

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Pečovnik, U., 2014. Procesi pri transportu kohezivnih sedimentov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D.): 50 str.

Datum arhiviranja: 13-10-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Pečovnik, U., 2014. Procesi pri transportu kohezivnih sedimentov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D.): 50 pp.

Archiving Date: 13-10-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVA IN
OKOLJSKEGA INŽENIRSTVA

Kandidatka:

URŠKA PEČOVNIK

**PROCESI PRI TRANSPORTU KOHEZIVNIH
SEDIMENTOV**

Diplomska naloga št.: 31/B-VOI

COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT PROCESSES

Graduation thesis No.: 31/B-VOI

Mentor:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 18. 09. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Urška Pečovnik izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »**Procesi pri transportu kohezivnih sedimentov**«.

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

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

Ljubljana, september 2014.

Urška Pečovnik

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	004:532.5(497.4)(043.2)
Avtor:	Urška Pečovnik
Mentor:	Izr. prof. dr. Dušan Žagar
Naslov:	Procesi pri transportu kohezivnih sedimentov
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	50 str., 9 pregl., 8 sl., 58 en.
Ključne besede:	transport plavin, kohezivni sedimenti, kritična pridnena strižna napetost, model PCFLOW3D

Izvleček

Pri procesih transporta, kot sta usedanje in privzdigovanje, obstajajo med kohezivnimi in nekohezivnimi sedimenti bistvene razlike. Obstoječi model PCFLOW3D ima v sedimentacijskem modulu vgrajene enačbe za nekohezivne sedimente, zato smo predpostavili, da na območjih kjer so sedimenti kohezivni, ne daje pravih rezultatov. Poiskali smo enačbe za račun usedanja, privzdigovanja in transporta kohezivnih sedimentov in jih primerjali z že vgrajenimi enačbami v modelu. Poiskali smo parametre, ki jih potrebujemo za račun procesov transporta kohezivnih sedimentov in izpostavili bistvene razlike med kohezivnimi in nekohezivnimi sedimenti. V diplomski nalogi smo s preprostimi izračuni v Excelu pokazali rezultate enačb vgrajenih v model PCFLOW3D in rezultate dobljene z enačbami za kohezivne sedimente. Rezultate smo primerjali in ugotovili, da model na območju kohezivnih sedimentov znatno podceni kritične strižne napetosti. Naloga predstavlja prispevek k boljšemu razumevanju razlik med procesi pri kohezivnih in nekohezivnih sedimentih, pokazali smo tudi, katere spremembe so v modelu PCFLOW3D potrebne, da ga bo mogoče uporabljati kot orodje za račun transporta plavin tudi na območjih kohezivnih sedimentov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 004:532.5(497.4)(043.2)
Author: Urška Pečovnik
Supervisor: Assoc. prof. Dušan Žagar, PhD
Title: Cohesive sediment transport processes
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 50 p., 8 tab., 9 fig., 58 eq.
Keywords: sediment transport, cohesive sediment, critical bed-shear stress, PCFLOW3D model

Abstract

In the sediment transport processes, settling and resuspension, there are significant differences between cohesive and non cohesive sediments. In the sediment transport module of the existing model PCFLOW3D only equations for non cohesive sediments are included. Therefore, we assumed that the model does not perform correctly in areas with cohesive sediments. We identified the equations for the cohesive sediment settling, resuspending and transport, and compared them with the equations included in the PCFLOW3D model. Furthermore, the parameters needed for simulations of these transport processes were identified and the significant differences between cohesive and non cohesive sediment were emphasised. We performed simple calculations in order to show the results of both the equations of the PCFLOW3D model and the equations for cohesive sediments, as well as to compare the results to each other. We detected significant discrepancies and concluded that the PCFLOW3D model significantly underestimates the critical bed-shear stress in the areas with cohesive sediments. The thesis is a contribution to better understanding of different transport processes in cohesive and non cohesive sediments. We also proposed adequate equations for upgrading the PCFLOW3D model in order to be used in cohesive sediment areas.

ZAHVALA

Hvala dr. Dušanu Žagarju za izjemno mentorstvo in pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Hvala svoji družini za vso podporo tekom študija.

Hvala Barbari in Anji za prijateljstvo in za vso pomoč, ki sta mi jo nudile tekom študija.

Hvala tudi vsem ostalim, ki so mi ob študiju tako ali drugače pomagali.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	X
1 UVOD	1
1.1 Dosedanje delo	3
1.2 Hipoteza in cilji naloge	5
2 METODOLOGIJA	6
2.1 Lastnosti kohezivnih sedimentov	6
2.2 Razlike med kohezivnimi in nekohezivnimi sedimenti	7
2.3 Procesi pri kohezivnih sedimentih	8
2.3.1 Osnovne enačbe transporta	8
2.4 Podatki	13
3 MODEL PCFLOW3D	15
3.1 Hidrodinamični modul	15
3.1.1 Osnovne enačbe.....	15
3.1.2 Modeli turbulence in stratifikacija.....	19
3.1.3 Metoda reševanja.....	19
3.2 Transportno disperzijski modul	20
3.2.1 Osnovna enačba.....	20
3.2.2 Metoda reševanja.....	21
3.3 Biogeokemični modul	21

3.4	Sedimentacijski modul za nekohezivne plavine.....	22
3.4.1	Osnovne predpostavke pri nekohezivnih sedimentih.....	23
3.4.2	Osnovna transportna enačba za nekohezivne plavine	23
3.4.3	Parametri usedanja in resuspendiranja delcev nekohezivnih plavin	25
3.4.4	Robni pogoji.....	28
3.4.5	Račun debeline odnešenega oziroma nančenega materiala.....	30
4	<i>KRITIČNE PRIDNE NE STRIŽNE NAPETOSTI PRI KOHEZIVNIH SEDIMENTIH.....</i>	33
4.1	Kritične pridne ne strižne napetosti za odlaganje materiala (τ_{cr}, d)	33
4.2	Kritične erozijske pridne ne strižne napetosti τ_e.....	36
4.3	Kritične pridne ne strižne napetosti za mešanice gline, melja in peska	40
5	<i>REZULTATI IN DISKUSIJA.....</i>	43
5.1	Metoda za nekohezivne sedimente.....	43
5.2	Metoda za kohezivne sedimente.....	44
5.3	Občutljivostna analiza enačbe (55).....	45
6	<i>ZAKLJUČKI.....</i>	49
7	<i>VIRI.....</i>	50

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Podatki za sediment morskega dna	14
Preglednica 2: Kritične pridnene strižne napetosti za odlaganje materiala (Van Rijn, 1993, str. 11.21)	33
Preglednica 3: Kritične erozijske strižne napetosti za površinsko in globinsko erozijo, za čas koncentracije od 1 dan do 7 dni (Van Rijn, 1993, str. 11.33)	38
Preglednica 4: Kritične erozijske strižne napetosti za različne koncentracije sedimenta (suhe gostote) (Van Rijn, 1993, str. 11.33).....	39
Preglednica 5: Kritične pridnene strižne napetosti za posamezni vzorec po metodi za nekohezivne sedimente.....	41
Preglednica 6: Kritične pridnene strižne napetosti po metodi za kohezivne sedimente.....	44
Preglednica 7: Občutljivostna analiza za srednji premer zrn	46
Preglednica 8: Občutljivostna analiza za delež vsebnosti gline	46
Preglednica 9: Spreminjanje kritične pridnene strižne napetosti glede na koeficient gama.....	46

KAZALO SLIK

Slika 1: Električne sile kot funkcija razdalje med delci (Van Rijn, 1993, str. 11.7).....	12
Slika 2: Razlika gostot (gostota kosma minus gostota tekočine) kot funkcija premera kosma (Van Rijn, 1993, str. 11.9)	13
Slika 3: Stopnja odlaganja v odvisnosti od koncentracije (Van Rijn, 1993, str. 11.22)	35
Slika 4: Učinek kohezivnih sil na kritične pridnene strižne napetosti za dna iz kohezivnih materialov (Van Rijn, 2013, str. 11.66)	41
Slika 5: Spreminjanje kritične pridnene strižne napetosti v odvisnosti od srednjega premera zrn.....	45
Slika 6: Spreminjanje pridnene kritične strižne napetosti glede na srednji premer zrn.....	44
Slika 7: Spreminjanje pridnene kritične strižne napetosti v odvisnosti od vsebnosti gline v materialu	46
Slika 8: Spreminjanje kritične pridnene strižne napetosti glede na koeficient γ	47

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

a	referenčna globina, privzamemo vrednost $H/10$ pri čemer je H globina vode
A	tlorsna površina obravnavane celice
B	spodaj (bottom)
c	volumska koncentracija
c_{gel}	delež materiala na dnu, ki je prešel v obliko gela
$c_{gel,s}$	največji možni delež, ki lahko preide v gel (oz. delež trdne snovi v dnu)
c_h	kohezija
c_p	specifična toplota
C	koncentracija poljubnega nekonservativnega onesnažila
C	koncentracija sedimenta
C'	Chézyjev koeficient, odvisen od zrnivosti plavin
C_0	koncentracija v celici v prejšnjem časovnem koraku
C_{ae}	ravnotežna referenčna koncentracija
$\frac{du}{dy}$	gradient hitrosti
D_h	koeficient turbulentne difuzije v horizontalni smeri
D_s	reprezentativni premer zrna
D_{tx}, D_{ty}, D_{tz}	koeficienti turbulentne difuzije
D_v	koeficient turbulentne difuzije v vertikalni smeri
D_{16}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 16% zrn
D_{50}	srednji premer zrna (premer zrna plavin, od katerega je manjših 50 % zrn)
D_{84}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 84% zrn
D_{90}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 90% zrn
D_*	parameter zrna plavin
E	stopnja erozije
f	parameter Coriolisove sile
g	težnostni pospešek
h	globina vode
h	debelina posameznega sloja
h_a	gladina vode v površinskem sloju
h_α	debelina površinskega sloja
H	globina vode
k	koeficient (1 do 2)
K_{por}	koeficient poroznosti oziroma zbitosti

m	koeficient (1 do 2)
M_i^a	vpliv advekcije
M_i^d	vpliv disperzije
M_T^S	vpliv usedanja delcev iz celice nad obravnavano celico
N	število horizontalnih slojev v z smeri
N_h	koeficient horizontalne turbulentne viskoznosti
N_v	koeficient vertikalne turbulentne viskoznosti
p	tlak
p_a	atmosferski tlak na površini vode
p_{clay}	delež vsebnosti gline
p_h	normalne napetosti
p_r	delež vseh usedajočih se delcev, ki pridejo v stik z dnom in tam ostanejo
R	penetracija kratkovalovnega sevanja preko vodne gladine
R_b	hidravlični radij, ki ga lahko aproksimiramo z globino H
R_i	Richardsovo število
s	slanost
s_s	relativna gostota delcev plavin
S_h	strižna trdnost
SRC	izvorno/ponorni člen
t	čas
T	transportni parameter
T	top (zgoraj)
T	temperatura
u	komponenta hitrosti v x smeri
$u_{b,w}$	strižna hitrost ob dnu zaradi vpliva valovanja
u_*	strižna hitrost
$u_{*,cr}$	kritična strižna hitrost ob dnu
u_*'	strižna hitrost ob dnu zaradi vpliva tokov
\bar{u}	povprečena hitrost po vertikali
v	komponenta hitrosti v y smeri
V_A	Van der Waalove privlačne sile
V_{cell}	volumen obravnavane celice
V_k	kinematična viskoznost vode
V_R	odbojne sile
V_T	seštevek privlačnih in odbojnih sil

w	vertikalna hitrost
w_b	komponenta hitrosti v z smeri na spodnjem robu kontrolnega volumna
w_t	komponenta hitrosti v z smeri na zgornjem robu kontrolnega volumna
w_s	hitrost usedanja posameznih delcev
$w_s C$	učinek flokulacije in faktor oviranja hitrosti
$w_{s,m}$	hitrost usedanja kosmov v mešanici tekočine in sedimenta
$w_{s,z}$	hitrost usedanja na višini z
W_s	sedimentacijska hitrost (hitrost usedanja delcev plavin)
W_{so}	sedimentacijska hitrost brez upoštevanja vpliva koncentracije lebdečih plavin na hitrost usedanja
W, E, S, N	smeri (W - zahod, E - vzhod, S - jug, N - sever)
x, y, z	koordinatne smeri
y_0	globina toka
z	razdalja od dna
z_s	višina vodne gladine
α	koeficient
α	delež kosmov, ki niso sposobni vzdržati visokih strižnih napetosti
β	koeficient (3 do 5)
γ	koeficient, ki se določa z umerjanjem
σ_s	Schmidtovo število
σ_s	geometrijska standardna deviacija
σ_T	Prandtlovo število
ε_s	koeficient mešanja na višini z
ζ	kota gladine v obravnavanem času
η	poroznost
θ_c	parameter mobilnosti, odvisen od parametra zrna D_*
κ	von Kármánova konstantna
μ_B	dinamični koeficient viskoznosti
ρ	gostota
ρ_s	gostota plavin
τ	strižne napetosti
τ_B	Binghamova meja napetosti
τ_b	strižna napetost zaradi valovanja
τ_{bx}	strižna napetost na dnu spodnjega sloja vode zaradi hrapavosti v x smeri
τ_{by}	strižna napetost na dnu spodnjega sloja vode zaradi hrapavosti v y smeri
$\tau_{b,w}$	strižne napetosti ob dnu zaradi vpliva valovanja

$\tau_{cr,d}$	kritična pridnen strižna napetost zaradi odlaganja
τ_d	kritična pridnena strižna napetost odlaganja materiala
τ_e	kritična erozijska pridnena strižna napetost
τ_{wx}	strižna napetost na površini zaradi vetra v x smeri
τ_{wy}	strižna napetost na površini zgornjega sloja vode zaradi vetra v y smeri
τ_y	skupna strižna napetost
Φ_h	kot notranjega trenja

1 UVOD

Potreba po razumevanju transporta sedimentov oz. plavin, se je pojavila primarno zaradi erozije in odlaganja sedimentov, ter obrambe pred poplavami. Zdaj se zavedamo, da je razumevanje procesov in transporta samega pomembno tudi zaradi transporta na delce vezanih toksičnih kovin in strupenih odpadkov. V vodnih telesih se pojavljajo tokovi, ki so v rekah posledica gravitacije, v mirnih vodah pa vetra, plimovanja, vtokov rek in gostotnih gibanj. Iz zraka, ali kot posledica izpiranja pri površinskem toku zaradi padavin, se v vodnem telesu pojavijo tudi delci, ki se pozneje premikajo s tokovi. Transport plavin se začne, ko hitrost vode v vodni masi pri dnu dovolj naraste, da trde delce iz dna premakne v gibanje. Na začetku se delci gibljejo tako, da drsijo in se kotalijo po dnu ali poskakujejo; to so rinjene plavine. V primeru, ko hitrost še naprej narašča, vstopijo delci v suspenzijo in takrat te delce preimenujemo v lebdeče plavine (Žagar in sod., 1997).

Poznavanje premika plavin je pomembno z gospodarskega stališča, saj je ključno za določanje in vzdrževanje plovnih poti in za poznavanje in razumevanje zasipavanja akumulacij. Posebna pozornost pa se posveča suspendiranim delcem, s katerimi se poveča možnost prenosa toksinov, zato je transport plavin zanimiv tudi iz okoljskega stališča. Toksini se pod vplivi procesov erozije, difuzije, sorpcije in konsolidacije ponovno sproščajo iz usedlin. Ko so ti delci v suspenziji pa se pojavljajo trije značilni procesi, ki so med seboj prepleteni: privzdigovanje (resuspendiranje), usedanje (sedimentacija) in premikanje (transport) (Mikoš, 2000).

Zaradi želje po preučevanju dinamike sedimentov so bili razviti različni modeli s katerimi razlagamo te procese. Eden takih modelov je PCFLOW3D, ki je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin UL FGG. Vendar pa je ta model, kot večina drugih, izdelan za nekohezivne materiale. Model ima poleg hidrodinamičnega in transportno disperzijskega ter sedimentacijskega modula vgrajen tudi biogeokemični modul, ki lahko upošteva izmenjavo onesnažil med vodo in atmosfero in med sedimentom in vodo. Razvit je bil za simulacije pretvorb živega srebra, ki so problem v Tržaškem zalivu, ki je dober primer plitvega priobalnega območja, kjer redno prihaja do resuspendiranja materiala iz dna (Žagar, 1999 in Žagar in sod., 1997).

V hidrotehnik in hidrotehničnih izračunih obravnavamo kot kohezivne sedimente tiste, ki so sestavljeni iz zmesi melja in glin, s premerom zrn manjših od 50 μm . Znotraj takih sedimentov se pojavljajo sile z elektrostatičnimi lastnostmi. Te sile so rezultat mineraloških lastnosti sedimenta in adsorpcije ionov na površino zrn sedimenta (Partheniades, 2009). Najpomembnejši minerali glin, ki vplivajo na strukturo zrn so: kaolinit, montmorilonit, ilit in klorit. Ti minerali tudi vplivajo na velikost

koloidnih delcev, ki so lahko velikosti nekaj mikrometrov do frakcij manjših od 1 μm (Van Rijn, 1993).

Najznačilnejše lastnosti kohezivnih materialov so plastičnost, viskoznost, kohezija in strižne napetosti, ki se pojavljajo znotraj materiala. Pri kohezivnih sedimentih se zato ob transportu pojavljajo drugačni procesi, kot pri nekohezivnih. Seveda pa pride tudi pri najbolj finih sedimentih, ob dovolj nizkih strižnih napetostih toka ob dnu, do usedanja. Zaradi tega je potrebno pri transportnih procesih in pri usedanju upoštevati tudi parametre toka in konsistenčno stanje zemljine. V primeru 100% zasičenega sedimenta je konsistenčno stanje zemljine odvisno tudi od gostotnega stanja sedimenta. Bolj gost in že konsolidiran sediment bo bolj odporen na resuspendiranje (Partheniades, 2009).

Partheniades (2009) opredeli plastičnost in kohezijo kot najpogostejši lastnosti, ki sta podvrženi konsolidaciji glinenih mas. Plastičnost je sposobnost materiala, ki se kaže v prenašanju deformacij. Pri kohezivnih sedimentih to pomeni, da je lahko sediment podvržen napetostim, ki povzročijo plastične deformacije, ne da bi se »pretrgal«. Za merjenje te lastnosti se uporabljajo Atterbergove meje plastičnosti in židkosti, ki so osnovna oblika klasifikacije kohezivnih sedimentov. Kohezija pa predstavlja privlačne sile med zrn, izraža pa se kot strižna trdnost pri ničelni normalni napetosti (Smolar, 2013).

Zaradi vseh teh lastnosti se delci kohezivnega sedimenta ne obnašajo kot individualni delci, ampak se sprimejo v celoto in tvorijo agregate - kosme, ki se obnašajo kot celota. Velikost teh kosmov in hitrost njihovega usedanja je veliko večja, kot hitrost usedanja in velikost posameznih delcev (Van Rijn, 1993). Vendar pa se tudi velikost kosmov lahko spreminja, glede na tok in sedimentacijske pogoje (Lin, 2013). Ko so torej privlačne sile največje, pride do združevanja dispergiranih delcev v kosme in večjih hitrosti usedanja. Ta pojav imenujemo flokulacija (Partheniades, 2009). Dispergirani delci imajo izredno majhne hitrosti usedanja, zato se lahko zgodi, da že najmanjše gibanje (mešanje) privede do tega, da večina teh delcev ostane v suspenziji.

Na hitrost usedanja delcev vplivajo torej gostota sedimentov, oblika zrn in viskoznost tekočine. Hitrost usedanja delcev pa je glavni parameter, ki opisuje odlaganje. Pri nekohezivnih materialih, ki se z dna premaknejo v gibanje, poteka prehod v gibanje tako, da delci drsijo, se kotalijo po dnu ali poskakujejo (saltacije). Ti delci vstopijo v suspenzijo, ko doseže tok dovolj veliko hitrost. Takrat govorimo o lebdečih plavinah. Suspendirani delci se premikajo v smeri toka vodne mase, dokler ima ta dovolj veliko hitrost. Za natančen opis dogajanja in modeliranje je torej potrebno izračunati hitrost usedanja delcev in t.i. transportni parameter (van Rijn, 1993), ki določa pogoje, ki so potrebni za prej opisane procese (resuspendiranje, transport in odlaganje premikajočih se plavin). Potrebno pa je tudi poznavanje hidrodinamičnih pogojev območjih, kjer do teh procesov pride (Kolarič, 2013 po Mihailovic in Gualtieri, 2010).

1.1 Dosedanje delo

Začetki teoretičnega preučevanja kohezivnih sedimentov in s tem povezanega raziskovalnega dela v 17. stoletju so zasluga DuBuata, Francija. Raziskoval je razlike med sedimenti, od glin do gramoz in razvil koncept strižne odpornosti. V naslednjem stoletju sta Hagen in DuPuit dodala še kvalitativne zapise gibanja plavin ob dnu in v suspenziji. Brahms je v sredini 18. stoletja prispeval k upoštevanju strižne hitrosti pri nekohezivnih sedimentih (za gramoz). Pomembno je omeniti, da je DuBoys nekaj let kasneje predstavil prvo formulo za račun transporta kot premikanje delcev v več zaporednih plasteh, ki je odvisna od globine in naklona dna. Publikacija, ki jo je objavil Gilbert, z naslovom: »Transportation of Debris by Running Water« (1914) je še zmeraj v uporabi, saj sta bila Gilbert v ZDA in Engels v Nemčiji prva, ki sta začela z resnim raziskovalnim in eksperimentalnim delom na kohezivnih sedimentih. Prvi modeli pa so bili izdelani že nekoliko prej. Okoli leta 1900 sta Fargue v Nemčiji in Reynolds v Angliji izdelala prve modele za premikajoče se dno. Leta 1914 je bila razvita tudi enačba za kritične pridnene napetosti, ki se pojavljajo na nagnjenem dnu. K razumevanju kritičnih strižnih napetosti je dodal pomemben prispevek tudi Shields, ki je razložil gibanje delcev sedimenta s krivuljo, ki jo poznamo in uporabljamo še danes kot Shieldsovo pretočno krivuljo (Van Rijn 1993).

Parteniades (2009) piše, da je prvo osnovno enačbo, ki opisuje kohezivne sedimente, razvil McLaughlin (1961), ki je sledil načelu kontinuitete. Enačbo opišemo tako: *»Stopnja povečane koncentracije usedajočih se delcev znotraj kontrolnega volumna, je enaka neto stopnji usedajočih se delcev s premerom d_i skozi kontrolno površino, ki je del kontrolnega volumna, plus stopnja nastanka enakih delcev znotraj tega kontrolnega volumna. Kontrolni volumen definiramo kot tisto območje, skozi katerega potujejo delci in v katerem računamo koncentracije in pretoke.«*

Začetek teoretične študije kohezivnih sedimentov se začne s formuliranjem osnovnih enačb za transport kohezivnih sedimentov. Proces je kontroliran z dvema skupinama spremenljivk. V prvo skupino spremenljivk spadajo lastnosti kohezivnih sedimentov, v drugo pa parametri toka, ki definirajo in kontrolirajo flokulacijo, erozijo, odlaganje in resuspenzijo (Partheniades, 2009).

Grobozrnate sedimente lahko ustrezno opišemo s povprečno velikostjo zrn ali s porazdelitvijo zrnivosti. Velikost kosmov in ostale lastnosti kohezivnih sedimentov pa so odvisne od napetosti, ki jih povzročajo turbulentne hitrosti. Te hitrosti ustvarjajo mehanizme, ki med agregati-skupki povzročajo medsebojne trke delcev in obenem tudi omejujejo velikost kosmov. V enačbah za kohezivne sedimente je potrebno upoštevati tudi, da so skupki podvrženi različnim procesom večanja in razpadanja, kar je potrebno upoštevati pri zapisu enačb (Partheniades, 2009).

Vse naštetu je potrebno upoštevati pri razvoju in izdelavi matematičnih modelov. Modele v glavnem razvijamo zato, da z njimi poskusimo opisati dejanske pojave na osnovi rezultatov, ki jih dobimo z

modelom, ki simulira dejansko dogajanje. Poznamo eno-dimenzijske modele (1-D), ter dvo-dimenzijske (2-D) in tri-dimenzijske (3-D) modele. Celovito revizijo različnih modelov transporta plavin je naredil Wu (2007). Ločimo pa tudi modele, ki so narejeni posebej za kohezivne sedimente in posebej za nekohezivne, ter takšne, ki lahko upoštevajo mešane sedimente (Lin, 2013).

Podobno kot si je sledil razvoj enačb, so se razvijali različni modeli. Kot opisuje Van Rijn (2006), je bil prvotni model za napovedovanje transporta plavin razvit za primere enovitega (uniformnega) dna. V tem modelu je za račun transporta upoštevan polmer srednjega zrna d_{50} . Takemu pristopu pravimo enovit enofrakcijski pristop, saj se material dna upošteva kot celota- ena frakcija, ne glede na razlike v dejanski zrnastosti strukturi. Rezultati takega modela so zelo nenatančni, saj so tudi razlike med zrni sedimenta v naravnem okolju velike. Ko imamo torej neenovito sestavo dna, se lahko modeliranja lotimo na dva načina, z uporabo enofrakcijske metode (vzamemo reprezentativno zrno manjše od d_{50} in statistično opišemo zrnastostno sestavo s še drugimi premeri zrn: d_{16} , d_{84} in d_{90}) ali z uporabo multifrakcijske metode. Prva metoda je primerna, ko imamo zrnastostno sestavo, kjer ni velikih razlik v velikosti zrn, druga pa se uporablja v glavnem za plavine, kjer so razlike v velikostih zrn velike (Van Rijn, 2006).

Multifrakcijski pristop je opisal Van Rijn (2006). Sediment je razdelil na poljubno število frakcij in izračunal stopnjo transporta posebej za vsako frakcijo, z uporabo obstoječega enofrakcijskega pristopa. Na koncu sešteje posamezne frakcije in dobi skupno količino prenesenega materiala. Van Rijnov model TRANSPOR2004 (Van Rijn, 2006) ima možnost izbire med štirimi multifrakcijskimi pristopi, ki se med seboj razlikujejo glede na različne načine izračuna nekaterih parametrov. Z multifrakcijskim pristopom se ukvarjajo tudi James in sod. (2010), ki trdijo, da je potrebno za pravilno modeliranje zapisati odnašanje in nanašanje materiala ob dnu kot funkciji lastnosti sedimenta in hidrodinamičnih spremenljivk. Drugače dobimo nenatančnih napovedi, ki so posledica tega, da ostali modeli upoštevajo oz. izhajajo iz rekonstrukcije že znanih dogodkov iz preteklosti (Kolarič, 2013).

Model PCFLOW3D, ki je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin UL FGG, je tridimenzionalni baroklini matematični model, ki je sestavljen iz hidrodinamičnega in transportno-disperzijskega modula (Četina, 1992). Kasneje je bil model nadgrajen še s sedimentacijskim modulom (Žagar, 1999) in biogeokemičnim modulom (Žagar in sod., 2007). Račun koncentracij lebdečih plavin in debeline nanosa oziroma erozije v vseh vrstah površinskih voda omogoča sedimentacijski modul. PCFLOW3D torej omogoča izračun količine transporta sedimentov, resuspendiranja in odlaganja materiala ter debeline erozije in usedanja (Kolarič, 2013). Pomanjkljivosti obstoječega modela je več; ima vgrajene samo enačbe za nekohezivni sediment in uporablja enofrakcijski pristop. Rezultati dosedanjih izračunov z modelom PCFLOW3D so pravzaprav vprašljivi, saj so bile tudi na območjih s kohezivnim sedimentom upoštevane enačbe za nekohezivne sedimente (Ramšak, 2013; Žagar in sod., 2012; Žagar in sod, 2014).

1.2 Hipoteza in cilji naloge

Med kohezivnimi in nekohezivnimi sedimenti obstajajo bistvene razlike pri procesih transporta, usedanja in privzdigovanja. Obstoječi model PCFLOW3D ima vgrajene enačbe za nekohezivne sedimente, zato na območjih kjer so sedimenti kohezivni, zelo verjetno ne daje pravih rezultatov. Potrebno je poiskati enačbe za račun usedanja, privzdigovanja in transporta kohezivnih sedimentov in jih primerjati z že vgrajenimi enačbami v modelu. Z izračuni na enostavnih primerih bo mogoče preveriti enačbe in primerjati rezultate, s tem pa ugotoviti razlike med enačbami in oceniti velikost napake, ki jo storimo, če ne upoštevamo, da so sedimenti kohezivni.

V diplomski nalogi bomo izpostavili bistvene razlike med kohezivnimi in nekohezivnimi sedimenti. Opisali bomo procese pri privzdigovanju sedimenta ter usedanju in transportu plavin v vodnem okolju in poiskali ustrezne enačbe za opis teh procesov pri kohezivnih sedimentih. Cilj naloge je primerjava enačb za kohezivne in nekohezivne sedimente in parametrov, ki se pojavljajo v enačbah. Z enostavnimi izračuni v Excelu bomo primerjali rezultate za obe vrsti sedimenta, kar bo prispevalo k razumevanju razlik med procesi pri kohezivnih in nekohezivnih sedimentih in omogočilo kasnejšo dopolnitev sedimentacijskega modula modela PCFLOW3D z enačbami za kohezivne sedimente.

2 METODOLOGIJA

2.1 Lastnosti kohezivnih sedimentov

Partheniades (2009) izhaja iz enačbe Coulombovega zakona:

$$S_h = c_h + p_h \tan \Phi_h \quad (1)$$

V kateri S_h predstavlja strižno trdnost, p_h normalne napetosti, c_h kohezijo in Φ_h kot notranjega trenja. Tudi Van Rijn (1993) izhaja iz te enačbe, vendar namesto kohezije vstavlja strižne napetosti τ_Y in pojasnjuje, da se v splošnem strižne napetosti interpretirajo kot kohezija obravnavanega vzorca.

Fizikalno-kemijske privlačne sile, ki delujejo med dispergiranimi zrnji, pri kohezivnih sedimentih prevladajo nad gravitacijsko silo. Zato se posamezni delci med sabo povezujejo v skupke, ki jih imenujemo kosmi. Kosmi so velikosti od nekaj mikrometrov do manj kot 1 μm . Ponavadi so igličaste oblike, ki pa je odvisna od mineraloške sestave. V popolnoma suhem okolju se glina obnaša kot prah različnih barv in gostot. Ko jo zmešamo z vodo imamo občutek, da se raztopi, kot npr. sol, vendar to ni res. Delci gline v vodi dispergirajo in tudi pod mikroskopom so vidni le nekateri od suspendiranih delcev (Partheniades, 2009).

Partheniades (2009) piše, da suspendiran sediment poveča viskoznost mešanice sedimenta in tekočine. Viskoznost je lastnost tekočin, ki se izraža kot fizikalna količina, ki predstavlja odziv tekočine na strižno silo (predstavlja notranje trenje v tekočinah). V mešanici vode in kohezivnih sedimentov se strižna trdnost v suspenziji spremeni v τ_B , skupne strižne trdnosti ali Binghamovo strižno trdnost. Suspendiran kohezivni material se pri strižnih napetostih nižjih od τ_B obnašajo kot trd, plastičen material, pri višjih strižnih napetostih pa kot tekočine. Takšne materiale imenujemo tudi »Binghamova plastika« (Bingham plastics) in ne spadajo med Newtonske tekočine. Van Rijn (1993) in Parteniades (2009) oba zapišeta Binghamovo formulo:

$$\tau - \tau_B = \mu_B \frac{du}{dy} \quad (2)$$

τ strižne napetosti

τ_B Binghamova meja napetosti

μ_B dinamični koeficient viskoznosti

$\frac{du}{dy}$ gradient hitrosti

Viskoznost in skupne strižne napetosti merimo z viskozimetrom, gradiente hitrosti pa merimo v smeri normale na smer toka. Van Rijn (1993) piše, da lahko glede na rezultate eksperimentov zaključimo, da so skupne strižne napetosti proporcionalne koncentraciji sedimenta ($\tau_y \approx c^\alpha$, $\alpha =$ od 2 do 6). Izvedenih je bilo tudi ogromno eksperimentov, ki bi naj povezali kemijske in fizikalne lastnosti s skupnimi strižnimi napetostmi, vendar kot so zapisali različni avtorji, splošna povezava še ni bila ugotovljena.

2.2 Razlike med kohezivnimi in nekohezivnimi sedimenti

Kohezivni sedimenti so sestavljeni v večini iz glinenih materialov, znotraj katerih se pojavljajo močne medzrnske sile, ki nastajajo zaradi negativnega naboja glinenih mineralov. Z manjšanjem velikosti zrn se večja razmerje med površino in volumnom. Zato, v nasprotju z nekohezivnimi materiali, obnašanje narekujejo medzrnske privlačne sile, ne pa gravitacijska sila. Jasne meje med kohezivnimi in nekohezivnimi sedimenti ni. Definicije se lahko razlikujejo in so odvisne od terena. Načeloma velja, da so sedimenti, katerih zrna so manjša od 2 μm (glina) kohezivni sedimenti. Sedimenti, katerih zrna pa so večja od 60 μm , veljajo za grobo-zrnate nekohezivne sedimente. Melj z velikostjo zrn med 2 μm in 60 μm velja za vmesni sediment (med kohezivnim in nekohezivnim). Odvisno je od deleža gline, vendar pa načeloma oba materiala - glina in melj, spadata med kohezivne sedimente (Huang in sod., 2006).

Že prej smo omenili, da se kohezivni sedimenti od nekohezivnih razlikujejo tudi po tem, da vsebujejo minerale gline, ki imajo različne strukture. Minerali glin so kaolinit (dvo-plastna struktura), ilit (tri-plastna struktura), montmorilonit (tri-plastna struktura) in klorit (štiri-plastna struktura). Ti minerali imajo ploščato strukturo, ki se lahko hitro spreminja pod vplivom elektrostatičnih sil in slanega okolja. Tudi zaradi te lastnosti so pri procesih obeh vrst sedimentov takšne razlike (Van Rijn, 1993).

Primarna razlika med grobozrnatimi in kohezivnimi sedimenti je ta, da so znotraj kohezivnih sedimentov, med zrn, privlačne sile. Zato se med transportom, usedanjem in privzdigovanjem obnašajo drugače, saj so drugačne velikosti, gostote in trdnosti. Te lastnosti pa niso konstantne, ampak se lahko spreminjajo s časom in deležem por, ter okoljem. Zaradi tega lahko modeliranje, ki temelji na posplošenih lastnostih in ne upošteva zapletenih fizikalno-kemijskih in mineraloških lastnosti, pripelje do napačnih rezultatov (Partheniades, 2009).

2.3 Procesi pri kohezivnih sedimentih

2.3.1 Osnovne enačbe transporta

2.3.1.1 Usedanje

Po Huang in sod. (2006) je združevanje v kosme rezultat hitrosti usedanja. Dispergirani drobni delci ni dovolj težek, da bi se usedel, saj gravitacijsko silo premaga tudi najmanjša motnja. Zato se delci združujejo v kosme, ki pa se lahko združijo še z drugimi kosmi. Struktura kosma (velikost, gostota, oblika) je odločilna za hitrost usedanja. Efektivna hitrost usedanja je hitrost usedanja pomnožena s t.i. faktorjem oviranja (hindrance factor), ki predstavlja zmanjšano hitrost usedanja zaradi drugih delcev.

Parteniades (2009) uporablja pri različnih velikostnih razredih delcev (kosmov) za usedanje naslednjo enačbo:

$$w_s(x, y, z, t)C(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n w_{si}(x, y, z, t)C_i(x, y, z, t) \quad (3)$$

V enačbi predstavlja w_s hitrost usedanja, ki je razdeljena na n razredov, kjer je n enak spremembi hitrosti usedanja (Δw_s). V splošnem je w_{si} vrednost hitrosti usedanja med $(i - 1) \Delta w_s$ in $i \Delta w_s$. Delci s hitrostjo usedanja w_i se imenujejo i -delci in njihova koncentracija je C_i . V teoriji sta hitrost usedanja in koncentracija funkciji prostora in časa in leva stran enačbe predstavlja skupno hitrost usedanja suspendiranega materiala.

Hitrost usedanja je pomemben parameter v vseh študijah sedimentov. Hitrost usedanja je povezana s slanostjo, koncentracijo sedimenta (C), globino vode, hitrostjo toka in je odvisna tudi od vrste merilnega inštrumenta. Če je koncentracija sedimenta večja od 1000 mg/l se hitrost usedanja linearno veča s slanostjo. V slanih vodah se zaradi efekta flokulacije poveča hitrost usedanja pri sedimentih s koncentracijami do približno 1000 mg/l. Pri koncentracijah večjih od 1000 mg/l se hitrost usedanja zmanjša, zaradi učinka oviranja usedanja. Do učinka oviranja pride zaradi toka, ki nastane ker delci pri usedanju izpodrivajo vodo, ki potuje navzgor. Pri zelo visokih koncentracijah je lahko vertikalni tok tako močan, da se te sile izenačijo z nasprotno usmerjeno silo gravitacije (usedanje) in dobimo stanje v katerem delci mirujejo. Do takega stanja pride ob dnu, kjer se pojavi t.i. »tekoče blato« (Van Rijn, 1993).

Po Van Rijn-u (1993) lahko hitrost usedanja določimo na dva načina:

$$\text{a) } w_{s,m} = k c^m \quad \text{v suspenziji (10-10.000 mg/l)} \quad (4)$$

$$b) \quad w_{s,m} = w_s (1 - \alpha c)^\beta \quad \text{v ovirani suspenziji (>10.000 mg/l)} \quad (5)$$

$w_{s,m}$ hitrost usedanja kosmov v mešanici tekočine in sedimenta

w_s hitrost usedanja posameznih delcev

c volumska koncentracija

m koeficient (1 do 2)

k koeficient (1 do 2)

α koeficient

β koeficient (3 do 5)

Van Rijn (2006) piše, da koeficient α izračunamo po naslednji formuli $\alpha = \left(\frac{d_{sand}}{d_{50}}\right)$, s tem da je $\alpha_{min} = 0$ in $\alpha_{max} = 3$. Za d_{sand} velja, da je $62 \mu\text{m}$, če je $\Phi_{cohesive} = 1$ za $d_{50} \geq 62 \mu\text{m}$.

Partheniades (2009) piše, da imenujemo i -delce vse tiste delce, ki imajo hitrost usedanja w_i . Če upoštevamo načelo kontinuitete za vse i delce in dodamo rezultirajoče vrednosti za vse vrednosti i in jih vstavimo v enačbo za hitrost usedanja in upoštevamo še difuzijske koeficiente neodvisne od velikosti delcev, potem dobimo enačbo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(w_s C)}{\partial z} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{i=1}^n D_{tx} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) - \\ \frac{\partial C}{\partial y} \left(\sum_{i=1}^n D_{ty} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) - \frac{\partial C}{\partial z} \left(\sum_{i=1}^n D_{tz} \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - \sum_{i=1}^n w_i = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

D_{tx}, D_{ty}, D_{tz} predstavljajo koeficiente turbulentne difuzije, x, y, z pa koordinatne smeri. Transport i -delcev poteka preko dveh procesov, advekcije in turbulentne difuzije. Turbulentna difuzija je posledica Fickovega zakona in je izražena s prej omenjenimi koeficienti D_{ij} , kjer i predstavlja frakcijo (tip) delcev, j pa smer- koordinatne smeri.

Če i -delci nastanejo samo zaradi flokulacije manjših delcev in razpada večjih skupkov, torej če je $\Sigma \omega_i = 0$ (vsota stopnje povečanja i -tega razreda agregatov znotraj kontrolnega volumna je nič) in če privzamemo, da difuzijski koeficienti niso odvisni od velikosti obravnavanega skupka, dobimo poenostavljeno advekcijsko difuzijsko enačbo za transport sedimenta v obliki:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial(w_s C)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ty} \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{tz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0 \quad (7)$$

V tej enačbi zajema produkt $w_s C$ učinek flokulacije in faktor oviranja hitrosti. Obe enačbi sta pomembni in ju moramo rešiti, kadar se ukvarjamo s procesi transporta (Partheniades, 2009).

Partheniades (2009) piše, da obstajajo tudi bolj poenostavljene enačbe, s katerimi pa se ne bomo ukvarjali, saj so namenjene dvo-dimenzionalnemu in eno-dimenzionalnemu računanju.

Za rešitev kontinuitetne enačbe moramo poznati robne pogoje. Partheniades (2009) je zapisal, da lahko za gladino, kjer ni pretoka sedimenta prek gladine, robni pogoj zapišemo z enačbo:

$$D_{tz} \frac{\partial C}{\partial z} = -w_s C \text{ pri } z = y_0 \quad (8)$$

V enačbi y_0 predstavlja globino toka.

Kritični pogoji (usedanje, privzdigovanje) so zmeraj ob dnu, tam računamo z enačbo:

$$E + (1 - p_r)w_s C = -D_{tz} \frac{\partial C}{\partial z} \text{ pri } z = 0 \quad (9)$$

E predstavlja stopnjo erozije, p_r je delež vseh usedajočih se delcev, ki pridejo v stik z dnom in tam ostanejo, z je razdalja od dna. Ta enačba nam pove, kakšna je izprana količina materiala z dna na enoto površine dna plus količina usedajočega se materiala, ki ne more doseči dna in se zato vrne nazaj v glavni tok. Iz te enačbe dobimo posebne pogoje:

1. Neto erozija brez hkratnega odlaganja: $E \neq 0, p_r=1,$
2. NI erozije in NI odlaganja: $E=0, p_r=0,$
3. Neto odlaganje brez erozije: $E=0, 0 < p_r < 1.$

Prej smo že zapisali, da je usedanje odvisno od različnih dejavnikov. Vpliva slanosti in koncentracije smo že opisali. Odvisno pa je tudi od globine in hitrosti toka. Van Rijn (1993) pravi, da je potrebna minimalna globina 2 m, da dosežemo maksimalno flokulacijo in maksimalno hitrost usedanja. Različne hitrosti usedanja pa se v glavnem pojavljajo, ker imajo večji kosmi večje hitrosti in »padejo« na manjše kosme, ki se potem pridružijo večjemu kosmu. Posledično so zato hitrosti usedanja v

spodnjem sloju višje, kot tiste v zgornjem sloju tekočine. Maksimalna hitrost usedanja pri globini 2 m je dosežena po približno 1600 s, kar je časovna omejitev, da vzdržujemo maksimalno flokulacijo.

Na flokulacijo pa vplivajo tudi merilni inštrumenti in tehnike merjenja. Kadar nimamo nobenih podatkov, je najbolje izvesti meritve na terenu, za katerega potrebujemo podatke. Meritve je najbolje izvajati v času plime. Vzorce pa odvezemamo malo pod gladino, na sredini globine in tik nad dnom, da dobimo podatke za celotni vodni stolpec. Meritve se največkrat izvajajo s cevjo, ki je nameščena horizontalno na mestu vzorčenja. V cev se nato ujame mešanica (tekočina s sedimentom) in cev zapremo z dvema ventiloma, ki sta nameščena na obeh koncih cevi. Cev oz. vzorec nato zavrtimo v vertikalno pozicijo in opazujemo proces usedanja. Hitrost usedanja nato določimo tako, da izmerimo koncentracijo sedimenta v cevi, v odvisnosti od časa. Dolžina cevi naj bo majhna (≈ 0.3 m), da se ne pojavi več različnih hitrosti usedanja. Drugi način določanja hitrosti usedanja je s kamerami. Na vsaki strani cevi sta okenci, na katera namestimo močno osvetlitev in dogajanje opazujemo s kamerami. Velikosti kosmov in hitrost usedanja določimo z računalniško analizo (Van Rijn, 1993).

Z meritvami s cevjo pa ni mogoče izmeriti hitrosti usedanja pri maksimalnem toku, kot piše Van Rijn (1993). Te izračunamo s pomočjo enačbe:

$$w_{s,z} = \frac{1}{c} \left[- \int_z^h \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) dz - \int_z^h u \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) dz - \varepsilon_s \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \right] \quad (10)$$

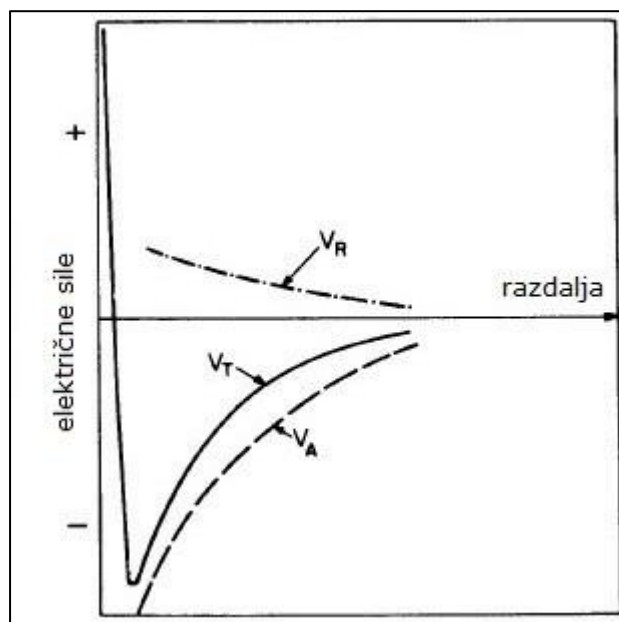
$w_{s,z}$	hitrost usedanja na višini z
c	koncentracija na višini z
t	čas
u	hitrost na višini z
ε_s	koeficient mešanja na višini z

Po tej enačbi dobimo bistveno večje hitrosti usedanja, kot pri preostalih metodah. Van Rijn (1993) zaključí, da pri meritvah s cevjo na mestu, kjer nas zanima hitrost usedanja, dobimo relativno majhne hitrosti, ker lahko kosmi razpadejo med vzorčenjem. Metoda z uporabo video kamere pa ni zanesljiva, saj upošteva samo večje kosme.

2.3.1.2 Flokulacija

Večina posameznih dispergiranih delcev ima negativen naboj in privlačne sile (Van der Waals, V_A), ki nastanejo zaradi interakcije električnih polov dveh ali več delcev. Odbojne sile (V_R) pa nastanejo

zaradi ionov, ki tvorijo oblake ionov z enakim nabojem, ki odbijajo drug drugega. Vsota obeh vrst sil je na sliki označena kot V_T (Slika 1). Pozitivni ioni, ki so prisotni v tekočini, tvorijo oblak ionov okoli negativno nabitih delcev gline. Katere sile prevladajo, je odvisno od števila pozitivnih ionov in razdalje med delci. V celinskih vodah, kjer je pozitivnih ionov manj, prevladajo odbojne sile in se zato delci med sabo odbijajo. V slanih vodah, kjer številni pozitivni ioni tvorijo kationsko plast okoli negativno nabitega delca, se le-ti med sabo privlačijo. Rezultat tega je nastajanje kosmov, ki se prav tako lahko združujejo med sabo (Van Rijn, 1993).



Slika 1: Električne sile kot funkcija razdalje med delci (Van Rijn, 1993, str. 11.7)

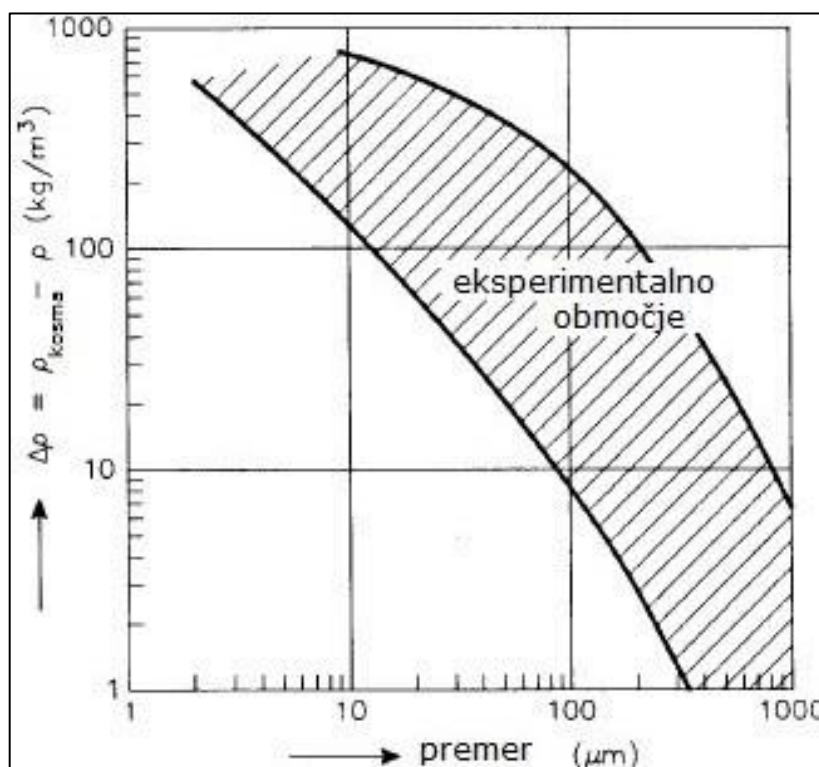
Poznamo 3 mehanizme flokulacije:

- a) Brownovo gibanje (delci manjši od 4 μm), ki je posledica temperaturnih sprememb v molekulah tekočine. Število kosmov je linearno proporcionalno s koncentracijo.
- b) Gradienti hitrosti, ki so prisotni v tekočinah ko imajo posamezni delci različne hitrosti. Kažejo se kot turbulentni tokovi.
- c) Različne hitrosti usedanja delcev (skupkov), ki nastanejo, ko hitreje premikajoče se enote vstopijo v vplivni radij počasnejših enot. Rezultat tega je, da delci, ki se usedajo hitreje, padejo na delce, ki so počasnejši.

Ostali dejavniki, ki še vplivajo na flokulacijo so: velikost in koncentracija delcev, slanost, temperatura in vsebnost organskih snovi (Van Rijn, 1993 in Partheniades, 2009).

Flokulacija je hitrejša pri visoki koncentraciji majhnih delcev in pri višjih temperaturah. Flokulacijski proces pospešuje tudi prisotnost organskih materialov, zaradi njihove sposobnosti vezanja. V mirnih vodah, kjer ni turbulentnega toka, se delci združujejo v večje kosme, ki se zaradi povečane teže hitreje usedajo. Razpadejo pa takrat, ko je strig na delce zaradi toka tekočine večji kot strižna trdnost kosma. Kosmi torej začnejo razpadati, kadar so v tekočini prisotne velike strižne sile. Največje strižne sile pa so tik ob dnu, kjer so največji gradienti hitrosti, zato je razpad ob dnu pogost pojav (Van Rijn, 1993).

Velikost makrokosmov se giblje od 100 do 1000 μm , mikrokosmi so reda velikosti od 10 do 100 μm in posamezni mineralni delci so manjši od 10 μm . Z združevanjem kosmov se velikost le-teh poveča, vendar se s tem zmanjša njihova gostota. Slika 2, ki temelji na eksperimentalnem delu, prikazuje razliko med gostoto vode in gostoto kosmov kot funkcija premera kosmov. Van Rijn (1993), je zapisal, da imajo posamezni glineni delci razliko gostot približno 1600 kg/m^3 ($\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$). Veliki kosmi (1000 μm) imajo razliko gostot samo od 1 do 10 kg/m^3 , saj večina kosma sestoji iz porne vode.



Slika 2: Razlika gostot (gostota kosma minus gostota tekočine) kot funkcija premera kosma (Van Rijn, 1993, str. 11.9)

2.4 Podatki

Za izdelane analize, katerih rezultati so predstavljeni v poglavju 5 REZULTATI IN DISKUSIJA, so uporabljeni podatki iz Malačič in sod (2009). Obravnavan je sediment iz morskega dna na območju

Koprskega zaliva. Poročilo vsebuje podatke za 5 vzorcev, ki smo jih označili s črkami od A do E. Preiskani sedimenti glede na zrnastostno analizo pripadajo melju. Imamo tudi podatke o globini odvzema vzorcev in zrnastosti sedimenta. Srednji premer zrna v večini preiskanih vzorcev znaša med 5,5 in 7 μm . Odstopa vzorec A, katerega srednji premer zrna znaša 15 μm . Poznan je tudi delež gline v %. Karakteristične zrnastostne značilnosti sedimenta in delež gline so prikazani v preglednici 1.

Preglednica 1: Podatki za sediment morskega dna

Vzorec	Globina [m]	D_{16} [μm]	D_{50} [μm]	D_{84} [μm]	D_{90} [μm]	Glina [%]
A	4	3	15	50	70	9
B	7	1,5	5,6	20	22	19,6
C	14	1,5	6,5	20	22	19,4
D	18	1,7	7	23	30	18
E	12	1,7	7,2	23	30	17,3

3 MODEL PCFLOW3D

Model PCFLOW3D je tridimenzionalni baroklini matematični model, ki je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin na UL FGG. PCFLOW3D spada med modele s hidrostatično aproksimacijo in v vertikalni smeri uporablja z -sloje. Vertikalno smer predstavlja z os, osi x in y pa predstavljata horizontalno smer. Model je sestavljen iz hidrodinamičnega (HD), transportno-disperzijskega (TD), sedimentacijskega (SD) in biogeokemičnega (BGK) modula. Model je bil večkrat podrobno opisan v literaturi in preizkušen pri reševanju praktičnih primerov. Posamezni moduli so podrobno opisani v literaturi: Rajar in sod. (1997), Širca in sod. (1999), Žagar (1999), Četina in sod. (2000), Rajar in sod. (2000), Rajar in sod. (2004) ter Žagar in sod. (2007).

3.1 Hidrodinamični modul

S hidrodinamičnim modulom določamo polja hitrosti, potek gladine, tlake in gostoto vode zaradi neenakomerne porazdelitve temperature in slanosti (Četina, 1992). Z vgrajenimi modeli turbulence pa računamo koeficiente turbulentne viskoznosti in turbulentne difuzije v horizontalni in vertikalni smeri (Četina, 1992; Dorić, 2008).

3.1.1 Osnovne enačbe

Osnovne enačbe hidrodinamičnega modula so:

1. *Kontinuitetna enačba*

- za posamezen sloj debeline h , razen za površinskega

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + w_t - w_b = 0 \quad (11)$$

kjer je:

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_z komponenta hitrosti v z smeri na zgornjem robu kontrolnega volumna

h debelina posameznega sloja

x, y, z koordinatne smeri

- kinematični robni pogoj za površinski sloj

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} = \sum_{K=1}^N \left(\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} \right) \quad (12)$$

kjer je:

N število horizontalnih slojev v z smeri

h_a gladina vode v površinskem sloju

t čas

2. Dinamična enačba

- v x smeri

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(huw)}{\partial z} \\ & = +f_v h - \frac{h \partial p}{r \partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h N_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h N_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h N_h \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \tau_{wy} \\ & \quad - \frac{1}{r} \tau_{by} \end{aligned} \quad (13)$$

- v y smeri

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(huw)}{\partial z} \\ & = +f_u h - \frac{h \partial p}{r \partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h N_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h N_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h N_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \tau_{wy} \\ & \quad - \frac{1}{r} \tau_{by} \end{aligned} \quad (14)$$

- v z smeri

$$p = p_a + g \int_z^{z_s} r dz \quad (15)$$

kjer je:

g	težnostni pospešek
f	parameter Coriolisove sile
p	tlak
p_a	atmosferski tlak na površini vode
N_h	koeficient horizontalne turbulentne viskoznosti
N_v	koeficient vertikalne turbulentne viskoznosti
z_s	višina vodne gladine
ρ	gostota
τ_{wx}	strižna napetost na površini zaradi vetra v x smeri
τ_{wy}	strižna napetost na površini zgornjega sloja vode zaradi vetra v y smeri
τ_{bx}	strižna napetost na dnu spodnjega sloja vode zaradi hrapavosti v x smeri
τ_{by}	strižna napetost na dnu spodnjega sloja vode zaradi hrapavosti v y smeri

3. Advekcijsko-difuzijski enačbi

- za temperaturo T

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hT)}{\partial t} + \frac{\partial(huT)}{\partial x} + \frac{\partial(hvT)}{\partial y} + \frac{\partial(hwT)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial(hS)}{rc_p \partial z} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

- za slanost s

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hs)}{\partial t} + \frac{\partial(hus)}{\partial x} + \frac{\partial(hvs)}{\partial y} + \frac{\partial(hws)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial(hs)}{\partial t} \right)_{površje} \end{aligned} \quad (17)$$

kjer je :

T	temperatura
s	slanost

D_h	koeficient turbulentne difuzije v horizontalni smeri
D_v	koeficient turbulentne difuzije v vertikalni smeri
R	penetracija kratkovalovnega sevanja preko vodne gladine
c_p	specifična toplota

Martinčič (2011) povzema po Rajar in sod. (1997), da se gostotni tokovi pojavijo zaradi sezonskega spreminjanja temperature zraka, kar vpliva na temperaturo in gostoto vode. Pri advekcijsko-difuzijski enačbi za temperaturo (16) je vpliv toplotne izmenjave med vodo in zrakom upoštevan v zadnjem členu, ki ga je potrebno upoštevati tudi pri določanju robnih pogojev (Rajar in Četina, 1997). V enačbi za slanost (17) pa je v zadnjem členu zajet vpliv dotoka površinske celinske vode, zmrzovanje v površinskem sloju ter sproščanje soli pri zmrzovanju (Martinčič, 2011 po Harms in Backhaus, 1994 in Dorić, 2008).

Horizontalni koeficient D_h in vertikalni koeficient D_v , sta difuzijska koeficienta, ki sta s turbulentno viskoznostjo povezana preko Prandtlovega (σ_T) in Schmidtovega (σ_S) števila, ki se gibljeta med 0,5 in 1,0. Običajno pa lahko za vsako smer (x , y in z) določimo drugačno vrednost. Poznamo relaciji:

$$D_h = \frac{N_h}{\sigma_T} \text{ oz. } D_h = \frac{N_h}{\sigma_S} \quad (18)$$

$$D_v = \frac{N_v}{\sigma_T} \text{ oz. } D_v = \frac{N_v}{\sigma_S} \quad (19)$$

Advekcijsko-difuzijski enačbi za temperaturo in slanost sodita v TD modul, vendar sta v modelu PCFLOW3D vključeni v HD modul. V HD modul sta vključeni, ker je porazdelitev temperature in slanosti tesno povezana z gostoto in z ostalimi hidrodinamičnimi količinami in pri modeliranju je potrebno celoten sistem enačb reševati istočasno. Enačbi sta primerni tudi za obravnavanje različnih onesnažil (Žagar, 1999).

4. Enačba stanja

$$\rho = \rho(T, s, C) \quad (20)$$

kjer je:

C koncentracija poljubnega nekonservativnega onesnažila

Enačba stanja je v baroklinih modelih pomembna zaradi vpliva spremenljive gostote na ostale hidrodinamične količine, ki predstavljajo končni rezultat HD modula (Četina, 1992).

3.1.2 Modeli turbulence in stratifikacija

Žagar (1999) piše, da je turbulenca posledica delovanja strižnih sil med posameznimi sloji tekočine ter med tekočino in dnom. Turbulenca vpliva na določanje hitrostnega polja, tlakov in višine vode. Z modeli turbulence lahko na podlagi koeficientov turbulentne viskoznosti in difuzije opišemo njen vpliv. Koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije niso odvisni od lastnosti tekočine, temveč od lastnosti toka, zato se spreminjajo v času in prostoru. V modelu PCFLOW3D so obravnavani posebej za vertikalno in horizontalno smer, saj se v plitvih območji (priobalna morja, zalivi), kjer je velika površina in majhna globina razlikujejo za red velikosti ali več.

Stopnja stratifikacije je v modelu opisana z Richardsonovim številom (R_i). Pri modeliranju je vpliv stratifikacije zelo pomemben. V primeru stabilne stratifikacije se lahko vertikalna koeficienta turbulentne viskoznosti (N_v) oziroma difuzije (D_v) bistveno zmanjšata (Četina, 1992).

Poznamo več različnih modelov turbulence, ki pa se med sabo razlikujejo po uporabljenem principu za določanje parametrov in glede na primernost uporabe v modelih. Nekateri modeli so se skozi razvoj izkazali za premalo natančne (predvsem za 3D modele), zato se njihova uporaba opušča. Med te sodijo modeli brez transportnih enačb, kjer so vrednosti turbulentne viskoznosti in difuzije konstantne in podane v vertikalni in horizontalni smeri, določene pa so na podlagi meritev ali umerjanja. Podrobneje so modeli turbulence, ki so vgrajeni v model PCFLOW3D prikazani v Dorić (2008).

Koeficient turbulentne viskoznosti in difuzije v vertikalni smeri se da določiti tudi na podlagi izračunov po parabolični ali parabolično-konstantni porazdelitvi. Bolj ustrezna za modeliranje sedimentov je slednja, saj parabolični razpored v sedimentacijskem modelu izračuna koncentracije plavin na površini toka nič, kar pa ni enako dejanskemu stanju. Bolj ustrezna, parabolično konstantna porazdelitev, ima razpored tak, da je v spodnji polovici vodnega stolpca odvisnost parabolična, na polovici doseže maksimalno vrednost in je nato do gladine konstantna (Lin in Falconer, 1996). Oba modela sta tudi vgrajena v sedimentacijski modul modela PCFLOW3D (Žagar, 1999).

3.1.3 Metoda reševanja

Za reševanje enačb se uporablja izpeljanka numerične metode končnih razlik. To je Eulerjeva metoda končnih volumnov, pri kateri definicijsko območje v horizontalni smeri razdelimo na mrežo celic z dimenzijami Δx in Δy , v vertikalni smeri pa na posamezne sloje debeline h . V modelu so uporabljene

z -koordinate, pri katerih je lahko debelina slojev h različna. Vsi sloji, razen površinskega pa imajo ves čas konstantno debelino. Debelina površinskega sloja h_α pa se spreminja časovno in krajevno (Četina, 1992).

Numerična mreža je premaknjena v obeh smereh, horizontalno in vertikalno. Komponentne hitrosti u , v in w se določijo na premaknjenih pozicijah, z reševanjem kontinuitetne enačbe, dinamične enačbe in kinematičnega pogoja za površinski sloj. Te hitrosti vstavimo v advekcijsko-difuzijske enačbe, ki določajo porazdelitev temperature T , slanosti s ali koncentracije poljubnega onesnažila C . V površinskem sloju h_α se določa še tlak p in gladina vode. Vse te spremenljivke se računajo v središču kontrolnih volumnov. Zaradi vpliva porazdelitve temperature in slanosti na gostoto vode, kar vpliva tudi na hitrostno polje, moramo pri izračunu hitrosti v vsaki novi iteraciji upoštevati spremenjeno gostoto vode (Četina, 1992; Rajar in Četina, 1997).

Žagar (1999) piše, da je pri reševanju problemov, povezanih s plavinami in sedimentom zelo pomembna pravilna izbira števila in debelina slojev. Teoretično bi bilo najbolj natančno, če bi računali s čim več tankimi enako debelimi sloji, vendar bi se s tem računski čas zelo povečal. Pravilna izbira debeline slojev je pomembna zaradi razmeroma natančnega opisa geometrije definicijskega območja modeliranja. Od debeline slojev pa sta odvisna natančnost računa robnih pogojev na prosti gladini ter ob dnu in računski čas (Žagar, 1999).

Znotraj kontrolnih volumnov je nato potrebno pretvoriti diferencialne enačbe v diferenčne. To storimo tako, da jih integriramo znotraj kontrolnih volumnov. To z zadovoljivo natančnostjo naredimo z numerično shemo QUICK, ki je drugega reda točnosti (Žagar in sod., 2007).

3.2 Transportno disperzijski modul

3.2.1 Osnovna enačba

Hidrodinamični modul modela PCFLOW3D vsebuje dve advekcijsko-difuzijski enačbi. Ti enačbi sta bili prvotno namenjeni računu transporta in disperzije dveh aktivnih konservativnih onesnažil, temperature in slanosti. Za izračun temperature in slanosti, v primeru stratificiranega stanja, sta enačbi že uporabljeni. Za račun transporta in disperzije drugih onesnažil pa potrebujemo dodatne enačbe, ki so bile vgrajene v TD modul. Vgrajene so bile tri advekcijsko-difuzijske enačbe, med njimi tudi osnovna enačba za koncentracijo poljubnega nekonservativnega onesnažila C , pri kateri pa izvorno/ponornega člena SRC ne upoštevamo pri konservativnih onesnažilih (Žagar, 1999):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} + \frac{\partial(hwC)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + SRC \end{aligned} \quad (21)$$

kjer je:

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

3.2.2 Metoda reševanja

Reševanje enačbe se razlikuje za aktivna in za pasivna onesnažila. Za aktivna onesnažila se enačba rešuje znotraj HD modula, saj imajo aktivna onesnažila vpliv na gostoto vode in s tem na hidrodinamične količine. Za pasivna onesnažila pa reševanje poteka znotraj TD modula in sicer po dveh metodah. Prva je metoda kontrolnih volumnov (MKV), druga pa metoda sledenja delcev (MSD). Pri modeliranju sedimenta in plavin z metodo MSD se računski čas močno podaljša, zato za račun uporabljamo MKV (Žagar, 1999).

3.3 Biogeokemični modul

Za namen simulacije pretvorb in kroženja živega srebra v Sredozemskem morju je bil razvit biogeokemični modul. Osnovni modul je opisan v literaturi (Rajar in sod., 1997; Širca in sod., 2000), nadgradnjo in uporabo pri modeliranju v Sredozemskem morju pa opisujejo Žagar in sod. (2007). Z biogeokemičnim modulom je omogočeno modeliranje transporta treh vrst živega srebra (elementarno, nemetilirano in monometil živo srebro). Posamezne zvrsti se lahko nahajajo v raztopljeni, plinasti ali partikularni obliki in v planktonu.

3.4 Sedimentacijski modul za nekohezivne plavine

Na tem mestu je potrebno poudariti, da z enačbami, ki so zapisane v tem poglavju lahko pravilno računamo samo procese pri nekohezivnih materialih. Opisujemo torej obstoječi sedimentacijski modul, ki potrebuje nadgradnjo, da bi lahko z njim računali transportne procese pri kohezivnih sedimentih.

Na podlagi rezultatov HD in TD modula lahko s sedimentacijskim modulom računamo premikanje neraztopljenih materialov na dnu in v vodnem stolpcu. Omogoča nam tudi določanje območij na katerih pride do usedanja, dvigovanja in transporta materiala, ter količino materiala, ki se pri tem prenese (Kolarič, 2013).

Transport zaradi advekcije in disperzije je tridimenzionalen proces. V dvodimenzijskih modelih, v horizontalni smeri, kjer so vgrajene globinsko povprečene enačbe za transport plavin in zanje zadošča manj podatkov. Rezultat takega dvodimenzionalnega modela je globinsko povprečna koncentracija lebdečih plavin in koncentracije ob dnu. Debelino odnešenega oziroma odloženega materiala izračunamo z dodatnimi empiričnimi enačbami, pri predpostavki, da je razmerje med koncentracijo plavin ob dnu in globinsko povprečno koncentracijo enako razmerju v ravnotežnem stanju. To pomeni, da kadar se razmere v toku hitro spreminjajo ali če je oblika definicijskega območja zelo nepravilna, z empiričnimi enačbami ne moremo dovolj dobro prikazati razporeditve lebdečih plavin po vertikali. Za take primere dvodimenzionalni model ni primeren in je smiselno uporabiti tridimenzionalni model, s katerim lahko neposredno iz koncentracij ob dnu izračunamo porazdelitev plavin po globini in debelino odnešenega oz. nanešenega materiala ob dnu. Pri modeliranju je pomembno upoštevati tudi resuspendiranje delcev, ki prispeva k zvišanju koncentracij lebdečih plavin (Žagar, 1999).

Sedimentacijski model je vsestransko uporaben v hidrotehnični praksi, saj je z njim mogoče računati transport plavin v rekah, jezerih in morjih. Uporaben je tudi za dokaj natančen račun koncentracij lebdečih plavin in debeline nanosa oziroma erozije v vseh vrstah površinskih voda. Z modelom se lahko računa tudi transport onesnažil vezanih na delce plavin in tudi geomorfološke procese v okolju, kar je velikega pomena za prakso. Osnovni model ponuja možnosti, kot so: nestacionarnost, možnost upoštevanja dotokov in iztokov (npr. izlivi rek v morje), vpliv vetra, plimovanje na odprtem robu, spremenljiva gostota kot posledica neenakomerne porazdelitve temperature in/ali slanosti, upoštevanje stratificiranega stanja, vpliv valovanja na strižne napetosti ob dnu (Žagar, 1999). Model pa ne omogoča računa s kohezivnimi materiali. Prav zato se v diplomski nalogi posvečamo možnim izboljšavam.

3.4.1 Osnovne predpostavke pri nekohezivnih sedimentih

Pri računu transporta in koncentracij lebdečih plavin z novim modelom morajo biti izplonjene naslednje osnovne predpostavke (Žagar, 1999):

- sediment na dnu je sestavljen iz enakega materiala kot lebdeče plavin, na razpolago je neomejena količina sedimenta, resuspenzija je zmeraj mogoča, na dnu ni nikoli trdna podlaga
- dno je sestavljeno iz nesprijetih delcev in erozija ni odvisna od kohezijskih sil.
- nanašanje in odnašanje materiala ob dnu je dovolj majhno, da ne vpliva na debelino spodnjega sloja v tolikšni meri, da bi se lastnosti toka spremenile
- koncentracija lebdečih plavin je dovolj majhna, da ne vpliva na lastnosti vode (gostota in viskoznost) in toka, ima pa vpliv na hitrost usedanja delcev.

Kolarič (2013) še dodaja, da pri 3D modelih uporabljamo najnatančnejše podatke, ki jih imamo. Enačbe, ki upoštevajo povprečne hitrosti po globini, lahko zamenjamo z dejanskimi hitrostmi v pridenem sloju, ki jih izračunamo s 3D HD modelom.

3.4.2 Osnovna transportna enačba za nekohezivne plavine

Osnovna tridimenzionalna advekcijsko-difuzijska enačba za račun lebdečih plavin v posameznem sloju debeline h je povzeta po Van Rijnu (1993):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) + \frac{\partial}{\partial z}((w - W_s)hC) \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD_h \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hD_h \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hD_v \frac{\partial C}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (22)$$

kjer je:

- h debelina posameznega sloja
- D_h difuzijski koeficient v horizontalni smeri
- D_v difuzijski koeficient v vertikalni smeri
- W_s sedimentacijska hitrost (hitrost usedanja delcev plavin)
- C koncentracija lebdečih plavin
- u, v horizontalne hitrosti v posameznem sloju

w vertikalna hitrost

x, y, z koordinatne smeri

Za reševanje enačbe (22) je potrebno poznati razporeditev hitrosti usedanja W_s , ki je odvisna od parametrov toka in zrn plavin. Potrebno je upoštevati tudi ustrezne robne pogoje. Postopek reševanja je enak kot pri enačbah HD modula (Žagar, 1999).

Če primerjamo enačbo (7) z enačbo (22), vidimo, da sta isti, vendar pa Partheniades (2009) ne definira območja računa po globini, računa torej točkovno ali zvezno po celotni globini, Van Rijn (1993) pa doda člen h , ki predstavlja debelino posameznega sloja.

V poglavju 2.3.1.1 smo po Parthenidesu (2009) zapisali, da je enačba (7) poenostavljena advekcijsko difuzijska enačba za transport sedimenta. Model torej računa s poenostavljeno enačbo, kar pomeni, da privzame, da i -delci nastanejo samo zaradi flokulacije manjših delcev in razpada večjih skupkov, torej da je $\Sigma\omega_i = 0$ (vsota stopnje povečanja i -tega razreda agregatov znotraj kontrolnega volumna je nič) in da difuzijski koeficienti niso odvisni od velikosti obravnavanega skupka.

Turbulentna viskoznost in difuzija imata pri majhnem razmerju med globino in površino obravnavanega področja (jezera, morja) velik vpliv na točnost rezultatov simulacij v vertikalni smeri. Zaradi tega je potrebno difuzijski koeficient v vertikalni smeri (D_v) določiti čim bolj natančno (Žagar, 1999). D_v lahko izračunamo tako, kot je opisano v HD modulu (enačba 19) ali pa po načinu, ki sta ga predlagala Lin in Falconer (1996):

$$D_v = 4 \cdot \frac{z}{H} \cdot \left(1 - \frac{z}{H}\right) \cdot (D_v)_{max} \quad \text{za } \frac{z}{H} \leq 0,5 \quad (23)$$

$$D_v = (D_v)_{max} = 0,25 \cdot \kappa \cdot u_* \cdot H \quad \text{za } \frac{z}{H} \geq 0,5 \quad (24)$$

kjer je:

z oddaljenost od dna

H globina vode

κ von Kármánova konstantna

u_* strižna hitrost

Ta način prikaže realnejšo porazdelitev koncentracij lebdečih plavin v vodnem stolpcu, saj privzame parbolično-konstantno porazdelitev vertikalnega koeficienta turbulentne difuzije. Pri tem se

koeficient v spodnji polovici vodnega stolpca razporeja po paraboli, ko na polovici doseže največjo vrednost, pa je do gladine konstanten.

3.4.3 Parametri usedanja in resuspendiranja delcev nekohezivnih plavin

Za določanje hitrosti usedanja delcev W_s potrebujemo podatke:

- struktura zrnivosti plavin ($D_{16}, D_{50}, D_{84}, D_{90}$),
- gostota delcev plavin ρ_s in gostoto vode ρ_v ,
- vertikalno povprečene hitrosti toka, ki so rezultat računa HD modula,
- kinematično viskoznost vode ν_k ki je lahko konstantna ali pa odvisna od temperature (Žagar, 1999).

S hidrodinamičnim modulom 3D modela dobimo dejanske hitrosti ob dnu, s katerimi potem v sedimentacijskem modulu računamo. Po Van Rijnu (1993) pa strižno hitrost, ki je posledica delovanja tokov, izračunamo iz globinsko povprečenih hitrosti po enačbi (Van Rijn, 1993):

$$u'_* = \left| \frac{\sqrt{g}}{c'} \bar{u} \right| \quad (25)$$

kjer je:

- u'_* strižna hitrost ob dnu zaradi vpliva tokov
 g težnostni pospešek
 C' Chézyjev koeficient, odvisen od zrnivosti plavin
 \bar{u} povprečena hitrost po vertikali

Chézyjev koeficient pa izračunamo po enačbi:

$$C' = 18 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot R_b}{3 \cdot D_{90}} \right) \quad (26)$$

kjer je:

- R_b hidravlični radij, ki ga lahko aproksimiramo z globino H
 D_{90} premer zrna plavin, od katerega je manjših 90% zrn

V večjih vodnih telesih (jezera, morje) je pri izračunu strižnih hitrosti ob dnu potrebno upoštevati tudi vpliv strižnih napetosti zaradi valovanja. Pri tem upoštevamo princip superpozicije, kar pomeni, da izračunane strižne napetosti zaradi valovanja in tokov lahko vektorsko seštevamo. Za upoštevanje vpliva valovanja moramo poznati višino in periodo valovanja po celotni površini definicijskega območja v vsakem časovnem koraku (Kolarič, 2013). Postopek izračuna je podrobno opisan v literaturi (Van Rijn, 1990; Žagar, 1999).

Povezava med strižno hitrostjo in napetostmi zaradi valovanja je podana z enačbo (Van Rijn, 1993):

$$u_{b,w} = \sqrt{\frac{\tau_{b,w}}{\rho}} \quad (27)$$

kjer je:

$u_{b,w}$ strižna hitrost ob dnu zaradi vpliva valovanja

$\tau_{b,w}$ strižne napetosti ob dnu zaradi vpliva valovanja

ρ gostota

Strižna hitrost zaradi valovanja in strižna hitrost, ki je posledica delovanja tokov sta količini, ki ju lahko približno določimo, če poznamo hitrost vetra in privetritišče, definirano kot razdalja med opazovano točko in najbližjo obalo v smeri, od koder piha veter (Žagar, 1999). Ta metoda pa je uporabna le kot približek, ker na območjih kjer ponavadi modeliramo transport plavin, nima dobre fizikalne osnove, saj enačbe veljajo le za globoko vodo pri popolnoma razvitem valovanju. Za natančnejše rezultate, podatke o valovanju uvozimo v model PCFLOW3D iz ustreznih modelov valovanja (SWAN, SWAB, <http://www.swan.tudelft.nl/>). Postopek je opisan v Ramšak (2013).

Hitrost usedanja delcev oz. sedimentacijsko hitrost W_s lahko določimo po enačbah, ki jih je zapisal Van Rijn (1993):

$$W_{so} = \frac{1}{18} \cdot \frac{(s_s - 1) \cdot g \cdot D_s}{V_k} \quad \text{za } D_s \leq 100 \mu\text{m} \quad (28)$$

$$W_{so} = 10 \frac{V_k}{D_s} \left\{ \left[1 + \frac{0.001 \cdot (s_s - 1) \cdot g \cdot D_s^3}{V_k^2} \right]^{0.5} - 1 \right\} \quad \text{za } 100 \mu\text{m} \leq D_s \leq 1000 \mu\text{m} \quad (29)$$

$$W_{so} = 1.1 \cdot [(s_s - 1) \cdot g \cdot D_s]^{0.5} \quad \text{za } D_s \geq 1000 \mu\text{m} \quad (30)$$

kjer je:

W_{so} sedimentacijska hitrost brez upoštevanja vpliva koncentracije lebdječih plavin na hitrost usedanja

s_s relativna gostota delcev plavin, določena kot razmerje med gostotama lebdječih plavin in vode

D_s reprezentativni premer zrna

V_k kinematična viskoznost vode

Reprezentativni premer zrna opisuje enačba (Žagar, 1999):

$$\frac{D_s}{D_{50}} = 1 + 0,011(\sigma_s - 1)(T - 25) \quad (31)$$

kjer je:

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

σ_s geometrijska standardna deviacija

T transportni parameter

Določanje transportnega parametra je opisano v nadaljevanju (enačba 36). Geometrijsko standardno deviacijo pa določimo glede na granulometrično sestavo plavin (Žagar, 1999):

$$\sigma_s = \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{16}}{D_{50}} \right) \quad (32)$$

kjer je:

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

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

Žagar (1999) piše, da se s povečanjem koncentracije plavin hitrost usedanja delcev zmanjšuje. To je pomemben proces, saj se pri enoodstotnih koncentracijah plavin hitrost usedanja delcev zmanjša za okrog 10%. Uporabljena je najustreznejša empirična enačba za zmanjšanje hitrosti usedanja (Van Rijn, 1993):

$$W_s = (1 - 2.15 \cdot C) \cdot (1 - 0.75 \cdot C^{0,33}) \cdot W_{s0} \quad (33)$$

kjer je:

W_{s0} prvotna hitrost usedanja plavin, brez upoštevanja koncentracije lebdečih plavin na hitrost usedanja

Enačba daje po vsem razponu koncentracij rezultate, ki se najbolje ujema z meritvami (Žagar, 1999).

3.4.4 Robni pogoji

Pri reševanju osnovne advekcijsko-difuzijske enačbe za transport lebdečih plavin moramo predpisati štiri vrste robnih pogojev, od katerih veljajo za robni pogoj na odprtem robu in ob obali iste enačbe in predpostavke kot pri osnovnem modelu PCFLOW3D, ki so podrobneje opisane v literaturi (Četina, 1992). Upoštevati moramo torej (Žagar, 1999):

1. Odprti rob

Na odprtem robu so hitrosti lahko usmerjene navznoter, kjer je lahko predpisana koncentracija na vtoku (dobljena iz meritev ali z računom ravnotežnega koncentracijskega profila na odprtem robu). Lahko so pa usmerjene navzven in uporabimo enostavno ekstrapolacijsko shemo prvega reda.

2. Obala

Pretok vode in plavin skozi obalo je enak nič, kar pomeni, da je odvod koncentracij v smeri pravokotno na obalo enak nič.

3. Prosta gladina

Na prosti gladini je neto pretok v vertikalni smeri enak nič, torej mora biti izpolnjena enačba:

$$\left[W_s \cdot C + D_v \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{\zeta} = 0 \quad (34)$$

kjer je:

ζ kota gladine v obravnavanem času

4. Dno

Ob dnu sta mogoča dva procesa- usedanje plavin in resuspendiranje že usedlih delcev. Količina materiala, ki se usede ali resuspendira, je odvisna od koncentracije plavin ob dnu, hitrosti usedanja delcev in transportne sposobnosti toka (Žagar, 1999).

Robni pogoj pri resuspenziji predstavlja referenčna koncentracija, ki je podana z enačbo (Van rijn, 1990):

$$C_{ae} = 0,015 \frac{D_{50} T^{1,5}}{a D_*^{0,3}} \quad (35)$$

kjer je:

C_{ae} ravnotežna referenčna koncentracija

a referenčna globina, privzamemo vrednost $H/10$ pri čemer je H globina vode

D_* parameter zrna plavin

Transportni parameter dobimo iz strižnih napetosti ob dnu (Van Rijn, 1993):

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*,cr})^2}{(u_{*,cr})^2} \quad (36)$$

kjer je:

$u_{*,cr}$ kritična strižna hitrost ob dnu

Kadar je $T > 0$ pride do resuspendiranja odloženega materiala, v primeru $T < 0$ pa do usedanja delcev plavin na dno.

Kritična strižna hitrost ob dnu je odvisna od parametra mobilnosti θ_c , relativne gostote plavin ρ_s , težnostnega pospeška g in srednjega premera zrn D_{50} (Van Rijn, 1993):

$$u_{*,cr} = \sqrt{\theta_c \cdot (s_s - 1) \cdot g \cdot D_{50}} \quad (37)$$

kjer je:

θ_c parameter mobilnosti, odvisen od parametra zrna D_*

Žagar (1999) piše, da najprej izračunamo kritično strižno hitrost ob dnu $u_{*,cr}$, definirano po Shieldsu (Van Rijn, 1993). Vendar za to potrebujemo izračun relativne gostote delcev plavin s_s , ki je definirana kot razmerje gostot plavin in vode. Nato izračunamo parameter zrna D_* (Van Rijn, 1993):

$$D_* = D_{50} \left[\frac{(s_s - 1) \cdot g}{V_k^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

Iz te enačbe lahko potem izračunamo parameter mobilnosti θ_c (Van Rijn, 1993):

$$\theta_c = \frac{0,24}{D_*} \quad \text{za } D_* \leq 4 \quad (39)$$

$$\theta_c = \frac{0,14}{D_*^{0,064}} \quad \text{za } 4 \leq D_* \leq 10 \quad (40)$$

$$\theta_c = \frac{0,04}{D_*^{0,1}} \quad \text{za } 10 \leq D_* \leq 20 \quad (41)$$

$$\theta_c = 0,013 \cdot D_*^{0,29} \quad \text{za } 20 \leq D_* \leq 150 \quad (42)$$

$$\theta_c = 0,055 \quad \text{za } D_* \geq 150 \quad (43)$$

3.4.5 Račun debeline odnešenega oziroma nančenega materiala

Žagar (1999) piše, da najprej izračunamo masno bilanco vtoka in iztoka plavin po prostoru in času v vsakem kontrolnem volumnu. Računati je potrebno po posameznih stolpcih od zgoraj navzdol. Na

vseh stičnih ploskvah s sosednjimi celicami je upoštevana advekcija in disperzija, med zgornjimi in spodnjimi celicami pa tudi usedanje. Količino lebdečih plavin v celici ob dnu primerjamo z maso, izračunano iz razlike empirično določene ravnotežne koncentracije C_{ae} in koncentracije v isti celici v prejšnjem časovnem koraku. Ko je takšna ravnotežna koncentracija presežena se pojavi usedanje lebdečih plavin. Ko koncentracija ni presežena pa se iz dna resuspendira tolikšna količina sedimenta, da je v celici dosežena ravnotežna koncentracija.

Enačbe in postopki upoštevanja vpliva advekcije, mase vtoka/iztoka, vpliv disperzije in vpliv usedanja delcev so podrobneje opisani v literaturi Žagar (1999).

Masa plavin, ki prehaja iz obravnavane celice v zadnjem časovnem koraku v celico pod njo zaradi usedanja delcev izračunamo kot (Žagar, 1999):

$$M_b^s = C_0 \cdot V_{cell} + M_W^a - M_E^a + M_S^a - M_N^a + M_B^a - M_T^a + M_W^d - M_E^d + M_S^d - M_N^d - M_T^d + M_B^d + M_T^s \quad (44)$$

kjer je:

C_0	koncentracija v celici v prejšnjem časovnem koraku
V_{cell}	volumen obravnavane celice
M_i^a	vpliv advekcije
M_i^d	vpliv disperzije
M_T^s	vpliv usedanja delcev iz celice nad obravnavano celico
W, E, S, N	smeri (W - zahod, E - vzhod, S - jug, N - sever)
B	spodaj (bottom)
T	zgoraj (top)

Masa plavin v posamezni celici ob dnu, izračunana iz ravnotežne koncentracije ob dnu, znaša (Žagar, 1999):

$$M^e = C_{ae} \cdot V_{cell} \quad (45)$$

kjer je:

C_{ae} izračunana ravnotežna koncentracija v celici

Žagar (1999) piše naprej, da je masa resuspendiranega oz. odloženega materiala enaka razliki ($M^e - M_b^s$), izračunani v celici ob dnu.

Debelino erozije oz. nanosa v obravnavani celici v posameznem časovnem koraku pa izračunamo po enačbi (Žagar, 1999):

$$E_r = \frac{M^e - M_b^s}{\rho_s \cdot A \cdot k_{por}} \quad (46)$$

kjer je:

ρ_s gostota plavin

A tlorisna površina obravnavane celice

K_{por} koeficient poroznosti oziroma zbitosti

V enačbi (46) pozitiven predznak predstavlja erozijo, negativen pa nanos materiala.

4 KRITIČNE PRIDNE NE STRIŽNE NAPETOSTI PRI KOHEZIVNIH SEDIMENTIH

4.1 Kritične pridne ne strižne napetosti za odlaganje materiala ($\tau_{cr,d}$)

Van Rijn (1993) piše, da glede na eksperimentalno delo Mehte in Partheniadesa (1975) poznamo dve kritični pridne ne strižni napetosti za odlaganje in sicer, $\tau_{d,full}$ in $\tau_{d,part}$. Minimalna pridne ne strižna napetost za polno usedanje $\tau_{d,full}$ je definirana kot pridne ne strižna napetost pri kateri se odlagajo vsi kosmi sedimenta. $\tau_{d,part}$ pa je tako velika napetost da se, ko je le-te presežena, kosmi sploh ne odlagajo. Za vmesne vrednosti med $\tau_{d,full}$ in $\tau_{d,part}$ velja, da prihaja do delnega odlaganja materiala oz. različne stopnje odlaganja. Obe vrednosti, kot je zapisal Van Rijn (1993), so eksperimentalno določili Mehta (1984) ter Winterwerp in sod. (1991). Prikazane so v Preglednici 2.

Preglednica 2: Kritične pridne ne strižne napetosti za odlaganje materiala (Van Rijn, 1993, str. 11.21)

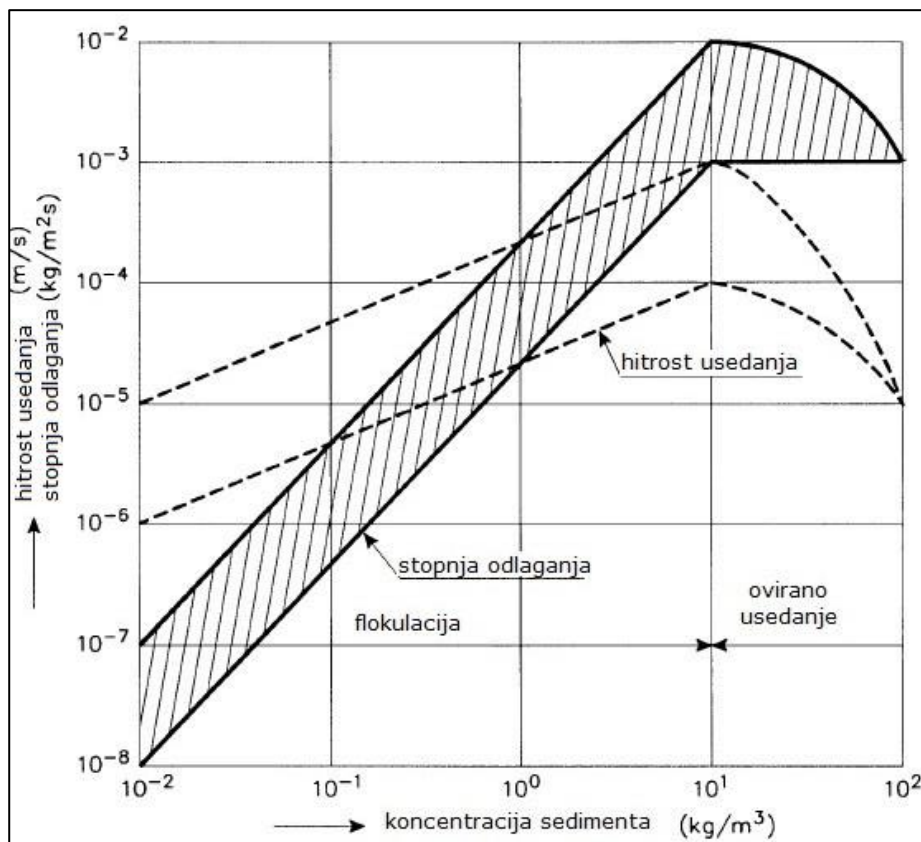
Izvor materiala	Delež peska (%)	Organski delež (%)	Kritične pridne ne strižne napetosti (N/m ²)	
			$\tau_{d,full}$	$\tau_{d,part}$
Kaolinit (slan)	-	-	0.05	-
Kaolinit (destiliran)	-	-	0.15	1.4
Hollands Diep 1 (jezero)	9	10	0.10	-
Hollands Diep 2 (jezero)	23	9	0.08	-
Ketelmeer (jezero)	7	12	0.08	-
Biesbosch (jezero)	8	8	0.04	-
Maas (reka)	36	8	0.06	-
pristanišče Breskens (estuarij)	27	5	0.06	-
pristanišče Delfzijl (estuarij)	60	2	0.03	-
Loswal Noord (morje)	69	2	0.08	-
San Francisco Bay	-	-	0.10	1.7

Maracaibo estuarij	-	-	0.08	1.6
--------------------	---	---	------	-----

Iz vrednosti podanih v preglednici 2 je mogoče sklepati le to, da so vrednosti kritičnih strižnih napetosti le malo odvisne od podanih parametrov (deleža peska in organskega materiala) in da je pri glinah zelo pomembno, ali se nahajajo v slani ali neslani vodi. Sklepamo tudi, da ima presejna krivulja, torej karakteristične vrednosti premerov zrn, prav tako majhen vpliv na kritične strižne napetosti. Za izračun $\tau_{d,full}$ in $\tau_{d,part}$ so nedvomno potrebne meritve drugih parametrov, kar močno otežuje zastavljeno diplomsko nalogo, saj se material dna običajno opiše s presejno krivuljo in vsebnostjo peska, melja, glin in organskega materiala, le redko pa so na razpolago še drugi merjeni parametri.

Že prej smo zapisali, da so stopnje odlaganja med $\tau_{d,full}$ in $\tau_{d,part}$ različne. Maksimalna stopnja odlaganja je $D_{max} = cw_{s,m}$, nastopi pri kompliciranih pogojih, povezanih s ciklom plimovanja. V enačbi D_{max} predstavlja največje možno odlaganje, c globinsko povprečeno koncentracijo, $w_{s,m}$ pa hitrost usedanja. Slika 4 prikazuje maksimalno stopnjo odlaganja kot funkcijo koncentracije pri hitrosti usedanja od 10^{-6} do 10^{-3} m/s. Iz slike je razvidno, da je najvišja stopnja odlaganja dosežena pri koncentraciji približno 10 kg/m^3 . Pri večjih pretočnih hitrostih se stopnja odlaganja zmanjša

zaradi turbulence in posledično dobimo manjše hitrosti usedanja.



Slika 3: Stopnja odlaganja v odvisnosti od koncentracije (Van Rijn, 1993, str. 11.22)

Winterwerp in Van Kesteren (2004) sta ugotovila, da je usedanje mogoče opisati z izrazom (Van Rijn, 2006):

$$\frac{d(hc)}{dt} = -\alpha w_s c \quad (47)$$

kjer je:

- c globinsko povprečena koncentracija
- h globina vode
- w_s hitrost usedanja
- α delež kosmov, ki niso sposobni vzdržati visokih strižnih napetosti

Kosmi, ki niso sposobni ostati skupaj ob visokih strižnih napetostih razpadejo na manjše frakcije, ki nato resuspendirajo. Van Rijn (2006) označi to frakcijo, kot α in zapiše enačbo:

$$\alpha = 1 - \tau_b / \tau_{cr,d} \quad (48)$$

kjer je:

$\tau_{cr,d}$ kritična pridnen strižna napetost zaradi odlaganja

τ_b strižna napetost zaradi valovanja

Za τ_b velja, da mora biti manjši od $\tau_{cr,d}$, da pride do celotnega usedanja materiala.

4.2 Kritične erozijske pridnene strižne napetosti (τ_e)

Delci sedimenta, kosmi ali kepe na dnu ter tekoč muljast sloj, bodo začeli erodirati, če bo dejanska pridnena strižna napetost (τ_b) presegla vrednost kritične erozijske strižne napetosti (τ_e). Kdaj pride do tega je odvisno od karakteristik materiala iz katerega je sestavljeno dno (mineralna sestava, vsebnost organskih materialov, slanost, gostota itd.) in strukture dna. Eksperimentalno delo kaže, da je kritična erozijska pridnena strižna napetost močno odvisna od zgodovine odlaganja in konsolidacije (Van Rijn, 1993).

Van Rijn (1993) je zapisal, da glede na eksperimentalno delo velja: $\tau_e > \tau_{d,full}$, kar pomeni, da je kritična erozijska pridnena strižna napetost večja od kritične pridnene strižne napetosti za popolno odlaganje. Enako velja, če primerjamo kritično pridneno strižno napetost s kritično pridneno strižno napetostjo za delno odlaganje.

Veljata torej dve enačbi (Van Rijn, 1993):

$$\tau_e > \tau_{d,full} \quad (49)$$

$$\tau_e \leq \tau_{d,part} \text{ ali } > \tau_{d,part} \quad \text{odvisno od zgodovine odlaganja} \quad (50)$$

Vrednost τ_e mora biti določena na podlagi laboratorijskih testov, pri katerih se uporabljajo naravna blata, ali iz rezultatov in-situ terenskih preiskav.

Van Rijn (1993) piše, da poznamo različne tipe erozije. Poznamo površinsko erozijo, ki predstavlja erozijo delcev oz. kosmov, ter globinsko erozijo, do katere pride zaradi nepravilnosti znotraj tal.

Podobno, kot za kritične pridnene napetosti odlaganja materiala (τ_d), obstajajo preglednice tudi za kritične erozijske pridnene strižne napetosti (τ_e). Preglednici 3 in 4 sta povzeti po literaturi (van Rijn, 1993):

Preglednica 3: Kritične erozijske strižne napetosti za površinsko in globinsko erozijo, za čas koncentracije od 1 dan do 7 dni (Van Rijn, 1993, str. 11.33)

Izvor materiala	Delež peska (%)	Organški delež (%)	$\tau_e =$ kritične erozijske pridnene strižne napetosti $\left(\frac{N}{m^2}\right)$					
			Površinska erozija zgornjega sloja		Erozija spodnjih slojev		Globinska erozija spodnjih slojev (porušitev dna)	
			1 dan	7 dni	1 dan	≥ 7 dni	1 dan	≥ 7 dni
Kaolinit (slan)	0	0	0.08	0.08	0.15	0.15	0.25	0.25
Hollands Diep 1 (jezero)	9	10	0.20	0.35	0.45	0.55	0.65	≥ 0.65
Hollands Diep 2 (jezero)	23	9	0.20	0.30	0.45	0.50	0.75	0.75
Ketelmeer (jezero)	7	12	0.15	0.20	0.30	0.35	0.55	≥ 0.55
Biesbosch (jezero)	8	8	0.15	0.25	0.30	0.40	0.60	0.60
Maas (reka)	36	8	0.20	0.35	0.45	0.55	≥ 0.55	≥ 0.65
pristanišče Breskens (estuarij)	27	5	0.20	-	0.40	-	≥ 0.60	-
pristanišče Delfzijl (estuarij)	60	2	0.10	0.20	0.20	0.40	0.40	≥ 0.50
Loswal Noord (morje)	69	2	0.25	0.30	0.40	0.45	0.60	0.60

Preglednica 4: Kritične erozijske strižne napetosti za različne koncentracije sedimenta (suhe gostote) (Van Rijn, 1993, str. 11.33)

Izvor materiala	Delež peska (%)	Organški delež (%)	$\tau_e =$ kritične erozijske pridnene strižne napetosti $\left(\frac{N}{m^2}\right)$				
			$c = 100$ (kg/m ³)	$C = 150$ (kg/m ³)	$c = 200$ (kg/m ³)	$c = 250$ (kg/m ³)	$c = 300$ (kg/m ³)
Kaolinit (slan)	0	0	-	0.05-0.10	0.30-0.40	-	-
Kaolinit (destiliran)	0	0	-	0.05-0.10	0.15-0.20	0.20-0.25	0.25-0.30
Hollands Diep 1 (jezero)	9	10	0.15-0.25	0.30-0.40	0.40-0.50	0.60-0.80	-
Hollands Diep 2 (jezero)	23	9	0.15-0.25	0.30-0.40	0.40-0.50	0.80-1.00	-
Ketelmeer (jezero)	7	12	0.10-0.20	0.20-0.25	0.25-0.35	0.50-0.70	-
Biesbosch (jezero)	8	8	0.20-0.25	0.25-0.30	0.30-0.35	0.50-0.70	-
Maas (reka)	36	8	0.15-0.30	0.30-0.40	0.40-0.50	0.80-1.00	-
pristanišče Breskens (estuarij)	27	5	0.15-0.25	0.25-0.35	0.35-0.45	0.60-0.80	-
pristanišče Delfzijl (estuarij)	60	2	0.05-0.15	0.15-0.20	0.20-0.25	0.40-0.60	-
Loswal Noord (morje)	69	2	0.20-0.30	0.30-0.35	0.35-0.45	0.60-0.80	-
Brisbane, Grangemouth, Belawan	0	-	0.20-0.30	0.40-0.60	0.80-1.00	-	-
Loire	-	-	0.10-0.15	0.15-0.20	0.20-0.30	0.30-0.40	0.80-1.20
Cardif Bay	-	-	0.20-0.30	0.40-0.50	0.60-0.70	0.70-0.90	-

Tudi iz preglednic 3 in 4 nam ni uspelo najti močne povezave med podanimi parametri in kritičnimi strižnimi napetostmi. Zelo verjetno je potrebno poiskati druge parametre, iz katerih bi se dalo določiti kritične strižne napetosti za različne materiale. Konsolidacija ponekod prispeva veliko, drugod malo, tudi vpliv koncentracije je vse prej kot enoličen in enostaven za posplošitve in zapis ustreznih enačb, ki bi jih lahko uporabili v modelu PCFLOW3D.

4.3 Kritične pridnene strižne napetosti za mešanice gline, melja in peska

Van Rijn (1993) je zapisal, da sta Migniot (1968) in Otsubo-Maraoko (1988) našla povezavo med kritičnimi erozijskimi pridnenimi napetostmi (τ_e) in skupnimi strižnimi napetostmi (τ_y) za kohezivne sedimente. Na podlagi rezultatov preiskav in številnih eksperimentov, sta zapisala naslednjo povezavo: $\tau_{e,1} = 0.27\tau_y^{0.56}$ in $\tau_{e,2} = 0.79\tau_y^{0.94}$. Za določitev vrednosti τ_y se uporablja roto-viskozimeter, $\tau_{e,1}$ so vrednosti velikosti 0.05-0.5 N/m² in vrednosti $\tau_{e,2}$ se gibljejo med 0.1 in 1 N/m². Tudi iz teh povezav brez dodatnih preiskav materiala v roto-viskozimetru ni mogoče pridobiti podatkov in zakonitosti, s katerimi bi lahko nadgradili model PCFLOW3D z enačbami za kohezivne materiale.

Van Rijn (2013) zapiše še dve dodatni enačbi za kritične pridnene strižne napetosti za drobnozrnate sedimente:

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{clay})^3 \left(\frac{c_{gel}}{c_{gel,s}} \right) \left(\frac{d_{sand}}{d_{50}} \right)^\gamma \tau_{cr,0} \quad \text{za delce} < 62 \mu\text{m (gline)} \quad (51)$$

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{clay})^3 \tau_{cr,0} \quad \text{za delce} \geq 62 \mu\text{m (peski)} \quad (52)$$

kjer je:

p_{clay} delež vsebnosti gline

c_{gel} delež materiala na dnu, ki je prešel v obliko gela

$c_{gel,s}$ največji možni delež, ki lahko preide v gel (oz. delež trdne snovi v dnu)

γ koeficient, ki se določa z umerjanjem (med 1 in 2)

c_{gel} , se izračuna po naslednji enačbi (Van Rijn, 2013):

$$c_{gel} = \left(\frac{d_{50}}{d_{sand}} \right) c_{gel,s} \quad \text{za } d_{50} < 62 \mu\text{m} \quad (53)$$

$c_{gel,s}$ pa ima vrednost določeno z enačbo (Van Rijn, 2013):

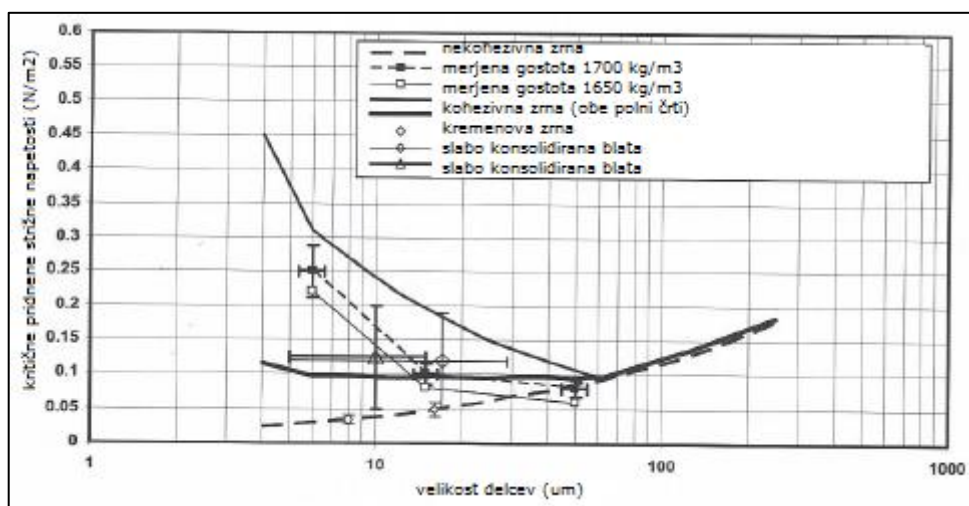
$$c_{gel,s} = 1 - \eta, \quad \eta = \text{poroznost} = 0.35 \quad (54)$$

Za izračun potrebujemo še d_{sand} , ki pa je: $d_{sand} = 62 \mu\text{m}$ ($\Phi_{cohesive} = 1$ za $d_{50} \geq 62 \mu\text{m}$), ter delež gline (p_{clay}), ki ga dobimo iz granulometrične analize sedimenta. (Van Rijn, 2013).

Enačbi (51) in (52) predstavljata nove kritične pridnene strižne napetosti in zajemata učinke, ki se pojavijo, ko se v materialu začne erozija. Eden teh učinkov je povezovanje, do katerega pride pri

delcih večjih od $62\ \mu\text{m}$, ko pozitivno nabiti delci glinice »obložijo« delec npr. kremenca. Vpliv na erozijo ima tudi vsebnost organskih delcev. Ob prisotnosti le teh se dno lahko cementira. Do takega pojava pa lahko pride tudi ob prisotnosti izločkov kremenastih alg in/ali bakterij (Van Rijn, 2013).

Na sliki Sliki 4 je prikazana enačba (51) za $\gamma = 2$ in $\gamma = 1.5$ ($p_{clay} = 0$, brez glinenih oblog). Koeficient γ je po definiciji med 1 in 2, določa pa se z umerjanjem. Van Rijn (2013) je zapisal, da na podlagi eksperimentov, lahko zmeraj uporabimo 1,5 in nam enačba (51) daje zadovoljive rezultate. Občutljivostna analiza, ki smo jo izvedli, je prikazana na Sliki 8. Pokazali smo, da je enačba zelo občutljiva na parameter γ , saj se rezultati znatno razlikujejo, če parameter spreminjamo med 1 in 2. Glede na rezultate enačbe (51) ima za vse slabo konsolidirane drobnozrnate sedimente kritična pridnena strižna napetost približno konstantno vrednost $\tau_{cr} = 0.1\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$. To velja za sedimente z delci reda velikosti od 8 do $62\ \mu\text{m}$. Maksimalna vrednost τ_{cr} in $\tau_{cr,0}$ je dosežena za sedimente reda velikosti pod $10\ \mu\text{m}$ (Van Rijn, 2013).



Slika 4: Učinek kohezivnih sil na kritične pridnene strižne napetosti za dna iz kohezivnih materialov (Van Rijn, 2013, str. 11.66)

Vpliv glinice, ki prekrije plast sedimenta je še zelo nejasen. Van Rijn (2013) piše, da so Barry in sod. (2006) zaradi učinka glinice dobili včasih manjše včasih pa večje kritične strižne napetosti. Zato je nedvomno potrebnih še veliko raziskav za določitev točnih enačb za kritične pridnene strižne napetosti kohezivnih sedimentov (Van Rijn, 2013).

Če vstavimo v enačbo (51) enačbo (53) dobimo:

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{clay})^3 \left(\frac{d_{50}}{d_{sand}} \right) \left(\frac{d_{sand}}{d_{50}} \right)^Y \tau_{cr,0} \quad (55)$$

Enačbo se da skrčiti v zadnjo obliko:

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{clay})^3 \left(\frac{d_{sand}}{d_{50}} \right)^{(-\gamma-1)} \tau_{cr,0} \quad (56)$$

Enačbo (51) se da torej poenostaviti do te stopnje, da za račun ne potrebujemo podatka o poroznosti. Ugotovili smo torej, da je kritična pridnena strižna napetost odvisna samo od deleža vsebnosti gline (p_{clay}) in srednjega premera zrn (d_{50}). Van Rijn (2013) je enačbo (51) iz nam neznanih razlogov pustil v osnovni obliki, brez poenostavitev.

Po vseh izvedenih raziskavah enačb razumemo, da za račun procesov nekohezivnih sedimentov potrebujemo druge parametre, kot za račun kohezivnih. Za nekohezivne sedimente je potrebno narediti sejnalno analizo in iz te dobiti granulometrično sestavo sedimenta. Za kohezivne sedimente pa moramo poznati Atterbergove meje plastičnosti in židkosti, ki jih izmerimo npr. v roto-viskozimetru.

Ne glede na to, da je opisani postopek (enačbe 51-54) razmeroma slabo raziskan, je edini, ki omogoča preverjanje doslej uporabljenih enačb v modelu PCFLOW3D, saj so za izračune potrebni izključno parametri, ki so na razpolago pri »običajnih« meritev. Zato smo za preizkus enačb v modelu in primerjavo med enačbami za kohezivne in nekohezivne sedimente izbrali prav to metodo.

V enačbah (51) in (52) nastopajo parametri, ki jih je običajno mogoče dobiti pri granulometričnih preiskavah in so nujno potrebni tako za račun kritične pridnene strižne napetosti pri kohezivnih kot tudi nekohezivnih sedimentih. Na ta način je možna primerjava računov kritičnih strižnih napetosti za obe vrsti sedimenta. Iz primerjave lahko sledi tudi ocena napake, ki se je doslej pojavljala v simulacijah, saj vgrajene enačbe niso upoštevale procesov značilnih za kohezivne sedimente.

Na razpolago smo imeli podatke o sedimentu, merjene na območju Koprškega zaliva, ki so zajemali granulometrično sestavo petih vzorcev, prav tako pa tudi vsebnost glin, meljev in peska (Malačič in sod., 2009). Podatki so v preglednici 1, v poglavju 2.4 Podatki.

5 REZULTATI IN DISKUSIJA

5.1 Metoda za nekohezivne sedimente

Za račun kritične pridnene strižne napetosti je najprej potrebno izračunati parameter zrna D_* , enačba (38). Za to moramo še prej določiti relativno gostoto delcev plavin (s_s), ki se določi kot razmerje gostot plavin in vode.

$$s_s = \frac{\rho}{\rho_v} \quad (57)$$

Relativna gostota plavin je v našem primeru $s_s = 2,524$. Kinemtična viskoznost vode ν_k pa znaša $1,4 \cdot 10^{-6}$.

Ko imamo parameter zrna D_* , lahko izračunamo parameter mobilnosti θ_c , ki je odvisen od premera zrna D_* . Izberemo enačbo (39). Sledi račun kritične strižne hitrosti $u_{*,cr}$, s katero lahko potem izračunamo kritično pridneno strižno napetost $\tau_{cr,0}$.

$$u_{*,cr} = \sqrt{\frac{\tau_{cr,0}}{\rho}} \rightarrow \tau_{cr,0} = u_{*,cr}^2 * \rho \quad (58)$$

Kritične pridnene strižne napetosti izračunane po enačbah za nekohezivne sedimente so prikazane v preglednici 5.

Preglednica 5: Kritične pridnene strižne napetosti [N/m^2] za posamezni vzorec izračunane po metodi za nekohezivne sedimente

Vzorec	D_*	θ_c	$u_{*,cr}$	$\tau_{cr,0}$
A	0,338634995	0,7087277	0,0126081	0,413309557
B	0,126423731	1,8983778	0,0126081	0,413309557
C	0,146741831	1,6355	0,0126081	0,413309557
D	0,158029664	1,5187022	0,0126081	0,413309557
E	0,162544798	1,476516	0,0126081	0,413309557

Iz vrednosti v preglednici 5 je razvidno, da dobimo za vse vzorce enake kritične pridnene strižne napetosti. Srednji premer zrna pri večini vzorcev med $5,5$ in $7,7 \mu\text{m}$. Odstopa le vzorec A, katerega srednji premer zrna znaša $15 \mu\text{m}$. Zato dobimo enake že vrednosti kritičnih strižnih hitrosti ob dnu. Enako bi veljalo za ostale drobnozrnate sedimente, saj na tem mestu vidimo, da enačbe niso primerne za tako drobne materiale, kot sta melj in glina. Empirične enačbe od (37) do (43), ki so vgrajene v model PCFLOW3D torej niso dovolj natančne, da bi upoštevale razlike zelo majhnih srednjih premerov, ki se pojavljajo v takih materialih, saj se razlike pri računu v enačbah izničijo.

5.2 Metoda za kohezivne sedimente

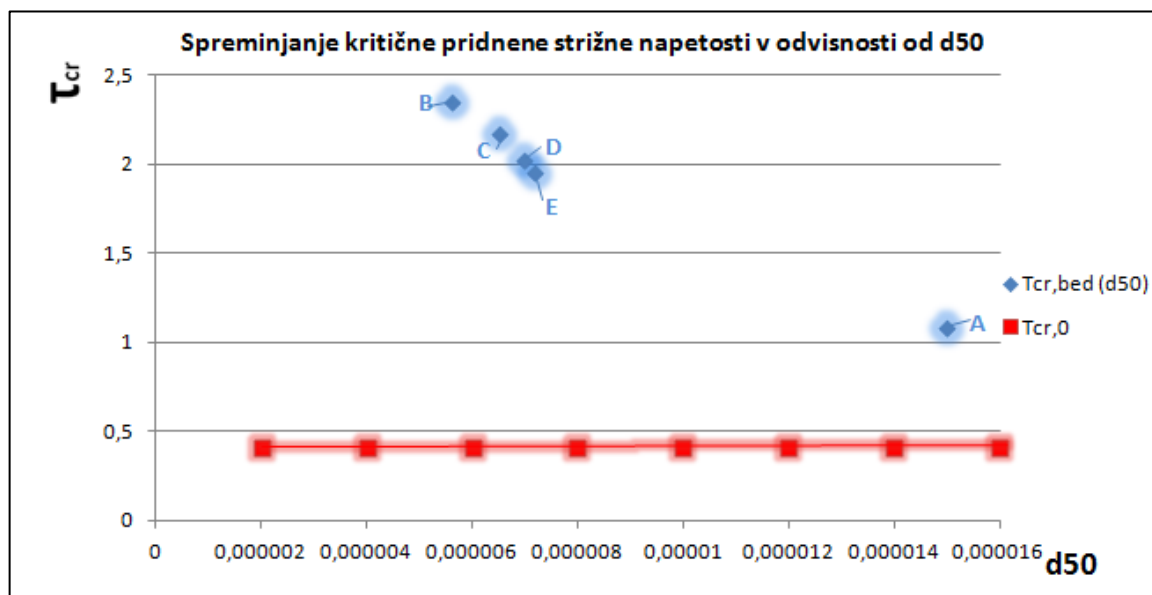
Pri računu po metodi za kohezivne sedimente smo računali po enačbi (51) oz. poenostavljeni enačbi (55). Ugotovili smo, da je kritična pridnena strižna napetost odvisna samo od deleža vsebnosti gline (p_{clay}) in srednjega premera zrn (d_{50}). V preglednici 6 so prikazane izračunane vrednosti, pri katerih smo v računu za koeficient γ uporabili vrednost 1,5.

Preglednica 6: Kritične pridnene strižne napetosti po metodi za kohezivne sedimente

Vzorec	D_{50}	Glina [%]	$\tau_{cr,0}$	Faktor povečanja τ_{cr}	$\tau_{cr,bed}$
A	0,000015	9	0,4133096	2,63287178	1,088191
B	0,0000056	19,6	0,4133096	5,69239948	2,352723
C	0,0000065	19,4	0,4133096	5,25717152	2,172839
D	0,000007	18	0,4133096	4,88981971	2,021009
E	0,0000072	17,3	0,4133096	4,7361302	1,957488

Iz preglednice 6 lahko razberemo, za kakšen faktor se poveča kritična pridnena strižna napetost, če uporabljamo enačbe namenjene kohezivnim sedimentom. Vidimo, da so rezultati lahko tudi petkrat večji, zato lahko zapišemo, da model PCFLOW3D z vgrajenimi enačbami za nekohezivne sedimente **ne daje pravih rezultatov**, če računamo kritične pridnene strižne napetosti kohezivnih sedimentov. Po enačbi (51) torej izračunamo faktor, s katerim potem pomnožimo $\tau_{cr,0}$, ki ga dobimo iz enačb za nekohezivne sedimente (prvotna strižna napetost) in dobimo strižno napetost $\tau_{cr,bed}$ z upoštevanjem značilnosti kohezivnih sedimentov. Pomembno je, da se zavedamo, da tega faktorja ne moremo enostavno izračunati posebej, saj sta $\tau_{cr,0}$ in $\tau_{cr,bed}$ odvisna od istih parametrov.

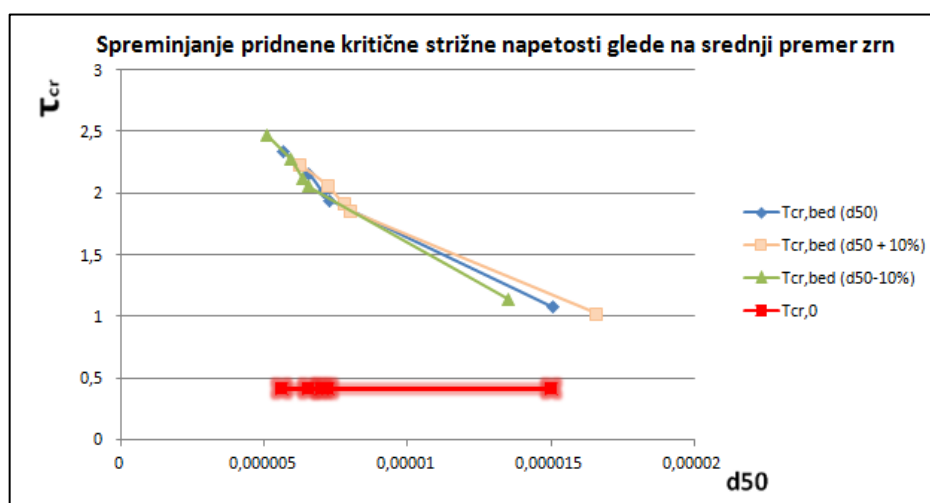
Na sliki 5 je prikazano spreminjanje kritične pridnene strižne napetosti v odvisnosti od D_{50} , hkrati pa je podan še $\tau_{cr,0}$ za lažjo predstavo o odstopanju med metodama.



Slika 5: Spreminjanje kritične pridnene strižne napetosti v odvisnosti od srednjega premera zrn

5.3 Občutljivostna analiza enačbe (55)

Občutljivostno analizo smo izvedli glede na tri dejavnike in sicer glede na srednji premer zrn, delež vsebnosti gline in koeficient γ , z namenom, da preverimo koliko je enačba občutljiva na pravilno podajanje parametrov. Srednji premer zrn in delež vsebnosti gline smo spreminjali za $\pm 10\%$ pri enaki granulometrični sestavi. Koeficient γ smo preverili za vrednosti 1, 1,5 in 2.



Slika 6: Spreminjanje pridnene kritične strižne napetosti glede na srednji premer zrn

Na sliki 6 so prikazani rezultati iz preglednice 7. Srednji premer zrn smo povečali in zmanjšali za 10%. Enačba je razmeroma malo občutljiva na srednji premer zrna, saj se kritične strižne napetosti ne spremenijo bistveno pri posameznih izračunih. Vidimo, da so pri vseh srednjih premerih zrn majhne

razlike v izračunanih pridnenih strižnih napetostih. Podatki in rezultati občutljivostne analize za srednji premer zrn so prikazani tudi v preglednici 7.

Preglednica 7: Občutljivostna analiza za srednji premer zrn

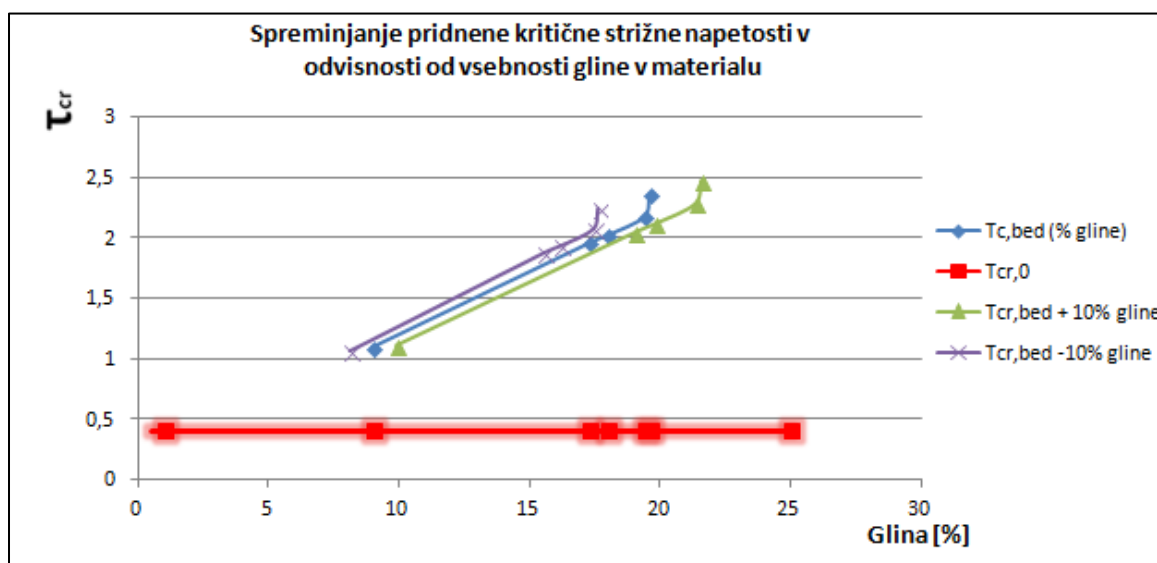
Vzorec	D_{50}	$\tau_{cr,bed}$	$\tau_{cr,0}$	$D_{50}+10\%$	$\tau_{cr,bed}+$	$D_{50}-10\%$	$\tau_{cr,bed}-$
A	0,000015	1,088191	0,413309557	0,0000165	1,03754947	0,0000135	1,1470541
B	5,6E-06	2,352723	0,413309557	0,00000616	2,24323346	0,00000504	2,47998791
C	6,5E-06	2,172839	0,413309557	0,00000715	2,07172092	0,00000585	2,29037365
D	0,000007	2,021009	0,413309557	0,0000077	1,92695668	0,0000063	2,13033076
E	7,2E-06	1,957488	0,413309557	0,00000792	1,86639146	0,00000648	2,06337339

V preglednici 8 prikazujemo občutljivostno analizo za delež vsebnosti gline. Delež gline smo najprej povečali za 10% in nato zmanjšali za 10%.

Preglednica 8: Občutljivostna analiza za delež vsebnosti gline

Vzorec	Glina [%]	$\tau_{cr,bed}$	$\tau_{cr,0}$	Glina+10%	$\tau_{cr,bed}+$	Glina-10%	$\tau_{cr,bed}-$
A	9	1,088191	0,413309557	9,9	1,11536944	8,1	1,06145783
B	19,6	2,352723	0,413309557	21,56	2,47029803	17,64	2,23893933
C	19,4	2,172839	0,413309557	21,34	2,28048167	17,46	2,0686385
D	18	2,021009	0,413309557	19,8	2,11491407	16,2	1,929926
E	17,3	1,957488	0,413309557	19,03	2,0453816	15,57	1,87214889

Iz rezultatov vidimo, da je tudi na ta parameter enačba precej neobčutljiva, saj se tudi tukaj vrednosti kritičnih strižnih napetosti med seboj ne razlikujejo veliko. Kot je bilo pričakovano, se $\tau_{cr,0}$ zviša, če povečamo delež gline in zniža, če ga zmanjšamo. Rezultati so prikazani na sliki 7.



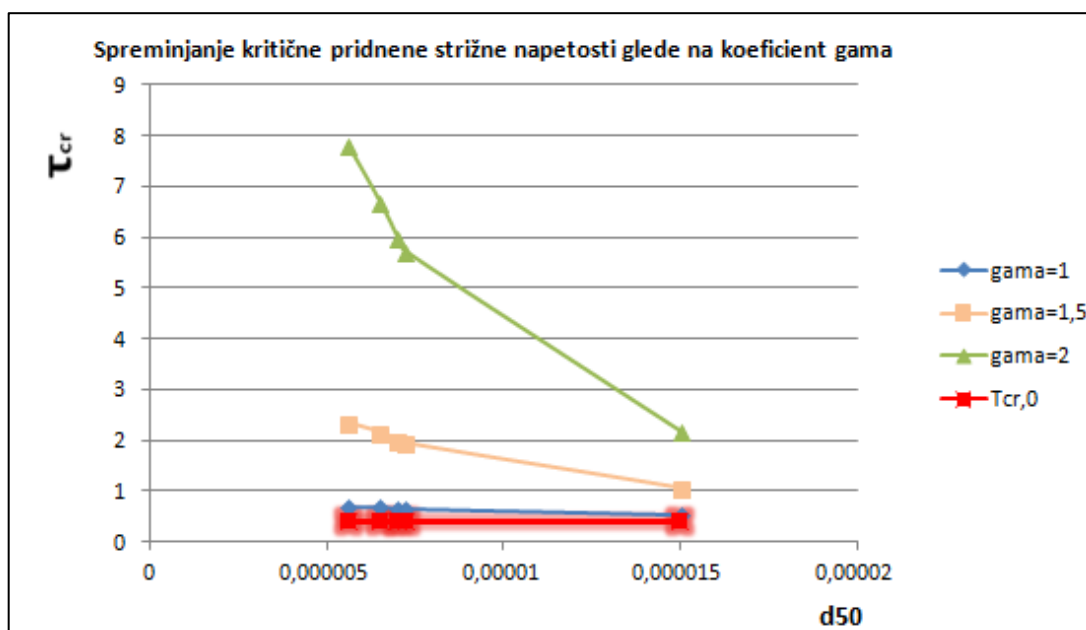
Slika 7: Spreminjanje pridnene kritične strižne napetosti v odvisnosti od vsebnosti gline v materialu

V zadnjem delu občutljivostne analize smo raziskali še vpliv eksponenta γ , ki se določa z umerjanjem. Iz slike 8 in preglednice 9 je razvidno, da z njegovim spreminjanjem lahko dobimo zelo različne rezultate. Van Rijn (2013) piše, da lahko na podlagi eksperimentalnih del vzamemo za račun vrednost 1,5 in dobimo zadovoljive rezultate. Rezultati, ki smo jih dobili, so bili pričakovani. Za $\gamma=1$ smo dobili najmanjše dejanske pridnene kritične strižne napetosti, ki so blizu $\tau_{cr,0}$, ter za vrednost $\gamma=2$ največje. Vidimo tudi, da napetosti s povečevanjem γ občutno naraščajo, saj je γ eksponent v enačbi (55).

V preglednici 9 prikazane kritične pridnene strižne napetosti za različne vrednosti eksponenta γ pa kažejo tudi, da je enačba na ta parameter zelo občutljiva in je zato dobro umerjanje enačbe na dejanskih podatkih velikega pomena. Rezultati, ki jih prikazujemo na sliki 5 in v preglednici 6, lahko torej, odvisno od pravilno izbranega eksponenta γ , odstopajo od vrednosti izračunanih z modelom PCFLOW3D le malo ali pa zelo veliko.

Preglednica 9: Spreminjanje kritične pridnene strižne napetosti glede na koeficient gama

	$\gamma=1$	$\gamma=1,5$	$\gamma=2$	
Vzorec	$\tau_{cr,bed}$	$\tau_{cr,bed}$	$\tau_{cr,bed}$	$\tau_{cr,0}$
A	0,5352479	1,088191067	2,2123578	0,41330956
B	0,7070807	2,352723105	7,8283935	0,41330956
C	0,7035394	2,172839232	6,7106836	0,41330956
D	0,6790808	2,021009216	6,0147159	0,41330956
E	0,667067	1,957487873	5,7441884	0,41330956



Slika 8: Spreminjanje kritične pridnene strižne napetosti glede na koeficient γ

Na slikah 5 do 8 je povsod prikazan tudi $\tau_{cr,0}$ z namenom, da poudarimo, koliko se dejanske pridnene strižne napetosti razlikujejo od prvotne strižne napetosti, ki jo dobimo z računom po enačbah modela PCFLOW3D.

6 ZAKLJUČKI

Obstoječi model PCFLOW3D ima vgrajene enačbe za nekohezivne sedimente. V diplomski nalogi smo pokazali, da to ni dovolj za pravilne rezultate simulacij na območjih s kohezivnimi sedimenti. Pri slednjih se ob transportu pojavljajo drugačni procesi in za račun teh procesov potrebujemo druge enačbe in druge vhodne parametre za model. Za nekohezivne sedimente zadošča sejalna analiza in iz nje pridobljena granulometrična sestava sedimenta. Za kohezivne sedimente pa moramo poznati Atterbergove meje plastičnosti in židkosti, ki so osnovna oblika klasifikacije kohezivnih sedimentov.

S podatki iz Koprškega zaliva smo preverili enačbe vgrajene v sedimentacijski modul modela PCFLOW3D in za vse vzorce dobili enake kritične pridnene strižne napetosti. S tem smo prišli do zaključka, da te enačbe niso ustrezne za tovrstni sediment, saj ne zajamejo vpliva razlik zelo majhnih srednjih premerov, ki se pojavljajo pri kohezivnih sedimentih. Med številnimi enačbami, ki upoštevajo lastnosti kohezivnega sedimenta smo izbrali dve enačbi za račun kritičnih pridnenih strižnih napetosti za drobnozrnate sedimente. Kljub temu, da je postopek računa razmeroma slabo utemeljen, je edini, ki nam omogoča preverjanje doslej uporabljenih enačb v modelu PCFLOW3D, saj le v teh enačbah nastopajo parametri, ki jih običajno dobimo pri granulometričnih preiskavah in so bili na voljo. Po primerjavi rezultatov smo lahko ocenili napako v dosedanjih simulacijah. Izračunane kritične strižne napetosti so bile do petkrat višje od napetosti izračunanih po metodah za nekohezivne sedimente, zato lahko zapišemo, da model PCFLOW3D z vgrajenimi enačbami za nekohezivne sedimente **ne daje pravih rezultatov** na območjih s kohezivnimi sedimenti.

Na uporabljeni enačbi, ki upošteva kohezijo v sedimentu smo izvedli tudi občutljivostno analizo glede na srednji premer zrn, delež vsebnosti gline in koeficient γ . Ugotovili smo, da je enačba razmeroma malo občutljiva na srednji premer zrn in na spreminjanje deleža vsebnosti gline. S spreminjanjem vrednosti eksponenta γ pa lahko dobimo zelo različne rezultate. To pomeni, da je potrebno pred simulacijami model dobro umeriti, saj lahko v nasprotnem primeru dobimo zavajajoče rezultate.

Sedimentacijski modul modela PCFLOW3D je uporaben v hidrotehnični praksi, saj je z njim mogoče računati transport plavin v rekah, jezerih in morjih. Ker ne omogoča računa s kohezivnimi materiali, je njegova uporabnost omejena. Diplomaska naloga nakazuje možne izboljšave modela, saj osvetljuje nekatere procese, ki se pojavljajo pri kohezivnih sedimentih, izpostavlja razlike med enačbami in nakazuje, katere enačbe je potrebno vgraditi v model. Pri uporabljenih enačbah zadošča že en dodatni parameter. Z občutljivostno analizo pa smo uspeli opozoriti tudi na pomembnost umerjanja eksponenta γ . Z upoštevanjem teh ugotovitev in vgradnjo dodatnih enačb bo model PCFLOW3D lahko postal uporabno orodje tudi za račun procesov transporta na območjih kohezivnih sedimentov, s samo enim dodatnim merjenim parametrom.

7 VIRI

Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju (Three-dimensional mathematical baroclinic model for flow computation in lakes and the sea). Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Četina).

Dorić, E. 2008. Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D za simulacije hidrodinamike v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba E. Dorić): 75 str.

James, S.C., Jones, C.A., Grace, M.D., Roberts, J.D. 2010. Advances in sediment transport modelling. *Journal of Hydraulic research* 34, 4: 435-456.

Kolarič, M. 2013. Večfrakcijski pristop k modeliranju transporta plavin. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kolarič): 54 str.

Lin, B., Falconer, R.A. 1996. Numerical modelling of three-dimensional suspended sediment for estuarine and costal waters. *Journal of Hydraulic Research* 34, 4: 435-456.

Lin, B. 2013. A one-dimensional model of mixed cohesive and non-cohesive sediment transport in open chanel. *Journal of Hydraulic Research* 51, 5: 506- 517.

Malačič, V., Čermelj B., Bajt O., Ramšak A., Petelin B., Vodopivec M. 2009. Cirkulacija in okoljske razmere v Koprskem zalivu in Luki Koper. Interno fazno poročilo 3/113. Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja: 97 str.

Martinčič, U. 2011. Modeliranje izmenjave živega srebra med sedimentom in vodo v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Martinčič): 93 str.

Mihailovic, D.T. (ur.), Gualtieri, C. (ur.). 2010. Advances in enviromental fluid mechanics. Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd: 348 str.

Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 182 str.

Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2003. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. *Acta hydrotechnica* 20, 32.

<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/acta/> (Pridobljeno 1. 6. 2014.)

Partheniades, E. 2009. Cohesive Sediments in Open Channels: Properties, transport and applications. United States of America, Elsevier Inc: 346 str.

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

Ramšak, V. 2006. Simulacija izmenjave živega srebra med vodo in zrakom s 3-D modelom PFLOW3D v Tržaškem zalivu. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Ramšak): 120 str.

Ramšak, V. 2013. Numerično modeliranje tokov onesnažil med okoljskimi segmenti. Doktorska disertacija. = Numerical modelling of pollutant fluxes between environmental segments. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Ramšak): 190 str.

U.S. Department of the Interior. 2006. Erosion and Sedimentation manual. Denver, Colorado: Sedimentation and River Hydraulics Group.

Van Rijn, L. C. 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam Aqua publications.

Van Rijn, L.C. 2006. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas part II: Supplement (update 2006). Amsterdam, Aqua Publications.

Žagar, D. 1999. Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v tržaškem zalivu. Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Žagar): 101 str.

Žagar, D., Rajar R., Četina M. 1997. Tridimenzionalni model za račun transporta lebdečih plavin v površinskih vodah. Ljubljana. Acta Hydrotechnica 15/17:2.

Žagar, D., Ramšak, V., Petelin, B., Malačič, V. Sediment transport modelling in the Koper bay - Northern Adriatic Slovenia. V: IAHR 2nd European Congress Munich, 27.-29.6.2012. Munich: IAHR, 2012, str. 1-6, ilustr.

Žagar, D., Ramšak, V., Jeromel, M. in sod. 2014. Modelling sediment resuspension caused by navigation, waves and currents (Gulf of Trieste, Northern Adriatic). V: Almedia, A. (ur.). Water-engineering and research: proceedings of University of Porto, Porto, Portugalska, 2014: 1-9 str.

