naloga raziskovalcev s FGG je bila določiti količino resuspendiranega sedimenta zaradi gradnje in obratovanja obeh terminalov in količino celokupnega živega srebra, ki se resuspendira v vodo.

3.4.2 Simulacije transporta in disperzije živega srebra po zalivu

V okviru študije vpliva terminala na okolje (Četina et al., 2006) sta bili opravljeni dve simulaciji za transport in disperzijo sedimentov in Hg. Prva simulacija, t.i. primer JUGO, je obravnavala kratkoročne meteorološke razmere, za katere so predvidevali, da bi v času gradnje terminala lahko povzročile največje premeščanje sedimenta in Hg na slovensko stran zaliva. Druga simulacija, t.i. primer SEK-04, pa je obravnavala dolgoročne meteorološke razmere v kombinaciji z rednim obratovanjem Morskega terminala. Celoletno obdobje je bilo

razdeljeno na štiri sekvence, ki so sovpadale z letnimi časi, za katere so bili podani sezonsko povprečni podatki za veter, pretok reke Soče ter temperatura in slanost morja.

V okviru moje diplomske naloge sem opravila še dodatno dolgotrajno simulacijo, t.i. primer SEK-11, pri kateri so bili sezonsko povprečnim pogojem dodani še krajši vložki ekstremnih vplivov (kratkotrajno povečanje pretoka Soče in vetra), ki so za splošno perturbacijo v zalivu najbolj merodajni. V nalogi podajam primerjavo rezultatov obeh primerov, torej predvsem vpliv dodatnih vložkov na cirkulacijo in transport živega srebra.

3.4.3 Kratkoročna simulacija, primer JUGO

Simuliran je transport in disperzija sedimenta, ki se dvigne z dna ob izkopavanju za temelje betonske konstrukcije morskega terminala in izkopa pri polaganju začetnega odseka plinovoda (prvi kilometer od terminala proti obali). Ker je pri simulaciji obravnavan kratkoročni proces gradnje terminala, so bile za kritične razmere predpostavljene spomladanske razmere, ko se na območju TZ pojavlja veter Jugo srednje intenzitete, ki usmerja morske tokove proti slovenski obali.

3.4.3.1 Vhodni podatki

Za Tržaški zaliv je bilo opravljenih že vrsto simulacij, tako da so podatki o geometriji, hidrologiji, meteorologiji in drugih vplivih dostopni v več študijah (Širca, 1996 in Žagar, 1999).

Topografija

Območje Tržaškega zaliva je določeno na enak način kot v primeru "Tržaški zaliv" (poglavje 3.3). Tudi tu je bilo območje razdeljeno na kontrolne volumne različnih dimenzij, le da je bila mreža še dodatno zgoščena na območju Morskega terminala, ker je bilo prvotno načrtovano istočasno računanje HD in TD. Zato so na mestu terminala dimenzije $D_x = 150$ m in $D_y = 150$ m in postopno prehajajo na maksimalno vrednost $D_x = 900$ m in $D_y = 900$ m. Število

kontrolnih volumnov v x smeri je tako $NI = 53$, v y smeri pa $NJ = 50$ (Slika 3.4 - 1). Po globini je skupno 25 slojev debeline 1m.

Zaradi težav, ki jih povzroča odprti rob, je bilo definicijsko območje ob odprtem robu podaljšano (iz prvotnih približno 600 km^2 je površino definicijskega območja povečana na 800 km^2).

Veter Jugo

Veter Jugo, ki piha iz smeri 180° , ima hitrost 12 m/s , kar po komponentah predstavlja:

$$u_{wJ} = 5.5 \text{ m/s}$$

$$v_{wJ} = 10.6 \text{ m/s.}$$

Reka Soča

Pretok reke Soče znaša $190 \text{ m}^3/\text{s}$, kar predstavlja sezonsko povprečen pretok za spomladanske razmere. Komponente hitrosti iztoka v dveh robnih celicah so tako:

$$T(37, 32, 26): u_{Soča} = 0,38 \text{ m/s}$$

$$v_{Soča} = -0,38 \text{ m/s}$$

$$T(37, 33, 26): u_{Soča} = 0,00 \text{ m/s}$$

$$v_{Soča} = -0,38 \text{ m/s}$$

Temperatura je enaka sezonsko povprečni temperaturi vode v Soči za spomladanske razmere in znaša $12.9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Po razpoložljivih meritvah (Četina et al., 2006 po Kotnik, 2003) je **slanost** Soče tik pred izlivom v morje približno 17% .

Temperatura in slanost

Temperatura vode je konstantna $8 \text{ }^\circ\text{C}$, saj v spomladanskih razmerah še ni vpliva stratifikacije. Tudi slanost je konstantna po vseh slojih in znaša 36% .

Plimovanje

Rezidualni tokovi zaradi plimovanja v Tržaškem zalivu so reda velikosti do 1 cm/s, hitrosti rezidualnega toka zaradi vpliva vetra pa vsaj na površini dosegajo vrednosti cca 20 cm/s (Širca, 1996). Vpliv plimovanja na gibanje vode v zalivu je zato zanemarjen.

Izvor sedimenta zaradi bagranja na mestu terminala

Začetno resuspenzijo sedimentov z dna, ki bo nastala zaradi del na morskem dnu, je težko pravilno simulirati, ker je to mehanski pojav, ne povzročajo ga HD ali meteorološki pogoji, temveč mehansko bagranje. Zato je bil na mestu Morskega terminala dodan izvor sedimenta z dna zaliva, pri tem je bilo treba vključiti tudi določeno hitrost izvora (vode) z dna. Upoštevano je kontinuirno delovanje izvora celoten čas simulacije, saj je bila simulacija namenjena bolj prikazu smeri transporta in disperzije sedimenta.

Hitrost izvora v_{term} v simulacijah je bila privzeta 0.01 m/s. Začetna koncentracija sedimenta na izvoru C_{term} je 100 %, medtem ko je po ostalem računskem področju enaka 0 %.

Karakteristike sedimenta so povzete po referenci Brambati in dr. 1988: (D16 = 13 μm , D50 = 30 μm ; D84 = 66 μm ; D90 = 80 μm ; porosity = 0.69) (Četina et al., 2006).

3.4.3.2 Metoda izračuna

Najprej se izračuna HD z upoštevanjem temperature in slanosti. Izkazalo se je, da je dovolj že 24 ur izračuna, saj se tokovi že praktično ustalijo (iteracije se zmanjšajo do 1). Na izvoru je bila upoštevana zelo majhna hitrost (10^{-5} m/s). V nadaljevanju se izračun ponovi s HOTSTARTOM, kar pomeni, da prej izračunana HD slika, služi kot vhodni podatek o hidrodinamičnih pogojih v zalivu, simulira pa se transport in disperzija sedimenta. Trajanje TD simulacije je 48 ur. Tako dobimo smer in relativno jakost transporta in disperzije sedimenta po zalivu izraženo v odstotkih začetne vrednosti. Simulacija poteka v dveh delih, tako da izvor z dna ne vpliva na HD sliko, ki je v drugem delu računa konstantna.

Ker za model turbulence Mellor-Yamada in numerično shemo QUICK robni pogoji za iztoke iz dna se niso vgrajeni v model, je bila uporabljena metoda SMV, t.j. model turbulence

Smagorinsky v horizontalni in vertikalni smeri, v kombinaciji s *hibridno* numerično shemo (metoda SMV).

3.4.3.3 Rezultati in komentarji

Sliki (*Slika 3.4 - 3* in *Slika 3.4 - 4*) prikazujeta samo relativno koncentracijo širjenja sedimenta v odstotkih od začetne vrednosti 100 %, ki bi nastala na mestu terminala ob gradnji temeljev betonske konstrukcije Morskega terminala in polaganju začetnega odseka plinovoda (1km). Iz slike vrhnjega sloja je razvidno, da bi se ob določenih meteoroloških pogojih del sedimentov z vsemi polutanti, torej tudi z živim srebrom, transportiral delno tudi v slovenske vode. Ker ne vemo, kakšni meteorološki pogoji bodo nastopali v času gradnje, je točne količine težko definirati.

Zato je bila v nadaljevanju izvedena nova simulacija, pri kateri so bili upoštevani vplivi obratovanja, t.j. delovanja ladijskih vijakov, na resuspenzijo. Ker je to permanenten proces, se pri simulaciji lahko obravnava celoletno obdobje z upoštevanjem tipičnih meteoroloških pogojev po sezonah.

3.4.4 Dolgtrajni simulaciji SEK-04 in SEK-11 za terminal na morju - obratovanje

Na podlagi izračunanih količin v vodo aktiviranega Hg (Četina e tal., 2006) se ocenjuje, da je za sproščanje MeHg bolj nevarno obratovanje terminala (sprostitev 135 kg Hg letno za vsak terminal), kot pa gradnja (70 kg Hg za Morski terminal in 10 kg za terminal Žavlje). Ker ima z vidika onesnaževanja slovenskih voda, posebno gojišč marikulture, Morski terminal bolj neugodno lego, je bila simulacija transporta in disperzije MeHg izdelana za primer terminala na morju - obratovanje.

3.4.4.1 Vhodni podatki

Primer SEK-04

Topografija

Računsko področje je enako kot v primeru "Tržaški zaliv" iz poglavja 3.3 (*Error! Reference source not found.*). Ker potekata izračuna za HD in TD ločeno, numerične mreže na mestu terminala ni bilo potrebno zgoščevati.

Veter

Za potrebe modeliranja vpliva vetra na cirkulacijo in dolgoročno disperzijo polutanta v Tržaškem zalivu so bile že leta 1996, s pomočjo metode VECTRA, določene smeri in jakosti sezonsko povprečnih vetrov (Širca, 1996).

Smer in hitrost sezonskih vetrov, ki sta prikazani v spodnji preglednici, sta bili za postajo Beli Križ določeni na osnovi urnih vrednosti smeri in hitrosti vetra za obdobje med letoma 1975 in 1990, ki jih je posredovala Agencija Republike Slovenije za okolje in prostor. Beli Križ se je pri dosedanjem modeliranju (Širca, 1996) izkazal za najbolj reprezentativno merilno postajo v območju Tržaškega zaliva.

Sezonsko povprečni vetrovi nad Tržaškim zalivom (Širca, 1996).

letni čas	smer [°]	hitrost [m/s]
zima	66.6	2.2
pomlad	101.6	1.1
poletje	64.7	1
jesen	69.8	2.3

Reka Soča

Sezonski pretoki in visokovodni vložki reke Soče so bili določeni na podlagi meritev, opravljenih na vodomerni postaji Solkan, tik pred slovensko-italijansko mejo. To je edina merska postaja v spodnjem toku reke Soče, za katero je na voljo dovolj podatkov, da je statistična obdelava sploh mogoča. Med Solkanom in izlivom Soče v Tržaški zaliv dotekata v Sočo še dva večja pritoka, Vipava in Ter (it. Torre). Na podlagi razmerja prispevnih površin porečja Soče nad in pod Solkanom je pretok ob ustju Soče ocenjen na 1.5-kratni skupni pretok Soče in Vipave (Širca, 1996 in Žagar, 1999).

Povprečni letni pretok na izlivu v Tržaški zaliv tako znaša 168 m³/s (Žagar, 1999). Sezonski povprečni pretoki so določeni iz povprečnih mesečnih pretokov, podanih v literaturi, in sicer za Solkan v VGI (1982), za Miren pa v vodnogospodarskih osnovah (ZVSS, 1978).

Sezonski povprečni pretok reke Soče na ustju (Žagar, 1999).

letni čas	pretok [m ³ /s]
zima	150
pomlad	190
poletje	120
jesen	209

Za simulacije stratificiranega stanja je pomemben tudi podatek o temperaturi Soče na ustju. Na voljo so bile meritve temperature pod zadnjim mostom pred ustjem Soče, ki je manj kot kilometer od izliva Soče, v približno dvotedenskih razmakih med leti 1974 in 1995. Za simulacije, ki smo jih želeli izvesti s 3D modelom, so bile iz podatkov statistično izračunane povprečne sezonske vrednosti (Žagar, 1999), ki so prikazane v spodnji tabeli. Po

razpoložljivih meritvah (Kotnik, 2003) je slanost v Soči tik pred izlivom v morje približno 1,7 %, kar pa velja zgolj za meritve ob nizkih in srednjih pretokih.

Povprečne sezonske temperature vode v Soči; most pred izlivom (Žagar, 1999).

letni čas	T [°C]
zima	7.7
pomlad	12.9
poletje	16.3
jesen	9.2

V simulaciji dotok v reki Soči raztopljenega živega srebra ni upoštevan. Predpostavlja se, da priteka čista voda, brez MeHg.

Plimovanje

Vpliv plimovanja na gibanje vode v zalivu zato ni upoštevan (*poglavje 3.4.3.1*).

Temperatura in slanost

Za simulacije je bilo potrebno za vsako sezono zagotoviti podatke o porazdelitvi temperatur in slanosti v vseh točkah računske mreže. V celotnem zalivu so bile sredi posameznih letnih časov (februar, maj, avgust, november) izmerjene temperature in slanosti sočasno v 27 točkah zaliva, v 5 metrskih intervalih po globini (Žagar, 1999).

Izvor MeHg iz dna

Največjo nevarnost za zdravje ljudi predstavlja organska oblika Hg, tako imenovan monometil živo srebro (MeHg), ki se kopiči v ribah. Proces pri katerem se anorganska oblika Hg pretvori v MeHg se imenuje metilacija. Koncentracija MeHg je v Tržaškem zalivu odvisna od celokupne koncentracije Hg v sedimentu (Covelli in sod. 1999-2001, 2005), še bolj pa od procesov, ki vplivajo na mobilnost in transformacije Hg (Četina et al., 2006).

V kontrolnem volumnu (900 m * 900 m) na mestu terminala se na dnu simulira izvor metiliranega živega srebra. Hitrost iztoka je 0.01 m/s. Na podlagi izračunane vrednosti aktiviranega živega srebra zaradi delovanja ladijskih vijakov, se za različne letne čase

oziroma sezone določi ustrezna hitrost metilacije, ki je v poletnih mesecih, zaradi višje temperature, večja in sicer po sezonah je razmerje 0.2 (jesen), 0.12 (zima), 0.2 (pomlad) in 0.48 (poletje) (Četina et al., 2006).

Letno bi se zaradi obratovanja aktiviralo 135kg Hg, kar predstavlja 370g Hg na dan. Predpostavlja se, da je za metilacijo na razpolago 10% Hg. V marcu je hitrost metilacije 1,5 % na dan, najvišjo je avgusta (6 % na dan), v ostalih dveh obdobjih pa 2,5 % na dan. Tako dobimo, da pozimi nastane približno 50,5 g MeHg, 201,9 g ga nastane poleti, v ostalih obdobjih pa 168,3 g MeHg, kar je skupaj 420,7 g MeHg. Ob predpostavki, da se količina 420 g porazdeli enakomerno po celem zalivu (volumen približno $1 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$), dobimo povprečno povečanje koncentracije v zalivu za 0,042 ng/l na leto (Četina et al., 2006).

V začetnem stanju se predpostavlja, da je koncentracija metiliranega živega srebra v zalivu enaka nič.

Primer SEK-11

Topografija

Je enaka kot v primeru SEK-04.

Veter

Sezonsko povprečnim vetrovom sem dodala še dva letna maksimuma trajanja burje, ki sta bila določena na podlagi statistične obdelave dolgoletnega niza meritev (od leta 1975 do 1990) na merilni postaji Beli Križ (Žagar, 1999). Maksimuma trajanja burje, ki skoraj sovpadata z obema maksimumoma hitrosti, se najpogosteje pojavita v mesecu februarju in novembru.

Vložki vetra na merski postaji Beli križ (Žagar, 1999).

smer	mesec	pogostost [%]	trajanje [dni]	hitrost [m/s]
NE	februar	37.4	11	6.4
NE	november	32.8	10	6.2

Reka Soča

Sezonsko povprečnim vrednostim sem dodala še dva visokovodna vložka. Trajanje in intenziteta tipičnih vložkov sta bila ugotovljena iz statističnih podatkov (Žagar, 1999). Tipični majski vložek traja okrog 5 dni, novembrski pa okrog 4 dni. Intenziteta je bila določena s pomočjo srednjih visokih pretokov, t.j. povprečja visokih pretokov v nekem daljšem obdobju. Na osnovi teh pretokov so bili po verjetnostni analizi in obdelavi odvisnosti med volumnom in pretokom v Solkanu določeni pretoki na ustju Soče.

Visokovodni vložek Soče na ustju (Žagar, 1999)

mesec	pretok [m ³ /s]	trajanje [dni]
maj	714	5
november (1. dan)	345	1
november (2. in 3. dan)	1371	2
november (4. dan)	345	1

Uporabljene so bile enake vrednosti kot pri sezonsko povprečnih pretokih reke Soče.

Tako kot v primeru SEK-04, se tudi tu predpostavlja, da priteka čista voda, brez MeHg.

3.4.4.2 Metoda računanja

Izračun poteka v dveh delih. V začetni fazi se na podlagi zunanjih vplivov, ki učinkujejo na hidrodinamiko v Tržaškem zalivu izvrši popolnoma nestacionaren izračun HD za vsako sezono oziroma sekvenco posebej. Čas simulacije HD je trajal največ 48h, dovolj, da se tok formira in ustali. Tu je iztok iz dna še enak nič. V drugi fazi, pri izračunu TD MeHg, pa se izračun vrši zaporedno po sekvencah začevši z jesensko sezono. Tako rezultati simulacije TD prve sekvence služijo kot vhodni podatki o disperziji MeHg za drugo sekvenco in tako naprej. Pri vsaki sekvenci mora tako nastopati ustrezna HD slika, hitrost metilacije ter ustrezna začetna prostorska porazdelitev MeHg. Uporabljen je bil tako imenovan kvazi-stacionarni pristop, kjer hidrodinamične parametre ter porazdelitev gostote, temperature in slanosti po določenem času fiksiramo in jih v nadaljnjem računu upoštevamo kot nespremenljive. Na ta način se računski čas občutno skrajša. Način je bil uporabljen že pri računu transporta živega srebra v Tržaškem zalivu (Žagar, 1999; Rajar et al., 2000).

V prvem delu poteka račun po modelu turbulence Smagorinsky v horizontalni ravnini. Za vertikalno smer, pa je bil uporabljen točnejši model Mellor-Yamada. Uporabljena je numerična shema QUICK. Pri računu TD, kjer se simulira iztok iz dna, pa račun poteka po modelu turbulence Smagorinsky tako v horizontalni kot vertikalni smeri, uporabljena pa je manj točna *HIBRIDNA* numerična shema. Vzrok za spremenjeno metodo je v tem, da za model turbulence Mellor-Yamada, kot tudi za numerično shemo QUICK še niso urejeni robni pogoji za iztoke iz dna.

Postopka sta pri primeru SEK-04 in SEK-11 identična, le da je v slednjem več sekvenc, ker v simulaciji poleg sezonsko povprečnih vrednosti parametrov nastopajo še nekajdnevni vložki maksimalnih vplivov (*Preglednica 3.4.1* in *Preglednica 3.4.2*). Prav ti vložki predstavljajo bistveno izboljšavo v primerjavi s stacionarnim modeliranjem, hkrati pa ne bistveno podaljšujejo časa računanja. Na sliki (*Slika 3.4 - 5*) je spreminjanje vhodnih podatkov prikazano še grafično.

Preglednica 3.4.1: Vrednosti sezonsko povprečnih parametrov za primer SEK-04.

Sekv.	Sezona	Trajanje [mesec]	Trajanje [dni]	Hitrost vetra [m/s]	TSoča [°C]	SSSoče [%]	Pretok Soče [m ³ /s]
S1	jesen	oct. - dec.	90	2.3	9.2	17	209
S2	zima	jan. - mar.	90	2.2	7.7	17	150
S3	pomlad	apr. - jun.	90	1.1	12.9	17	190
S4	poletje	jul. - sep.	90	1	16.3	17	120

Preglednica 3.4.2: Vrednosti sezonsko povprečnih parametrov ter vložkov za primer SEK-11. Vrednosti vložkov močne burje in visokega pretoka reke Soče so odebeljene.

Sekv.	Sezona	Trajanje [datum]	Trajanje [dni]	Hitrost vetra [m/s]	TSoča [°C]	SS Soče [‰]	Pretok Soče [m ³ /s]
S1	jesen	17.11.-20.11	1+2+1	2.3	9.2	17	345+1371+345
S2	jesen	21.11.-30.11.	10	6.2	9.2	17	209
S3	jesen	1.12.-31.12.	31	2.3	9.2	17	209
S4	zima	1.1.-11.2.	42	2.2	7.7	17	150
S5	zima	12.2.-22.2	11	6.4	7.7	17	150
S6	zima	23.2.-31.3.	38	2.2	7.7	17	150
S7	pomlad	1.4.-6.5.	36	1.1	12.9	17	190
S8	pomlad	7.5.-11.5.	5	1.1	12.9	17	714
S9	pomlad	12.5.-30.6.	50	1.1	12.9	17	190
S10	poletje	1.7.-30.9.	92	1	16.3	17	120
S11	jesen	1.10.-16.11.	47	2.3	9.2	17	209

3.4.5 Primerjava rezultatov primera SEK-04 in primera SEK-11

Dejanski razpored koncentracije po zalivu, simuliran s 3D modelom PCFLOW3D, je prikazan na slikah. Rezultati obeh simulacij kažejo, da bi se po enoletnem obratovanju Morskega terminala resuspendiran MeHg razpršil po celotnem zalivu. V manjši meri tudi na območju marikulture oziroma gojišča v Piranskem zalivu.

3.4.5.1 Rezultati HD

Na slikah (*Slika 3.4 - 6* do *Slika 3.4 - 10*) so prikazani rezultati HD za tokove v površinskem sloju zaliva. Prikazane so sezonsko povprečne razmere za mesec november in avgust in vsi štirje vložki visoke vode na Soči ter močne burje. Slike HD za sezonsko povprečne razmere so za primer SEK-04 in SEK-11 enake. Iz rezultatov HD za visokovodne vložke na Soči je razvidno, da se pojavi izrazita cirkulacija vode, ki zajame celotno območje zaliva (*Slika 3.4 - 8* in *Slika 3.4 - 11*). Močna burja v novembru in februarju prav tako vidno vpliva na perturbacijo toka v zalivu (*Slika 3.4 - 9* in *Slika 3.4 - 10*).

3.4.5.2 Rezultati TD MeHg

Rezultati prikazujejo koncentracije MeHg v posameznih slojih oziroma prerezih. Kontaminant MeHg ima svoj izvor na dnu zaliva na mestu Morskega terminala. Porazdelitev je prikazana v procentih, glede na začetno koncentracijo vnosa 100%. Obe simulaciji sta izvršeni za enoletno obratovanje terminala. Na slikah vrhnjega sloja XY26 je označena lokacija gojišča v Piranskem zalivu (*Slika 3.4 - 12* in *Slika 3.4 - 13*).

Ostale slike prikazujejo izračune koncentracije MeHg v nekaterih sekvencah in po posameznih prerezih. Dotok sladke vode iz Soče, pri kateri je koncentracija MeHg enaka nič, je dobro viden. Koncentracija kontaminanta se časom povečuje. V posameznih sekvencah so koncentracije MeHg različno porazdeljene zaradi drugačnih meteoroloških razmer, ki vplivajo na HD.

Po 360 dneh znaša na lokaciji marikulture dejanska koncentraciji MeHg:

primer SEK-04: $C_{\text{MeHg}} = 0.0176 \text{ ng/l}$ (1.45%)

primer SEK-11: $C_{\text{MeHg}} = 0.0178 \text{ ng/l}$ (1.47%)

V simulaciji SEK-11 doseže koncentracija MeHg na mestu marikulture le za 1% večjo koncentracijo. Glede na to, da nastopajo v simulaciji SEK-11 poleg sezonsko povprečnih pogojev še krajša obdobja močnejše burje in visokovodnih valov reke Soče, ki bistveno vplivajo na perturbacijo in mešanje vodnih mas v zalivu, bi pričakovala, da bo razlika nekoliko večja. Po podrobnejši analizi sem ugotovila, da ekstremni vplivi sicer povzročajo večje spremembe razporeditve koncentracije MeHg po zalivu, ampak ne v območju Piranskega zaliva. Na primer, v mesecu novembru visoki val reke Soče vidno vpliva na porazdelitev MeHg po zalivu, na področje marikulture pa skoraj nima vpliva (*Slika 3.4 - 24*). Podobno je pri vplivu močne burje, saj se oblak MeHg zadržuje bolj na severnem območju zaliva.

Primerjava rezultatov koncentracije MeHg po enoletnem (360 dni) obratovanju Morskega terminala pokaže, da ekstremni vplivi (SEK-11) preusmerijo oblak največjih koncentracij bolj proti odprtemu robu Tržaškega zaliva. To je razvidno tako iz slik koncentracij v površinskem sloju XY26 (*Slika 3.4 - 12* in *Slika 3.4 - 13*), kot tudi v nižje ležečih plasteh (od *Slika 3.4 - 14*

do *Slika 3.4 - 17*). Iz vertikalnega prereza XZ17 (*Slika 3.4 - 22* in *Slika 3.4 - 23*), ki poteka skozi Morski terminal, je razvidno, da se v primeru SEK-04 oblak kontaminanta MeHg širi proti vzhodu, medtem ko v primeru SEK-11 širi proti zahodu.

3.4.5.3 Zaključek

Za namen študije vplivov gradnje in obratovanja Morskega terminala ter terminala Žavlje na resuspenzijo živega srebra, ki jo je opravila skupina raziskovalcev IJS in FGG, so bile izdelane dve simulaciji transporta in disperzije.

Prva je obravnavala kratkoročni vpliv gradnje Morskega terminala na transport in disperzijo resuspendiranega sedimenta, ki je pod vplivom močnega vetra jugo in sezonsko povprečnega pritoka reke Soče. Iz rezultatov je sicer razvidno, da se del z živim srebrom kontaminiranega sedimenta širi tudi v slovensko morje, ker pa so meteoroloških pogojev za čas gradnje neznanca, je bilo zelo težko napovedati v kakšni meri se bo to zgodilo.

Izračun je pokazal, da bo imelo obratovanje Morskega terminala zaradi delovanja ladijskih vijakov pomemben vpliv na resuspenzijo. Zato je bila opravljena še dolgotrajna simulacija transporta in disperzije MeHg za celoletno obratovanje Morskega terminala, pri čemer so bile za štiri sezone upoštevane sezonsko povprečne vrednosti vetra, pretoka Soče, temperature, slanosti ter hitrosti metilacije. Ker je obratovanje permanenten proces, so rezultati simulacije veliko bolj zanesljivi. Izkazalo se je, da bi se na zelo občutljivem področju Strunjanskih gojišč koncentracija MeHg povečala za 0,0176 ng/l letno, v slovensko morje pa bi se letno transportiralo približno 147g MeHg.

V okviru moje diplomske naloge sem izvedla dodatno dolgotrajno simulacijo, pri kateri sem sezonsko povprečnim vrednostim dodala še krajše sekvence ekstremnih vplivov (veter burja in visokovodni val Soče), ki se v tipičnem letu z veliko verjetnostjo pojavljajo skoraj vedno v istem obdobju in močno vplivajo na hidrodinamične pogoje v Tržaškem zalivu. Iz rezultatov je razvidno, da se ob upoštevanju ekstremov, koncentracija MeHg na mestu gojišč, v obdobju enega leta, poveča za 0,0178 ng/l, kar predstavlja le 1% povečanja napram rezultatom sezonsko povprečne simulacije. Vzroki za tako majhno razliko so v tem, da kratkoročni

ekstremni pogoji, ki povzročajo intenzivnejšo cirkulacijo po zalivu, usmerijo oblak konataminanta MeHg stran od gojišča v Piranskem zalivu.

Druga ugotovitev je, da upoštevanje dodatnih vložkov ekstremnih pojavov pretoka Soče in vetra, razmeroma močno vplivajo na razporeditev koncentracije MeHg v posameznih časovnih obdobjih. Povprečna koncentracija MeHg v zalivu pa ostaja praktično konstantna, saj je izvor z dna v obeh primerih enak.

4 POVZETEK

Cilji moje diplomske naloge so bili ovrednotiti delovanje modela PCFLOW3D nadgrajenega z modelom turbulence Smagorinsky vertikalno, ki naj bi z zadostno natančnostjo nadomeščal model turbulence Mellor-Yamada. Prednosti modela turbulence Smagorinsky so se v modelu PCFLOW3D pokazale z že nekajletno uporabo modela v horizontalni smeri.

Prednosti modela Smagorinsky lahko zaobjamemo v naslednjih točkah:

- ker uporablja samo eno enačbo je enostaven za numerično računanje;
- potek izračuna je večinoma zelo stabilen;
- kljub temu, da je v osnovi model le prvega reda točnosti, lahko s pravilno izbiro brezdimenzijskega koeficienta dosežemo višjo natančnost;
- določanje robnih pogojev ja manj zahtevno, kot pri modelu Mellor-Yamada.

Slabosti modela Smagorinsky pa so:

- manjša natančnosti kot pri modelu Mellor-Yamada;
- zahteva umerjanje brezdimenzijskega koeficienta.

Iz rezultatov testnih primerov je razvidno, da je model Smagorinsky uporaben tudi v vertikalni smeri. Primerjava z modelom Mellor-Yamada je pokazala, da daje model Smagorinsky nekoliko manjše vrednosti hitrostnega polja. Karakteristike hidrodinamičnega polja se dobro ujemajo. Potrdile so se slabosti *hibridne* numerične sheme, ki proizvede veliko večjo numerično difuzijo, kar se še toliko bolj očitno pokaže pri obravnavi transporta in disperzije toplote ali poljubnega polutanta. Da so napake v večji meri res povezane z izbiro numerične sheme, potrjuje dejstvo, da so se rezultati pri kombinacij modela Mellor-Yamada in *hibridne* numerične sheme približali tistim modela Smagorinsky-vertikalno.

Z namenom verifikacije novega modela (pa tudi samega modela PCFLOW3D) smo uporabili komercialni program CORMIX. Izkazalo se je, da je CORMIX uporaben predvsem za obravnavo problemov izpustov onesnaženih voda v kolikor dejanske topografske razmere poenostavimo na prizmatični kanal z enodimenzijskim tokom. Da bi programa lahko

primerjali, smo pripravili testni primer, ki naj bi izpolnjeval omejitve programa CORMIX in modela PCFLOW3D. Žal se je izkazalo, da primerjava ni mogoča, saj se pri stranskem izpustu pojavijo velike vertikalne hitrosti (več kot 10% horizontalnih), ki jih model PCFLOW3D ne more simulirati.

V zadnjem delu diplomske naloge je prikazan primer uporabe modela Smagorinsky-vertikalno na konkretnem problemu terminala v Tržaškem zalivu. Pri simuliranju obratovanja in gradnje terminala na TD je bilo potrebno dodati izvor sedimenta oziroma MeHg iz dna. Taki robni pogoji pri turbulentnem modelu Mellor-Yamada še niso določeni, zato je bil uporabljen model turbulence Smagorinsky-vertikalno. Predstavljeni sta bili dve simulaciji, ki sta bili izdelani za namen študije vpliva obratovanja terminala na resuspenzijo živega srebra. Sama pa sem opravila še dodatno simulacijo celoletnega obratovanja terminala z upoštevanjem sezonsko povprečnih ter maksimalnih vplivov. Izkazalo se je, da se koncentracija MeHg na področju marikulture pri obeh dolgotrajnih simulacijah le malenkost razlikuje. Hidrodinamični pogoji zaradi ekstremnih vplivov so namreč taki, da na transport in disperzijo MeHg v Piranski zaliv skoraj ne vplivajo.

Metoda Smagorinsky-vertikalno je vsekakor uporabna, v nadaljevanju pa bi bilo potrebno izdelati dodatne raziskave, predvsem z namenom umerjanja koeficienta C_{smaH} in C_{smaV} . Kot je razvidno iz testnih primerov, je izbira ustreznega koeficienta ključnega pomena za točnost rezultatov.

Po drugi strani pa se je izkazalo, da uporaba hibridne numerične sheme povzroča netočnosti (zaradi numerične difuzije), ki so istega reda velikosti, kot je uporaba modela Smagorinsky namesto točnejšega modela Mellor-Yamada.

NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

1. Za različne primere z numerično mrežo spreminjajočih korakov DX, DY ali DZ ugotoviti najbolj pravilne vrednosti koeficientov C_{smaH} in C_{smaV}
2. Narediti bolj detajlno analizo o vplivu točnosti numerične sheme – primerjava hibridne sheme in sheme QUICK. Analizo narediti za simulacije hidrodinamičnega

polja hitrosti, posebej pa še za izračune transporta in disperzije polutantov, kjer je vpliv numerične sheme na točnost rezultatov še bistveno večji.

VIRI

Četina, M., Rajar, R., Krzyk, M., Zakrajšek, M., Žagar, D. 2006. Ekspertna 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). FGG 2006.

Četina M., Rajar R., Širca A., Žagar D. 1999. PCFLOW3D, User's Manual, Users Manual, Univerza v Ljubljani, Katedra za mehaniko tekočin, 294 str.

Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, FGG, 127 str.

Četina, M. 2000. Dvodimenzionalno modeliranje toka s prosto gladino, Acta hydrotechnica 18/29, Univerza v Ljubljani, FGG, 15 str.

Jirka, G., H., Doneker, R., L., Hinton, S., W., 1996. User's manual for CORMIX: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. Cornell University, School of Civil and Environmental Engineering, DeFrees Hydraulics Laboratory.

<http://www.epa.gov/waterscience/models/cormix/users.pdf> (september 2006)

Jones, G., R., Nash, J., D., Jirka, G., H., 1996. CORMIX3: An expert system for mixing zone analysis and prediction of buoyant surface discharges. Cornell University, School of Civil and Environmental Engineering, DeFrees Hydraulics Laboratory.

www.cee.odu.edu/mbin/cormix/dos/cmx-3rpt.pdf (september 2006)

Mellor G. L., 2004. User guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University.
<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/usersguide0604.pdf>
(december 2006)

Mellor G. L., Yamada T., 1982. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 20, št. 4, str. 851-875.

<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/PAPERS/> (december 2006)

Publikacija *Moje tvoje morje Slovenko, Sredozemlje in trajnostni razvoj* (2002). Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije, Ljubljana, 28 str.

Rajar R., Četina M. 1988. Matematično modeliranje turbulentne difuzije. *Gradb. vestn.*, 37, št.1/2/3.1988, str. 34-40.

Rajar R., Četina M. 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: An experience. *Ecological modelling* 101, str.195-207.

Rajar R., Četina M., Širca A. 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: Case Studies. *Ecological modelling* 101, str.209-228.

Rajar R., Žagar D., Četina M., Akagi H., Yano S., Tomiyasu T., Horvat M. 2003. Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. *Ecological Modelling*, 2003, letn. 171, št. 1/2, str. 139-155.

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

Ramšak, V., 2006. Simulacija izmenjave živega srebra med vodo in zrakom s 3-D modelom PCFLOW3D v Tržaškem zalivu. Diploma. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Rejec Brancelj, I., 2003. *Morje. V: Vodno bogastvo Slovenije – Ljubljana: Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republika Slovenije za okolje, 2003. – Str. 69-73.*

Rozman, S. 2005. Simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu z modelom PCFLOW3D. Seminarska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za vodarstvo in komunalni inženiring.

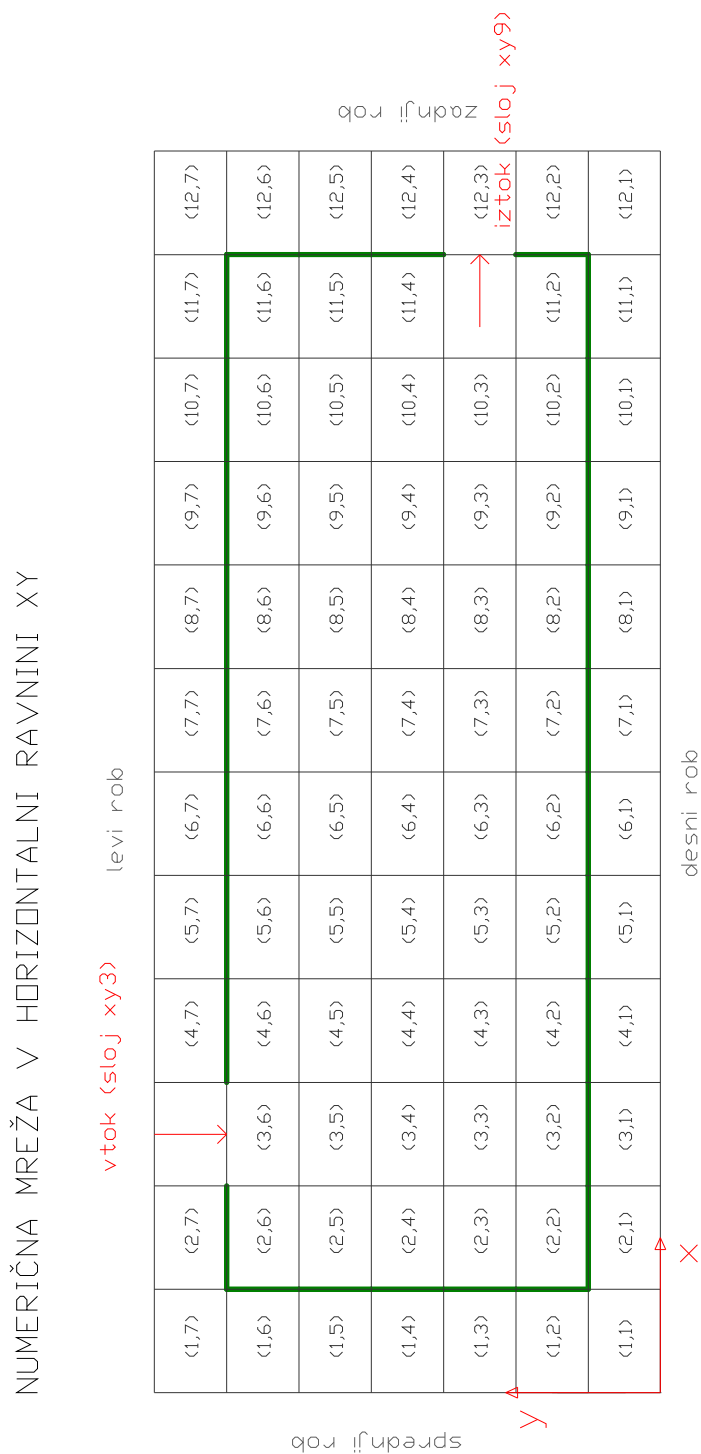
Širca, A. (1992). Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, FGG, 87 str.

Širca, A. (1996). Modeliranje hidrodinamike in transporta živosrebrnih spojin v Tržaškem zalivu, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, FGG, 87 str.

Žagar D. (1999). Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v morskem okolju, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, FGG, 101 str.

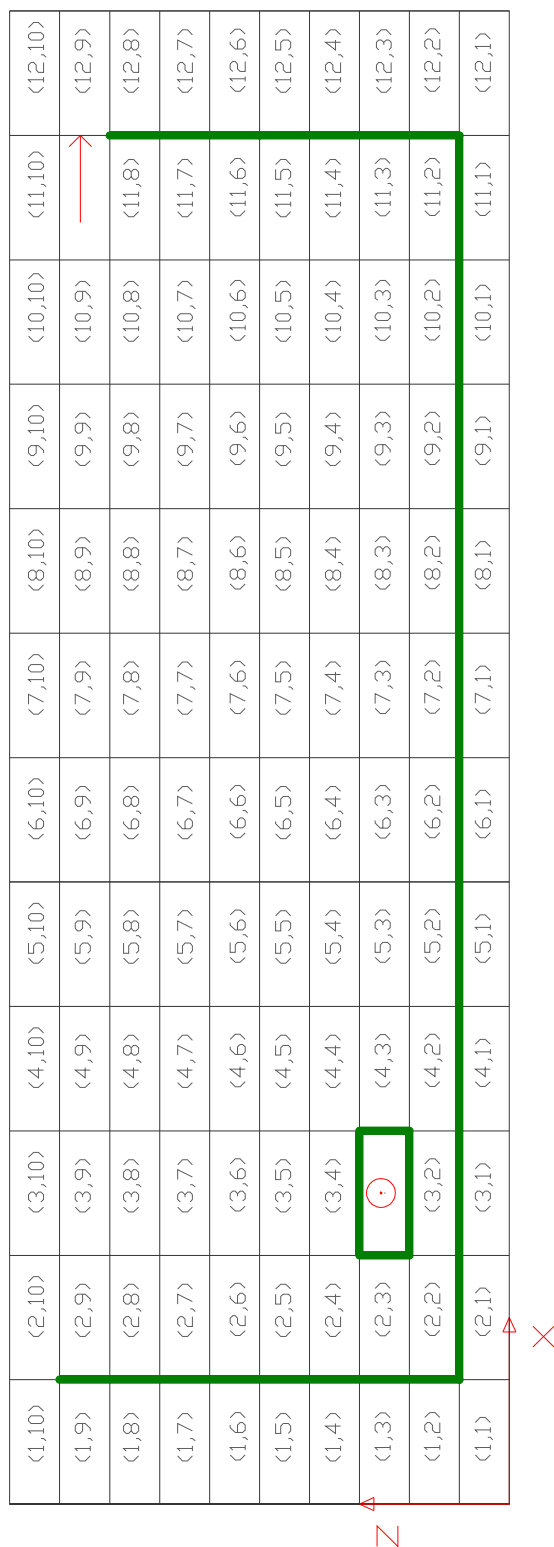
Žagar D., Rajar R., Širca A., Horvat M., Četina M. (2001). Dolgotrajna 3D simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu. Acta hydrotech., 2001, vol. 19, št. 30, str. 25-43.

Priloga A: Slike k poglavju 3.1



Slika 3.1- 1: Numerična mreža za primer ŠKATLA v horizontalni ravnini xy.

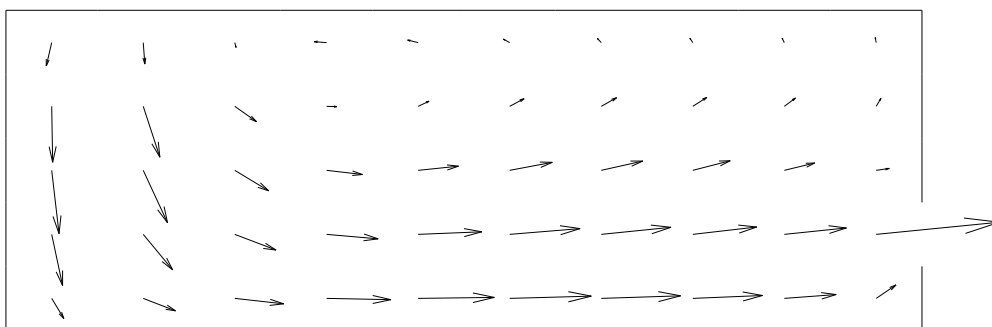
Podane so oznake celic po x in y smeri, mesto vtoka in iztoka ter poimenovanje robov.



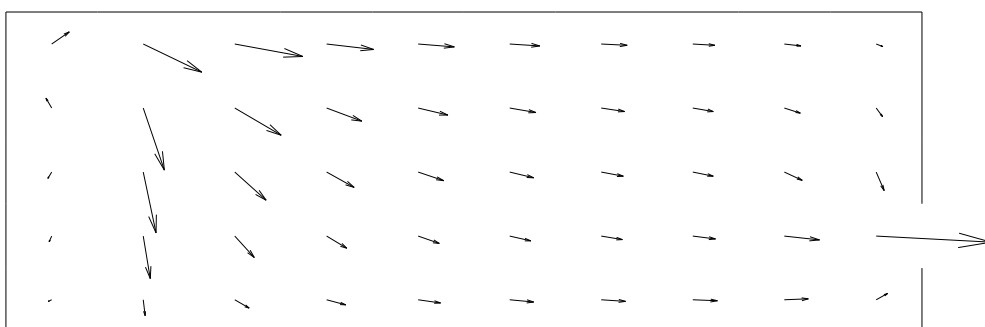
Slika 3.1- 2: Numerična mreža za primer ŠKATLA v vertikalni ravnini xz , distorzija v z smeri je 4.

Označen je vtok v sloju XY2 ter iztok v sloju XY9.

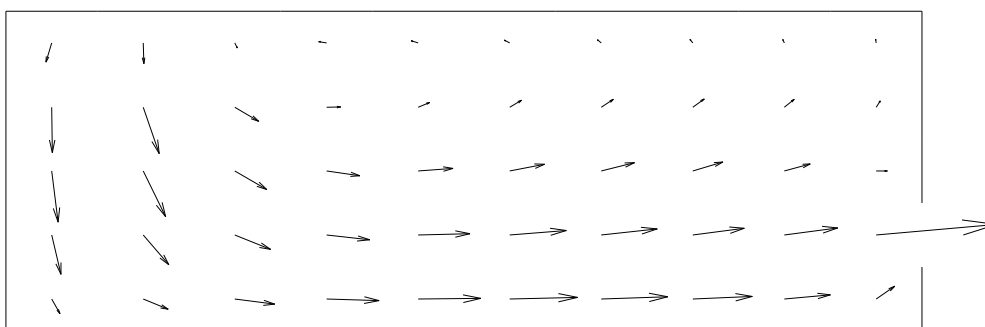
E-smav, CsmH=0.2, CsmV=0.1, mer=40, XY9, 1h



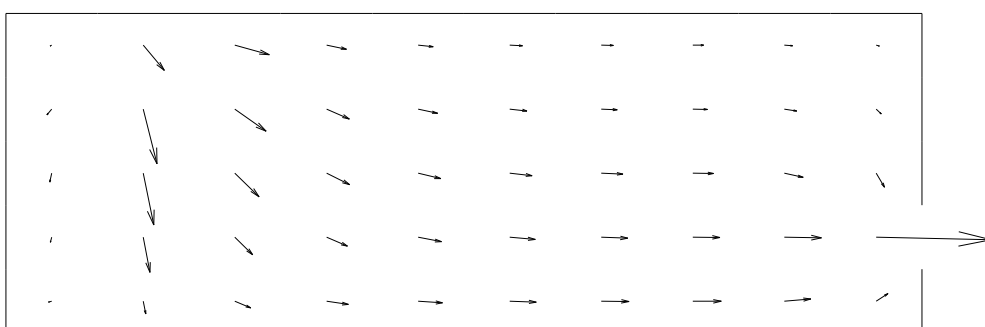
E-smav, CsmH=0.2, CsmV=0.2, mer=40, XY9, 1h



E-smav, CsmH=0.2, CsmV=0.15, mer=40, XY9, 1h

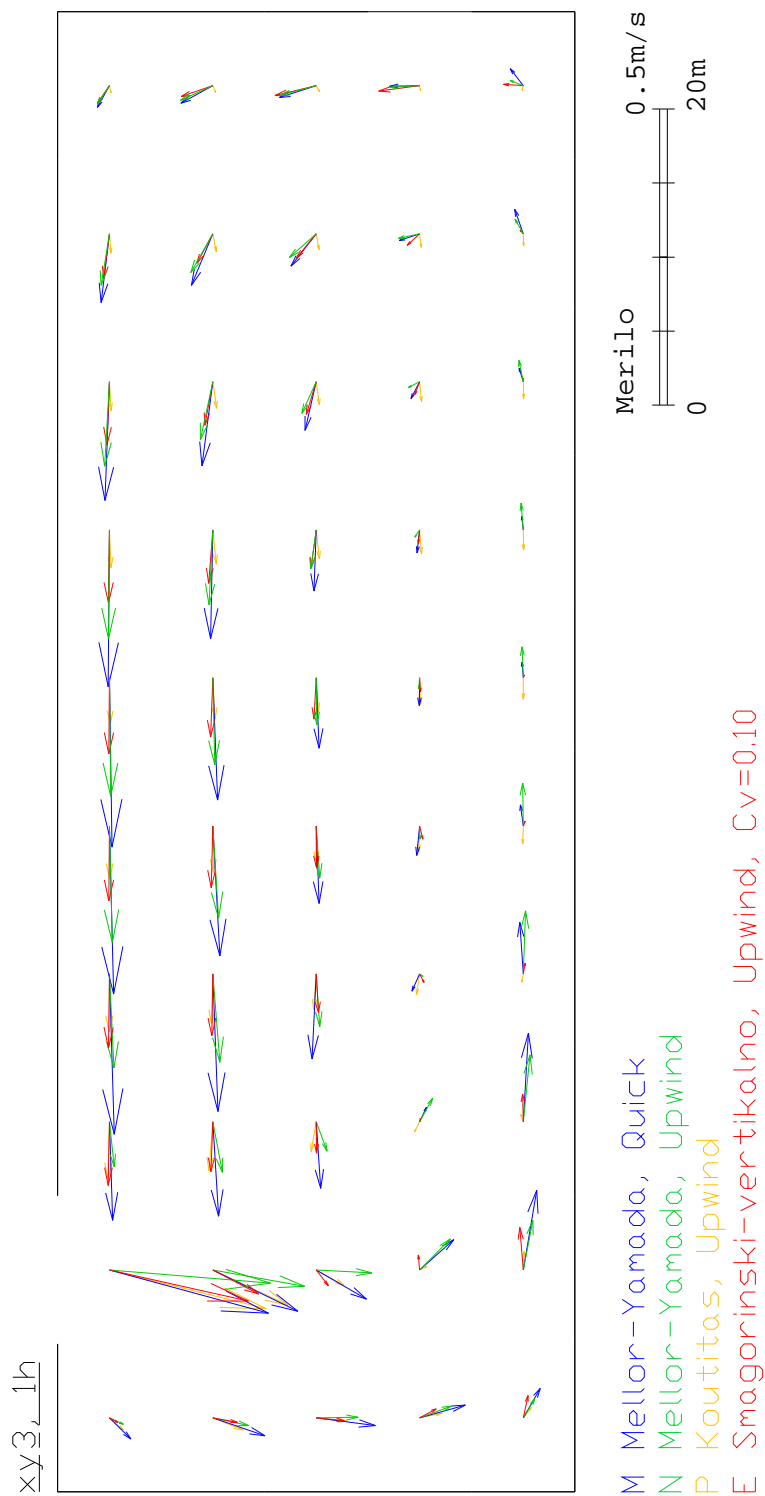


E-smav, CsmH=0.2, CsmV=0.4, mer=40, XY9, 1h

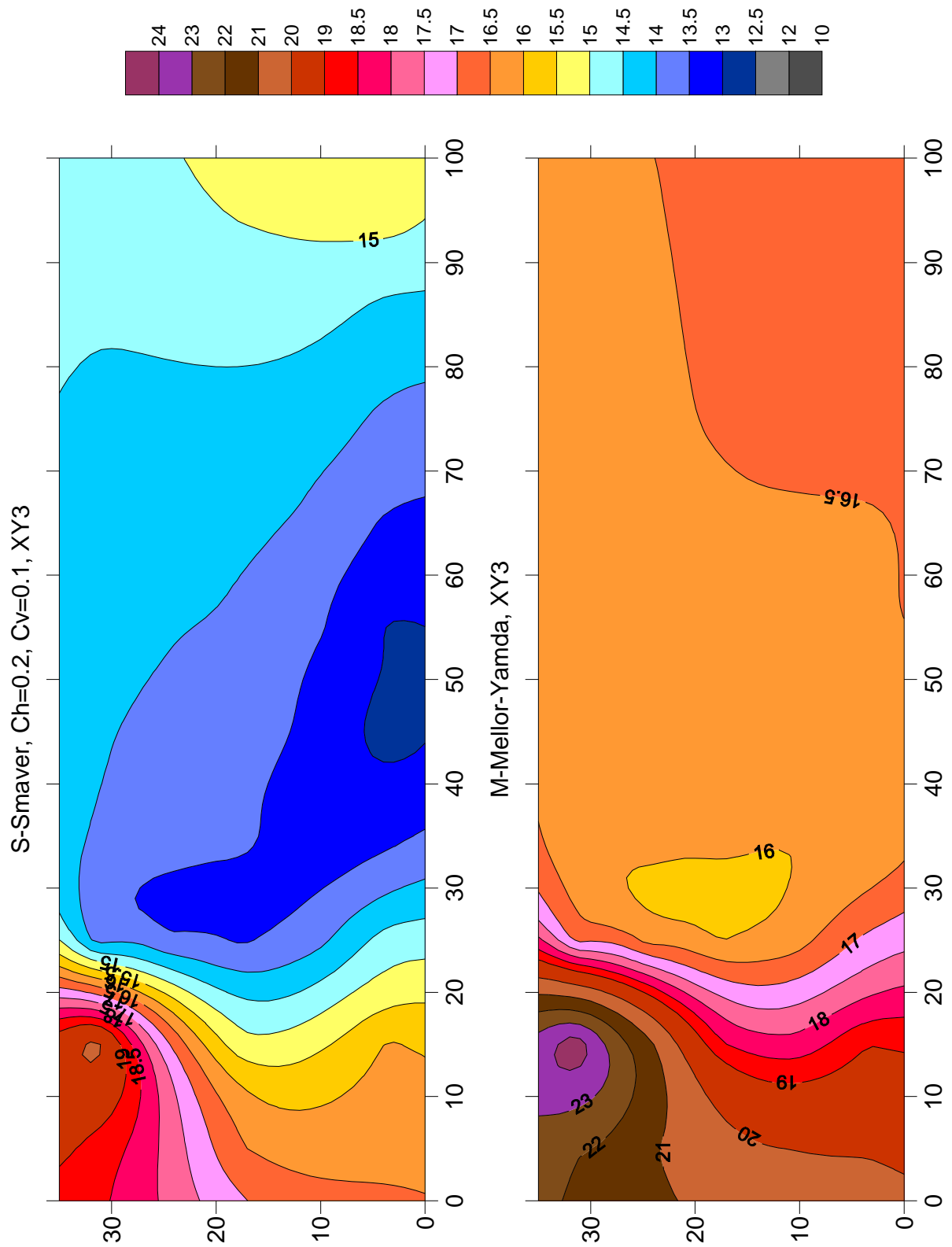


Slika 3.1- 3: Umerjanje koeficienta Smagorinsky-vertikalno v sloju XY9.

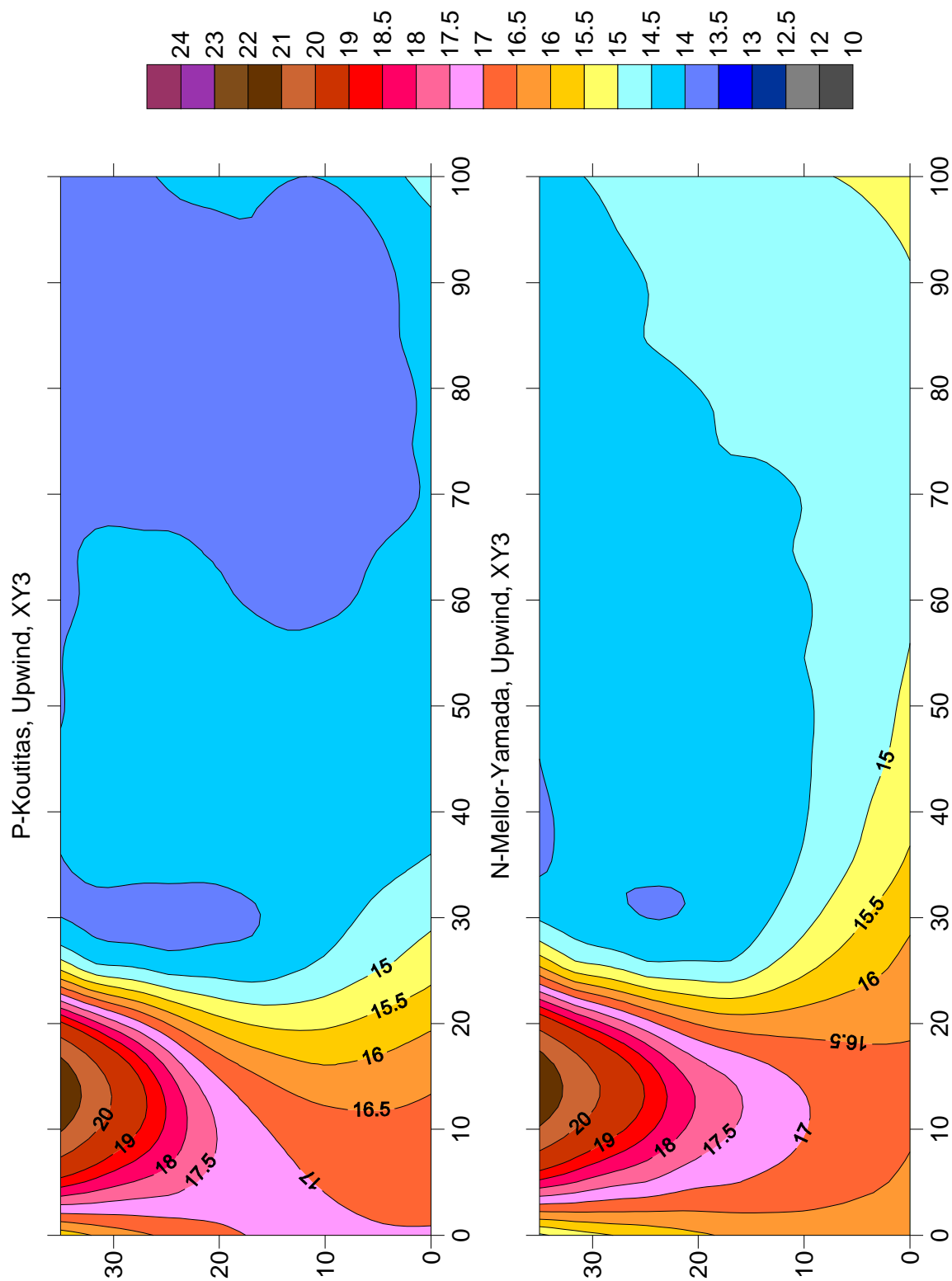
Vse štiri slike so v enakem merilu.



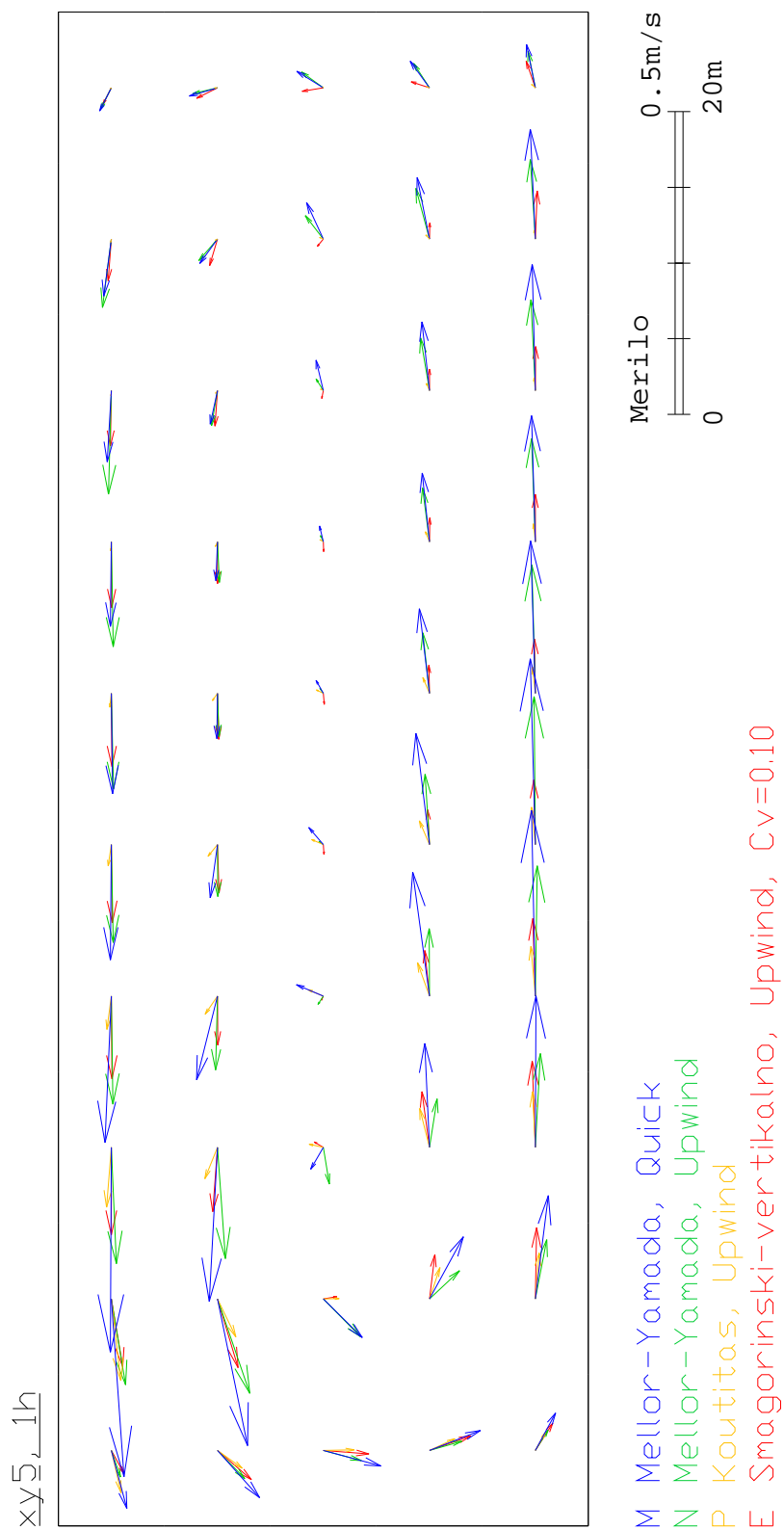
Slika 3.1- 4: Hitrostno polje v sloju XY3 po 1h simulacije.



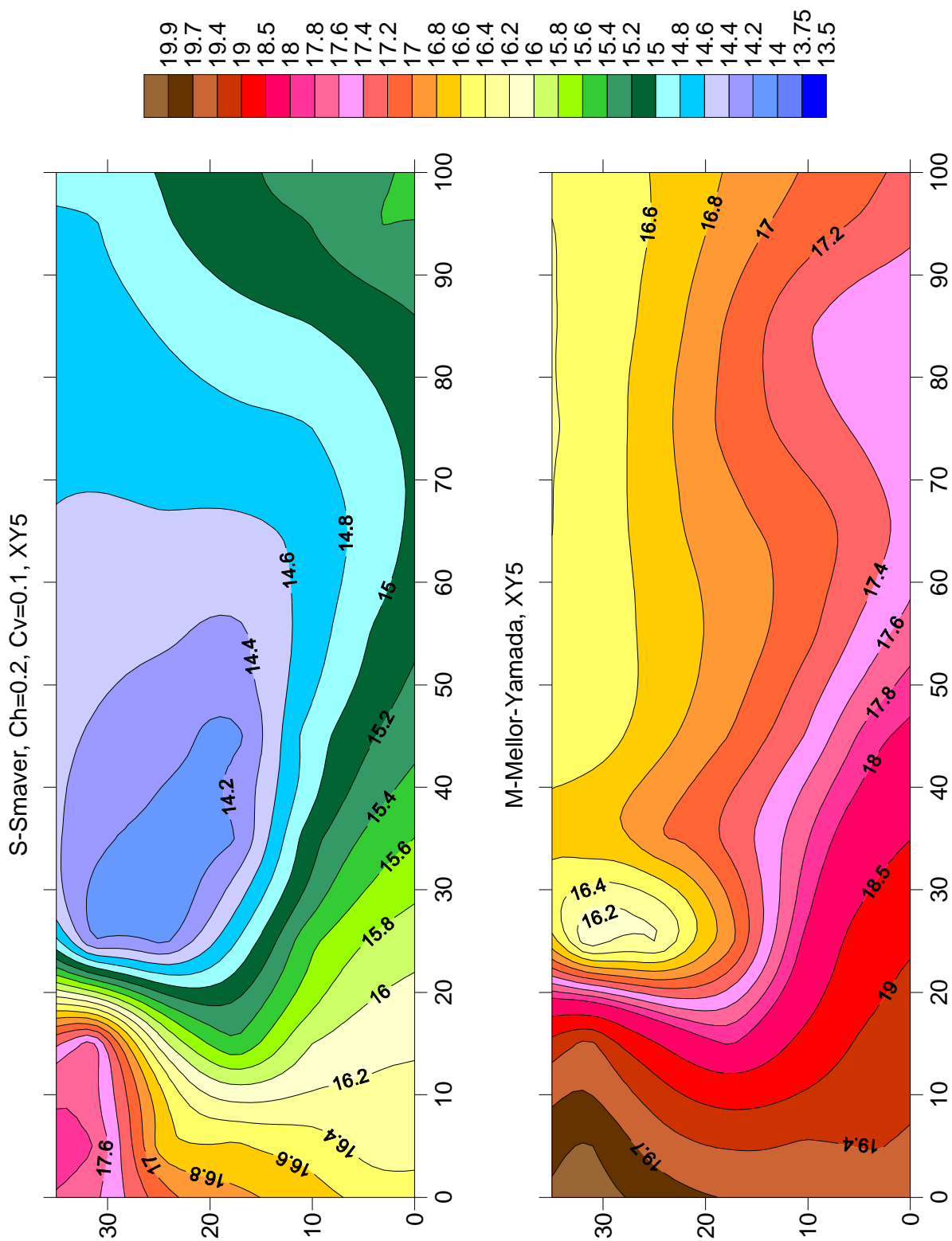
Slika 3.1- 5: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY3 izračunane po dveh metodah.



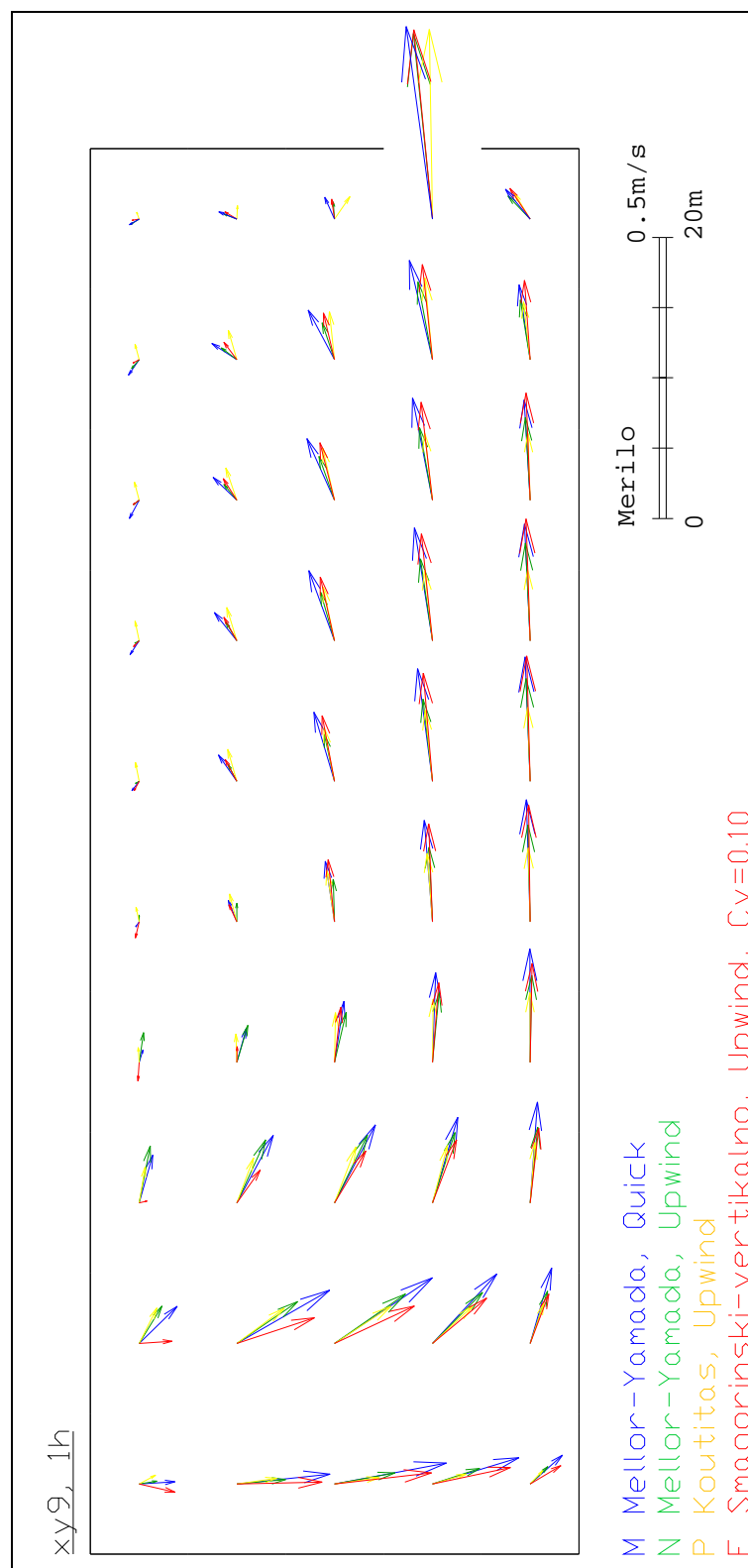
Slika 3.1- 6: Izolinije za temperaturo T [$^{\circ}\text{C}$] v sloju XY3 za primer KOU in MYU.



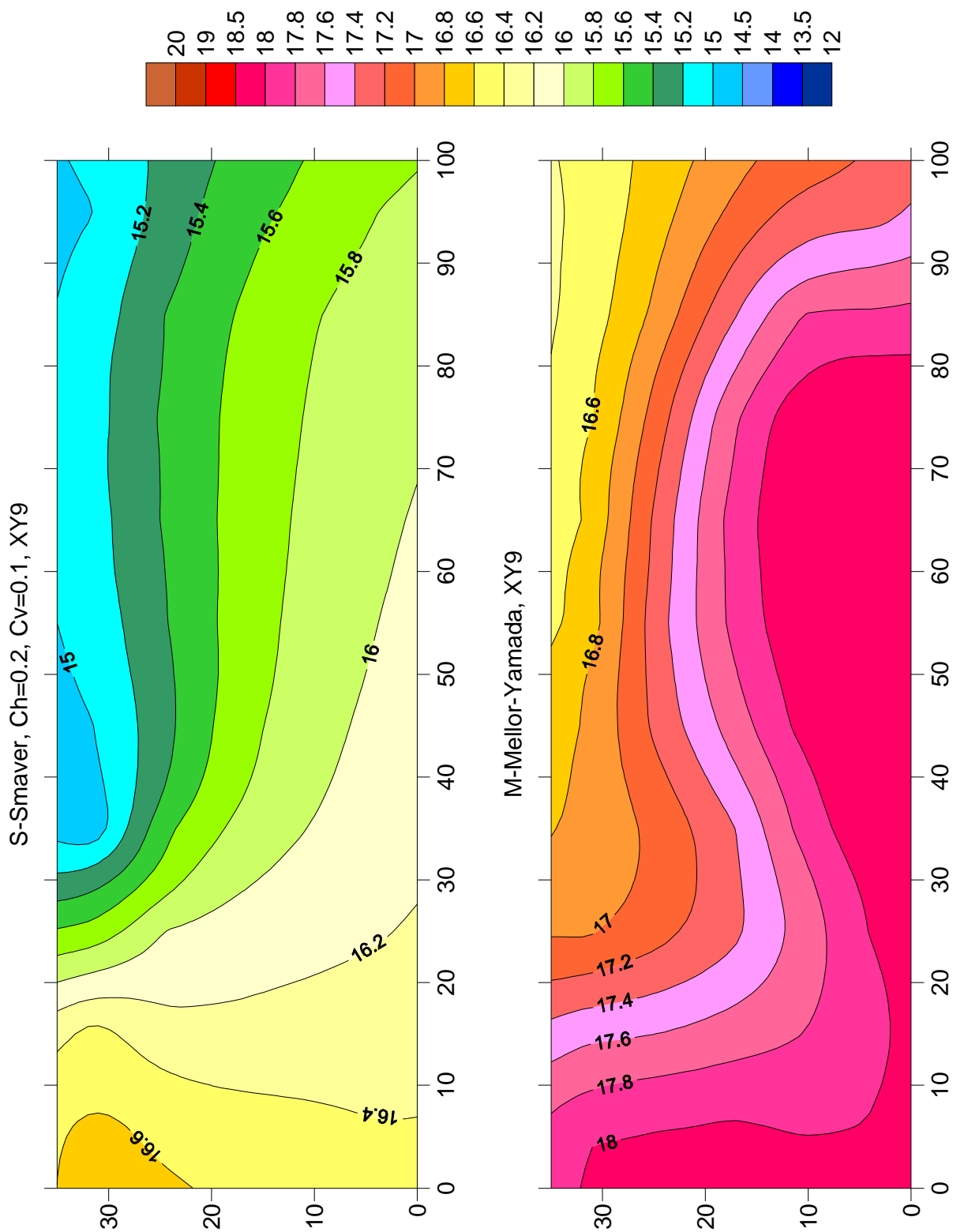
Slika 3.1- 7: Hitrostno polje v sloju XY5 po 1h.



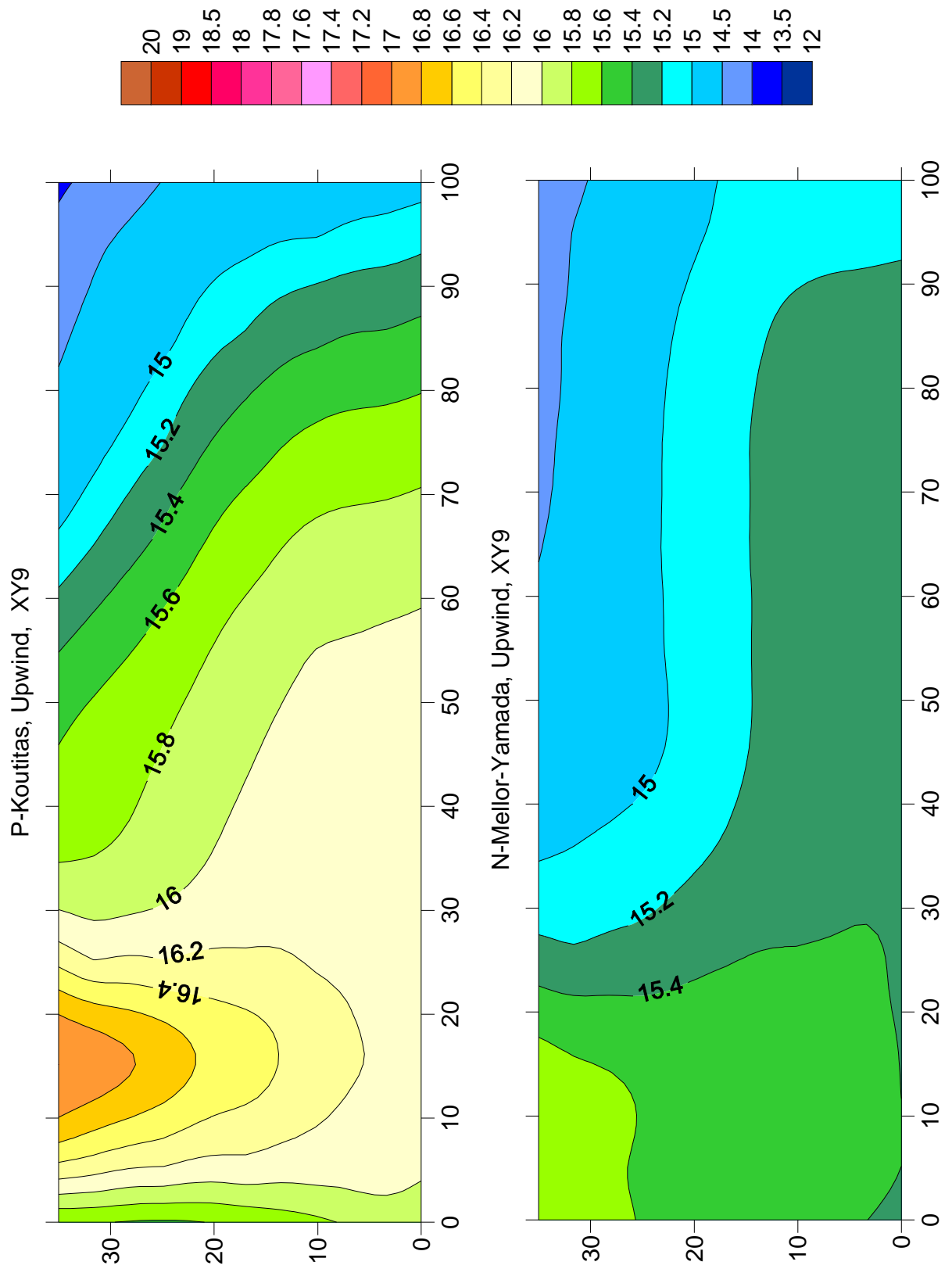
Slika 3.1- 8: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY5.



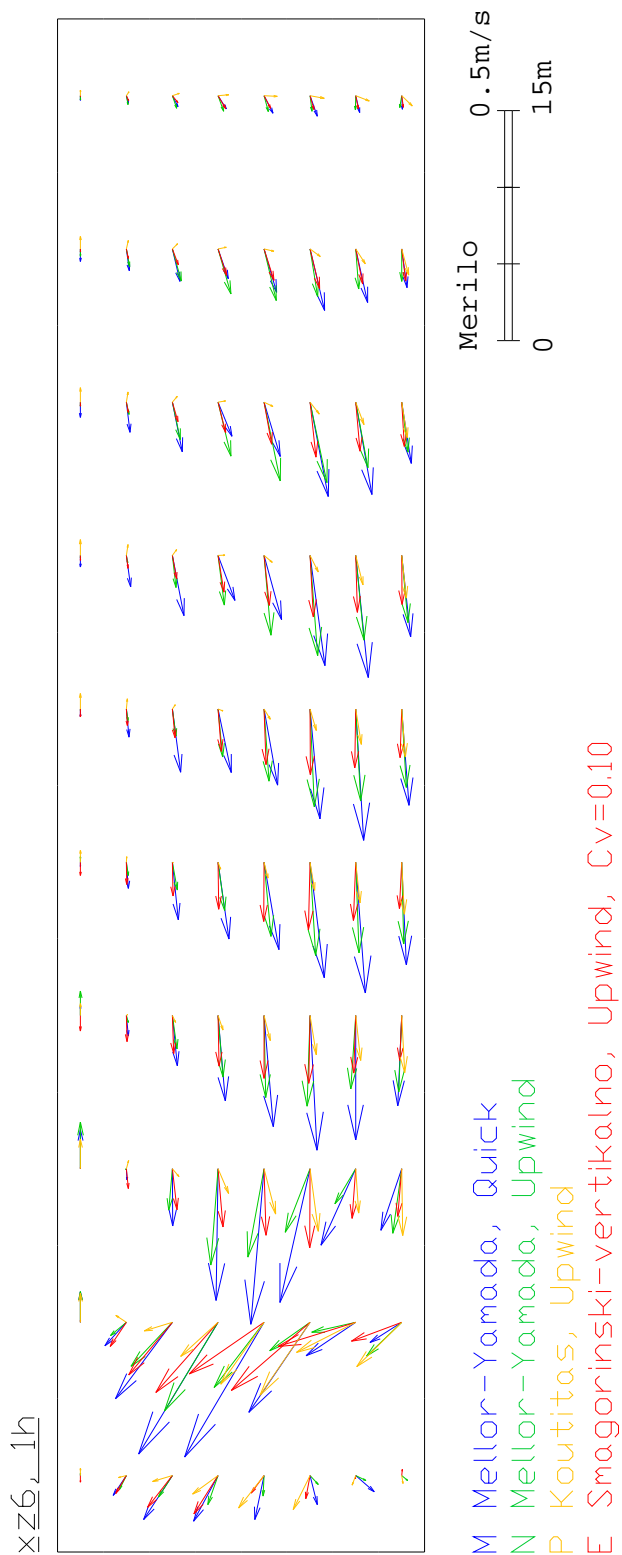
Slika 3.1- 9: Hitrostno polje v zgornjem sloju XY9 po 1h.



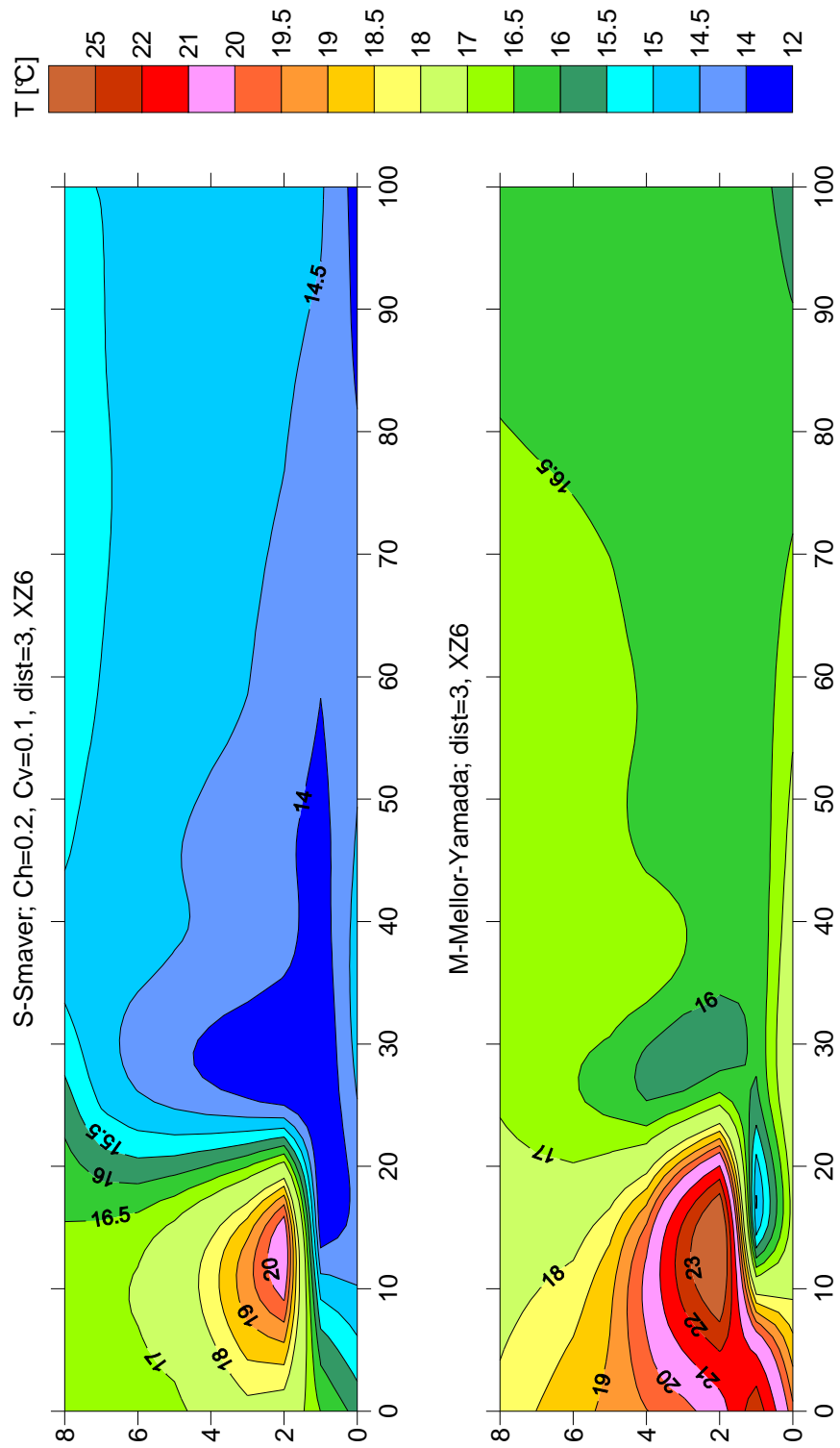
Slika 3.1- 10: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY9.



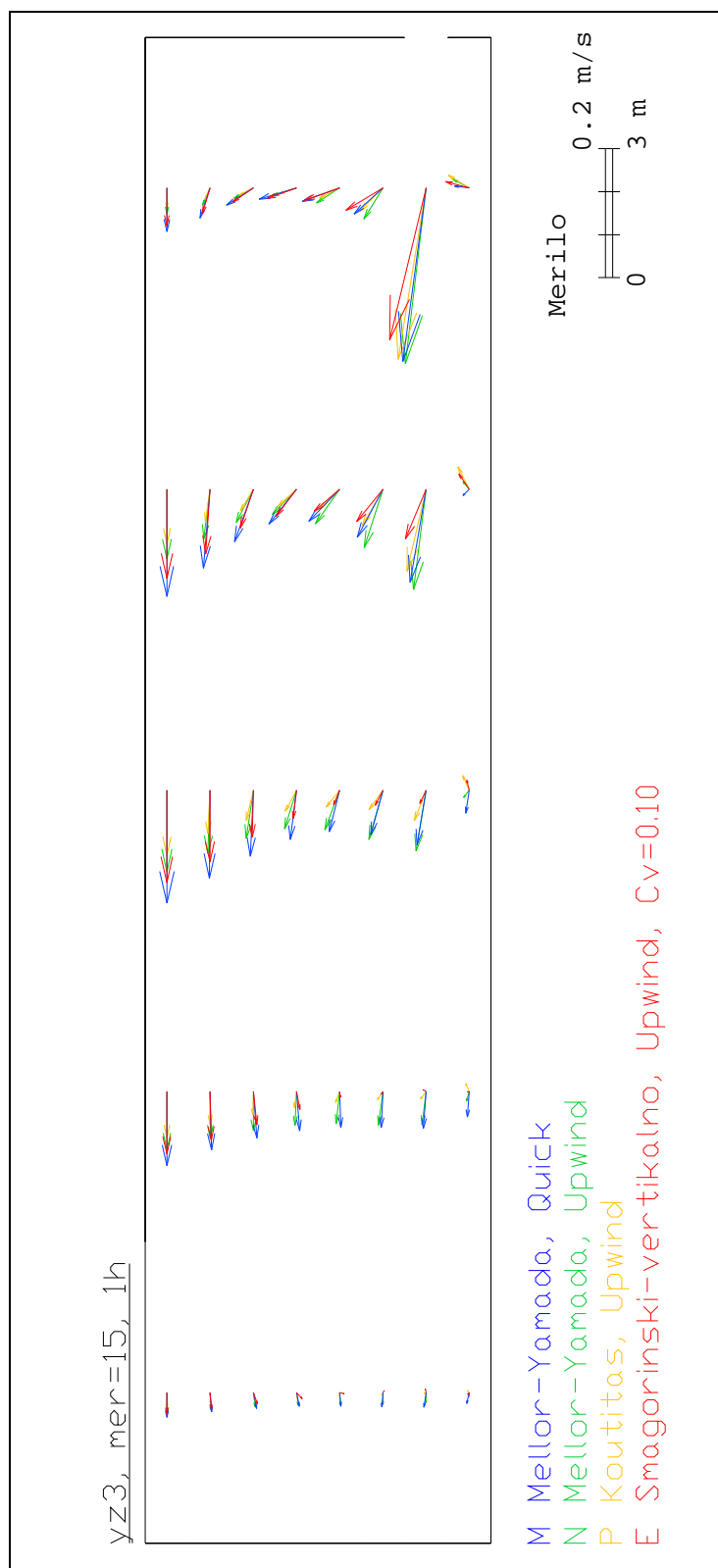
Slika 3.1- 11: Izolinije za temperaturo T [°C] v sloju XY9 za primer KOU in MYU.



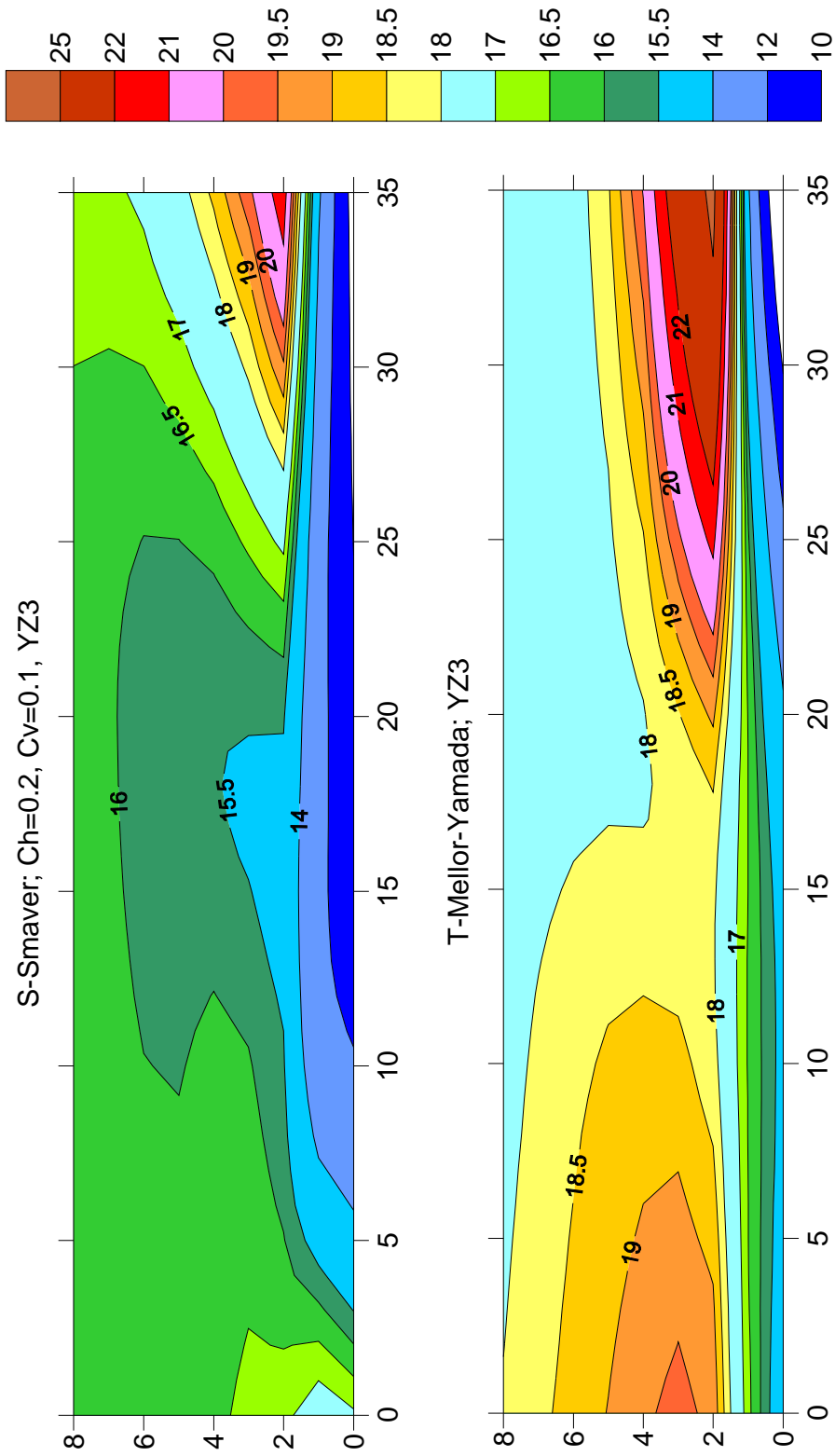
Slika 3.1- 12: Hitrostno polje v prerezu XZ6 po 1h, distorzija v z smeri je 3.



Slika 3.1- 13: Izolinije za temperaturo T [°C] v prerezu XZ6.

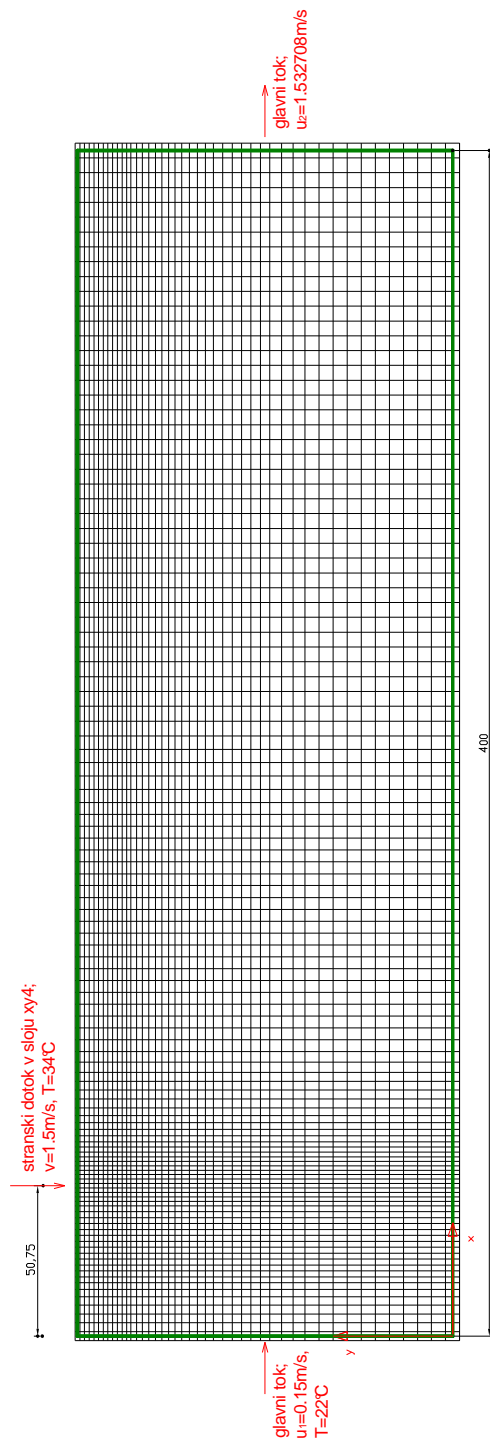


Slika 3.1- 14: Hitrostno polje v prerezu YZ3 (na mestu podvodnega izpusta).

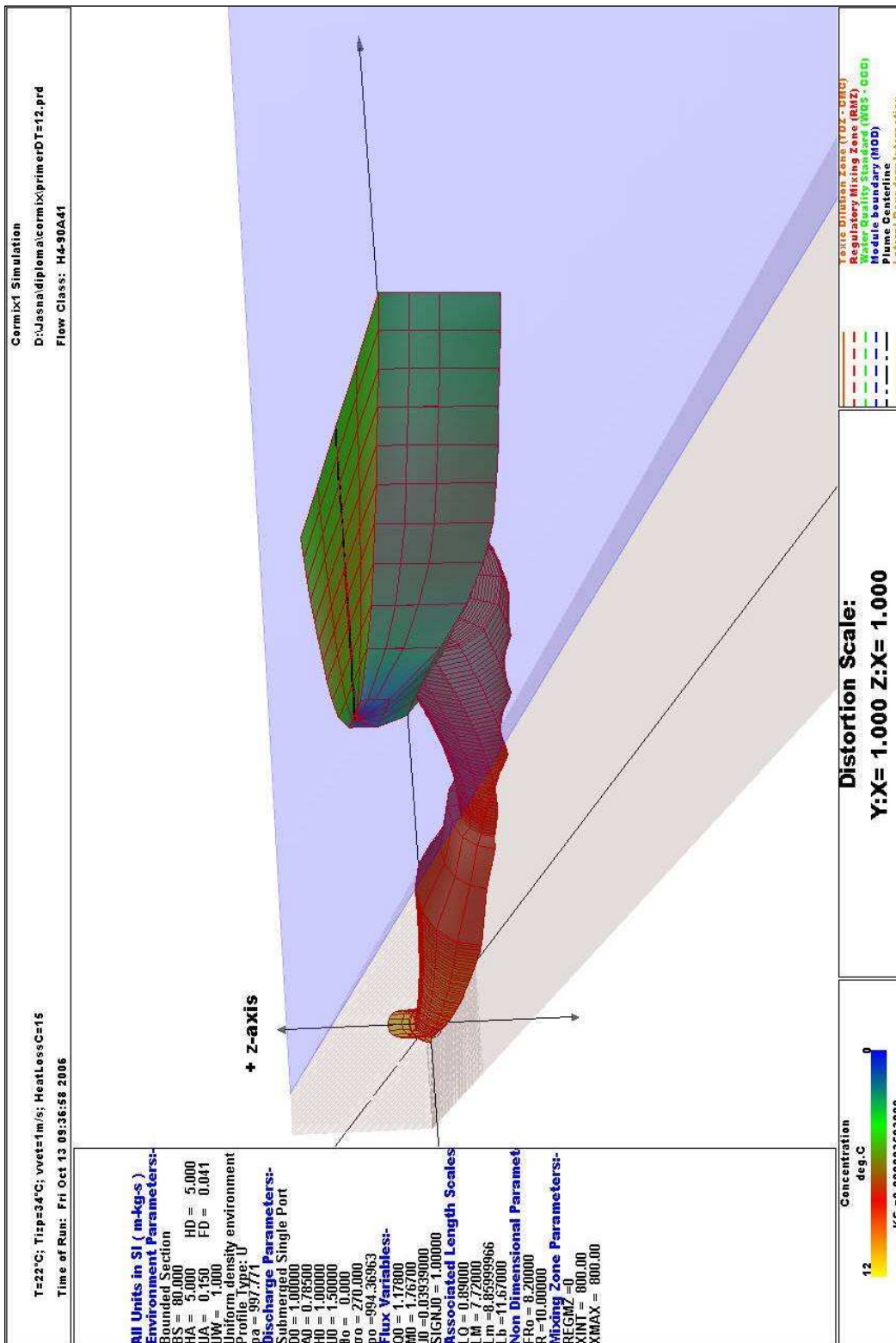


Slika 3.1- 15: Izolinije za temperaturo T [°C] v prerezu YZ3.

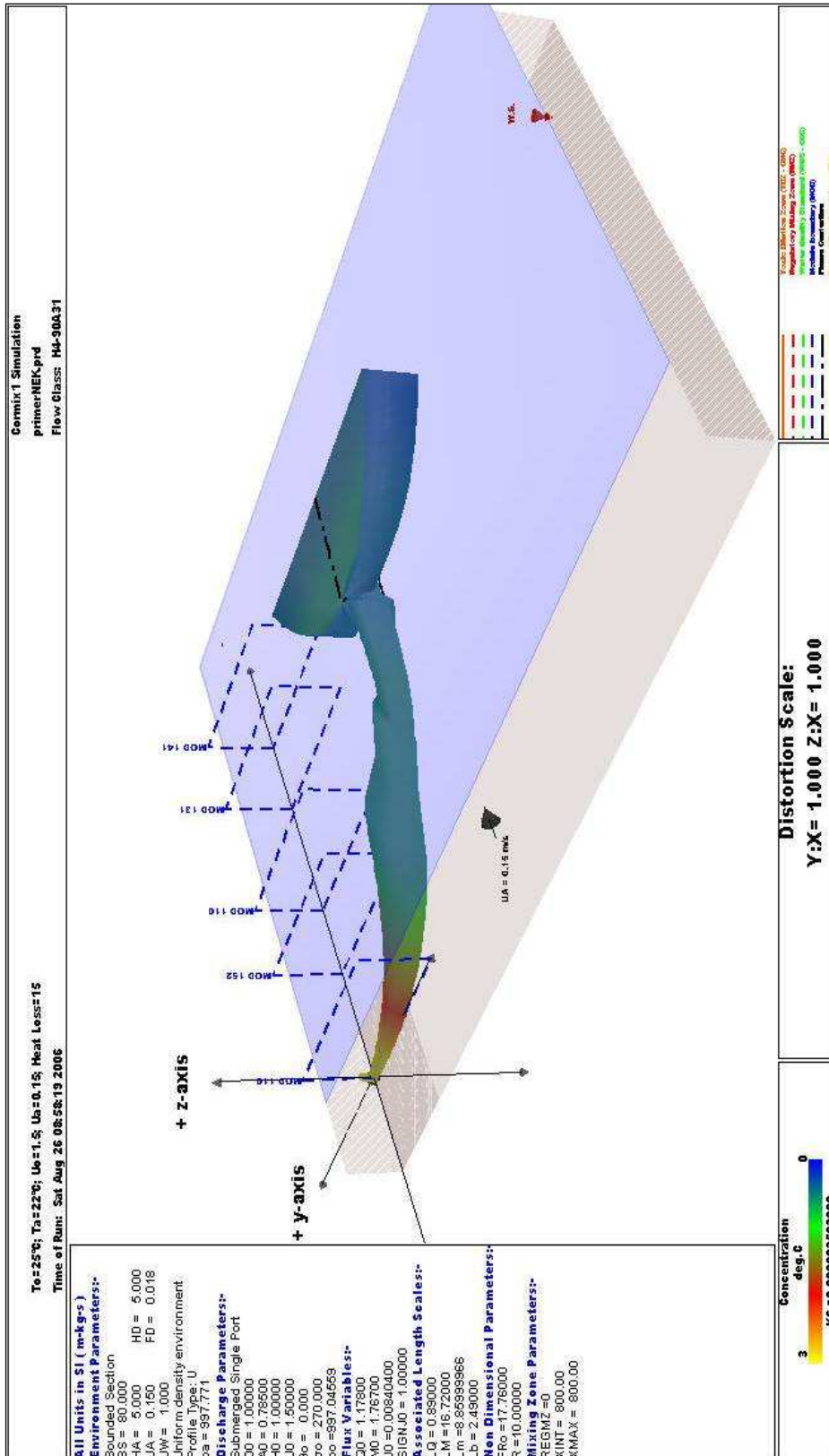
Priloga B: Slike k poglavju 3.2



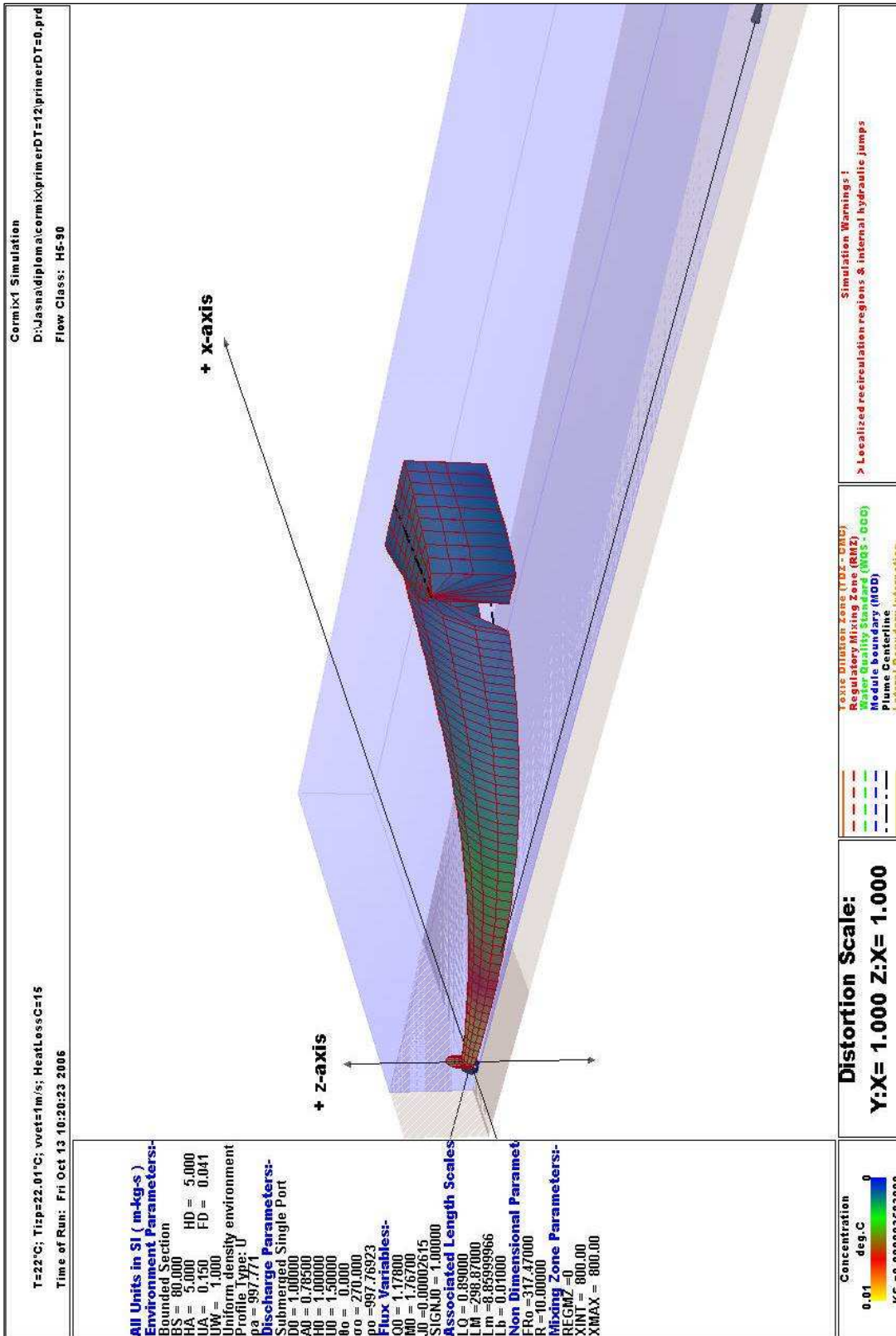
Slika 3.2 - 1: Numerična mreža za primer CORMAL v ravnini xy , distorzija v y smeri je 1.5. Kontrolni volumni so vzdolž x osi označeni z indeksom I , ki teče od 2 do 112, vzdolž y pa z indeksom J , ki teče od 2 do 45.



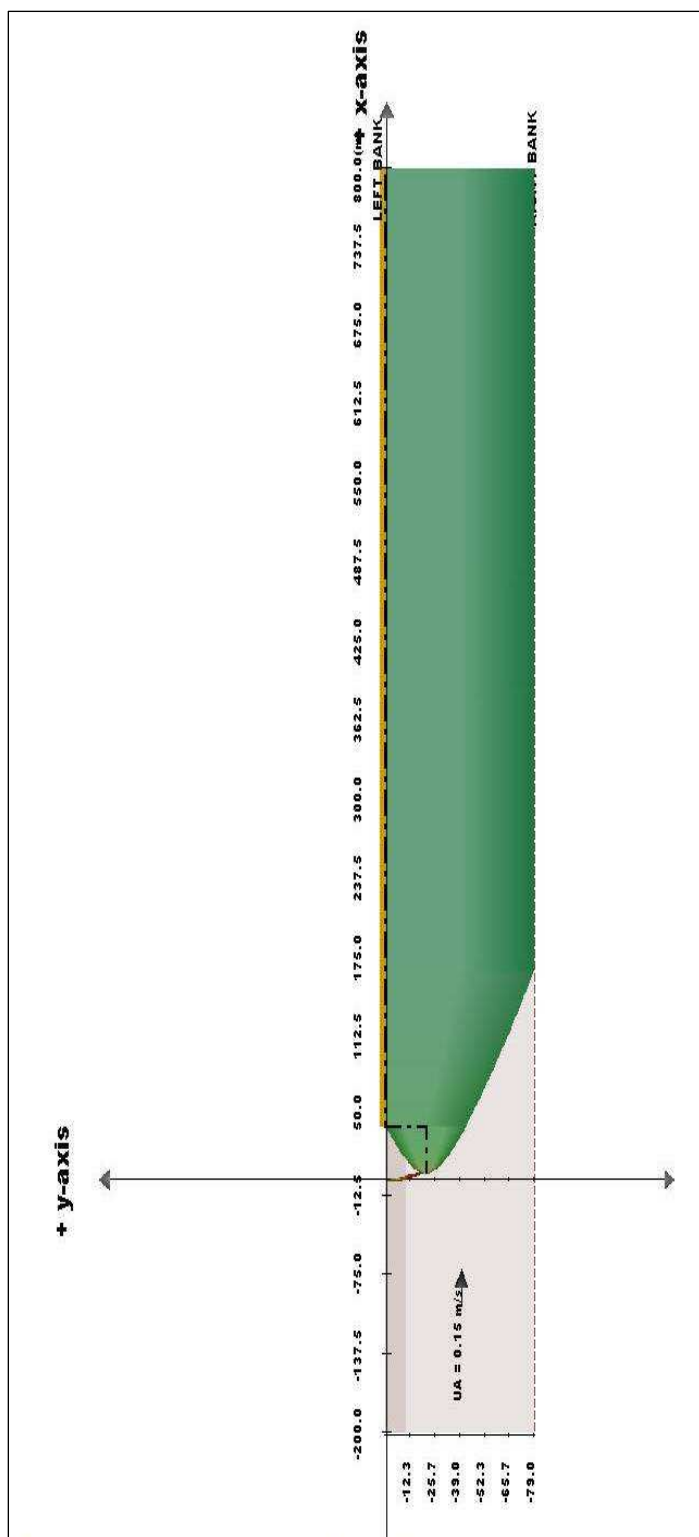
Slika 3.2 - 2: 3D prikaz potovanja iztočnega curka v bližnjem polju za primer CMX01.



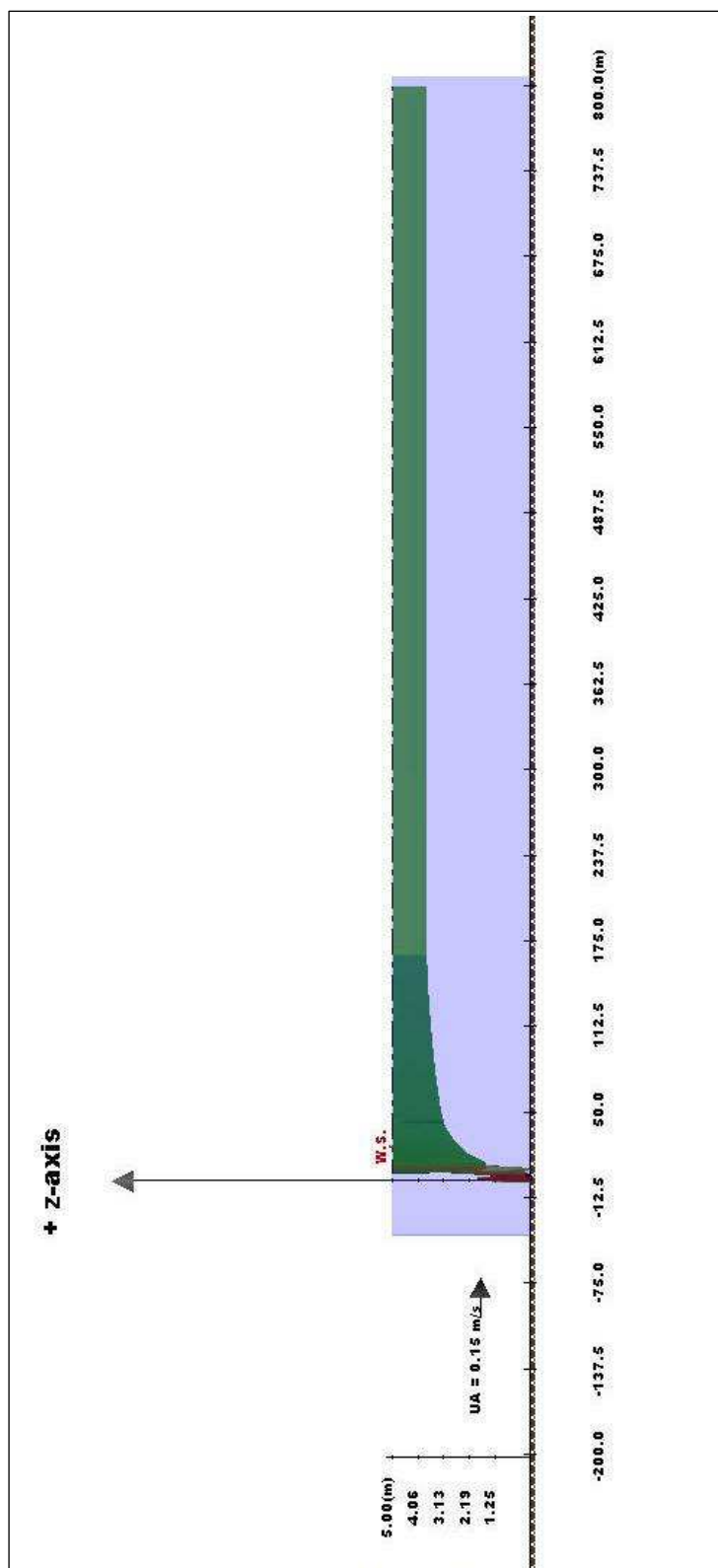
Slika 3.2 - 3: 3D prikaz potovanja iztočnega curka v bližnjem polju za primer CMX02.



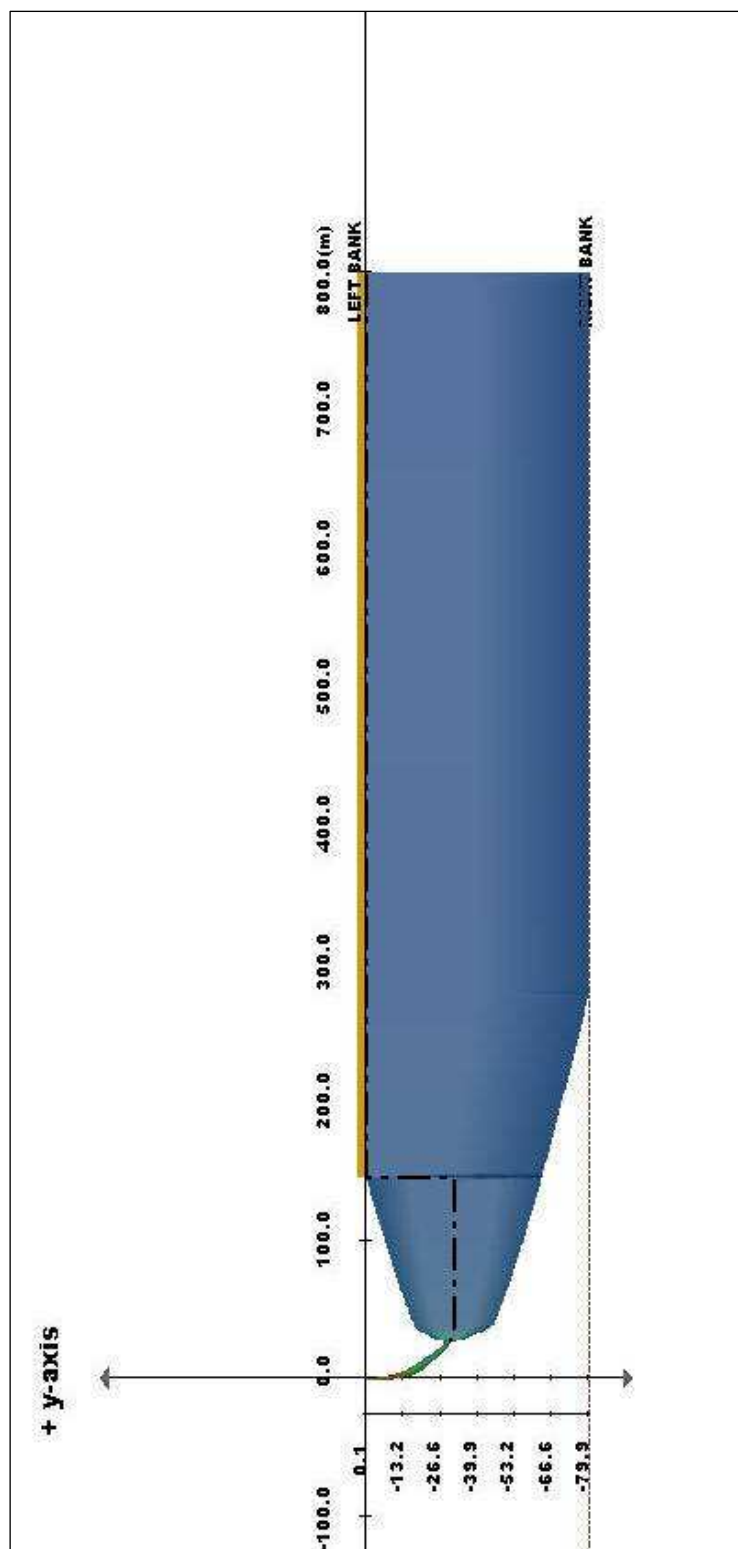
Slika 3.2 - 4: 3D prikaz potovanja iztočnega curka v bližnjem polju za primer CMX03.



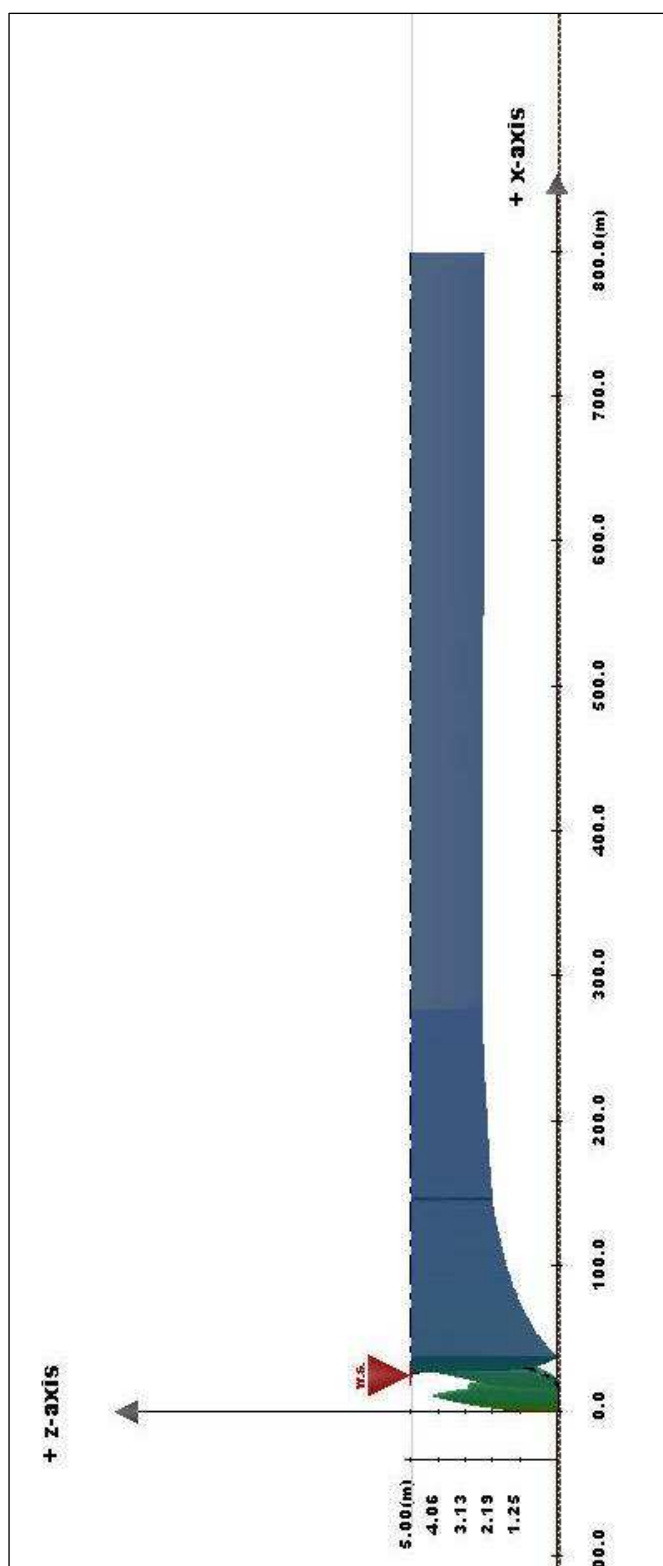
Slika 3.2 - 5: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX01 (tloris XY, distorzija = 2).



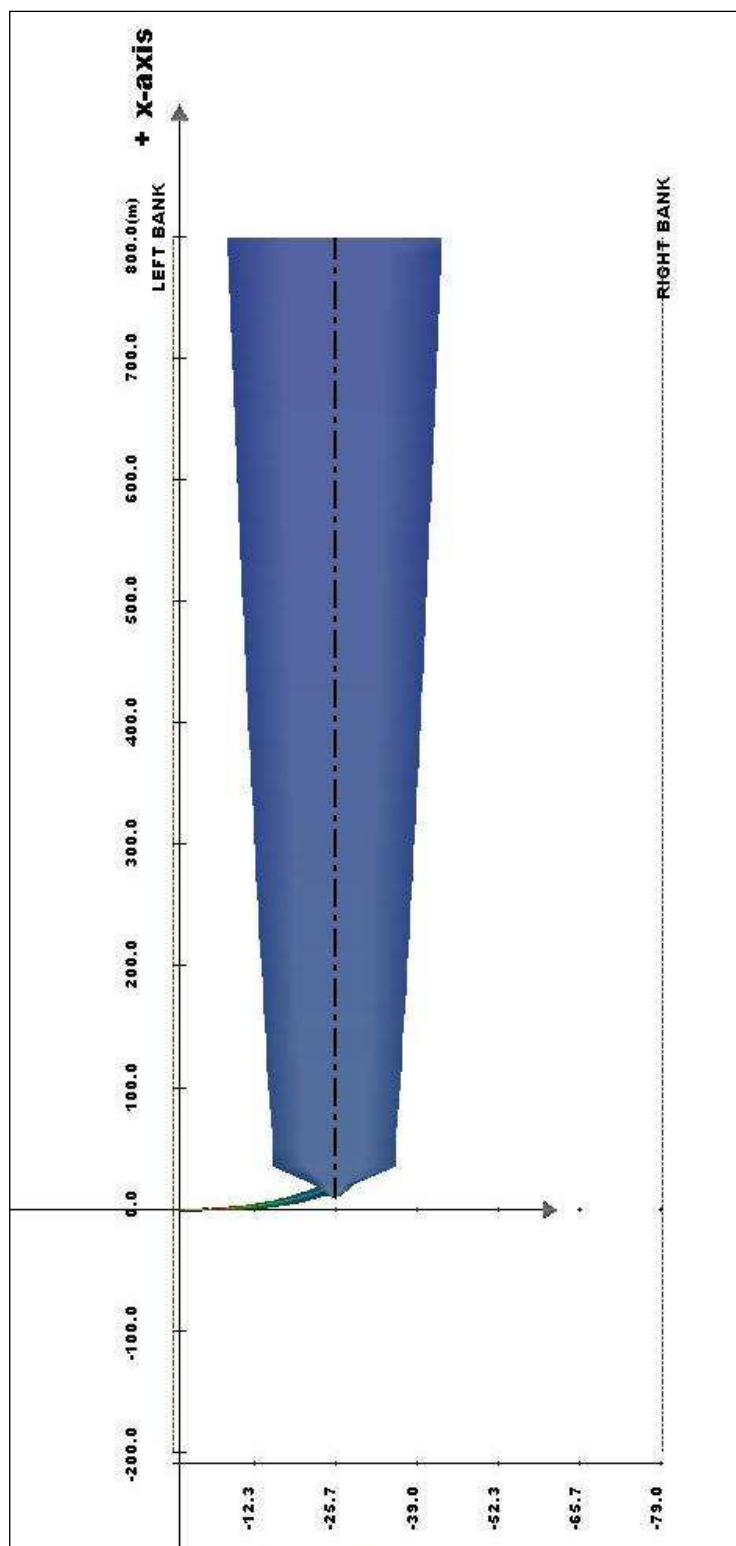
Slika 3.2 - 6: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX01 (stranski ris XY, distorzija = 20).



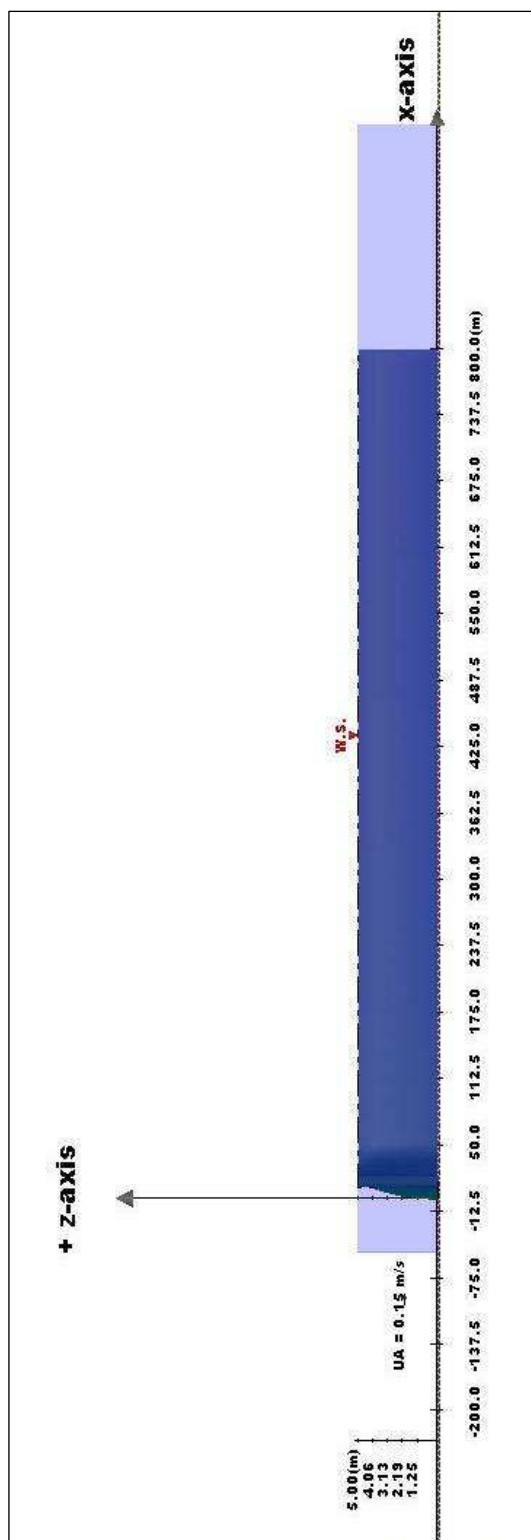
Slika 3.2 - 7: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX02 (tloris XY, distorzija = 2).



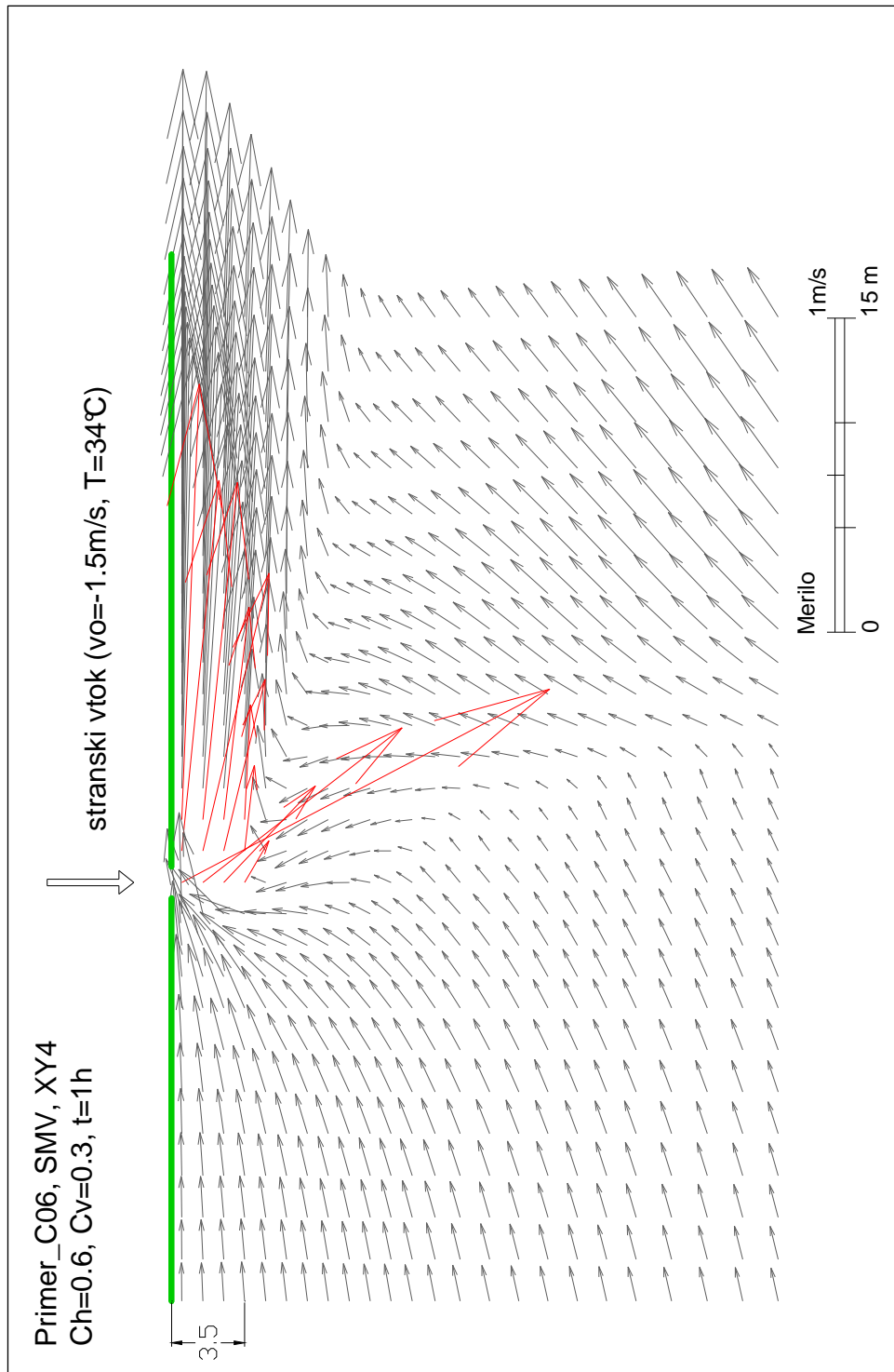
Slika 3.2 - 8: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX02 (stranski ris XY, distorzija = 20).



Slika 3.2 - 9: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX03 (tloris XY, distorzija = 20).

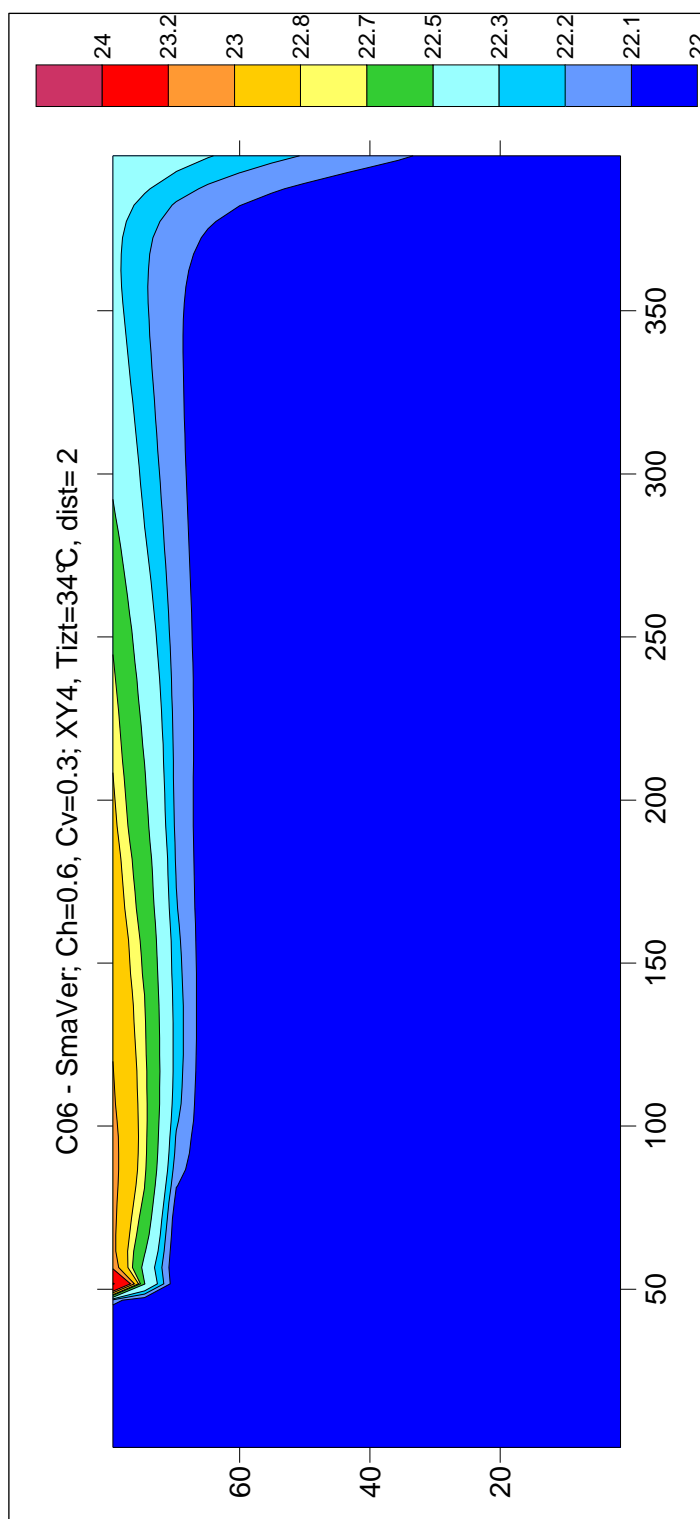


Slika 3.2 - 10: Prikaz potovanja iztočnega curka v daljnem polju za primer CMX03 (stranski ris XY, distorzija = 20).

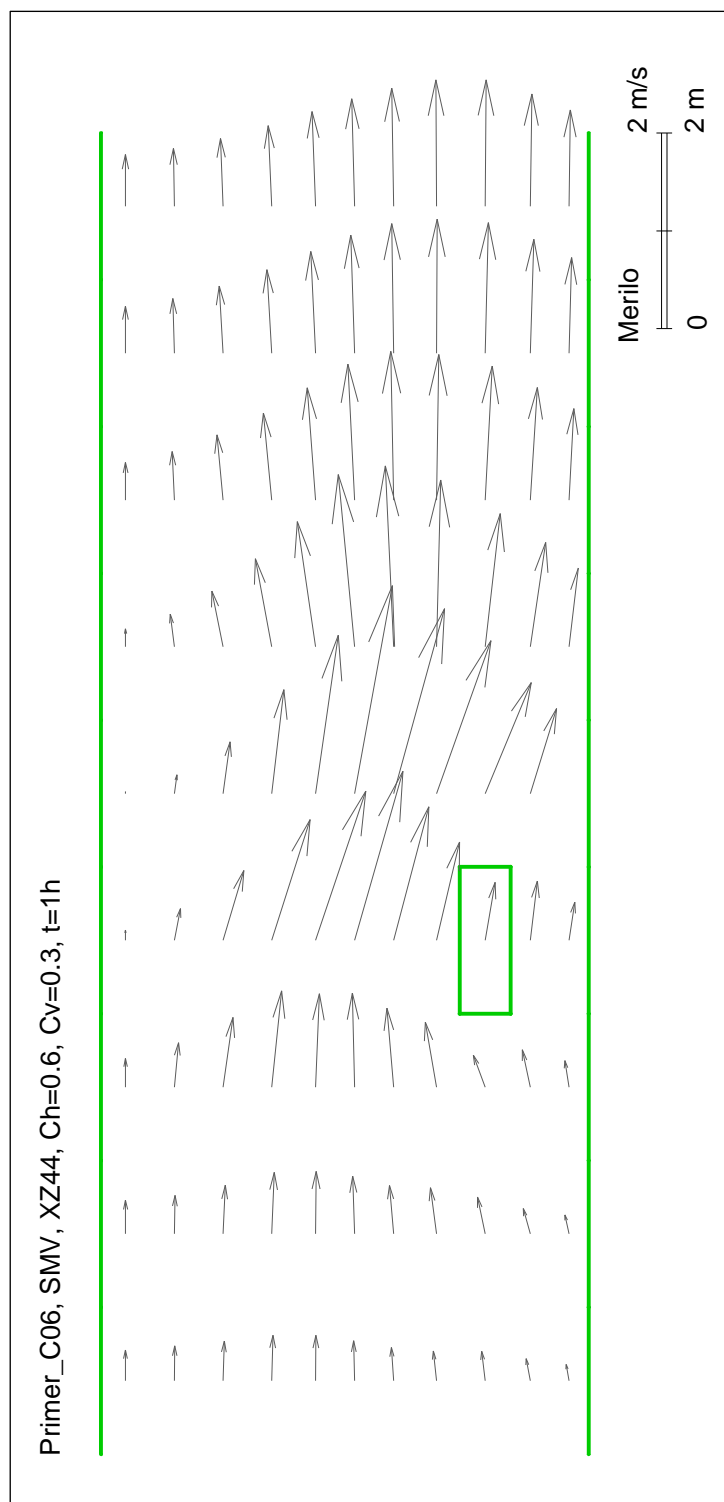


Slika 3.2 - 11: Detajl hitrostnega polja v sloju XY4 na mestu stranskega vtoka.

Z rdečo je označenih prvih nekaj hitrosti, kjer je lepo vidno, kako se tok relativno hitro preusmeri k levemu robu kanala.

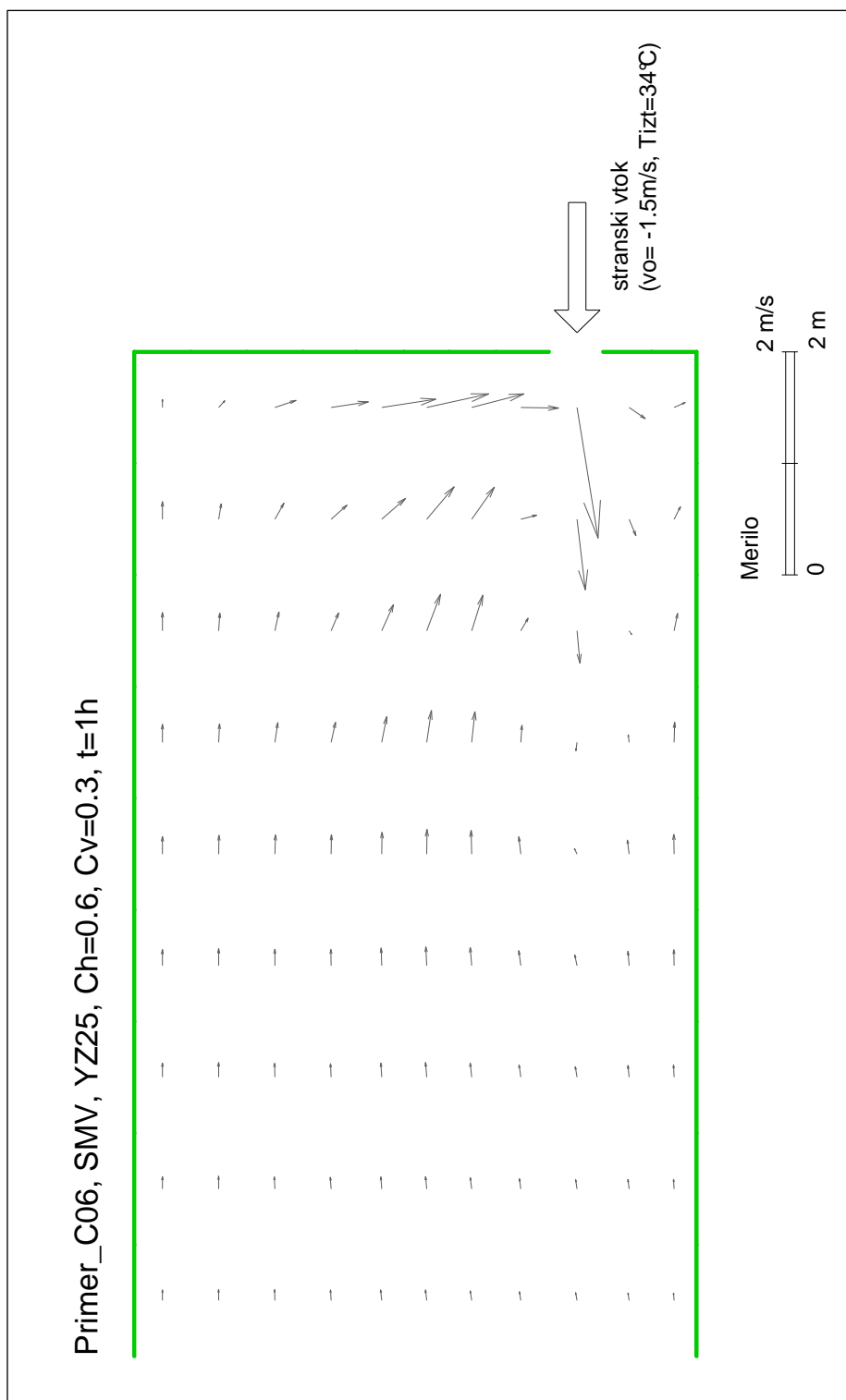


Slika 3.2 - 12: Potek temperature v sloju XY4 za primer C06.



Slika 3.2 - 13: Detajl hitrostnega polja v prerezu XZ44 na mestu stranskega vtoka.

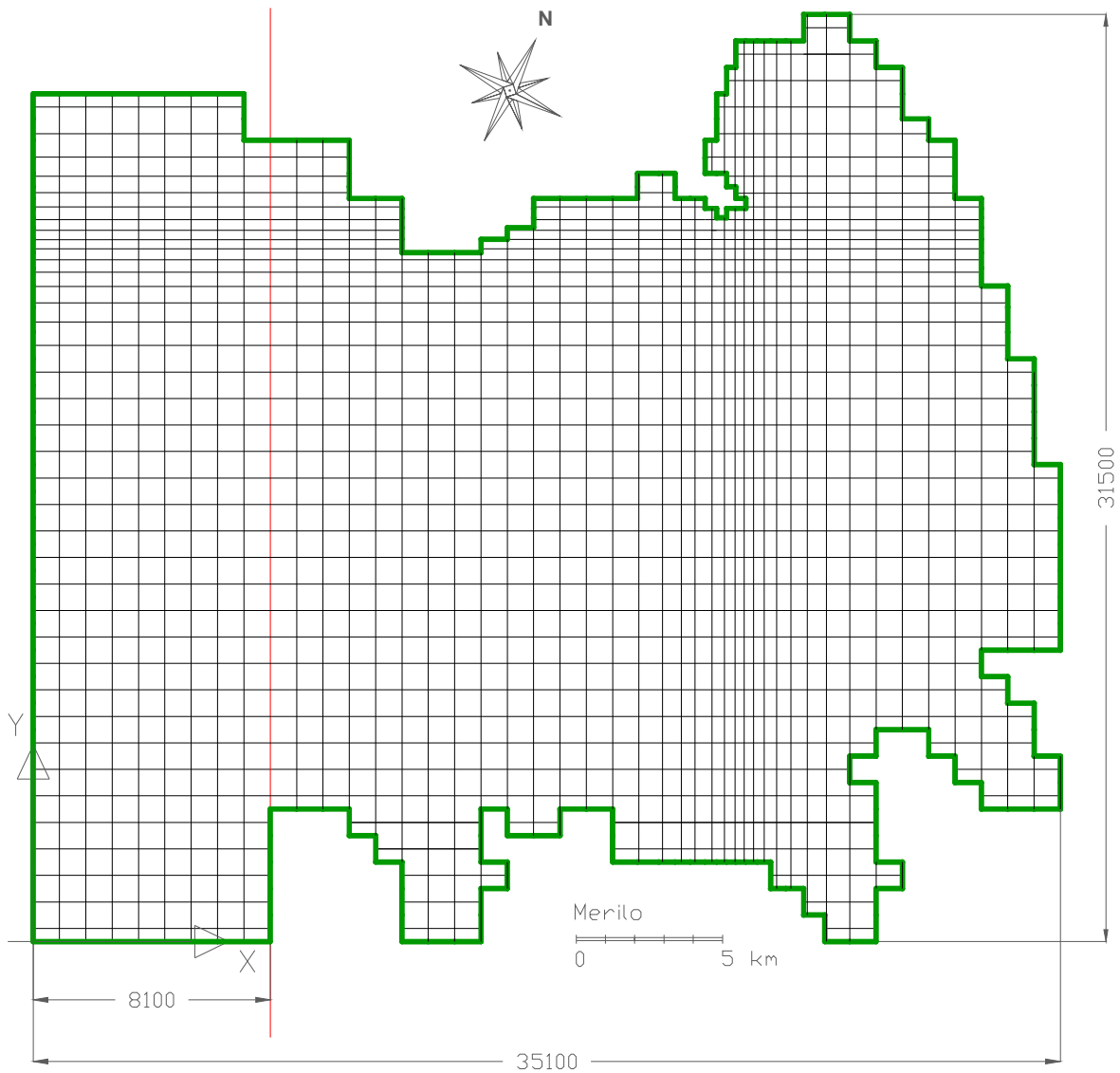
Ker so hitrostna polja za vse tri primere zelo podobna, je na sliki prikazan samo detajl za primer C06.



Slika 3.2 - 14: Detajl hitrostnega polja v sloju YZ25 na mestu stranskega vtoka.

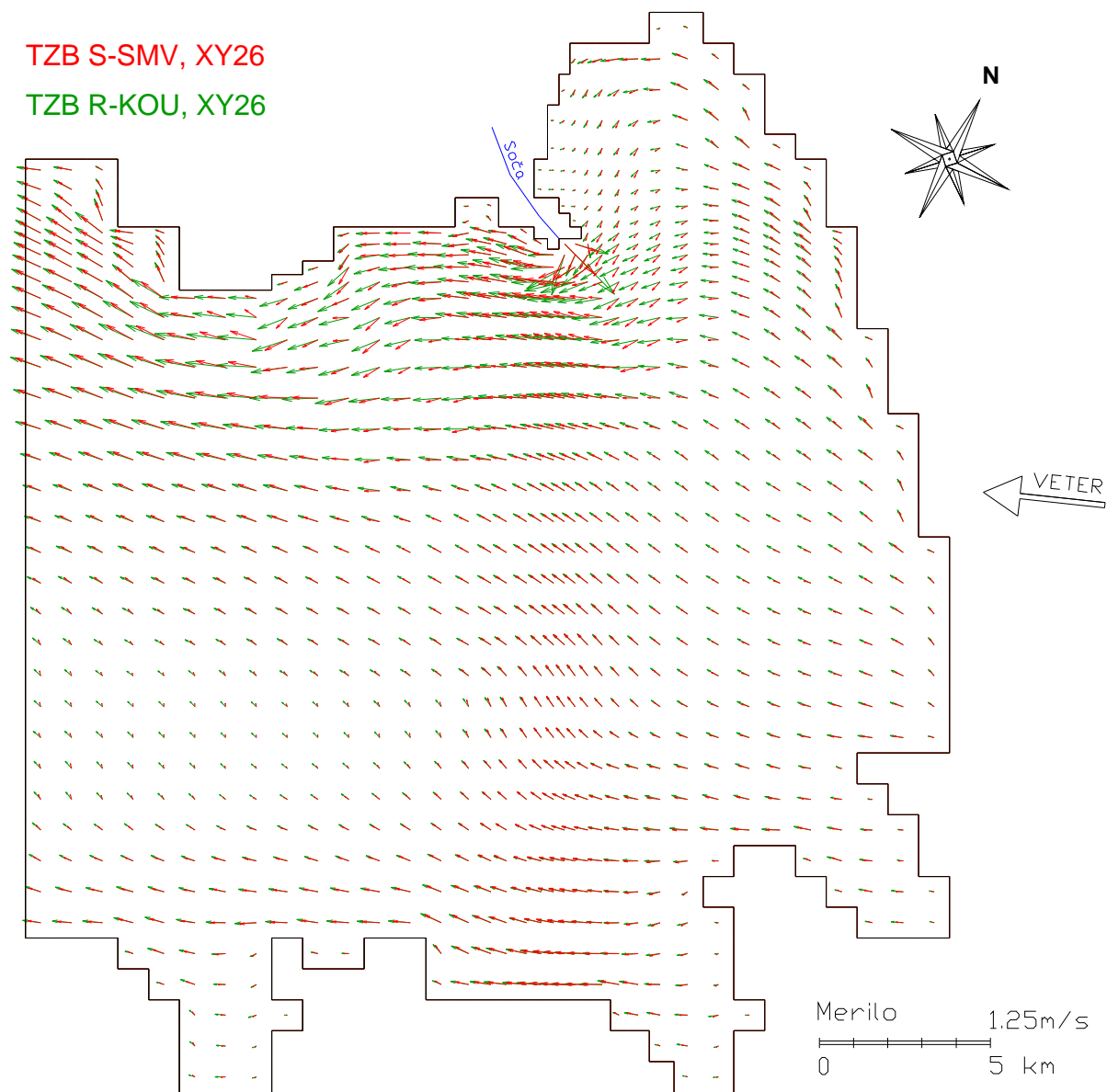
Ob steni se pojavijo velike vertikalne hitrosti.

Priloga C: Slike k poglavju 3.3

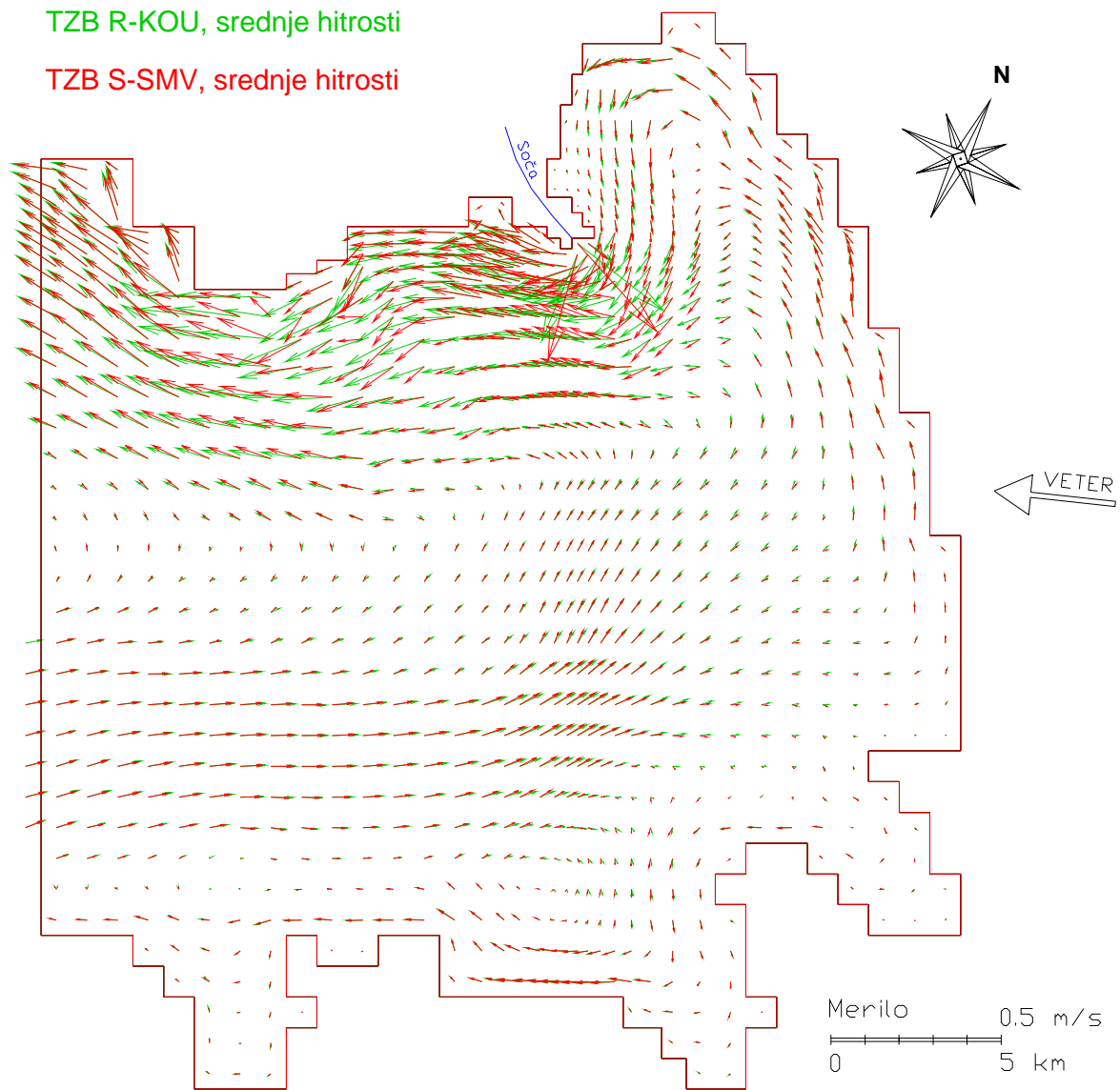


Slika 3.3 - 1: Numerična mreža za primer *Tržaški zaliv*.

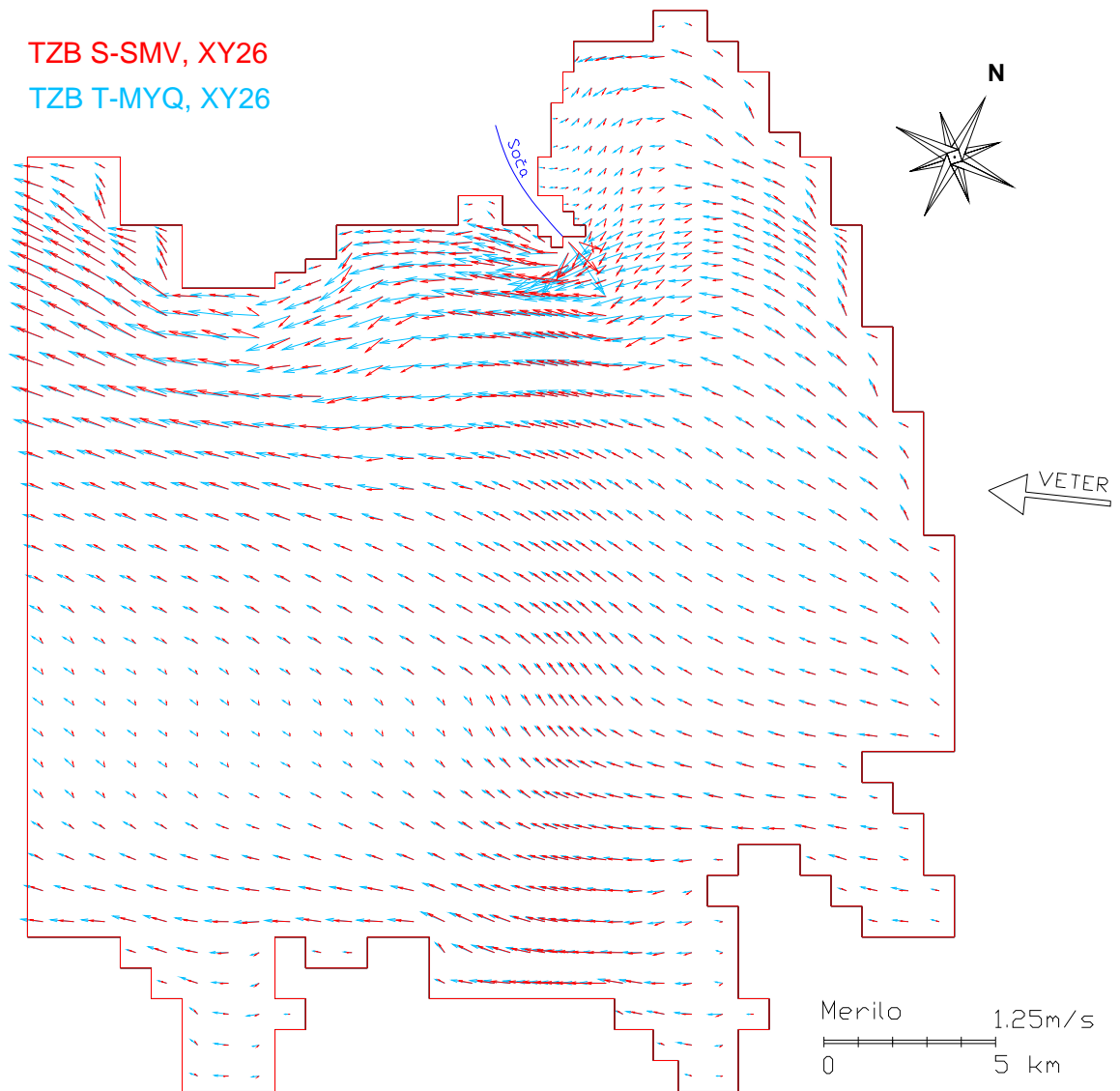
Na levem robu ($X = 8100$ m) je z rdečo črto označena meja med obravnavanim in podaljšanim območjem.



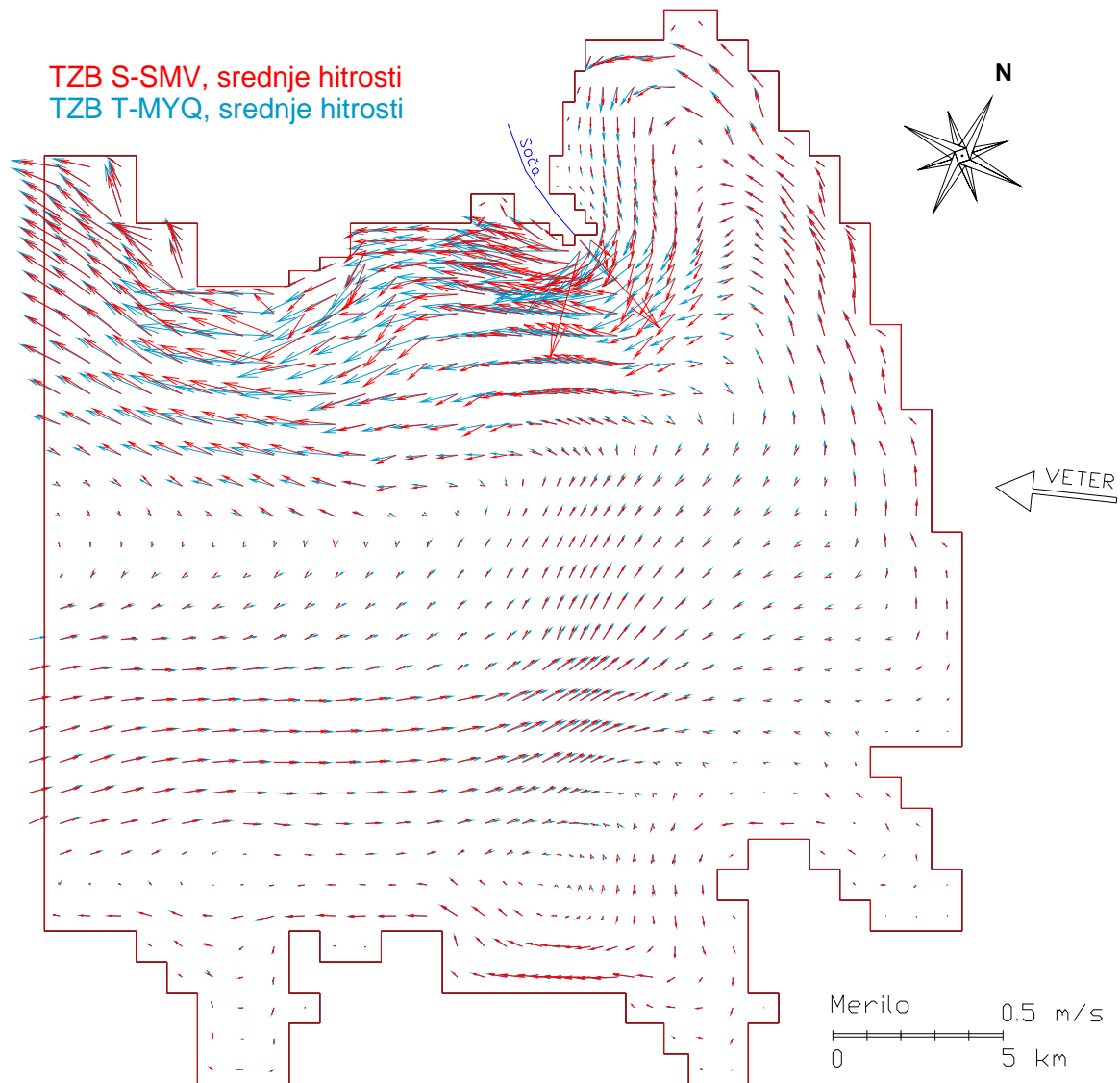
Slika 3.3 - 2: Hitrostno polje v površinskem sloju XY26. Primerjava modelov SMV in KOU.



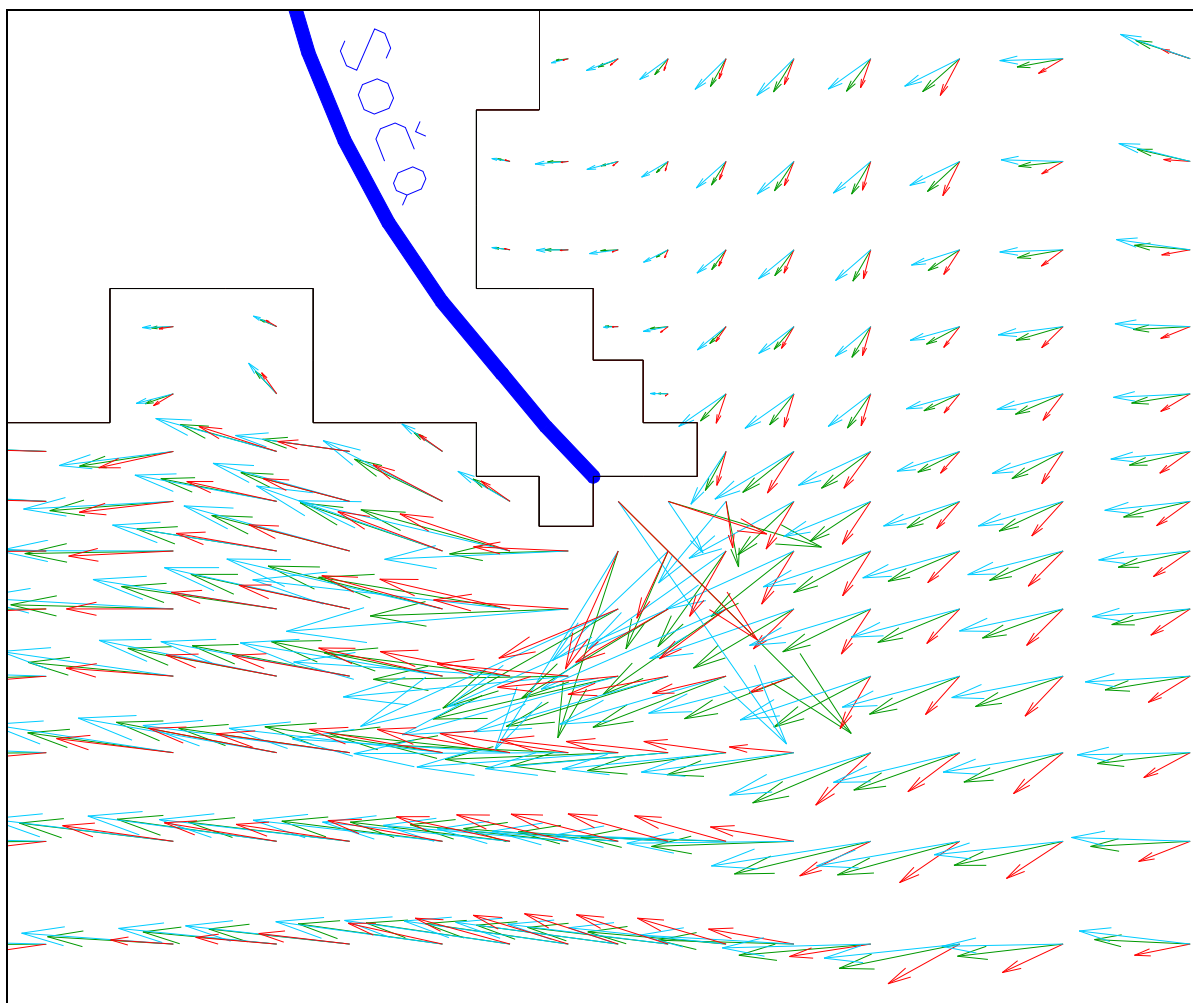
Slika 3.3 - 3: Hitrostno polje srednjih hitrosti. Primerjava modelov SMV in KOU.



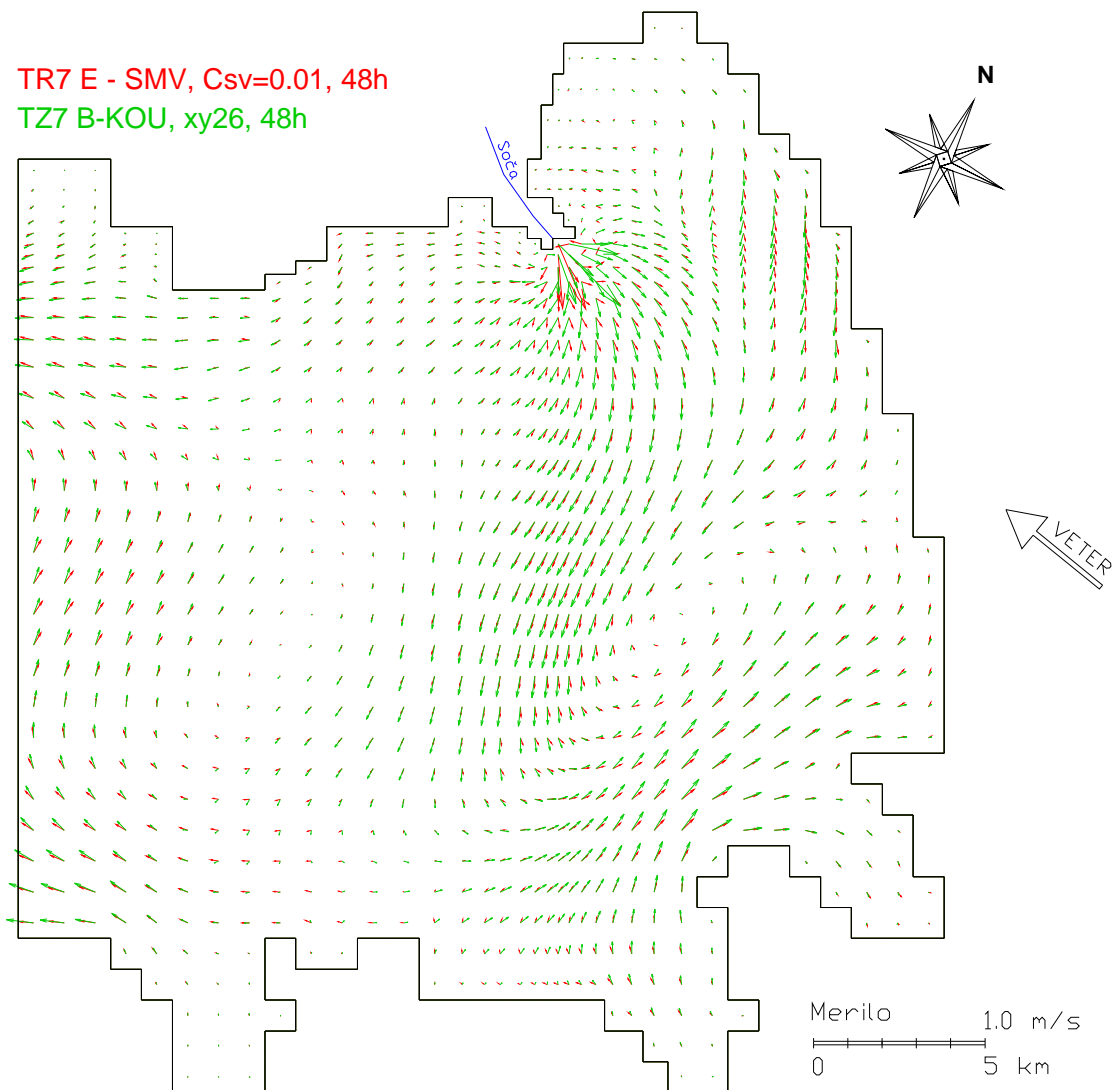
Slika 3.3 - 4: Hitrostno polje v površinskem sloju XY26. Primerjava modelov SMV in MYQ.



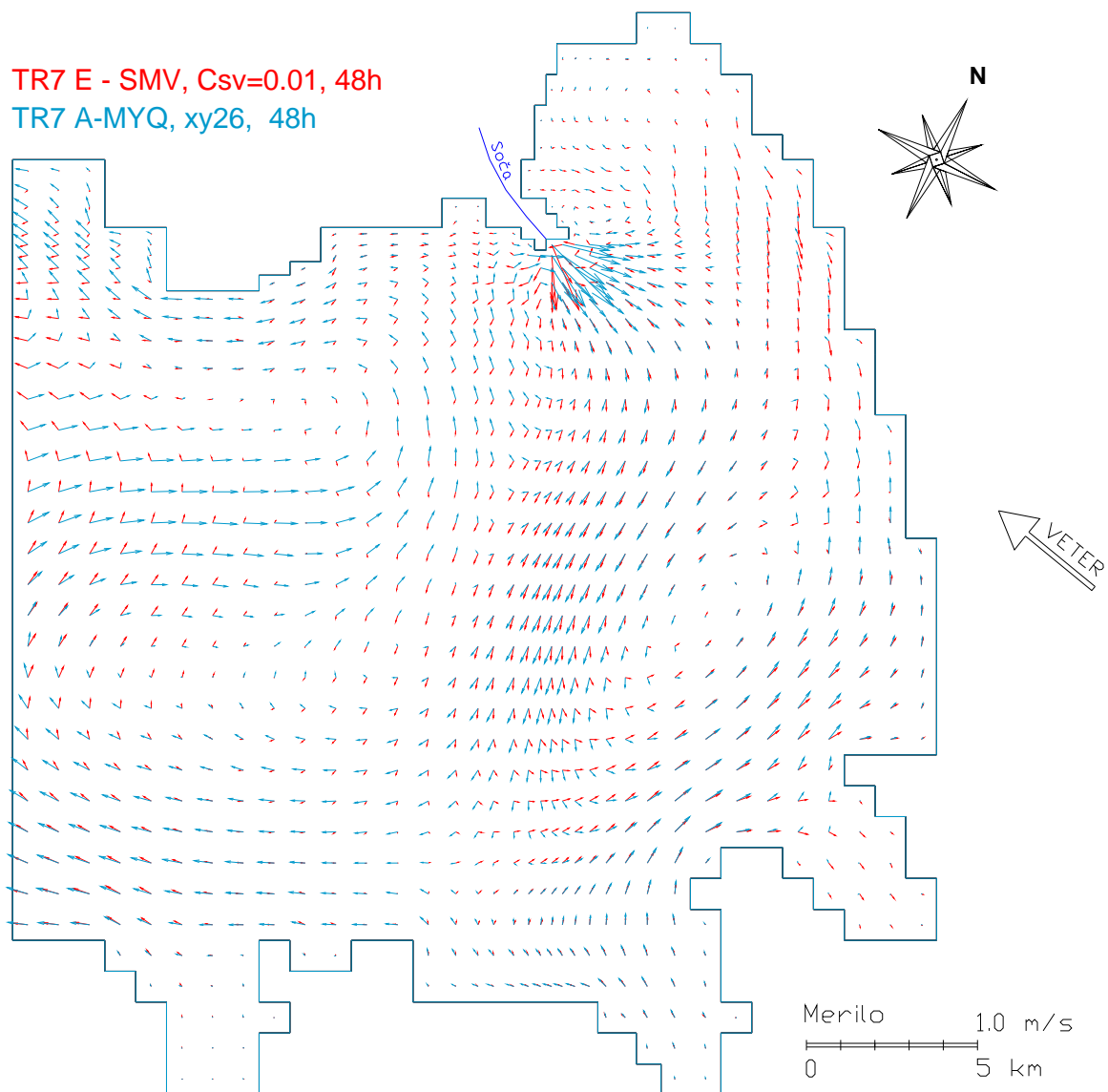
Slika 3.3 - 5: Hitrostno polje srednjih hitrosti. Primerjava modelov SMV in MYQ.



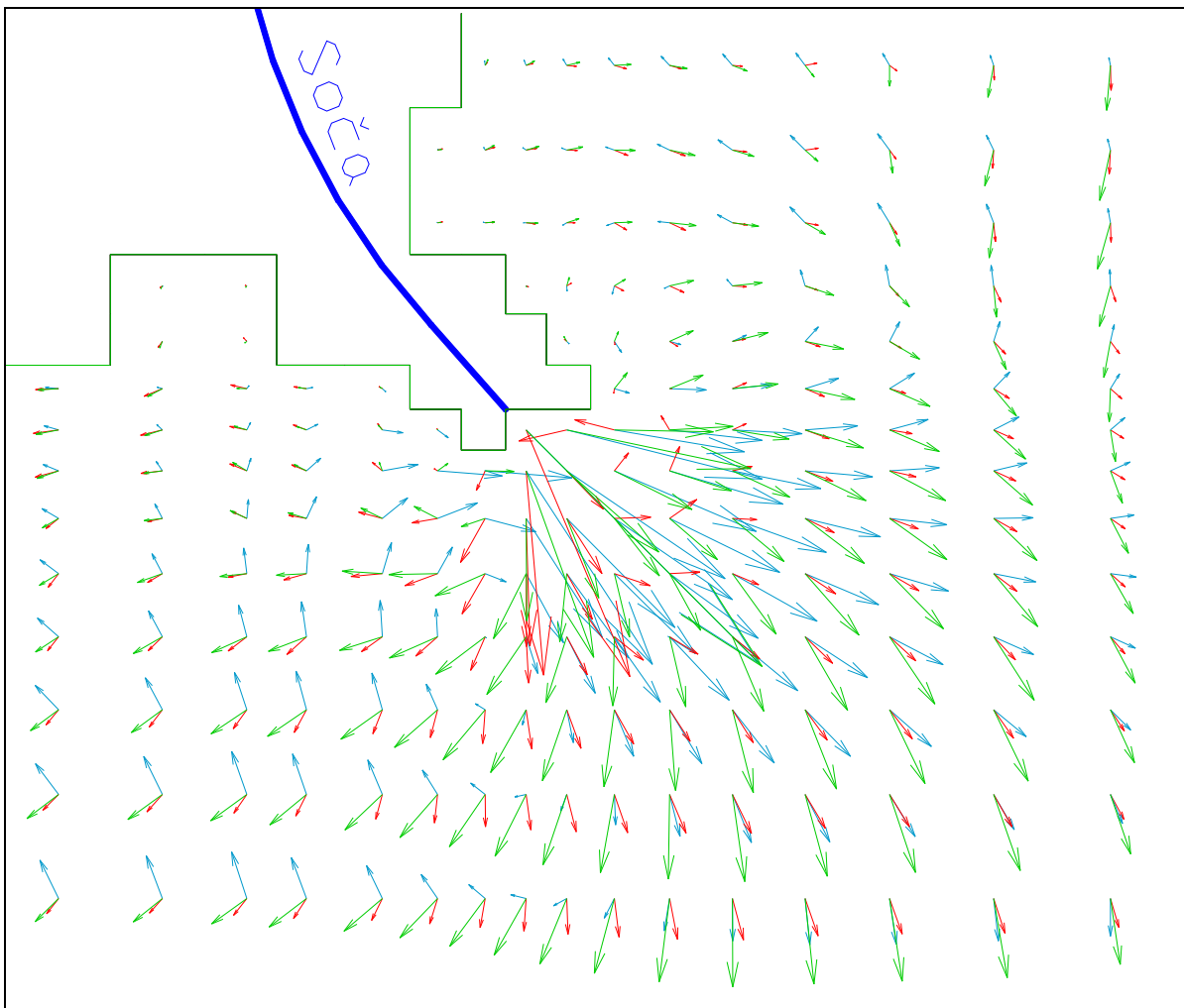
Slika 3.3 - 6: Detajl hitrostnega polja v površinskem sloju XY26 na mestu vtoka reke Soče. Primerjava modelov SMV (rdeče puščice), MYQ (modre puščice) in KOU (zelene puščice) za primer TZB.



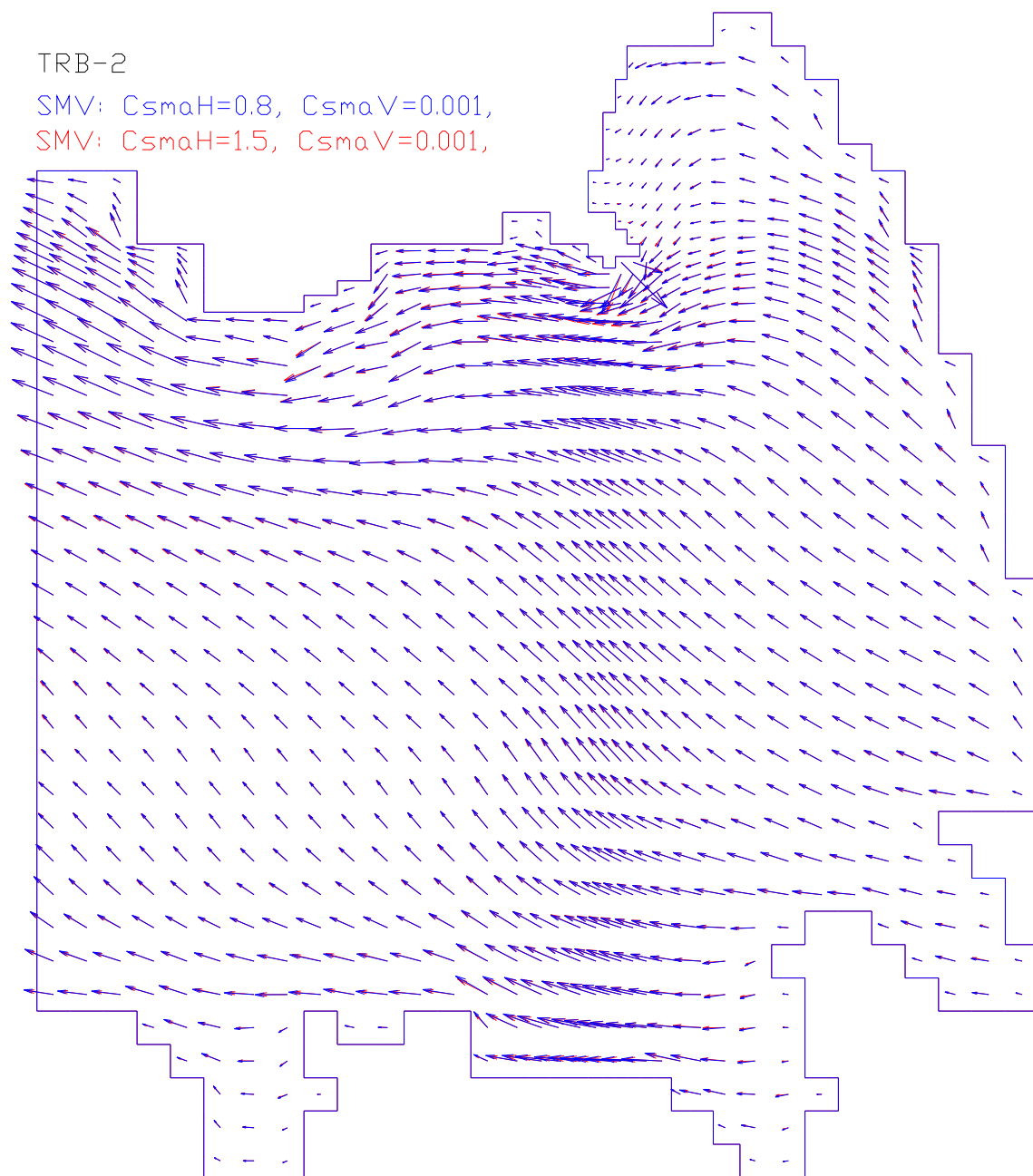
Slika 3.3 - 7: Hitrostno polje v površinskem sloju XY26. Primerjava modelov SMV in KOU.



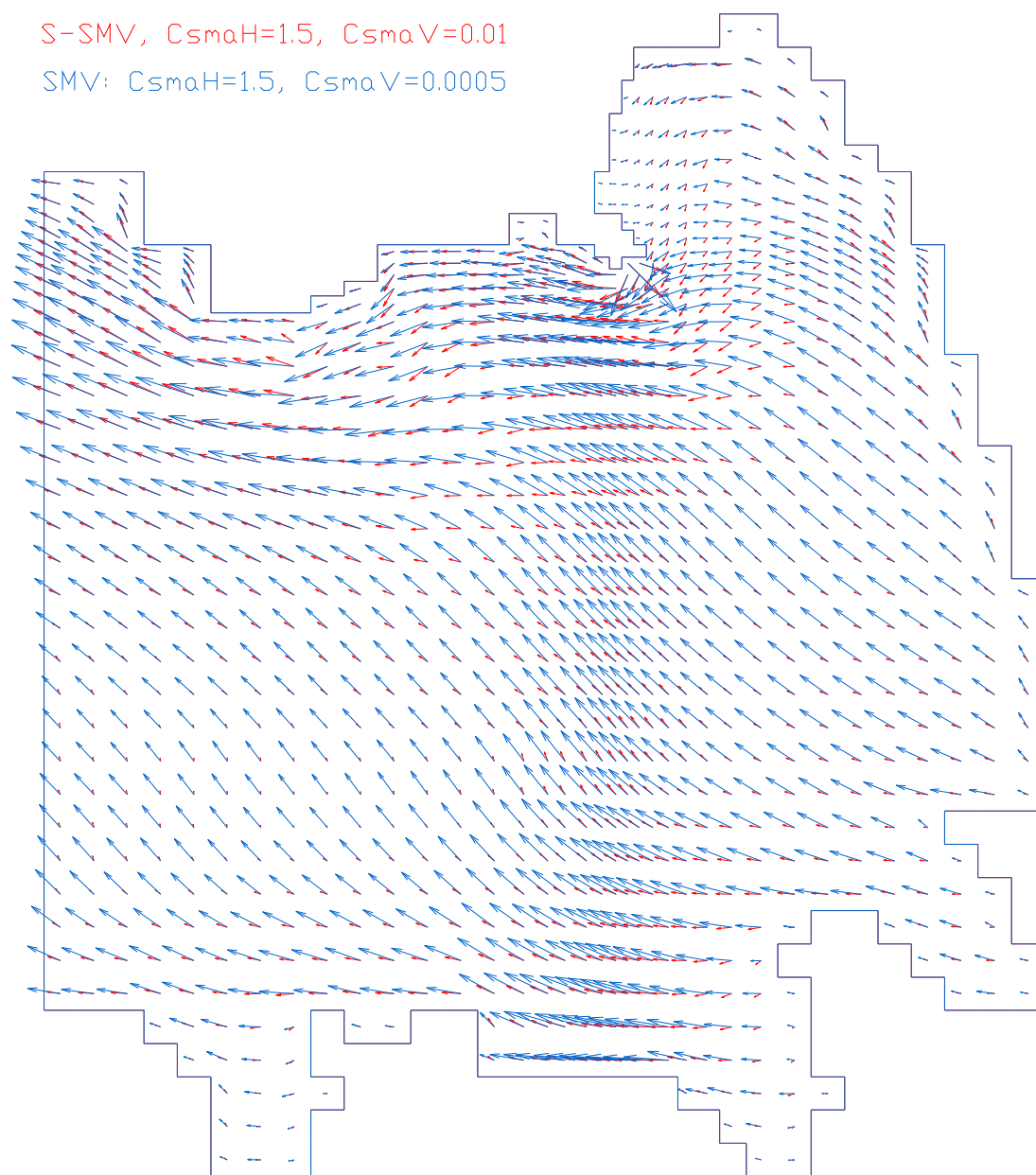
Slika 3.3 - 8: Hitrostno polje v površinskem sloju XY26. Primerjava modelov SMV in MYQ.



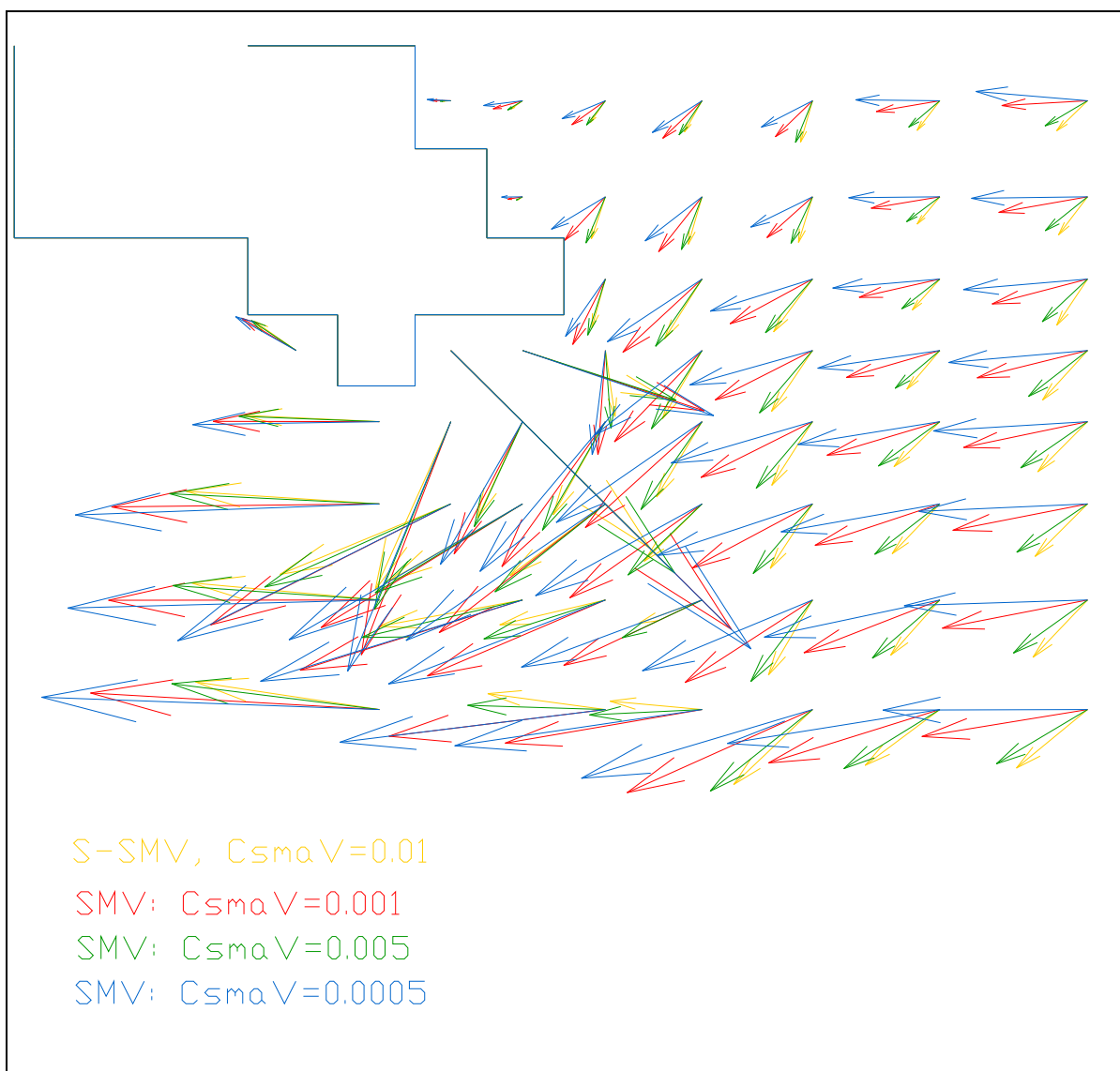
Slika 3.3 - 9: Detajl hitrostnega polja v površinskem sloju XY26 na mestu vtoka reke Soče. Primerjava modelov SMV (rdeče puščice), MYQ (modre puščice) in KOU (zelene puščice) za primer TZ7.



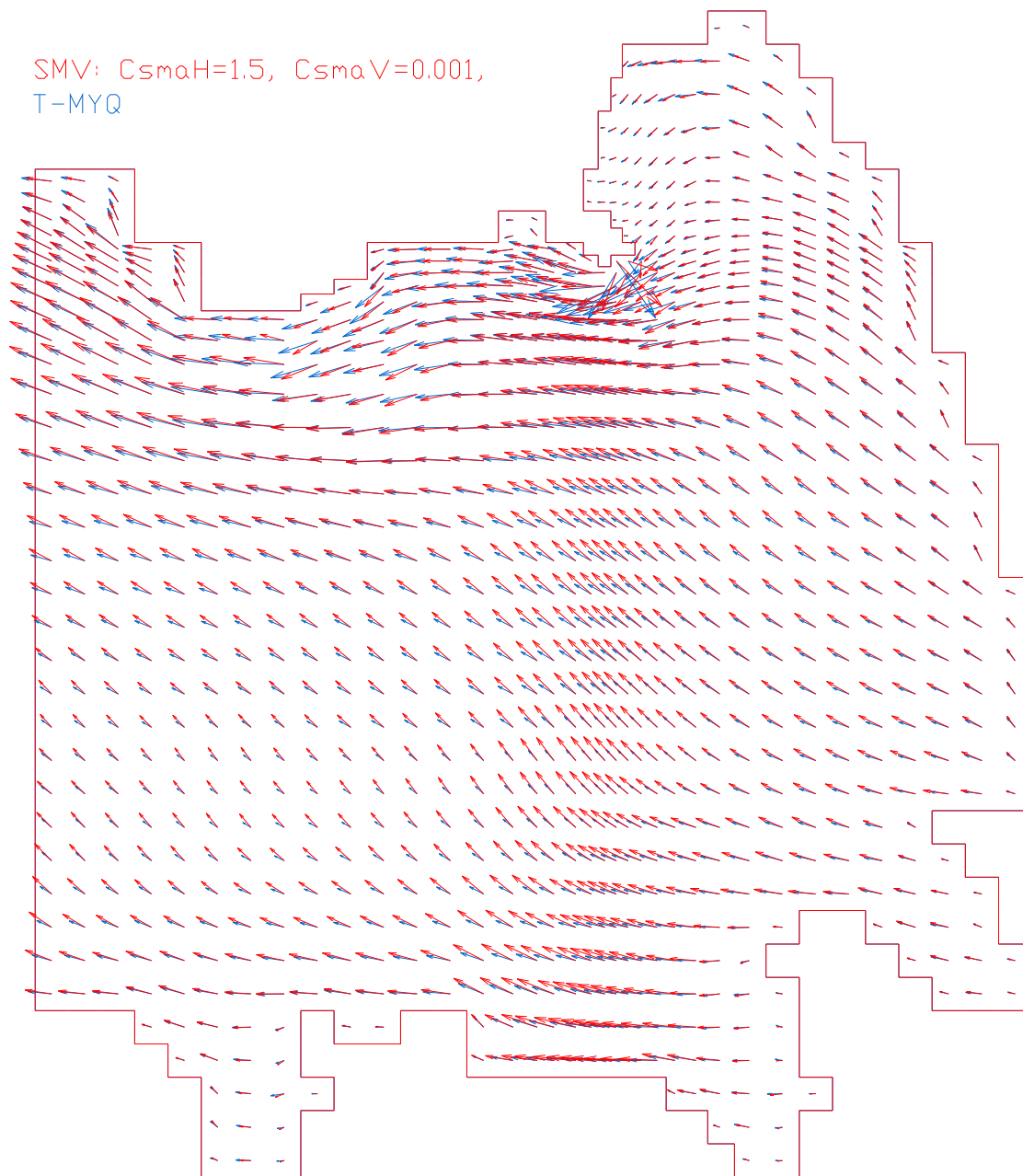
Slika 3.3 - 10: Primerjava rezultatov hitrostnega polja za različne vrednosti koeficienta C_{smaH} .



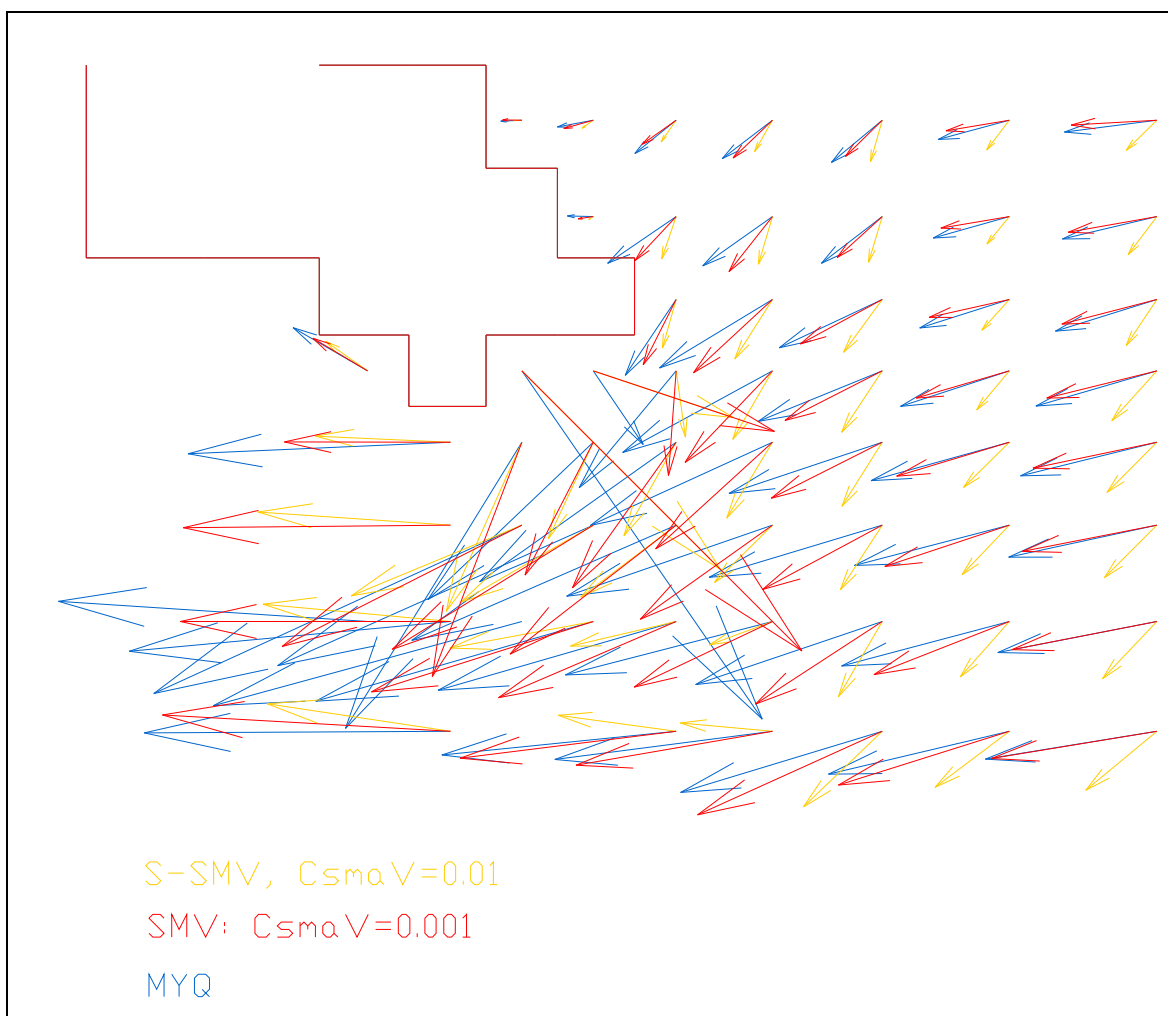
Slika 3.3 - 11: Primerjava rezultatov hitrostnega polja za različne vrednosti koeficienta C_{smaV} (0.01 in 0.0005).



Slika 3.3 - 12: Detajl hitrostnega polja v površinskem sloju XY26 na mestu vtoka reke Soče. Primerjava rezultatov metode Smagorinsky-vertikalno za različno izbrane koeficiente C_{smv} .

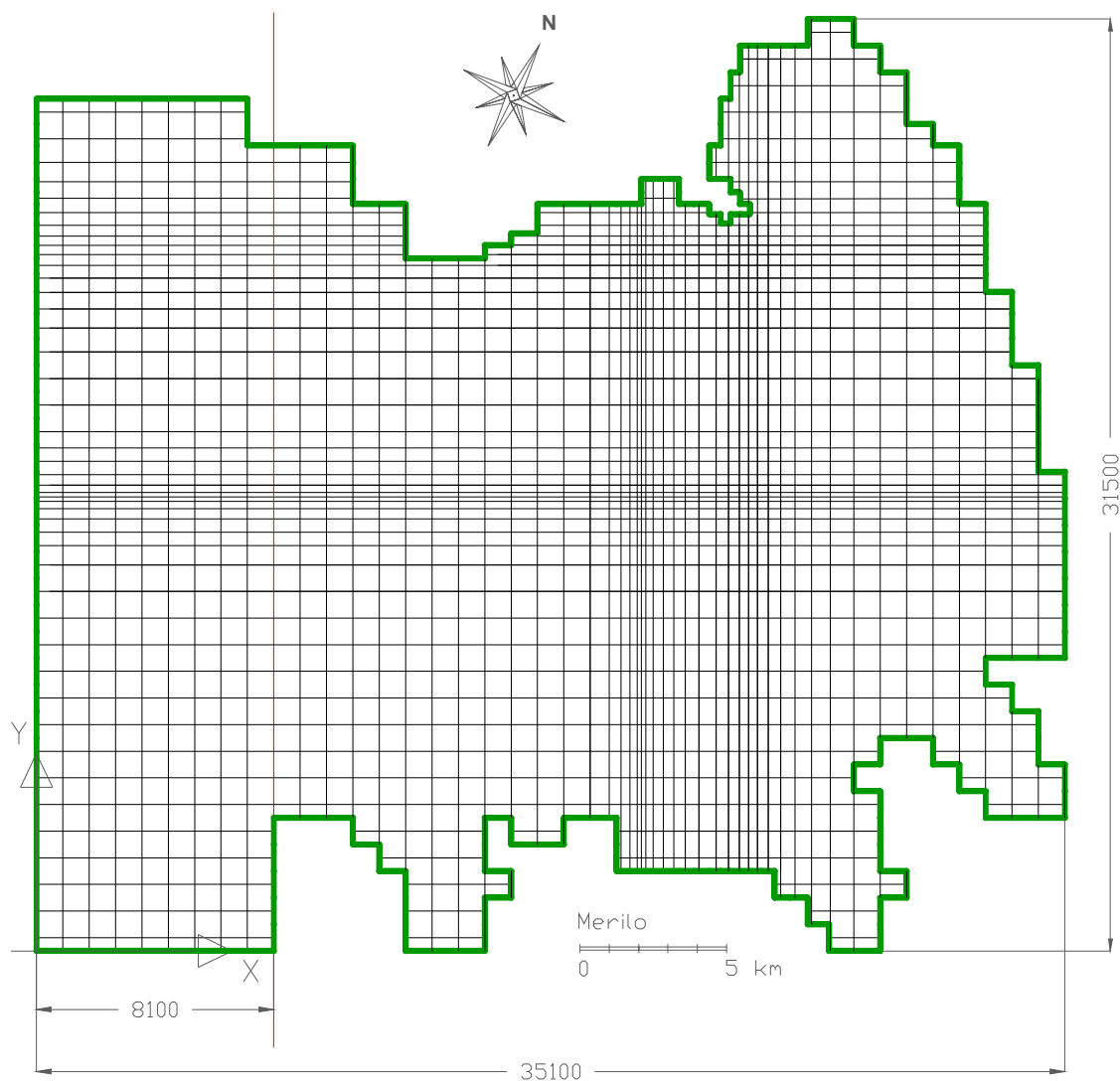


Slika 3.3 - 13: Primerjava rezultatov hitrostnega polja za vrednost koeficienta $C_{smaV} = 0.001$ metode SMV in metode MYQ.



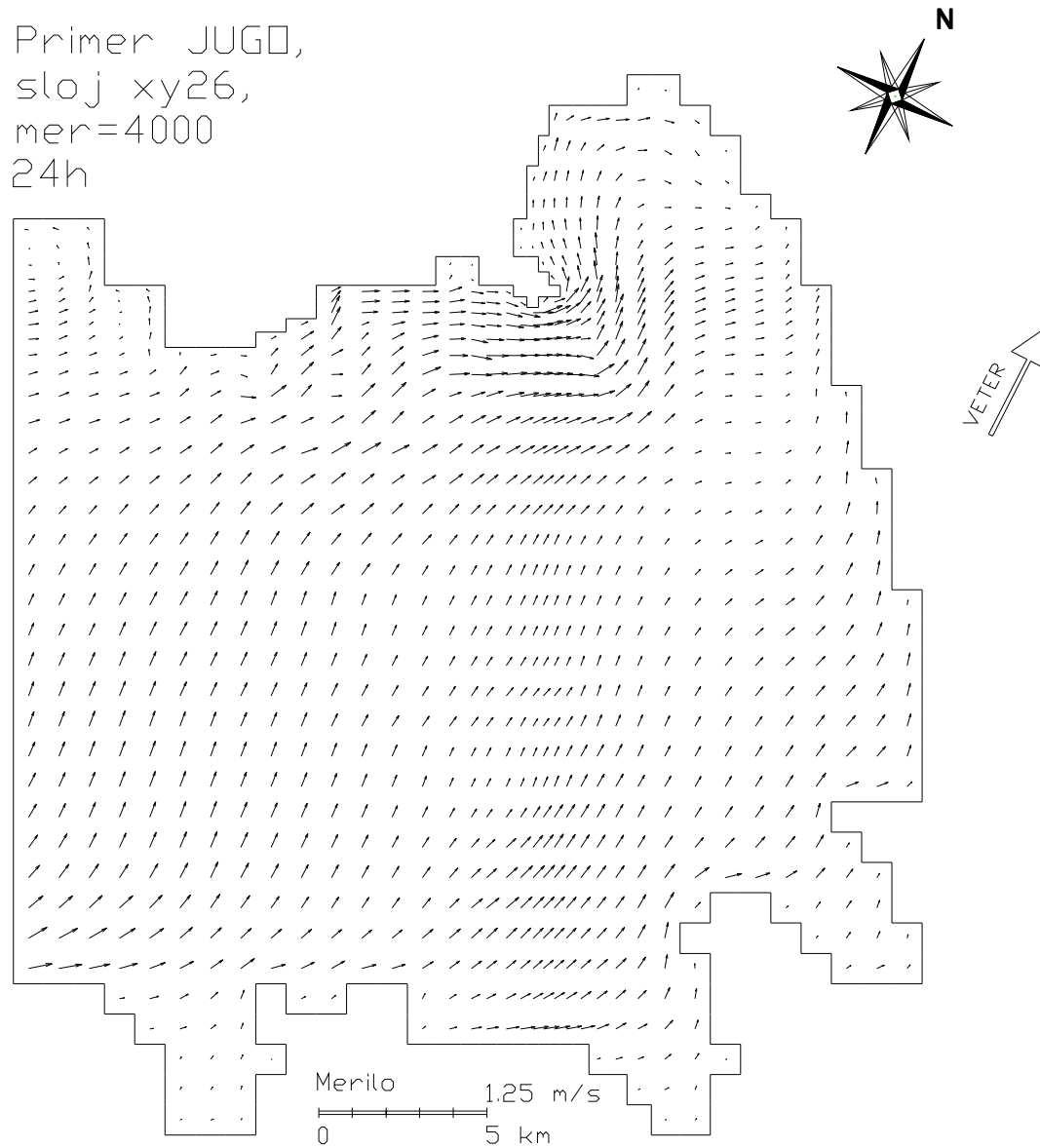
Slika 3.3 - 14: Detajl hitrostnega polja v površinskem sloju XY26 na mestu vtoka reke Soče. Primerjava hitrostnih polj po metodi SMV in metodi MYQ.

Priloga D: Slike k poglavju 3.4

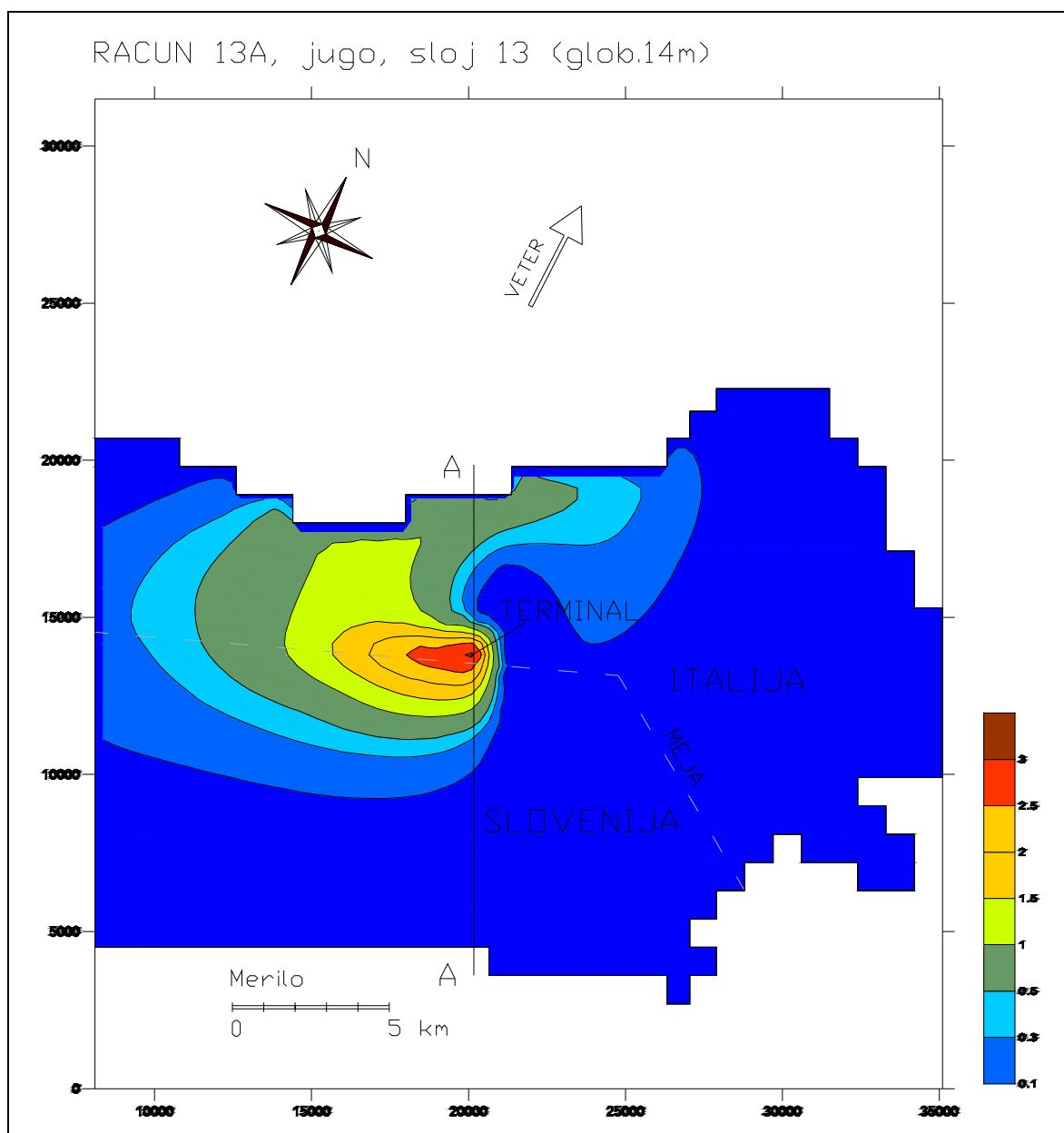


Slika 3.4 - 1: Numerična mreža definicijskega območja za primer JUGO.

Dodatno je zgoščena na območju Morskega terminala in vtoka reke Soče.

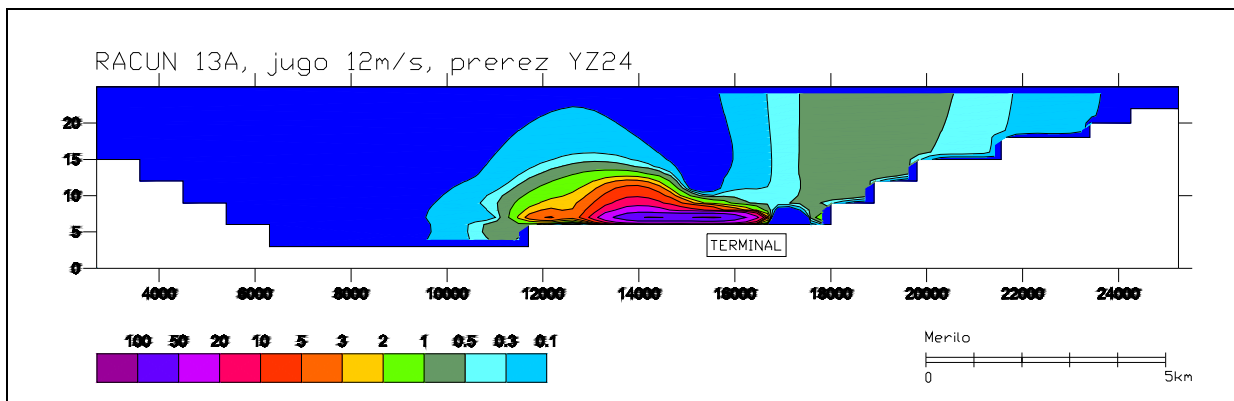


Slika 3.4 - 2: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju - primer JUGO.



Slika 3.4 - 3: Tlorisni prikaz širjenja koncentracije resuspendiranega sedimenta – primer JUGO (sloj XY13).

Pri gradnji morskega terminala ob vetru 12 m/s (jugo, 180 stopinj). Koncentracije so prikazane kvalitativno, glede na 100% na mestu gradnje.



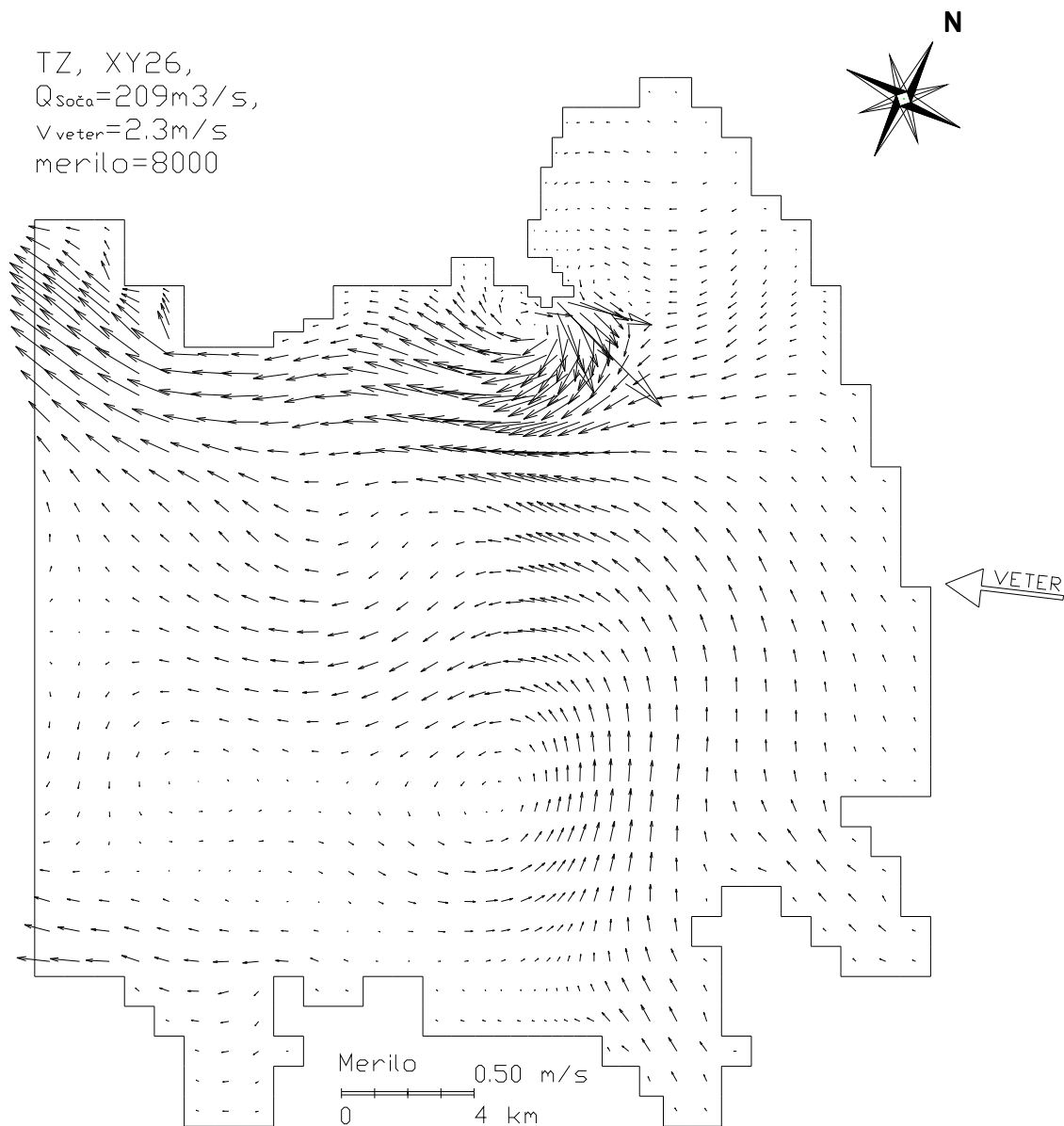
Slika 3.4 - 4: Prikaz širjenja koncentracije resuspendiranega sedimenta – primer JUGO (prerez YZ24).

Vertikalni prerez A-A (Slika 3.4 - 3). Vpliv gradnje morskega terminala ob vetru 12 m/s (jugo, 180 stopinj). Koncentracije so prikazane kvalitativno, glede na 100% na mestu gradnje.

SEZONSKO POVPREČNI PARAMETRI

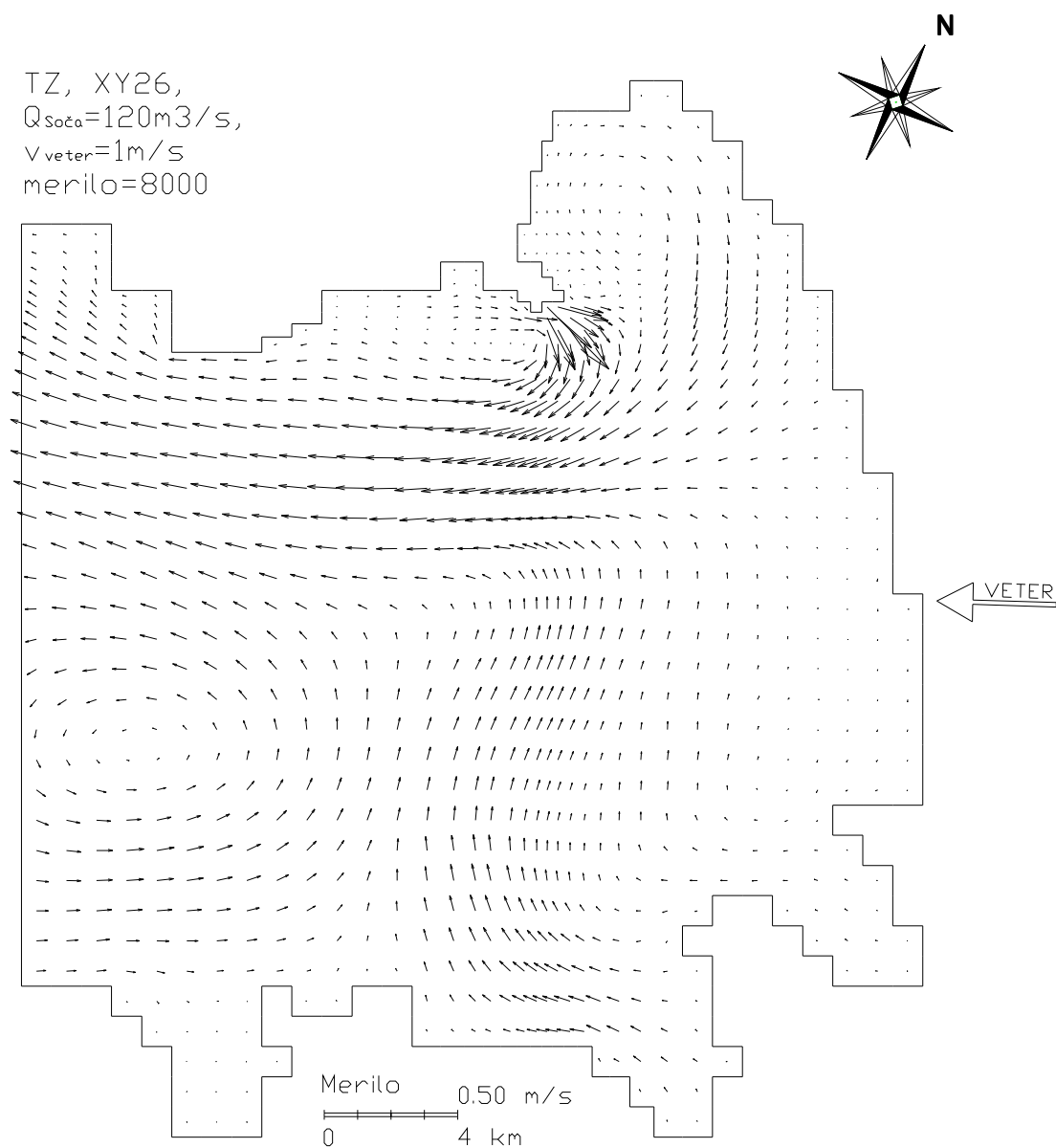


Slika 3.4 - 5: Sezonsko povprečni parametri v Tržaškem zalivu za primer SEK-04 ter sezonsko povprečni parametri z vložki maksimalnih vplivov za primer SEK-11.

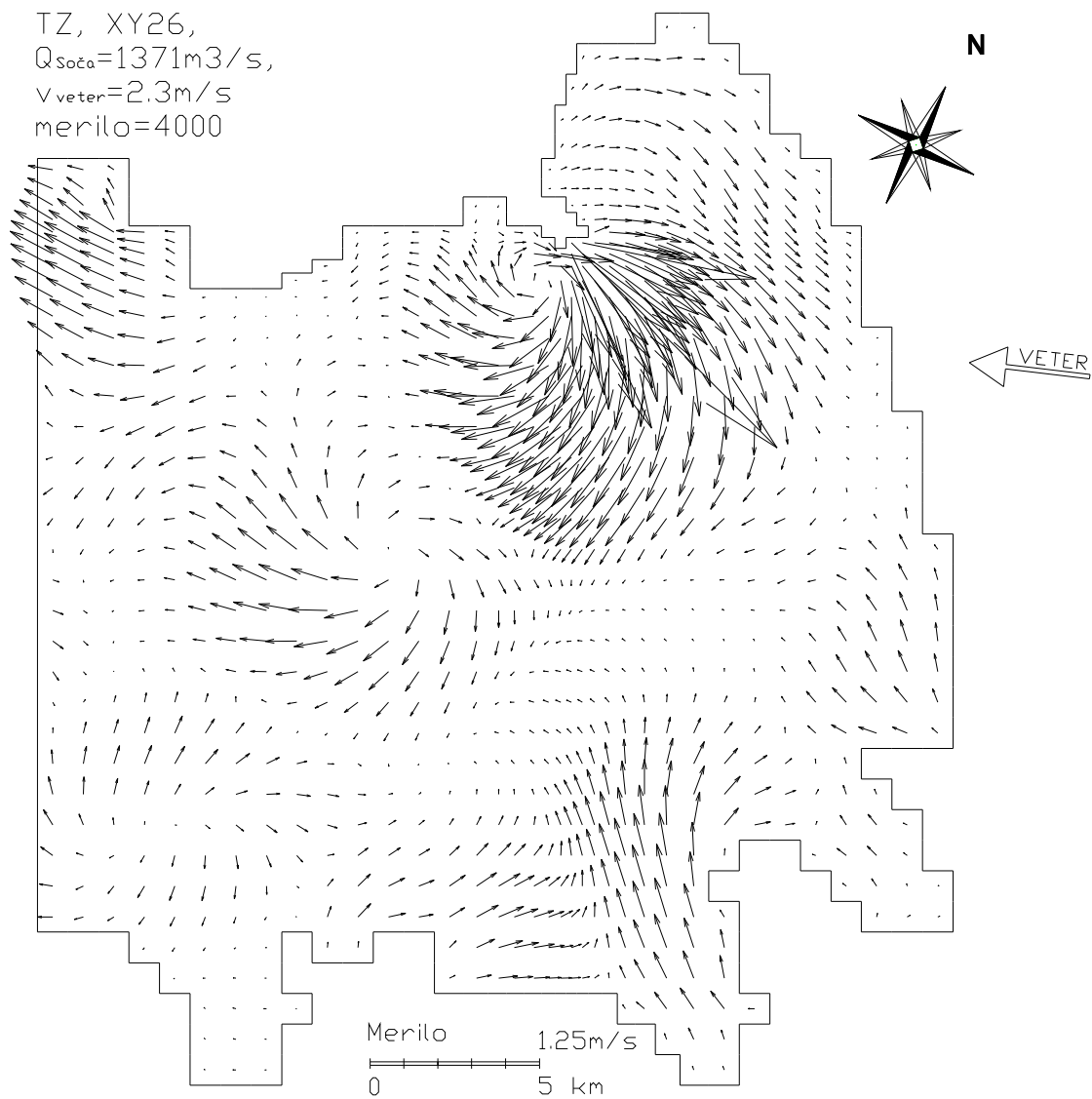


Slika 3.4 - 6: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju za jesensko sezono.

Pretok Soče 209 m³/s. Debelina sloja je 1 m.

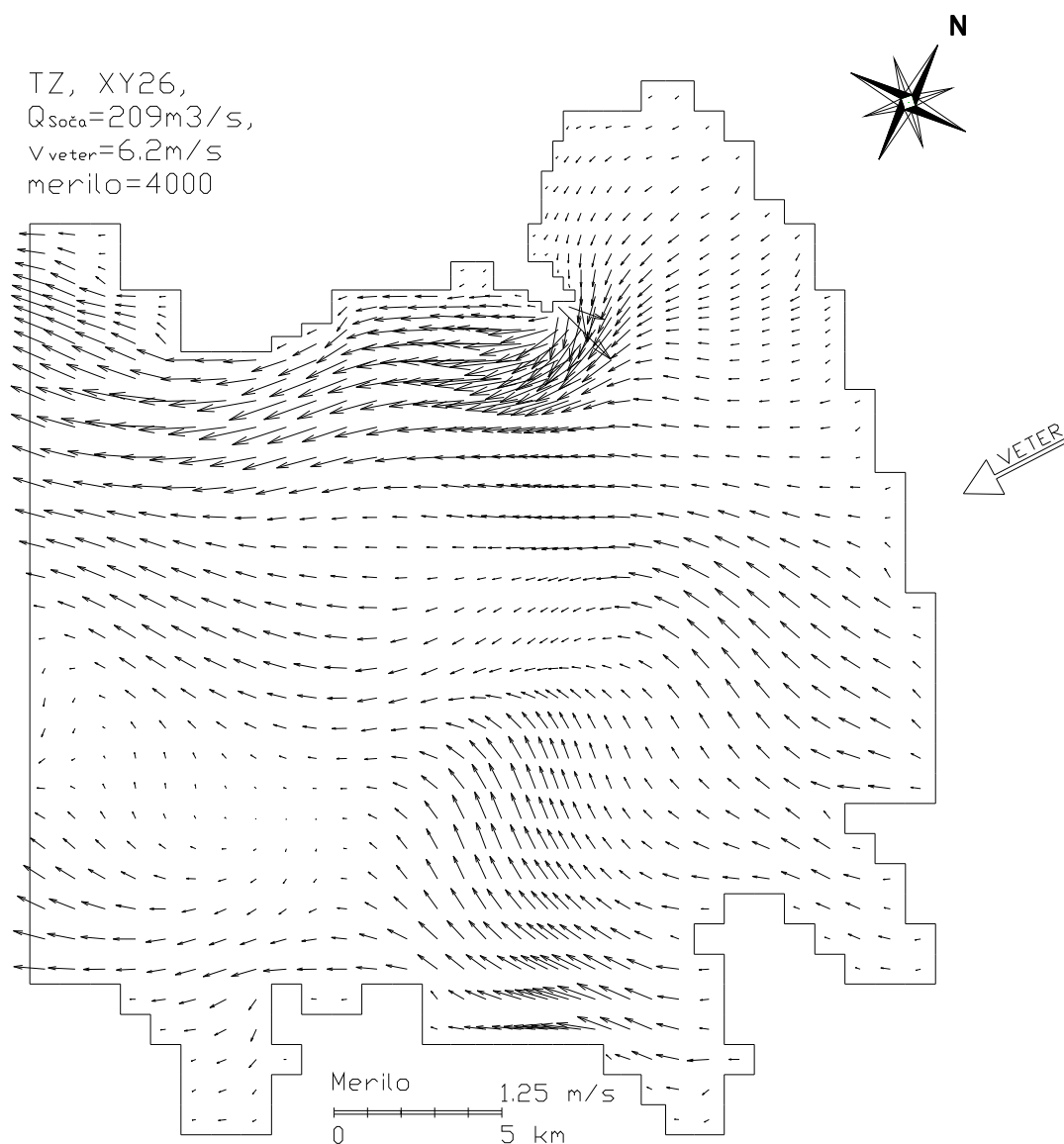


Slika 3.4 - 7: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju za poletno sezono.
Pretok Soče 120 m³/s. Debelina sloja je 1 m.



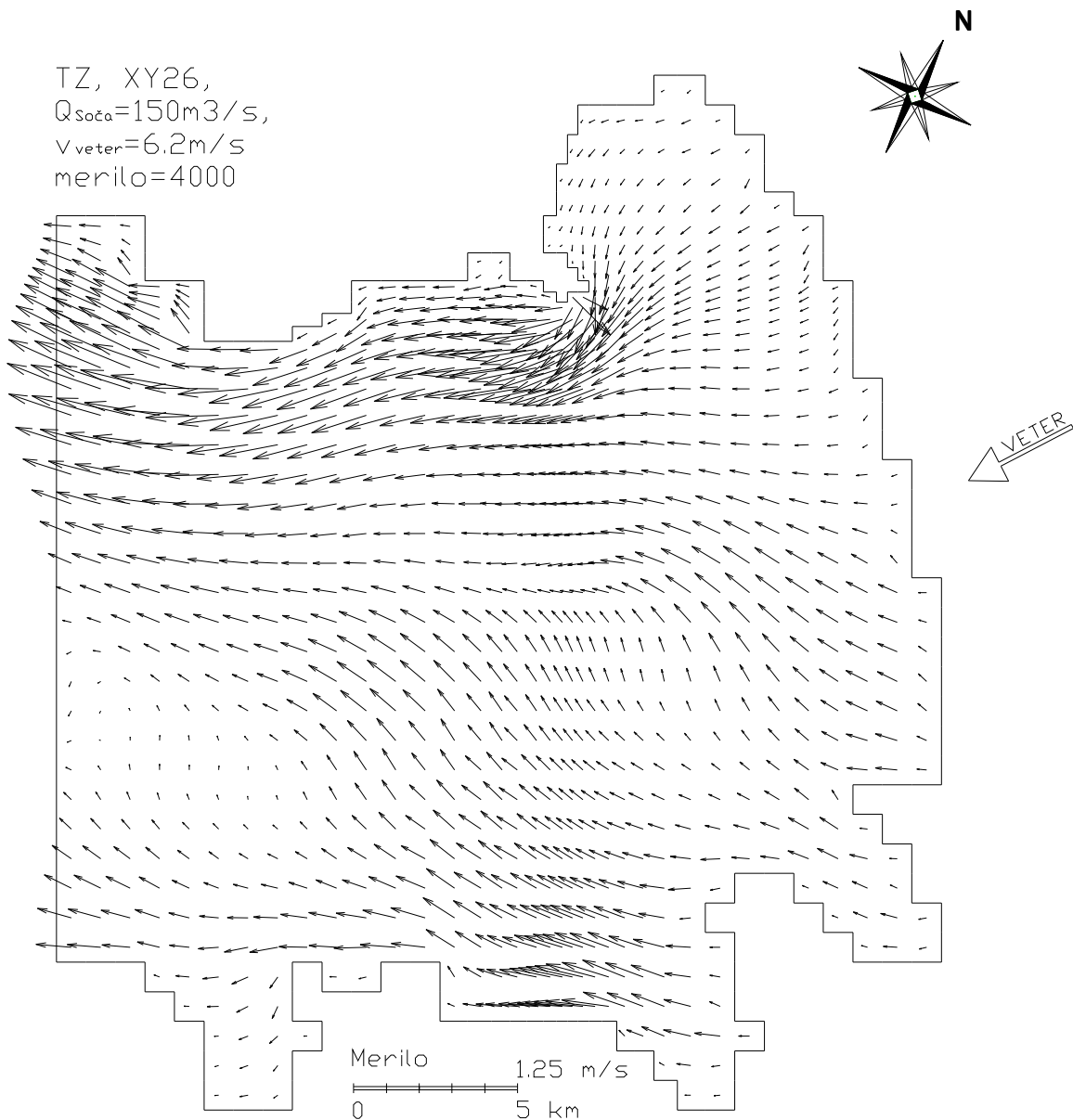
Slika 3.4 - 8: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju pod vplivom visoke vode na Soči, pretok $1371\text{ m}^3/\text{s}$.

Trajanje dva dni, od 18. do 19. novembra. Debelina sloja je 1 m.



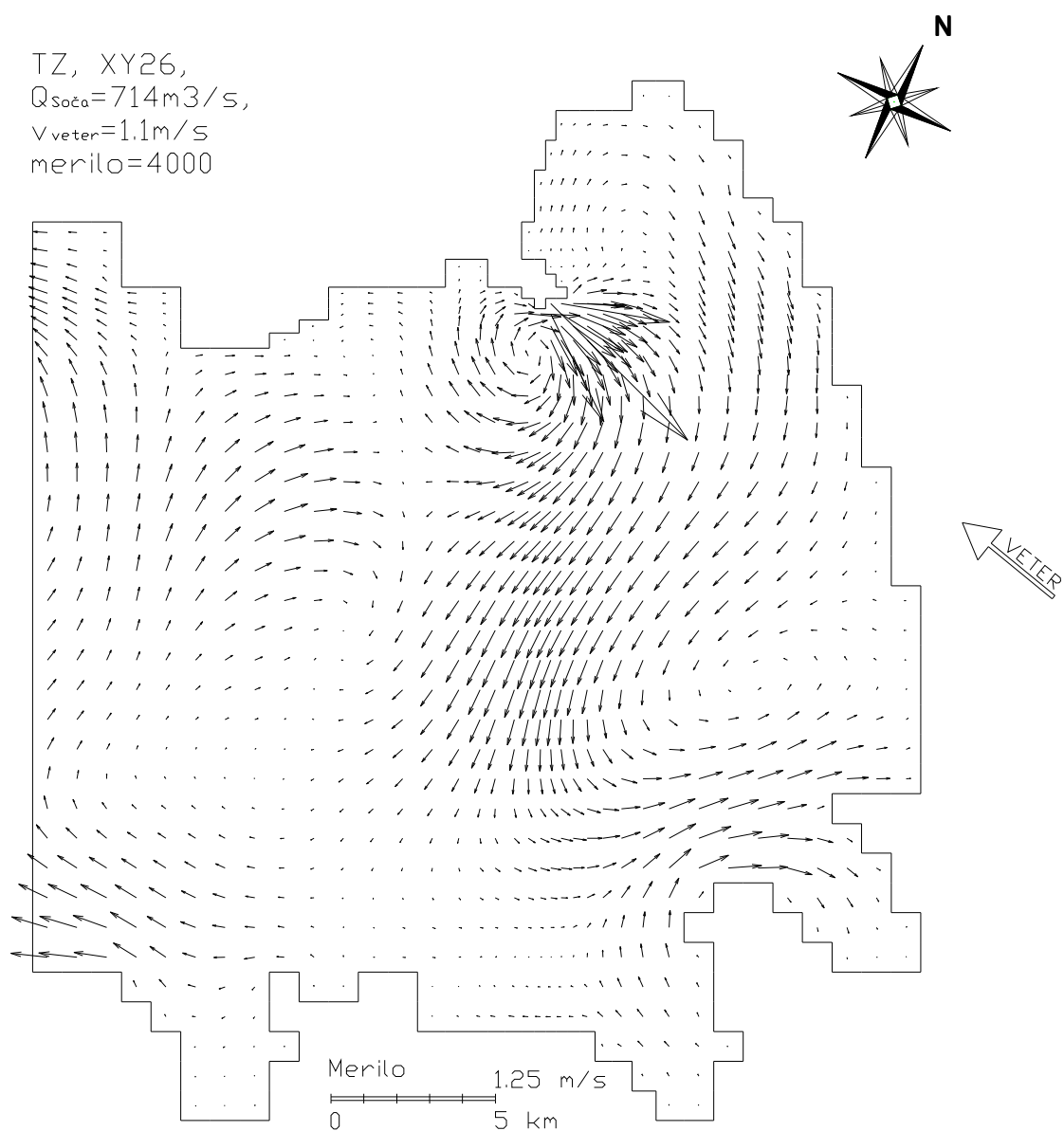
Slika 3.4 - 9: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju (debeline 1m) pod vplivom močne burje 6.4 m/s .

Trajanje deset dni, od 21. do 31. novembra. Pretok Soče je $209\text{ m}^3/\text{s}$.



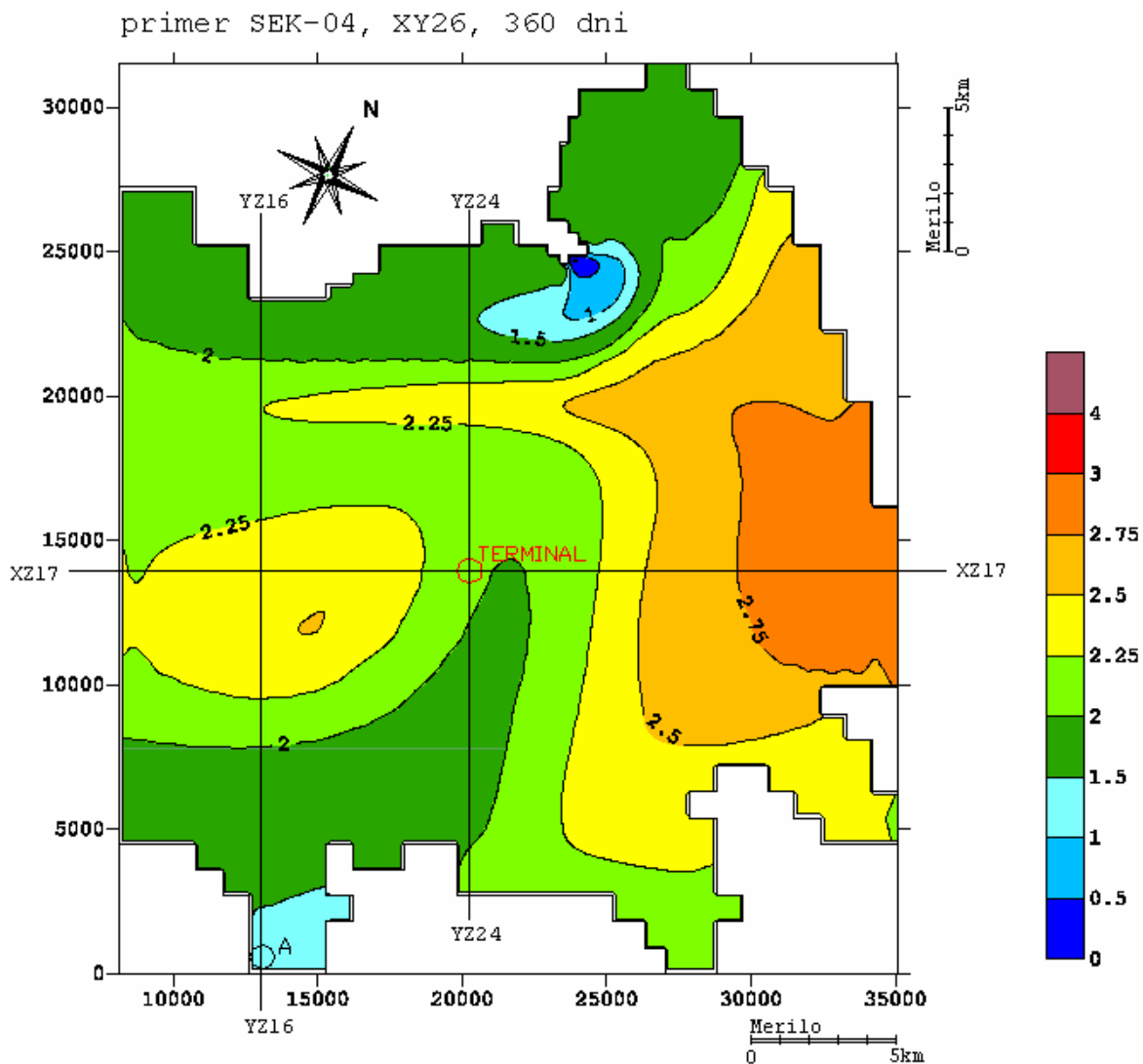
Slika 3.4 - 10: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju (debeline 1m) pod vplivom močne burje 6.2 m/s

Trajanje enajst dni, od 12. do 22. februarja. Pretok Soče je $209\text{ m}^3/\text{s}$.



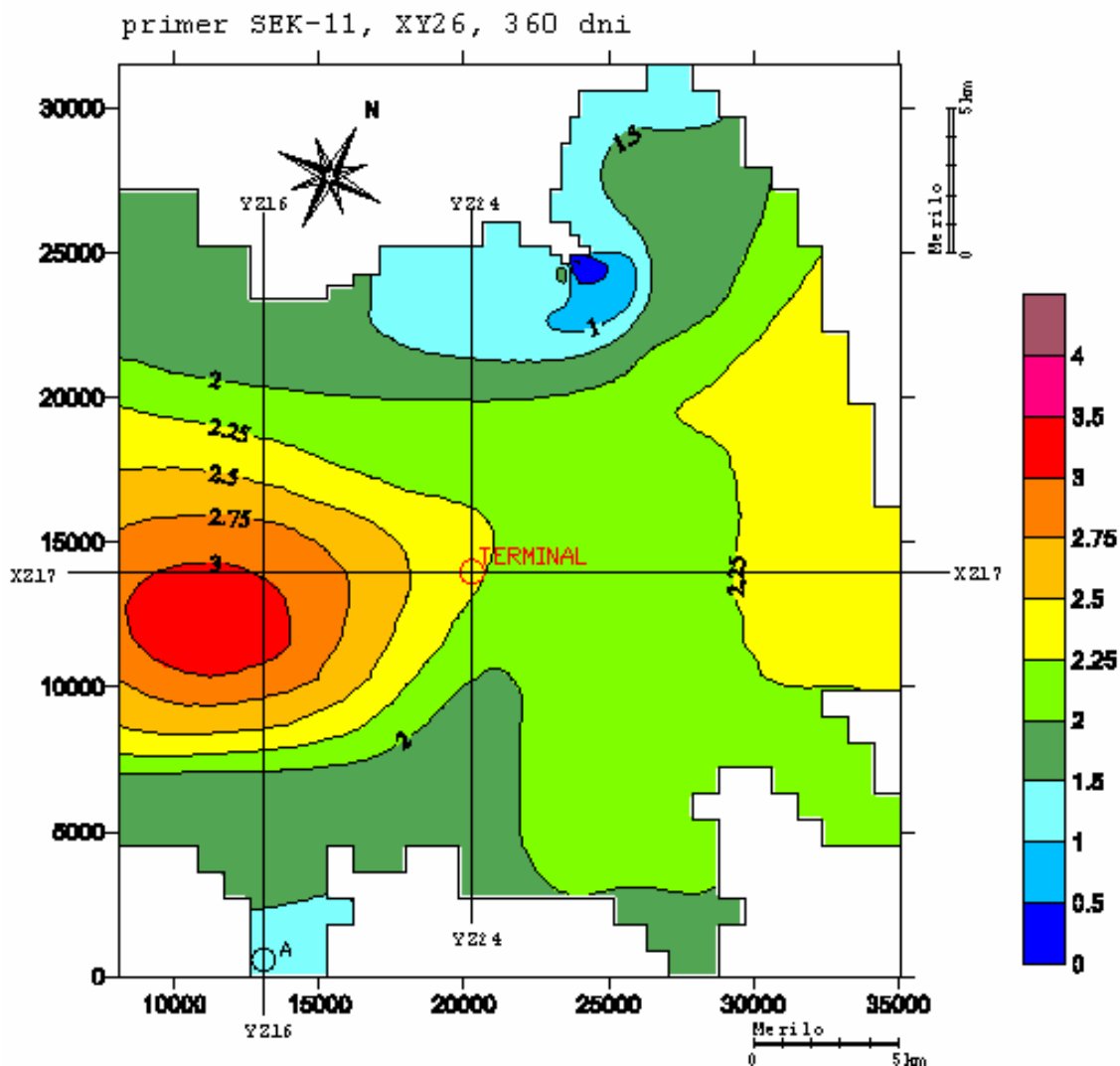
Slika 3.4 - 11: Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu v površinskem sloju pod vplivom visoke vode na Soči, pretok $714\text{ m}^3/\text{s}$.

Trajanje pet dni, od 7. do 11. maja. Debelina sloja je 1 m.



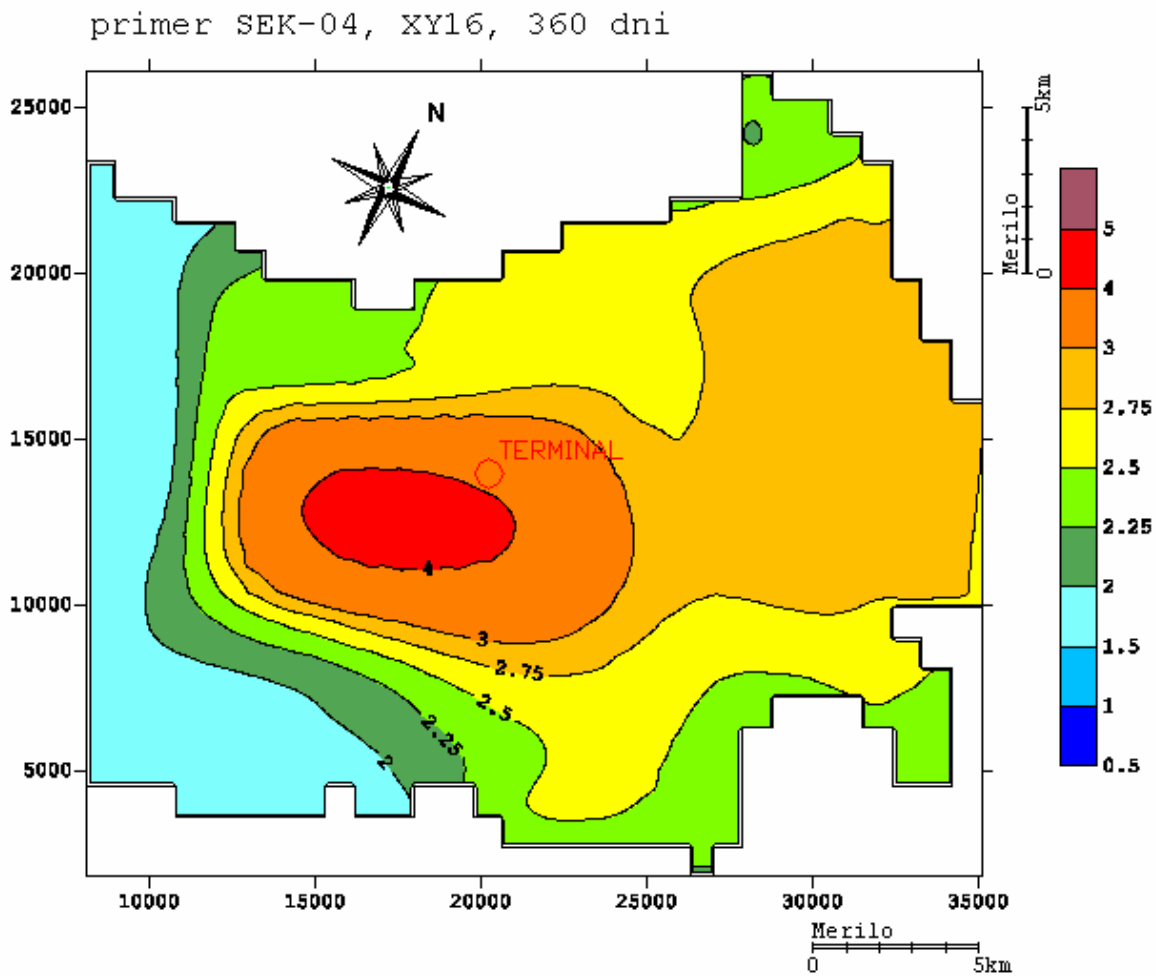
Slika 3.4 - 12: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-04 (sloj XY26).

Prikaz stanja v površinskem sloju (debeline 1m) po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D. Pretok Soče se spreminja po sezonah, dotok upoštevan brez MeHg. Točka A označuje lokacijo marikulture.

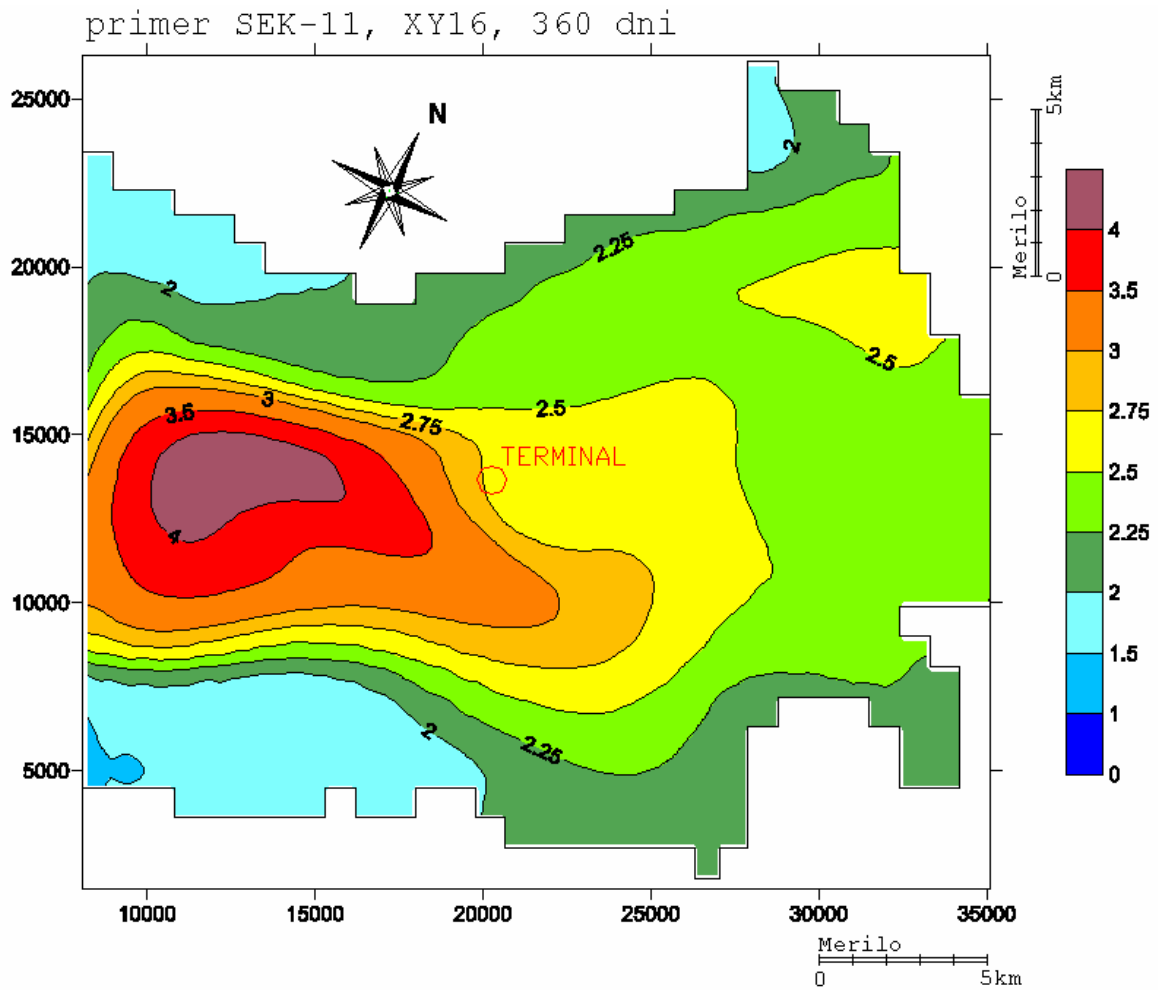


Slika 3.4 - 13: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (sloj XY26).

Prikaz stanja v površinskem sloju (debeline 1m) po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D. Pretok Soče se spreminja po sezonah, dotok upoštevan brez MeHg. Točka A označuje lokacijo marikulture.

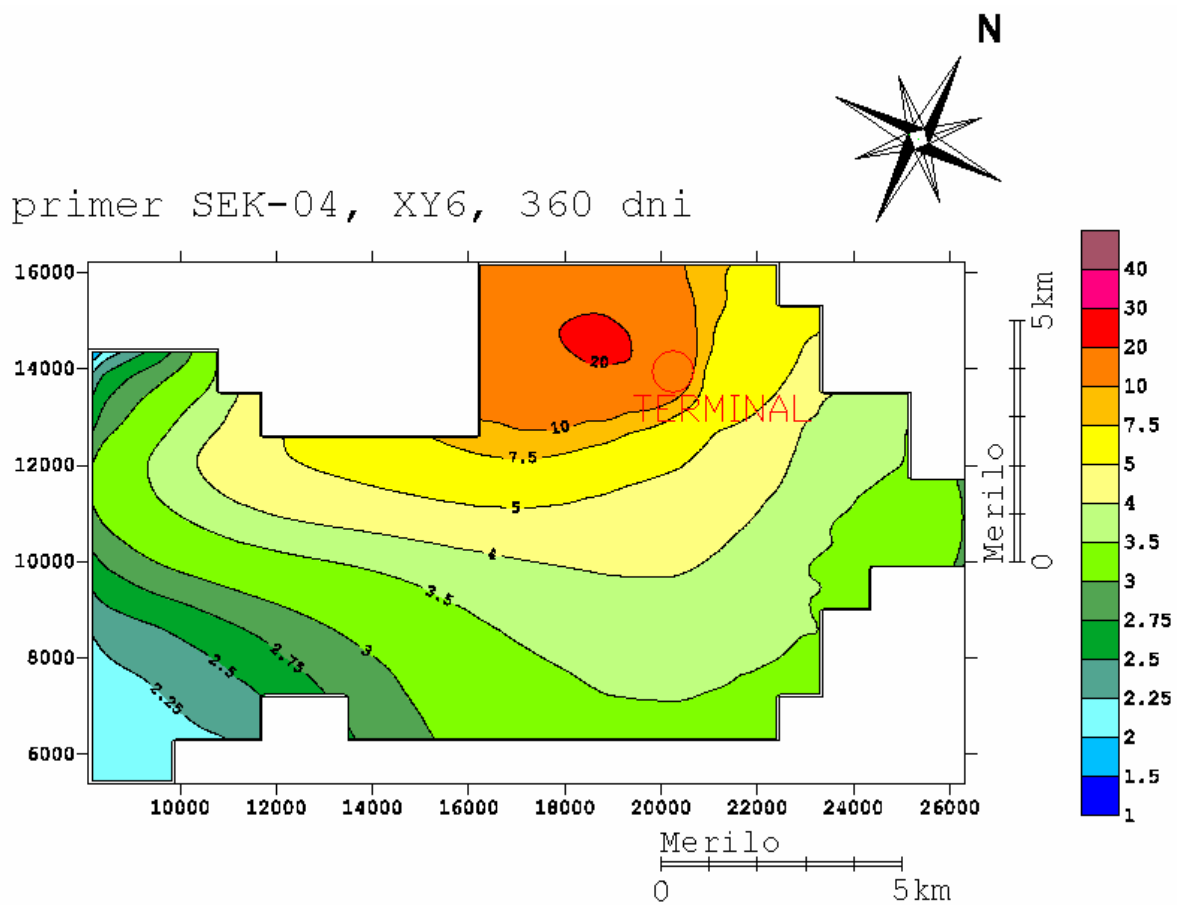


Slika 3.4 - 14: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-04 (sloj XY16).
Prikaz stanja v globini 10 m po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



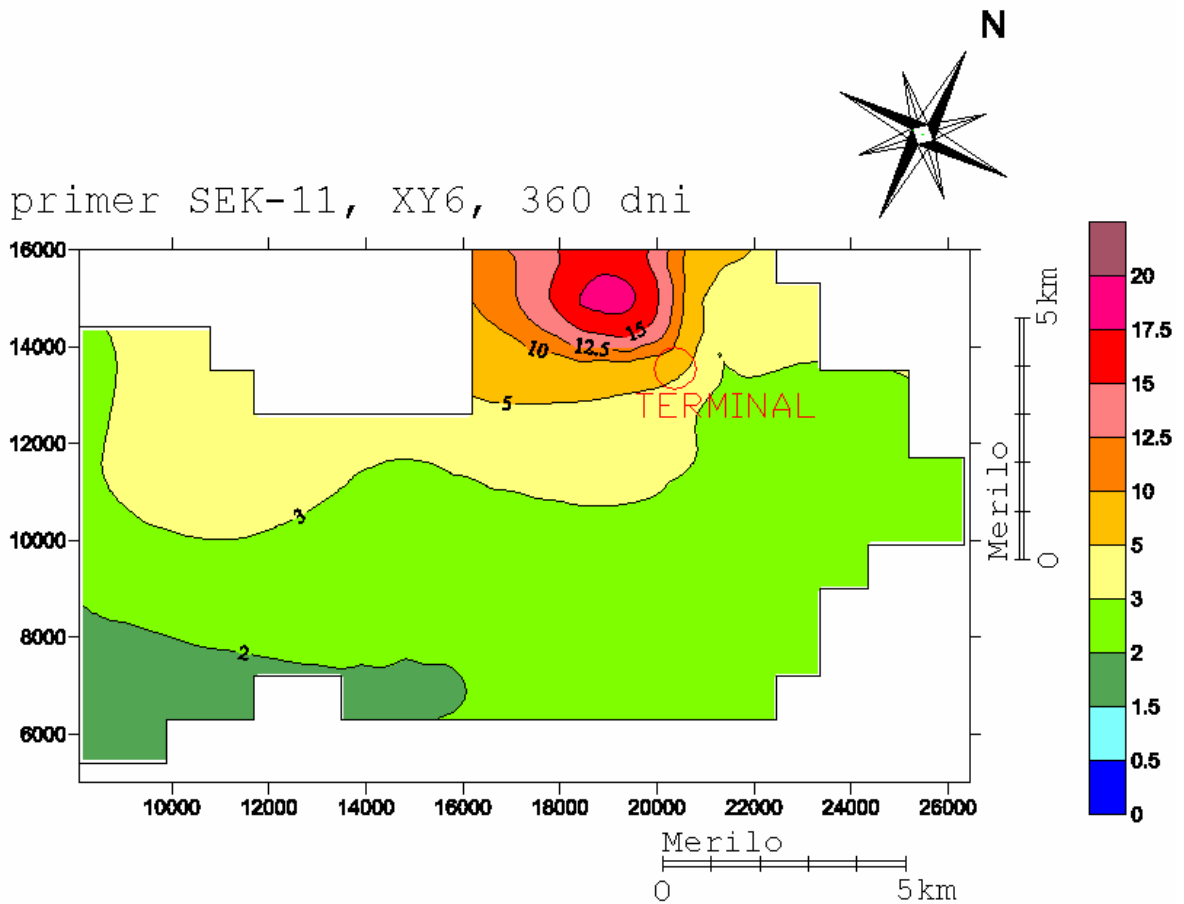
Slika 3.4 - 15: Kvalitativni raspored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (sloj XY16).

Prikaz stanja v globini 10 m po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



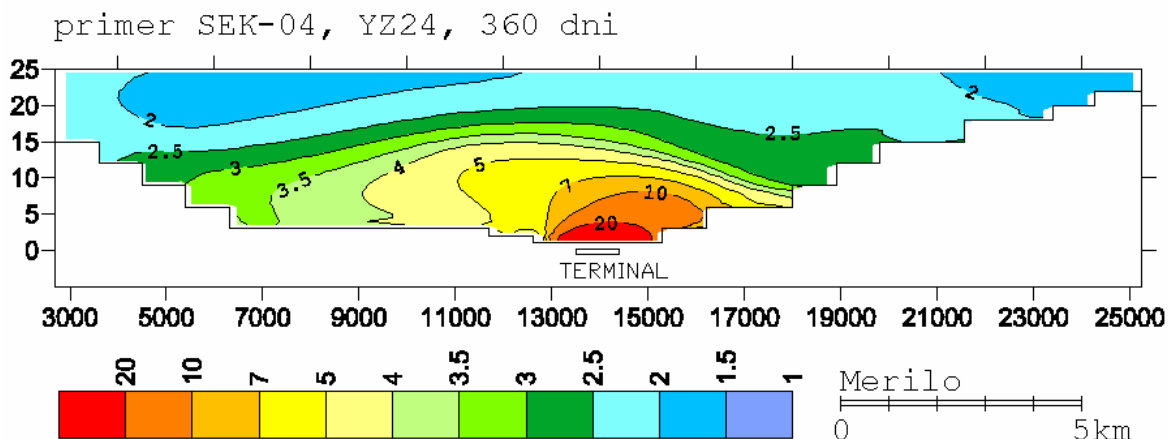
Slika 3.4 - 16: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala za primer SEK-04 (sloj XY6).

Prikaz stanja v globini 21 m po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



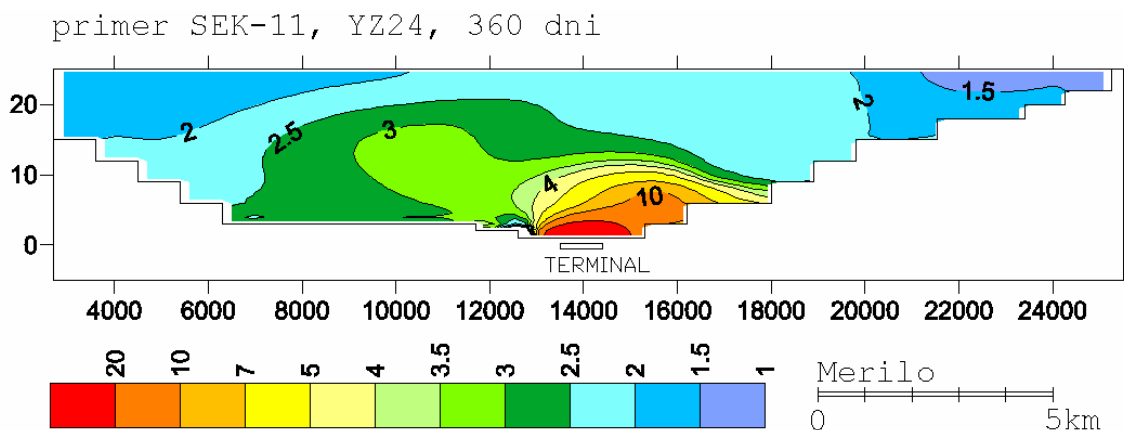
Slika 3.4 - 17: Kvalitativni raspored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (sloj XY6).

Prikaz stanja v globini 21 m po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



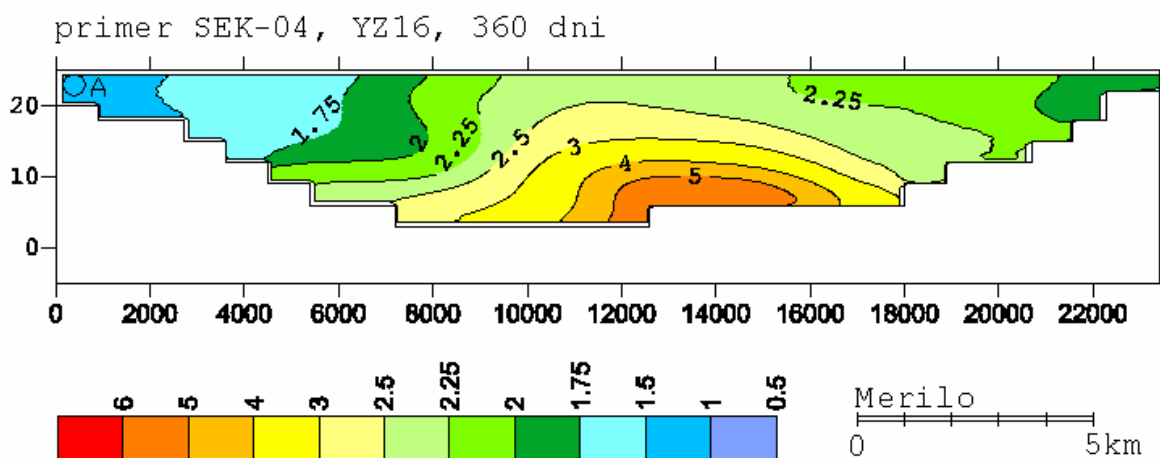
Slika 3.4 - 18: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala za primer SEK-04 (prerez YZ24).

Prikaz stanja v vertikalnem prerezu, skozi mesto terminala (Slika 3.4 - 12) po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



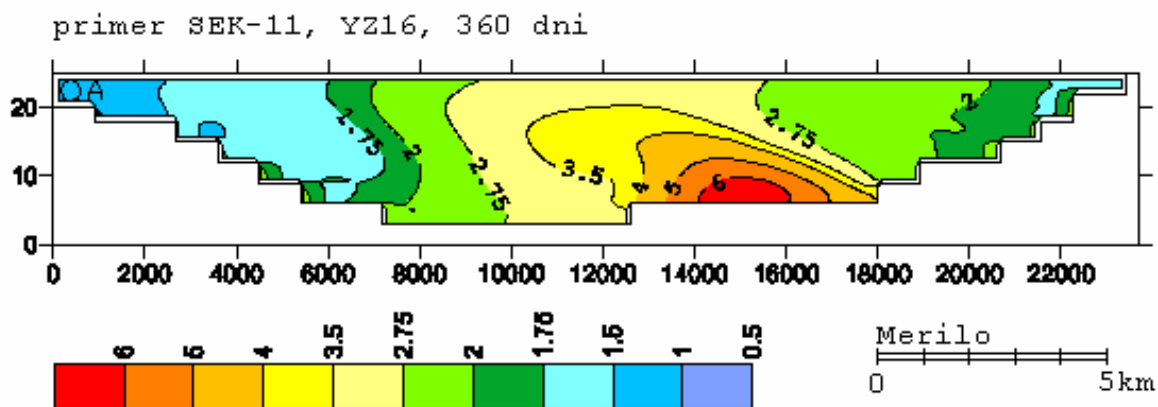
Slika 3.4 - 19: Kvalitativni razpored MeHg zaradi enoletnega obratovanja Morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (prerez YZ24).

Prikaz stanja v vertikalnem prerezu, skozi mesto terminala (Slika 3.4 - 13) po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



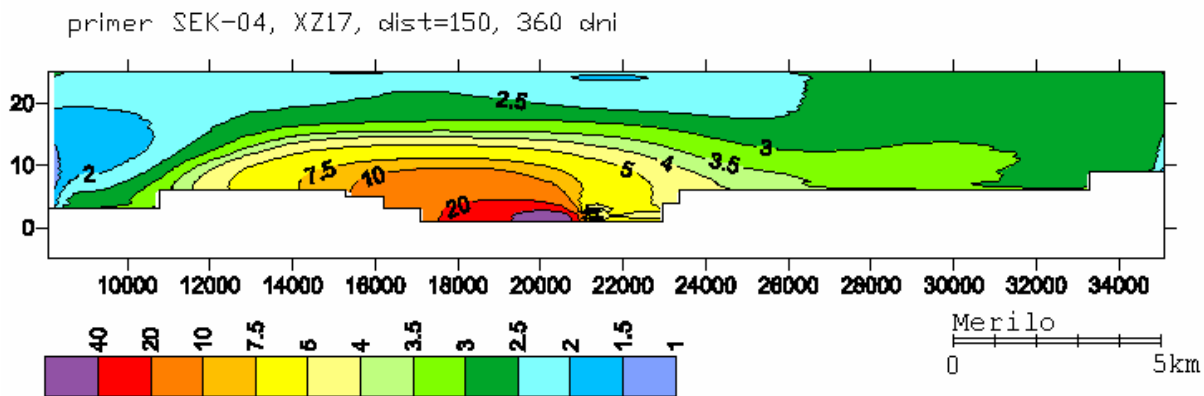
Slika 3.4 - 20: Kvalitativni raspored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-04 (prerez YZ16).

Prikaz stanja v vertikalnem prerezu, skozi mesto marikulture, (Slika 3.4 - 12) po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



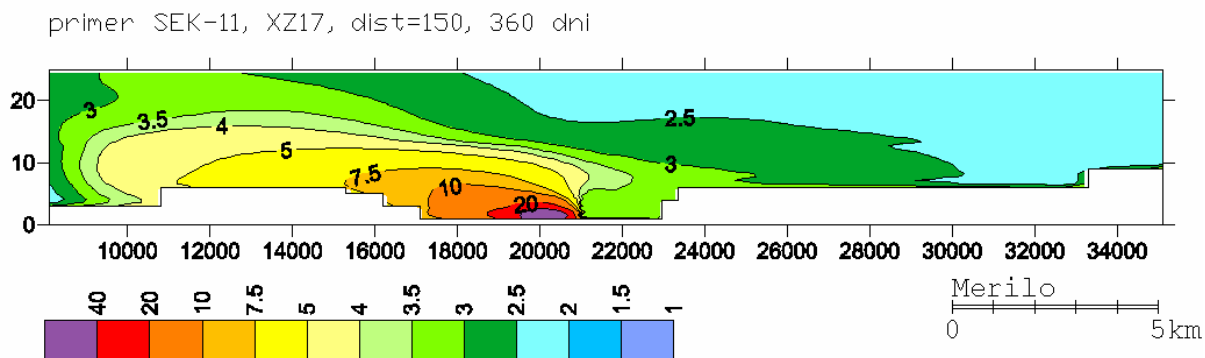
Slika 3.4 - 21: Kvalitativni raspored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (prerez YZ16).

Prikaz stanja v vertikalnem prerezu, skozi mesto marikulture, (Slika 3.4 - 13) po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D za primer SEK-11.



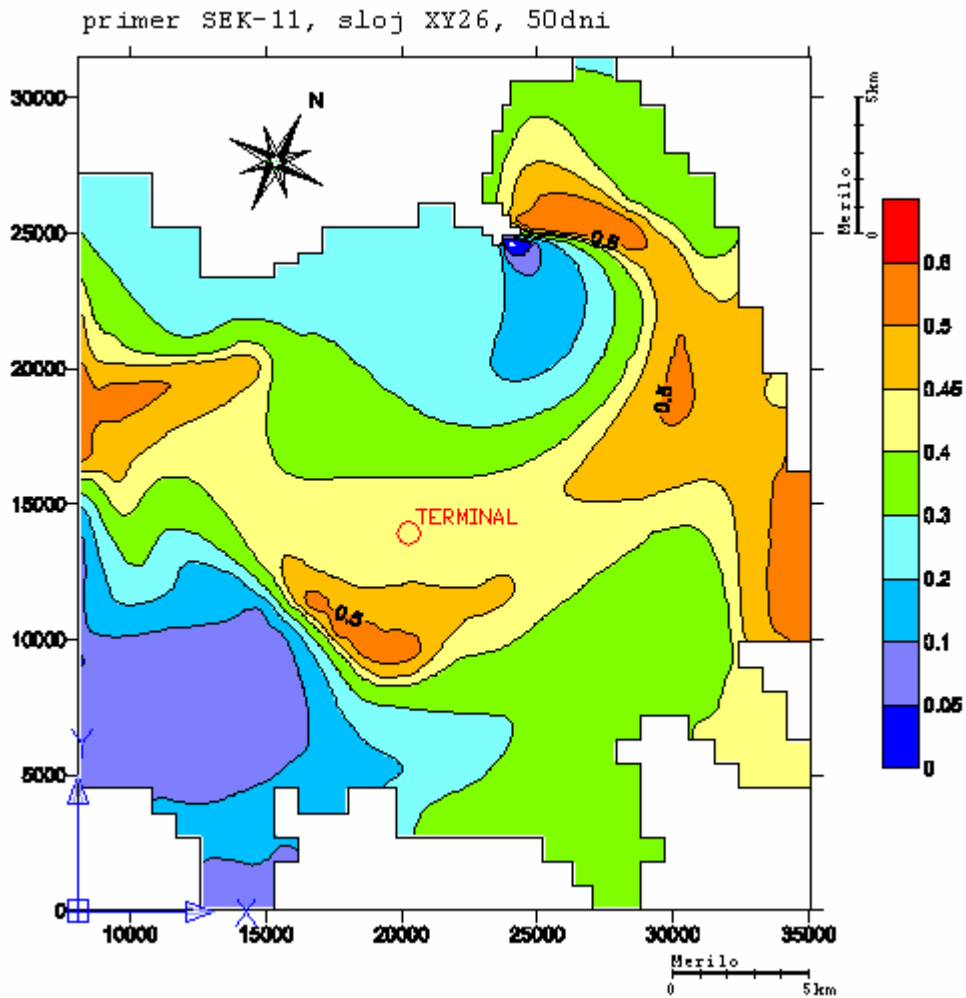
Slika 3.4 - 22: Kvalitativni raspored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-04 (prerez XZ17).

Prikaz stanja v vertikalnem prerezu skozi mesto terminala (Slika 3.4 - 12) po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



Slika 3.4 - 23: Kvalitativni raspored MeHg zaradi enoletnega obratovanja morskega terminala (v procentih od začetnega vnosa) za primer SEK-11 (prerez XZ17).

Prikaz stanja v vertikalnem prerezu, skozi mesto terminala (Slika 3.4 - 13) po enoletni simulaciji z modelom PCFLOW3D.



Slika 3.4 - 24: Kvalitativni razpored MeHg po dvodnevem vložku visokovodnega vala na reki Soči ($1371 \text{ m}^3/\text{s}$) za primer SEK-11 (prez XY26).