

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 izvorna različica zaključnega dela.

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

Lovšin, G., 2014. Izdelava kart poplavne in erozijske nevarnosti z 2D hidravličnim modelom. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F., somentor Rak, G.): 50 str.

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:

Lovšin, G., 2014. Izdelava kart poplavne in erozijske nevarnosti z 2D hidravličnim modelom. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F., co-supervisor Rak, G.): 50 pp.

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 ŠTUDIJ
VODARSTVA IN
KOMUNALNEGA
INŽENIRSTVA

Kandidat:

GREGOR LOVŠIN

**IZDELAVA KART POPLAVNE IN EROZIJSKE
NEVARNOSTI Z 2D HIDRAVLIČNIM MODELOM**

Diplomska naloga št.: 221/VKI

**FLOOD AND EROSION HAZARD MAPS BASED ON 2D
HYDRAULIC MODEL**

Graduation thesis No.: 221/VKI

Mentor:
prof. dr. Franc Steinman

Predsednik komisije:
doc. dr. Dušan Žagar

Somentor:
asist. mag. Gašper Rak

Ljubljana, 28. 02. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU DELA

Podpisani **GREGOR LOVŠIN** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »**IZDELAVA KART POPLAVNE IN EROZIJSKE NEVARNOSTI Z 2D HIDRAVLIČNIM MODELOM**«

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 15. 2. 2013

Gregor Lovšin

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.166:912.43(043.2)
Avtor:	Gregor Lovšin
Mentor:	prof. dr. Franc Steinman
Somentor:	asist. mag. Gašper Rak
Naslov:	Izdelava kart poplavne in erozijske nevarnosti z 2D hidravličnim modelom
Tip dokumenta:	Diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema:	50 str., 11 pregl., 4 graf., 14 sl., 7 pril., 44 en.
Ključne besede:	GIS, CCHE2D, hidravlično modeliranje, LIDAR, transport sedimentov

Izvelek

Evropska unija je leta 2007 sprejela Poplavno direktivo, z namenom boljše ureditve razmer ob poplavah. Od držav članic Evropske unije se zahteva izdelava kart poplavne nevarnosti in kart poplavne ogroženosti. Za izpolnitev ciljev je bil v Sloveniji sprejet Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti. Nenadomestljivo orodje pri napovedovanju obsega poplav in kartiranju poplav predstavljajo dvodimenzionalni hidravlični modeli, ki so vedno bolj v uporabi. Ti za razliko od enodimenzionalnih modelov bolj natančno opišejo gibanje vode na poplavnih površinah. Na izdelavo kakovostnega hidravličnega modela vplivajo topografski podatki, robni pogoji in hrapavost površja. Bolj kot so zbrani podatki zanesljivi, natančnejši model lahko izdelamo. V diplomski nalogi je prikazana izdelava karte poplavne in erozijske nevarnosti na primeru odseka reke Schwarzaubach v Avstriji. Hidravlična analiza je bila izvedena z dvodimenzionalnim hidravličnim programom CCHE2D, ki poleg simulacije toka omogoča tudi račun transporta sedimentov.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 556.166:912.43(043.2)
Author: Gregor Lovšin
Supervisor: Prof. Franc Steinman, PhD.
Co-supervisor: Assist. Gašper Rak, M. Sc.
Title: Flood and erosion hazard maps based on 2D hydraulic model
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 50 p., 11 tab., 4 graph., 14 fig., 7 ann., 44 eq.
Key words: GIS, CCHE2D, hydraulic modeling, LIDAR, sediment transport

Abstract

In 2007, the European Union adopted the Flood Directive with the aim of better regulation in case of flood. The European Union member states are required to create flood hazard maps and flood risk maps. To achieve these objectives, Rules on Methodology to Define Flood Risk Areas and Erosion Areas Connected to Floods and Classification of Plots into Risk Classes were adopted in Slovenia. The two-dimensional hydraulic models, which are increasingly in use, represent an irreplaceable tool in predicting the flood extent and flood mapping. As opposed to the one-dimensional models, these models are more accurate in describing the movement of water on the floodplain areas. The development of the high-quality hydraulic model is dependent of the topographic data, boundary conditions and roughness of the surface. The more reliable the data collected, the more accurate the model built. In the thesis, the development of the flood and erosion hazard maps in the case of the Austrian Schwarzaubach River is shown. The hydraulic analysis was carried out by two-dimensional hydraulic software CCHE2D, which enables not only the simulation of the flow but also the simulation of the sediment transport.

ZAHVALA

Za strokovno in tehnično pomoč ter napotke pri pisanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Francu Steinmanu in somentorju asist. mag. Gašperju Raku.

Hvala za podporo tudi družini, sošolcem in prijateljem, še posebej A. A. in F. P.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETIČNA IZHODIŠČA	2
2.1	Hidravlika odprtih vodotokov.....	2
2.1.1	Kontinuitetna enačba	2
2.1.2	Dinamična enačba	3
2.1.3	Energijska enačba	4
2.2	Premeščanje plavin.....	5
2.3	Strižna odpornost tal.....	7
2.4	Prodni premik.....	8
2.5	Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti	12
2.6	Hidravlični robni pogoji	15
2.7	Uporabljeno programsko orodje	16
2.7.1	Programsko orodje ESRI Arc GIS	16
2.7.2	Hidravlični matematični model CCHE2D	17
2.8	Načini zajema topografskih podatkov	24
3	OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA IN VHODNI PODATKI	26
3.1	Osnovni vhodni podatki	27
3.2	Podatki o lastnostih sedimentov	30
3.3	Raba tal	31
4	HIDRAVLICNA ANALIZA	33
4.1	Generiranje numerične mreže	33
4.2	Programsko orodje CCHE2D-GUI.....	36
4.3	Robni pogoji.....	40
4.3.1	Hidravlični robni pogoj.....	41
4.3.2	Robni pogoj za sedimente	43
4.4	Opravljeni izračuni s CCHE2D	43

4.5	Obdelava rezultatov izračunov v ArcGIS	44
4.6	Primerjava dovoljenih in izračunanih strižnih napetosti	44
5	ZAKLJUČEK	46
VIRI	47

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Zrnavostni razredi, ki se uporabljajo v slovenski hidrotehnični praksi (Mikoš, 2000) ...	6
Preglednica 2: Maksimalne dovoljene hitrosti in strižne sile (Steinman, 2010)	8
Preglednica 3: Kriteriji za določanje razredov poplavne nevarnosti ter legenda za označitev obsega visokih voda (Pravilnik ..., 2007, priloga 2)	14
Preglednica 4: Kriteriji za določitev razredov erozijske nevarnosti ter legenda za označitev meje območja pri pretoku Q(100) (Pravilnik ..., 2007, priloga 2).....	15
Preglednica 5: Legenda oznak na kartah razredov poplavne in erozijske nevarnosti (Pravilnik ..., 2007, priloga 3)	15
Preglednica 6: Pretoki s povratnimi dobami	28
Preglednica 7: Pretoki s povratnimi dobami ter datumom meritve.....	28
Preglednica 8: Vrednost koeficienta hrapavosti glede na rabo zemljišč ter izračunana strižna napetost pri pretoku Q100.....	37
Preglednica 9: Uporabljene frakcije v sintetičnem vzorcu, ki ponazarjajo sestavo dna.....	38
Preglednica 10: V izračunih uporabljeni pretoki s pripadajočimi povratnimi dobami.....	42
Preglednica 11: Primerjava med dovoljenimi in izračunanimi strižnimi napetostmi.....	44

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Sestava sintetičnega vzorca zemljine.....	39
Grafikon 2: Logaritmična trendna linija in njeno ujemanje s podatki o pretokih	41
Grafikon 3: Ekstrapolacija trendne črte do pojava pretoka $P = 0.002$	42
Grafikon 4: Pretočna krivulja dobljena z izračunom v programu HEC-RAS	43

KAZALO SLIK

Slika 1: Postopek izdelave karte poplavnih in erozijskih območij skladno s Pravilnikom (Pravilnik ..., 2007, priloga 1)	13
Slika 2: Programsko okolje CCHE2D. Prikazana je povezanost posameznih procesov pri pripravi 2D hidravličnega modela	18
Slika 3: Potek transporta sedimentov. Globina vode je razdeljena na sloj rinjenih plavin in sloj lebdečih plavin. Diagrami si od leve proti desni sledijo: vertikalna porazdelitev koncentracije	

lebdečih plavin $c(z)$, vertikalni profil strižnih napetosti $\tau(z)$ in porazdelitev hitrosti $u(z)$. (Wu, 2001, 3).....	21
Slika 4: LIDAR sistem (Alemseged, 2005, 8).....	25
Slika 5: Prikaz lokacije obravnavanega območja (Geopedia, 2013).....	26
Slika 6: Prikaz območja modeliranja na podlagi ortofoto posnetka.....	27
Slika 7: Obseg poplave – Modra območja predstavljajo obseg poplavljenosti pri pretoku Q100, rdeča črta pa pri pretoku Q300 (Das Land Steiermark, 2013)	29
Slika 8: Sintetični vzorci, opisani z zrnavostno krivuljo.....	30
Slika 9: Ortofoto obravnavanega območja (Google maps, 2013).....	31
Slika 10: Raba tal obravnavanega območja kot podlaga za določitev koeficientov hrapavosti.....	32
Slika 11: Digitalni model terena obravnavanega območja v obliki TIN.....	33
Slika 12: Izdelana numerična mreža, sestavljena iz štirih blokov.....	34
Slika 13: Numerična mreža na kateri so vidni posamezni bloki ter notranje kontrolne meje (črtkano).....	35
Slika 14: Porazdelitev sprememb dna struge in obvodnega prostora pri pretoku Q100	45

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: Osnovni postopek simulacije s programom CCHE2D

PRILOGA B: Spreminjanje dna struge v času

PRILOGA C: Karta poplavne nevarnosti – kriterij globina

PRILOGA D: Karta poplavne in erozijske nevarnosti – kriterija [globina x hitrost]

PRILOGA E: Karta razredov poplavne nevarnosti

PRILOGA F: Karta erozijske nevarnosti

PRILOGA G: Karta razredov erozijske nevarnosti

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

DMT	Digitalni model terena
LIDAR	Light Detection and Ranging (Zaznavanje svetlobe in merjenje razdalj)
TIN	Triangulated Irregular Network (Mreža nepravilnih trikotnikov)
NCCHE	National Center for Computational Hydroscience and Engineering (Državni center za vodarstvo in hidrotehniko)

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Z napredovanjem računalniške tehnologije in hitrim razvojem matematičnih modelov na področju hidravličnega modeliranja se lahko dobro ponazori obnašanje vode v primeru visokih voda. Ob prelivanju vode iz struge nas predvsem zanimajo doseg poplavne vode, globina ter hitrost vode na poplavnih površinah. Voda pa poleg same poplave povzroča tudi erozijo tal ali odlaganje materiala, ki se prenaša z vodnim tokom. V ta namen se izdelujejo opozorilne karte visokih voda ter karte poplavne in erozijske nevarnosti. Za izdelavo omenjenih kart pa so potrebne številne analize, zbrani podatki o poplavnih in erozijskih dogodkih ter raziskave.

Za simulacijo toka vode ter erozijskih procesov je potrebno imeti čim več in čim bolj natančne podatke. Zelo pomemben je natančno izdelan model terena, tako struge kot poplavnih površin. Na obnašanje vode vpliva tudi hrapavost površja, ki jo zajamemo s koeficienti hrapavosti, s katerimi poskušamo čim bolj opisati lastnosti terena. Zelo je pomembno, da poznamo kote vodnih gladin pri določenih pretokih, saj na podlagi tega podatka lahko umerjamo hidravlični model. Posebej, kadar nas zanimajo erozijski procesi, moramo pridobiti podatke o materialu, ki sestavlja strugo in obvodni prostor.

Pridobivanje vseh možnih podatkov o vodotoku in obvodnem prostoru je lahko zamudno in drago. Vendar več kot imamo podatkov, boljše lahko ponazorimo dejanske razmere na terenu.

V našem primeru pa na voljo ni bilo veliko podatkov na katere bi se lahko hidravlični model umeril. Poleg višinskih točk za izdelavo modela terena, smo uspeli pridobiti še pretoke z različnimi povratnimi dobami z bližnje vodomerne postaje. Višinskih podatkov vodnih gladin na dolvodnem odseku vodotoka nismo uspeli pridobiti, zato smo morali sami izdelati pretočno krivuljo. Tudi sestava tal je bila neznana, zato smo predpostavili sintetični vzorec zemljine z različnimi frakcijami materiala.

Namen diplomskega dela je spoznati postopek izdelave kart poplavne in erozijske nevarnosti. Na podlagi izračunov v programskem orodju CCHE2D so bile v okolju ArcGIS izdelane karte poplavne in erozijske nevarnosti ter karte razredov poplavne in erozijske nevarnosti. Prikazan je tudi potek spreminjanja dna struge v primeru transporta sedimentov.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Računalniški programi, ki se uporabljajo v hidravličnih analizah toka vode, poplavnih tokov in transporta sedimentov, temeljijo na matematičnih in empiričnih enačbah. Cilj diplomske naloge je izdelati karte poplavne in erozijske nevarnosti z 2D hidravličnim modelom CCHE2D. V ta namen so opisane osnovne enačbe na katerih temelji program, postopek izdelave kart poplavne in erozijske nevarnosti skladno z zakonodajo, opisano je programsko orodje ArcGIS s katerim je bila pripravljena geometrija (digitalni model terena) ter orodje CCHE2D, uporabljeno za izvedbo hidravlične analize.

2.1 Hidravlika odprtih vodotokov

Mehaniko splošnega gibanja tekoče vode v matematičnem smislu enoznačno določajo trije elementarni zakoni, katerih poznavanje in uporaba je bistvena za popis hidravličnih razmer obravnavanega problema. To so zakon o ohranitvi mase (kontinuitetna enačba), zakon o ohranitvi gibalne količine (dinamična enačba) in zakon o ohranitvi energije (energijska enačba) (Steinman, 1999).

2.1.1 Kontinuitetna enačba

Osnovno obliko kontinuitetne enačbe dobimo z upoštevanjem pogoja, da je sprememba mase tekočine v nekem volumnu enaka razliki dotoka in iztoka na površini volumna (Steinman, 1999):

$$\iint_S \rho \cdot \vec{v} \cdot dS = - \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \cdot dV \quad (1)$$

Kjer pomeni:

- S sklenjena ploskev,
- ρ gostota tekočine,
- v vektor hitrosti,
- t čas,
- V prostornina.

Če upoštevamo, da mora biti enačba izpolnjena za vsak, tudi najmanjši del volumna dV , lahko kontinuitetno enačbo za prostorski tok zapišemo v diferencialni obliki:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

Kjer pomeni:

v_x komponenta hitrosti v x smeri,

v_y komponenta hitrosti v y smeri,

v_z komponenta hitrosti v z smeri.

V nadaljevanju bo obravnavan 2D (globinsko povprečen) tok, za katerega velja enačba:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Kjer sta v_x in v_y komponenti hitrosti v x in y smeri.

2.1.2 Dinamična enačba

Osnovno obliko dinamične enačbe dobimo, če delujoče sile na kontrolni volumen, v zapisu II. Newtonovega zakona, razdelimo na masne in površinske:

$$\iiint_V \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \rho \cdot dV = \iiint_V \vec{F} \cdot \rho \cdot dV + \iint_S [\sigma] \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

Kjer pomeni:

V obravnavan volumen,

v vektor hitrosti,

t čas,

ρ gostota tekočine,

F rezultanta delujočih sil,

S sklenjena ploskev,

$[\sigma]$ tenzor napetosti.

Če upoštevamo lastnosti tekočin in preoblikujemo posamezne člene, dobi enačba naslednjo obliko (t.i. Navier-Stokesova enačba za realne tekočine):

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \frac{1}{\rho} \cdot \text{div}[\sigma] = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}p + \nu \cdot \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \cdot \text{grad}(\text{div}(\vec{v})) \quad (5)$$

Kjer pomeni:

ν koeficient kinematične viskoznosti,

p tlak.

Če upoštevamo predpostavke, da je voda:

- nestisljiva: $div(\vec{v}) = 0$,
- idealna: $\nu = 0$,

dobi dinamična enačba za prostorski tok naslednjo obliko:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \cdot grad p. \quad (6)$$

Z upoštevanjem predpostavk za enodimenzionalni tok, se tudi dinamična enačba poenostavi:

$$\frac{dv_s}{dt} = F_s - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} \quad (7)$$

Kjer pomeni:

- v_s prevladujoča komponenta hitrosti (ostale komponente zanemarimo),
- s smer naravne koordinate v smeri toka (v vsaki točki tangenta na tokovnico),
- F_s komponenta rezultante delujočih sil v smeri toka.

2.1.3 Energijska enačba

Pri upoštevanju zakona o ohranitvi energije za katerega velja, da se celotna energija sistema spreminja le ob dovajanju ali odvzemanju toplote oz. pri opravljanju dela, ki ga sistem opravi na okolico, dobimo enačbo sledeče oblike:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA}{dt} \quad (8)$$

Kjer pomeni:

- E celotna energija sistema,
- Q energija dovedene toplote,
- A odvzeta (oddana) energija zaradi dela.

Opravljenno delo lahko razčlenimo glede na izvor in dobimo obliko enačbe:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA_p}{dt} - \frac{dA_{tr}}{dt} - \frac{dA_m}{dt} \quad (9)$$

Kjer pomeni:

- A_p delo normalnih tlakov,

A_{tr} delo strižnih sil,

A_m mehansko delo.

Z upoštevanjem predpostavke, da je tok stacionaren in enodimenzionalen, kar pomeni, da so parametri enakomerno razporejeni po prerezu, lahko operiramo z njihovimi povprečnimi vrednostmi. Tako dobimo enačbo oblike:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dA_m}{dt} = \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{izhodno} - \rho \cdot Q \cdot \left(e_{ir} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} \right)_{vhodno} \quad (10)$$

Kjer e_{ir} predstavlja nepovratno notranjo energijo na enoto mase.

Pri analiziranju hidravlike vodnega toka odprtih vodotokov, kjer ni hidravličnih ali hidroenergetskih strojev, razlike med dovedeno oziroma odvzeto energijo zaradi mehanskega dela ni. Energijsko bilanco med dvema prečnima prerezoma lahko tako predstavimo s pomočjo energijske enačbe. Če preoblikujemo člene tako, da dobijo dimenzije oblike enote dolžine, dobimo 1D energijsko enačbo:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta E_{ir} \quad (11)$$

Kjer predstavlja ΔE_{ir} spremembo vseh oblik nepovratnih notranjih energij.

2.2 Premeščanje plavin

Pri računu premeščanja plavin je potrebno poznati različne lastnosti plavin, ki vplivajo na premestitveno zmogljivost. Z odvzemanjem in analizo vzorcev se pridobi podatke o velikosti, obliki, specifični teži plavin ter o zrnastosti sestavi sedimentov, ki sestavljajo strugo.

- **Velikost zrn plavin**

Velikost je najpomembnejši parameter za opis fizičnih lastnosti zrn plavin (Singh, 2005). Velikost zrn se največkrat označi s pomočjo karakterističnega premera, torej dolžinske dimenzije. Ta premer se lahko določi s sejalno analizo, z direktno meritvijo posameznih razsežnosti zrn ali preko ustreznih enačb za račun hitrosti usedanja zrn plavin (Mikoš, 2000). Velikost zrn plavin narekuje način transporta v vodnem telesu. Večja zrna plavin, kot so melji in peski, se premeščajo kot rinjene plavine, finejša zrna (glina) pa se premeščajo kot lebdeče plavine (Singh, 2005). Preglednica 1 podaja vrsto materiala ter mejne premere zrn le-tega.

Preglednica 1: Zrnavostni razredi, ki se uporabljajo v slovenski hidrotehnični praksi (Mikoš, 2000)

Oznaka	Zrnavostni razred	Premer zrn [mm]
P	Šota, humus	Nedoločljiv
O	Organski melj	Težko določljiv
C	Glina	< 0.002
M	Melj	0.002 – 0.06
S	Pesek	0.06 – 2
G	Prod	2 – 60
K	Grušč	60 – 120
R	groblja	> 120

Zrnavostna sestava vpliva na erodibilnost rečnega gradiva. Tako v prodnih kot v peščenih strugah vlada med erodibilnostjo in velikostjo zrn izrazita korelacija, ki pa se v primeru vezljivih materialov praktično povsem izgubi, zaradi posebne elektrokemične strukture, ki jo imajo delci glin in melja.

- **Oblika zrn plavin**

Erozijski drobir in plavine v svojih izvorih (erozijskih žariščih) so navadno še robate in nezaobljene. Plavine v dnu struge in rinjene plavine se zaobljujejo med premeščanjem vzdolž hudournikov in rek zaradi abrazije. Njihovo obliko se lahko tako že blizu izvorov plavin ponazori z elipsoidom (Mikoš, 2000).

- **Specifična teža zrn plavin**

Gostota zrn plavin je v prvi meri odvisna od njihove mineralne sestave. V večini primerov se gostota naravnih peskov in prodov giblje med 2650 in 2680 kg/m³. Zrna plavin sestavljena iz težkih mineralov so lahko bistveno gostejša (Mikoš, 2000).

- **Zrnavost plavin**

Iz krivulj zrnivosti plavin je možno določiti različna merodajna zrna plavin. Običajno jih označimo z indeksom, ki nam pove, kolikšen delež zrn plavin je drobnejših od njihovega premera (npr. d_{50}).

Srednje aritmetično zrno plavin d_m pa se uporablja za analizo premostitvene zmogljivosti vodnih tokov (Mikoš, 2000). Analitični izraz za določitev srednjega premera d_m se zapiše kot:

$$d_m \cong \frac{\sum_i d_i \Delta p}{100 \%} \quad (12)$$

Kjer je d_m premer srednjega zrna plavin [cm], d_i premer zrna posamezne frakcije nanosa [cm], Δp zastopnost posameznih frakcij [%] (Mikoš, 2009).

2.3 Strižna odpornost tal

Pri obravnavi vodotokov v osnovi veljajo zakoni toka s prosto gladino. Pri odtekanju voda imamo skupno delovanje težnostnih sil in sil trenja ter v primeru krivin tudi centrifugalno silo in Coriolisove sile. V krivinah se pojavi tudi sekundarni vodni tok, ki zaradi svoje usmerjenosti dodatno obremenjuje zunanjo brežino (Mikoš, 2000).

Pri toku vode v strugi deluje vlečna sila v smeri vodnega toka na brežine in na dno vodotoka. Strižna napetost se izračuna kot razmerje med omočenim obodom in vlečno silo. Vlečna sila vpliva na procese v strugi in povzroča prodonosnost (Mikoš, 2009).

Povprečna strižna napetost τ_0 , ki deluje na enoto površine dna struge vodotoka, se lahko v primeru relativno majhne pretočne globine v primerjavi s širino struge (hidravlični radij je približno enak pretočni globini) izračuna po enačbi:

$$\tau_0 = \rho_w g h I \quad (13)$$

Kjer pomeni:

ρ_w gostota vode [kg/m³],

g težnostni pospešek [9.81 m/s²],

I vzdolžni padec dna [-],

h pretočna globina [m].

V preglednici 2 so podane kritične vrednosti materialov oz. pokrovnost površja, ki se lahko pojavi v vodotoku ali ob njem.

Preglednica 2: Maksimalne dovoljene hitrosti in strižne sile (Steinman, 2010)

Material	Čista voda		Voda s koloidnimi delci	
	Hitrost [m/s]	Strig [N/m^2]	Hitrost [m/s]	Strig [N/m^2]
Droben pesek	0.46	1.29	0.76	3.59
Aluvialne naplavine, nekolidne	0.61	2.30	0.91	5.27
Navaden prod	0.76	3.59	1.07	7.18
Glina	1.14	12.40	1.52	22.00
Aluvialne naplavine, koloidne	1.14	12.40	1.52	22.00
Škrilavci	1.82	32.10	1.83	32.10
Droben gramoz	0.76	3.59	1.52	15.30
Konglomerat	1.14	18.20	1.52	31.60
Zrnate naplavine	1.22	20.60	1.68	38.30
Grob gramoz	1.22	14.40	1.83	32.10
Kamen in prod	1.52	43.60	1.83	52.70
Vrsta podlage	Hitrost [m/s]	Strig [N/m^2]		
Razgaljena zemljina	0.4	<1.2		
Travna ruša	1.4	50 – 80		
Grmičevje	2.0	100 – 140		
Gozd	>2.0	>140		

2.4 Prodni premik

Delec, ki miruje na ravnem dnu vodotoka, spravi v gibanje vlečna sila, ki jo povzroči voda. Ta sila nastane zaradi tlačnih razmer na sprednji in zadnji strani zrna. Ker so lokalne pretočne hitrosti odvisne od razporeditve strižnih napetosti na dnu struge, se mejno stanje stabilnosti zrn plavin največkrat določa v odvisnosti od strižnih napetosti (Mikoš, 2000).

Dvižna sila oz. dinamični vzgon, ki je rezultat delovanja turbulence, lahko deluje v dveh smereh. Zrno plavin lahko pritisne k dnu in s tem poveča njegovo stabilnost, ali pa zrno dviguje in tako pospešuje prodni premik. (Mikoš, 2000).

Vodni tokovi premeščajo plavine po dnu ali v bližini dna (rinjene plavine) in v telesu vodnega toka (lebdeče plavine). Meja med obema oblikama premeščanja je odvisna od hidravličnih pogojev v vodotoku (Mikoš, 2000).

- Plavine so vse snovi, ki jih vodotok premika v trdni obliki. Strogo vzeto spadajo zraven tudi raztopljene snovi.
- Rinjene plavine so plavine, ki se premikajo v bližini dna vodotoka. Način njihovega premeščanja je lahko drsenje, kotaljenje ali poskakovanje.
- Lebdeče plavine so plavine, ki so ob premeščanju zelo redko v stiku z dnom vodotoka, ampak zaradi turbulence lebdi v vodnem toku – se zadržujejo v določeni razdalji od dna vodotoka.
- Sedimenti so tiste plavine, ki se v mirujoči vodi izločijo in usedejo na dno. Ne obsegajo pa plavje, tj. plavajočih snovi (les, led).

Če poenostavimo, lahko potek premeščanja plavin predstavimo na naslednji način:

- Dokler vodni tok ni v stanju zasičenosti z nanosom, tok spodkopava svoje korito,
- Ko je vodni tok zasičen, preneha z erodiranjem in ne spodkopava svojega korita,
- V primeru zmanjšanja hitrosti in povezano zmanjšane transportne zmogljivosti toka, pride do odlaganja dela nanosa, katerega prenaša in tako se dno korita viša (Oblak, 2013).

Premestitvena zmogljivost je odvisna od hidravlične obtežbe vodnega toka na zrno in odpora zrna proti premiku. Kritične razmere ob začetku prodnega premika lahko definiramo s pomočjo brezdimenzionalne strižne napetosti (Mikoš, 2000):

$$\Theta = \frac{\tau_0}{\rho_w g (s - 1) d} \quad (14)$$

Kjer pomeni:

- Θ brezdimenzionalna strižna napetost [-],
- τ_0 strižna sila ob dnu [N/m^2],
- h pretočna globina vode [m],
- g težnostni pospešek [9.81 m/s^2],
- ρ_w gostota vode [1000 kg/m^3],
- s relativna gostota zrn plavin glede na vodo [-],
- d premer zrn plavin [m].

Za hidravlične razmere z razvito turbulenco je razmerje konstantno, po navadi velja vrednost $\Theta = 0.05$.

Premestitvena zmogljivost dejanskega dotoka plavin vpliva na spremembo geometrije dna struge. Pri manjši premestitveni zmogljivosti prihaja do odlaganja sedimentov, pri večji pa do erozije struge vodotoka (Miklavčič, 2013).

V naravnih vodotokih prevladuje neenovita zrnavostna sestava plavin. Premestitvena zmogljivost vodnih tokov za drobne plavine je po navadi večja kakor obstoječi dotok teh plavin iz gorvodnega toka. Dejanska prodonosnost teh plavin je potemtakem določena z dotokom le teh iz prispevnega območja (Mikoš, 2000).

Za izračun premestitvene zmogljivosti obstaja več enačb. V nadaljevanju je podana enačba Meyer-Peter – Müller (MPM), ki je bila razvita za premeščanje rinjenih plavin:

$$\rho g \left(\frac{Q_r}{Q} \right) \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{1.5} RI = 0.047 \rho (s - 1) g d_m + 0.25 \rho (s - 1)^{0.67} g^{0.67} q_B^{9.67} \quad (15)$$

Kjer pomeni:

Q_r reducirani (na dno delujoči) pretok vode [m^3/s],

Q celoten pretok vode [m^3/s],

k_s dejanski koeficient odpora toku vode [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$],

k_r Stricklerjev koeficient trenja – prilagojen poizkusom Nikuradseja [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$],

ρ gostota vode [$1000 \text{ kg}/\text{m}^3$],

g težnostni pospešek [$9.81 \text{ m}/\text{s}^2$],

d_m srednji premer zrna plavin [m],

q_B na širinski m in na sekundo premeščena prostornina rinjenih plavin – sekundna specifična premestitvena zmogljivost [$\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$],

s relativna gostota plavin glede na vodo (ρ_s/ρ) [kg/m^3].

Enačba za premeščanje rinjenih plavin, ki jo je zasnoval van Rijn (Jia in Wang, 2001) in je bila tudi uporabljena za izračun premestitvene zmogljivosti q_B v diplomski nalogi, je naslednja:

$$q_B = 0.053 \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g \right)^{0.5} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{2.1} \quad (16)$$

$$D_* = d_{50} \left[(s - 1) \frac{g}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

$$T = \frac{\tau - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (18)$$

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho)gd_{50}\Theta_{cr} \quad (19)$$

Kjer D_* predstavlja brezdimenzijski premer zrn, T je parameter strižne napetosti ob dnu, s je relativna gostota plavin glede na vodo in τ_{cr} je kritična strižna napetost po Shieldsu.

Kritična strižna napetost Θ_{cr} je računana na sledeč način (Jia in Wang, 2001):

$$\Theta_{cr} = 0.24D_*^{-1} \quad za \quad 1 < D_* \leq 4 \quad (20a)$$

$$\Theta_{cr} = 0.14D_*^{-0.64} \quad za \quad 4 < D_* \leq 10 \quad (20b)$$

$$\Theta_{cr} = 0.04D_*^{-0.1} \quad za \quad 10 < D_* \leq 20 \quad (20c)$$

$$\Theta_{cr} = 0.013D_*^{-0.29} \quad za \quad 20 < D_* \leq 150 \quad (20d)$$

$$\Theta_{cr} = 0.055 \quad za \quad D_* > 150 \quad (20e)$$

Strižna sila τ in Chezyjev koeficient trenja C' se računata kot:

$$\tau = \rho g \left[\frac{u}{C'} \right]^2 \quad (21)$$

$$C' = 7.8 \ln \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right) \quad (22)$$

Kjer u pomeni hitrost vode, h je globina vode in d_{90} je velikost zrn pri presejku 90 %.

Groba zrna plavin se pri manjših hidravličnih obtežbah premeščajo kot rinjene plavine. Z naraščanjem pretoka pa narašča intenziteta toka in turbulenca, kar povečuje dinamični vzgon. Večanje hidravlične obtežbe povzroči, da poskakujoča zrna plavin odskakujejo vedno bolj strmo in na koncu preidejo v lebdeče gibanje. Ob nastopu lebdečega gibanja erodiranih plavin iz dna vodotoka se del teh plavin še vedno premešča po dnu struge kot rinjene plavine.

Pogosto se za določitev prehoda iz rinjenega v lebdeče gibanje uporablja Kresserjeva enačba, na podlagi katere sklepamo ali je potrebna posebna obravnava gibanja lebdečih plavin:

$$\frac{v_m^2}{gd} = 360 \quad (23)$$

Ker pomeni:

v_m srednja hitrost vode [m/s],

g težnostni pospešek [9.81 m/s²],

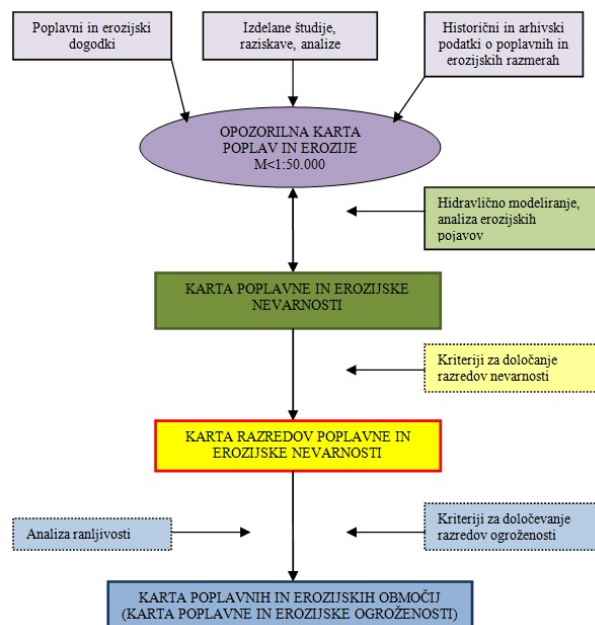
d premer zrna [m].

2.5 Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti

Vzrok, da poplave sodijo med najbolj uničujoče ujme, je na eni strani naraščajoči trend pogostosti in intenzitete pojavov, na drugi strani pa na to vplivajo vse pogostejši nepremišljeni in kapitalsko visoko vredni posegi človeka v obvodni prostor in na poplavne ravnice, kar povečuje ranljivost/občutljivost teh območij (Rak in sod, 2007, str. 108).

Z namenom boljše ureditve razmer ob poplavah, sta Evropski parlament in Svet evropske unije oktobra leta 2007 sprejela Poplavno direktivo. Direktiva od držav članic EU zahteva izdelavo kart poplavne nevarnosti in kart poplavne ogroženosti do konca leta 2013, do konec leta 2015 pa izdelavo načrtov za obvladovanje poplavne ogroženosti. Načrti morajo vsebovati ukrepe za zmanjšanje poplavne ogroženosti ter napovedovanje poplav in opozorilne sisteme za zgodnje opozarjanje. Za delno izpolnitev ciljev je bil v Sloveniji leta 2007 sprejet Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (v nadaljevanju Pravilnik). Država želi z njim natančneje urediti ravnanje ob nevarnostih, povezanih z vodami, in učinkoviteje conirati obvodni prostor.

Postopek izdelave karte poplavnih in erozijskih območij po zgoraj omenjenem pravilniku pregledno oriše spodnja shema na sliki 1. V diplomski nalogi smo se omejili na izdelavo karte poplavne in erozijske nevarnosti ter karte razredov poplavne in erozijske nevarnosti.



Slika 1: Postopek izdelave karte poplavnih in erozijskih območij skladno s Pravilnikom (Pravilnik ..., 2007, priloga 1)

Namen Opozorilne karte poplav in erozije je podajanje prve informacije o obsegu in pogostosti pojava. Opozorilno karto pripravi ministrstvo, pristojno za vode, s povzemanjem različnih podatkov in študij. Na karti so prikazana območja dosega poplavnih voda pri različnih povratnih dobah, opremljena pa je tudi z informacijo o stopnji zanesljivosti podatka.

Na podlagi opozorilne karte poplav in erozije se za območja, kjer lahko pride do pomembnejše ogroženosti, določijo območja poplavne in erozijske nevarnosti. Karta poplavne in erozijske nevarnosti prikazuje rezultate dobljene s hidravličnim modeliranjem. Pravilnik določa dva kriterija in sicer kriterij globine in kriterij zmnožka globine in hitrosti vode. Območja poplavne in erozijske nevarnosti ob tekočih vodah se prikažejo v grafični obliki na kartah poplavne in erozijske nevarnosti, ki vsebujejo podatke o mejah območij poplavne nevarnosti pri pretoku $Q(10)$, $Q(100)$ in $Q(500)$ ter podatke o mejah območij erozijske nevarnosti pri pretoku $Q(100)$.

Merila za določitev razredov poplavne nevarnosti

Območja poplavne nevarnosti se na podlagi meril, ki upoštevajo moč poplavnega toka pri enaki verjetnosti nastanka dogodka, razvrstijo v razrede poplavne nevarnosti, pri čemer je odločujoče tisto merilo, ki izkazuje največji razred nevarnosti:

- **razred velike nevarnosti**, kjer je pri pretoku $Q(100)$ ali gladini $G(100)$ globina vode enaka ali večja od 1,5 m oziroma zmnožek globine in hitrosti vode enak ali večji od $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$,

- **razred srednje nevarnosti**, kjer je pri pretoku $Q(100)$ ali gladini $G(100)$ globina vode enaka ali večja od 0,5 m in manjša od 1,5 m oziroma zmnožek globine in hitrosti vode enak ali večji od $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ in manjši od $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ oziroma, kjer je pri pretoku $Q(10)$ ali gladini $G(10)$ globina vode večja od 0,0 m,
- **razred preostale nevarnosti**, kjer je pri pretoku $Q(100)$ ali gladini $G(100)$ globina vode manjša od 0,5 m oziroma zmnožek globine in hitrosti vode manjši od $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$, in
- **razred zelo majhne nevarnosti**, kjer poplava nastane zaradi izrednih naravnih ali od človeka povzročenih dogodkov (npr. izredni meteorološki pojavi ali poškodbe ali porušitve proti poplavnih objektov ali drugih vodnih objektov).













Merila za določitev razredov erozijske nevarnosti

Območja erozijske nevarnosti se na podlagi meril, ki upoštevajo erozijo glede na njeno moč pri enaki verjetnosti nastanka dogodka, razvrstijo v razrede erozijske nevarnosti:

- **razred velike nevarnosti**, kjer je pri pretoku $Q(100)$ ali gladini $G(100)$ debelina odplavljenega sloja večja od 2,0 m oziroma debelina odloženega sloja večja od 1,0 m,
- **razred srednje nevarnosti**, kjer je pri pretoku $Q(100)$ ali gladini $G(100)$ debelina odplavljenega sloja od 0,5 m do 2,0 m oziroma debelina odloženega sloja od 0,3 m do 1,0 m in
- **razred majhne nevarnosti**, kjer je pri pretoku $Q(100)$ ali gladini $G(100)$ debelina odplavljenega sloja manjša od 0,5 m oziroma debelina odloženega sloja manjša od 0,3 m.








V preglednici 3 in preglednici 4 so natančneje opisani kriteriji za določitev razredov poplavne in erozijske nevarnosti ter legenda za označitev meja območij poplavne in erozijske nevarnosti.

Preglednica 3: Kriteriji za določanje razredov poplavne nevarnosti ter legenda za označitev obsega visokih voda (Pravilnik ..., 2007, priloga 2)

KARTA POPLAVNE NEVARNOSTI			
GLOBINA VODE (pri Q_{100})		GLOBINA * HITROST (pri Q_{100})	
	< 0.5 m		< $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$
	0.5 m – 1.5 m		$0.5 \text{ m}^2/\text{s} - 1.5 \text{ m}^2/\text{s}$
	> 1.5 m		> $1.5 \text{ m}^2/\text{s}$
Velja za vsa območja		Velja za območja, kjer so hitrosti vode $\geq 1 \text{ m/s}$	
$v < 1$		območja, kjer so hitrosti manjše od 1 m/s	
 Q_{500} 		meja območja pri pretoku Q_{500}	
 Q_{100} 		meja območja pri pretoku Q_{100}	
 Q_{10} 		meja območja pri pretoku Q_{10}	








Območja erozijske nevarnosti se na podlagi meril, ki upoštevajo erozijo glede na njeno moč pri enaki verjetnosti nastanka dogodka, razvrstijo v razrede erozijske nevarnosti. Kriteriji ter način označevanja meja so podani v spodnji preglednici.

Preglednica 4: Kriteriji za določitev razredov erozijske nevarnosti ter legenda za označitev meje območja pri pretoku $Q(100)$ (Pravilnik ..., 2007, priloga 2)

KARTA EROZIJSKE NEVARNOSTI			
DEBELINA SLOJA (pri Q_{100})		DEBELINA SLOJA (pri Q_{100})	
	< 0.5 m		< 0.3 m
	0.5 m – 2.0 m		0.3 m – 1.0 m
	> 2.0 m		> 1.0 m
Odplavljeni prepereli kamninski material		Odloženi prepereli kamninski material	
		meja območja pri pretoku Q_{100}	

Karta razredov poplavne in erozijske nevarnosti se izdelava na podlagi vsebin, prikazanih na kartah poplavne in erozijske nevarnosti, z upoštevanjem meril za določitev razredov poplavne in erozijske nevarnosti. Pri izdelavi karte razredov poplavne nevarnosti se razredi določijo ločeno glede na kriterij nevarnosti (globina, globina x hitrost), upošteva pa se razred z višjo nevarnostjo. Oznake posameznih razredov nevarnosti za karte razredov poplavne in erozijske nevarnosti so prikazane v preglednici 5.

Preglednica 5: Legenda oznak na kartah razredov poplavne in erozijske nevarnosti (Pravilnik ..., 2007, priloga 3)

KARTA RAZREDOV POPLAVNE IN EROZIJSKE NEVARNOSTI			
			Območje preostale nevarnosti
	Območje majhne nevarnosti		Območje majhne nevarnosti
	Območje srednje nevarnosti		Območje srednje nevarnosti
	Območje velike nevarnosti		Območje velike nevarnosti

2.6 Hidravlični robni pogoji

Za reševanje hidravličnih enačb so potrebni robni pogoji. Gre za znane vrednosti pretokov ali gladin na vtočnem ali iztočnem prerezu pri 1D modelih oz. na robovih ravninskega računskega območja pri 2D modeliranju. Razlikujemo zunanje in notranje robne pogoje. Prvi se uporabljajo za izračun stanja na modeliranem območju, medtem ko drugi podajajo dodatne pogoje, ki morajo biti izpolnjeni znotraj računskega območja (Müller, 2009).

2.7 Uporabljeno programsko orodje

V diplomski nalogi sta bili uporabljeni dve programski orodji. Za pripravo geometrije in izdelavo digitalnega modela terena (DMT), kot podlage za hidravlični model, je bilo uporabljeno programsko orodje ESRI ArcGIS z razširitvama Spatial Analyst in 3D Analyst. Hidravlični model in hidravlična analiza pa sta bila izvedena v programskem orodju CCHE2D.

2.7.1 Programsko orodje ESRI Arc GIS

Programsko orodje ArcGIS Desktop je razvil ameriški okoljski inštitut ESRI (Environmental System Research Institute), ki je bil ustanovljen leta 1969. Njihovo poslanstvo je bilo pomagati načrtovalcem okolja z organiziranjem in analiziranjem prostorskih podatkov. Postopoma so razvijali tehnologijo in programsko orodje za delo s kartami in prostorskimi informacijami (ESRI, 2013). ArcGIS sestavljajo tri aplikacije in sicer ArcMap, ArcCatalog in ArcToolbox. Omogoča nam različne operacije kot so obdelava in urejanje prostorskih podatkov, kartiranje, vizualni prikaz ter geografske analize. Uporabnik lahko med drugim izdela topografske karte, prikaz infrastrukture, rastrski izris, prikaz rabe tal itd. Možna je tudi izdelava zahtevnejših interaktivnih kart, ki nam poleg vizualnega prikaza podajajo medsebojna razmerja podatkov in njihove lastnosti na izbranem področju. Trije najpogostejši podatkovni modeli, ki se uporabljajo v ArcGIS-u so vektorski, rastrski in TIN. ESRI je razvil tudi veliko programskih razširitev, ki so namenjena specifičnim operacijam na različnih področjih ter omogočajo več možnosti pri obdelavi podatkov. Razširitvi 3D Analyst in Spatial Analyst pripomoreta h kvalitetnejši izdelavi digitalnega modela terena in batimetrije struge, kar predstavlja osnovo za izdelavo hidravličnega modela. Primarnega pomena pri 1D hidravličnih analizah pa so razširitvena orodja HEC-GeoRAS, ki jih je razvil center za hidrološke raziskave HEC (Lovšin, 2013).

2.7.1.1 Razširitev Spatial Analyst

Razširitev Spatial Analyst vsebuje orodja za prostorske analize. Uporabniku omogoča analizo raznovrstnih prostorskih problemov. Z njegovo uporabo lahko pridobimo nove podatke iz obstoječih, ugotovljamo povezanost različnih podatkovnih slojev ter povežemo rastrske podatke z vektorskimi. Enostavno lahko pridobimo uporabne informacije kot so usmerjenost ali naklon površja. Za reševanje kompleksnejših nalog, kot je iskanje optimalne poti, pa povezujemo več različnih metod in podatkovnih slojev. S pomočjo razširitve Spatial Analyst lahko prikažemo rezultate vodnih globlin in hitrosti vode v modelu po končanih izračunih s pomočjo rastrske mreže ali oblikujemo histograme (McCoy in Johnston, 2001).

2.7.1.2 Razširitev 3D Analyst

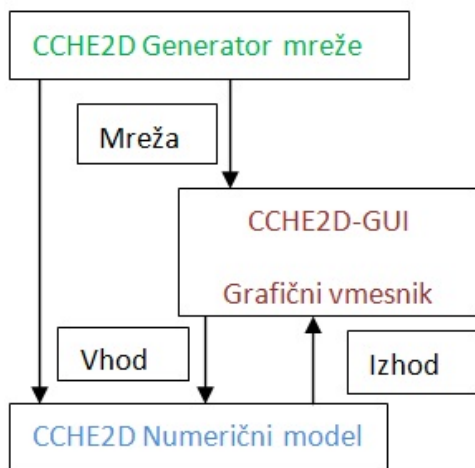
Razširitev 3D Analyst omogoča orodja za napredno vizualizacijo, analize in izvedbo terena. Podatke vidimo v treh dimenzijah z različnih zornih kotov, prikažemo različne gradiente, lahko pa ustvarimo tudi realističen model, kjer daljinsko zaznano sliko prenesemo na obstoječo površino terena. S pomočjo atributnih podatkov lahko pretvorimo 2D model v 3D model. Model lahko izvedemo v pravilni (kvadratni) mreži ali v mreži nepravilnih trikotnikov. Za izdelavo modela površin se lahko uporabijo različni formati podatkov. V 3D Analyst-u lahko s pomočjo interpolacije izdelamo model TIN na osnovi podatkov točk, linij ali poligonov. Možna je tudi pretvorba rastrskega modela v TIN model in obratno. Za lažjo interpretacijo lahko na pripravljenem terenu izrišemo izohipse, dobimo podatke o naklonih površin in višinah točk ter določimo smer pogleda ali izračunamo površino ali volumen nekega področja (ESRI, 1996).

2.7.2 Hidravlični matematični model CCHE2D

Programsko orodje CCHE2D je izdelal ameriški Državni center za vodarstvo in hidrotehniko NCCHE (National Center for Computational Hydroscience and Engineering), ki je bil ustanovljen leta 1982 kot raziskovalni oddelek na univerzi v Missisippiju. Raziskovalne in razvojne dejavnosti NCCHE pokrivajo širok spekter področij vključno s hidravliko vodotokov, rečno morfologijo, poplavne študije, transport sedimentov in drugo. Numerični model CCHE2D se uporablja za račun dvodimenzionalnega nestalnega turbulentnega toka, transport sedimentov in ocenitev spreminjanja kvalitete vode. Model omogoča tudi napovedovanje erodiranega rečnega dna in brežin zaradi premeščanja sedimentov, premikanje meandrov in ugotavljanje kakovosti vode. Uporablja se tudi za analizo vpliva vodnih zgradb na rečno morfologijo. 2D hidravlični modul deluje v stacionarnem, kvazi stacionarnem ali nestacionarnem režimu (Jia in Wang, 2001).

"V primeru lebdečih plavin je pomembno, da model CCHE2D omogoča transport plavin v neravnotežnem stanju. Prednost modela je tudi simulacija neenakomernih mešanic sedimenta različnih frakcij." (Hojnik, 2010).

CCHE2D sestavljajo numerični model, generator mreže (CCHE2D Mesh Generator) in grafični vmesnik (CCHE2D-GUI) (Zorkeflee in sod., 2006). Shema povezanosti procesov je prikazana na sliki 2. V prilogi A pa je prikazan postopek izvedbe simulacije z modelom CCHE2D.



Slika 2: Programsko okolje CCHE2D. Prikazana je povezanost posameznih procesov pri pripravi 2D hidravličnega modela

CCHE2D Mesh Generator služi pripravi strukturirane krivočrtne mreže na podlagi topografije in znanih višinskih podatkov. Navadno je podlaga na kateri se izdelava mreža za digitalni model reliefa (Zorkeflee in sod., 2006).

Proces priprave mreže je sledeč:

- definicija mej blokov (zunanje in notranje meje),
- generiranje algebraične mreže,
- generiranje numerične mreže (izboljšanje mreže),
- interpolacija višin.

CCHE2D-GUI je uporabniško grafično okolje za model CCHE2D s štirimi glavnimi funkcijami (Zorkeflee in sod., 2006):

- priprava in vnos začetnih in robnih pogojev,
- priprava parametrov modela,
- zagon simulacije in
- pregled rezultatov v tabelarični in grafični obliki.

Dvodimenzijski hidrodinamični model temelji na reševanju dveh dinamičnih enačb v x in y smereh ter kontinuitetne enačbe po metodi upoštevanja učinkovitih (aktivnih) elementov (Zhang, 2006).

Dinamični enačbi v x in y smeri:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor} \cdot v \quad (24)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{Cor} \cdot u \quad (25)$$

Kjer pomeni:

u, v po globini povprečni komponenti hitrosti v x in y smeri,

t čas,

g gravitacijski pospešek,

Z nadmorska višina vodne gladine,

ρ gostota vode,

h globina vode,

f_{Cor} Coriolisov koeficient,

τ_{xx} τ_{xy} τ_{yx} τ_{yy} Reynoldsove napetosti,

τ_{bx} τ_{by} strižni napetosti ob dnu.

Reynoldsove napetosti v dinamični enačbi so aproksimirane po Boussinesquovi metodi, kjer ν_t pomeni kinematični koeficient turbulentne viskoznosti:

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (26)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (27)$$

$$\tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (28)$$

Prosta gladina vode je računana po kontinuitetni enačbi:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (29)$$

Kjer pomeni:

Z nadmorska višina vodne gladine,

h globina vode.

Za izračun turbulentne viskoznosti je možno izbirati med tremi modeli turbulence in sicer parabolčni model, model mešalne dolžine in k- ϵ model. Podana je enačba mešalne dolžine, ki je bila v diplomi uporabljena za simulacije.

Enačba mešalne dolžine za izračun koeficienta turbulentne viskoznosti:

$$v_t = \bar{l}^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \quad (30)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{h} \int \kappa z \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h} \right)} dz = \kappa h \int_0^1 \zeta \sqrt{1 - \zeta} d\zeta \approx 0.267 \kappa h \quad (31)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = C_m \frac{U^*}{\kappa h} \quad (32)$$

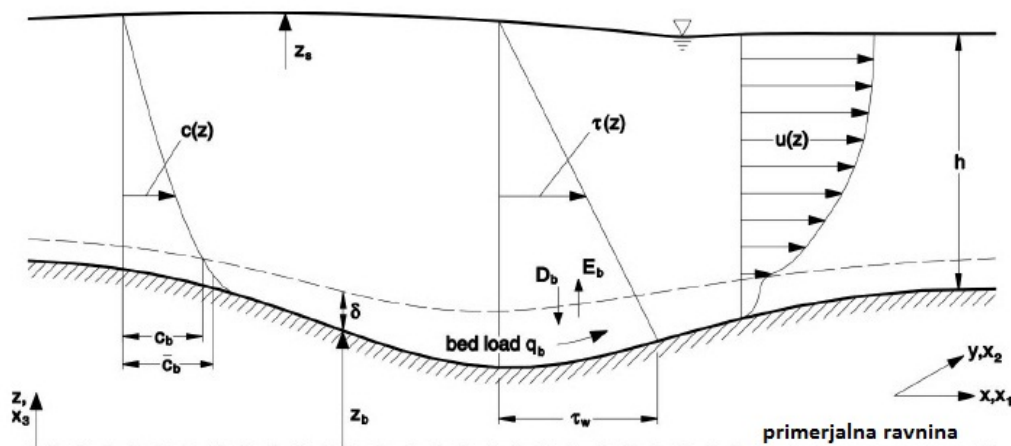
Kjer pomeni:

$\frac{\partial U}{\partial z}$ po globini povprečen gradient hitrosti v vertikalni smeri,

C_m koeficient z vrednostjo 2.34375

Za simulacijo transporta plavin v neravnovesnem stanju so omogočeni trije pristopi. Prvi je tip enačbe za rinjene plavine, kjer gre za reševanje kontinuitetne enačbe (v bistvu gre samo za konvekcijo). Drugi je tip enačbe za lebdeče plavine (konvekcija – difuzija), in tretji je pristop z obema tipoma enačbe, ki se rešujeta vsaka posebej. V tem primeru pa na voljo niso vse empirične transportne enačbe, ampak le ena (Wu, 2001).

Za vse tri pristope se računa tudi spreminjanje dna, ki temelji na pristopu z več sloji. Najnižje se nahaja ne - erodibilni sloj, nad njim pa sta podpovršinski sloj ter mešalni sloj. V mešalnem sloju prihaja do izmenjave sedimentov med vodo in rečnim dnom (Wu, 2001).



Slika 3: Potek transporta sedimentov. Globina vode je razdeljena na sloj rinjenih plavin in sloj lebdečih plavin. Diagrami si od leve proti desni sledijo: vertikalna porazdelitev koncentracije lebdečih plavin $c(z)$, vertikalni profil strižnih napetosti $\tau(z)$ in porazdelitev hitrosti $u(z)$. (Wu, 2001, 3)

Tridimenzionalna konveksijsko – difuzijska enačba za transport sedimentov je naslednja:

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{\partial(uc_k)}{\partial x} + \frac{\partial(vc_k)}{\partial y} + \frac{\partial(wc_k)}{\partial z} - \frac{\partial(\omega_{sk}c_k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial z} \right) \quad (33)$$

Kjer pomeni:

- c_k koncentracija k-te frakcije sedimentov,
- u, v, w komponente hitrosti v x, y in z smeri,
- ω_{sk} hitrost usedanja delcev plavin k-tega razreda,
- ε_s turbulentna difuzija sedimentov.

Konveksijsko - difuzijska enačba za transport lebdečih plavin, pri kateri se upošteva, da je krovni sloj (bed-load zone) veliko manjši od globine vode vodotoka ($\delta \ll h$), se zapiše kot:

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) + E_{bk} - D_{bk} \quad (34)$$

Kjer pomeni:

- h globina vode,
- C_k po globini povprečna koncentracija lebdečih plavin,
- U, V po globini povprečni hitrosti toka v x in y smeri,
- E_{bk} sproščanje k-tega razreda sedimentov,
- D_{bk} usedanje k-tega razreda sedimentov.

$$E_{bk} - D_{bk} = \alpha \omega_{sk} (C_{*k} - C_k) \quad (35)$$

Integracija tridimenzionalne enačbe vodi do kontinuitetne enačbe rinjenih plavin:

$$(1 - p') \frac{\partial Z_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial(\delta \bar{c}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial q_{bkx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bky}}{\partial y} = -E_{bk} + D_{bk} \quad (36)$$

$$q_{bkx} = \alpha_{bx} q_{bk} \quad (37)$$

$$q_{bky} = \alpha_{by} q_{bk} \quad (38)$$

Kjer pomeni:

p'	poroznost materiala,
c_{bk}	povprečna koncentracija plavin v krovnem sloju,
q_{bkx} , q_{bky}	komponenti stopnje transporta rinjenih plavin v x in y smeri,
q_{bk}	stopnja transporta rinjenih plavin k-tega zrna,
α_{bx} , α_{by}	smeri premikanja rinjenih plavin,
δ	debelina krovnega sloja.

Enačba za spremembo dna:

$$(1 - p') \frac{\partial Z_{bk}}{\partial t} = \alpha \omega_{sk} (C_k - C_{*k}) + (q_{bk} - q_{b*k})/L_t \quad (39)$$

Kjer pomeni:

C_{*k}	po globini povprečna koncentracija v ravnovesnih pogojih,
α	razmerje med koncentracijo pri dnu in po globini povprečno koncentracijo,
L_t	adaptacijska dolžina plavin (rinjenih in lebdečih).

Upoštevanje relacije enačbe za spremembo dna v kontinuitetni enačbi rinjenih plavin pripelje do enačbe za premeščanje rinjenih plavin:

$$\frac{\partial(\delta \bar{c}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial q_{bkx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bky}}{\partial y} + \frac{1}{L_t} (q_{bk} - q_{b*k}) = 0 \quad (40)$$

Enačba za sortiranje frakcij:

$$\frac{\partial(\delta_m p_{bk})}{\partial t} = \frac{\partial Z_{bk}}{\partial t} + p_{bk}^* \left(\frac{\partial \delta_m}{\partial t} - \frac{\partial Z_b}{\partial t} \right) \quad (41)$$

Kjer pomeni:

p_{bk} gradacija materiala v mešalnem sloju,

δ_m debelina mešalnega sloja,

$\partial Z_b / \partial t$ stopnja spreminjanja dna struge,

p_{bk}^* gradacija materiala v podpovršinskem sloju.

Parametri v enačbi za sedimente se računajo po znanih empiričnih enačbah za nevezane sedimente. Uporabljeni modeli so modificirani zapisi Ackers & White, SEDTRA, Wu & Wang & Jia in modificirani Engelung & Hansen. Vsi modeli so empirični, izpeljani na osnovi omejenega števila meritev različnih vzorcev plavin in hidravličnih razmer (Wu, 2001).

Model Wu & Wang & Jia, ki je bil tudi uporabljen v našem primeru, je bil izpeljan leta 2000 na podlagi laboratorijskih in terenskih meritev za neenakomerno sestavo plavin in sicer posebej za rinjene in posebej za lebdeče plavine. Pri rinjenih plavinah znaša razpon uporabljenega premera zrn med 0.062 in 128 mm ter globine vode do 4.4 m. Pri lebdečih plavinah znaša razpon premera zrn med 0.01 in 2.37 mm ter globine vode do 4 m.

Podani sta enačbi za transportno sposobnost rinjenih (enačba 42) in lebdečih plavin (enačba 43), uporabljeni v modelu Wu & Wang & Jia (Wu, 2001):

$$\phi_{bk} = 0.0053 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \frac{\tau_b}{\tau_{ck}} - 1 \right]^{2.2} \quad (42)$$

Kjer je ϕ_{bk} brezdimenzijska transportna sposobnost rinjenih plavin, n je Manningov koeficient hrapavosti, n' je Manningov koeficient hrapavosti zrn, τ_b je strižna napetost dna in τ_{ck} je kritična strižna napetost.

$$\phi_{sk} = 0.0000262 \left[\left(\frac{\tau}{\tau_{ck}} - 1 \right) \frac{U}{\omega_{sk}} \right]^{1.74} \quad (43)$$

Kjer je ϕ_{sk} transportna sposobnost lebdečih plavin, τ je strižna napetost celotnega prečnega prereza, τ_{ck} je kritična strižna napetost, ω_{sk} je hitrost usedanja delcev in U je povprečna hitrost vodnega toka.

Dolžina umiritve delcev rinjenih plavin, ki ponazarja dolžino na kateri sedimenti preidejo iz ne ravnotežnega v ravnotežno stanje, je zelo pomemben parameter pri računu transporta sedimentov v neravnotežnem stanju (Wu, 2001).

Adaptacijski koeficient α je izračunan po metodi Armanini in de Silvio:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{a}{h} + \left(1 - \frac{a}{h}\right) \exp\left[-1.5 \left(\frac{a}{h}\right)^{-1/6} \frac{\omega_{sk}}{u_*}\right] \quad (44)$$

Kjer a pomeni debelino spodnjega sloja [m], h je globina vode [m], ω_{sk} je hitrost usedanja delcev [m/s] in u_* je strižna hitrost na dnu [m/s]. Po tej metodi so vrednosti α po navadi večje od 1.

V praksi ima koeficient α različne vrednosti, velikokrat manjše od 1. Glede na raziskave so bile predlagane naslednje vrednosti: 1 v primeru močnega odlaganja, 0.25 v primeru močnega odnašanja, ter 0.5 v primeru majhnega odnašanja in odlaganja (Wu, 2001).

Pri transportnih enačbah gre v bistvu za opis hidravličnih parametrov, pri katerih se prične gibanje plavin. Transportna enačba pomeni empirični opis podatkov iz meritev. Pri uporabi je potrebno upoštevati razmere in območje parametrov v katerem so se nahajale meritve, na osnovi katerih je bila izpeljana transportna enačba (Hojnik, 2010).

2.8 Načini zajema topografskih podatkov

Digitalni model reliefa (DMR) se izdelava iz obsežnih meritev na terenu s pomočjo različnih metod daljinskega zaznavanja ali na podlagi klasičnih geodetskih meritev. Najnatančnejše modeliranje obvodnega prostora se lahko izvede iz točk izmerjenih s pomočjo tehnologije LIDAR (Light Detection And Ranging), ki v prevodu pomeni zaznavanje svetlobe in merjenje razdalj. Zajem podatkov tu poteka s pomočjo aktivnega senzorja v obliki laserskega tipala, pritrjenega na letalo, helikopter ali vesoljsko plovilo (Rak, 2006).

Tehnologija LIDAR omogoča merjenje razdalj, ki temelji na principu odboja svetlobnega pulza. Laser odda svetlobni pulz, ki se odbije od objekta nazaj proti senzorju. Čas potovanja svetlobnega pulza od laserja do objekta in nazaj, ter znana hitrost potovanja svetlobnega pulza omogoča izračun razdalje do objekta (Supej, 2008).

Rezultat meritev večkratnega preleta območja je mreža merjenih točk različne gostote. Na območjih, ker je topografija bolj razgibana, se z obdelavo točke po potrebi lahko zgosti. Prav to je razlog, da je geometrija zajeta z LIDAR tehnologijo za potrebe hidravličnega modeliranja veliko primernejša kot tista, zajeta z običajnimi metodami, kjer je sicer natančnost posamezne merjene točke lahko večja, natančnost celotnega opisa terena pa po navadi zaradi premajhne gostote meritev manjša (Müller, 2012).

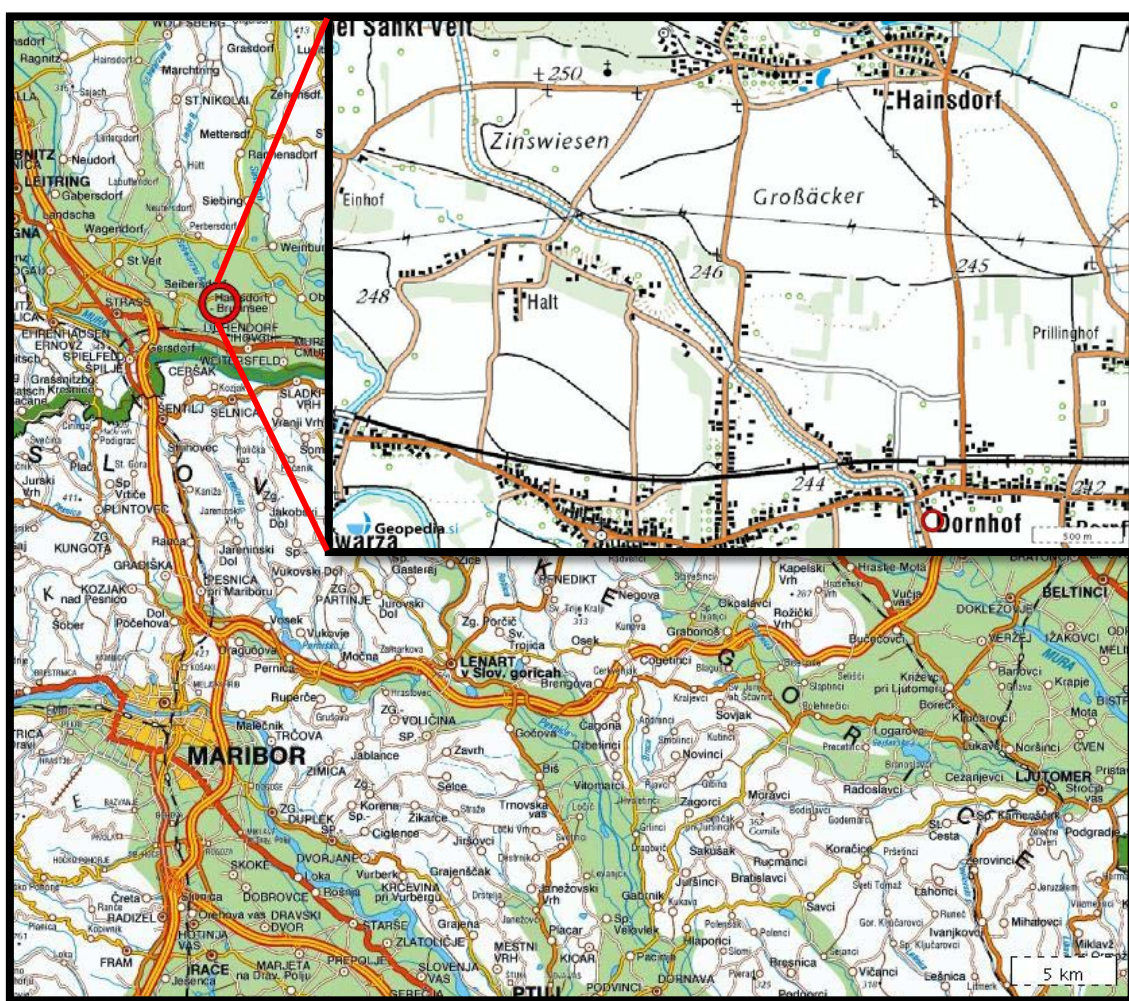


Slika 4: LIDAR sistem (Alemseged, 2005, 8)

Zaradi odboja laserskega žarka od gladine vode pa takšen način meritev topografije ni primeren za strugo vodotoka. Za ta del so še vedno potrebne meritve prečnih profilov ali izmera z globinomerom. Z združitvijo meritev topografije in batimetrije se tako dobi relativno natančno mrežo merjenih točk, na podlagi katerih se lahko izdelata digitalni model terena in struge (Müller, 2012).

3 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA IN VHODNI PODATKI

Območje se nahaja na porečju reke Mure v bližini naselja Dornhof v Avstriji. Obravnavan je 3.1 kilometra dolg odsek Murinega levega pritoka Schwarzaubach med naseljema Seibersdorf bei Sankt Veit in Dornhof. Območje je v zgornjem predelu omejeno s cesto, ki preko mostu poteka preko struge. Na spodnjem predelu pa je območje omejeno z železnico, ki prav tako poteka preko struge. Na izbranem odseku vodotoka sta še dva manjša avtomobilska mostova. Lokacija obravnavanega območja je prikazana na spodnji sliki.



Slika 5: Prikaz lokacije obravnavanega območja (Geopedia, 2013)



Slika 6: Prikaz območja modeliranja na podlagi ortofoto posnetka

Dolvodno od merilne postaje Lipsch ima vodotok Schwarzaubach dva manjša pritoka (Dorfgraben in Einbach), ki pa ju zaradi majhnosti ter pomanjkanja podatkov nismo upoštevali.

3.1 Osnovni vhodni podatki

Osnovni vhodni podatki, potrebni za hidravlično analizo, so natančno opisana topografija ter čim bolj točni hidrološki podatki. Topografske podatke se uporabi za definiranje geometrije modeliranega območja, hidrološke pa za določitev robnih pogojev na dotoku in iztoku iz modela. Kot zgornji robni pogoj se lahko uporabi konstanten dotok ali hidrogram, kot spodnji robni pogoj pa pretočno krivuljo ali višinsko koto vodne gladine.

Za izdelavo digitalnega modela terena obravnavanega območja so bili uporabljeni podatki LIDAR točk poplavnega območja ter meritve na terenu za zajem topografije struge (batimetrije). Podatki meritev so bili podani v obliki točk s koordinatami x , y in z . Ločljivost točk zajetih s tehnologijo LIDAR je 1 meter, medtem ko so bili prečni profili merjeni na 100 metrov vzdolž vodotoka ter kasneje interpolirani na vmesne razdalje 5 metrov.

- **Hidrološki podatki**

Za izdelavo diplomske naloge so bili uporabljeni hidrološki podatki vodomerne postaje Lipsch, ki se nahaja približno 3.5 km gorvodno od obravnavanega odseka vodotoka. Podatki o pretokih s povratnimi dobami 1, 5 in 10 let (Q1, Q5 in Q10) ter o velikosti povodja (129.5 km²) so objavljeni na spletni strani avstrijske štajerske (Das Land Steiermark...Datenbankabfrage, 2013), predstavljeni pa so v preglednici 6.

Preglednica 6: Pretoki s povratnimi dobami

Pretok [m³/s]	Povratna doba [leta]
19	1
37	5
47	10

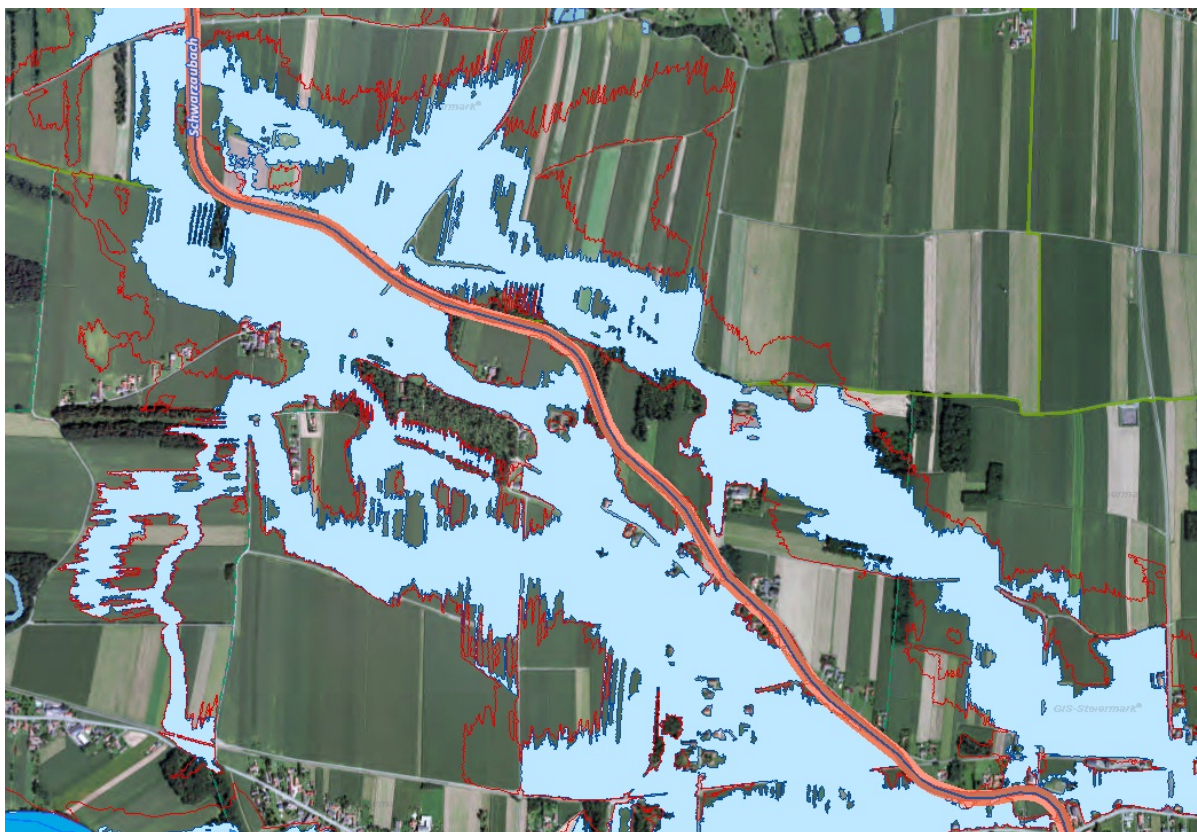
Ostali podatki o pretokih pa so povzeti iz publikacije poročila poplav (Das Hochwasserereignis) med leti 2005 in 2012. Podatki so prav tako merjeni na vodomerni postaji Lipsch. V spodnji preglednici so zbrani podatki o času meritve, pretoku ter pripadajoči povratni dobi.

Preglednica 7: Pretoki s povratnimi dobami ter datumom meritve

Datum meritve	Pretok [m³/s]	Povratna doba [leta]
21. avgust 2005	53	15
8. februar 2009	33	4
24. junij 2009	110	200
18. julij 2009	61	25
4. avgust 2009	74	50
5. november 2012	60	25

Uporabljen je bil tudi podatek o pretoku s povratno dobo 100 let, hidravlične študije podjetja Donau Consult, ki znaša 92 m³/s (Donau Consult, 2013). Podatek nam je služil za primerjavo z izračunanim 100 letnim pretokom, ki je bil prav tako kot 500 letni dobljen z ekstrapolacijo logaritmične trendne črte. Postopek izračuna pretokov je prikazan v poglavju 4.7.1.

Na spletni strani avstrijske štajerske (Das Land Steiermark...digitaler atlas, 2013) je bil v digitalnem atlasu pridobljen tudi grafični podatek poplavnih linij visokih voda s povratnimi dobami 30, 100 in 300 let. Podatek o obsegu poplave pri pretoku s 100 letno povratno dobo je bil uporabljen za umerjanje koeficienta hrpavosti n_G vodotoka in poplavnih površin.



Slika 7: Obseg poplave – Modra območja predstavljajo obseg poplavljenosti pri pretoku Q_{100} , rdeča črta pa pri pretoku Q_{300} (Das Land Steiermark, 2013)

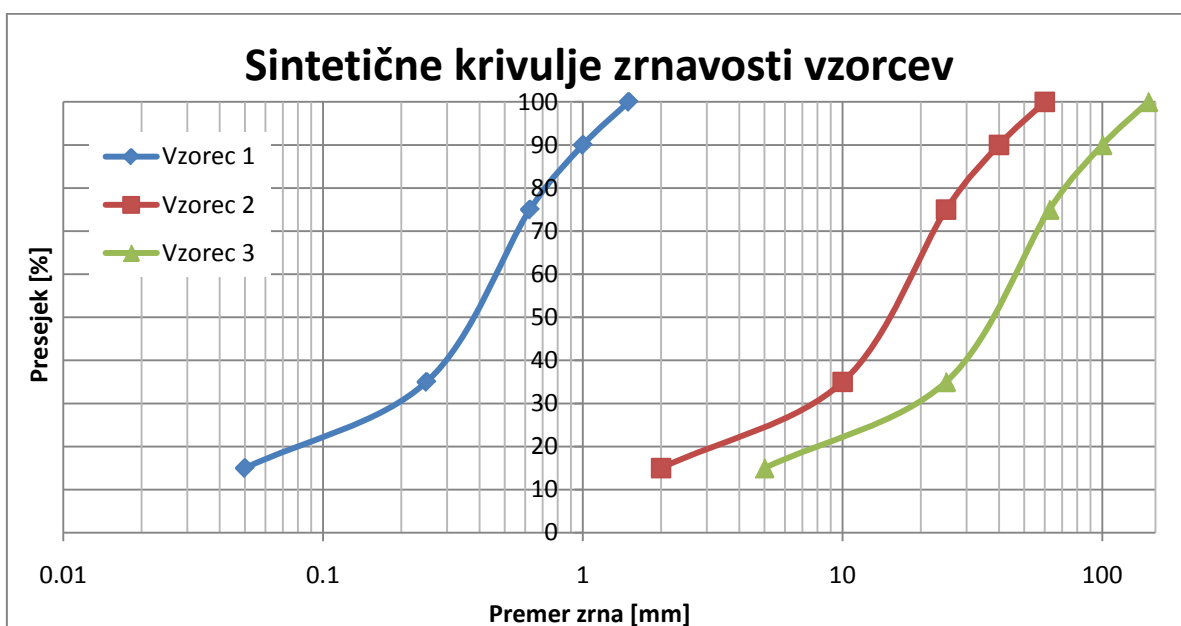
- **Q/h krivulja**

Poleg vhodnih dotokov je za izračun potreben tudi spodnji robni pogoj. Uporabljena je bila pretočna krivulja za dolvodni stalni enakomerni tok, ki je bila dobljena s simulacijo stalnega enakomernega toka v programu HEC-RAS. Pretočna krivulja $Q = f(h)$ je bila določena na prečnem prerezu, kjer železniški most prečka vodotok.

Ker pa program CCHE2D ne omogoča modeliranja mostov in prepustov, je bil na teh lokacijah upoštevan le teren brez premostitvenih konstrukcij. Mostne stebre je možno modelirati z dvigom celic, kjer se nahajajo mostni stebri. Zaradi pomanjkanja podatkov o mostni konstrukciji pa je bilo predpostavljeno, da gre za most brez mostnih stebrov.

3.2 Podatki o lastnostih sedimentov

Za račun transporta sedimentov so potrebni podatki o koncentraciji lebdječih plavin, o specifični prodonosnosti rinjenih plavin ter o granulometrijski sestavi plavin. Ker potrebnih podatkov ni bilo na voljo, so bili predpostavljeni 3 sintetični vzorci, kjer je zastopanih 5 frakcij materiala. Število frakcij naj ne bi bilo več kot 5, saj se z večjim številom frakcij učinkovitost izračuna močno zmanjša (Zhang, 2006). Na spodnji sliki so prikazani 3 vzorci, ki so bili uporabljeni v analizi občutljivosti.



Slika 8: Sintetični vzorci, opisani z zrnavostno krivuljo

V nadaljevanju (4. poglavje) je opisano za kateri vzorec smo se odločili, da se ga uporabi v simulaciji transporta sedimentov ter kateri kriteriji so bili pri tem upoštevani.

3.3 Raba tal

Na obravnavanem območju prevladujejo travniki in obdelovalne površine. Majhen delež, v primerjavi z obdelovalnimi površinami, predstavljajo naseljena območja ter gozdne površine. Naseljenost na desni strani vodotoka večinoma prevladuje v oddaljenosti 300 metrov od vodotoka.



Slika 9: Ortofoto obravnavanega območja (Google maps, 2013)

V spodnjem predelu območja je poselitev tudi v neposredni bližini vodotoka. Naselja povezujejo asfaltirane prometnice, dostop do obdelovalnih površin pa omogočajo manjše lokalne poti.

Na podlagi ortofoto posnetka je bila povzeta raba zemljišč obravnavanega območja. Za potrebe hidravličnih izračunov je bil vpliv rabe tal zajet s koeficienti hrapavosti n_G v numeričnih celicah. Porazdelitev območij z različno rabo zemljišč je prikazana na sliki 10.



Slika 10: Raba tal obravnavanega območja kot podlaga za določitev koeficientov hrapavosti

Za določitev primerne vrednosti Manning-ovega koeficienta hrapavosti je potrebno poznati faktorje, ki nanj vplivajo. Še posebej v realnih razmerah je ta funkcija več spremenljivk. Velik vpliv na vodni tok ima zagotovo hrapavost struge, ki je odvisna od velikosti materiala na obodu. Velik vpliv na hrapavost ima tudi zarast v vodotoku, ki zaustavlja tok in predstavlja oviro vodnemu toku. Vpliv je odvisen od gostote, porazdelitve ter tipa zarasti in globine ter hitrosti vodnega toka. Nujno je upoštevanje naštetega pri manjših, ne redno vzdrževanih vodotokih. Raznolikost oblike rečne struge vzdolž vodotoka je po navadi posledica naplavljanja ali pa izpodjedanja brežin. Poleg prisotnosti zaprek, zastojev zaradi debel ali zdrsov materiala je koeficient hrapavosti odvisen tudi od sprememb vzdolž krivine, posebno če gre za meandre majhnih polmerov. Na povečanje koeficienta vpliva tudi nenehno spreminjanje oblike kanala, ki ga povzročata transport plavin in izpodjedanje. V večini vodotokov se vrednost n_G zmanjša v primeru povečanja vodostaja in pretoka. Takrat so nepravilnosti v koritu, ki imajo velik vpliv pri nizkih vodostajih, prekrite z vodo. Pri višjih vodostajih in pretokih se vrednost n_G povečuje v primerih, ko so brežine hrapave ali zarasle na višjih predelih oz. v primeru prisotnosti oblikovanega upora stebel oz. krošenj zarasti ali mostnih stebrov, kjer se z vodostajem veča tudi natočna površina. Koeficient hrapavosti se največkrat določa na podlagi izmerjenih pretokov, poteka gladin in karakteristik vodotoka. Lahko ga pa določimo tudi na podlagi izkustvenih vrednosti, ki so podane v različni literaturi (Steinman, 1999).

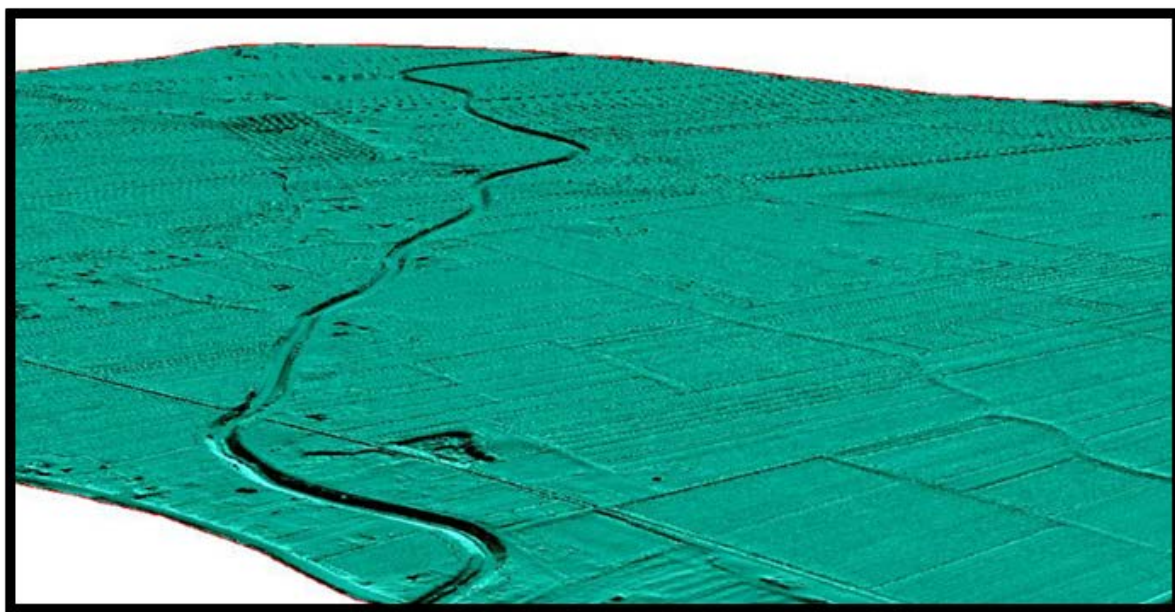
4 HIDRAVLIČNA ANALIZA

Za hidravlično analizo je bilo treba najprej pripraviti digitalni zapis topografije. Izračunani so bili statistični pretoki, kateri so potrebni za analize (Q10, Q100, Q500). S programom HEC-RAS pa je bila izračunana pretočna krivulja kot spodnji robni pogoj. Predpostavljen je bil tudi vzorec materiala, ki sestavlja strugo vodotoka. Priprava geometrijskih podatkov je potekala v orodju ArcGIS, simulacije toka in transporta plavin pa v dvodimenzionalnem hidravličnem modelu CCHE2D.

4.1 Generiranje numerične mreže

Osnova za pripravo modela je digitalni model reliefa, ki se ga z uporabo ArcGIS-ovega orodja Arc Toolbox zapiše v ASCII (American Standard Code for Information Interchange) obliki, da se ga lahko uporabi v programu CCHE2D. ASCII datoteka vsebuje (x, y, z) informacije za vse višinske točke v modelu.

Združitev podatkov poplavnih površin in batimetrije je bila osnova za izdelavo DMT v obliki nepravilne TIN mreže (po Delaunayevi metodi), ter iz te, s pomočjo rasterizacije, še rastrski DMT (po metodi naravnih sosedov). DMT v obliki TIN je prikazan na sliki 11. Pripravljeni DMT z ločljivostjo celic 1 metra je bil osnova za hidravlično modeliranje s programom CCHE2D.



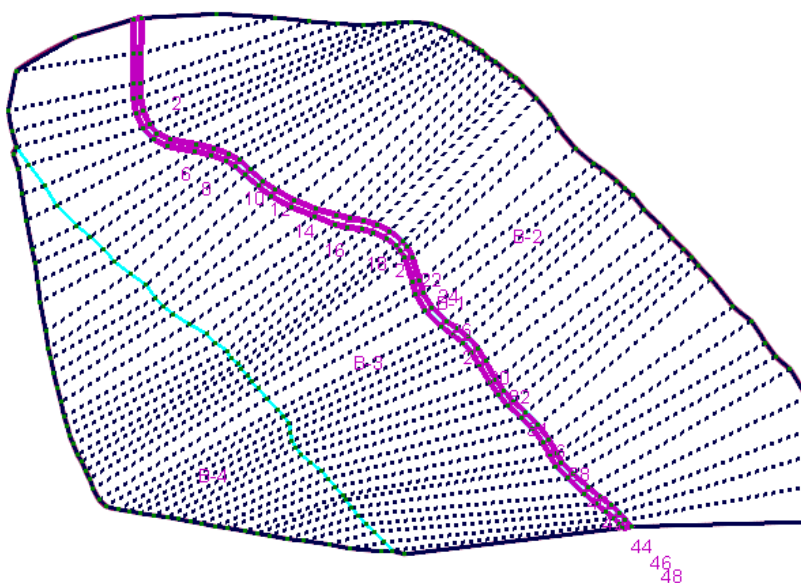
Slika 11: Digitalni model terena obravnavanega območja v obliki TIN

Sledi generiranje numerične mreže na podlagi pripravljene topografije ter batimetrije. Ta je sestavljena iz zunanjih in notranjih meja, pri katerih sta zgornja in spodnja meja neodvisni in služita za kontrolo pravilnosti podatkov o geometriji modela.

Prvi korak v postopku priprave mreže je izdelava bloka, ki s kontrolno mejo obda področje obravnave. Kontrolna meja je sklenjena krivulja, predstavljena s kontrolnimi točkami. Ker program za generiranje algebraične mreže uporablja metodo dveh meja (two-boundary method), je tudi blok predstavljen z dvema mejama.

Program omogoča več metod generiranja mreže in sicer eno algebraično in devet numeričnih metod. Za pripravo algebraične mreže so potrebni trije koraki. Najprej je potrebno določiti kontrolne bloke. V drugem koraku se določi informacije o mreži kot sta zaporedna številka bloka in velikost mreže (število vzdolžnih I_{max} in prečnih J_{max} črt, glede na smer toka). Za generiranje mreže je v diplomski nalogi uporabljena algebraična metoda.

Celotna mreža je v našem primeru sestavljena iz štirih blokov različnih velikosti. Mreže blokov so sestavljene iz 451 prečnih črt, ter 217 vzdolžnih črt. Blok, ki pokriva območje struge vodotoka, je sestavljen iz ožjih celic kot ostali trije bloki. Razlog je v bolj natančnem zapisu podatkov, saj se pri zapisu v manjšo celico izgubi manj podatkov.

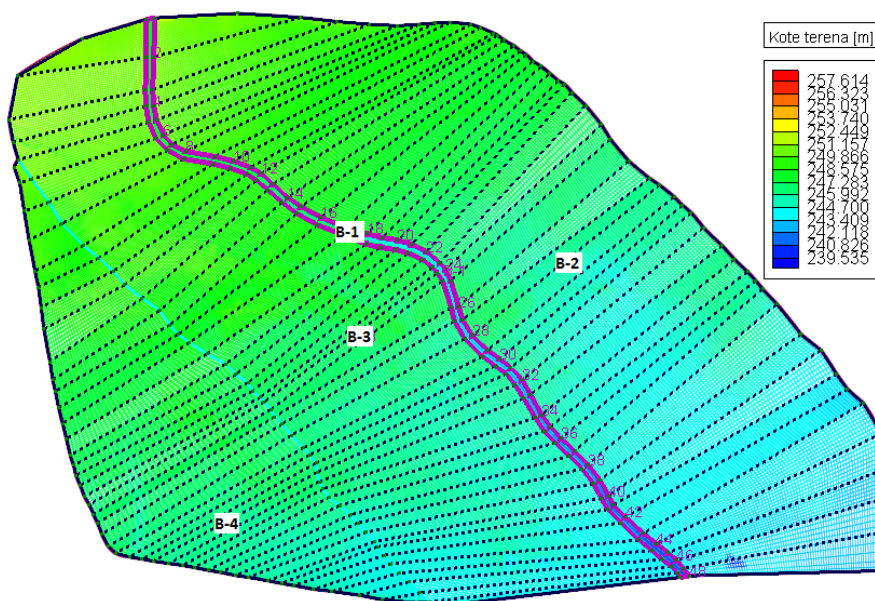


Slika 12: Izdelana numerična mreža, sestavljena iz štirih blokov

Z orodjem za oceno mreže se dobi podatek o minimalnih in maksimalnih dolžinah celic v I in J smeri (od 0.79 m do 20.6 m v primeru vzdolžnih celic in od 1.8 m do 36 m v primeru prečnih celic). Blok, ki omejuje geometrijo vodotoka je sestavljen iz celic velikosti približno 7.5 m x 1.0 m, celice ostalih blokov pa težijo k bolj kvadratni obliki, velikosti 10 m x 10 m. Numerična mreža vsebuje $217 \times 451 = 97867$ vozlišč.

Interpolacija višin točk struge je pomemben korak, če hočemo, da bo mreža uporabna za nadaljnje delo. Ta pripiše osnovne podatke iz digitalnega modela reliefa na vozlišča mreže. Pri tem ima veliko vlogo struktura baze topografskih podatkov. Ta se deli na strukturirano in naključno bazo podatkov. Prva je dobro organizirana z merjenimi podatki prečnih prereзов, medtem ko so v drugi podatkovne točke naključno razporejene. Program uporablja dve interpolacijski metodi, to sta metoda utežne kvadratne razdalje (IDW) in ploskovna metoda. Na voljo sta dva interpolacijska algoritma tako za nestrukturirano bazo podatkov kot za strukturirano bazo podatkov. Pri prvi je najprej uporabljena Delaunayjeva triangulacija, nato pa ploskovna metoda interpolacije. Za strukturirano bazo podatkov pa je uporabljen poseben algoritem, ki se imenuje strukturirana interpolacija, za katero pa potrebujemo izmerjene prečne prereze. Ko je strukturirana mreža ustvarjena, se uporabi še metoda IDW (inverse distance weighting) za interpolacijo višinskih podatkov.

Po uspešnem generiranju numerične mreže in pripisa višinskih podatkov ogliščem si lahko mrežo ogledamo ter jo po potrebi tudi izboljšamo. Imamo možnost dodajanja, brisanja in premikanja mrežnih črt ter pripisovanja vrednosti posameznim mrežnim celicam.



Slika 13: Numerična mreža na kateri so vidni posamezni bloki ter notranje kontrolne meje (črtkano)

Poleg informacij o geometriji, vsebuje datoteka v katero je shranjena mreža, tudi informacije o začetnih pogojih toka, tj. začetne gladine in začetne kote terena. Te informacije pa se lahko pripiše kasneje v grafičnem vmesniku CCHE2D GUI. Pripravljeno mrežo se shrani v datoteko, ki je osnova za nadaljnje delo v CCHE2D GUI.

4.2 Programsko orodje CCHE2D-GUI

Geometrijsko datoteko, izdelano z generatorjem mreže, se odpre z grafičnim vmesnikom CCHE2D-GUI, kjer uporabnik nastavi vhodne podatke ter potrebne parametre preko grafičnih ikon in menijev. Za potrebe diplomske naloge so bile izvedene štiri simulacije pri različnih dotokih. V treh primerih je bil simuliran samo tok vode pri pretokih Q10, Q100 in Q500, v enem primeru pa tudi transport sedimentov pri pretoku Q100. Vhodni podatki, ki so opisani v nadaljevanju, so bili uporabljeni za vse štiri izračune.

- **Začetni pogoji toka**

Začetne gladine (Initial Water Surface) so bile predpostavljene na podlagi višin dna struge na spodnjem in zgornjem delu vodotoka, kjer se nahajajo robni pogoji. Da se je simulacija v programu izvedla, je bilo potrebno na območju struge vodotoka predpostaviti nadmorsko višino vodne gladine na vtoku in iztoku. Gladini na vtoku je bila pripisana vrednost 251 m.n.v., kar je za 2.5 m višja vrednost od kote dna struge (248.5 m.n.v.). Gladini na iztoku pa je bila pripisana vrednost 250 m.n.v. Nato se z ukazom za interpolacijo linearno interpolira novo dodeljene vrednosti po celotni dolžini struge.

- **Lastnosti podlage**

Kot že omenjeno, so bili koeficienti hrapavosti površja določeni na podlagi ortofoto posnetka. Za potrebe hidravličnih izračunov je bil vpliv rabe tal zajet s koeficienti hrapavosti n_G . V pomoč so nam bile predlagane vrednosti koeficientov n_G (Brunner, 2010). Za območja naselij pa so bile uporabljene enake vrednosti kot v študiji Urban Flood Risk Management (Müller in sod., 2011). Uporabljene vrednosti koeficientov hrapavosti so prikazane v spodnji preglednici.

Preglednica 8: Vrednost koeficienta hrapavosti glede na rabo zemljišč ter izračunana strižna napetost pri pretoku Q100

Raba zemljišča	Koeficient hrapavosti n_g [-]	Strižna napetost [N/m ²]
Vodotok	0.033	Ok. 60, max 210
Obdelovalne površine / travniki	0.062	< 20
Hiše / naselje	0.2	5
Gozd	0.1	< 15

Za erodibilnost tal je bila vzeta vrednost 1 za celoten model. Ta vrednost pomeni, da na obravnavanem območju lahko pride do erodiranja. Maksimalna debelina odloženega sloja je bila nastavljena na (namenoma veliko) vrednost 90.0 m. S tem smo omogočili, da se v vsakem oglišču mreže začetna kota terena lahko hipotetično zviša za 90 m. Debelina dna je bila prav tako določena za celoten model. Opisana je s tremi sloji, pri čemer je zgornji (mešalni sloj) debel 0.05 m, spodnja dva pa po 1 m.

- **Parametri simulacije toka**

Čas simulacije ter časovni korak se podata v sekundah. Časovni korak je bil zmanjševan dokler simulacija ni bila stabilna. Začetna simulacija se izvede v načinu imenovanem "cold start", pri čemer se upošteva, da so predhodno določene gladine in začetne hitrosti enake 0. Vse nadaljnje simulacije pa potekajo iz predhodnih simulacij (način imenovan "hot start"). Začetna simulacija v primeru transporta plavin se izvede iz rezultata simulacije toka. Uporabljen model turbulence je bil model mešalne dolžine (Mixing Length Model), za koeficient turbulentne viskoznosti je bila izbrana vrednost 1. Pri določitvi oziroma izračunu koeficientov hrapavosti pa je bila izbrana možnost, ki omogoča, da program uporabi podatke, ki so zapisani v geometrijski datoteki modela (Preglednica 8).

- **Parametri sedimentov**

Kot že omenjeno v poglavju 3.2, na voljo ni bilo podatkov o sestavi tal v vodotoku in na obvodnem prostoru. Zato so bili izdelani 3 sintetični vzorci s petimi frakcijami. Za kriterij pri izbiri vzorca je bila uporabljena enačba (22) za prehod plavin iz rinjenega v lebdeče gibanje.

Potrebni podatki:

- v_m srednja hitrost vode [3 m/s].
 g težnostni pospešek [9.81 m/s²],
 d premer zrna [m].

Preoblikujemo enačbo (23) in dobimo:

$$d = \frac{v_m^2}{g \cdot 360} = \frac{(3 \text{ m})^2}{360 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.00255 \text{ m} = 2.55 \text{ mm}$$

Za vzorec 1 je bilo ugotovljeno, da vse frakcije preidejo v lebdeče gibanje. V vzorcu 2 kot lebdeče plavine sodeluje le najmanjša frakcija, v vzorcu 3 pa do prehoda v lebdeče gibanje ne pride. Odločili smo se, da bo v simulaciji uporabljen vzorec 2, ker je, glede na dani kriterij, zastopan prenos tako lebdečih kot rinjenih plavin. Velikostne razrede vzorcev se definira s podatkom o srednjem premeru zrn. Predpostavljen je bil tudi delež posamezne frakcije v sestavi tal (Preglednica 9). Poroznost uporabljenega materiala se določi za celoten vzorec, izbrana je bila privzeta vrednost 0.4.

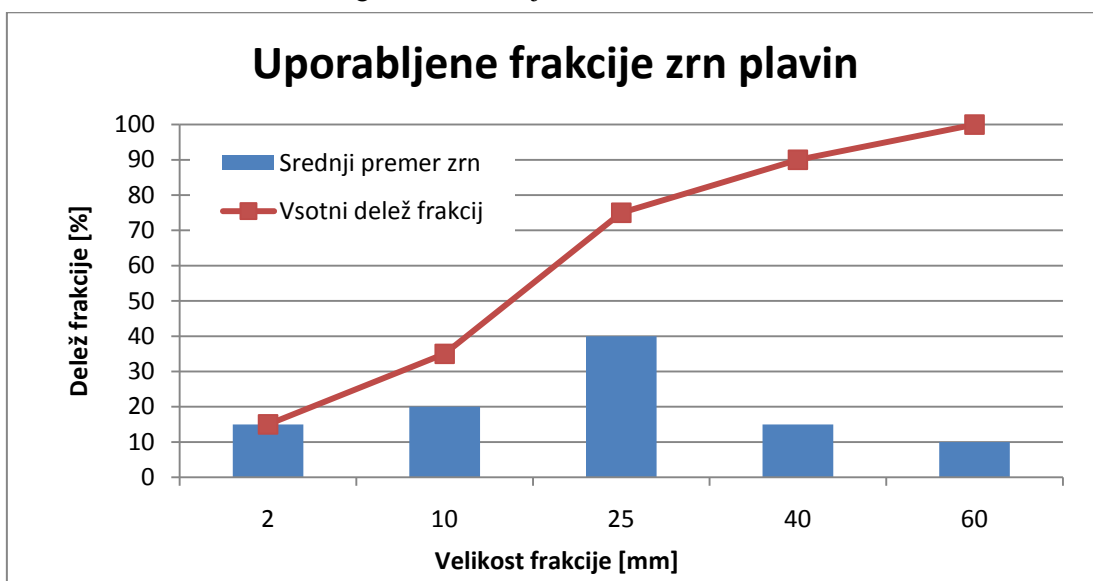
Preglednica 9: Uporabljene frakcije v sintetičnem vzorcu, ki ponazarjajo sestavo dna

Srednji premer zrna [mm]	Delež v sestavi [-]	Opis
2	0.15	Pesek
10	0.20	Prod
25	0.40	Prod
40	0.15	Prod
60	0.10	Prod /Grušč

Glede na rezultat zgornje enačbe se lahko rinjene plavine, manjše od 2.55 mm, premeščajo kot lebdeče plavine. Za izbrani sintetični vzorec se tako upošteva dotok lebdečih plavin velikostnega razreda do 2 mm. Ob tem je bila predpostavljena tudi koncentracija lebdečih plavin na dotoku, in sicer 1 kg/m³.

Predpostavljeno je bilo, da v območje modela v primeru rinjenih plavin dotekajo enake frakcije kot so bile uporabljene za sestavo dna. Prav tako je bilo privzeto, da je delež frakcij dotekajočih rinjenih plavin enak deležu frakcij v sestavi dna (Preglednica 9).

Grafikon 1: Sestava sintetičnega vzorca zemljine



Specifična premestitvena zmogljivost q_B je bila ocenjena z uporabo enačbe (15). Za izračun so bili uporabljeni sledeči podatki:

d_{50} premer zrn pri presejku 50% [0.0135 m],

d_{90} premer zrn pri presejku 90% [0.04 m],

ρ_s gostota plavin [2650 kg/m³],

ρ gostota vode [1000 kg/m³],

g težnostni pospešek [9.81 m/s²],

ν kinematična viskoznost vode [1.31·10⁻⁶ m²/s],

τ strižna napetost [N/m²],

τ_{cr} kritična strižna napetost po Shieldsu [N/m²],

Θ_{cr} kritična strižna napetost [0.055],

u hitrost vode [3 m/s],

C' Chezyjev koeficient hrapavosti [],

h globina vode [3 m],

T parameter strižne napetosti ob dnu [-],

D_* brezdimenzijski premer zrn [-],

q_B specifična premestitvena zmogljivost [m³/m·s].

Če potrebne podatke vnesemo v enačbe (16) – (22), dobimo:

$$q_B = 0.053 \sqrt{\left[\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)g\right]} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{2.1} = 0.0004983 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$$

$$D_* = d_{50} \left[(s - 1) \frac{g}{v^2}\right]^{\frac{1}{3}} = 285.23 \rightarrow \Theta_{cr} = 0.055 \text{ za } D_* > 150$$

$$T = \frac{\tau - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} = 2.71$$

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho)gd_{50}\Theta_{cr} = 12.01 \text{ N/m}^2$$

$$\tau = \rho g \left[u/C'\right]^2 = 44.6 \text{ N/m}^2$$

$$C' = 7.8 \ln\left(\frac{12h}{3d_{90}}\right) = 44.49$$

$$Q_b = q_B \rho_s = 1.32 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

Izračunana specifična prodonosnost znaša 1.32 kg/m/s.

Predpostavke v primeru lebdečih in rinjenih plavin:

- V območje modela dotekajo enake frakcije kot smo jih uporabili za sestavo tal
- Delež frakcij rinjenih plavin je enak deležu frakcij v sestavi dna
- V primeru lebdečih plavin doteka le najmanjša frakcija vzorca
- Transportna sposobnost rinjenih plavin je 1.32 kg/m/s
- Koncentracija lebdečih plavin je 1 kg/m³

Za račun transporta sedimentov je bil izbran pristop "Total load as bed load plus suspended load" kar pomeni, da so v izračunu zastopane rinjene in lebdeče plavine. Za sam izračun pa je bila izbrana empirična formula Wu et. al. Dolžina umiritve delcev rinjenih plavin je bila izbrana kot vrednost povprečne dolžine mrežne celice. Adaptacijskemu koeficientu lebdečih plavin α je bila predpostavljena vrednost 0.5. Za vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti so bile izbrane vrednosti določene v geometrijski datoteki (enake vrednosti kot pri simulaciji toka).

4.3 Robni pogoji

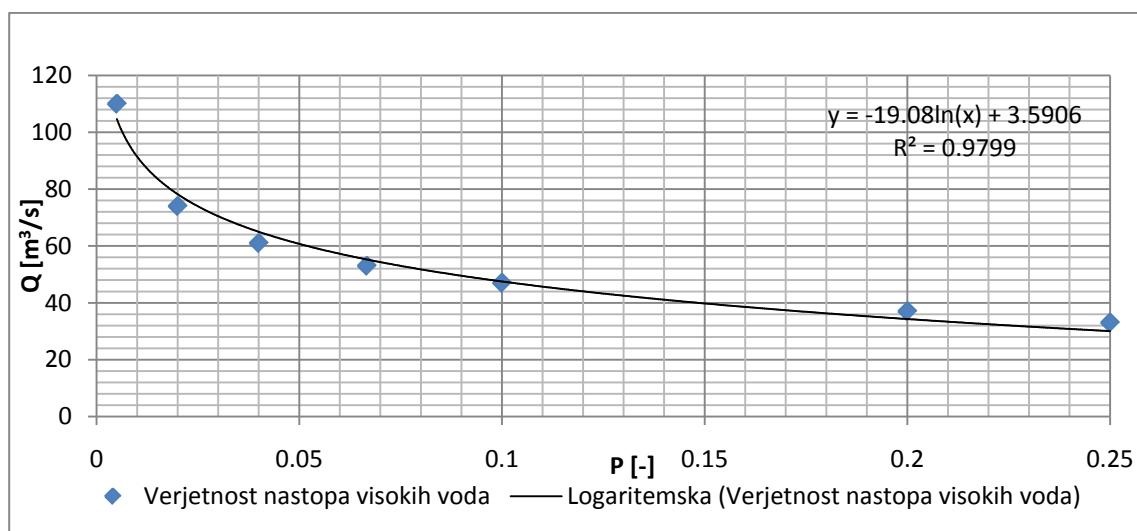
Robne pogoje (Boundary Conditions) se določi v dveh korakih (Zhang, 2006):

- Definiramo niz robnih vozlišč,
- Predpišemo robni pogoj

Pri določanju niza robnih vozlišč se izbere ali gre za zgornji oz. spodnji robni pogoj (Inlet / Outlet Boundary Node String). Za zgornji robni pogoj se lahko izbere vhodni pretok ali poda hidrogram. Pri podajanju spodnjega robnega pogoja pa so na voljo štiri možnosti. Odprt robni pogoj, kjer model poskuša določiti koto vodne gladine, znano koto vodne gladine, določi pa se lahko tudi pretočno krivuljo (Q/h krivulja) ali nivogram.

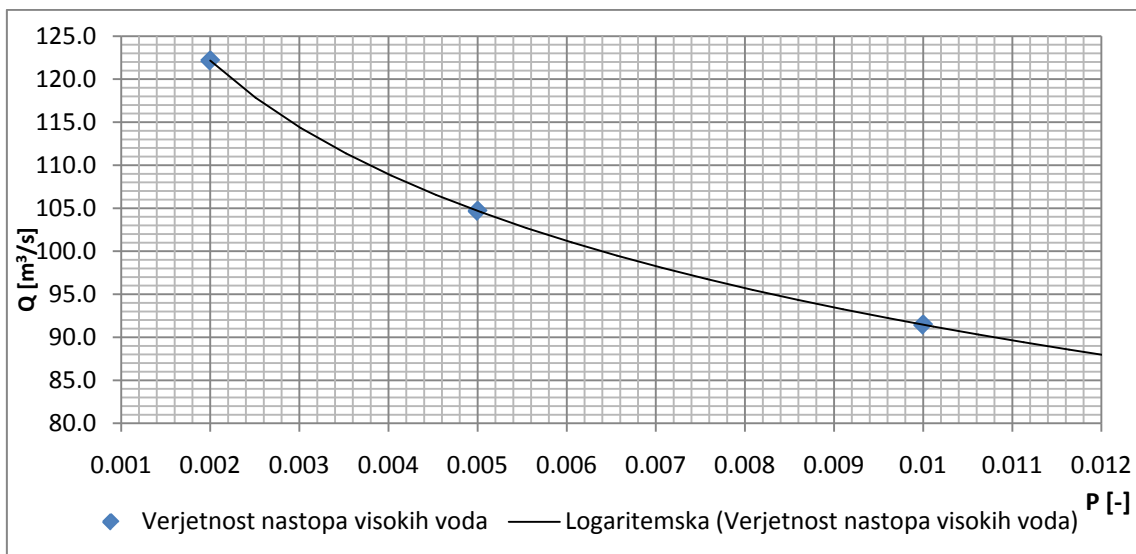
4.3.1 Hidravlični robni pogoj

V diplomski nalogi so bili kot zgornji robni pogoj uporabljeni pretoki z 10, 100 in 500 letno povratno dobo. Pretoki so bili izračunani s pomočjo enačbe logaritmične trendne črte, ki je bila določena v programu MS Excel, na osnovi podatkov iz preglednic 6 in 7. Zaradi boljšega ujemanja z zbranimi podatki je bil podatek o Q1 zanemarjen. Na grafikonu 2 je prikazana logaritmična trendna črta za pretoke z različno verjetnostjo pojava.



Grafikon 2: Logaritmična trendna linija in njeno ujemanje s podatki o pretokih

Z ekstrapolacijo grafa 2 je bil dobljen graf 3, iz katerega sta se odčitata pretoka z verjetnostjo pojava 0.01 (Q100) in 0.002 (Q500). Kot lahko tudi razberemo iz spodnjega grafa, znašata iskana pretoka 91.5 m³/s in 122.2 m³/s.



Grafikon 3: Ekstrapolacija trendne črte do pojava pretoka P = 0.002

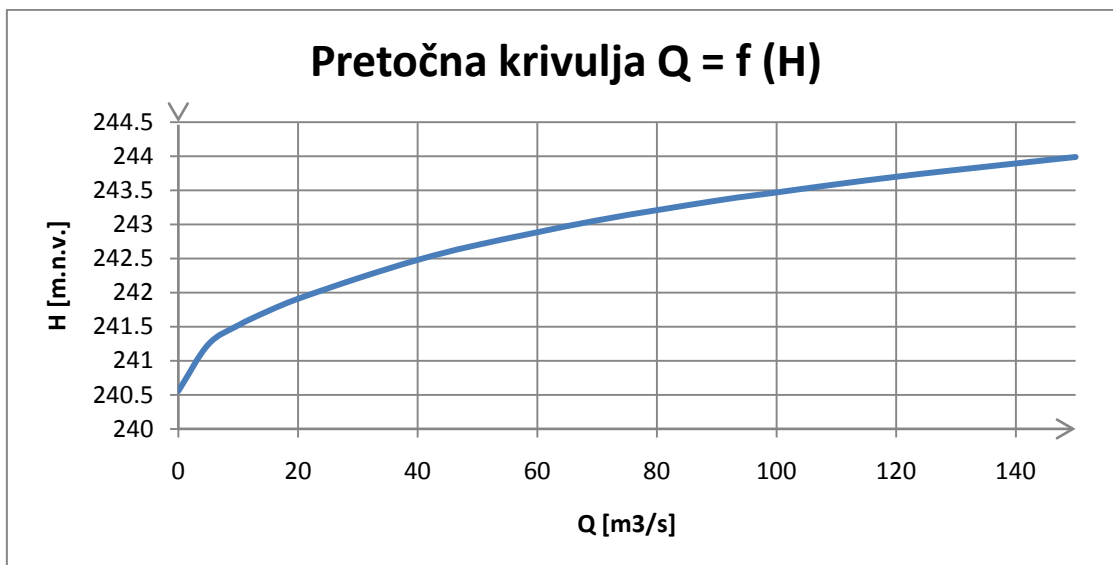
Uporabljene izračunane vrednosti pretokov visokih voda so predstavljene v preglednici 10. Izračunana pretoka Q10 in Q100 kažeta dobro ujemanje s pridobljenima podatkom Q10 in Q100 (poglavje 3.1). V obeh primerih je razlika 0.5 m³/s.

Preglednica 10: V izračunih uporabljeni pretoki s pripadajočimi povratnimi dobami

Povratna doba [leta]	Verjetnost pojava [-]	Pretok [m ³ /s]
10	0.1	47.5
100	0.01	91.5
500	0.002	122.2

Pretok s 500 letno povratno dobo je bil izračunan tudi po navodilih iz Pravidnika, ki se za površino povodja velikega med 100 km² in 1000 km² določi na sledeč način: $Q(500) = 1.3 * Q(100) = 1.3 * 91.5 \text{ m}^3/\text{s} = 118.95 \text{ m}^3/\text{s}$. Razlika med obema izračunanima pretokoma znaša manj kot 3 odstotke, kar pa pri tako velikem pretoku ne predstavlja velikega odstopanja.

Kot dolvodni robni pogoj pa je bila uporabljena pretočna krivulja za dolvodni stalni enakomerni tok, ki je predstavljena na grafikonu 4. Za določitev Q/h krivulje je bilo v HEC-RAS izdelanih 9 prečnih prevezov na 130 metrih spodnjega predela vodotoka.



Grafikon 4: Pretočna krivulja dobljena z izračunom v programu HEC-RAS

Prečni prerezi so bili na območju mostne konstrukcije zgoščeni, da so boljše zajeli geometrijo terena pod mostom. V geometrijo je bil vstavljen tudi prečni prerez 1000 metrov dolvodno od mostu. Za izračun stalnega toka smo upoštevali povprečni padeč vodotoka, ki znaša 0.0022.

4.3.2 Robni pogoj za sedimente

V primeru simuliranja prenosa sedimentov prav tako potreben robni pogoj, potrebno pa je podati samo zgornji robni pogoj. Tega se določi na istem mestu kot zgornji hidravlični robni pogoj. Podatki o sedimentih so shranjeni posebej za rinjene plavine in lebdeče plavine. Kot robni pogoj se za rinjene plavine uporabi specifična prodonosnost in delež dotekajočih frakcij, pri lebdečih plavinah pa njihova koncentracija in prav tako delež dotekajočih frakcij.

4.4 Opravljeni izračuni s CCHE2D

Ko so bili vneseni vsi potrebni podatki za nemoten potek simulacije, se je le - to opravilo najprej za stalni neenakomerni tok brez dotoka plavin in sicer za 3 primere z različnim dotokom (Q10, Q100 in Q500), ki predstavljajo samostojne rezultate in so bili uporabljeni za izdelavo kart poplavne nevarnosti. Simulacijo transporta plavin pri Q100 pa je bilo potrebno izvesti iz predhodnih rezultatov simulacije vodnega toka. Uporabljeni so bili rezultati dobljeni pri računu stalnega toka po času dveh dni. Skupni čas simulacije transporta plavin je prav tako trajal 2 dni. Zaradi takega načina izvedbe simulacij, začetnega stanja pri času $t = 0$ ur oz. v našem primeru $t = 2$ dni ni možno prikazati. Prikazati

je možno le spremembe po določenem času (npr. 2 dni in 6 ur). Izvedeni sta bili dve simulaciji transporta plavin. V prvem primeru je simulacija potekala brez dotoka plavin, namenjena je bila predvsem za primerjavo med dovoljenimi in izračunanimi strižnimi napetostmi. V drugem primeru pa so bile zastopane tako lebdeče kot rinjene plavine. Rezultati so bili uporabljeni za pripravo kart erozijske nevarnosti. Ker v diplomski nalogi ni bil poudarek na izračunih, temveč na metodologiji priprave kart, tu posameznih računskih rezultatov ne podajamo.

4.5 Obdelava rezultatov izračunov v ArcGIS

Po končanih simulacijah so bili rezultati vodnih globin in hitrosti vode izvoženi v obliki datotek primernih za urejanje s programom ArcGIS. Za posamezni primer visokih voda (Q10, Q100 in Q500) so bili izdelani rastrni globin in hitrosti vode ter pri Q100 tudi odplavljenega oz. odloženega materiala, ki so potrebni za izdelavo karte poplavne in erozijske nevarnosti. Na podlagi teh podatkov so bile nato izdelane še karte razredov poplavne in erozijske nevarnosti. Karte nevarnosti in razredov nevarnosti so predstavljene v prilogah C do G.

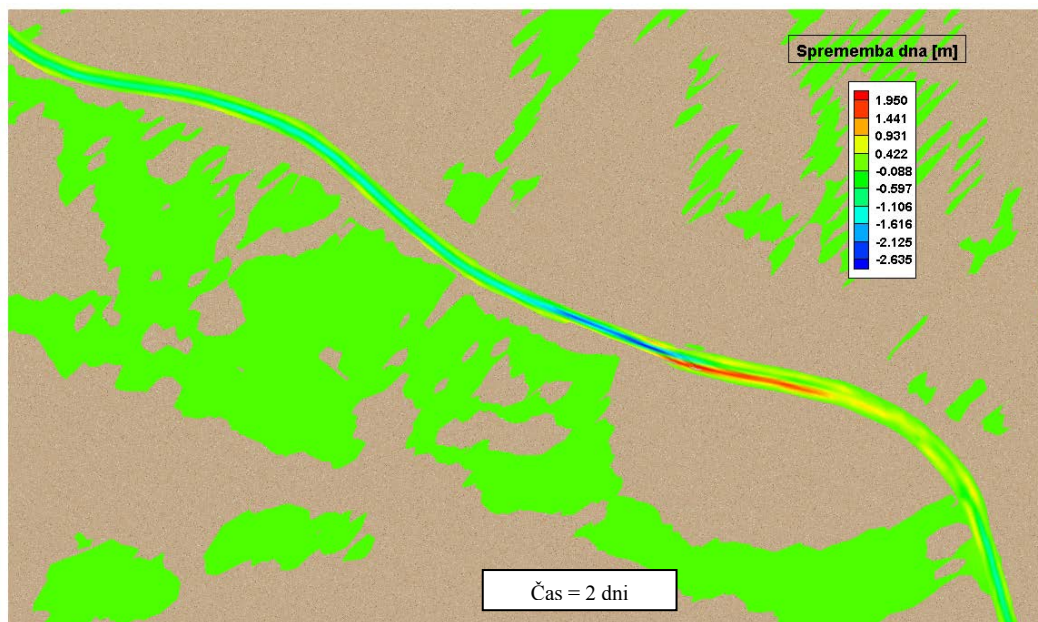
4.6 Primerjava dovoljenih in izračunanih strižnih napetosti

S primerjanjem maksimalnih dovoljenih ter izračunanih strižnih napetosti glede na različno rabo tal lahko sklepamo ali na posameznem območju pride do erozijskih procesov ali ne. V preglednici 11 so zbrane dovoljene strižne napetosti glede na rabo tal ter izračunane strižne napetosti pri pretoku Q100. Glede na izračunane strižne napetosti lahko sklepamo, da so erozijski procesi prisotni le v strugi vodotoka, medtem ko do le-teh na obvodnem prostoru ne prihaja.

Preglednica 11: Primerjava med dovoljenimi in izračunanimi strižnimi napetostmi

Raba tal	Dovoljene strižne napetosti [N/m ²]	Izračunane strižne napetosti [N/m ²]
Vodotok / kamen in prod	52.7	ok 60
Obd. površine / travna ruša	50-80	< 20
Hiše / naselje		5
Gozd	>140	< 15

Na spodnji sliki je prikazana tudi višinska sprememba tal v primeru, ko plavine v model ne dotekajo. Simulacija je potekala pri pretoku Q100.



Slika 14: Porazdelitev sprememb dna struge in obvodnega prostora pri pretoku Q100

Iz slike 14 je razvidno, da do erozijskih procesov na poplavnih površinah ne pride, sprememba njihove topografije je 0 metrov. V strugi pa prihaja tako do poglobljanja rečnega dna kot tudi do nanosa materiala in s tem višanja dna.

V prilogi B je prikazan tudi potek spreminjanja struge v času 36 ur na odseku vodotoka, kjer prihaja do največjih sprememb dna struge. Razvidna so tako območja odloženega kot tudi odnešenega materiala.

5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi je prikazan postopek izdelave kart poplavne in erozijske nevarnosti z upoštevanjem meril Pravidnika. Prvi korak pri izdelavi kart je bila izdelava digitalnega modela terena v orodju ArcGIS. Ko je ta pripravljen, se ga lahko uvozi kot podlago za nadaljnje delo v orodje CCHE2D. Drugi korak je bilo zbiranje in obdelava hidroloških podatkov. Ker vseh podatkov o pretokih s pripadajočo povratno dobo nismo uspeli pridobiti, so bili ti pretoki izračunani. Prav tako ni bilo podatka o gladini vode na iztoku iz modela, ki bi jo uporabili za umerjanje modela. Zato se je z 1D orodjem HEC-RAS izdelala pretočna krivulja, ki je bila uporabljena kot spodnji robni pogoj. Tretji korak je bila določitev rabe tal ter pripadajočih koeficientov hrapavosti. Zadnji korak je bila izdelava predpostavljenega sintetičnega vzorca materiala, ki sestavlja strugo in tudi sodeluje v transportu plavin.

Ko so vsi potrebni podatki zbrani oz. izračunani se jih vnese v programsko orodje CCHE2D in izvede hidravlični izračun. Dobljene rezultate se izvozi v ArcGIS, kjer se jih obdela ter prikaže na primerni podlagi (npr. ortfoto).

Simulacije so bile izvedene v primeru stalnega toka. Kar se tiče poplav smo s takimi rezultati na varni strani, saj je v primeru stalnega toka pretok konstanten (in cel čas maksimalen), in je tako obseg poplave večji kot bi sicer bil realno. Na voljo je bila tudi karta obsega poplave pri Q100 (Das Land Steiermark, 2013) na katero smo se lahko oprli pri pregledu rezultatov. V primeru transporta plavin pa na voljo ni bilo nikakršnih podatkov in kart s katerimi bi si lahko pomagali pri interpretaciji rezultatov. Na poplavnih površinah, je glede na rezultate izračunov pričakovati, da do erodiranja ne bo prišlo. Z natančnejšimi hidrološkimi podatki ter podatki o sestavi dna struge, na podlagi katerih bi se hidravlični model umerilo, bi se dalo izdelati še natančnejše karte poplavne in erozijske nevarnosti.

Cilj diplomske naloge, spoznati procese, potrebne podatke in metodologijo izdelave kart poplavne in erozijske nevarnosti, je bil dosežen. Za praktično uporabo prikazanih rezultatov pa bi seveda morali imeti čim bolj točne, konkretne podatke tako o sestavi struge kot o količini dotekajočih plavin.

VIRI

About ESRI. 2013.

<http://www.esri.com/about-esri/history/history-more> (Pridobljeno 16. 11. 2013).

Alemseged, T. H. 2005. Integrating Hydrodynamic Model and High Resolution DEM (LIDAR) For Flood Modelling. Enschede, Netherlands: 84 str.

Brunner, G. W. 2010. HEC-RAS River Analysis Sistem Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC). Davis, CA: 411 str.

Das Land Steiermark - Wasserwirtschaft: Die Hochwasserereignisse im August 2005 (Teil 2): str. 21. 2013.

<http://app.hydrographie.steiermark.at/berichte/hw082005teil2.pdf> (Pridobljeno 15. 12. 2013.)

Das Land Steiermark - Wasserwirtschaft: Das Hochwasserereignis von 8. Februar 2009: str. 5-6. 2013.

<http://app.hydrographie.steiermark.at/berichte/hw022009.pdf> (Pridobljeno 15. 12. 2012.)

Das Land Steiermark - Wasserwirtschaft: Die Hochwasserereignisse von Juni bis August 2009: str. 36. 2013.

<http://app.hydrographie.steiermark.at/berichte/hw06082009.pdf> (Pridobljeno 15. 12. 2012.)

Das Land Steiermark - Wasserwirtschaft: Die Hochwasserereignis vom 5. November 2012 in der Steiermark: str. 17. 2013.

<http://app.hydrographie.steiermark.at/berichte/hw05112012.pdf> (Pridobljeno 15. 12. 2012.)

Das Land Steiermark – Wasserwirtschaft: digitaler Atlas. 2013.

[http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(jz0hc1yckhknr45owemdq45\)\)/init.aspx?karte=gew&ks=das&cms=da&massstab=800000](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(jz0hc1yckhknr45owemdq45))/init.aspx?karte=gew&ks=das&cms=da&massstab=800000) (Pridobljeno 7. 12. 2013.)

Das Land Steiermark - Wasserwirtschaft: Datenbankabfrage. 2013.

<http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/ziel/4651942/DE/> (Pridobljeno 7. 12. 2013.)

DonauConsult. Schwarzaubach 2D-Abflussuntersuchung. 2013.

http://www.donauconsult.at/referenzen/detail/id/schwarzaubach/?tx_ttnews%5Bcat%5D=19&cHash=295cfd8d7246bd0440f7c2a8eed300a5 (Pridobljeno 7. 12. 2013.)

Environmental System Research Institute. 1996. ArcView 3D Analyst, 3D Surface Creation, Visualization and Analysis, Using the ArcView 3D Analyst, Version 3.2a. Redland, CA: 118 str.

Geopedia. Dornhof. 2013.

<http://www.geopedia.si> (Pridobljeno 5. 12. 2013.)

Google Maps. Dornhof. 2013.

<https://maps.google.com/> (Pridobljeno 5. 12. 2013.)

Hojnik, T. 2010. 2D model transporta plavin v akumulacijskih bazenih NEK in HE Brežice. V: 21. Mišičev vodarski dan, zbornik referatov, 6. December. Maribor. Vodnogospodarski biro: str. 112-119.

Jia, Y., Wang, S. S. Y. 2001. CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows over Loose Bed. The University of Mississippi: 87. Str.

Lovšin, G. 2013. Analiza hidravličnih lastnosti vodotokov z uporabo GIS orodij. Seminarska naloga. Ljubljana, (samozaložba G. Lovšin): 46 f.

McCoy, J., Johnston, K. 2001. Using ArcGIS Spatial Analyst: 230 str.

Miklavčič, L. 2013. Sonaravni ukrepi za upočasnitev vodnega toka. Diplomaska naloga. Ljubljana, (samozaložba L. Miklavčič): 36 f.

Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov: skripta, verzija 01. 2000. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 182 str.

Mikoš, M. 2009. Osnove hudourništva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 217 str.

Müller, M., Šantl, S., Steinman, F., Novak, G. 2011. Cross-border flood risk management at the state border reach of Mura. Urban Flood Risk Management - Approaches to enhance resilience of communities : Proceedings of the International Symposium UFRIM, 21st - 23rd September 2011, Graz, Austria: str. 425-430.

Müller, M. 2009. Vpliv zarasti na visokovodne razmere pri hidravličnem modeliranju. Diplomaska naloga. Ljubljana, (samozaložba M. Müller): 99 f.

Oblak, J. 2013. Mehanizacija, ukrepi in postopki upravljanja z rinjenimi plavinami. Diplomaska naloga. Ljubljana, (samozaložba J. Oblak): 35 f.

Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti Ur. L. RS št. 60/2007

Rak, G. 2006. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov. Diplomaska naloga. Ljubljana, (samozaložba G. Rak): 86 f.

Rak, G., Steinman, F., Gosar, L. 2008. Kartiranje poplavno ogroženih območij v skladu z novo zakonodajo v Sloveniji. V: Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008. Ljubljana, Založba ZRC: str. 107-116.

Singh, V. 2002. Two dimensional sediment transport model using parallel computers. B. Tech, Banaras Hindu University, India: 109 str.

http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-03312005-193516/unrestricted/Singh_thesis.pdf (Pridobljeno 18. 12. 2013.)

Supej, B., Kovačič, B. 2006. Tehnologija LIDAR pri planiranju, projektiranju, vzdrževanju in upravljanju vodotokov. V: 17. Mišičev vodarski dan, zbornik referatov, Maribor: Vodnogospodarski biro: str. 183-188.

<http://mvd20.com/LETO2006/R27.pdf> (Pridobljeno 10. 6. 2013.)

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 295 str.

Steinman, F. 2010. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 294 str.

Wu, W. 2001. CCHE2D Sediment Transport Manual (Version 2.1). The University of Mississippi: 45 str.

Zhang, Y. 2006. CCHE-GUI – Graphical Users Interface for NCCHE Model User's Manual – Version 3.0. The University of Mississippi: 153 str.

Zhang, Y., Jia Y. 2009. CCHE-MESH: 2D Structured Mesh Generator User's Manual – Version 3.x. The University of Mississippi: 140 str.

Zorkeflee, A. H., Aminuddin, A. G., Zakaria, N. A. 2006. Application of 2-D Modelling for Muda River Using CCHE2D. V: 2nd International Conference on Managing Rivers in the 21st Century: Solutions Towards Sustainable River Basins: str. 249-253.

http://redac.eng.usm.my/html/publish/2007_14.pdf (Pridobljeno 5. 2. 2013.)

»Ta stran je namenoma prazna«

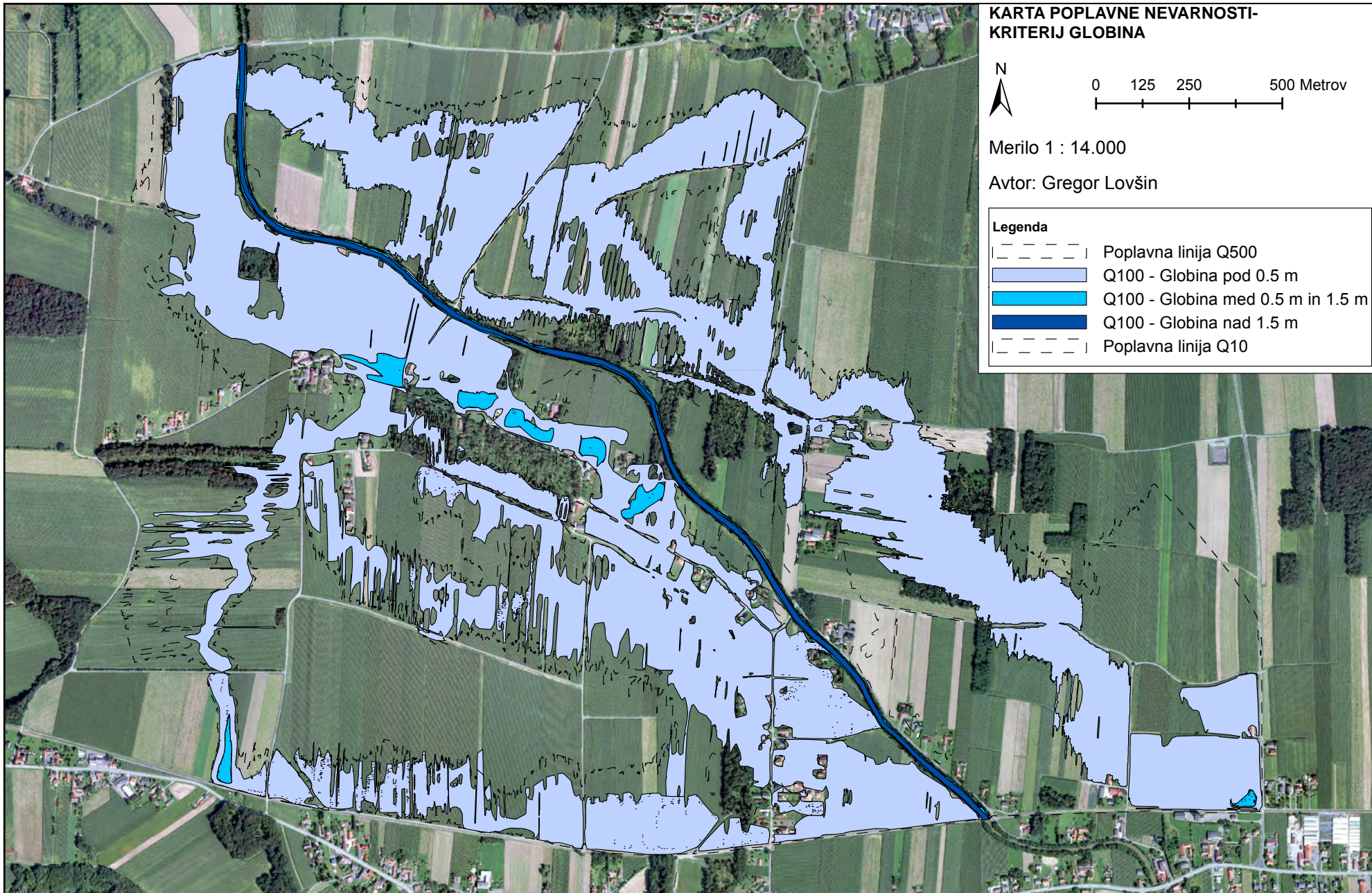
PRILOGA A: Osnovni postopek simulacije s programom CCHE2D

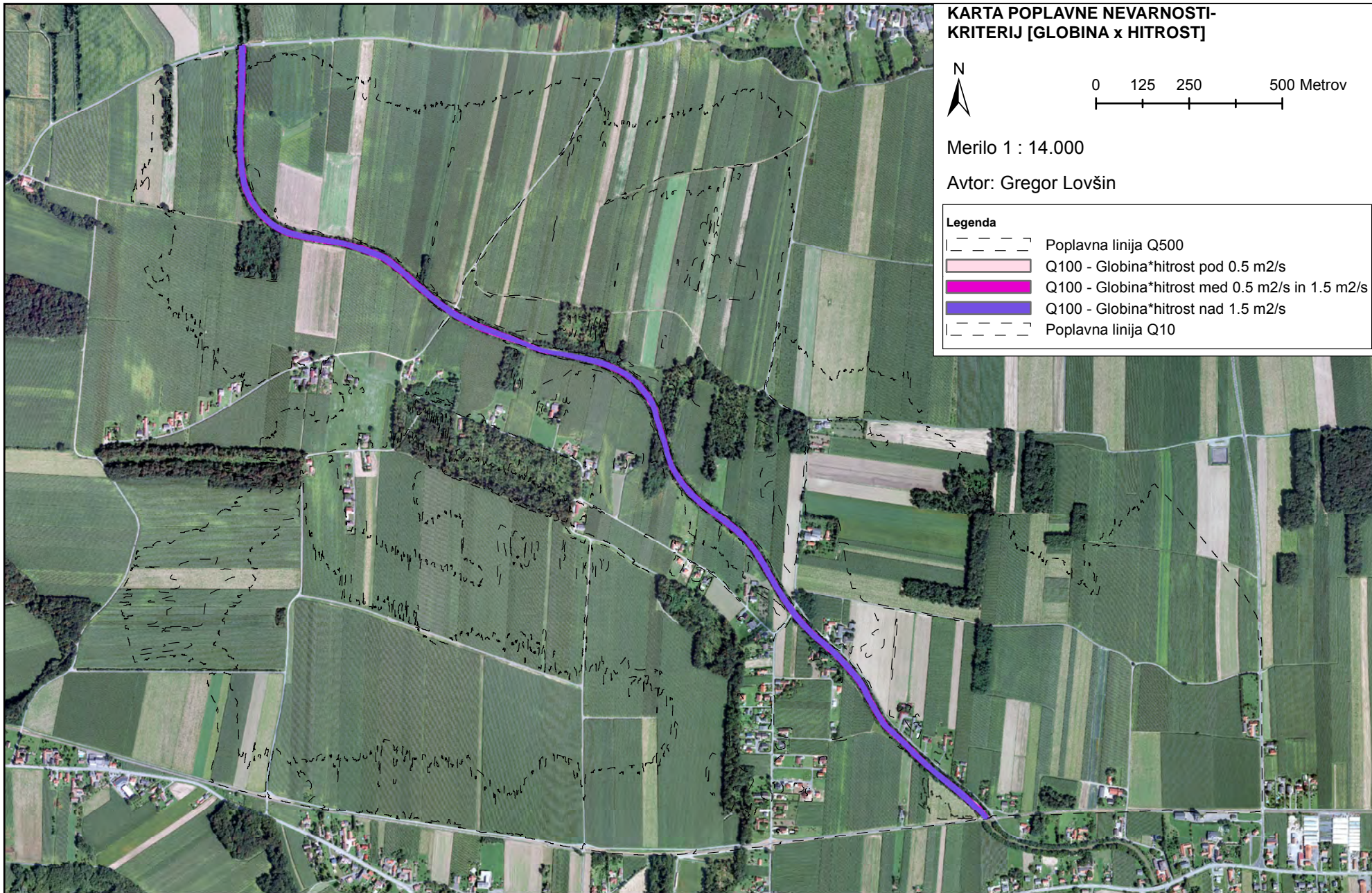
Tip		Analiza toka	Analiza sedimentov
Korak 1	Izdelava mreže		
Korak 2	Nastavitev začetnih pogojev	Začetne kote terena	Erodibilnost tal
		Začetne gladine (gorvodno in dolvodno)	Maksimalna debelina odloženega materiala
		Hrapavost površja	Maksimalna debelina odnešenega materiala
			Debelina sloja (sloj 1, 2, 3)
			Vzorec sloja (sloj 1, 2, 3)
Korak 3	Nastavitev robnih pogojev	(Zgornji) Pretok, tj. dotok Hidrogram (*.dhg) (Spodnja) Kota vodne gladine Pretočna krivulja (*.rcv) Nivogram (*.shg)	(Zgornja) koncentracija lebdečih plavin (kg/m ³ , SBC datoteka) Transportna sposobnost rinjenih plavin (kg/m/s, BBC datoteka)
Korak 4	Nastavitev parametrov modela	Časovni korak (čas simulacije)	Velikostni razredi sedimentov (premer zrn)
		Časovni korak za prikazane rezultate	Določitev vzorca -poroznost, velikostni razredi
		-Izpis vmesnih rezultatov	Način transporta sedimentov
		-Izpis končnih rezultatov	-rinjene + lebdeče plavine
		Turbulenca	-rinjene plavine
		-Parabolični model	-lebdeče plavine
		-Model mešalne dolžine	Način simulacije
		-K-Epsilon model	-Počasna sprememba dna (stalni tok)
		Izračun nestalnega toka	-Hitra sprememba dna (nestalni tok)
		Koeficient hrapavosti (n, Ks)	Specifična teža sedimentov
		Coriolisov koeficient	Erodibilnost brežin
		Gravitacijski pospešek	
		Von Karmanova konstanta	
		Kinematična viskoznost tekočine	
Korak 5	Zagon simulacije	Prvi zagon simulacije	Zagon simulacije iz predhodnega rezultata simulacije toka
		Nadaljevanje zagona simulacije iz predhodnih rezultatov	Nadaljevanje zagona simulacije iz predhodnih rezultatov simulacij sedimentov

PRILOGA B: Spreminjanje dna struge v času









**KARTA POPLAVNE NEVARNOSTI-
KRITERIJ [GLOBINA x HITROST]**

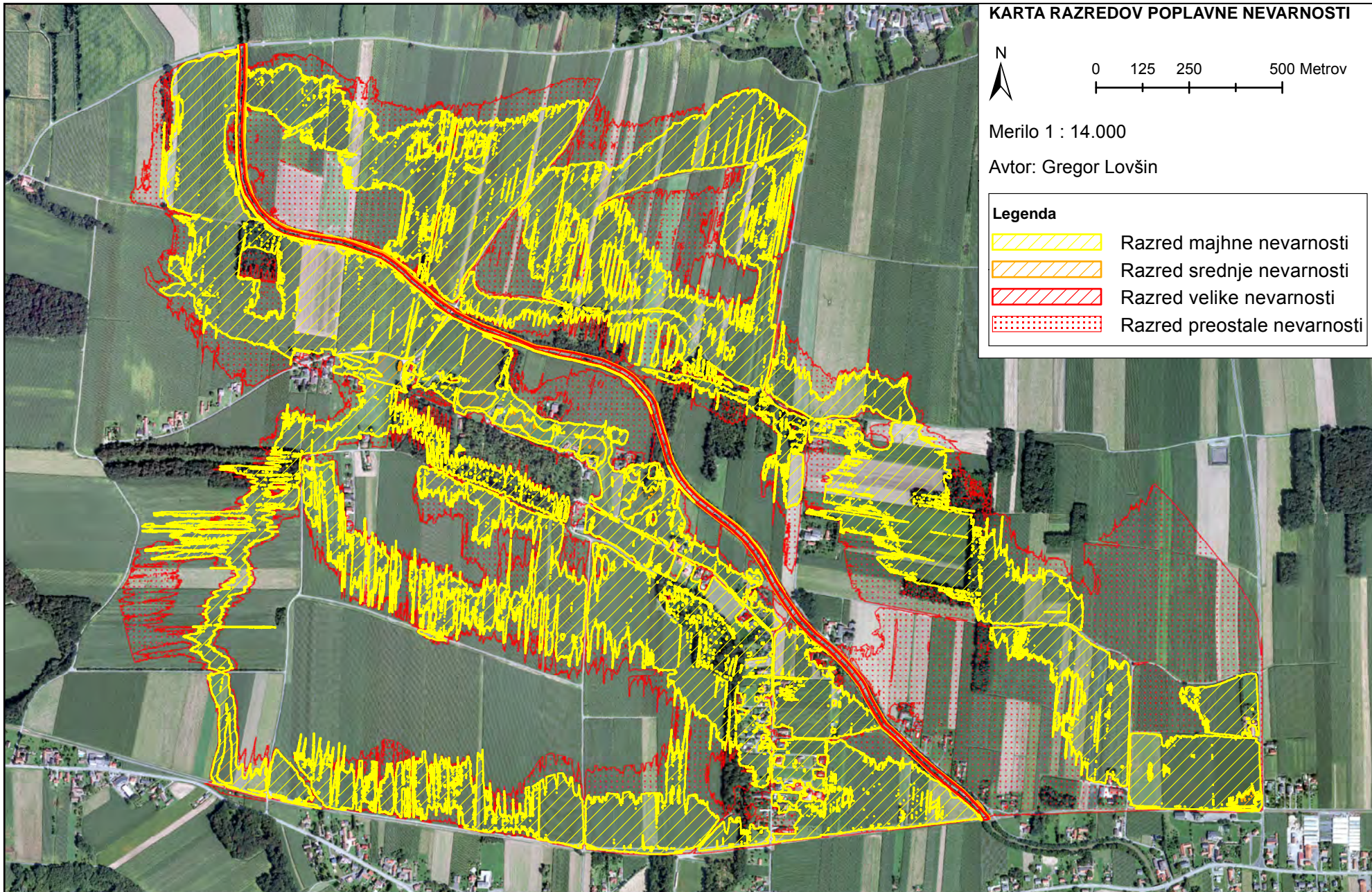


0 125 250 500 Metrov

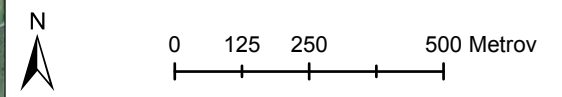
Merilo 1 : 14.000

Avtor: Gregor Lovšin

Legenda	
	Poplavna linija Q500
	Q100 - Globina*hitrost pod 0.5 m2/s
	Q100 - Globina*hitrost med 0.5 m2/s in 1.5 m2/s
	Q100 - Globina*hitrost nad 1.5 m2/s
	Poplavna linija Q10







KARTA RAZREDOV POPLAVNE NEVARNOSTI



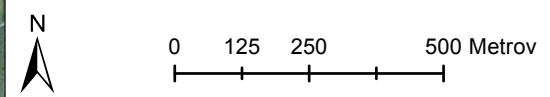
Merilo 1 : 14.000

Avtor: Gregor Lovšin

Legenda	
	Razred majhne nevarnosti
	Razred srednje nevarnosti
	Razred velike nevarnosti
	Razred preostale nevarnosti




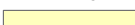





KARTA EROZIJSKE NEVARNOSTI



Merilo 1 : 14.000

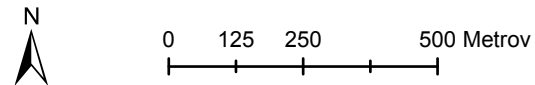
Avtor: Gregor Lovšin

Legenda

	Območje erozijske nevarnosti Q100
Odplavljeni material	
	Debelina sloja pod 0.5 m
	Debelina sloja med 0.5 m in 2.0 m
	Debelina sloja nad 2.0 m
Odloženi material	
	Debelina sloja pod 0.3 m
	Debelina sloja med 0.3 m in 1.0 m
	Debelina sloja nad 1.0 m



KARTA RAZREDOV EROZIJSKE NEVARNOSTI



Merilo 1 : 14.000

Avtor: Gregor Lovšin

Legenda	
	Razred velike nevarnosti
	Razred srednje nevarnosti
	Razred majhne nevarnosti