

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



LUKA PREZELJ

**MODELIRANJE TRANSPORTA PLAVIN NA
POREČJU SAVE DOLINKE**

MAGISTRSKO DELO

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE
STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO**

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

LUKA PREZELJ

**MODELIRANJE TRANSPORTA PLAVIN NA
POREČJU SAVE DOLINKE**

Magistrsko delo št.:

**SEDIMENT TRANSPORT MODELLING IN THE
SAVA DOLINKA RIVER**

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

doc. dr. Nejc Bezak

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

izr. prof. dr. Gašper Rak

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju, doc. dr. Nejc Bezaku, in somentorju, izr. prof. dr. Gašperju Raku, za vso strokovno pomoč in vodenje pri izdelavi magistrske naloge.

Posebna zahvala pa gre tudi družini in puncu Maruši, ki so mi tekom študija stali ob strani, me podpirali, spodbujali ter verjeli vame.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.5:627.13(043.3)
Avtor:	Luka Prezelj, dipl. inž. ok. grad. (UN)
Mentor:	doc. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	izr. prof. dr. Gašper Rak, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.
Naslov:	Modeliranje transporta plavin na porečju Save Dolinke
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	75 str., 18 pregl., 30 sl., 54 graf., 13 en., 4 pril., 37 virov
Ključne besede:	transport sedimentov, bilanca, rinjenje plavine, dinamika, erozijski procesi, hidravlično modeliranje, prodonosnost

Izvleček

V okviru magistrske naloge je obravnavana tematika modeliranja transporta (rinjenih) plavin. Predstavljene so teoretične osnove, potrebne za celovito obravnavo, pod kar spadajo tako določitev dotoka plavin iz zaledja, kot tudi lastnosti premeščanja plavin znotraj struge vodotoka. Pri prvi so predstavljene metode določitve potencialnega sproščanja sedimentov v zaledjih, pri drugi pa osnove o začetku prodnega premika, lastnostih različnih tipov premeščanja plavin in o različnih metodah določitve transportne zmogljivosti oz. količine premeščanja plavin v vodotoku.

Premeščanje plavin je v nalogi obravnavano na konkretnem primeru Save Dolinke, ki predstavlja tipičen prodonosni vodotok. Obravnavan je bil odsek med sotočjem s Pišnico (Kranjska Gora) in prodnim zadrževalnikom Hrušica. Za omenjeni odsek je bil vzpostavljen enodimenzijski hidravlični model, dodatno prilagojen za modeliranje transporta sedimentov. Z njegovo uporabo je bila analizirana dinamika premeščanja rinjenih plavin na obravnavanem odseku. Dodatno je bil ocenjen vpliv lastnosti vodotoka (vodnatost, hrapavost podlage in zrnavost podlage), kot tudi nastavitvev hidravličnega modela (izbira transportne funkcije itd.) na rezultate modeliranja transporta plavin.

V zaključkih so na podlagi ugotovljenega vpliva posameznih parametrov podane smernice, ki določajo, čemu je pri modeliranju transporta potrebno posvetiti največ pozornosti, da bi zagotovili čim manjšo negotovost rezultatov. Predstavljene so prednosti in slabosti uporabljene metode modeliranja, ugotovljene tekom izdelave magistrske naloge. Na podlagi tega je bila posledično ocenjena njena uporabnost v različnih primerih.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 556.5:627.13(043.3)
Author: Luka Prezelj, dipl. inž. ok. grad. (UN)
Supervisor: Assist. Prof. Nejc Bezak, Ph.D.
Co-supervisor: Assoc. Prof. Gašper Rak, Ph.D.
Title: Sediment transport modelling in the Sava Dolinka River
Document type: Master Thesis
Notes: 75 p., 18 tab., 20 fig., 54 graph., 13 eq., 4 ann., 37 ref.
Keywords: sediment transport, balance, bed load, dynamic, erosion, hydraulic modelling, bed load discharge

Abstract

Within the Master's thesis, we discuss the topic of modelling the transport of bedload sediments. We present the theoretical bases, which includes determination of sediment inflow from the hinterland, as well as the characteristics of sediment transport within the watercourse bed. Determination of sediment inflow wise, we describe the methods for determination of potential erosion of sediments in the hinterland. In the case of sediment transport within the riverbed, we introduce the basics of the start of bed load transport, the characteristics of different types of sediment transport as well as different methods of determining the transport capacity and the amount of sediment transport in the watercourse.

In the thesis, the bed load transport is discussed on the concrete example of the Sava Dolinka river, which represents a typical gravel bed river. We focused on the section between the confluence with Pišnica (Kranjska Gora) and the dam Hrušica. A one-dimensional hydraulic model was established for the aforementioned section, additionally adapted for sediment transport modelling. It was used to analyse the dynamics of the bedload transport in this section. In addition, we evaluate the influence of watercourse qualities (water amount, roughness and grain size distribution), as well as hydraulic model settings (choice of transport function, etc.) on bed load transport modelling results.

In the end, based on the established impact of individual parameters, we provide guidelines that highlight the priorities that should be given the most attention in bed load transport modelling in order to ensure the low uncertainty of the modelling results. The advantages and disadvantages of the applied modelling methods, established during the preparation of the Master's thesis, are presented. Based on this, their usefulness in various cases was assessed.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

POPRAVKI – ERRATA.....	I
ZAHVALA.....	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
KAZALO SLIK.....	XI
KAZALO PREGLEDNIC	XII
KAZALO GRAFOV	XIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS.....	XVI
1 UVOD	1
1.1 Procesi erozijskega kroga	1
1.2 Področje obravnave in cilji magistrske naloge	2
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	4
2.1 Premeščanje plavin v strugi	4
2.1.1 Začetek prodnega premika	4
2.1.2 Mehanizmi premeščanja plavin	7
2.1.3 Vrednotenje premestitvene zmogljivosti	8
2.2 Sproščanje plavin v zaledju	10
2.2.1 Pintarjeva enačba	10
2.2.2 Koeficient odplavljanja gradiva	11
3 PODATKI IN METODE	12
3.1 Obravnavano testno območje in vhodni podatki	12
3.1.1 Lokacija in lastnosti testnega območja	12
3.1.2 Podatki o lastnostih terena	14
3.1.3 Podatki o zrnavostni sestavi rinjenih plavin	16
3.1.4 Hidrološki in meteorološki podatki	20
3.2 Uporabljena orodja	20
3.2.1 QGIS	20
3.2.2 HEC-RAS	21
3.3 Priprava hidroloških podatkov	21
3.3.1 Določitev statistično značilnih hidroloških let.....	21
3.3.2 Določitev spreminjanja pretoka znotraj modeliranega odseka	23
3.4 Določitev dotoka plavin iz zaledja	26
3.4.1 Določitev koeficientov Pintarjeve enačbe.....	26
3.4.2 Določitev povprečnega letnega sproščanja gradiva	29
3.4.3 Določitev koeficienta odplavljanja gradiva in količine odplavljenega gradiva	29
3.5 Hidravlično modeliranje transporta sedimentov	29
3.5.1 Metoda izračuna.....	30
3.5.2 Geometrija	30
3.5.3 Modeli pritokov za določitev robnega pogoja vtoka sedimentov	33
3.5.4 Robni pogoji	34

3.5.5	Podatki o sedimentih	36
3.5.6	Izbira različnih računskih simulacij	38
4	REZULTATI IN ANALIZA	40
4.1	Rezultati simulacije z izbranimi osnovnimi parametri	40
4.1.1	Dinamika transporta v karakterističnih prečnih profilih	43
4.1.2	Karakteristični profil odlaganja sedimentov	48
4.1.3	Karakteristični profil erozije	50
4.2	Vpliv spreminjanja različnih dejavnikov na rezultate.....	52
4.2.1	Vpliv spremembe hidrologije na rezultate	52
4.2.2	Vpliv spremembe koeficienta hrapavosti na rezultate	54
4.2.3	Vpliv spremembe zrnivosti podlage na rezultate.....	57
4.2.4	Vpliv spremembe transportne funkcije na rezultate.....	60
4.2.5	Vpliv spremembe metode sortiranja podlage na rezultate	62
4.2.6	Primerjava vpliva različnih dejavnikov.....	64
4.3	Določitev povprečnih vrednosti premeščanja sedimentov in območij erozije in odlaganja	64
4.3.1	Določitev povprečnih vrednosti premeščanja sedimentov na posameznih odsekih.....	64
4.3.2	Določitev območij erozije in odlaganja	65
4.4	Rezultati simulacije daljšega časovnega obdobja	67
5	ZAKLJUČEK	70
6	VIRI	72
	PRILOGE.....	75

KAZALO SLIK

Slika 1: Reprodukcijski Hjulströmovega (1935) diagrama (prirejeno po Sherman in sod., 2013).	5
Slika 2: Shiledsov diagram (prirejeno po Bosboom, Stive, 2023b).	6
Slika 3: Mehanizmi premeščanja rinjenih plavin (prirejeno po Geological Digressions, Earth science resources, images, glossaries, and SCICOMM for students and non-specialists, b.d.).	8
Slika 4: Prikaz ožjega obravnavanega območja.	13
Slika 5: Prikaz širšega obravnavanega območja.	14
Slika 6: Prikaz modela senčenja digitalnega modela terena z ločljivostjo 0,25m na območju Mojstrane.	15
Slika 7: Model senčenja rastrskih podatkov s prostorsko resolucijo 100m.	15
Slika 8: Lokacije odvzemov vzorcev rinjenih plavin.	17
Slika 9: Primer mesta odvzema vzorca za lokacijo Martuljek (foto: osebni arhiv, 2022).	17
Slika 10: Primer odvzema linijskega vzorca na lokaciji sotočja Save Dolinke in Pišnice (foto: osebni arhiv, 2022).	18
Slika 11: Prispevna območja pritokov Save Dolinke.	24
Slika 12: Prispevne površine Save Dolinke na posameznih prerezi.	25
Slika 13: Prikaz poteka osi struge, prečnih profilov in robov struge za vzorčni odsek.	31
Slika 14: Primer modifikacijskih poligonov.	32
Slika 15: Primer prečnega profila (Profil 9816).	33
Slika 16: Geometrija hidravličnega modela pritoka Pišnica.	33
Slika 17: Geometrija hidravličnih modelov pritokov Martuljek, Beli potok in Belca.	34
Slika 18: Geometrija hidravličnega modela pritoka Bistrica.	34
Slika 19: Primer prečnega profila s prikazanim območjem možne erozije.	36
Slika 20: Prikaz območij razredov erozije in odlaganja sedimentov.	66

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Uporabljena statistično značilna hidrološka leta..	23
Preglednica 2: Površine prispevnih območij pritokov Save Dolinke:	24
Preglednica 3: Površine prispevnih območij Save Dolinke na posameznih prerezihi.	25
Preglednica 4: Vrednosti koeficienta erodibilnosti za različne tipe tal (vir: Gavrilović, 1970, cit. po Bezak in sod., 2023).	27
Preglednica 5: Vrednosti koeficienta vegetacijske zaščitenosti za različne tipe pokrovnosti (vir: Gavrilović, 1970, cit. po Bezak in sod., 2023).	27
Preglednica 6: Vrednosti koeficienta razvitosti erozijskih pojavov (vir: Gavrilović, 1970, cit. po Bezak in sod., 2023).	28
Preglednica 7: Vrednosti koeficientov za določitev povprečnega letnega letnega sproščanja gradiva.	28
Preglednica 8: Določitev povprečnega letnega sproščanja gradiva.	29
Preglednica 9: Določitev povprečnega letnega odplavljanja gradiva.	29
Preglednica 10: Uporabljene vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti.	32
Preglednica 11: Razmerje med višino prelivanja in pretokom vode.	35
Preglednica 12: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica za različna statistično značilna hidrološka leta.	53
Preglednica 13: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica za različne koeficiente hrapavosti.	55
Preglednica 14: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica za različne zrnivosti podlage.	58
Preglednica 15: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica pri uporabljenih različnih transportnih funkcijah.	60
Preglednica 16: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica pri spremembi metode sortiranja podlage.	63
Preglednica 17: Primerjava povprečnega letnega premeščanja sedimentov na posameznih odsekih. ..	65
Preglednica 18: Pretok sedimentov oz. prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica v posameznih letih simulacije daljšega časovnega obdobja.	69

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Preračun številčne linijske analize grobih zrn s težnostno prostorninsko analizo grobih zrn in toga sestavljanje s Fullerjevo zrnastostno krivuljo v prostorninski vzorec za lokacijo vzorca pod sotočjem Save Dolinke in Belce.....	19
Graf 2: Prilagoditev velikostnih razredov presejalnih krivulj za vzorec na lokaciji Tabre.	19
Graf 3: Zrnastostne krivulje podlage na lokacijah odvzetih vzorcev.....	20
Graf 4: Krivulje trajanja pretokov za posamezna leta.	22
Graf 5: Sosledja pretokov za značilna hidrološka leta.	23
Graf 6: Spreminjanje pretoka Save Dolinke vzdolž obravnavanega odseka.....	26
Graf 7: Krivulja "Pretok - kota gladine" na dolvodnem robu modela.....	36
Graf 8: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – OSNOVNI PRIMER.	41
Graf 9: Letna sprememba višine dna struge v prečnem profilu - OSNOVNI PRIMER.	41
Graf 10: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – OSNOVNI PRIMER.	42
Graf 11: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil - OSNOVNI PRIMER.	42
Graf 12: Odvisnost med kvadratom povprečnega dnevnega pretoka vode in dnevnim pretokom sedimentov za stabilen karakteristični profil.....	43
Graf 13: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in bilanco transporta sedimentov v stabilnem karakterističnem profilu.	44
Graf 14: Odvisnost med spremembo pretoka in dnevno bilanco transporta sedimentov v stabilnem karakterističnem profilu.	44
Graf 15: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in dnevno spremembo kote dna struge v stabilnem karakterističnem profilu.....	44
Graf 16: Odvisnost med spremembo pretoka in dnevno spremembo kote dna struge v stabilnem karakterističnem profilu.	44
Graf 17: Dnevna spremembe kote dna struge - stabilen karakteristični profil.....	45
Graf 18: Spreminjanje višine kote dna struge - stabilen karakteristični profil.....	46
Graf 19: Dnevne bilance transporta sedimentov - stabilen karakteristični profil.....	46
Graf 20: Kumulativna bilanca transporta sedimentov – stabilen karakteristični profil.....	47
Graf 21: Dnevni pretok sedimentov skozi stabilen karakteristični profil.....	47
Graf 22: Kumulativni pretok sedimentov skozi stabilen karakteristični profil.	48
Graf 23: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom vode in dnevnim pretokom sedimentov za karakteristični profil odlaganja.....	48
Graf 24: Odvisnost med kvadratom povprečnega dnevnega pretoka vode in dnevnim pretokom sedimentov za karakteristični profil odlaganja.....	49
Graf 25: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in bilanco transporta sedimentov v karakterističnem profilu odlaganja.....	49

Graf 26: Odvisnost med spremembo pretoka in bilanco transporta sedimentov v karakterističnem profilu odlaganja.....	49
Graf 27: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in dnevno spremembo kote dna struge v karakterističnem profilu odlaganja.	50
Graf 28: Odvisnost med spremembo pretoka in dnevno spremembo kote dna struge v karakterističnem profilu odlaganja.....	50
Graf 29: Odvisnost med kvadratom povprečnega dnevnega pretoka vode in dnevnim pretokom sedimentov za karakteristični profil erozije.....	50
Graf 30: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in bilanco transporta sedimentov v karakterističnem profilu erozije.	51
Graf 31: Odvisnost med spremembo pretoka in bilanco transporta sedimentov v karakterističnem profilu erozije.	51
Graf 32: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in dnevno spremembo kote dna struge v karakterističnem profilu erozije.	51
Graf 33: Odvisnost med spremembo pretoka in dnevno spremembo kote dna struge v karakterističnem profilu erozije.	51
Graf 34: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV DINAMIKE PRETOKOV.....	52
Graf 35: Odvisnost med letno prodonosnostjo in srednjim letnim pretokom Save Dolinke v profilu nad prodnim zadrževalnikom Hrušica.....	53
Graf 36: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV DINAMIKE PRETOKOV.	54
Graf 37: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV DINAMIKE PRETOKOV.	54
Graf 38: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV KOEFICIENTA HRAPAVOSTI.....	55
Graf 39: Odvisnost med uporabljenim koeficientom hrapavosti in letno prodonosnostjo Save Dolinke v profilu nad prodnim zadrževalnikom Hrušica.	55
Graf 40: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV KOEFICIENTA HRAPAVOSTI.....	56
Graf 41: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV KOEFICIENTA HRAPAVOSTI.	57
Graf 42: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV ZRNAVOSTI.....	58
Graf 43: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV ZRNAVOSTI.	59
Graf 44: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV ZRNAVOSTI.	59
Graf 45: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV SPREMEMBE TRANSPORTNE FUNKCIJE.....	60
Graf 46: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV SPREMEMBE TRANSPORTNE FUNKCIJE.....	61

Graf 47: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV SPREMEMBE TRANSPORTNE FUNKCIJE.....	62
Graf 48: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV SPREMEMBE METODE SORTIRANJA PODLAGE.	62
Graf 49: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV SPREMEMBE METODE SORTIRANJA PODLAGE.....	63
Graf 50: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV SPREMEMBE METODE SORTIRANJA PODLAGE.....	64
Graf 51: Vz dolžni profil območij razredov odlaganja in erozije.	66
Graf 52: Spreminjanje letnega pretoka sedimentov na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica pri simulaciji daljšega časovnega obdobja.	67
Graf 53: Odvisnost med letnim pretokom sedimentov na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica in srednjim letnim pretokom v pripadajočem letu.....	68
Graf 54: Odvisnost med letnim pretokom sedimentov na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica in povprečjem zgornje tretjine največjih pretokov v pripadajočem letu.	68

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

VP	Vodomerna postaja
DMR	Digitalni model reliefa
DMR1	Digitalni model reliefa s prostorsko resolucijo 1 m
DMV	Digitalni model višin
n_g	Manningov koeficient hrapavosti
m.n.v.	Metri nadmorske višine

1 UVOD

Vodotok in njegovo delovanje je kompleksen sistem, v katerem se prepletajo vplivi podnebnih, topografskih in geoloških dejavnikov. Del tega je tudi dinamika transporta snovi, predvsem kameninskega materiala. Pri transportu snovi se pogosto srečujemo z dvema pojmom. Širši pojem sediment zajema vse zemljine, ki so se kot posledica različnih procesov erozije sprostile iz prvotne lege nastanka in odložile na drugi lokaciji. S pojmom plavine pa so zajeti vsi sedimenti, ki se vsaj občasno premeščajo kot posledica delovanja vodnega toka (Petkovšek, 2002). Poznavanje dinamike transporta sedimentov, predvsem količine premeščanja plavin v strugi vodotoka, je bistveno za ustrezno upravljanje z vodotokom. Z različnimi posegi v prostor na območju vodotoka namreč spreminjamo naravno dinamiko transporta sedimentov (npr. sečnja gozdov ali kmetovanje na prispevnem območju), oziroma v nekaterih primerih naravno stanje ni več združljivo s človekovo uporabo prostora. Z ustreznimi podatki o dinamiki transporta lahko načrtujemo ukrepe, ki dosežejo kompromis med naravnim stanjem vodotoka in možnostjo (varnega) izvajanja človekovih aktivnosti v okolici.

1.1 Procesi erozijskega kroga

Celotno dinamiko sedimentov opisuje erozijsko-sedimentacijski krog. Ta se začne s procesom sproščanja materiala iz zemeljskega površja ter odplavljanja v vodotoke, kjer predstavlja vir plavin. Sledijo med seboj izmenjujoči procesi erozij in odlaganja znotraj struge skozi celotno porečje, kar opisujemo z dinamiko transporta plavin. Zadnjo fazo predstavlja končna sedimentacija, ki nastopi na ravninskih območjih in iztokih v stoječe vode, kjer vodnemu toku zmanjka energije za nadaljnji transport plavin (Mikoš, 2012).

O sproščanju materiala govorimo, ko se delci (zrna ali agregati) ločijo od matičnih tal. Sproščanje materiala je posledica površinske erozije, ki jo povzročata erozijska moč dežnih kapelj in vodnega toka. Prva vrsta površinske erozije je medžlebična erozija, ki nastopa na mestih, kjer še ne pride do koncentracije površinskega toka. Tu prihaja do erozije dežnih kapelj in plitvega površinskega toka. Druga vrsta površinske erozije nastopi znotraj žlebičev, v katere se začne koncentrirati plitvi površinski tok – žlebična erozija. Tu ima največji vpliv erozijska moč toka v žlebičih (Petkovšek, 2000). Količina sproščenega materiala na prispevnih območjih vodotoka je odvisna predvsem od geološke zgradbe površja, vegetacijske zaščite oz. poraščenosti, oblike reliefa in hidroloških lastnosti območja (padavine). Tradicionalne metode za napovedovanje sproščanja materiala predstavljajo empirične enačbe, sestavljene iz koeficientov, ki opisujejo omenjene lastnosti območja. Primer take metode predstavljata enačbi Universal Soil Loss Equation (USLE) oz. RUSLE (»Revised Universal Soil Loss Equation«) (Wischmeier in sod., 1978) in Gavrilovičeva enačba (Gavrilović, 1970). Prva se največ uporablja v ZDA za napovedovanje letne izgube tal predvsem za namene kmetijstva. Druga pa je bila zasnovana za napoved povprečnega letnega sproščanja zemljin na območju Sredozemlja. Pintar in sod. (1986) so predlagali modifikacijo Gavrilovičeve enačbe, ki je prilagojena za območje Slovenije. Poleg tradicionalnih metod za določanje sproščanja pa so danes vse bolj uveljavljene moderne metode, katerih modeli poleg sproščanja upoštevajo tudi ostale procese erozijsko-sedimentacijskega kroga in s tem podajo realnejše rezultate. (Petkovšek, 2000).

Sproščen material se nato postopoma premešča vzdolž hidrografske mreže vodotoka z izmenjujočima procesoma erozije in sedimentacije oz. odlaganja, ki sta v največji meri odvisna od energije vodnega toka. Ta material (plavine) lahko po tipu premeščanja razdelimo v dve skupini. Prva vrsta so lebdeče plavine, ki so ob premeščanju zelo redko v stiku z dnom vodotoka, saj zaradi vpliva turbulence lebdiyo v vodnem toku (Rusjan in sod., 2006). Ta vrsta plavin povzroča kalnost. To lahko dodatno razdelimo na naravno kalnost, ki predstavlja v vodnem toku stalno lebdeč material, ter poplavno kalnost, ki je prisotna zgolj ob povišanih pretokih. Druga vrsta plavin so rinjene plavine, za katere je značilno, da se premeščajo po rečnem dnu ali ob poskakovanju v vodnem toku ostajajo v bližini dna. Količina premeščanja rinjenih plavin definira prodonosnost vodotoka (Mikoš, 2012).

Pri dinamiki premeščanja (predvsem rinjenih) plavin ima pomembno vlogo razmerje med dotokom plavin v obravnavani odsek in zmožnostjo premeščanja plavin na odseku. Slednjo imenujemo transportna zmogljivost in je v največji meri odvisna od moči vodnega toka ter zrnastostne sestave plavin. Transportno zmogljivost odseka je mogoče določiti z različnimi empiričnimi enačbami, kot sta na primer Meyer - Peter Mullerjeva enačba (Meyer-Peter Muller, 1948) in Ackers - Whiteova enačba (Ackers, White, 1973). Dotok plavin v odsek pa je odvisen od sproščanja plavin v zaledju in transportne zmogljivosti struge vodotoka gorvodno. Če je dotok plavin večji od transportne zmogljivosti odseka, govorimo o zasičenem toku plavin. Takrat je premeščanje plavin na odseku enako transportni zmogljivosti odseka, višek dotoka plavin pa se odlaga znotraj odseka in povzroča zaplavljanje struge. Če pa je transportna zmogljivost večja od dotoka plavin, pa na odseku prihaja do erozije oz. poglobljanja struge in selektivnega odplavljanja manjših frakcij plavin. Zaradi tega se sčasoma na dnu ustvari krovna plast iz preostalih večjih frakcij, ki pred nadaljnjim odplavljanjem ščitijo pod njimi skrite drobnejše frakcije. V tem primeru je dejansko premeščanje plavin manjše od teoretične transportne zmogljivosti, dokler moč vodnega toka ni dovolj velika, da poruši krovni sloj in znova začne erodirati dno struge.

1.2 Področje obravnave in cilji magistrske naloge

Magistrska naloga se osredotoča na tematiko premeščanja plavin v strugi Save Dolinke. Sava Dolinka je tipična alpska prodonosna reka, ki predstavlja levi povirni krak Save. Njen izvir predstavlja mokrišče Zelenci med naseljema Podkoren in Rateče v Zgornjesavski dolini, ki se napaja s podzemnimi vodami potokov Nadiža in Trebiža. Od izvira teče skozi Zgornjesavsko dolino proti jugovzhodu mimo naselij Kranjska Gora, Gozd Martuljek, Belca, Mojstrana in Hrušica do Jesenic, kjer je zaradi akumulacijskega jezua hidroelektrarne Moste prekinjen njen naravni tok. Od izvira do Hrušice teče po naravni strugi, vrezani v lastne rečno-ledeniške prodne nanose, mimo Jesenic pa je njena struga regulirana. Pod jezum hidroelektrarne Moste nato pot nadaljuje po globlji dolini, vrezani v prodne naplavine in konglomerat, proti jugu, kjer se pri Radovljici združi s Savo Bohinjko v Savo. S hidrološkega vidika ima Sava Dolinka dežno-snežni režim z dvema viškoma pretokov. Bolj izrazit je večinoma jesenski višek, ki je posledica jesenskih padavin. Drugi, manj izraziti spomladanski višek, pa je posledica kombinacije padavin in taljenja snega. Glavnina plavin, ki se premeščajo po strugi Save Dolinke, doteka iz pritokov Pišnica, Martuljek, Beli potok, Belca in Bistrica. Tok plavin je večinoma zaustavljen na prodnem zadrževalniku pri Hrušici, dokončno pa pred akumulacijsko pregrado HE Moste.

V okviru magistrske naloge se bomo osredotočili na premeščanje rinjenih plavin na odseku Save Dolinke od sotočja s Pišnico pri Kranjski Gori do prodnega zadrževalnika Hrušica pred Jesenicami.

Predvidena je izdelava hidravličnega modela za omenjen odsek v programu HEC-RAS ter njegova nadgradnja na model premeščanja sedimentov. Osrednji cilj naloge je s podatki, ki so na voljo (vzorci zrnastostne sestave dna struge, podatki o pretokih), in določenimi ocenami (dotok plavin iz prispevnih območij) s pomočjo omenjenega modela oceniti količine premeščanja plavin v strugi Save Dolinke. Poleg tega želimo ugotoviti, kakšen vpliv ima spreminjanje metod izračuna in posameznih parametrov na končne rezultate modela. Po do sedaj znanih podatkih je prodonosnost Save Dolinke v prerezu nad prodnim zadrževalnikom Hrušica po podatkih Vodogradbenega laboratorija iz Ljubljane (VL, 1968) ocenjena na 20.000 m³/leto (Mikoš, 2000), kar nam bo služilo kot orientacijska vrednost za rezultate modela, ki se ji bomo želeli približati. Pred izvedbo primerjalnih izračunov v modelu predvidevamo, da ima bistven vpliv na transport plavin hidrologija oziroma vodnatost vodotoka, kar se bo pokazalo s primerjavo med povprečnim, suhim in mokrim hidrološkim letom. Pričakujemo tudi vpliv različnih metod izračuna transportne zmogljivosti in delovanja podlage oziroma rečnega dna. Na prodonosnost v določeni meri lahko preko hitrosti in globine vode vpliva tudi koeficient hrapavosti podlage (v našem primeru Manningov koeficient hrapavosti).

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Premeščanje plavin v strugi

Premeščanje plavin v strugi vodotoka je neposredno povezano z močjo vodnega toka. Odvisnost med premeščanjem plavin in pretokom opisuje premestitvena funkcija, ki za posamezen prečni prerez vodotoka definira količine premeščanja plavin pri različnih pretokih v strugi. Z izjemo naravne kalnosti, ki predstavlja v vodi stalno lebdeče delce, se proces premeščanja zrn plavin začne šele ob doseženem določenem pretoku oz. globini vodnega toka. Ta prag je definiran kot začetek prodnega premika, ki je opisan v nadaljevanju.

2.1.1 Začetek prodnega premika

Začetek premika posameznega zrna je odvisen od ravnovesja sil, ki delujejo na zrno. Te sile so:

- efektivna teža potopljenega zrna (teža zrna, zmanjšana za silo vzgona),
- potisna sila toka vode F_s in
- dvižna sila oz. dinamični vzgon.

Teoretično lahko ravnovesje sil na zrno z določeno izpostavljenostjo zapišemo kot momentni pogoj ravnovesja okoli podporne točke zrna v dnu vodotoka. Velikost potisne sile, ki je potrebna za porušitev tega ravnovesja in začetek premika posameznega zrna, je definirana kot kritična potisna sila F_{s-krit} . Ta se za vsako zrno razlikuje glede na velikost in lego zrna. V primeru, ko je F_s manjša od F_{s-krit} za vsa zrna, ni prodnega premika. Z večanjem F_s ta preseže F_{s-krit} za posamezna zrna, ki se začnejo premikati, in govorimo o selektivnem prodnem premiku. V primeru, ko je F_s večja od F_{s-krit} večine zrn, govorimo o razviti prodonosnosti.

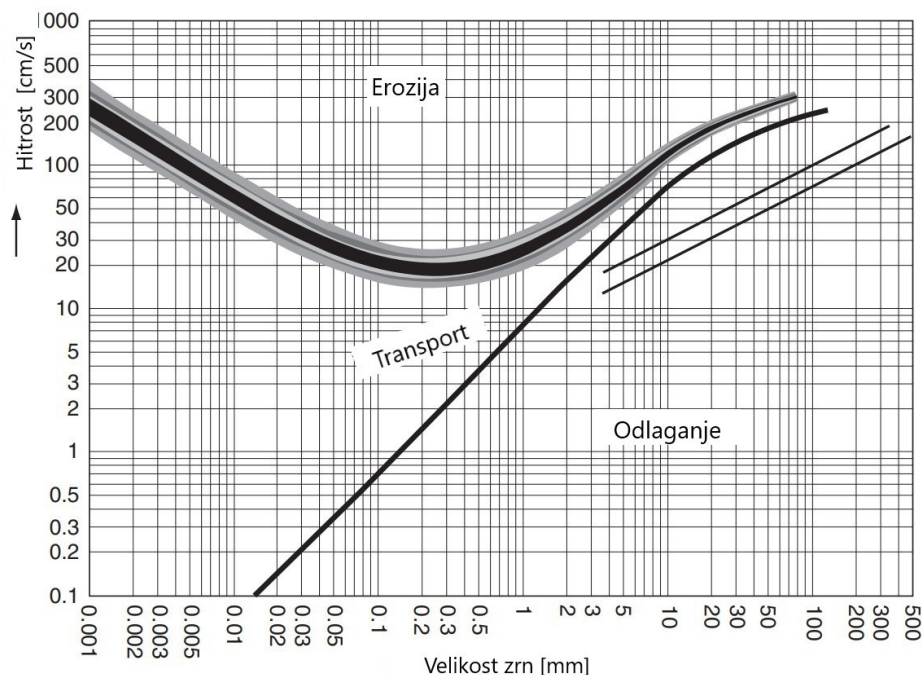
Potisno silo toka vode na posamezno zrno povzroči tlačna razlika na sprednji in zadnji strani zrna, ki nastane zaradi obtekanja vode. Njeno vrednost je mogoče v odvisnosti od lokalnih pretočnih hitrosti ob zrnu zapisati po teoriji hitrosti posedanja kroglastega telesa v mirujoči vodi (Mikoš, 2007):

$$F_s = c_w \times F \times \rho_w \times \frac{v^2}{2} \quad (2.1)$$

kjer nastopajo:

- F ... vodnemu toku izpostavljena površina zrna, odvisna od lege zrna [m^2],
- ρ_w ... gostota vode [1000 kg/m^3],
- c_w ... oblikovni koeficient upora toku vode, odvisen od oblike zrna [-],
- v ... lokalna pretočna hitrost vode [m/s].

Lokalne pretočne hitrosti vode so spremenljive in težko merljive, zato je Hjulström (1935) podal diagram (Slika 1), ki določa mehanizem transporta različnih velikosti delcev glede na povprečne pretočne hitrosti. Krivulje, ki ločujejo območja mehanizma odlaganja, transporta in odlaganja delcev, je pridobil z izvedbo laboratorijskih poizkusov z uniformnimi velikostmi zrn, kjer je spremljal, pri katerih povprečnih pretočnih hitrostih se zrna določenih velikosti začnejo premikati (Sherman in sod., 2013).



Slika 1: Reprodukcijska Hjulströmovega (1935) diagrama (prirejeno po Sherman in sod., 2013).

Lokalne hitrosti, ki imajo neposreden vpliv na potisno silo toka vode, so odvisne od razporeditve hitrosti in preko tega posledično tudi od strižne napetosti ob dnu τ_0 . Iz tega izhaja drugi pristop, ki izraža začetek prodnega premika v odvisnosti od strižne napetosti ob dnu. Tako je Shields (1936) definiral brezdimenzionalno strižno napetost Θ (Enačba (2.2)), ki jo imenujemo tudi Shieldsov parameter (Bosboom, Stive, 2023a).

$$\Theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w) \times g \times D} = \frac{h \times I}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \times D} \quad (2.2)$$

kjer je:

Θ ... brezdimenzionalna strižna napetost [-],

τ_0 ... strižna napetost pri dnu [N/m^2],

h ... pretočna globina [m],

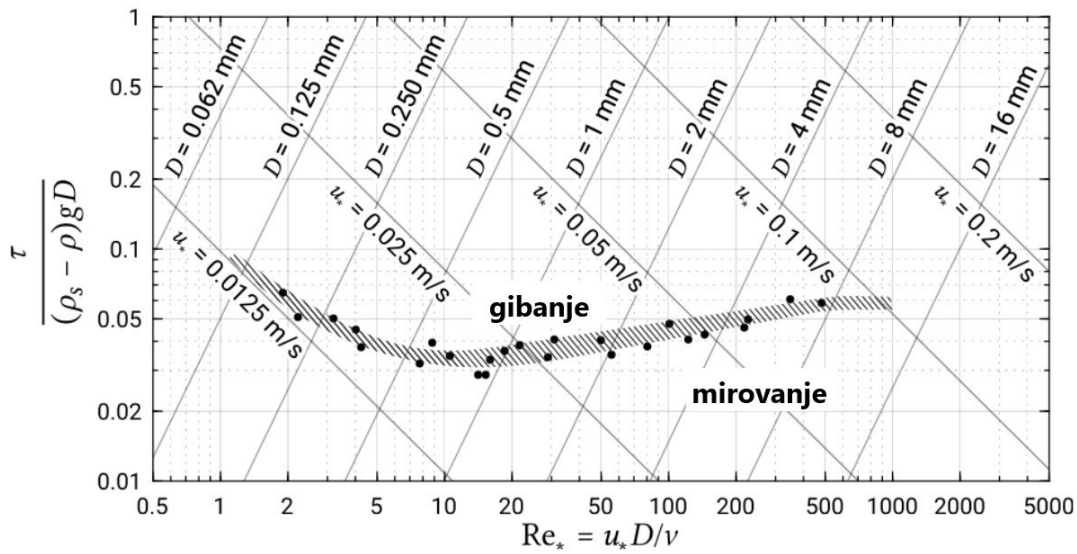
g ... gravitacijski pospešek [m/s^2],

ρ_s ... gostota zrna plavin [kg/m^3],

ρ_w ... gostota vode [kg/m^3],

D ... premer zrn plavin [m].

Z vrednostjo tega parametra, ki je odvisna od hidravlične obtežbe toka na zrno (preko strižne napetosti) in odpora zrna proti premiku (preko teže potopljenega zrna), je enolično določen začetek prodnega premika. Ta nastopi, ko je dosežena kritična vrednost brezdimenzionalne strižne napetosti Θ_{cr} . Kritično vrednost je mogoče določiti z uporabo Shieldsovega diagrama (Shields, 1936), ki ga prikazuje slika 2. Ta podaja kritične brezdimenzionalne napetosti v odvisnosti od Reynoldsovega števila posameznega zrna plavin.



Slika 2: Shiledsov diagram (prirejeno po Bosboom, Stive, 2023b).

Reynoldsovo število posameznega zrna se razlikuje od običajne definicije Reynoldsovega števila, ki narekuje režim toka. V enačbi (2.3) pretočno hitrost nadomesti strižna hitrost, velikost struge vodotoka pa premer zrna (Bosboom, Stive, 2023b):

$$Re_* = \frac{u_* \times D}{\nu} \quad (2.3)$$

kjer je:

- Re_* ... Reynoldsovo število za posamezno velikost zrna,
- u_* ... strižna hitrost [m/s],
- D ... premer zrna [m],
- ν ... kinematična viskoznost vode [m²/s].

Ob tako določeni kritični brezdimenzionalni strižni napetosti in znani velikosti srednjega zrna plavin v podlagi D_{mUS} lahko z uporabo enačbe (2.4) določimo kritično globino vodnega toka h_{cr} , ob kateri nastopi začetek prodnega premika. Tudi v primeru tlakovanja dna struge, kjer je prisoten utrjen zgornji krovni sloj podlage, lahko kritično globino izračunamo po enačbi (2.4), kjer upoštevamo predpostavko, da je velikost 90% zrna podlage približno enaka srednjemu zrnu krovnega sloja D_{mDS} (Mikoš, 2007).

$$h_{cr} = \frac{\theta_{cr} \times \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \times D_{mUS}}{I} \quad (2.4)$$

kjer je:

- h_{cr} ... kritična pretočna globina vode [m],
- θ_{cr} ... kritična brezdimenzionalna strižna napetost [-],
- ρ_s ... gostota zrna plavin [kg/m³],
- ρ_w ... gostota vode [kg/m³],
- D_{mUS} ... srednje zrno plavin v podlagi [m],
- I ... padec dna vodotoka [m/m].

2.1.2 Mehanizmi premeščanja plavin

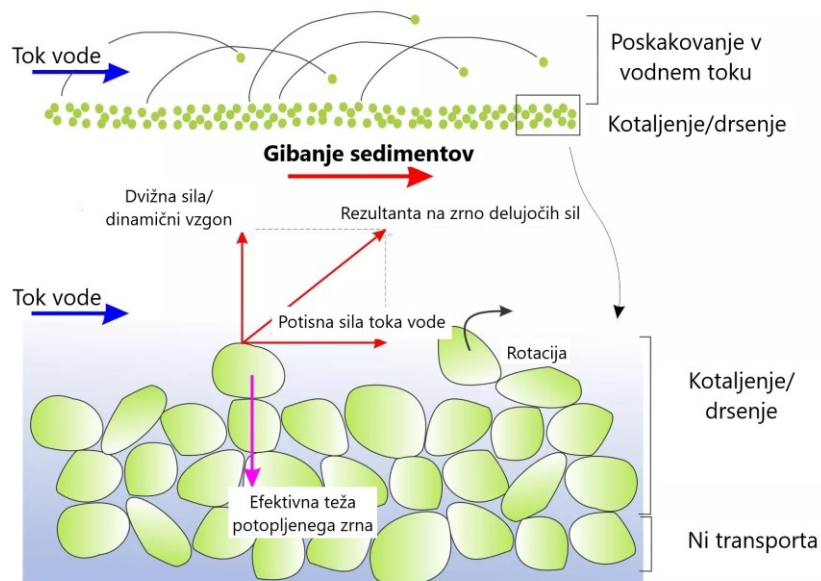
Plavine se z vodnim tokom premeščajo z različnimi mehanizmi. Glede na to jih lahko ločimo na naravno kalnost, rinjene plavine in lebdeče plavine.

2.1.2.1 Naravna kalnost

V naravno kalnost spadajo delci, ki so dovolj majhni, da stalno lebdijo v vodnem toku in tudi v mirni vodi nimajo stika s podlago. V večini primerov ti delci v dnu vodotoka ne nastopajo, vir kalnih snovi pa predstavlja predvsem izpiranje iz povirnih območij vodotoka (Mikoš, 2007). Naravna kalnost vodotokov v Sloveniji je načeloma majhna.

2.1.2.2 Rinjene plavine

Če odmislimo kalne delce, ki so stalno prisotni v vodnem toku, se prodni premik ob doseženi kritični pretočni hitrosti oz. kritični strižni napetosti začne kot transport rinjenih plavin. Pri tem mehanizmu se zrna plavin pod vplivom potisne sile vodnega toka gibljejo ob dnu ali blizu dna vodotoka. Ob zveznem večanju moči vodnega toka preko praga začetka prodnega premika, se zrna začnejo najprej kotaliti in drseti po dnu vodotoka. Ta proces je v angleščini definiran kot »traction load« oziroma »traction carpet«. Z nadaljnjim večanjem moči vodnega toka se večata potisna sila vode in posledično tudi dvižna sila dinamičnega vzgona, kar povzroči odlepljanje zrn od podlage in poskakovanje v vodnem toku. Mehanizem poskakovanja je vključen med mehanizme rinjenih plavin, saj je čas lebdenja zrna v vodi pred ponovnim stikom s podlago kratek. Pri poskakovanju delcev v vodnem toku prihaja do veliko trkov med delci, kar povzroča povečano abrazijo oz. obrus delcev (Allen, 1992). Mehanizme premeščanja rinjenih plavin prikazuje slika 3.



Slika 3: Mehanizmi premeščanja rinjenih plavin (prirejeno po Geological Digressions, Earth science resources, images, glossaries, and SCICOMM for students and non-specialists, b.d.).

2.1.2.3 Lebdeče plavine

Z večanjem moči vodnega toka se sorazmerno večja dvižna sila dinamičnega vzgona, kar povzroči prehod iz poskakovanja v lebdenje zrn v vodnem toku. Zrna, ki tako zaradi vpliva turbulence lebdiijo v vodnem toku in so le redko v stiku z dnem vodotoka, imenujemo lebdeče plavine. Za dovolj majhne delce v turbulentnem toku velja, da je hitrost usedanja delcev dosti manjša od turbulentnega vertikalnega gibanja, čemur sledi enakomerna porazdeljenost teh delcev po globini toka (Allen, 1992).

2.1.3 Vrednotenje premestitvene zmogljivosti

Premestitvena zmogljivost posameznega prereza vodotoka poda količino plavin (z definirano zrnastostjo), ki jo lahko moč vodnega toka premesti v določenem časovnem intervalu. V primeru zasičenega toka plavin, ko je dotok plavin večji od premestitvene zmogljivosti, je slednja enaka prodonosnosti vodotoka. V primeru manjšega dotoka plavin od premestitvene zmogljivosti, je dejanska prodonosnost največkrat manjša od premestitvene zmogljivosti, oz. enaka v primeru prisotnosti erozije v strugi, ki predstavlja nadomestni vir plavin. V primeru, ko je dejanska prodonosnost manjša od premestitvene zmogljivosti, govorimo o latentni eroziji, ko se v dnu struge ustvari tlakovani sloj, ki ima večjo zrnastost od ostale podlage in ščiti podlago pred odplavljanjem zrn zaradi moči vodnega toka.

Različni avtorji so podali različne enačbe za oceno premestitvene zmogljivosti. Večina od njih je bila pridobljena na osnovi laboratorijskih poizkusov pri določenih pogojih in ekstrapolacijo za realne razmere v naravi. Omenjene enačbe delimo glede na to, ali podajajo premestitveno zmogljivost za celotne plavine, ali samo za rinjene oz. samo lebdeče plavine.

2.1.3.1 Enačba Meyer-Peter Müller

Enačba Meyer-Peter Müller (Meyer-Peter Müller, 1948) je bila ena prvih enačb za oceno premestitvene zmogljivosti. Razvita je bila na podlagi poizkusov na raziskovalnem zavodu za zemeljske in vodne gradnje na ETH Zurich. Vsi poizkusi so bili izvedeni na primerih z uporabo bolj grobih, rinjenih plavin, brez prisotnosti lebdečih plavin, zato enačba podaja zgolj količine premeščanja te skupine plavin. Poizkusi so bili opravljeni v območju razvite turbulence za padce dna od 0,04 % do 2 %, globine vode od 1 cm do 120 cm, pretoke med 2 l/s in 4 m³/s ter gostote zrn od 0,25 do 3,2 t/m³. Njena originalna oblika s prilagojenimi oznakami parametrov je prikazana v enačbi (2.5) (Meyer-Peter Muller, 1948):

$$\rho_w \times g \times \left(\frac{Q_r}{Q}\right) \left(\frac{k_s}{k_r}\right)^{3/2} \times R \times I = 0,047(\rho_s - \rho_w) \times g \times D_m + \rho_w^{1/3} \times q_B^{2/3} \quad (2.5)$$

kjer je:

Q_r ...reducirani, na dno delujoči pretok vode [m³/s],

Q ...celotni pretok vode [m³/s],

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

k_r ...Stricklerjev koeficient trenja [m^{1/2}/s],

ρ_w ... gostota vode [kg/m³],

ρ_s ...gostota zrn plavin [kg/m³],

g ... gravitacijski pospešek [m/s²],

D_m ...srednji premer zrn plavin [m],

q_B ...prostornina premeščenih rinjenih plavin na sekundo na širinski meter [m³/(m*s)].

Posamezni parametri so podrobneje opisani v (Mikoš, 2007). Vsak člen v enačbi (2.5) ima enoto strižne napetosti. Prvi člen predstavlja strižno napetost ob določeni obtežbi vodnega toka. Drugi člen predstavlja kritično strižno napetost, ki je potrebna za začetek prodnega premika. Tretji člen pa predstavlja presežno strižno napetost, ki narekuje količino premeščanja plavin.

Enačbo lahko zapišemo tudi v brezdimenzijski obliki, kjer poleg kritične brezdimenzionalne napetosti iz enačbe (2.4) nastopa še Einsteinov brezdimenzijski parameter premeščanja. Ta predstavlja razmerje med maso plavin, ki se premeščajo, in maso posameznih zrn plavin. Izračunamo ga lahko po enačbi (2.6) (Parker, 2006):

$$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \times g \times D_m \times D_m}} \quad (2.6)$$

Enačba (2.7) prikazuje brezdimenzijsko obliko enačbe Meyer-Peter Müller (Parker, 2006):

$$\Phi_B = 8 \times (\theta - \theta_{cr})^{3/2}; \theta_{cr} = 0,04 \quad (2.7)$$

Kasneje sta Wong (2003) ter Wong in Parker (2006) na podlagi laboratorijskih poizkusov popravila interpretacijo enačbe Meyer-Peter Müller in podala novo brezdimenzijsko zvezo, prikazano v enačbi

(2.8) (Parker, 2004). Poizkusi, na katerih temelji korekcija, so bili izvedeni na modelih z ravnim dnom, brez pojavljanja značilnih oblik dna. Zato je veljavnost enačbe omejena na uporabo pri nižjih pretokih oz. v mirnem režimu toka, kjer so zaradi enakomerne gladine vode sedimenti enakomerno porazdeljeni po dnu in ne prihaja do tvorjenja značilnih oblik dna:

$$\Phi_B = 4,93 \times (\theta - \theta_{cr})^{1,6}; \theta_{cr} = 0,047 \quad (2.8)$$

2.2 Sproščanje plavin v zaledju

Poleg premestitvene zmogljivosti predstavlja pomemben faktor pri transportu plavin tudi količina sproščanja plavin v zaledju, saj ta predstavlja vir plavin, ki so na voljo za premeščanje v vodotoku. Ta je odvisna od veliko različnih dejavnikov, med drugim od naklona terena, poraščenosti, količine padavin, kameninske sestave tal in velikosti območja. Tradicionalne metode napovedi potencialnega sproščanja plavin v zaledjih, ki jih bomo uporabili tudi pri naši analizi, temeljijo na uporabi empiričnih enačb. V njih najpogosteje nastopajo koeficienti, ki določajo posamezne lastnosti območja. Za določitev potencialnega sproščanja plavin na prispevnih območjih pritokov Save Dolinke smo uporabili Pintarjevo enačbo, ki je za območje Slovenije prilagojena verzija Gavrilovićeve enačbe.

2.2.1 Pintarjeva enačba

Kot je omenjeno v prejšnjem poglavju, Pintarjeva enačba (Pintar in sod., 1986, cit. po Bezak in sod., 2023) predstavlja za območje Slovenije prilagojeno enačbo, ki jo je razvil Gavrilović (Gavrilović, 1970, cit. po Bezak in sod., 2023) na podlagi terenskih meritev na območju Srbije v 60. letih 19. stoletja. Glavna enačba, ki kot rezultat poda povprečno letno sproščanje gradiva v kubičnih metrih, je prikazana v enačbi (2.9):

$$W = 20 \times P_d \times Z^{3/2} \times A \quad (2.9)$$

kjer je:

W ...povprečno letno sproščanje gradiva [m^3/leto],

P_d ...maksimalne dnevne padavine [mm],

Z ...erozijski koeficient območja,

A ... površina hidrografske enote [km^2].

Erozijski koeficient območja se določi po enaki metodi kot v originalni Gavrilovićevi enačbi. Njegova določitev je prikazana v enačbi (2.10):

$$Z = Y \times X \times (\rho \times \sqrt{S}) \quad (2.10)$$

kjer je:

Z ...erozijski koeficient območja,

Y ...koeficient erodibilnosti,

X ...koeficient vegetacijske zaščitenosti,

ρ ...koeficient razvitosti erozijskih pojavov,

S ... povprečni naklon območja [m/m].

Več o uporabljenih koeficientih in o metodologiji za njihovo določitev je zapisano v (Hrvatin in sod., 2019) in (Bezák et al, 2023).

2.2.2 Koeficient odplavljanja gradiva

Dotok plavin v določen profil ni odvisen zgolj od potencialnega sproščanja gradiva v zaledju, temveč tudi od zmožnosti odplavljanja tega sproščenega gradiva preko porečja. To opisuje koeficient odplavljanja gradiva, ki določa, kolikšen del sproščenega gradiva se odplavi preko porečja. Enačba (2.11) prikazuje določitev povprečnega letnega odplavljanje gradiva:

$$W_{odplavljeno} = W \times SDR \quad (2.11)$$

kjer je:

$W_{odplavljeno}$...povprečno letno odplavljanje gradiva [$m^3/leto$],

W ...povprečno letno sproščanje gradiva [$m^3/leto$],

SDR ...koeficient odplavljanja gradiva.

Različni avtorji so podali številne enačbe, prek katerih je s pomočjo lastnosti porečja mogoče oceniti koeficient odplavljanja gradiva (SDR). Ena od metod ocenjevanja je model Vanoni (Ouyang in sod., 1997), ki je bil določen na podlagi analize 300 porečij iz različnih delov sveta. Model ima en parameter in tako za oceno koeficienta zahteva podatek o površini porečja, prikazan je v enačbi (2.12):

$$SDR = 0,42 \times A^{-0,125} \quad (2.12)$$

kjer je:

SDR ...koeficient odplavljanja gradiva,

A ...površina porečja [m^2].

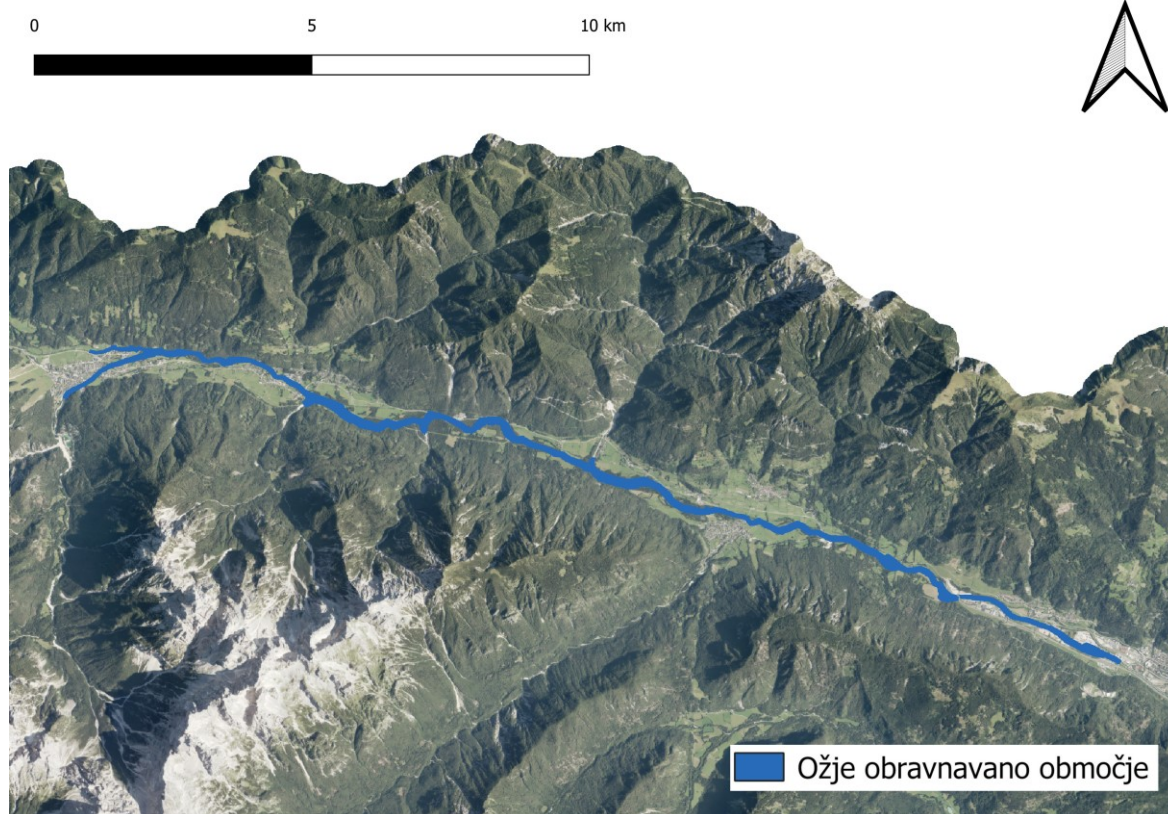
3 PODATKI IN METODE

3.1 Obravnavano testno območje in vhodni podatki

3.1.1 Lokacija in lastnosti testnega območja

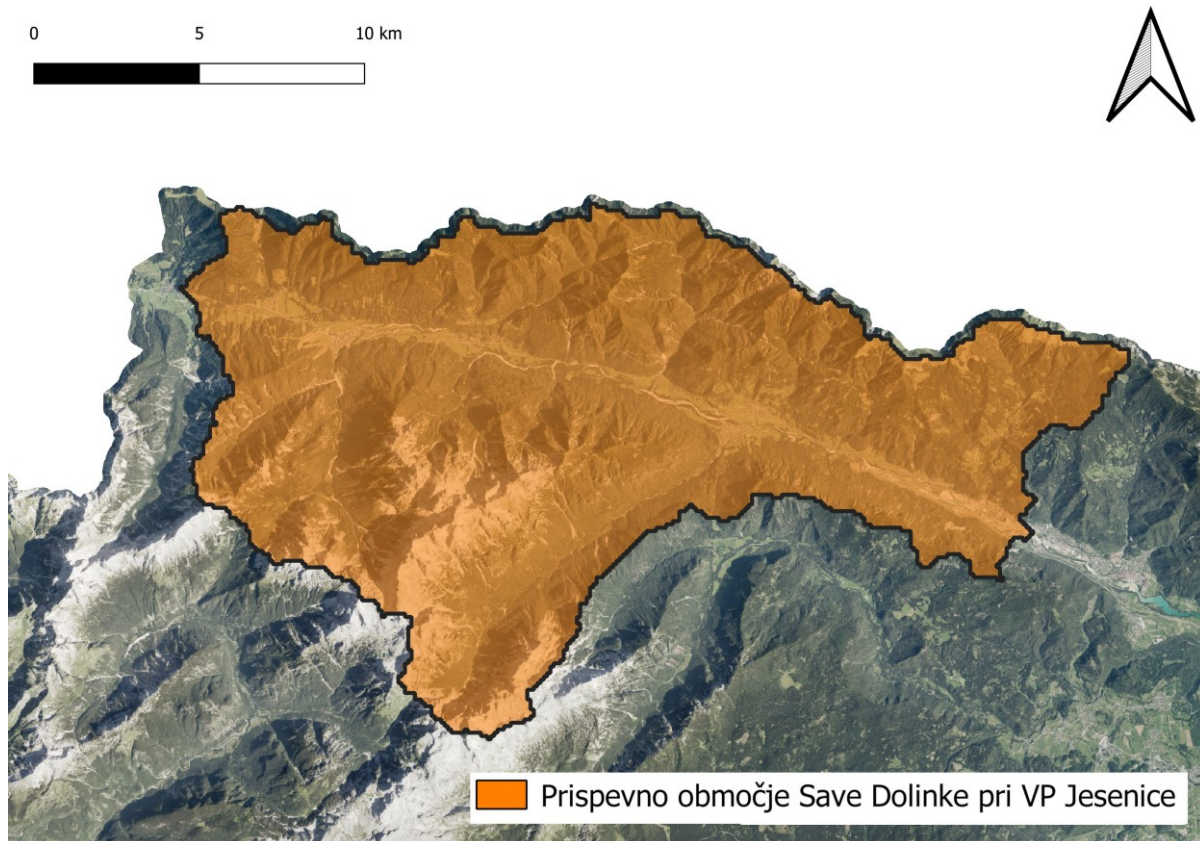
V okviru magistrske naloge je obravnavan odsek reke Save Dolinke na območju Zgornjesavske doline. Dolina je nastala kot posledica Savskega preloma, ki poteka po sredini doline (Placer, 1996) in ločuje gorski verigi Julijskih Alp in Karavank. Dolino je preoblikovalo dolgoletno delovanje rečnega toka in ledeniških procesov. Danes je dno doline v večini pokrito s slojem naplavinjskih nanosov, v katerega strugo vrezuje tok Save Dolinke.

Ožje območje obravnave, ki je vključeno v hidravlični model, obsega strugo Save Dolinke z obojestranskim obrežnim pasom od sotočja Save Dolinke s Pišnico pri Kranjski Gori do prodnega zadrževalnika Hrušica nad Jesenicami. Prikazano je na sliki 4. Omenjeno območje je v celoti obravnavano kot enovit hidravlični model z enodimenzijskim tokom. Zraven so vključeni še krajši odseki glavnih prodonosnih pritokov nad njihovimi sotočji s Savo Dolinko. V hidravličnem modelu obravnavan odsek je dolg približno 20 km, višinska razlika med začetkom in koncem odseka je enaka 194 m. Povprečni padec dna struge znaša 0,0097 m/m. Struga vodotoka je večinoma naravno oblikovana. Predvsem na območjih naselij in v bližini prometne infrastrukture so prisotne posamezne regulacije vodotoka z namenom zavarovanja pred poplavno in erozijsko nevarnostjo. Med njimi so najbolj zastopani ustalitveni pragovi, jezbece in pregrade za zadrževanje plavin. Ožje območje obravnave bo preko hidravličnega modela neposredno uporabljeno za izračun dinamike transporta sedimentov. Glavni vir sedimentov, ki se premeščajo po obravnavanem odseku Save Dolinke, predstavljajo njeni pritoki. Prvi pritok z vidnim prispevkom k prodonosnosti Save Dolinke je Pišnica, dolvodno sledijo še Martuljek, Beli potok, Belca in Bistrica. Omenjeni pritoki so tudi posebej obravnavani v hidravličnem modelu.



Slika 4: Prikaz ožjega obravnavanega območja.

Širše območje obravnave obsega celotno porečje Save Dolinke nad vodomerno postajo Jesenice, ki je razdeljeno na prispevna območja posameznih odsekov Save Dolinke in njenih pritokov. To območje prikazuje slika 5. Poznavanje lastnosti prispevnih območij je potrebno predvsem za ustrezno določitev robnih pogojev hidravličnega modela, med katerimi so najpomembnejši hidrološki podatki o pretokih in podatki o vtoku sedimentov v hidravlični model. Celotno prispevno območje Save Dolinke nad prerezom prodnega zadrževalnika Hrušica obsega površino 245,3 km². Razvodnica, ki ga omejuje, poteka na severni strani Gornjesavske doline, od Jesenic po grebenu Karavank do območja tromeje med Slovenijo, Avstrijo in Italijo, nato pa preko Rateč po grebenih Julijskih Alp in Mežakle po južni strani doline nazaj do Jesenic. Z izjemo vznožja Gornjesavske doline, širše območje obravnave obsega večinoma gorski svet z dokaj velikimi nakloni terena. Prispevno območje je dodatno razdeljeno na manjša prispevna območja za posamezne hidrološke prereze Save Dolinke in prispevna območja njenih pritokov. Prispevna območja posameznih prerezov so uporabljena predvsem za določitev podatkov o lokacijskem spreminjanju (večanju) pretokov vzdolž celotnega odseka. Prispevna območja pritokov (ta se prekrivajo s prispevnimi območji prerezov Save Dolinke) pa so uporabljena za določitev vrednosti pretokov na pritokih Save Dolinke in pridobitev podatkov o potencialnem sproščanju sedimentov v njihovem zaledju. Celotno prispevno območje je tako razdeljeno na 8 manjših prispevnih območij, ločeno pa je obravnavanih še pet prispevnih območij pritokov.



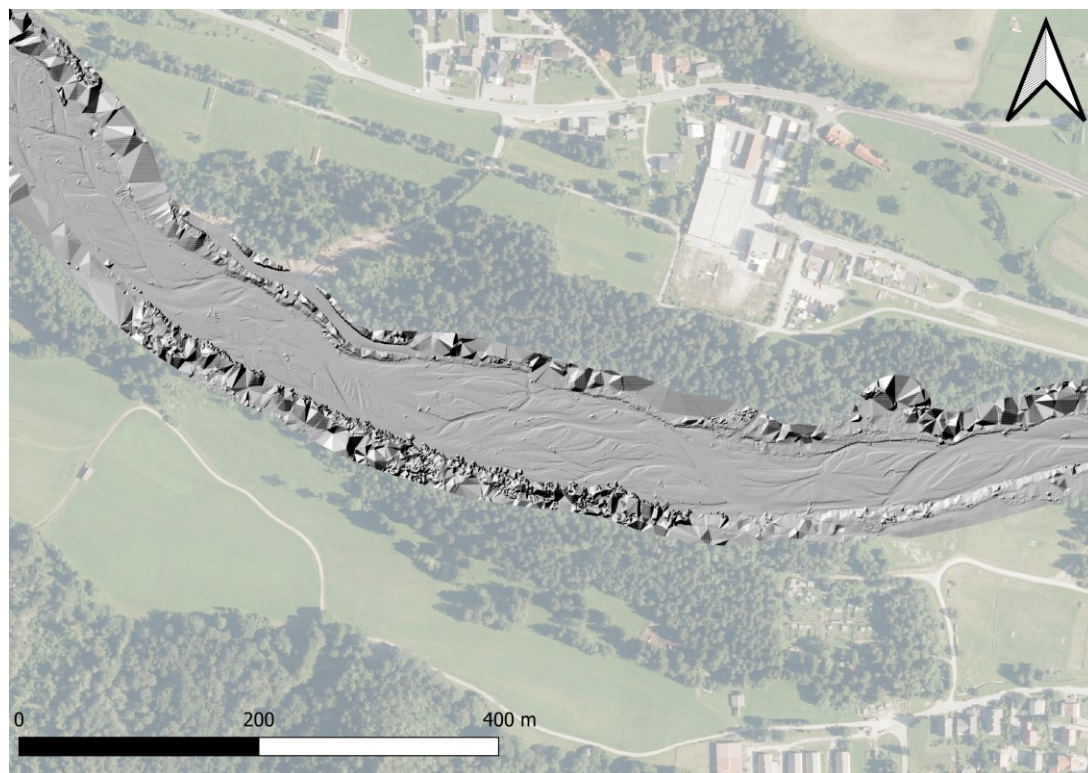
Slika 5: Prikaz širšega obravnavanega območja.

3.1.2 Podatki o lastnostih terena

3.1.2.1 Topografija

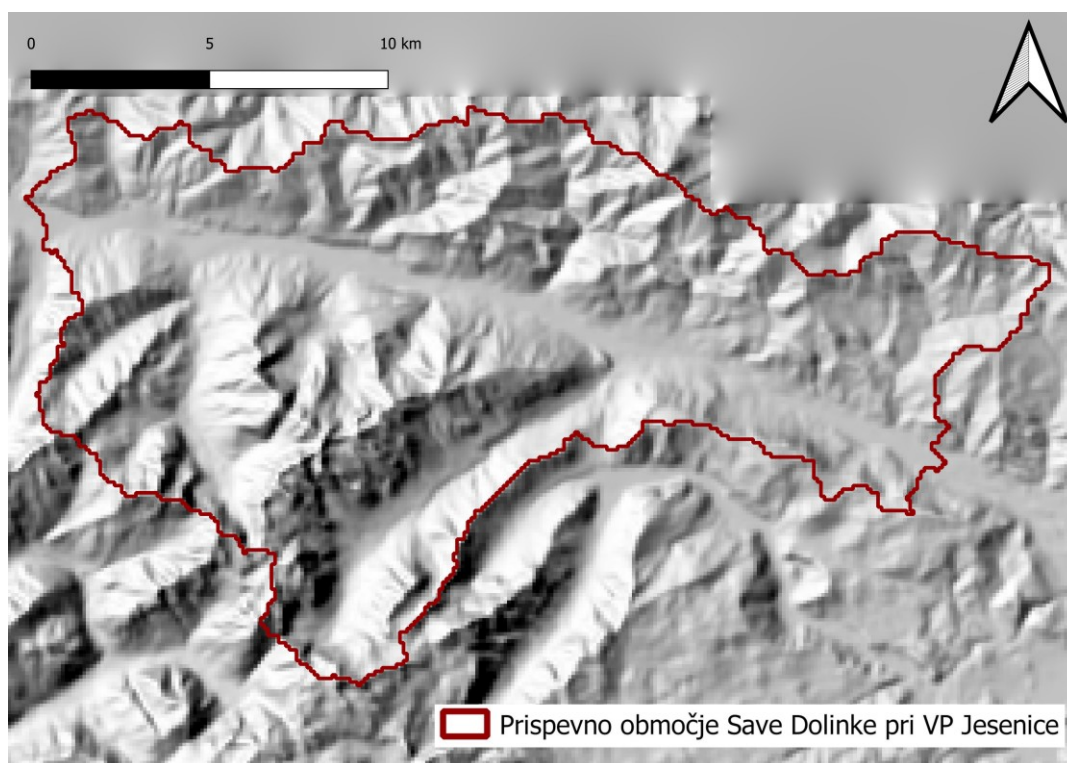
Podatki o topografiji oziroma batimetriji na območju struge so bili za večinski del ožjega območja obravnave pridobljeni iz rastrskega sloja podatkov višin terena (digitalni model višin - DMV) ločljivosti 0,025 m. Ta je bil ustvarjen z lidarskim snemanjem iz zraka s pomočjo RTK drona (EHO Projekt, 2022). Snemanje je za potrebe projekta »Strategija odvzema naplavin na porečju reke Save« (Nivo Eko in sod., 2023) potekalo v maju in juniju 2022. Za območje struge od pritoka Belce do Mojstrane so bili uporabljeni drugi podatki in sicer točkovni sloj podatkov višin terena ločljivosti 0,25 m, pridobljen po enaki metodi (EHO Projekt, 2021). Vsi podatki so bili reducirani na enotno ločljivost 0,25 m in združeni v celovit rastrski sloj podatkov višin terena. Primer podatkov za območje Mojstrane je prikazan na sliki 6.

Za modele posebej obravnavanih pritokov, ki segajo izven območja zgoraj omenjenih podatkov, je bil uporabljen Digitalni model reliefa Slovenije z resolucijo 1 m (DMR1), javno dostopen na spletnih straneh Agencije Republike Slovenije za okolje (Geodetski inštitut Slovenije, 2015). Dodatno je bil uporabljen tudi na območju struge Save Dolinke na mestih, kjer so v podatkih z resolucijo 0,25 m napake zaradi nepravilne filtracije vegetacijskih slojev, kar se dogaja predvsem ob brežinah in izven robov struge (poplavna območja ob strugi).



Slika 6: Prikaz modela senčenja digitalnega modela terena z ločljivostjo 0,25m na območju Mojstrane.

Podatki o topografiji terena za širše območje obravnave (celotno porečje Save Dolinke nad VP Jesenice) so bili pridobljeni iz rastrskih podatkov višin za Slovenijo s prostorsko resolucijo 100 m. Model senčenja rastrskih podatkov o višinah za širše območje prikazuje slika 7.



Slika 7: Model senčenja rastrskih podatkov s prostorsko resolucijo 100m.

3.1.2.2 Podatki aerofotografije

Podatki aerofotografije oziroma ortofoto posnetki so bili pridobljeni iz zbirke podatkov daljinskega zaznavanja na spletni strani E-geodetski podatki (Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS), 2023).

3.1.2.3 Pokrovnost tal

Podatki o pokrovnosti tal so bili pridobljeni iz vektorskih podatkov o pokrovnosti tal Programa za usklajevanje informacij o okolju – Corine Land Cover (CLC) 2018. Podatki imajo prostorsko resolucijo 100 m.

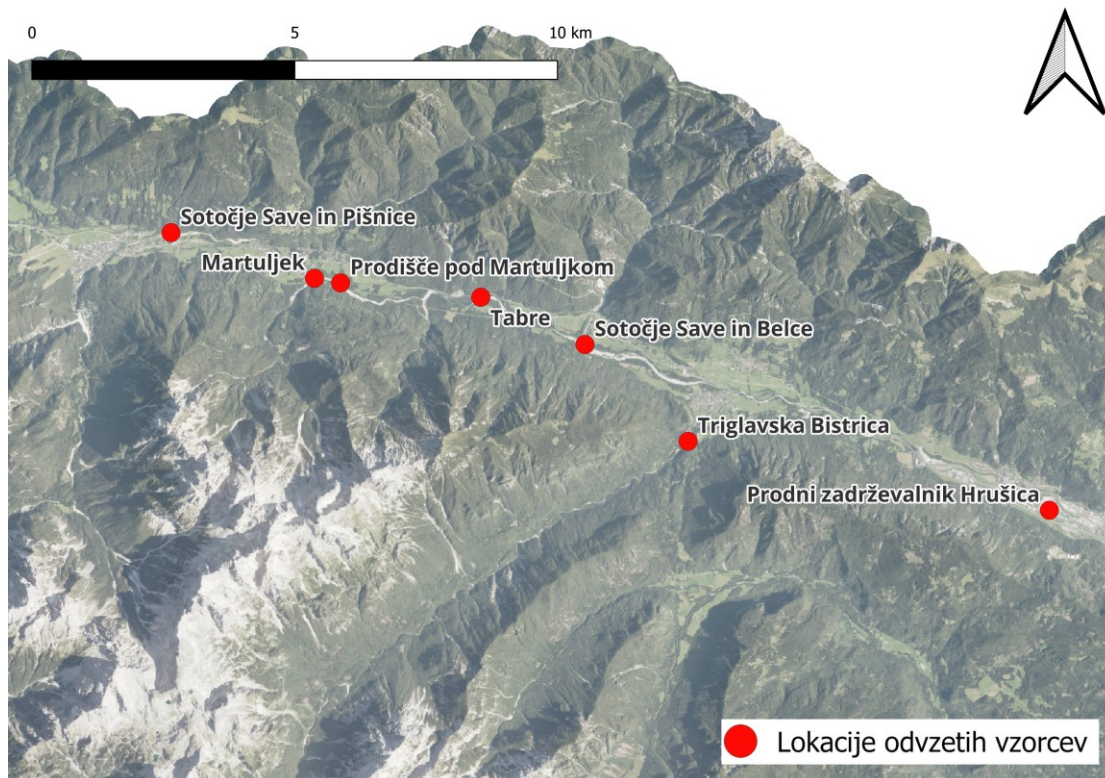
3.1.2.4 Pedološka sestava tal

Podatki o pedološki sestavi tal so bili pridobljeni iz podatkov Pedološke karte Slovenije (MKGP, 2022).

3.1.3 Podatki o zrnnavostni sestavi rinjenih plavin

Podatki o zrnnavostni sestavi dna struge in posledično rinjenih plavinah so bili pridobljeni na podlagi točkovnih vzorčnih mest, razporejenih vzdolž obravnavanega odseka Save Dolinke. Zrnnavost podlage na ostalih lokacijah med posameznimi vzorčnimi mesti, ki je zahtevana kot parameter hidravličnega modela, je bila v nadaljevanju pridobljena z interpolacijo med zrnnavostjo na lokacijah dveh sosednjih vzorcev.

Vzorci so bili znotraj obravnavanega odseka odvzeti na sedmih lokacijah. Šest lokacij se nahaja na Savi Dolinki, sedmi vzorec je bil odvzet na lokaciji pritoka Bistrica. Za ostale obravnavane pritoke, na katerih vzorci niso bili odvzeti, smo predpostavili zrnnavostno sestavo najbližjega vzorca. Lokacije so prikazane na sliki 8. Primer mesta odvzema vzorca za lokacijo Martuljek je prikazan na sliki 9. Ostala mesta odvzema vzorcev so prikazana na slikah znotraj priloge A.



Slika 8: Lokacije odvzemov vzorcev rinjenih plavin.



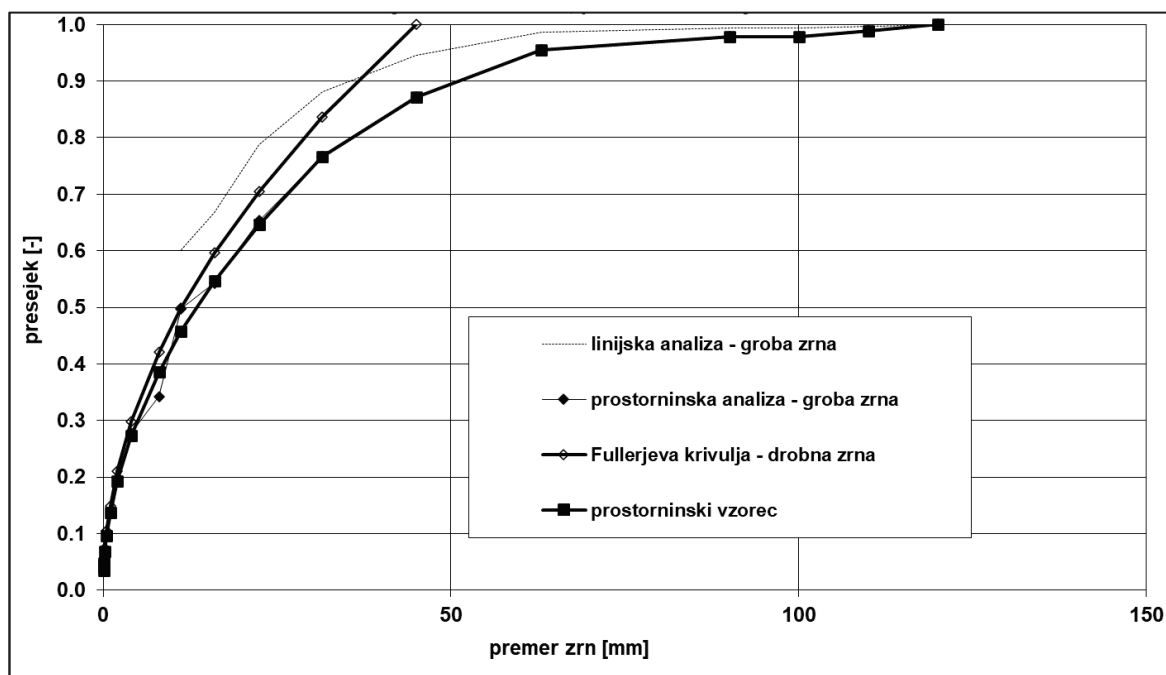
Slika 9: Primer mesta odvzema vzorca za lokacijo Martuljek (foto: osebni arhiv, 2022).

Zrnavostna sestava plavin na lokacijah odvzetih točkovnih vzorcev je bila pridobljena na podlagi postopkov linijske analize, ki je podrobneje opisana v Poglajen (2022). Pri odvzemu linijskega vzorca se na lokaciji vzorčenja vzpostavi ravna linija, po navadi v smeri toka, in odvzamejo vsa površinska zrna, ki se nahajajo pod črto. Odvzet vzorec se najpogosteje vrednoti številčno – rezultat vzorčenja predstavljajo podatki o številu zrn posameznega velikostnega razreda. Pri odvzemanju vzorcev je bilo na vsaki lokaciji odvzetih vsaj 200 zrn. Primer odvzema linijskega vzorca je prikazan na sliki 10.



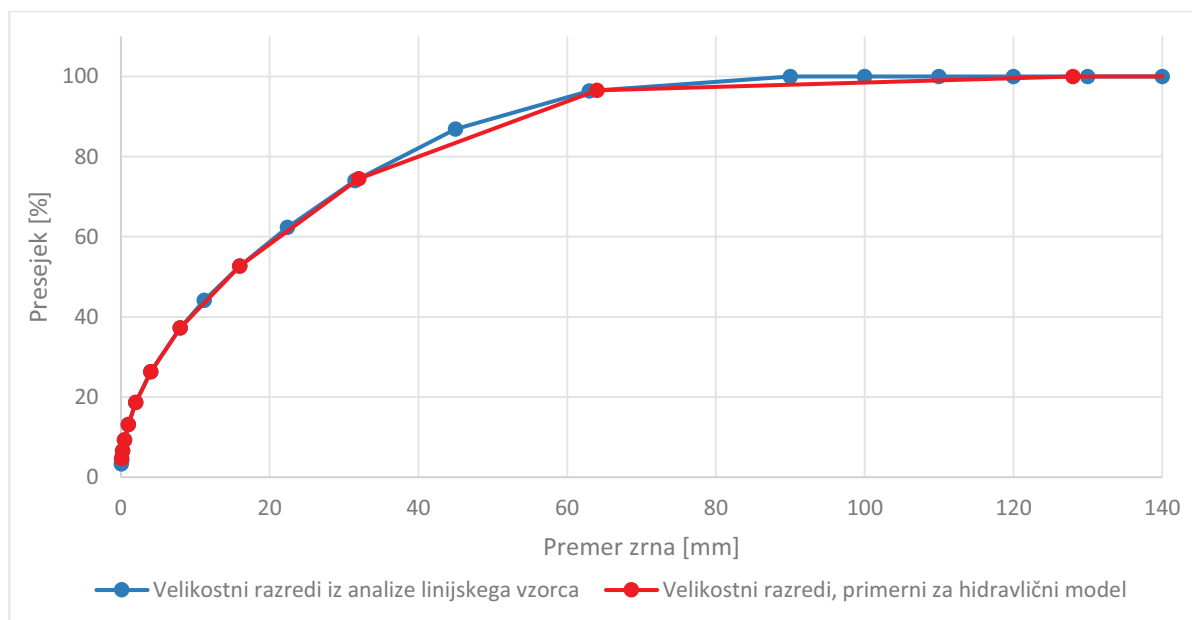
Slika 10: Primer odvzema linijskega vzorca na lokaciji sotočja Save Dolinke in Pišnice (foto: osebni arhiv, 2022).

Linijski vzorci so bili s programom ZPP v programskem orodju Excel (Mikoš, 1999) pretvorjeni v prostorninski vzorec grobih zrn. Končna zrnavostna krivulja vzorca je bila pridobljena s togim sestavljanjem tako pridobljenega prostorninskega vzorca grobih plavin s Fullerjevo krivuljo. Ta zajema deleže finih frakcij, ki pri linijskem vzorčenju krovnege sloja niso zajeti. Primer pretvorbe linijskega v prostorninski vzorec je prikazan na grafu 1.



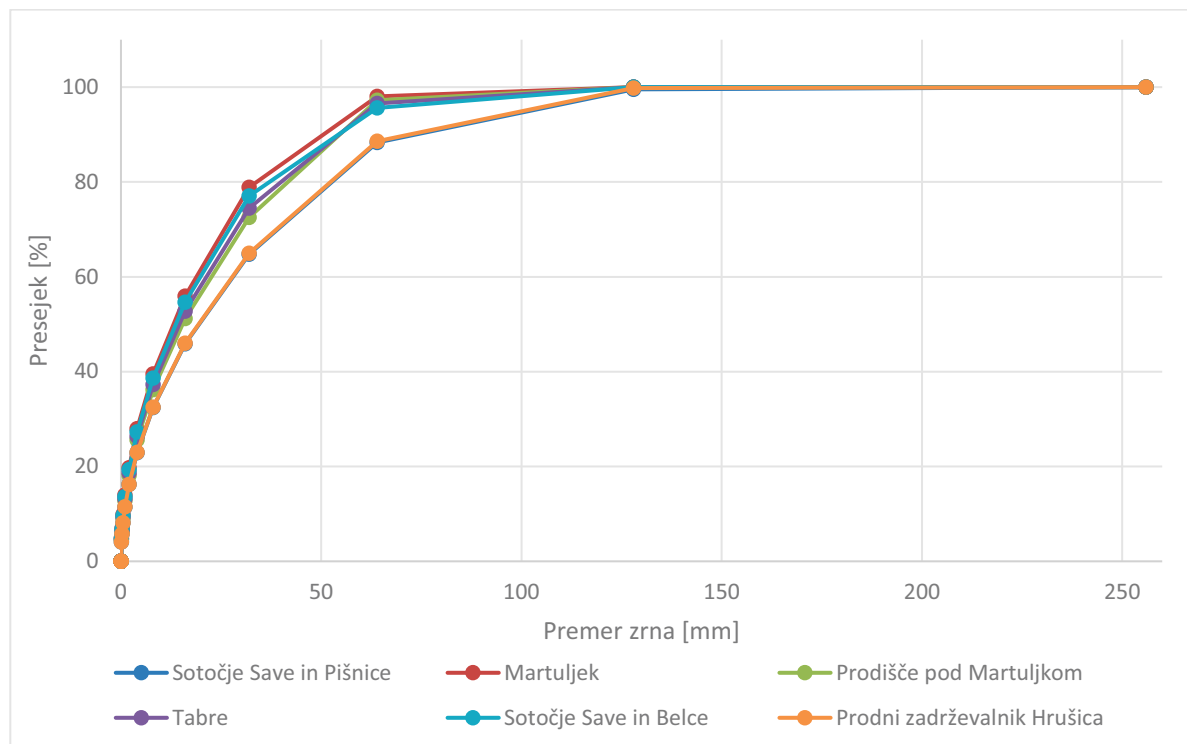
Graf 1: Preračun številčne linijske analize grobih zrn s težnostno prostorninsko analizo grobih zrn in togo sestavljanje s Fullerjevo zrnastostno krivuljo v prostorninski vzorec za lokacijo vzorca pod sotočjem Save Dolinke in Belce.

Krivulje zrnastosti, pridobljene s programom ZPP, so bile s pomočjo interpolacije prilagojene na velikostne razrede, ki ustrezajo zahtevam programa HEC-RAS, v katerem so bili kasneje izvedeni izračuni. Primer spremembe velikostnih razredov zrnastostne krivulje je prikazan na grafu 2.



Graf 2: Prilagoditev velikostnih razredov presejalnih krivulj za vzorec na lokaciji Tabre.

Zrnastostne sestave plavin na lokacijah odvzetih vzorcev so prikazane na grafu 3. Preglednica deležev zrnastosti po razredih je priložena v prilogi B.



Graf 3: Zrnastostne krivulje podlage na lokacijah odvzetih vzorcev.

3.1.4 Hidrološki in meteorološki podatki

3.1.4.1 Vhodni podatki o pretokih

Kot vhodni podatki za nadaljnjo določitev vrednosti pretokov na posameznih delih obravnavanega odseka so bile uporabljene povprečne dnevne vrednosti pretoka na vodomerni postaji Jesenice. Podatki so bili pridobljeni iz Arhiva hidroloških podatkov površinskih voda (ARSO, 2023a) in sicer za obdobje od 1. januarja 1952 do 31. decembra 2013.

3.1.4.2 Podatki o padavinah

Podatki o maksimalnih dnevni padavinah, ki so bili kasneje uporabljeni za določitev potencialnega letnega sproščanja gradiva na prispevnih območjih, so bili pridobljeni iz arhiva opazovanih in merjenih meteoroloških podatkov po Sloveniji (ARSO, 2023b). Uporabljene so bile vrednosti, merjene na padavinski postaji Mojstrana, in sicer za obdobje 1948-2001.

3.2 Uporabljena orodja

3.2.1 QGIS

QGIS (QGIS.org, 2023) je brezplačen odprtokoden program za prostorsko analizo, ki uporabnikom omogoča obdelavo in analizo geoprostorskih podatkov. QGIS omogoča uvoz, prikaz in urejanje različnih vrst prostorskih podatkov, kot so geografski informacijski sistemi (GIS), ortofoto posnetki, topografske karte in druge vrste podatkov. Program podpira številne formate datotek, kar omogoča združevanje podatkov iz različnih virov. Za prostorsko analizo je na voljo širok nabor orodij in

vtičnikov, ki omogočajo izvajanje različnih analitičnih postopkov za obdelavo podatkov. Poleg tega je mogoče program razširiti z različnimi dodatki in vtičniki, ki omogočajo prilagoditev funkcionalnosti programa glede na specifične potrebe uporabnika.

Pri izdelavi magistrske naloge je bil omenjeni program uporabljen za določitev obsega in analizo lastnosti širšega obravnavnega območja (prispevna območja Save Dolinke in njenih pritokov).

3.2.2 HEC-RAS

HEC-RAS (HEC-RAS 6.3.1, 2023), angleško »Hydrologic Engineering Center's River Analysis System«, je brezplačno in javno dostopno hidrološko in hidravlično programsko orodje, ki se uporablja za modeliranje toka s prosto gladino v rekah, kanalih in drugih odprtih sistemih. Razvito je bilo na Hidrološkem inženirskem centru, angleško »Hydrologic Engineering Center – HEC« v Združenih državah Amerike. HEC-RAS omogoča izdelavo hidravličnih modelov za simulacijo toka vode s prosto gladino. S programom je mogoče modelirati različne elemente, kot so rečne struge, mostovi, kanali, pregrade in drugi hidravlični objekti. Med drugim se uporablja za analizo pretočnih razmer, določanje območij poplavne ogroženosti, preučevanje vpliva poplav in izvajanje hidravličnih optimizacij. Program omogoča enodimenzijsko modeliranje stalnega ali nestalnega toka ter dvodimenzijsko modeliranje z nestalnim tokom. Dodatno program omogoča možnost modeliranja transporta sedimentov, kar je uporabljeno tudi v okviru magistrske naloge, ter modeliranje kakovosti vode.

Del programskega orodja sestavlja modul HEC-RAS Mapper, ki vključuje orodja za obdelavo GIS in ostalih prostorskih podatkov in njihovo uporabo pri izdelavi hidravličnih modelov. Poleg tega omogoča tudi prostorsko vizualizacijo rezultatov hidravličnih modelov.

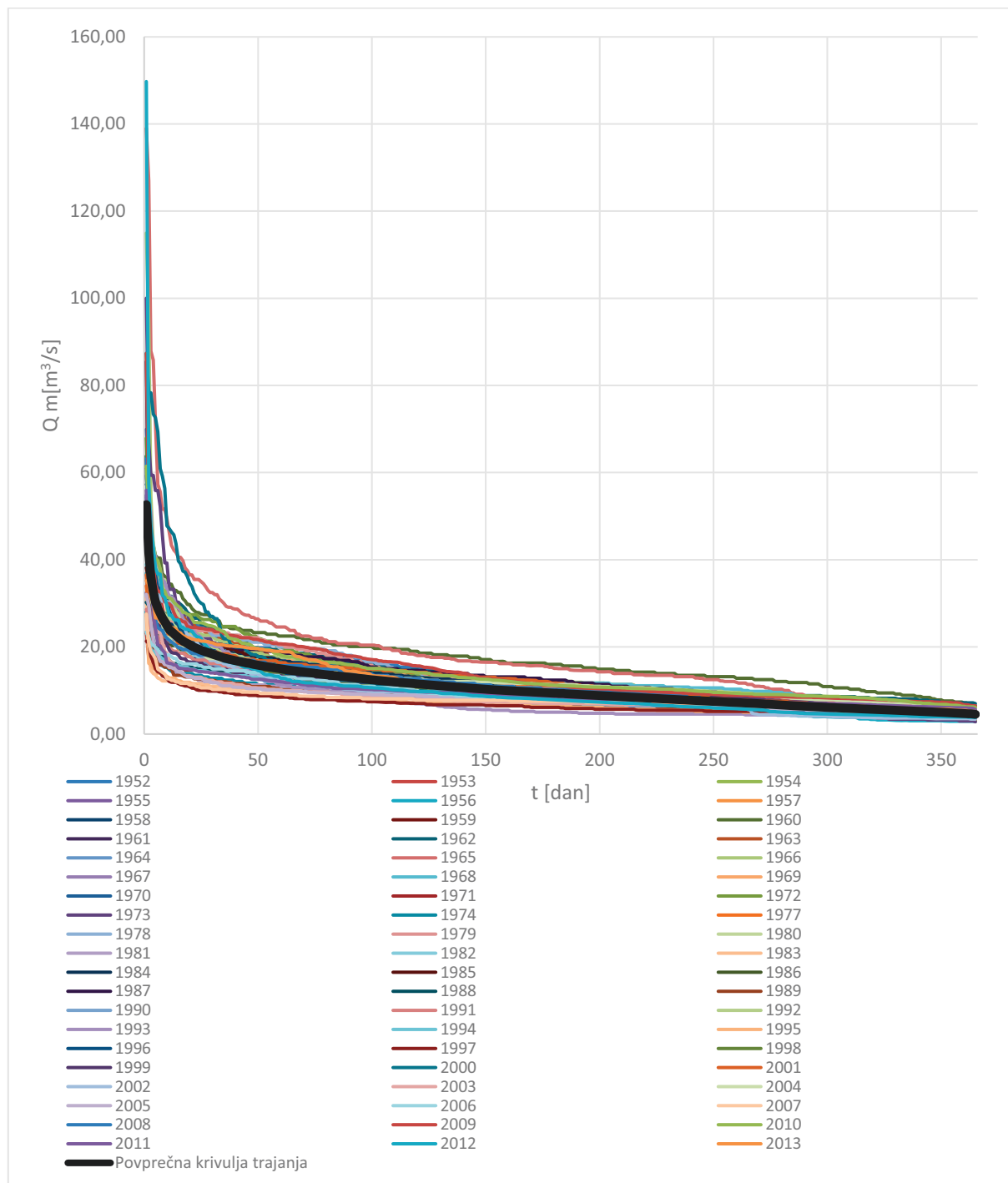
V okviru magistrske naloge je bilo omenjeno programsko orodje uporabljeno za izgradnjo hidravličnega modela z vključenim modulom računa sedimentov ter uporabo tega modela za simulacijo obravnavanih scenarijev.

3.3 Priprava hidroloških podatkov

3.3.1 Določitev statistično značilnih hidroloških let

Kot vhodni podatki so bile uporabljene povprečne dnevne vrednosti pretoka na vodomerni postaji Jesenice. Obravnavali smo vrednosti v obdobju med leti 1953 in 2013. Iz analize so zaradi vmesnih manjkajočih podatkov izvzete vrednosti za leti 1975 in 1976.

Za vsako obravnavano hidrološko leto smo z ureditvijo dnevni vrednosti od največje do najmanjše tvorili pripadajočo krivuljo trajanja. Krivuljo trajanja za posamezno leto tvorijo vrednosti pretokov v časovnih korakih enega dne, razvrščene po velikosti. Povprečno krivuljo trajanja za obravnavano obdobje (1953-2013) smo pridobili z določitvijo povprečja vrednosti vseh obravnavanih let v posameznem časovnem koraku krivulj trajanja. Krivulje trajanja za posamezna leta so prikazane na grafu 4. Dodatno smo za vsako leto določili srednji letni pretok Q_s , ki predstavlja povprečje povprečnih dnevni vrednosti pretoka v obravnavanem letu.



Graf 4: Krivulje trajanja pretokov za posamezna leta.

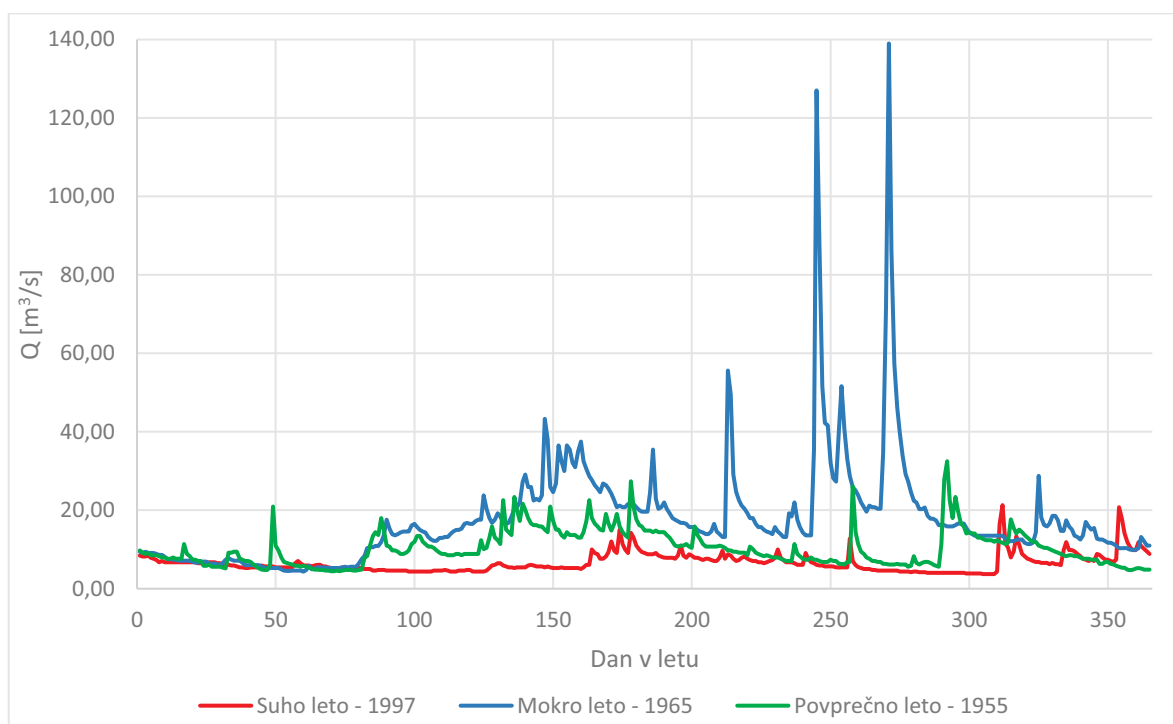
Pretok sedimentov ni linearno odvisen od pretoka vode. Največje količine sedimentov se v strugi premeščajo ob visokovodnih konicah, zato so količine premeščenih sedimentov v daljših časovnih obdobjih v največji meri odvisne od velikosti teh konic pretokov ob visokovodnih dogodkih. Na količine premeščenih sedimentov ima tako vpliv tudi razporeditev vrednosti pretokov oz. oblika krivulje trajanja in ne zgolj povprečni pretok v nekem časovnem obdobju. Zato smo si za »povprečno hidrološko leto«, ki smo ga kasneje v modelu uporabili kot osnovni primer, izbrali leto, katerega krivulja trajanja se najboljše ujema s povprečno krivuljo trajanja, določeno v prejšnjem odstavku. Odstopanje krivulje trajanja posameznega leta od povprečne smo določili s seštevkom odstopanj v posameznih časovnih

korakih krivulje. Dodatno smo za potrebe kasnejših analiz v modelu določili še mokro in suho hidrološko leto. Za mokro hidrološko leto smo uporabili povprečne dnevne vrednosti pretoka leta z največjim srednjim pretokom Q_s in obratno za suho leto vrednosti iz leta z najmanjšim srednjim pretokom. Letna obdobja povprečnih dnevni vrednosti pretoka, ki smo jih uporabili za posamezna statistično značilna hidrološka leta, so prikazana v preglednici 1.

Preglednica 1: Uporabljen statistično značilna hidrološka leta..

KRITERIJ	LETO	Q_s [m ³ /s]
Najboljše ujemanje krivulje trajanja s povprečno krivuljo trajanja:	1955	10,3
Najmanjši Q_s (Suho leto):	1997	6,6
Največji Q_s (Mokro leto):	1965	17,7

Pri nadaljnji analizi smo kot vhodni podatek v hidravličnem modelu uporabili dejansko časovno sosledje pretokov in ne krivulje trajanja, kjer so pretoki razvrščeni po velikosti. S tem bolje posnemamo dejansko hidrološko dogajanje v posameznem letu. Zato tudi ni mogoče uporabiti povprečne krivulje trajanja, temveč je potrebno določiti leto, ki se s povprečno krivuljo trajanja najbolj ujema. Sosledje povprečnih dnevni pretokov obravnavanih let je prikazano na grafu 5.



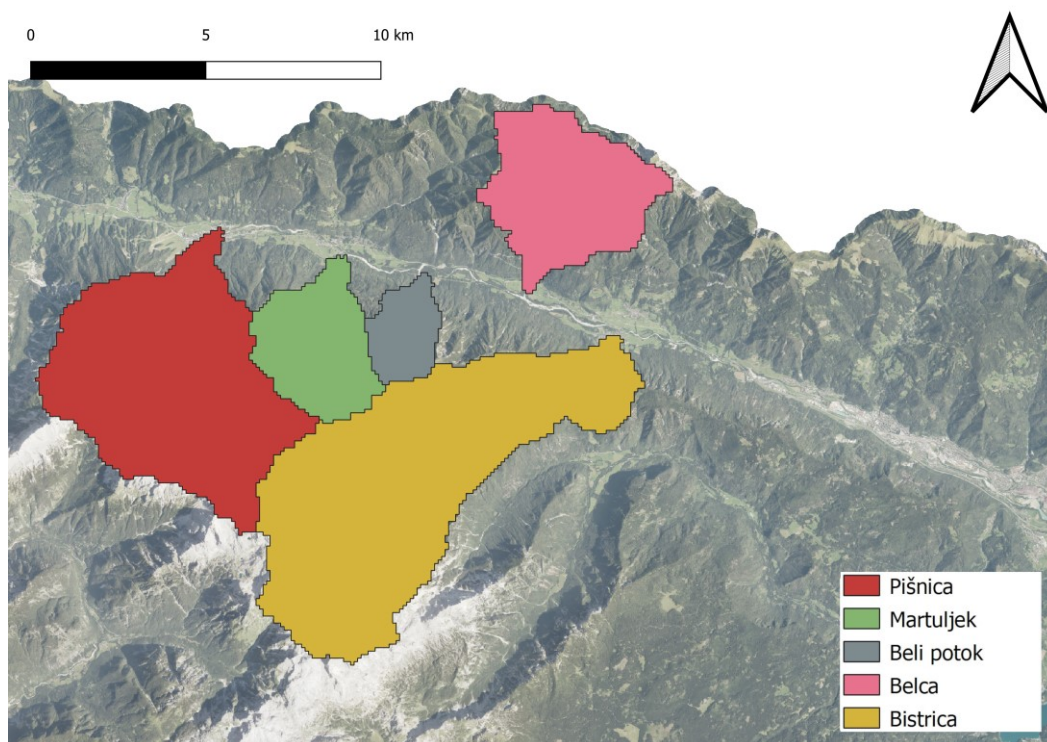
Graf 5: Sosledja pretokov za značilna hidrološka leta.

3.3.2 Določitev spreminjanja pretoka znotraj modeliranega odseka

V hidravličnem modelu obravnavanega odseka Save Dolinke, ki je bil izdelan v nadaljevanju, je uporabljeno postopno večanje pretoka vzdolž odseka. Uporaba enotnega pretoka za celoten odsek bi bila namreč nerealna, saj se pretok Save Dolinke od Kranjske Gore do Jesenic zaradi številnih pritokov bistveno poveča.

Pretoke na različnih prerezih Save Dolinke v posameznem časovnem koraku smo določili v odvisnosti od pretoka na vodomerni postaji Jesenice. Določeni so glede na razmerja med prispevnimi območji tako, da je pretok na VP Jesenice pomnožen s količnikom med velikostmi prispevnih območij obravnavanega prereza in vodomerne postaje Jesenice. Na enak način so bili določeni pretoki na pritokih, ki so bili posebej obravnavani v samostojnih hidravličnih modelih.

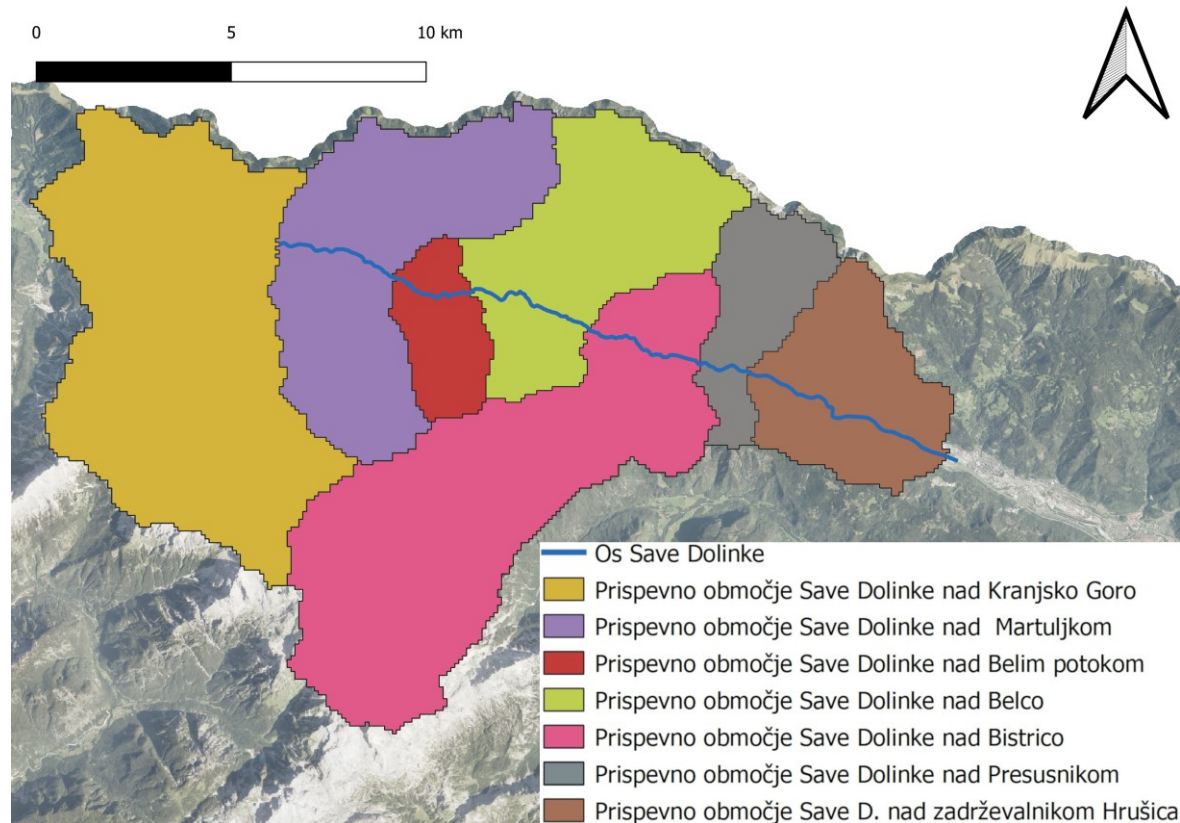
Prispevne površine Save Dolinke na posameznih prerezih in prispevne površine pritokov so določene z uporabo programskega orodja QGIS. Kot vhodni podatek je uporabljen raster podatkov o višinah s prostorsko resolucijo 100 m. Z orodji vtičnika Grass (Grass Development Team, 2022) je bil generiran raster smeri površinskega odtoka, z njegovo uporabo pa določen potek razvodnic prispevnih območij. Prispevna območja pritokov in posameznih prerezov Save Dolinke so prikazana na slikah 11 in 12. Velikosti prispevnih območij in razmerja glede na VP Jesenice so prikazana v preglednicah 2 in 3 .



Slika 11: Prispevna območja pritokov Save Dolinke.

Preglednica 2: Površine prispevnih območij pritokov Save Dolinke:

Pritok	Površina prispevnega območja F_i [m ²]	$F_i/F_{VPJesenice}$
Pišnica	36359431	0,148
Martuljek	11490034	0,047
Beli Potok	4900067	0,020
Belca	17420574	0,071
Bistrica	43460527	0,177

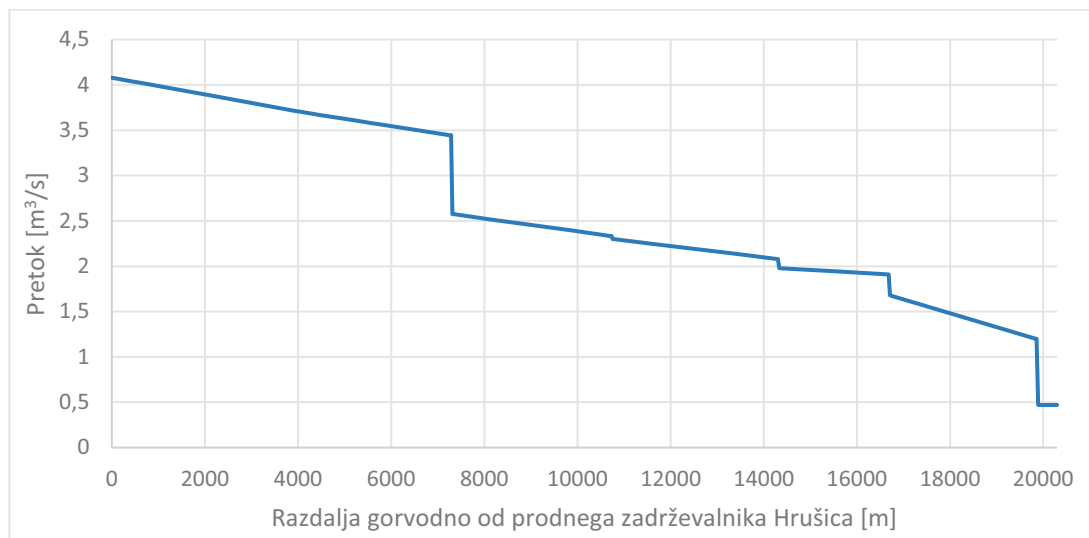


Slika 12: Prispevne površine Save Dolinke na posameznih prerezih.

Preglednica 3: Površine prispevnih območij Save Dolinke na posameznih prerezih.

Prerez Save Dolinke	Površina prispevnega območja F_i [m ²]	$F_i/F_{VPJesenice}$
Sotočje s Pišnico	59718976	0,243
Sotočje z Martuljekom	95079207	0,388
Sotočje z Belim potokom	103639316	0,422
Sotočje z Belco	131840126	0,537
Sotočje z Bistrico	187281081	0,763
Sotočje s Presušnikom	199261628	0,812
Prodni zadrževalnik Hrušica	218662692	0,891

Povečanje pretoka na sotočjih s pritoki, ki so posebej obravnavani v hidravličnem modelu, je točkovno in je neposredna posledica dodatnega pretoka, ki v glavni model preko sotočja priteka iz modelov pritokov. Ti pretoki so določeni z razmerjem prispevnih površin glede na VP Jesenice, kot je opisano v prejšnjem poglavju. Na enak način je določen pretok Save Dolinke nad sotočjem s Pišnico, ki predstavlja zgornji robni pogoj hidravličnega modela. Večanje pretoka zaradi ostalih manjših (neobravnavanih) pritokov smo upoštevali z linearnim povečevanjem pretoka vzdolž celotnega modela tako, da so vrednosti pretoka Save Dolinke na obravnavanih prerezih enake tistim, določenim z razmerjem prispevnih površin glede na VP Jesenice. Vrednosti pretoka oz. njegovo večanje vzdolž odseka v enem od časovnih korakov je prikazano na grafu 6. Stacionaža 0 ustreza prerezu prodnega zadrževalnika Hrušica, 19893 pa prerezu sotočja Save Dolinke in Pišnice.



Graf 6: Spreminjanje pretoka Save Dolinke vzdolž obravnavanega odseka.

3.4 Določitev dotoka plavin iz zaledja

Dotok plavin smo določali za zaledja petih najbolj prodonosnih pritokov Save Dolinke. Ti pritoki so Pišnica, Martuljek, Beli Potok, Belca in Bistrica. Za Savo Dolinko nad sotočjem s Pišnico smo na podlagi terenskih opažanj predpostavili ničelno prodonosnost.

Potencialno sproščanje plavin v zaledjih je bilo določeno z uporabo Pintarjeve enačbe, ki je opisana v poglavju 2.2.1. Količine materiala, ki se odplavi in dejansko prispeva k prodonosnosti, smo določili preko koeficienta odplavljanja gradiva, izračunanega po enačbi Vanoni, ki je opisana v poglavju 2.2.2.

3.4.1 Določitev koeficientov Pintarjeve enačbe

Povprečni naklon območja

Povprečni naklon prispevnega območja posameznega pritoka smo določili z uporabo programskega orodja QGIS. Za vhodni podatek je bil uporabljen rastrski sloj podatkov o višinah terena s prostorsko resolucijo 10m.

Koeficient erodibilnosti

Koeficient erodibilnosti za posamezno prispevno območje je bil določen na podlagi pedološke sestave tal območja. Pridobitev podatkov o pedološki sestavi tal je opisana v poglavju 2.1.2.4. Vrednosti koeficienta erodibilnosti za različne tipe tal so bile določene s pomočjo preglednice 4. Povprečni koeficient območja je bil določen z oteženim povprečjem glede na površine posameznih tipov tal.

Preglednica 4: Vrednosti koeficienta erodibilnosti za različne tipe tal (vir: Gavrilović, 1970, cit. po Bezak in sod., 2023).

Tip tal	Vrednost koeficienta <i>Y</i>
Pesek, prod in nevezana tla	2,0
Ilovnata, tufna in stepska tla	1,6
Razpadli apnenci in laporji	1,2
Serpentiniti, rdeči peščenjaki, flišni nanosi	1,1
Podzolska tla, razpadli škrlavci	1,0
Temeljni apnenci in škrlavci, rdeče kamnine in humusno-silikatna tla	0,9
Kambisoli in gorska tla	0,8
Vertisoli, humoglej in močvirska tla	0,6
Černozjomi in aluvialna tla dobre strukture	0,5
Gola, kompaktna vulkanska tla	0,25

Koeficient vegetacijske zaščitenosti

Koeficient vegetacijske zaščitenosti za posamezno prispevno območje je bil določen na podlagi pokrovnosti tal. Pridobitev podatkov o pokrovnosti tal je opisana v poglavju 2.1.2.3. Vrednosti koeficienta vegetacijske zaščitenosti za različne tipe pokrovnosti so bile določene s pomočjo preglednice 5. Povprečni koeficient območja je bil določen z oteženim povprečjem glede na površine tipov tal.

Preglednica 5: Vrednosti koeficienta vegetacijske zaščitenosti za različne tipe pokrovnosti (vir: Gavrilović, 1970, cit. po Bezak in sod., 2023).

Additional info	Opis pokrovnosti tal	Vrednost koeficienta <i>X</i>
Pred implementacijo protierozijskih ukrepov	Neporaščena, neobdelana zemlja	1,0
	Obdelovalno zemljišče z oranjem navzgor ali navzdol po pobočju	1,0
	Sadovnjaki in vinogradi brez talne vegetacije	0,7
	Planinske pašne površine in aridna območja	0,6
	Travniki, njive in podobna kmetijska zemljišča	0,4
	Degradirani gozdovi in grmičevje z erodiranimi tlemi	0,6
	Gozdovi ali grmičevje z dobro strukturo in talno vegetacijo	0,05
Po implementaciji protierozijskih ukrepov	Oranje prečno na naklon pobočja	0,6
	Dobro vzdrževana obdelovalna zemlja, zaščiten z mulčenjem	0,5
	Zemlja, obdelovana s kolobarjenjem, prečno na naklon pobočja	0,45
	Sadovnjaki in vinogradi, sajani prečno na naklon pobočja	0,3
	Zemljišča, obdelovana v terasah oz. nivojih	0,35
	Melioracija pašnih in aridnih območij	0,3
	Izgradnja jarkov, prečno na naklon pobočja, srednje gostote.	0,25
	Izvedba zadrževalnih jarkov in mikroakumulacij	0,25
	Izvedba pogozditev v nivojih	1,0
	Regulacija kanalov, izvedba jezov in kanaliziranje vodotokov	0,7

Koeficient razvitosti erozijskih pojavov

Koeficient razvitosti erozijskih pojavov je bil določen na podlagi indeksa moči vodnega toka po enačbi (3.1) (Hrvat in sod., 2019). Vrednosti indeksa moči vodnega toka so bile pridobljene v programskem orodju QGIS z uporabo vtičnika Grass (Grass Development Team, 2022). Vhodni podatek za njihovo vrednost predstavljajo podatki o topografiji, pridobitev katerih je opisana v poglavju 3.1.2.1. Dodatno smo preverili, da po tej metodi določeni koeficienti razvitosti erozijskih pojavov ustrezajo vrednostim v preglednici 6.

$$\rho = \frac{1}{10} (\overline{\ln I}) \quad (3.1)$$

kjer je:

$\overline{\ln I}$...povprečna vrednost naravnega logaritma indeksa moči vodnega toka,

ρ ...koeficient razvitosti erozijskih pojavov.

Preglednica 6: Vrednosti koeficienta razvitosti erozijskih pojavov (vir: Gavrilović, 1970, cit. po Bezak in sod., 2023).

Lastnosti erozijskih procesov znotraj porečja	Vrednost koeficienta ρ
Celotno porečje je pod vplivom žlebične erozije in globinskih erozijskih procesov	1,0
Približno 80% porečja je pod vplivom brazdne in žlebične erozije	0,9
Približno 50% porečja je pod vplivom brazdne in žlebične erozije	0,8
Celotno porečje je pod vplivom površinske erozije: prisotni so nevezan material iz obrežij, nekaj brazd ter žlebičev, močna kraška erozija	0,7
Celotno porečje je pod vplivom površinske erozije, vendar ni prisotnih globinskih procesov kot so brazde in žlebična erozija	0,6
50% porečja je pod vplivom površinske erozije, na ostalem delu porečja erozija ni prisotna	0,5
20% porečja je pod vplivom površinske erozije, na ostalem delu porečja erozija ni prisotna	0,3
Tla porečja nimajo vidnih znakov erozije, prisotni so manjši plazovi in zdrsi materiala na pobočjih vodotokov	0,2
Porečje obsegajo večinoma obdelane površine, ni vidnih znakov erozije	0,15
Porečje obsegajo večinoma gozdovi in trajno poraščena območja (travniki, pašniki), ni vidnih znakov erozije	0,1

Erozijski koeficient območja

Erozijski koeficient je bil za posamezno območje določen z uporabo enačbe (2.10). Vrednosti posameznih koeficientov in določenega erozijskega koeficienta za prispevna območja pritokov Save Dolinke so prikazane v preglednici 7.

Preglednica 7: Vrednosti koeficientov za določitev povprečnega letnega sproščanja gradiva.

Pritok	Povprečni naklon območja		Koef. erodibilnosti	Koef. veg. zaščitenosti	Koef. razvitosti erozijskih pojavov	Erozijski koeficient območja
	[°]	J_{FW} [%]	Y	X	ρ	Z
Pišnica	35,10	0,703	0,824	0,420	0,426	0,438
Martuljek	35,99	0,726	0,841	0,453	0,439	0,492
Beli Potok	36,57	0,742	0,813	0,236	0,434	0,249
Belca	33,60	0,664	0,782	0,156	0,399	0,149
Bistrica	35,51	0,71	0,833	0,503	0,455	0,545

3.4.2 Določitev povprečnega letnega sproščanja gradiva

Povprečno letno sproščanje gradiva za posamezna prispevna območja smo določili z uporabo enačbe (2.9). Določitev površine posameznega prispevnega območja, ki nastopa v enačbi, je opisana v poglavju 3.3.2. Pridobitev podatkov o maksimalnih 24-urnih padavinah na območju je opisana v poglavju 3.1.4.2. Vrednosti parametrov enačbe in določeno povprečno letno sproščanje gradiva so prikazani v preglednici 8.

Preglednica 8: Določitev povprečnega letnega sproščanja gradiva.

Pritok	Erozijski koeficient območja	Površina hidrografske enote	Maks. dnevne padavine	Povprečno letno sproščanje gradiva
	Z	A [km ²]	P_d [mm]	W [m ³ /leto]
Pišnica	0,438	36,36	172	36205
Martuljek	0,492	11,49	172	13617
Beli Potok	0,249	4,90	172	2088
Belca	0,149	17,42	172	3424
Bistrica	0,545	43,46	172	60004

3.4.3 Določitev koeficienta odplavljanja gradiva in količine odplavljenega gradiva

Koeficient odplavljanja sproščenega gradiva smo določili z uporabo enačbe (2.12). Povprečno letno odplavljanje gradiva je bilo določeno z enačbo (2.11). Vrednosti koeficienta odplavljanja in določenega povprečnega letnega odplavljanja gradiva so prikazane v preglednici 9.

Preglednica 9: Določitev povprečnega letnega odplavljanja gradiva.

Pritok	Površina hidrografske enote	Površina hidrografske enote	Koef. odplavljanja gradiva - VANONI	Povprečno letno sproščanje gradiva	Povprečno letno odplavljanje gradiva
	A / FW [km ²]	A / FW [mi ²]	SDR	W [m ³ /leto]	$W_{odplavljeno}$ [m ³ /leto]
Pišnica	28,10	10,85	0,31	36205	11287
Martuljek	14,68	5,67	0,34	13617	4604
Beli Potok	9,24	3,57	0,36	2088	748
Belca	18,98	7,33	0,33	3424	1121
Bistrica	30,62	11,82	0,31	60004	18507

3.5 Hidravlično modeliranje transporta sedimentov

Za modeliranje transporta sedimentov je bil ustvarjen hidravlični model v programskem orodju HEC-RAS, ki je natančneje opisano v poglavju 3.2.2. Model obsega strugo Save Dolinke z ožjim

obojestranskim poplavnim obrežnim pasom od sotočja s Pišnico pri Kranjski Gori do prodnega zadrževalnika Hrušica. Dolžina modeliranega odseka znaša 19900 m.

3.5.1 Metoda izračuna

Zaradi velike dolžine obravnavnega odseka in poudarka na premeščanju sedimentov znotraj struge, kjer se voda giblje večinoma v eni smeri (vzdolž osi vodotoka), smo za modeliranje izbrali enodimenzionalni model. Zaradi obravnave daljših časovnih nizov (simulacije več zaporednih let), ki bi bile za račun z nestalnim tokom računsko prezahtevne, smo za račun izbrali metodo s kvazi-nestalnim tokom. Pri tej metodi se vrednost pretoka spreminja v različno dolgih časovnih korakih, model pa za vsak časovni korak izračuna hidravlične razmere po metodi stalnega toka. Kot prvi podatek se v model vnese časovni korak spreminjanja pretoka. V našem primeru so uporabljene povprečne dnevne vrednosti pretoka in tako ta znaša 24 ur. Dodatno se poda še računski korak, ki določa, v kolikšnih razmakih model izvaja račune stalnega toka. Računski korak je navadno manjši od časovnega koraka spreminjanja pretoka, njegova dolžina pa se lahko spreminja glede na vrednosti pretoka. Več o tem je navedeno pri robnih pogojih modela v poglavju 3.5.4.

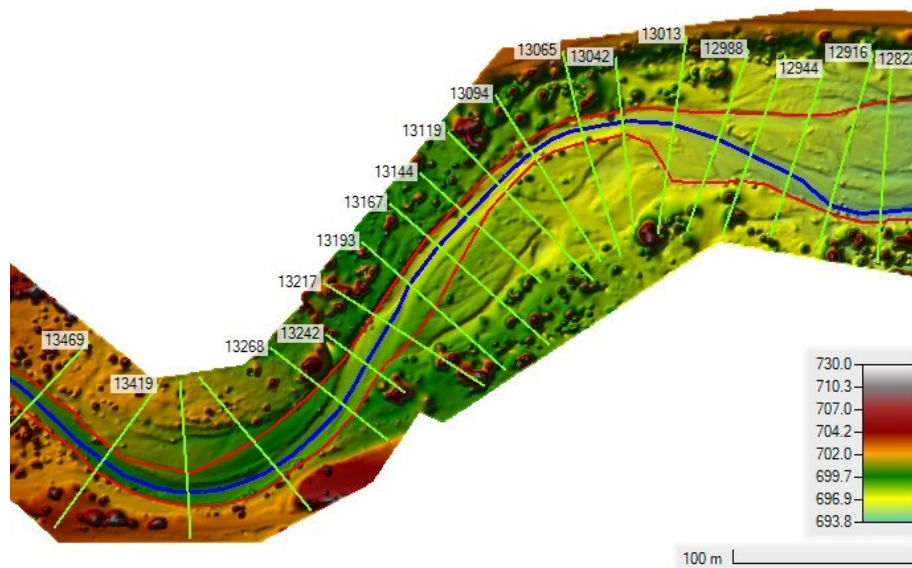
3.5.2 Geometrija

Geometrija enodimenzionalnega modela je bila v celoti ustvarjena v orodju HEC-RAS Mapper, ki je del programskega orodja HEC-RAS. Topografski podatki, ki so bili uporabljeni pri izdelavi geometrije modela, so opisani v poglavju 2.1.2.1. Za pridobitev podatkov o stanju prostora na lokaciji modela so bili uporabljeni ortofoto posnetki, opisani v poglavju 2.1.2.2.

Potek osi struge je bil določen na podlagi modela senčenja digitalnega modela višin in ortofoto posnetkov tako, da v čim večji meri sledi najnižjim točkam struge.

Prečni profili so bili v osnovi umeščeni na medsebojno razdaljo 50 m vzdolž celotnega odseka modeliranja. Na mestih, kjer so prisotne izrazite spremembe prereza struge, so profili zgoščeni na razdaljo 25 m oz. manj z namenom, da bi z modelom bolje povzeli dejanski tok vode v strugi. Prečni profili so bili umeščeni tako, da so v čim večji meri pravokotni na vodni tok, kar pa je na določenih odsekih zaradi razvejanosti struge težko dosegljivo. Višinski potek prečnih profilov je bil določen z uporabo DMV ločljivosti 0,25 m znotraj orodja HEC-RAS Mapper.

Linije robov struge so bile izrisane ročno s pomočjo podlog modela senčenja digitalnega modela višin in ortofoto posnetkov. Glavni merili za umestitev linij robov struge sta bili poraščenost (obrežna vegetacija) in značilna morfološka sprememba, kjer se voda razliva iz struge na poplavna območja. Primer poteka osi struge, prečnih profilov in robov struge je prikazan na sliki 13. Geometrija celotnega odseka Save Dolinke je prikazana v prilogi C.



Slika 13: Prikaz poteka osi struge, prečnih profilov in robov struge za vzorčni odsek.

V uporabljenem DMV z ločljivostjo 0,25 m je zaradi neefektivne filtracije vegetacije na poraščenih območjih precej nepravilnosti. Zato so bile v prečnih profilih višine terena zunaj robov struge posodobljene z državnim digitalnim modelom reliefa ločljivosti 1 m (DMR1), ki podaja pravilnejše višine terena na območjih vegetacije. Naknadno so bile ročno korigirane višine na lokacijah navezave obeh virov podatkov (rob struge), tako da je potek višin v prečnem profilu smiselno povezan. Dodatno so bile ročno popravljene tudi napake v višinah prečnih profilov znotraj struge. Za vsako nepravilnost v prečnem profilu je bilo na podlagi senčenja obeh modelov višin in ortofoto posnetka ugotovljeno, ali gre za napako v DMV (največkrat posledica neefektivne filtracije vegetacije), ki jo je treba odpraviti, ali dejansko morfološko obliko struge.

Črte vodnih tokov (angl. flowpaths), iz katerih orodje HEC-RAS Mapper določi dolvodne razdalje med robovi struge posameznih prečnih profilov, so bile določene na podlagi morfologije dna struge. Po testnem zagonu modela, ko je bil dokončno razviden potek toka vode, so bile na določenih odsekih črte vodnih tokov dodatno popravljene.

Območja zunaj vidne morfološke spremembe struge, kjer voda ne teče vzporedno z osjo vodotoka, so bila v prečnih profilih določena kot območja neefektivnega toka. Na teh območjih model predpostavi ničelno hitrost vodnega toka in posledično te pretočne površine ne upošteva v enačbah izračuna. V tem primeru so rezultati računa pravilnejši, saj enodimenzijski model obravnava gibanje vode samo v eni smeri (pravokotno na prečne profile), voda na poplavnih območjih pa se giblje tudi v drugih smereh ali pa celo miruje. V primeru neuporabe območij neefektivnega toka bi bili pretočni prerezi uporabljeni v enačbah stalnega toka preveliki, izračunane gladine vode pa posledično nižje od dejanskih.

Manningovi koeficienti hrapavosti

Manningovi koeficienti hrapavosti so bili določeni na podlagi podatkov iz terena in ortofoto posnetkov. Za celotno območje struge je bila v osnovi privzeta vrednost koeficienta 0,05. Za poplavna območja (zunaj robov struge) je bila v osnovi privzeta vrednost 0,1. Za območja znotraj in zunaj robov struge, katerih koeficienti se razlikujejo od predpostavljanih (npr. otoki vegetacije znotraj struge, travniki, itd.),

so bili koeficienti specifično določeni preko modifikacijskih poligonov. Orodje HEC-RAS Mapper avtomatsko privzame vrednosti koeficienta hrapavosti modifikacijskega poligona za območja prečnih prereзов, ki sekajo ta poligon. Primer modifikacijskih poligonov je prikazan na sliki 14. Uporabljene vrednosti Manningovih koeficientov za posamezna območja so prikazane v preglednici 10.

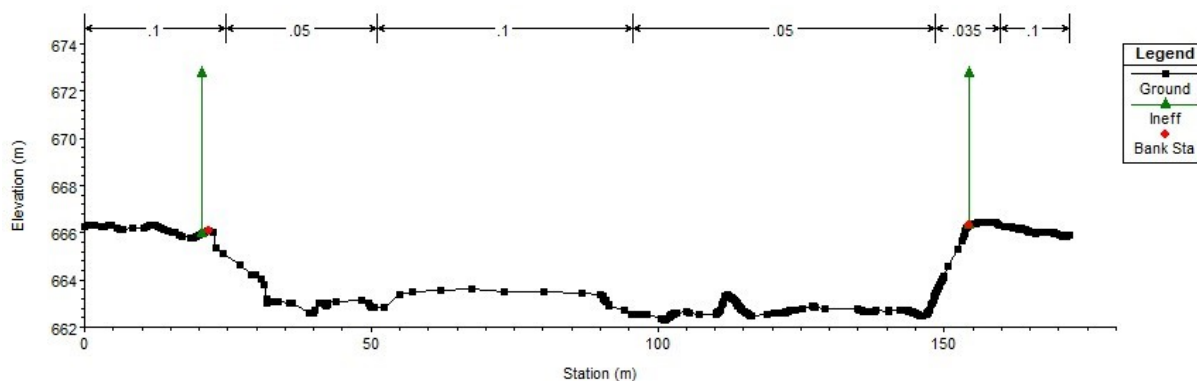


Slika 14: Primer modifikacijskih poligonov.

Preglednica 10: Uporabljene vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti.

Območje	Uporabljen n_g
Struga	0,05
Rahla porasčenost (znotraj robov struge)	0,08
Prod	0,035
Grmovje	0,1
Travniki	0,03
Gozd	0,1
Ostala območja zunaj robov struge	0,1

Na sliki 15 je prikazan primer prečnega profila, na katerem so vidna območja različnih vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti in območja neefektivnega toka. Navpične zelene črte označujejo robove območij neefektivnega toka, ta so umeščena na zunanjih straneh teh robov.

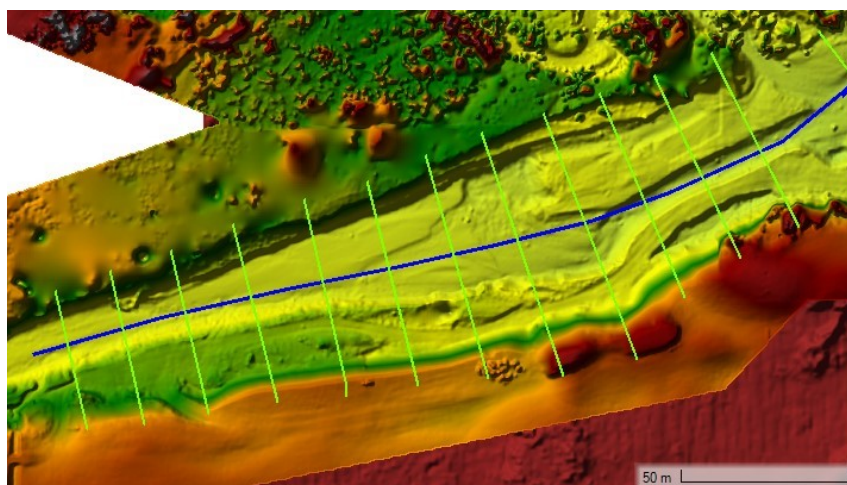


Slika 15: Primer prečnega profila (Profil 9816).

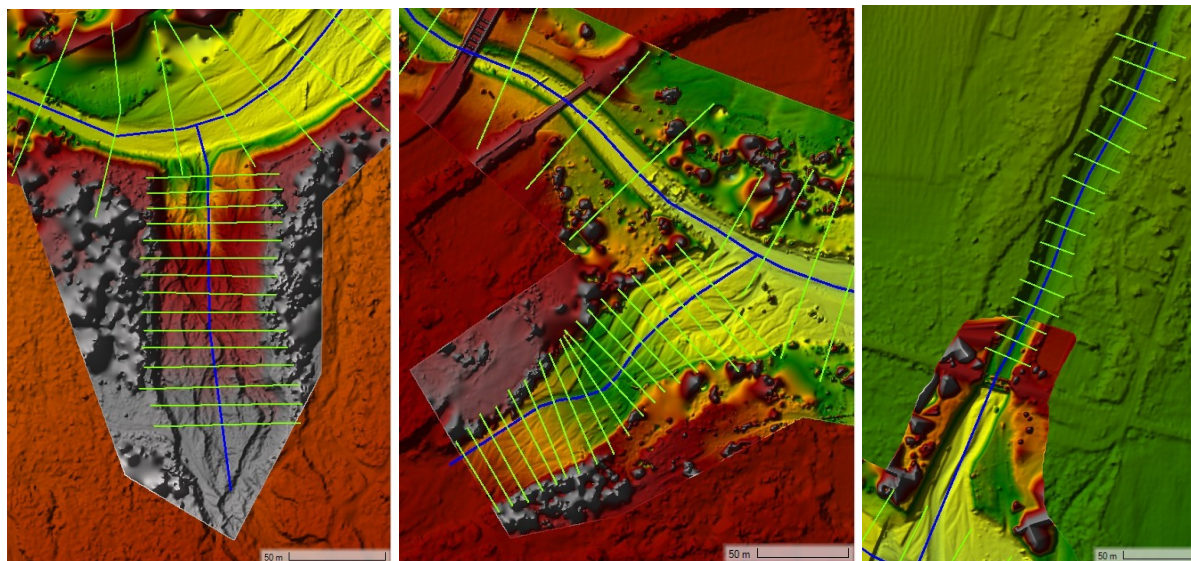
3.5.3 Modeli pritokov za določitev robnega pogoja vtoka sedimentov

Da bi zagotovili čim bolj realne količine vtoka sedimentov v glavni model Save Dolinke, smo za pet najbolj prodonosnih pritokov, omenjenih v poglavju 3.4, izdelali ločene modele. Za vsak pritok je tako izdelan krajši enodimenzionalni hidravlični model, segajoč od izliva v Savo Dolinko v gorvodni smeri. Os vodotoka, prečni profili, robovi struge in črte vodnih tokov so bili generirani po enaki metodi, kot je za glavni model Save Dolinke opisano v poglavju 3.5.2. Prečni profili so zaradi manjših dimenzij modelov in bolj razgibane morfologije njihovih strug umeščeni na krajši razdalji, ki v večini primerov znaša približno 10 m. Za pritoka Belca in Bistrica je kot vir topoloških podatkov uporabljen državni DMR1. Pri ostalih je uporabljen DMV ločljivosti 0,25 m. Za Manningov koeficient hrapavosti je pri vseh pritokih uporabljena vrednost 0,1.

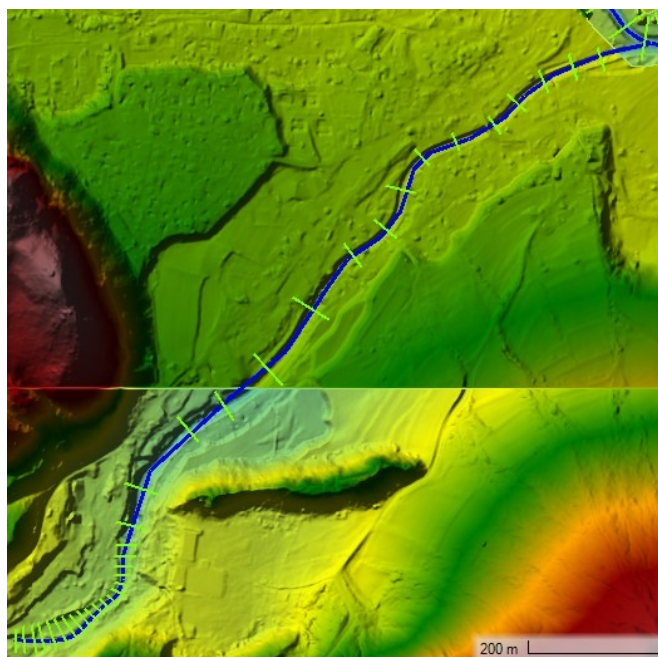
Modeli pritokov so znotraj programskega orodja HEC-RAS na glavni model Save Dolinke navezani preko sotočij, v katerih se za račun hidravličnih razmer uporabljajo energije vodnih tokov. Modeli Save Dolinke in pritokov tako skupaj delujejo kot enovit hidravlični model, v katerem vrednosti pretokov, ki preko sotočij vtekajo iz pritokov v Savo Dolinko, zagotavljajo realno povečevanje pretoka vzdolž obravnavanega odseka. Preko sotočij se iz pritokov v glavni model steka tudi tok sedimentov, kar je glavni namen priključitve teh modelov. Hidravlični modeli pritokov so prikazani na slikah 16, 17 in 18.



Slika 16: Geometrija hidravličnega modela pritoka Pišnica.



Slika 17: Geometrija hidravličnih modelov pritokov Martuljek, Beli potok in Belca.



Slika 18: Geometrija hidravličnega modela pritoka Bistrica.

3.5.4 Robni pogoji

Zgornji robni pogoji

Za zgornji robni pogoj so bili tako v modelu Save Dolinke, kot tudi v modelih pritokov, uporabljeni časovni nizi spreminjanja pretoka. Kot je opisano v poglavju 3.5.1, sta pri kvazi-nestalnem toku osnovna podatka časovni korak spreminjanja pretoka in računski korak. Za spreminjanje pretoka je bil v vseh primerih uporabljen 24-urni časovni korak. Določitev uporabljenih časovnih nizov spreminjanja pretoka za posamezne lokacije je podrobneje opisana v poglavju 3.3. Dolžina računskega koraka v posameznem časovnem koraku spreminjanja pretoka je bila določena glede na vrednosti pretoka. Ker se pretežni del sedimentov premešča ob višjih pretokih, je bil za vse časovne korake s pretokom, večjim

od pretoka s 15% trajanjem na povprečni krivulji trajanja, uporabljen računski korak 0,6 h oz. 24 min. V ostalih časovnih korakih je bil uporabljen računski korak dolžine 2 h.

Notranji robni pogoji

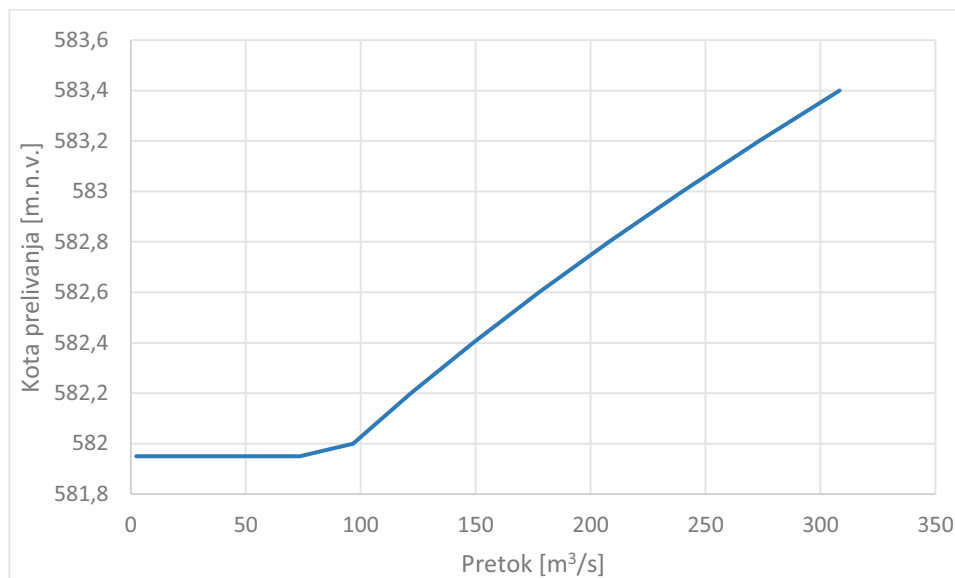
Notranji robni pogoji so bili v modelu uporabljeni za povečanje pretoka vzdolž obravnavanega odseka, ki ga povzročijo tisti pritoki, ki niso posebej obravnavani. Povečanje pretoka je bilo zvezno porazdeljeno vzdolž posameznih delov modela z uporabo enakomernih stranskih pritokov (angl. »Uniform lateral flow«). Uporabljene so bile enake vrednosti časovnih korakov spreminjanja pretoka in računskih korakov kot pri zgornjih robnih pogojih. Več o časovnih nizih spreminjanja pretokov, uporabljenih pri notranjih robnih pogojih, je opisano v poglavju 3.3.

Spodnji robni pogoj

Za robni pogoj na dolvodni strani modela, ki se zaključi na kroni jezua prodnega zadrževalnika Hrušica, je bila uporabljena krivulja »pretok - kota gladine« (angl. Rating curve). Fiksna krona jezua se nahaja na koti 580,8 m.n.v. Na njej je fiksiran napihljiv mehki jez maksimalne višine 1,15 m. Najvišja kota pomičnega dela krone tako dosega višino 581,95 m.n.v. (Rudolf, 2009). Širina prelivnega dela krone jezua znaša 40 m. Višine prelivanja vode čez krono za različne pretoke so bile določene z enačbo pravokotnega preliava, prikazane so v preglednici 11. Dokler je višina prelivanja vode manjša od maksimalne višine pomičnega dela jezua, je kota gladine pri prelivanju enaka 581,96 m.n.v. V tem območju pretoka je večanje prelivne višine kompenzirano z zniževanjem kote napihljivega pomičnega dela jezua. Ko višina prelivanja vode preseže omenjeno vrednost, se z njo začne premo sorazmerno povečevati tudi kota gladine prelivanja. Krivulja »Pretok – kota gladine« je prikazana na grafu 7.

Preglednica 11: Razmerje med višino prelivanja in pretokom vode.

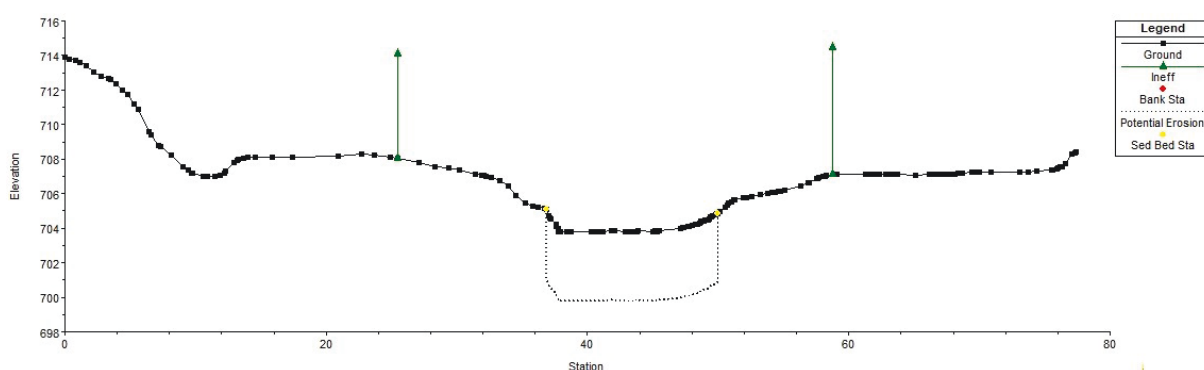
Pretok [m³/s]	Višina prelivanja [m]	Pretok [m³/s]	Višina prelivanja [m]
2,33	0,1	73,54	1
6,58	0,2	96,67	1,2
12,08	0,3	121,82	1,4
18,60	0,4	148,83	1,6
26,00	0,5	177,59	1,8
34,18	0,6	208,00	2
43,07	0,7	239,97	2,2
52,62	0,8	273,42	2,4
62,79	0,9	308,30	2,6



Graf 7: Krivulja "Pretok - kota gladine" na dolvodnem robu modela.

3.5.5 Podatki o sedimentih

Meje območja, kjer je možen premik sedimentov (angl. Movable Bed Limits), smo določili z robovi struge. Ti so bili pri izdelavi modela izrisani tako, da potekajo po ločnicah med prodnato podlago struge ter z vegetacijo poraščenim obrečnim terenom. V nastavitvah modela je bilo določeno, da zunaj tega območja ni možna erozija rečnega dna, je pa na tem območju dovoljeno odlaganje sedimentov. Zaradi debelih naplavinjskih nanosov proda v dnu Zgornjesavske doline, po katerih teče Sava Dolinka, je bila maksimalna možna erozija omejena z globino 4 m. Na lokacijah, kjer je dno struge fiksirano z vodnogospodarskimi ureditvami (npr. talni pragovi, drče, itd.), je bila maksimalna možna erozija omejena s podano minimalno višinsko koto dna struge. Primer prečnega profila s prikazanim območjem možne erozije je prikazan na sliki 19.



Slika 19: Primer prečnega profila s prikazanim območjem možne erozije.

3.5.5.1 Zrnavost podlage

V prečnih profilih na lokacijah vzorčenja zrnavosti dna struge so bile uporabljene zrnavostne krivulje pridobljene z linijskimi analizami. Metode vzorčenja in pridobljeni podatki o zrnavosti so podrobneje opisani v poglavju 3.1.3. V ostalih prečnih profilih je zrnavost določena z interpolacijo znotraj programskega orodja HEC-RAS.

3.5.5.2 Izbira metod in parametrov transporta sedimentov

Transportna funkcija

Za transportno funkcijo, ki določa premestitveno zmogljivost posameznega prečnega profila, je bila uporabljena enačba Meyer-Peter Müller. Enačba in njeni parametri so podrobneje opisani v poglavju 2.1.3.1.

Metoda sortiranja podlage

Metoda sortiranja podlage (angl. Sorting Method) definira način razvrščanja zrn v dnu struge in določa, kateri deli podlage sodelujejo pri transportu sedimentov. V obravnavanem hidravličnem modelu je bila uporabljena metoda Thomas (Ex 5), ki je privzeta metoda v programskem orodju HEC-RAS. Omenjena metoda deluje na osnovi razdelitve podlage v tri sloje in je zasnovana tako, da upošteva »Armoring« oz. krovni zaščitni sloj podlage. Metoda v osnovi razdeli podlago na pasivni sloj, ki ne sodeluje pri transportu, in aktivni sloj. Aktivni sloj je dodatno razdeljen na krovni zaščitni sloj in podpovršinski del aktivnega sloja. To omogoča ločeno obravnavo tanjšega krovnega zaščitnega sloja, ki regulira erozijo, ter podpovršinskega sloja z boljšo gradacijo zrnivosti.

Metoda posedanja delcev

Za metodo posedanja delcev (angl. Fall Velocity Method) je uporabljena metoda Soulsby, ki je privzeta v programskem orodju HEC-RAS.

3.5.5.3 Zgornji robni pogoji vtoka sedimentov v model

Za zagotovitev čim bolj realnih količin vtoka sedimentov v model so bili v prvi fazi modeli pretokov za namene umerjanja obravnavani ločeno od glavnega modela.

V prvi iteraciji smo v ločeno obravnavanih modelih pritokov za zgornji robni pogoj uporabili možnost »Equilibrium Load«. Omenjen robni pogoj v vsakem časovnem koraku dovaja frakcije sedimentov, enake tistim, ki se iz zgornjega profila erodirajo zaradi transportne zmogljivosti. V zgornjem profilu se tako kota dna struge ne spreminja, prav tako je konstantna tudi zrnavost v tem profilu.

Na podlagi ugotovljene odvisnosti med pretokom in iztokom sedimentov iz modela, smo za vsakega od pritokov konstruirali krivuljo pretoka sedimentov (angl. Sediment rating curve), ki opiše pretok sedimentov v odvisnosti od toka vode. V naslednji iteraciji so bile za zgornji robni pogoj vtoka sedimentov uporabljene tako pridobljene krivulje. Pri tem je bila za vtok sedimentov v model uporabljena zrnavostna sestava iztoka sedimentov iz modela v prejšnji iteraciji. V nadaljnjih iteracijah so bile krivulje skalirane s takšnim faktorjem, da je kumulativni letni vtok sedimentov v model pri zagonu simulacije za povprečno hidrološko leto ustrezal povprečnemu letnemu odplavljanju sedimentov, določenem v poglavju 3.4.3.

Tako umerjeni modeli pritokov so bili nato preko sotočij priključeni na glavni model Save Dolinke, kot je opisano že v poglavju 3.5.3. Zgornji robni pogoj vtoka sedimentov v model Save Dolinke tako predstavlja iztok sedimentov iz modelov posameznih pritokov. S tem je dosežen bolj realen podatek o vtoku sedimentov v model, saj je ta odvisen tako od potencialnega sproščanja sedimentov v zaledju, kot tudi od transportne zmogljivosti v strugah pritokov. V primeru, da je transportna zmogljivost manjša od

količine potencialnega sproščanja, vtok sedimentov v Savo Dolinko narekuje transportna zmogljivost. Obratno velja v primeru, ko je transportna zmogljivost večja od potencialnega sproščanja.

3.5.5.4 Odstranjevanje sedimentov iz struge

Hidravlični model se na dolvodnem robu zaključi na prodnem zadrževalniku Hrušica. Ves material, ki se premešča po modelu, se odloži v bazenu prodnega zadrževalnika, ki je vključen v model. Iztok sedimentov iz modela je zato enak nič. Da bi zagotovili realne razmere in preprečili vpliv odlaganja sedimentov preko višine polnega bazena, kar bi vplivalo na hidravlične razmere v gorvodnih profilih, smo po koncu vsakega leta simulacije določili praznjenje bazena oz. odstranjevanje sedimentov (angl. Dredging Event) do fiksno določene kote.

3.5.6 Izbira različnih računskih simulacij

Z izdelanim hidravličnim modelom smo izvedli več različnih simulacij. Uporaba različnih vhodnih podatkov in nastavitev modela je namenjena ugotovitvi vpliva posameznih parametrov na rezultate izračuna.

Pri vseh simulacijah je bilo izvedeno predhodno ogrevanje modela za stabilizacijo razmer. Iz testnih zagonov modela, v katerih smo model poganjali za več zaporednih let povprečnih hidroloških let, je bilo ugotovljeno, da se razmere v modelu približno stabilizirajo po treh letih simulacije. V vseh primerih je bila dejanska računsko simulacija izvedena najprej za nize pretokov treh zaporednih povprečnih hidroloških zaporednih let, nato pa za dejansko obravnavani niz pretokov. Npr. za analizo transporta sedimentov v mokrem hidrološkem letu, je bil model najprej zagnan za tri zaporedna povprečna leta, temu pa je sledil niz podatkov o pretokih mokrega leta. Začetno obdobje treh let ogrevanja modela v prikaze rezultatov ni vključeno.

V nadaljevanju so predstavljene izvedene računske simulacije, v katerih so spremenjeni posamezni parametri izračuna oz. vhodni podatki z namenom ugotovitve njihovega vpliva na račun transporta sedimentov.

3.5.6.1 Osnovni primer

Osnoven primer računske simulacije je bil izveden z nastavitvami modela, ki so opisane v poglavju 3.5. Analizirana je bila dinamika transporta sedimentov v obdobju enega leta, z uporabljenimi podatki o pretokih povprečnega hidrološkega leta. Za slednjega je bilo uporabljeno leto 1955 s srednjim letnim pretokom $Q_s = 10,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Kot je omenjeno v poglavju 3.5.6, je dejanska računsko simulacija trajala štiri leta (štiri zaporedna povprečna hidrološka leta), vendar rezultati prvih treh let ogrevanja modela niso vključeni v interpretacijo rezultatov.

3.5.6.2 Spremenjena hidrologija

Poleg osnovnega primera, ki obravnava povprečno hidrološko leto, sta bili izvedeni simulaciji za mokro in suho hidrološko leto. Kriterij izbire značilnih hidroloških let in uporabljeni nizi pretokov so podrobneje predstavljeni v poglavju 3.3.1. Kot suho leto je uporabljeno leto 1997 s srednjim letnim pretokom $Q_s = 6,6 \text{ m}^3/\text{s}$, za mokro pa leto 1965 s srednjim letnim pretokom $Q_s = 17,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.5.6.3 Različne vrednosti koeficienta hrapavosti

Poleg osnovnega primera z vrednostjo Manningovega koeficienta hrapavosti $n_g = 0,05$, sta bili izvedeni še simulaciji s spremenjenima vrednostnima koeficienta. Za manjšo vrednost je bila izbrana $n_g = 0,035$, ki predstavlja pogosto uporabljeno vrednost pri obravnavi slovenskih vodotokov. Za večjo vrednost je bila uporabljena $n_g = 0,08$.

3.5.6.4 Spremenjena zrnnavost struge

Poleg osnovnega primera, kjer je v profilih uporabljena zrnnavost glede na interpolacijo med lokacijami vzorčenj, sta bili izvedeni še simulaciji z bolj grobo in bolj fino zrnnavostjo. Pri simulaciji z grobo zrnnavostjo je bila za celoten odsek uporabljena zrnnavost vzorca na lokaciji prodnega zadrževalnika Hrušica. Pri simulaciji s fino zrnnavostjo pa je bila za celoten odsek uporabljena zrnnavost vzorca na pritoku Martuljek.

3.5.6.5 Simulacija z uporabo spremenjene transportne funkcije

V osnovnem primeru je za metodo izračuna transportne zmogljivosti izbrana enačba Meyer-Peter Müller. Poleg omenjene enačbe je v programskem orodju HEC-RAS za račun izključno rinjenih plavin na voljo še enačba Wilcock and Crowe. Za analizo vpliva izbire transportne funkcije je bila tako izvedena simulacija z uporabo enačbe Wilcock and Crowe. Dodatno je bila izvedena še simulacija z enačbo Meyer-Peter Müller z upoštevanom korekcijo, ki sta jo predlagala Wong in Parker (2006). Korekcija je podrobneje opisana v poglavju 2.1.3.1.

3.5.6.6 Simulacija s spremenjeno metodo sortiranja podlage

Za ugotovitev vpliva izbire metode sortiranja podlage, je bila poleg osnovnega primera z uporabo metode Thomas izvedena še simulacija s sortiranjem podlage preko Aktivne plasti (angl. Active Layer Mixing Method). Pri slednji je podlaga razdeljena na aktivni sloj, ki sodeluje pri transportu sedimentov, in spodnji, pasivni sloj.

3.5.6.7 Simulacija daljšega časovnega obdobja

Ločeno je bila z osnovnimi nastavitvami modela (hidrologija povprečnega hidrološkega leta, $n_g = 0.035$, transportna funkcija Meyer-Peter Müller in metoda sortiranja podlage Thomas) izvedena simulacija transporta sedimentov za daljše časovno obdobje. Enako kot pri simulacijah, omenjenih v prejšnjih poglavjih, je tudi v tem primeru izvedeno ogrevanje modela s simulacijo treh zaporednih povprečnih hidroloških let. Po ogrevanju modela je bila izvedena simulacija za časovni niz pretokov v obdobju med leti 1.1.1977 in 31.12.2013. To obdobje je bilo izbrano, ker predstavlja najdaljši neprekinjeni časovni niz merjenih pretokov v obdobju meritev na VP Jesenice.

4 REZULTATI IN ANALIZA

Ker je bila pri izračunih uporabljena transportna funkcija (Meyer-Peter Müller), ki ocenjuje zgolj transport rinjenih plavin, so v rezultatih in analizi pod pojmom sedimenti oz. transport sedimentov zajete le rinjene plavine. Transport lebdečih plavin v rezultate ni vključen.

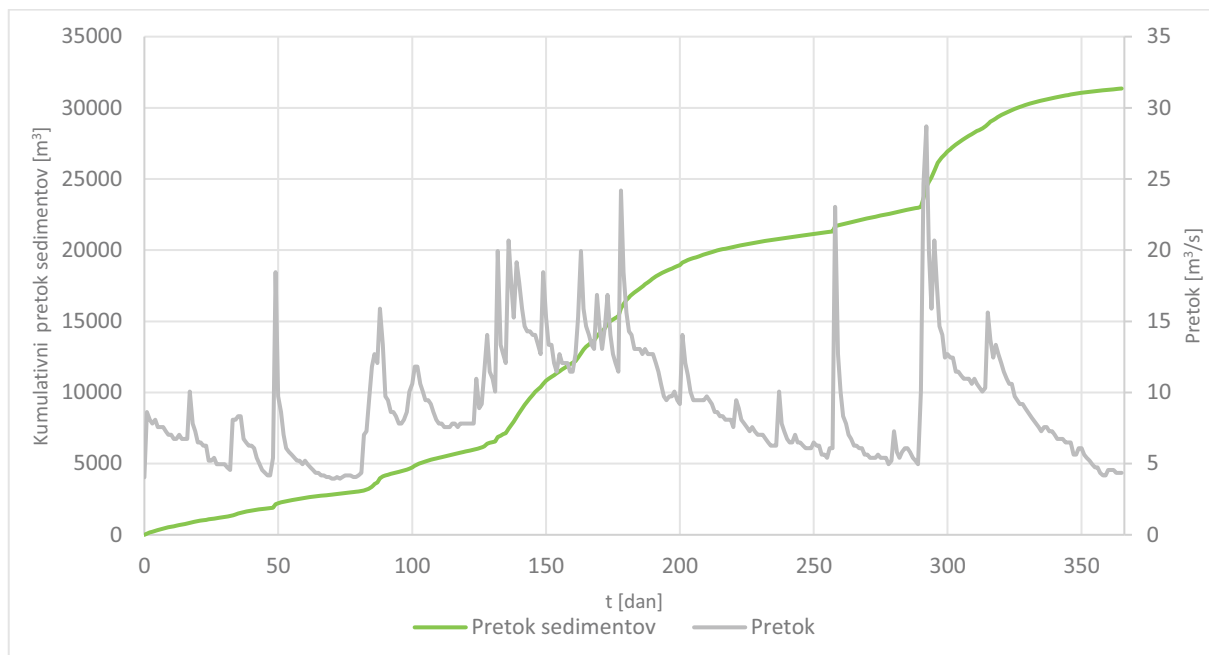
Rezultati simulacij so v večini primerov prikazani na dva načina. Prvi način vključuje prikaz prodonosnosti na iztoku iz obravnavnega odseka (pred vtokom v bazen prodnega zadrževalnika). Ta je prikazana s časovnim spreminjanjem kumulativnega pretoka sedimentov skozi profil 455, ki je najbolj dolvodni profil izven vpliva prodnega zadrževalnika.

Pri drugem načinu prikaza rezultatov so za simulacije s trajanjem enega leta v vzdolžnem profilu prikazane spremembe nivelete struge, letna bilanca transporta sedimentov in letni pretok sedimentov v posameznih profilih. Stacionaže si sledijo od najbolj dolvodnega profila gorvodno. V vzdolžnem profilu tako stacionaža 500 m označuje konec modela pri vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica, stacionaža 19893 m pa začetek modeliranega odseka pri sotočju Save Dolinke in Pišnice. Sprememba nivelete struge poda informacijo o tem, ali prihaja do poglobljanja ali zaplavljanja struge zgolj v najnižjih točkah prečnih profilov. Letna bilanca transporta sedimentov direktno poda razmerje med letnim vtokom in iztokom sedimentov v profilu, kar bolje kot sprememba nivelete opiše dinamiko transporta plavin v celotnem prečnem profilu. V primeru pozitivne letne bilance transporta je skupni letni vtok sedimentov v profil večji od količine sedimentov, odplavljenih iz prečnega profila, kar nakazuje trend zaplavljanja struge. Obratno velja pri negativni letni bilanci transporta, kjer je prisoten trend erozije struge. Letni pretok sedimentov predstavlja letno prodonosnost v posameznem prečnem profilu.

Za primer simulacije z osnovnimi parametri so prikazane še dodatne analize v določenih karakterističnih profilih. Na obravnavanem odseku so določena območja, kjer prihaja do erozije oz. odlaganja sedimentov. Za potrebe primerjave s sorodnimi študijami so ovrednotene povprečne vrednosti letne prodonosnosti za posamezne dele obravnavanega odseka.

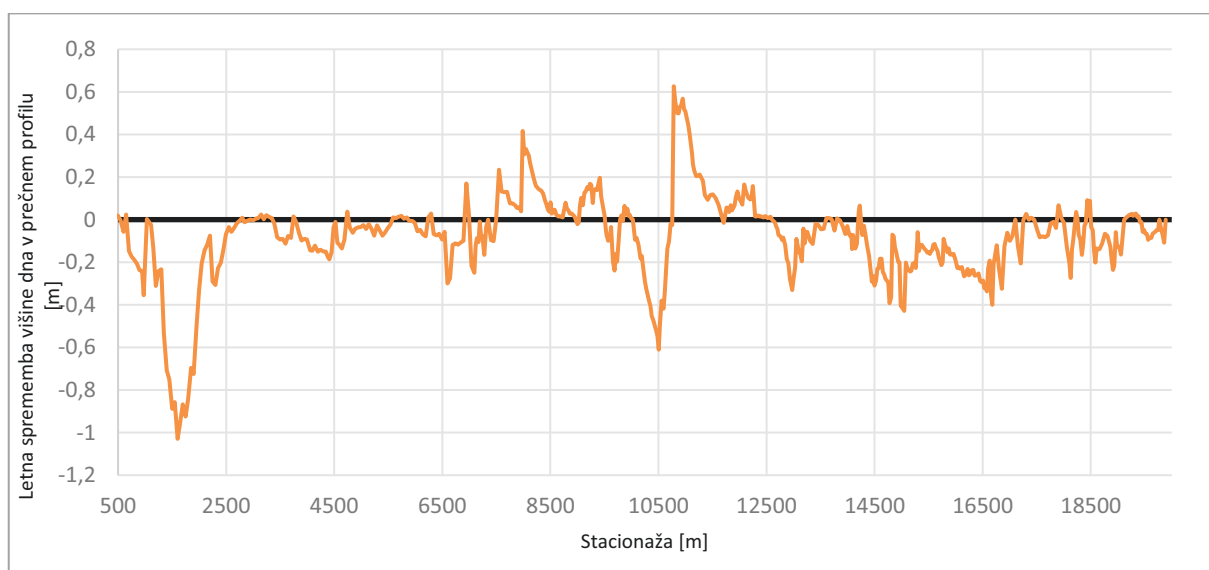
4.1 Rezultati simulacije z izbranimi osnovnimi parametri

Na grafu 8 je prikazan kumulativni pretok sedimentov na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica, v kombinaciji s spreminjanjem pretoka na tej lokaciji. Iz grafa je razvidno, da se največje količine sedimentov premeščajo ob konicah visokih pretokov. Letni kumulativni pretok sedimentov ob koncu simulacije obdobja povprečnega leta predstavlja letno prodonosnost v tem profilu. Glede na rezultate je ta za prerez Save Dolinke nad prodnim zadrževalnikom ocenjena na $31354 \text{ m}^3/\text{leto}$.

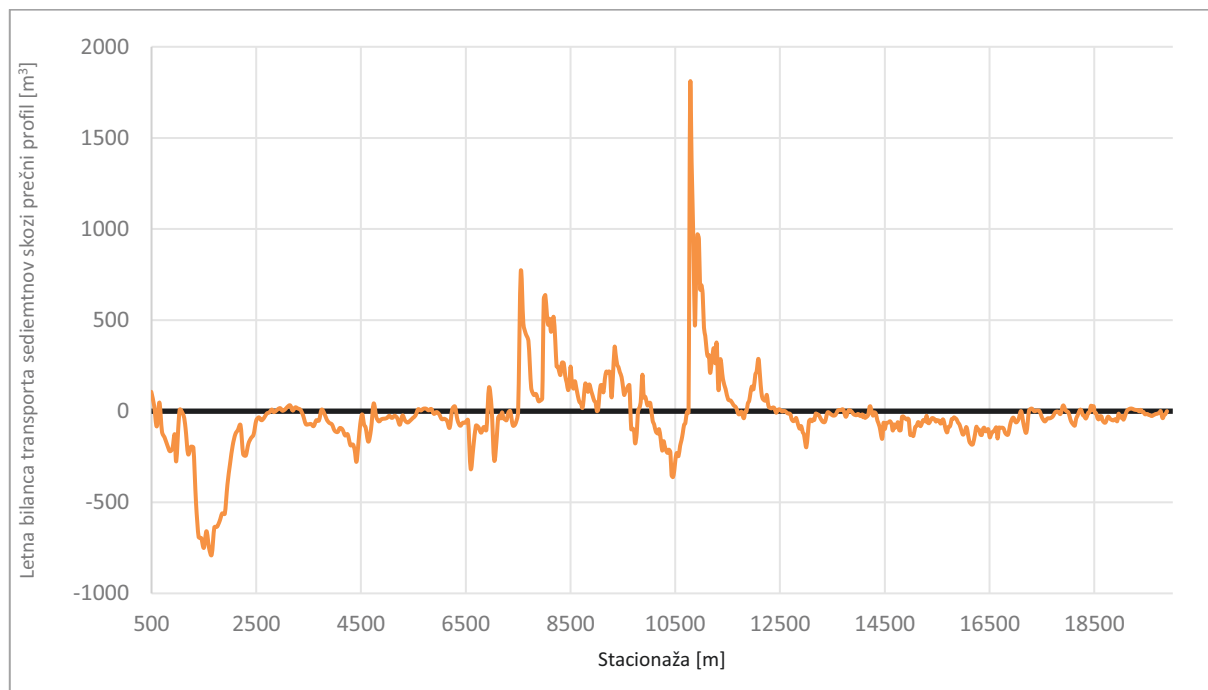


Graf 8: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – OSNOVNI PRIMER.

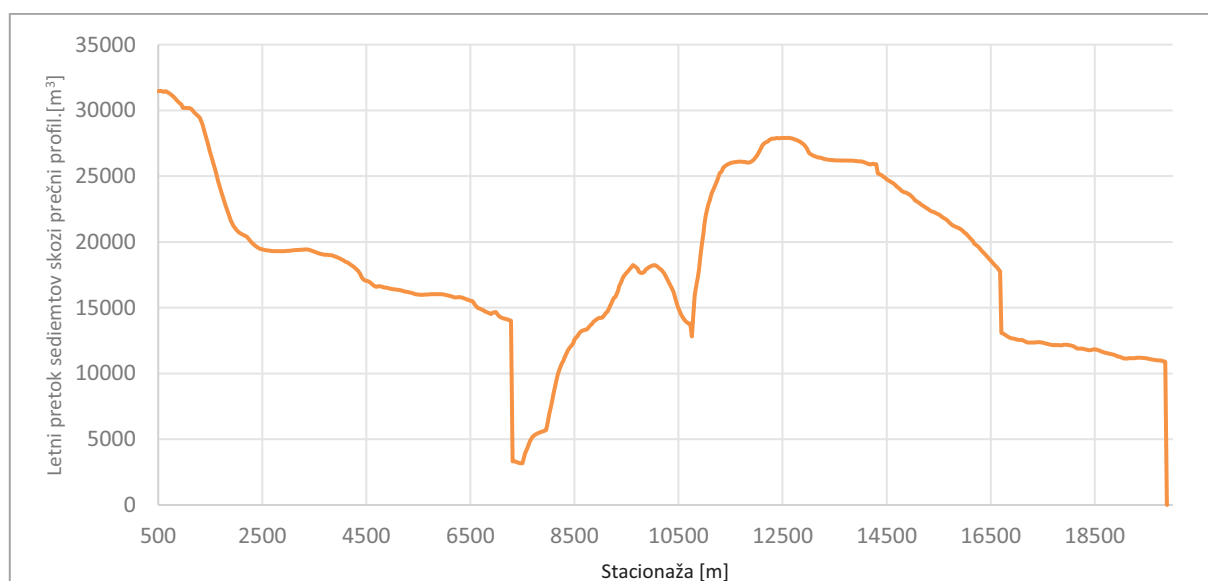
Na grafih 9, 10 in 11 so prikazani vzdolžni profili spreminjanja višine dna struge, letne bilance transporta sedimentov in letnega pretoka sedimentov vzdolž obravnavnega odseka Save Dolinke.



Graf 9: Letna sprememba višine dna struge v prečnem profilu - OSNOVNI PRIMER.



Graf 10: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – OSNOVNI PRIMER.



Graf 11: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil - OSNOVNI PRIMER.

Iz grafov 9 in 10 je razvidna medsebojna odvisnost med letno spremembo višine dna struge in letno bilanco transporta sedimentov. V veliki večini primerov sta obe vrednosti enako predznačeni (obe pozitivni oz. obe negativni). Izjeme so primeri, ko znotraj struge prihaja do erozije, na brežinah pa do odlaganja materiala in obratno. Pri analizi vplivov posameznih parametrov v poglavju 4.2 zato v vzdolžnem profilu letne spremembe višine dna struge niso prikazane, prikazane so le vrednosti letne bilance transporta. Pri vrednostih letnega pretoka sedimentov, prikazanih na grafu 11, je razvidno, da količine premeščanja sedimentov vzdolž modela nihajo, vendar je opazen trend povečevanja pri premikanju dolvodno. Opazna je odvisnost vzdolžnega spreminjanja pretoka sedimentov in letne bilance transporta. Na območjih s pozitivno bilanco, ki nakazuje odlaganje sedimentov, se posledično vrednosti pretoka sedimentov proti dolvodno zmanjšujejo. Obratno se pri negativni bilanci zaradi erozije, ki

predstavlja nove količine premeščajočega materiala, vrednosti pretoka sedimentov proti dolvodni smeri povečujejo. Vertikalne skoke v vrednostih pretoka sedimentov predstavljajo sedimenti, ki v model vtekajo iz modelov pritokov.

4.1.1 Dinamika transporta v karakterističnih prečnih profilih

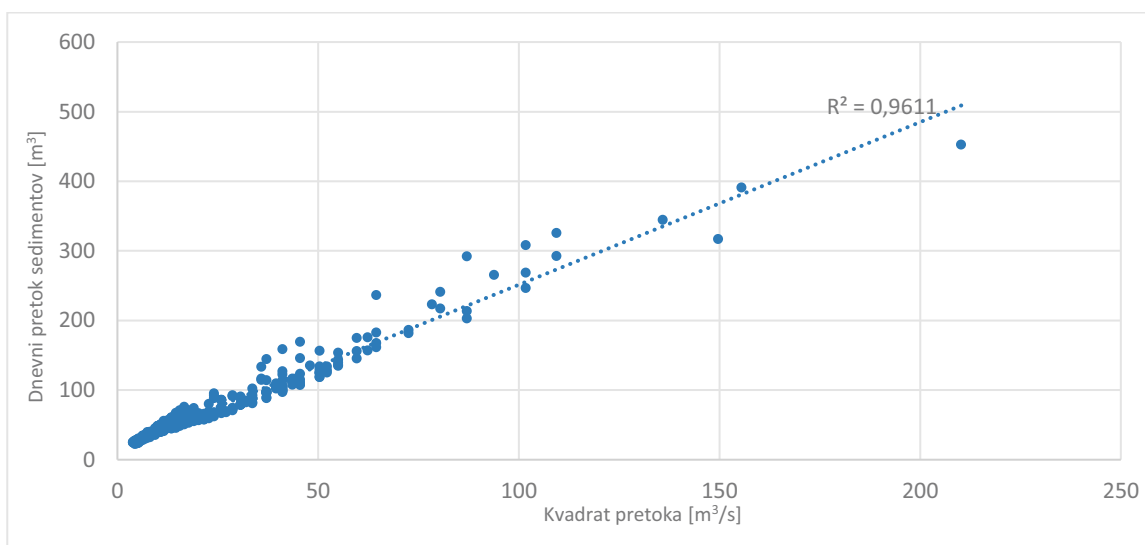
Za dodatno analizo so bili glede na kriterij letne bilance transporta sedimentov izbrani trije karakteristični profili:

- Stabilen karakteristični profil s stacionažo 12372; izbran na območju, kjer se pri simulaciji povprečnega hidrološkega leta niveleta dna struge ne spreminja in posledično ni opaznega trenda zaplavljanja / erozije dna struge.
- Karakteristični profil odlaganja sedimentov s stacionažo 8154; izbran na območju, na katerem prevladuje odlaganje sedimentov, saj se pri simulaciji povprečnega hidrološkega leta niveleta dna struge zviša.
- Karakteristični profil erozije struge s stacionažo 1604; izbran na območju, na katerem prevladuje erozija, saj se pri simulaciji povprečnega hidrološkega leta niveleta dna struge zniža.

Za posamezni karakteristični profil so prikazane linearne odvisnosti med dnevnim pretokom sedimentov in kvadratom povprečnega dnevnega pretoka vode. Dodatno je prikazana linearna odvisnost dnevne bilance transporta sedimentov in dnevne spremembe niveleta dna struge od povprečnega dnevnega pretoka in spremembe le tega glede na prejšnji dan. Stopnja linearne odvisnosti med posameznimi spremenljivkami je prikazana z vrednostjo R-kvadrat (kvadratna vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije).

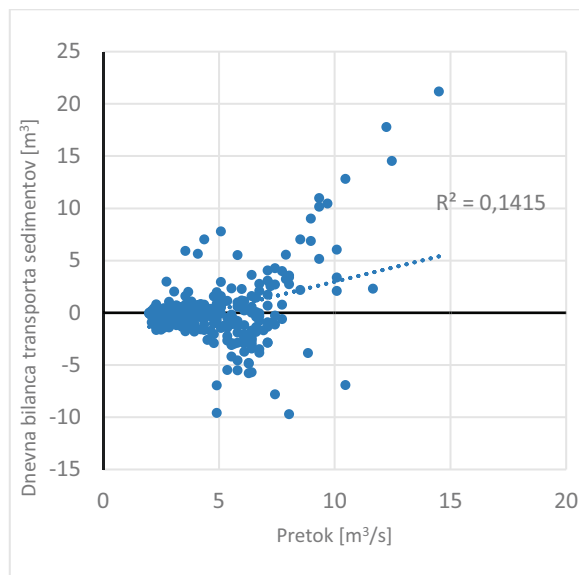
4.1.1.1 Stabilen karakteristični profil

Na grafu 12 je prikazana linearna odvisnost med kvadratom povprečnega dnevnega pretoka in dnevnim pretokom sedimentov. Dobro je vidna odvisnost med kvadratom pretoka vode in pretokom sedimentov.

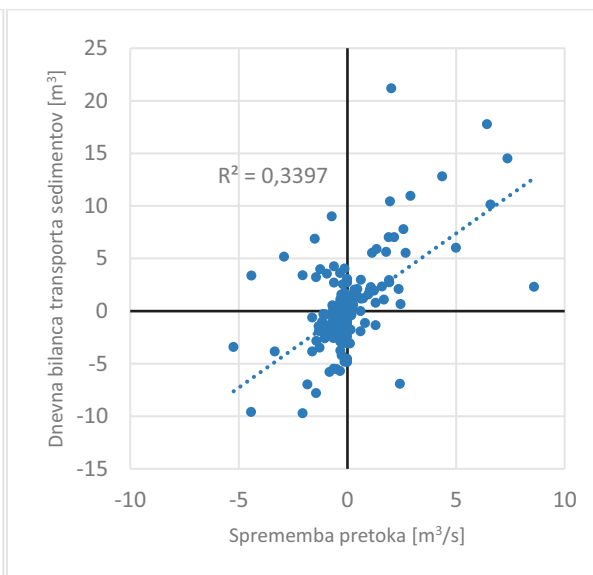


Graf 12: Odvisnost med kvadratom povprečnega dnevnega pretoka vode in dnevnim pretokom sedimentov za stabilen karakteristični profil.

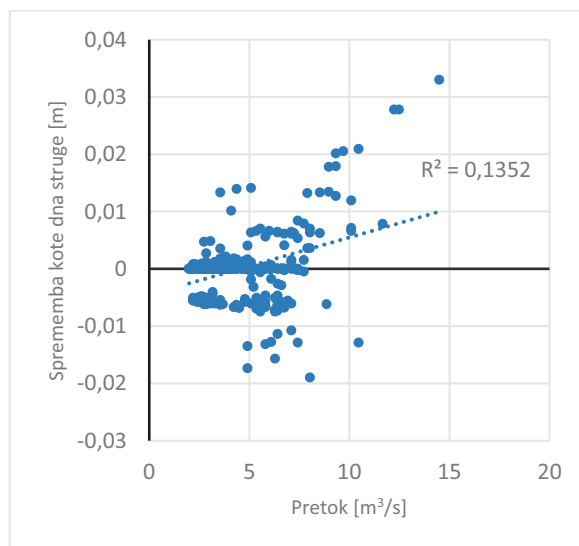
Na grafih 13 in 15 so prikazane odvisnosti med dnevno bilanco transporta sedimentov in dnevno spremembo kote dna ter povprečnim dnevnim pretokom vode. Dodatno so na grafih 14 in 16 prikazane odvisnosti teh vrednosti od spremembe povprečnega dnevnega pretoka glede na prejšnji dan.



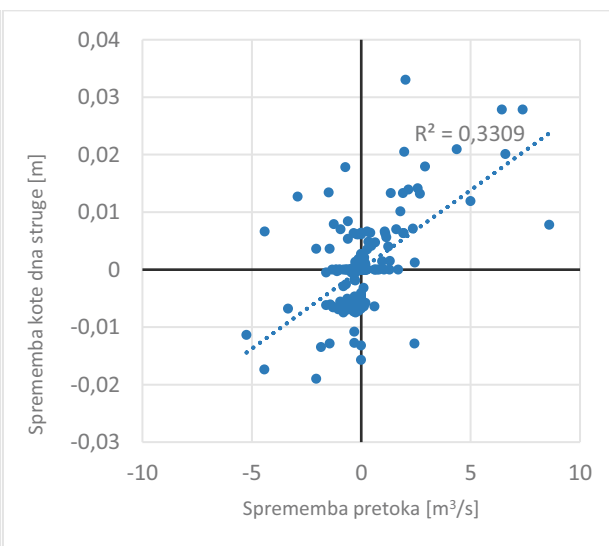
Graf 13: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in bilanco transporta sedimentov v stabilnem karakterističnem profilu.



Graf 14: Odvisnost med spremembo pretoka in dnevno bilanco transporta sedimentov v stabilnem karakterističnem profilu.



Graf 15: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in dnevno spremembo kote dna struge v stabilnem karakterističnem profilu.

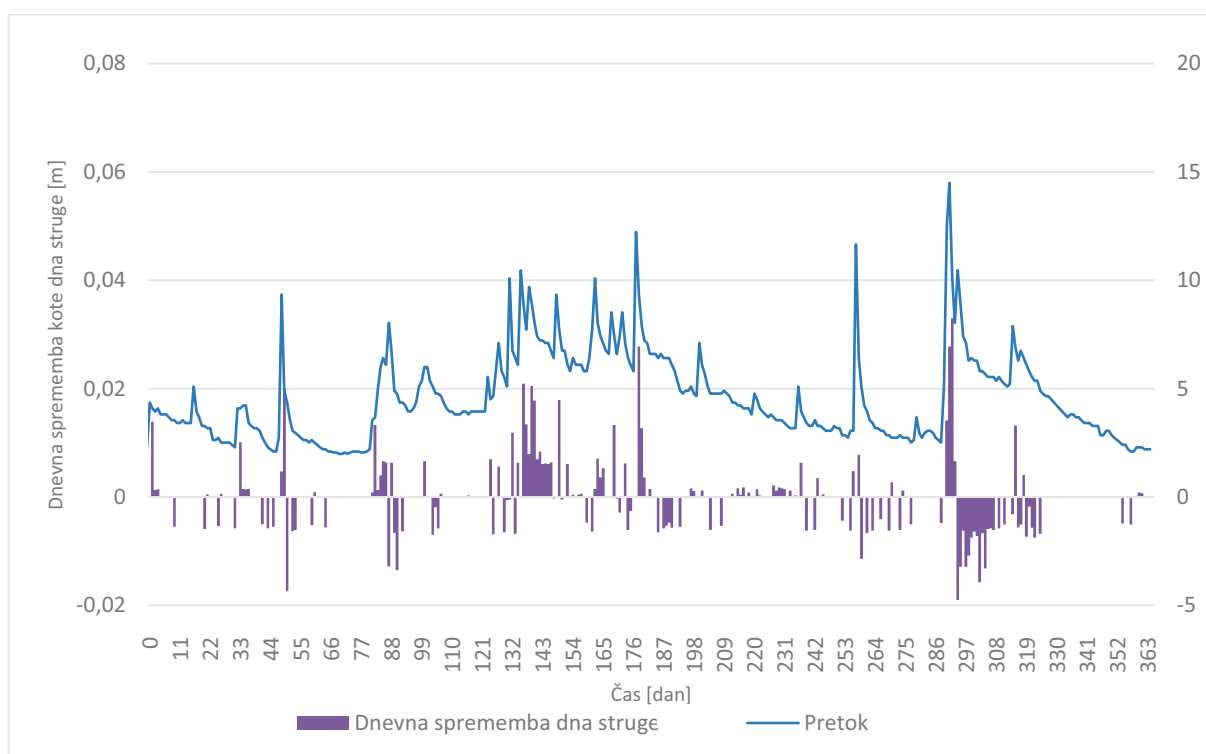


Graf 16: Odvisnost med spremembo pretoka in dnevno spremembo kote dna struge v stabilnem karakterističnem profilu.

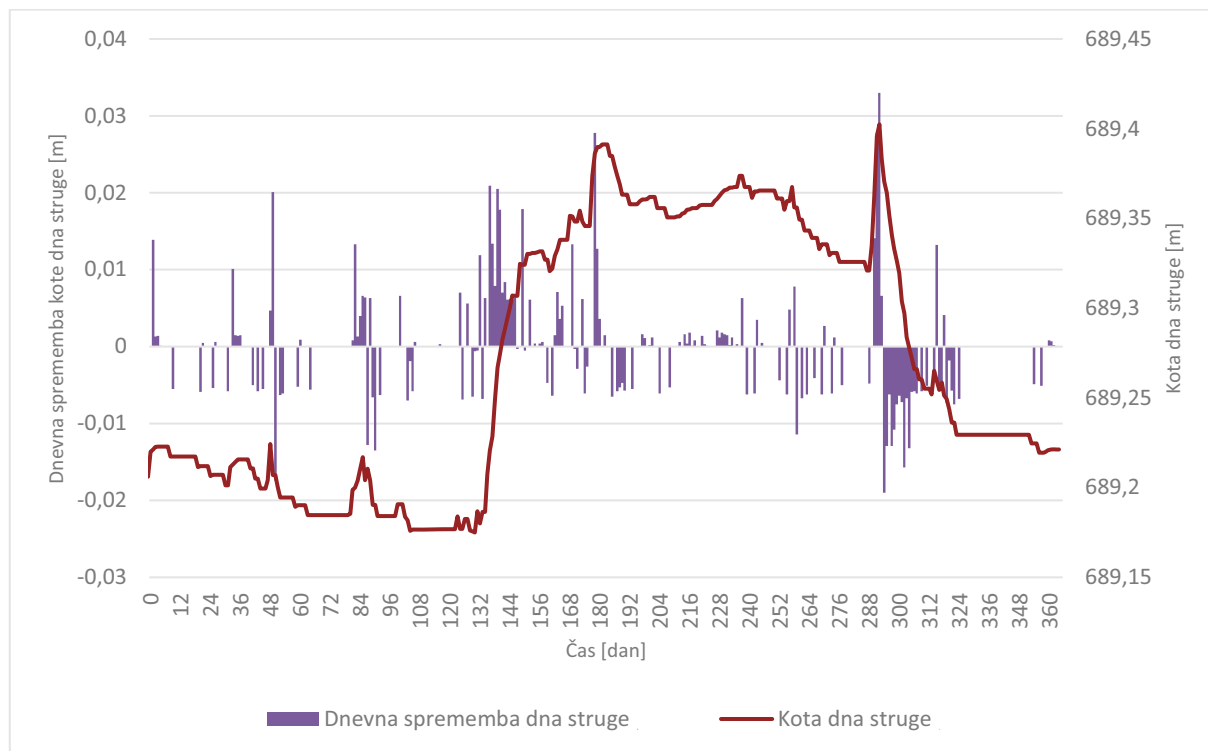
Iz primerjave odvisnosti je razvidno, da sta tako dnevna sprememba kote dna struge, kot tudi dnevna bilanca transporta sedimentov, bolj kot od povprečnega dnevnega pretoka odvisni od spremembe njegove vrednosti glede na prejšnji dan. Iz tega sklepamo, da v tem profilu do večjih sprememb v dinamiki transporta sedimentov prihaja ob nenadnih zvečanjih oz. zmanjšanjih pretoka. Pri povečanju pretoka je prisoten proces odlaganja sedimentov, kar je posledica povečanja odplavljanja sedimentov iz

gorvodnih profilov v tistem trenutku. Iz grafa 30 v poglavju 4.1.3 je razvidna odvisnost med povečanjem pretoka in erozijo v karakterističnem profilu erozije. V primeru zmanjšanja pretoka pa glede na analizo odvisnosti v stabilnem karakterističnem profilu prihaja do pojava erozije struge.

Za stabilen karakteristični profil je prikazano še časovno spreminjanje dnevni vrednosti sprememb kote dna struge, bilance transporta sedimentov in pretoka sedimentov skozi karakteristični profil. Dodatno so prikazane kumulativne vrednosti teh parametrov znotraj obravnavnega leta (pri spreminjanju kote dna struge je namesto kumulativne spremembe prikazana kota dna struge v posameznem časovnem koraku).

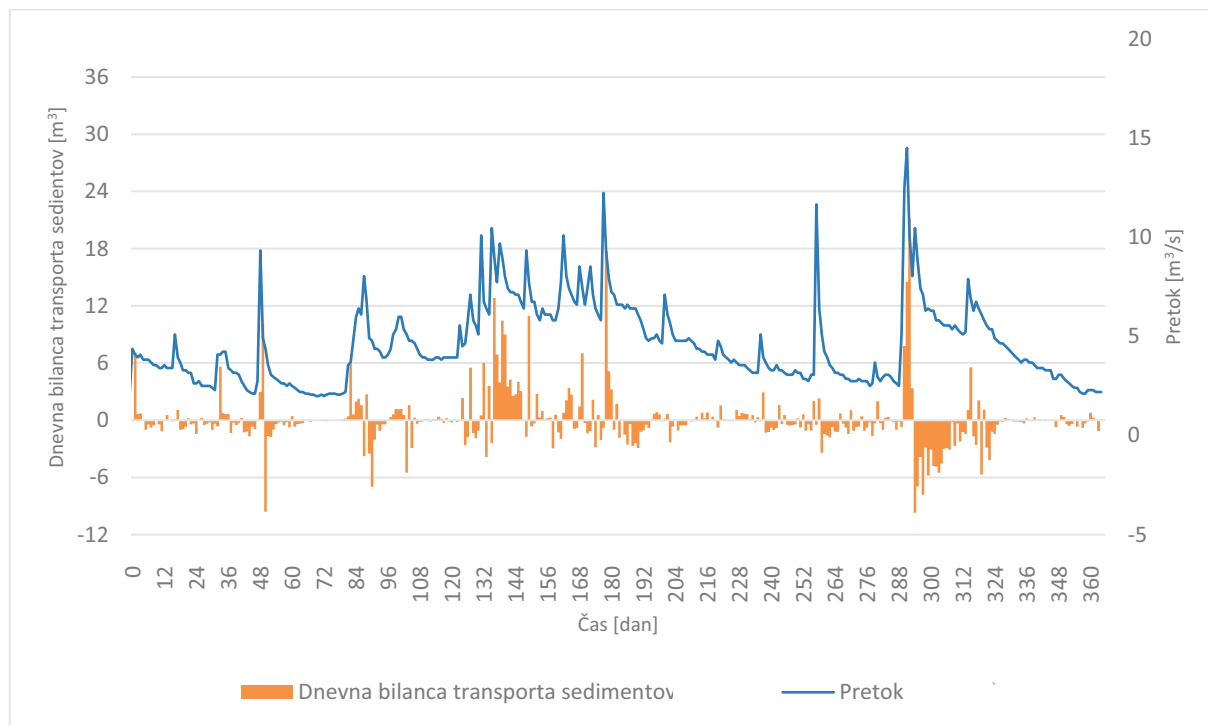


Graf 17: Dnevna spremembe kote dna struge - stabilen karakteristični profil.

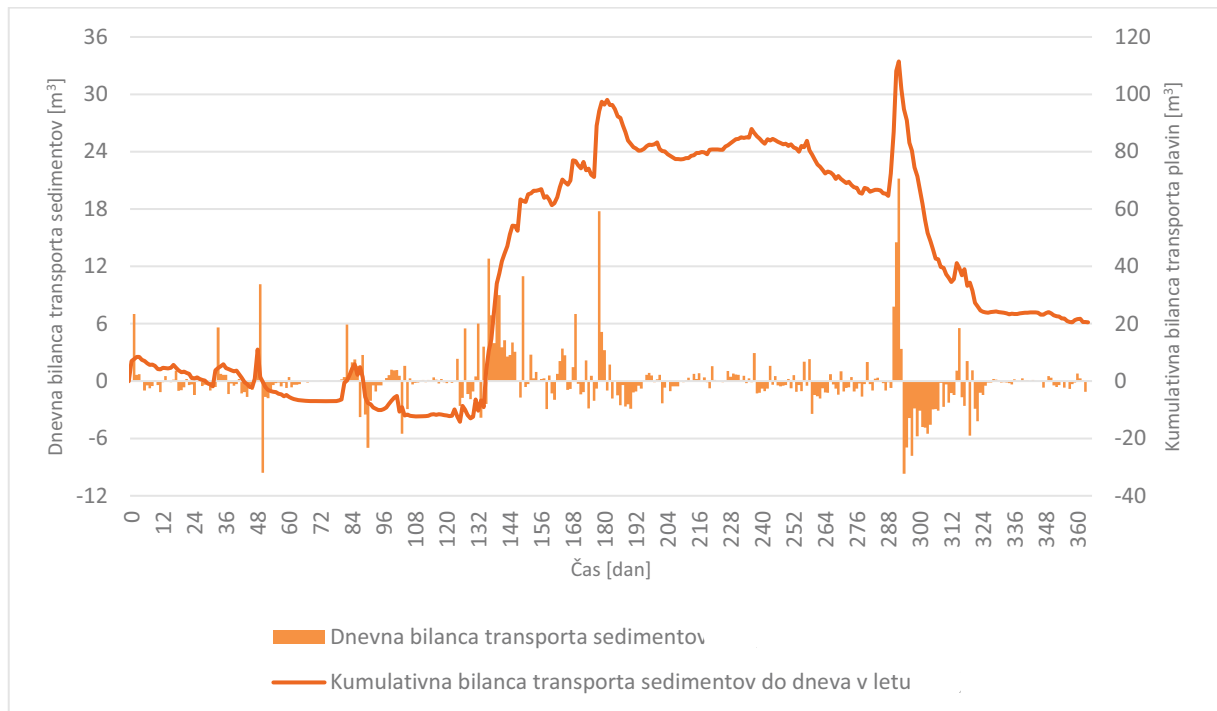


Graf 18: Spreminjanje višine kote dna struge - stabilen karakteristični profil.

Na grafu 17 so prikazane dnevne spremembe višine dna struge v primerjavi s povprečnim pretokom v tistem dnevu. Na grafu 18 je poleg dnevnih sprememb višin prikazano časovno spreminjanje višine dna struge v povprečnem letu.

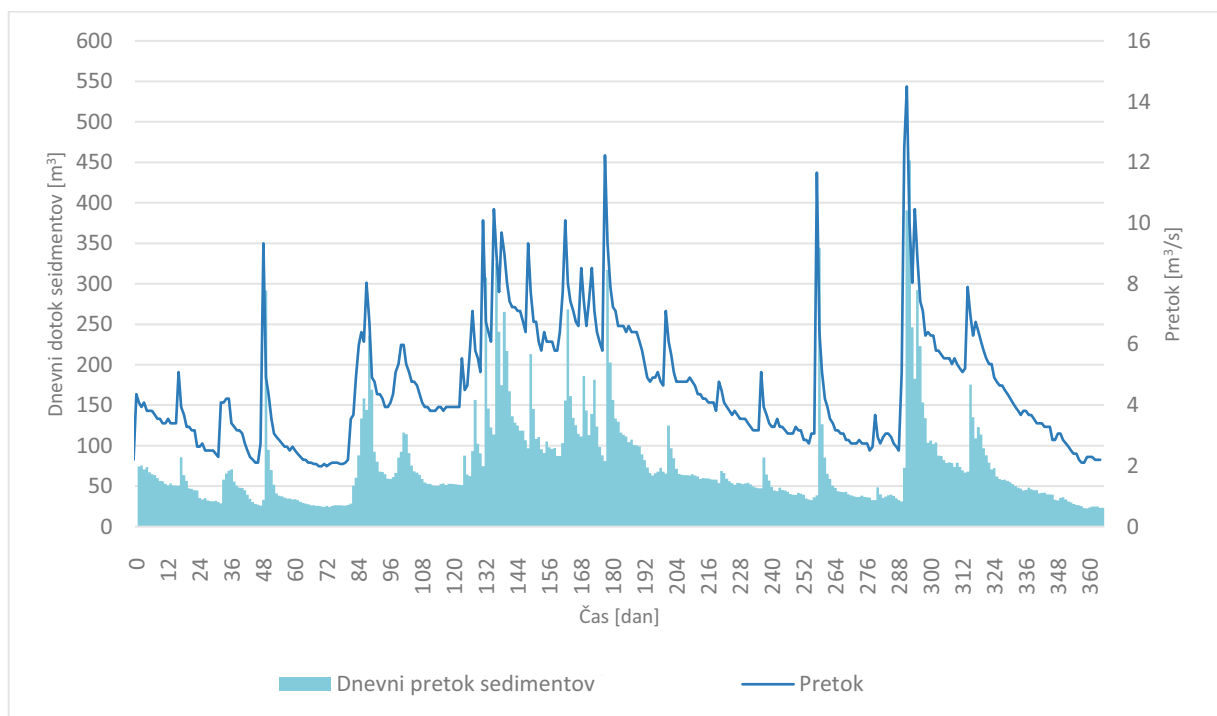


Graf 19: Dnevne bilance transporta sedimentov - stabilen karakteristični profil.

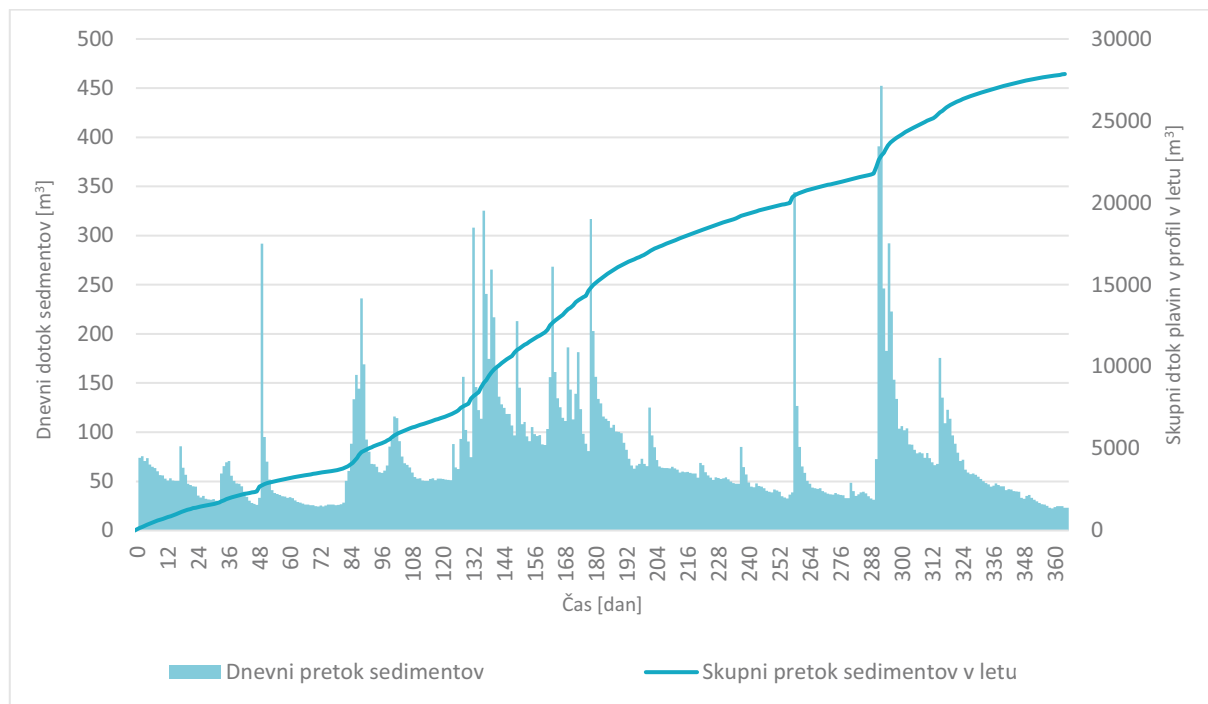


Graf 20: Kumulativna bilanca transporta sedimentov – stabilen karakteristični profil.

Na grafu 19 prikazane dnevne bilance transporta sedimentov z dobrim ujemanjem sledijo dnevnim spremembam višine dna struge. Tudi časovno spreminjanje kumulativne bilance transporta sedimentov prikazano na grafu 20 se dobro ujema z gibanjem višine dna struge.



Graf 21: Dnevni pretok sedimentov skozi stabilen karakteristični profil.

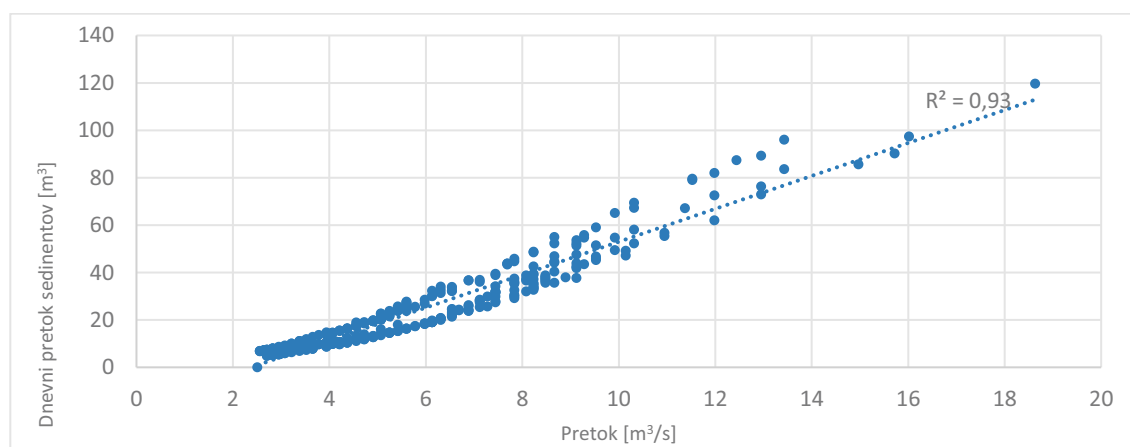


Graf 22: Kumulativni pretok sedimentov skozi stabilen karakteristični profil.

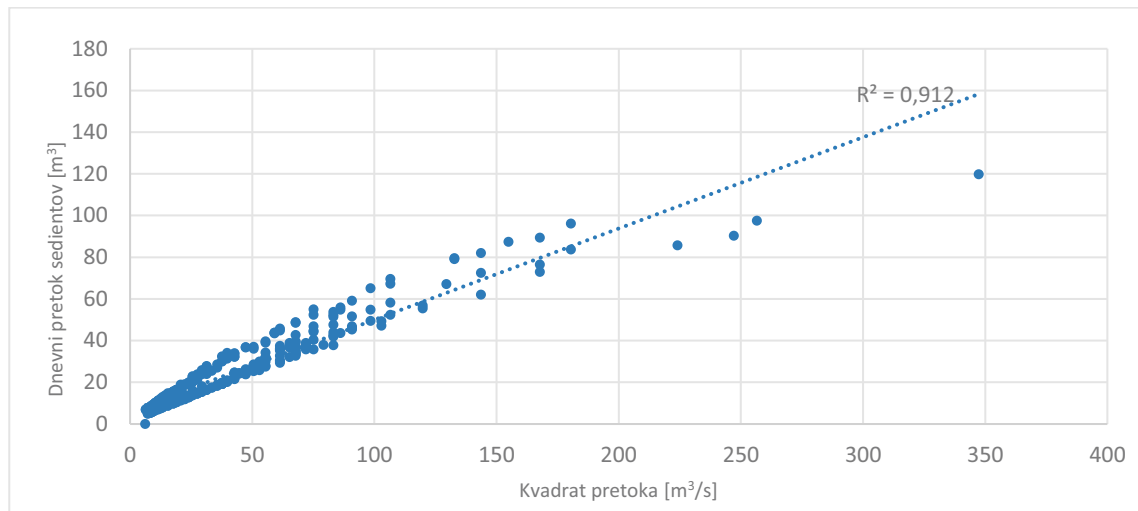
Na grafu 21 je razvidna velika odvisnost med dnevnim pretokom sedimentov skozi profil in povprečnim pretokom vode v tistem dnevu. Na grafu 22 je poleg dnevnega pretoka sedimentov prikazan kumulativni seštevek pretoka sedimentov v obravnavanem letu.

4.1.2 Karakteristični profil odlaganja sedimentov

Pri karakterističnem prerezu odlaganja sedimentov za razliko od stabilnega karakterističnega profila ni tako tipične linearne odvisnosti med pretokom sedimentov in kvadratom pretoka vode. Na grafih 23 in 24 sta zato prikazani odvisnosti pretoka sedimentov tako od pretoka vode, kot tudi od kvadrata pretoka vode.

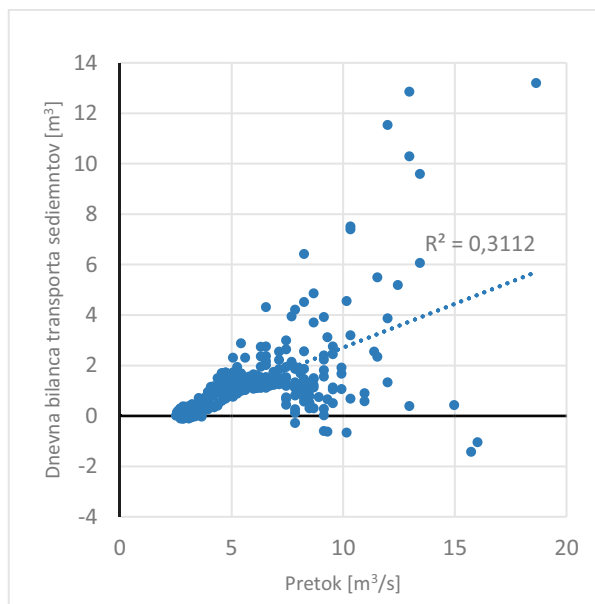


Graf 23: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom vode in dnevnim pretokom sedimentov za karakteristični profil odlaganja.

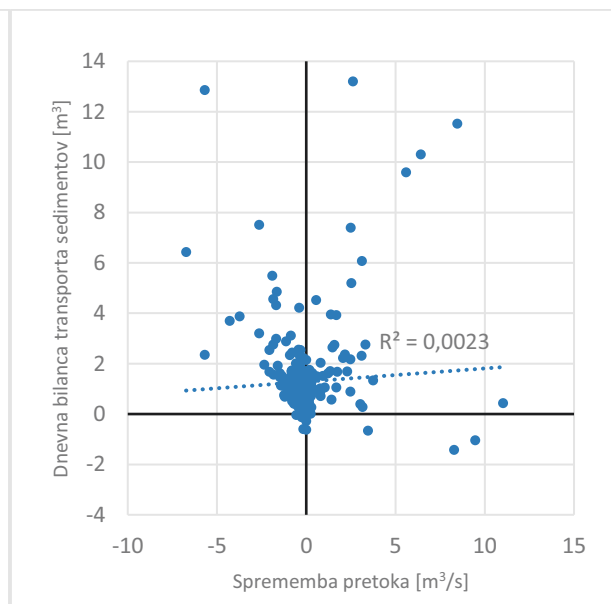


Graf 24: Odvisnost med kvadratom povprečnega dnevnega pretoka vode in dnevnim pretokom sedimentov za karakteristični profil odlaganja.

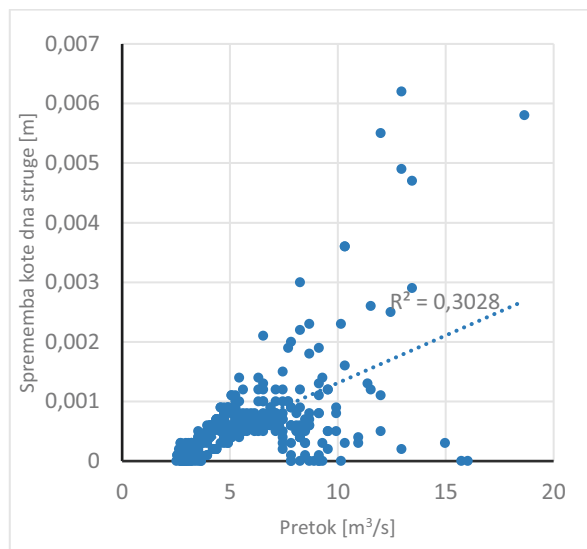
Na grafih 25 in 27 so prikazane odvisnosti med dnevno bilanco transporta sedimentov in dnevno spremembo kote dna ter povprečnim dnevnim pretokom vode. Dodatno so na grafih 26 in 28 prikazane odvisnosti teh vrednosti od spremembe povprečnega dnevnega pretoka glede na prejšnji dan.



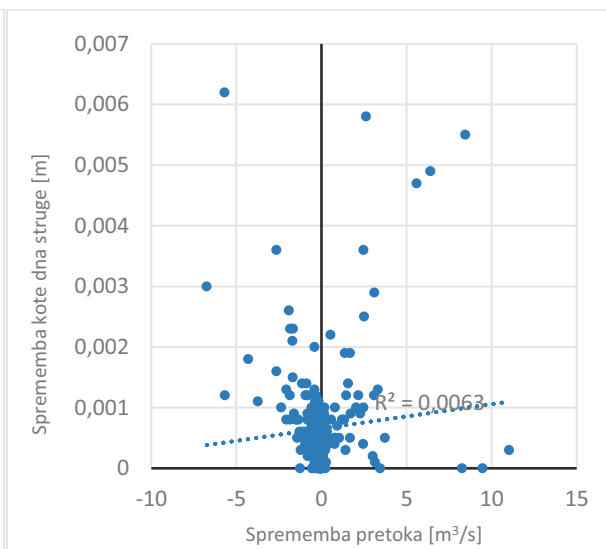
Graf 25: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in bilanco transporta sedimentov v karakterističnem profilu odlaganja.



Graf 26: Odvisnost med spremembo pretoka in bilanco transporta sedimentov v karakterističnem profilu odlaganja.



Graf 27: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in dnevno spremembo kote dna struge v karakterističnem profilu odlaganja.

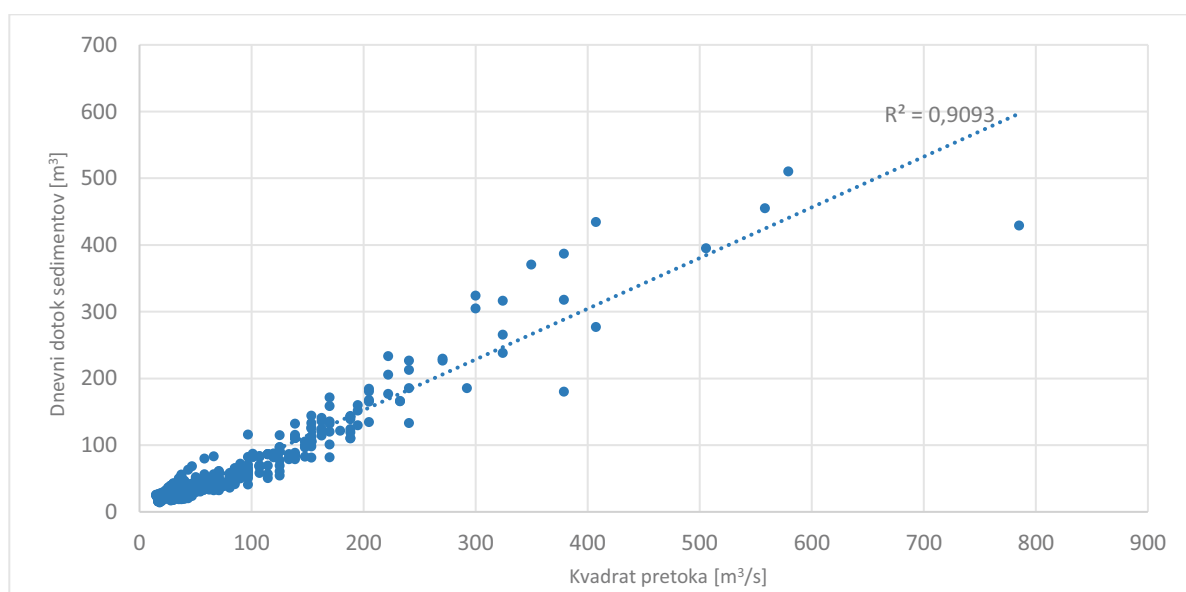


Graf 28: Odvisnost med spremembo pretoka in dnevno spremembo kote dna struge v karakterističnem profilu odlaganja.

Za razliko od stabilnega karakterističnega profila sta v karakterističnem profilu odlaganja spreminjanje višine kote dna in bilanca transporta bolj odvisne neposredno od pretoka vode. Odvisnost pri uporabi vrednosti sprememb pretoka je majhna. Iz tega je razvidno, da je v tem karakterističnem profilu neodvisno od nihanja pretokov večino časa prisoten proces odlaganja sedimentov. Z večanjem pretoka se krepi tudi proces odlaganja.

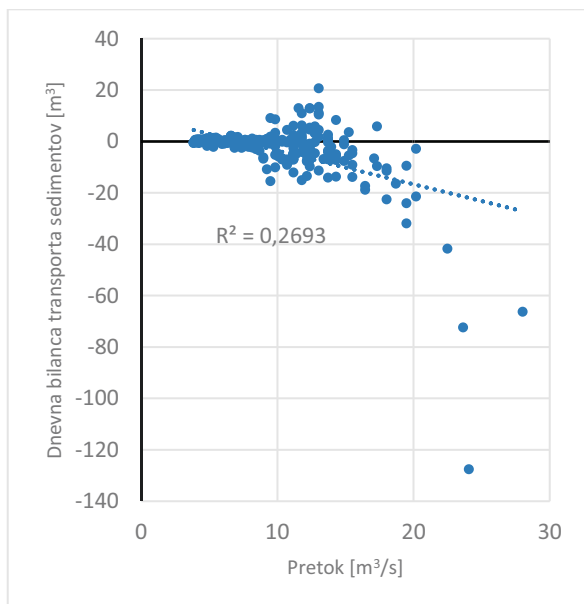
4.1.3 Karakteristični profil erozije

V primeru karakterističnega profila erozije je vidna linearna odvisnost med kvadratom povprečnega dnevnega pretoka in dnevnim pretokom sedimentov. Odvisnost je prikazana na grafu 29.

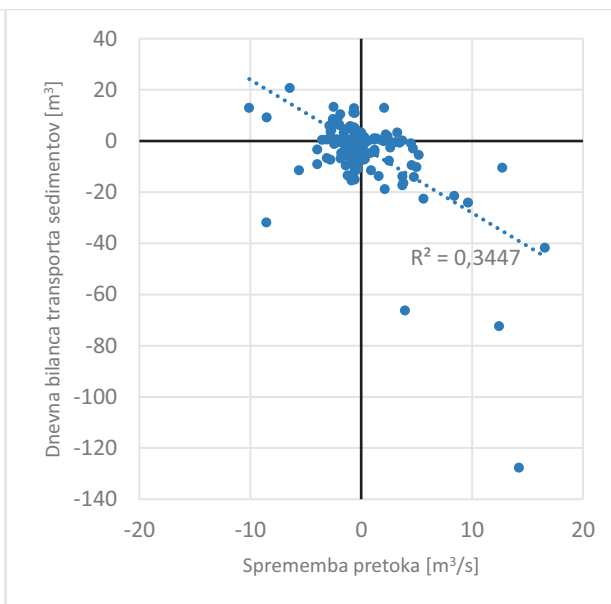


Graf 29: Odvisnost med kvadratom povprečnega dnevnega pretoka vode in dnevnim pretokom sedimentov za karakteristični profil erozije.

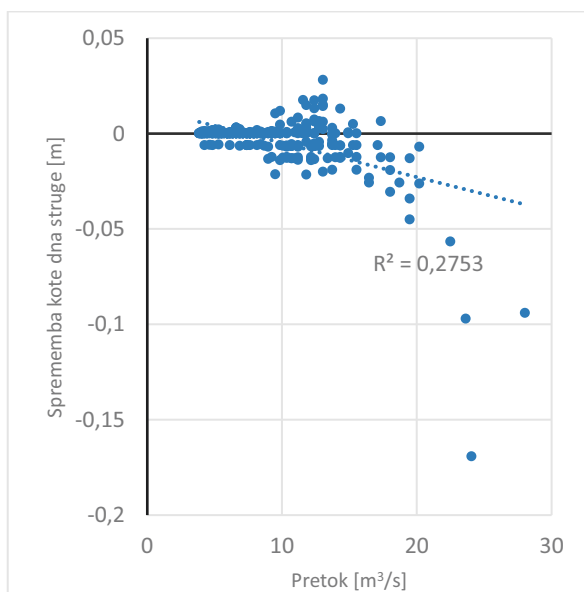
Na Graf 30 in Graf 32 so prikazane odvisnosti med dnevno bilanco transporta sedimentov in dnevno spremembo kote dna ter povprečnim dnevnim pretokom vode. Dodatno so na grafih 31 in 33 prikazane odvisnosti teh vrednosti od spremembe povprečnega dnevnega pretoka glede na prejšnji dan.



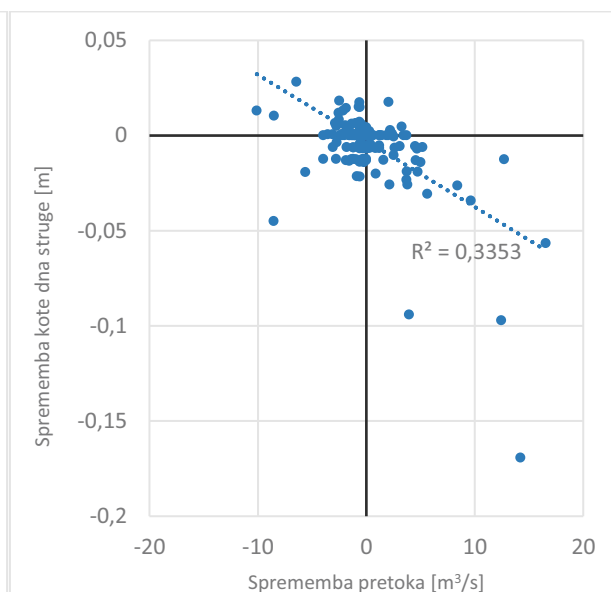
Graf 30: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in bilanco transporta sedimentov v karakterističnem profilu erozije.



Graf 31: Odvisnost med spremembo pretoka in bilanco transporta sedimentov v karakterističnem profilu erozije.



Graf 32: Odvisnost med povprečnim dnevnim pretokom in dnevno spremembo kote dna struge v karakterističnem profilu erozije.



Graf 33: Odvisnost med spremembo pretoka in dnevno spremembo kote dna struge v karakterističnem profilu erozije.

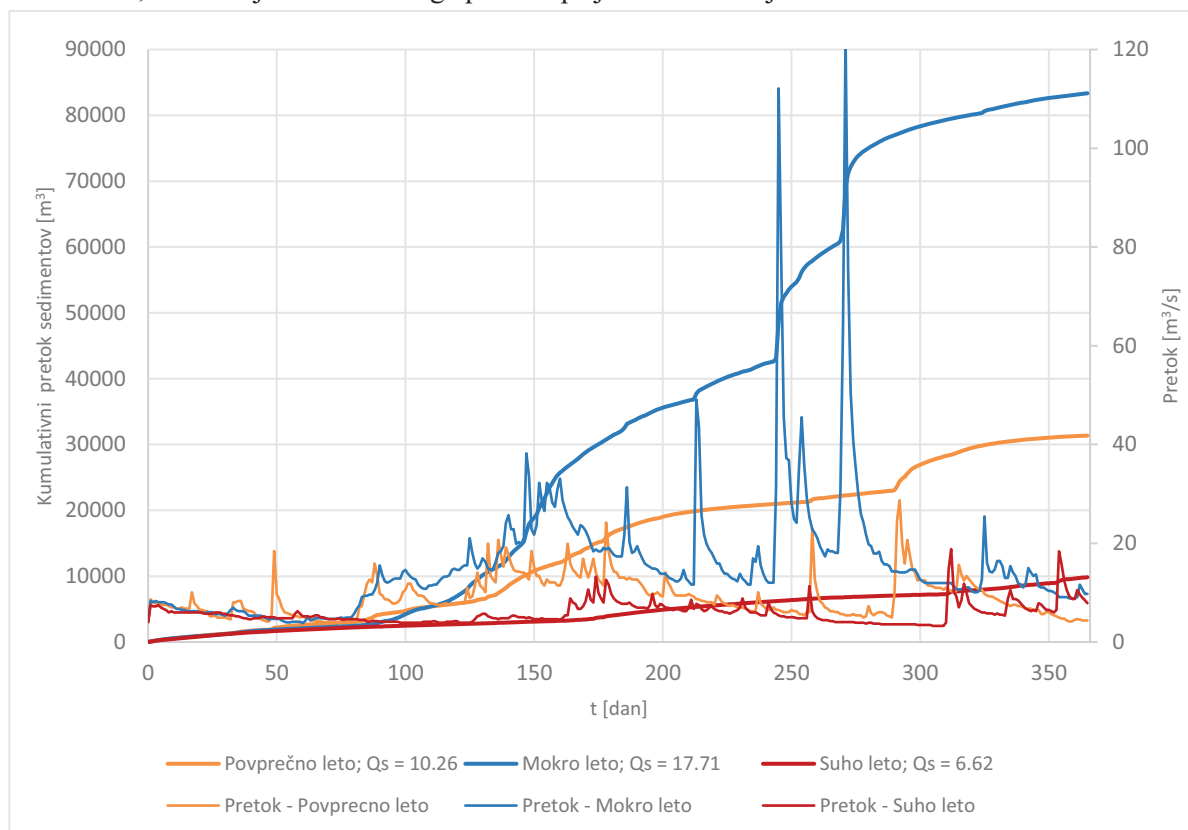
Iz primerjave odvisnosti je razvidno, da je v karakterističnem profilu erozije dinamika transporta sedimentov odvisna tako od pretoka, kot tudi od njegove spremembe glede na prejšnji dan, pri čemer je

slednja odvisnost nekoliko boljša. Na grafih 30 in 32, kjer je prikazana odvisnost dinamike transporta od dejanskega povprečnega dnevnega pretoka, je razvidno, da se erozija v profilu povečuje z naraščanjem pretoka, kar je še posebej očitno pri zgornji polovici vrednosti pretokov. Iz graf 31 in 33 je razvidna odvisnost med pozitivno spremembo pretoka in nastopom povečane erozije, kar bi lahko bila posledica porušitve grobega zgornjega zaščitnega sloja podlage ob povečanju pretoka. Ker na novo izpostavljena finejša zrna spodnjih slojev, ki so bila predhodno zaščitena z vrhnjim grobim slojem, niso odporna proti eroziji, se ta pri porušitvi zaščitnega sloja znatno poveča. Do odlaganja sedimentov pa v večini prihaja pri zmanjšanju pretoka. To lahko povežemo z zmanjšanjem transportne zmogljivosti, ki ni več sposobna premeščati vseh sedimentov, ki še naprej pritekajo iz gorvodnih profilov.

4.2 Vpliv spreminjanja različnih dejavnikov na rezultate

4.2.1 Vpliv spremembe hidrologije na rezultate

Iz primerjav kumulativnega pretoka sedimentov, prikazanega na grafu 34, je razvidno, da ima hidrologija oz. vrednosti pretokov velik vpliv na transport sedimentov. Največ sedimentov se premešča v času visokovodnih konic pretoka, kar se na grafu prikazuje kot strmo naraščanje kumulativnega pretoka sedimentov. V času visokovodnih konic se tudi ustvari največja razlika med količino premeščenih sedimentov v mokrem, povprečnem in suhem hidrološkem letu. V mokrem letu so visokovodne konice pretokov višje, zato so tudi povečanja kumulativnega pretoka sedimentov izrazitejša. V suhem hidrološkem letu so konice nižje, zato ni opaznih izrazitejših povečanj pretoka sedimentov, naraščanje kumulativnega pretoka pa je enakomernejše.

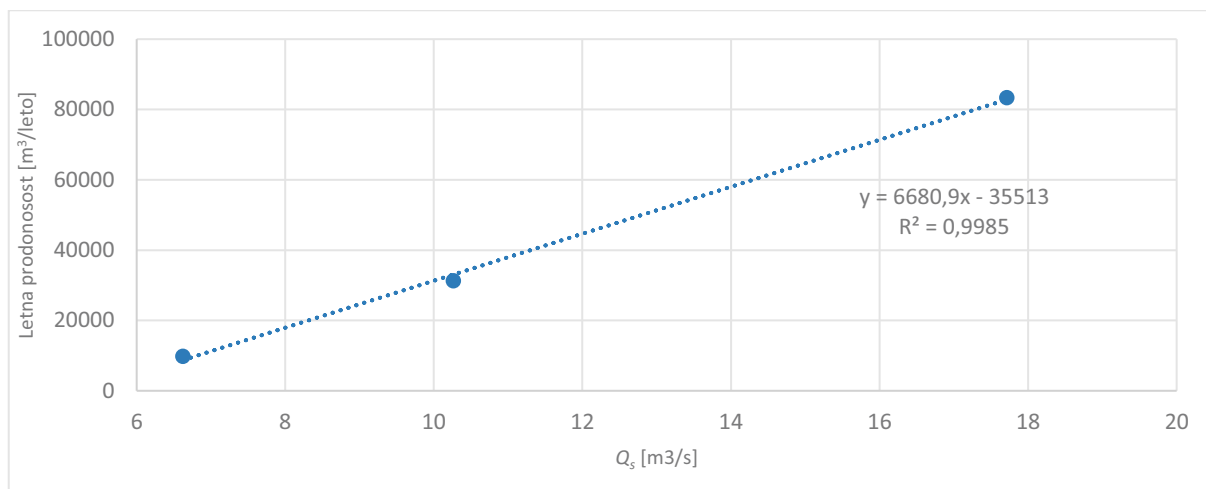


Graf 34: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV DINAMIKE PRETOKOV.

V preglednici 12 so prikazane letne prodonosnosti Save Dolinke v prerezu nad vtokom v prodni zadrževalnik Hrušica. Ugotovljena je bila velika odvisnost prodonosnosti od srednjega letnega pretoka, kar je prikazano na grafu 35.

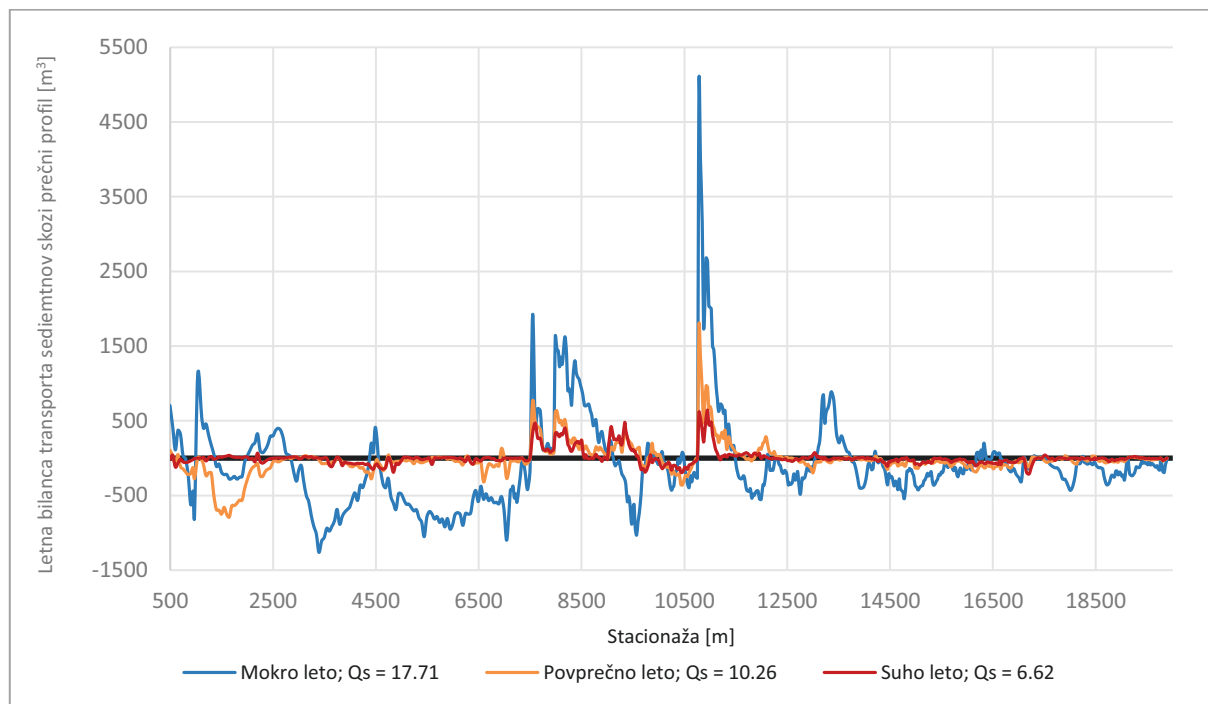
Preglednica 12: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica za različna statistično značilna hidrološka leta.

	Q_s [m ³ /s]	Letna prodonosnost na vtoku v zadrževalnik Hrušica [m ³ /leto]
Mokro leto	17,71	83356,0
Povprečno leto	10,26	31353,2
Suho leto	6,62	9842,0

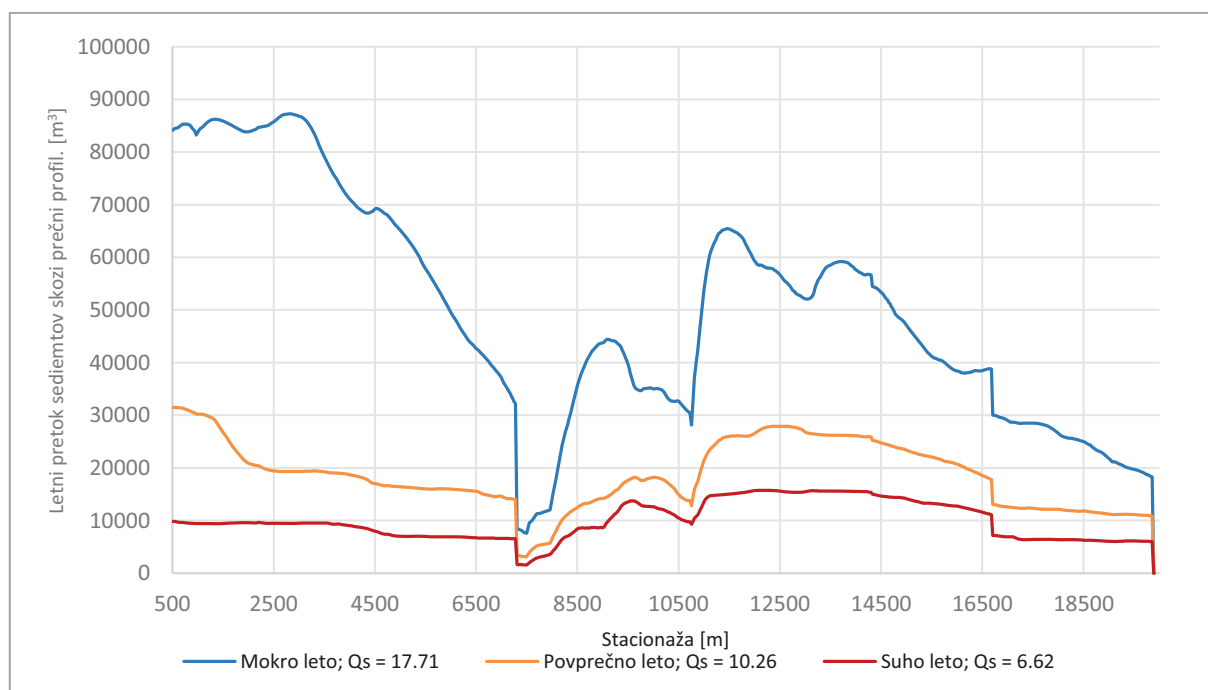


Graf 35: Odvisnost med letno prodonosnostjo in srednjim letnim pretokom Save Dolinke v profilu nad prodnim zadrževalnikom Hrušica.

Vrednosti letne bilance transporta in letni pretok sedimentov skozi posamezni prečni profil so v vzdolžnem profilu prikazane na grafih 36 in 37. Pri vseh treh obravnavanih hidroloških letih so lokacije procesov erozije in odlaganja sedimentov približno enake, le intenziteta teh procesov je različna. Tudi trend naraščanja oziroma padanja vrednosti letnega pretoka sedimentov dolvodno po odseku je pri vseh obravnavanih letih podoben. Razlike v dinamiki premeščanja sedimentov med suhim in povprečnim letom so manjše od razlik med mokrim in povprečnim letom. To nakazuje na to, da do največjih sprememb v dinamiki transporta prihaja ob najvišjih pretokih. Pri mokrem letu na več odsekih, kjer so bile v povprečnem letu razmere približno stabilne, nastopi erozija. Po tem lahko sklepamo, da je bila na teh odsekih presežena kritična strižna napetost, ki poruši zgornji zaščitni sloj in povzroči povečano erozijo.



Graf 36: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV DINAMIKE PRETOKOV.

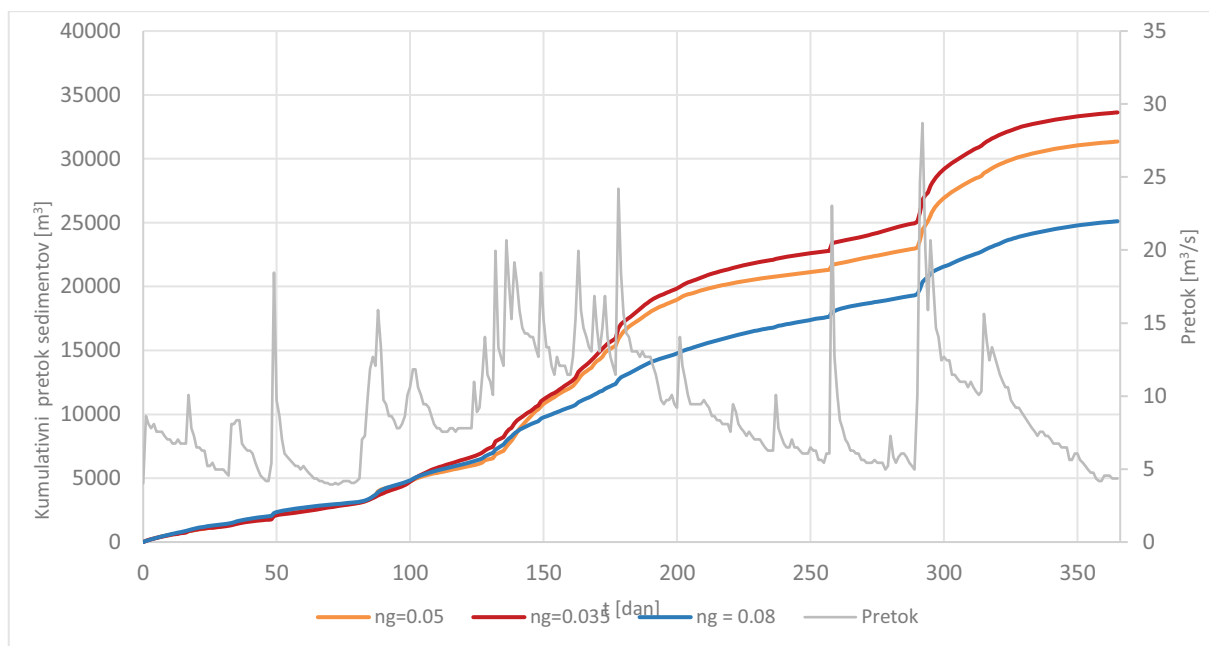


Graf 37: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV DINAMIKE PRETOKOV.

4.2.2 Vpliv spremembe koeficienta hrapavosti na rezultate

Na grafu 38 so prikazani kumulativni pretoki sedimentov v povprečnem letu pri uporabljenih različnih Manningovih koeficientih hrapavosti. V vseh primerih je oblika povečevanja kumulativnega pretoka skozi leto podobna – največ sedimentov se premešča ob večjih pretokih. V preglednici 13 so prikazane letne prodonosnosti Save Dolinke v prerezu nad vtokom v prodni zadrževalnik Hrušica za uporabljene

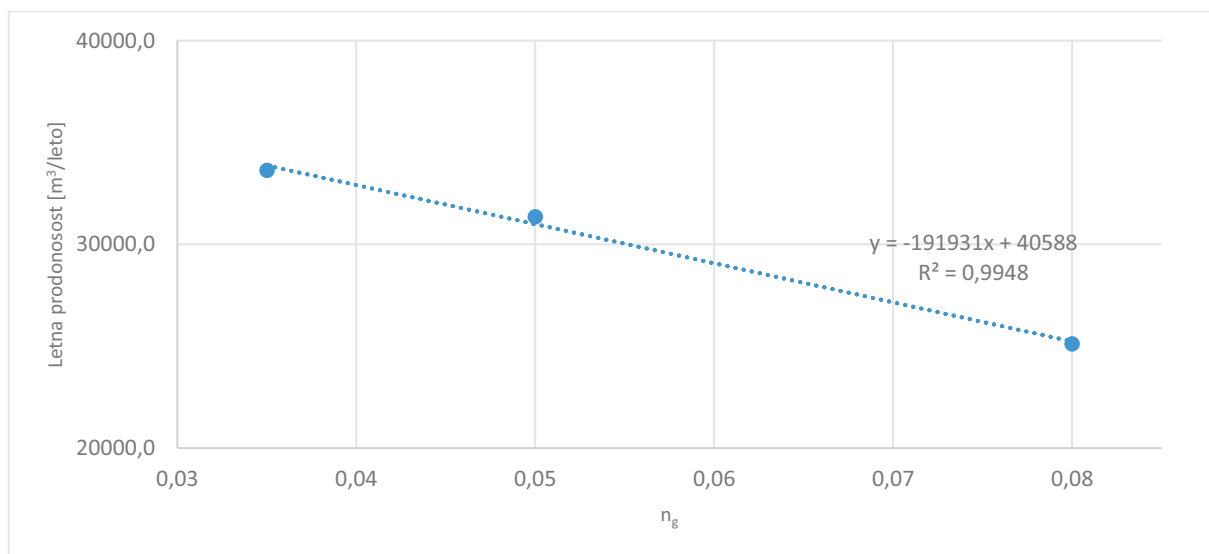
koeficiente hrapavosti. Ugotovljena odvisnost prodonosnosti od koeficienta hrapavosti je prikazana na grafu 39. Razvidno je, da se z večanjem koeficienta hrapavosti transport sedimentov zmanjšuje.



Graf 38: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV KOEFICIENTA HRAPAVOSTI.

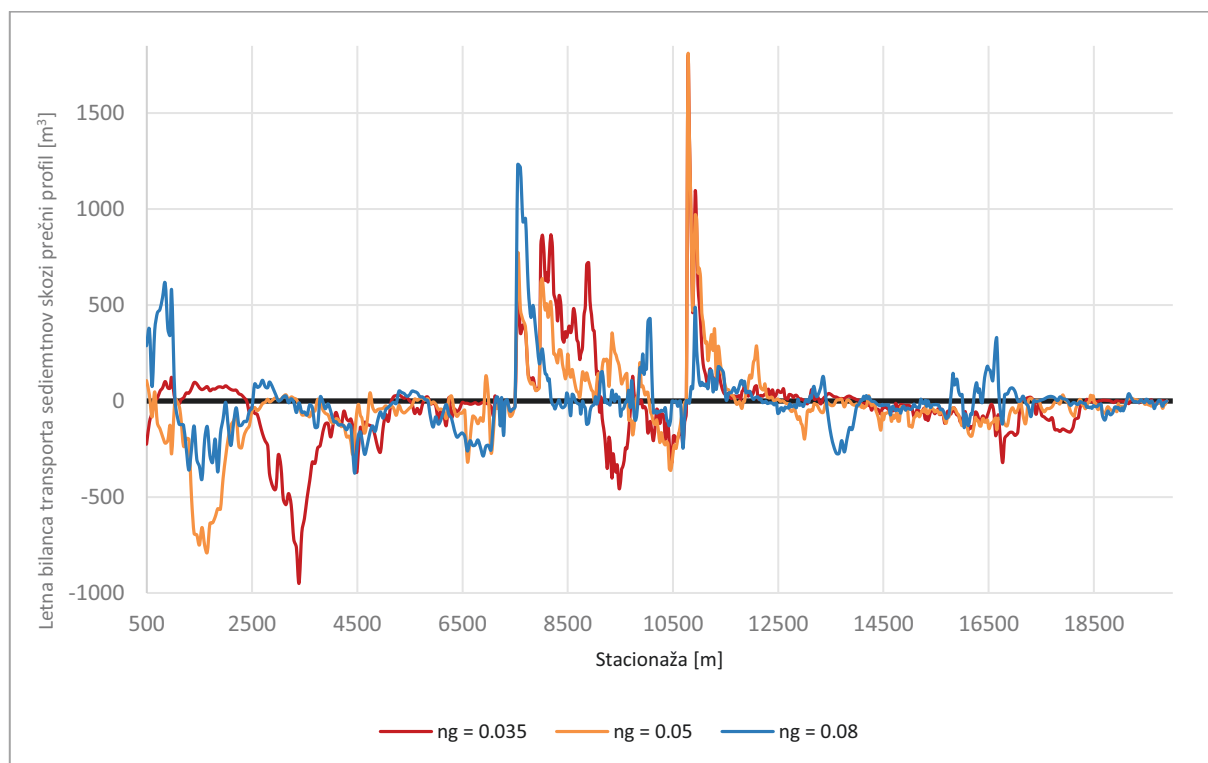
Preglednica 13: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica za različne koeficiente hrapavosti.

Uporabljen n_g	Letna prodonosnost na vtoku v zadrževalnik Hrušica [m^3/leto]
0,035	33630,0
0,05	31353,2
0,08	25113,5

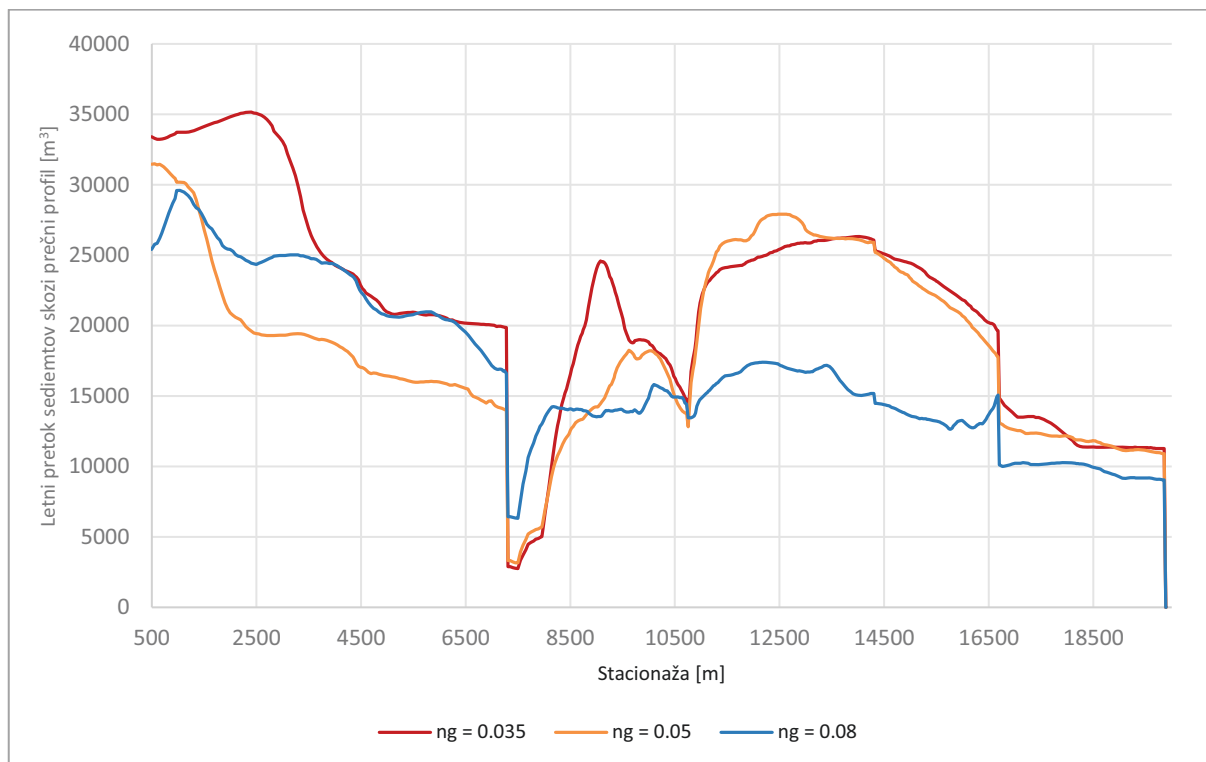


Graf 39: Odvisnost med uporabljenim koeficientom hrapavosti in letno prodonosnostjo Save Dolinke v profilu nad prodnim zadrževalnikom Hrušica.

Vrednosti letne bilance transporta in letni pretok sedimentov skozi posamezni prečni profil so v vzdolžnem profilu prikazane na grafih 40 in 41. Čeprav je na iztoku iz modela viden jasen trend zmanjševanja pretoka sedimentov s povečevanjem hrapavosti, je na grafu 41 razvidno, da temu ni tako na celotnem odseku. Gorvodno od vtoka Belce je npr. letni pretok sedimentov pri uporabi osnovnega koeficienta hrapavosti večji od tistega pri uporabi vrednosti $n_g = 0,035$. Prav tako je nad vtokom Bistrice letni pretok sedimentov največji v primeru uporabe večje vrednosti koeficienta hrapavosti $n_g = 0,08$. To je posledica tega, da so območja odlaganja in erozije v vzdolžnem profilu pri uporabi različnih koeficientov hrapavosti ponekod premaknjena, kar je razvidno iz grafa 40, kar povzroči razlike pri spreminjanju letnega pretoka sedimentov vzdolž odseka, zaradi česar povečanje transporta sedimentov z zmanjšanjem hrapavosti ni značilno za vse profile na odseku.



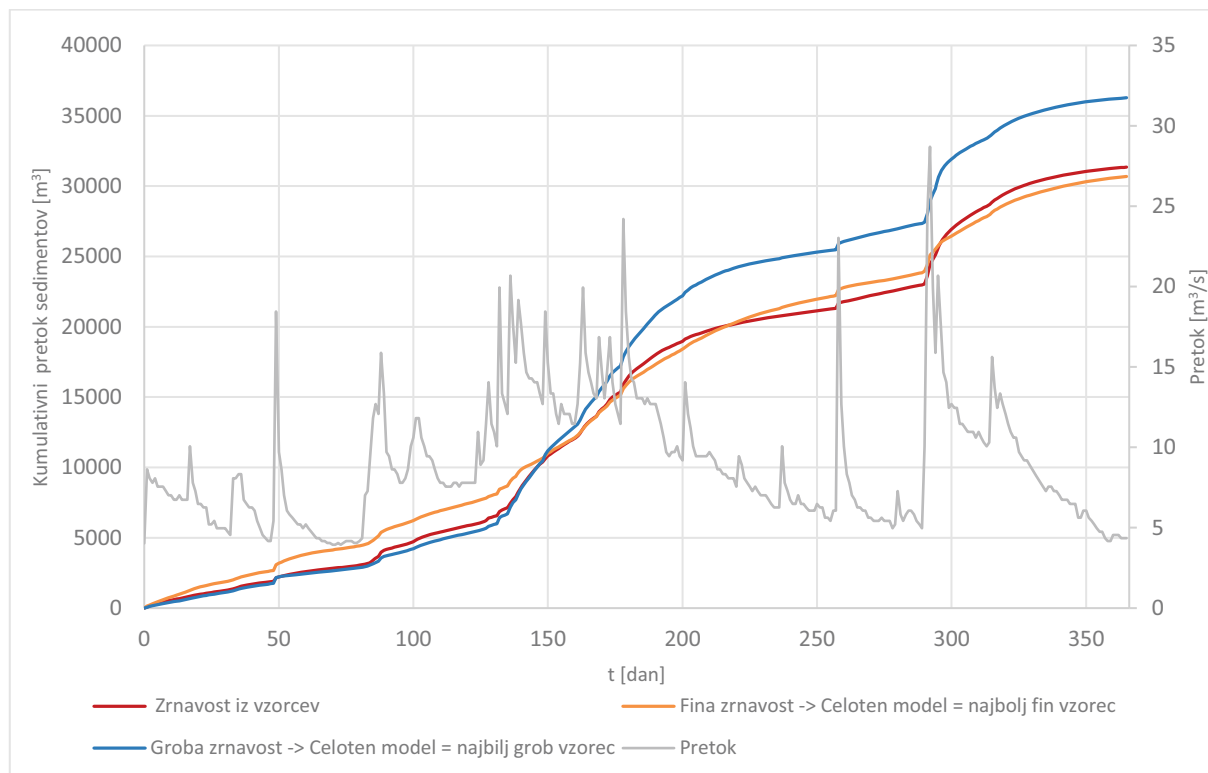
Graf 40: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV KOEFICENTA HRAPAVOSTI.



Graf 41: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV KOEFICIENTA HRAPAVOSTI.

4.2.3 Vpliv spremembe zrnivosti podlage na rezultate

Na grafu 42 so prikazani kumulativni pretoki sedimentov v povprečnem letu pri uporabljenih različnih zrnavostih podlage. Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica so prikazane v preglednici 14. Pri uporabi fine zrnivosti je letna prodonosnost podobna kot pri uporabi dejanske zrnivosti. Pri uporabi grobe zrnivosti, za katero je uporabljen vzorec na lokaciji prodnega zadrževalnika Hrušica (ta po zrnivosti vidno odstopa od ostalih vzorcev), pa je razlika v prodonosnosti v primerjavi z osnovnim primerom večja. Čeprav je pri uporabi bolj grobe zrnivosti opazno povečanje končne letne prodonosnosti, je iz grafa 42 razvidno, da temu ni tako skozi celo leto. V prvi polovici leta je transport sedimentov v primeru uporabe grobe zrnivosti manjši kot v osnovnem primeru uporabe zrnivosti iz vzorcev. Vrednosti transporta sedimentov pri grobi zrnivosti so v primerjavi z osnovnim primerom večje predvsem v času povečanih pretokov oz. visokovodnih konic.

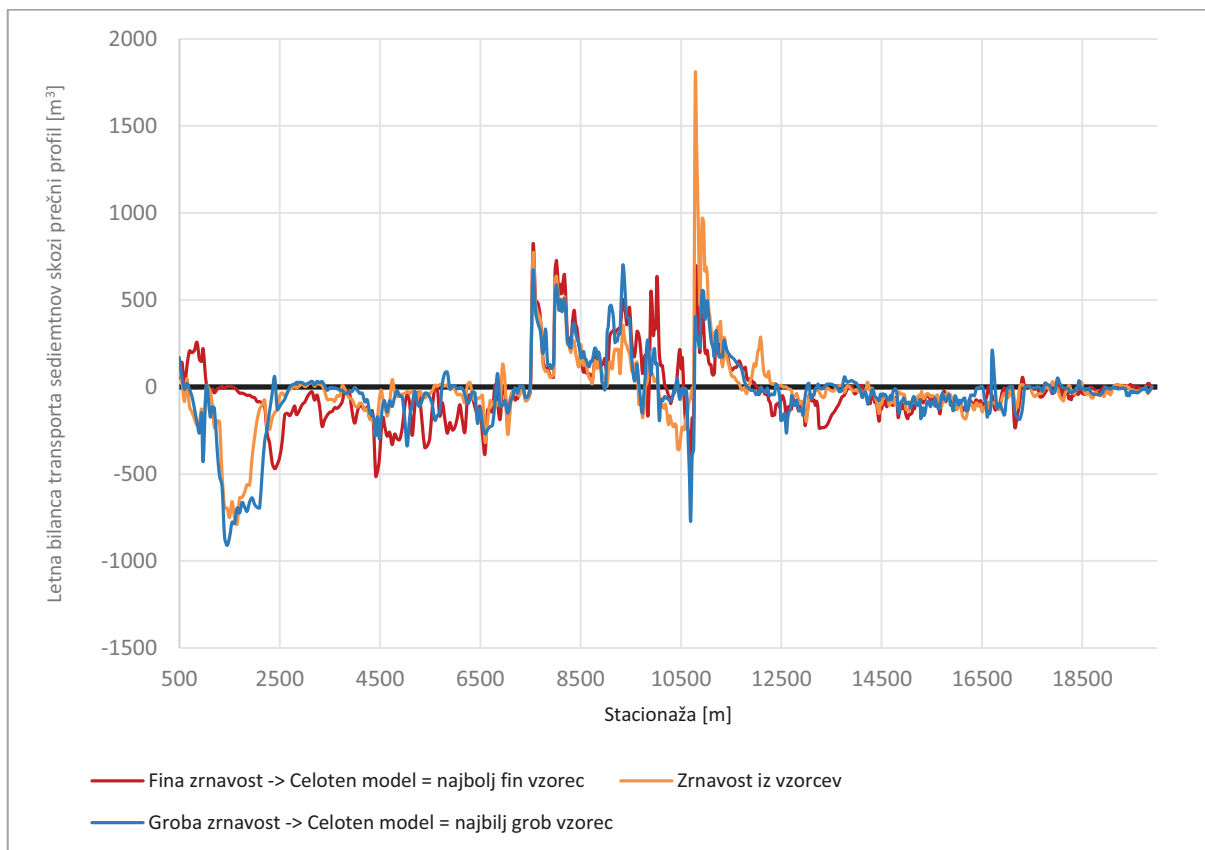


Graf 42: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV ZRNAVOSTI.

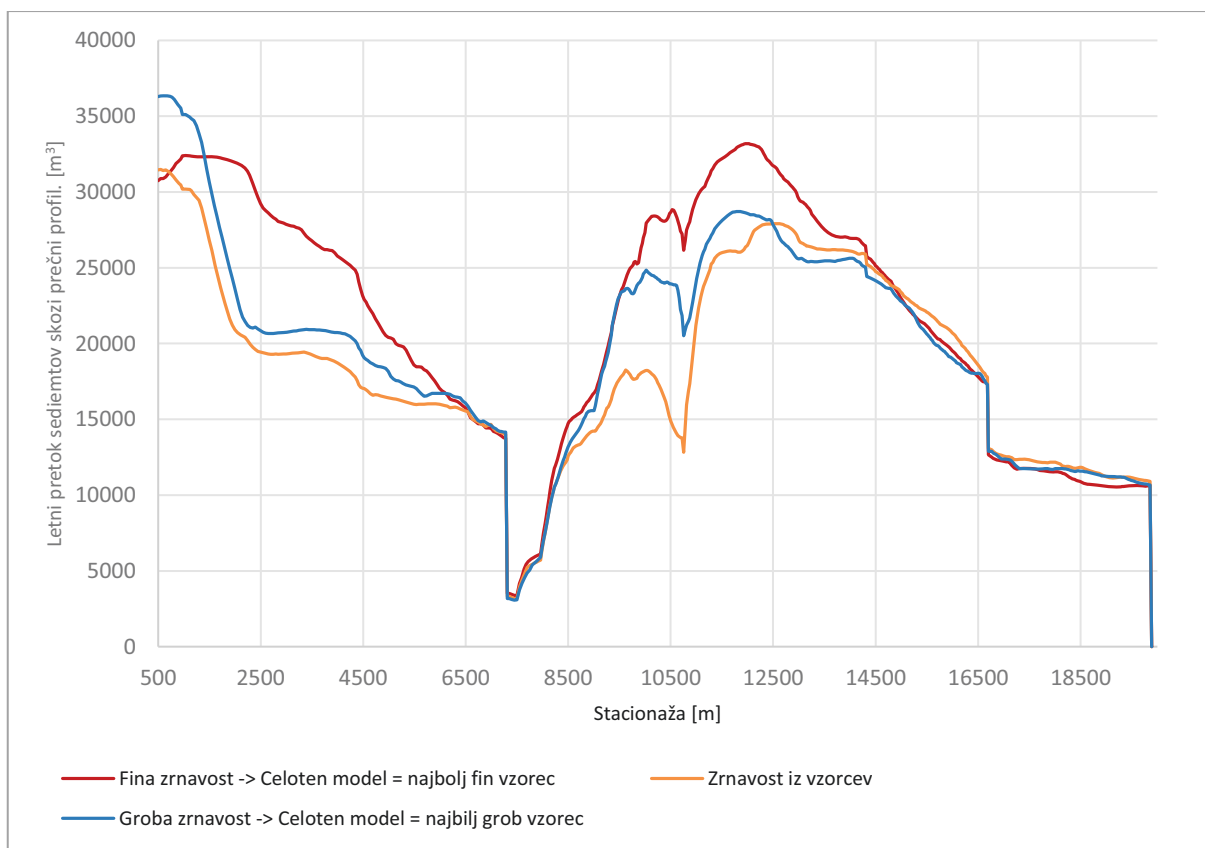
Preglednica 14: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica za različne zrnivosti podlage.

ZRNAVOST	Letna prodonosnost na vtoku v zadrževalnik Hrušica [m³/leto]
FINA	30686,7
IZ VZORCEV	31353,2
GROBA	36284,8

Vrednosti letne bilance transporta in letni pretok sedimentov skozi posamezni prečni profil so v vzdolžnem profilu prikazane na grafih 43 in 44. V vseh primerih so lokacije procesov erozije in odlaganja sedimentov približno enake, le intenziteta teh procesov je različna. Tudi trend naraščanja / padanja vrednosti letnega pretoka sedimentov dolvodno po odseku je pri vseh obravnavanih letih podoben. Iz grafa 44 je razvidno, da je na večjem delu obravnavanega odseka transport sedimentov največji v primeru uporabe fine zrnivosti, kljub temu, da je v tem primeru prodonosnost na iztoku iz modela najmanjša. Transport sedimentov pri uporabi bolj grobih zrnivosti se najbolj vidno poveča v spodnjem delu modela, kjer je zaradi večjih pretokov in ožje struge erozijska moč vode dovolj velika, da se premeščajo tudi bolj grobe frakcije sedimentov. Iz predstavljenih analiz ne moremo določiti značilnega vpliva zrnivosti podlage na dinamiko transporta sedimentov.



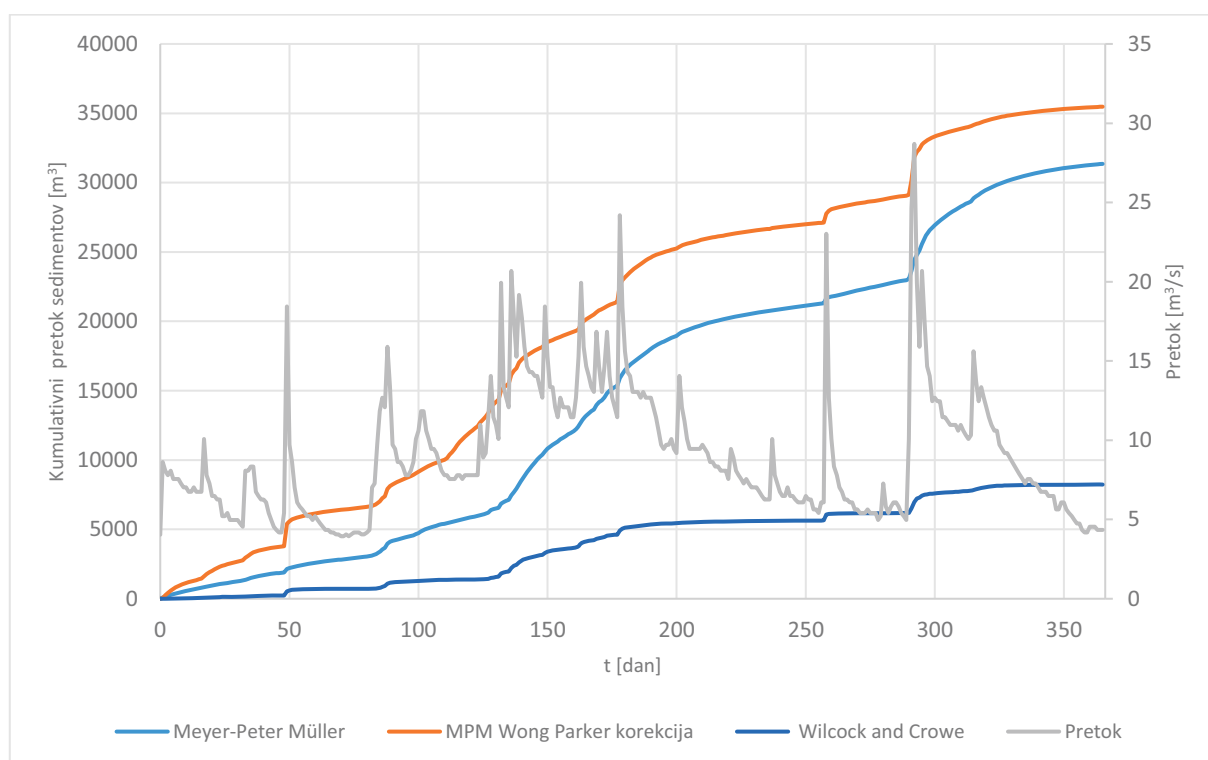
Graf 43: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV ZRNAVOSTI.



Graf 44: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV ZRNAVOSTI.

4.2.4 Vpliv spremembe transportne funkcije na rezultate

Na grafu 45 so prikazani kumulativni pretoki sedimentov v povprečnem letu pri uporabljenih različnih transportnih funkcijah. Pri uporabi transportne funkcije Wilcock and Crowe, ki temelji na drugih enačbah kot enačba Meyer-Peter Müller, je prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica bistveno drugačna – manjša. Iz grafa 45 je razvidno, da je transport sedimentov pri uporabi te transportne funkcije prisoten zgolj ob višjih pretokih, medtem ko je pri uporabi enačbe Meyer-Peter Müller transport sedimentov v manjših količinah prisoten tudi pri nižjih pretokih. Pri uporabi Wong in Parker korekcije enačbe Meyer-Peter Müller je prodonosnost na tej lokaciji bolj podobna - v primerjavi z osnovnim primerom uporabe enačbe Meyer-Peter Müller se nekoliko poveča. Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica pri različnih uporabljenih transportnih funkcijah so prikazane v preglednici 15.



Graf 45: Letna prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV SPREMEMBE TRANSPORTNE FUNKCIJE.

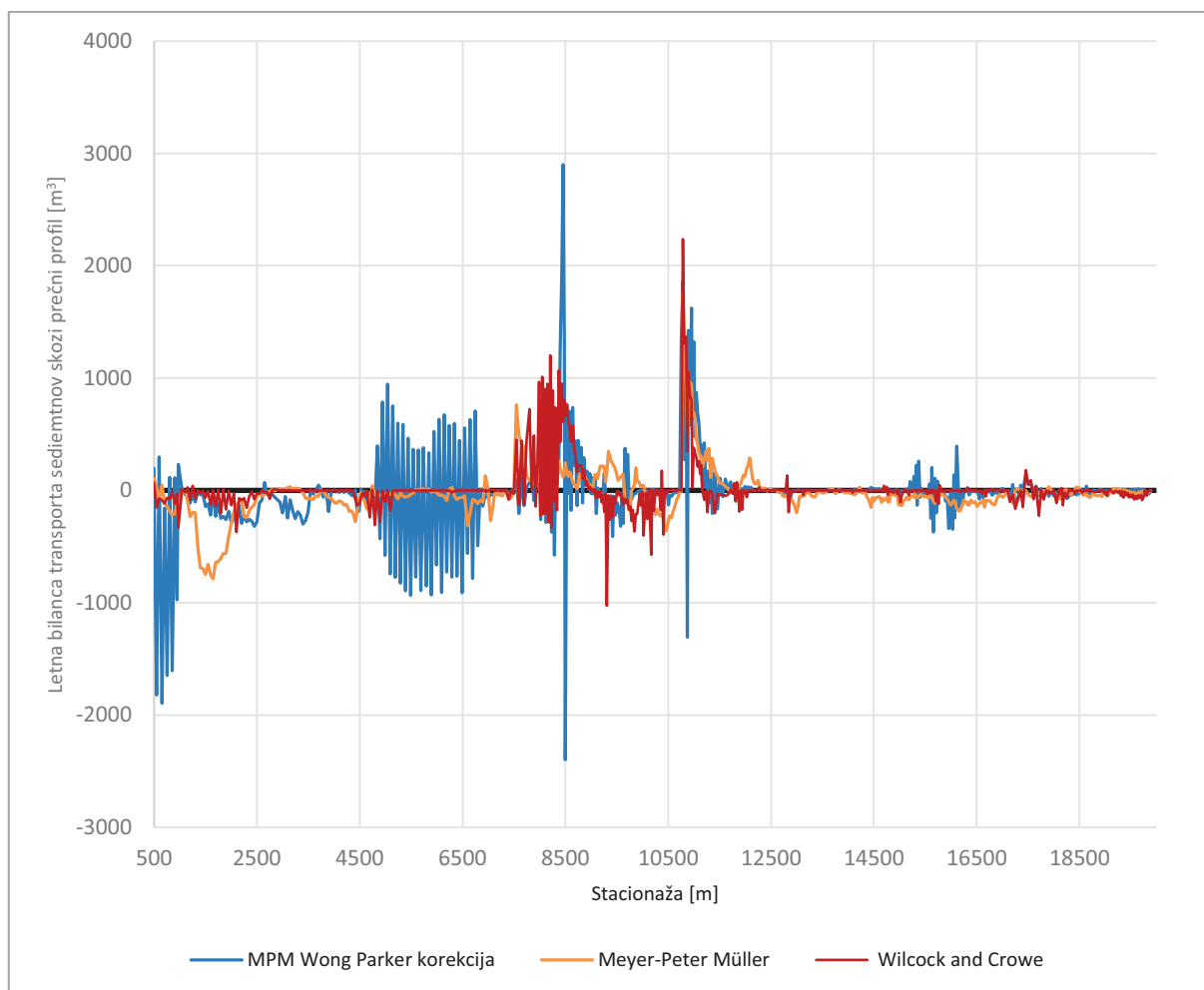
Preglednica 15: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica pri uporabljenih različnih transportnih funkcijah.

Transportna funkcija	Letna prodonosnost na vtoku v zadrževalnik Hrušica [m³/leto]
Meyer-Peter Müller	31353,2
Meyer-Peter Müller - Wong Parker korekcija	35475,1
Wilcock and Crowe	8230,4

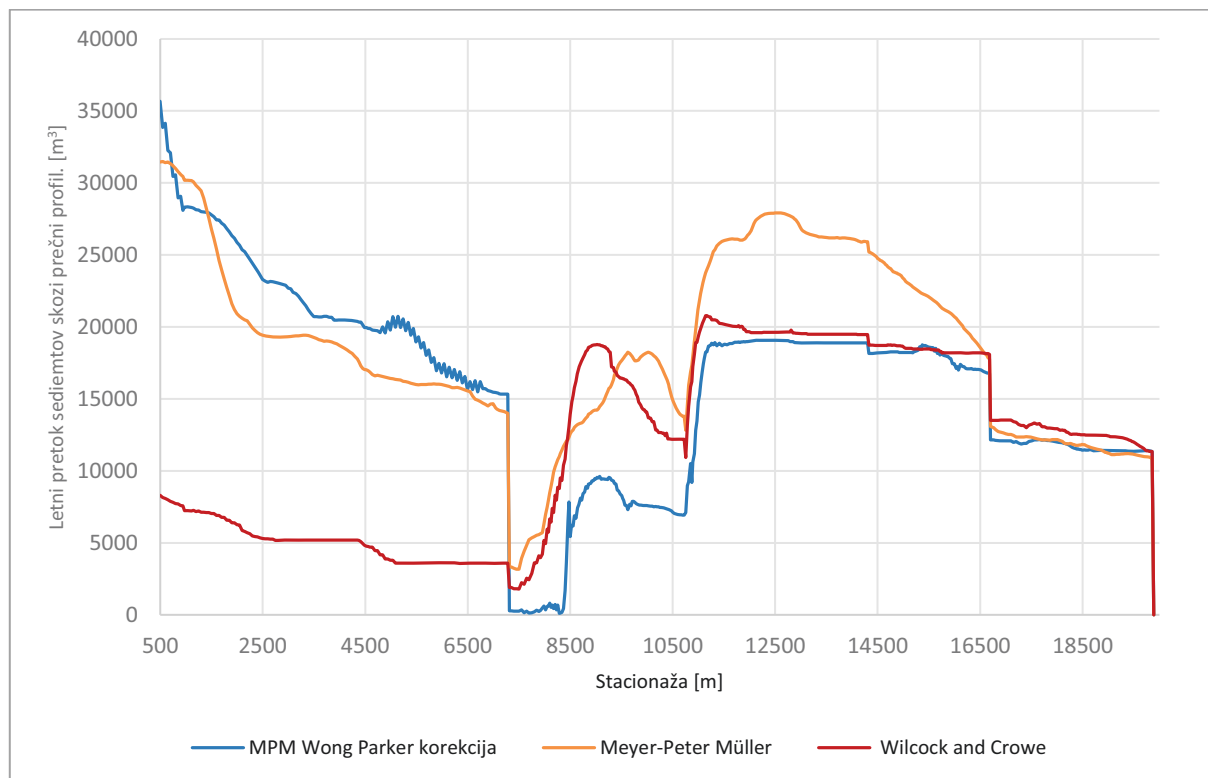
Iz grafa 46 je razvidno, da pri uporabi enačbe Wilcock in Crowe ter Wong Parker korekcije enačbe Meyer-Peter Müller na posameznih odsekih prihaja do nestabilnosti v dinamiki transporta sedimentov. Čeprav pri uporabi omenjenih enačb prihaja do večjih nihanj oz. nestabilnosti pri vzdolžnem spreminjanju letne bilance transporta sedimentov, pa je iz grafa 47 razvidno, da to bistveno ne vpliva na

količino transporta sedimentov. V spreminjanju letnega pretoka sedimentov vzdolž modela namreč te nestabilnosti niso tako izrazite, tudi trend spreminjanja letnega pretoka sedimentov vzdolž modela je podoben kot v osnovnem primeru. Razlog za nestabilnosti bi lahko predstavljal režim toka, saj je korekcija Wong in Parker omejena na uporabo pri nižjih pretokih oz. v mirnem režimu toka. Iz grafa 46 je razvidno, da pri uporabi te enačbe do nestabilnosti prihaja v spodnjem delu, kjer je pretok večji in zaradi ožje oblike struge bolj skoncentriran. V zgornjem delu, kjer je pretok manjši in razporejen po širši strugi, do nestabilnosti ne prihaja.

V zgornjem delu obravnavanega odseka obe varianti spremenjene transportne funkcije podajata nižje vrednosti transporta od osnovnega primera. Prav tako je v zgornjem delu odstopanje količine transporta pri uporabi enačbe Wilcock in Crowe manjše. V spodnjem delu enačba Wilcock in Crowe podaja bistveno manjše, korekcija Wong Parker pa rahlo povečane vrednosti transporta v primerjavi z osnovnim primerom. Razlog za spremembo razmerij med količinami transporta pri različnih transportnih funkcijah vzdolž odseka bi lahko bila sprememba pretočnih razmer. V spodnjem delu namreč Sava Dolinka teče po bistveno bolj ozki strugi kot v zgornjem delu. Pretočne globine so zato povečane, spremenjene pa so tudi hitrosti vodnega toka, kar ima lahko vpliv na različno delovanje transportnih funkcij.



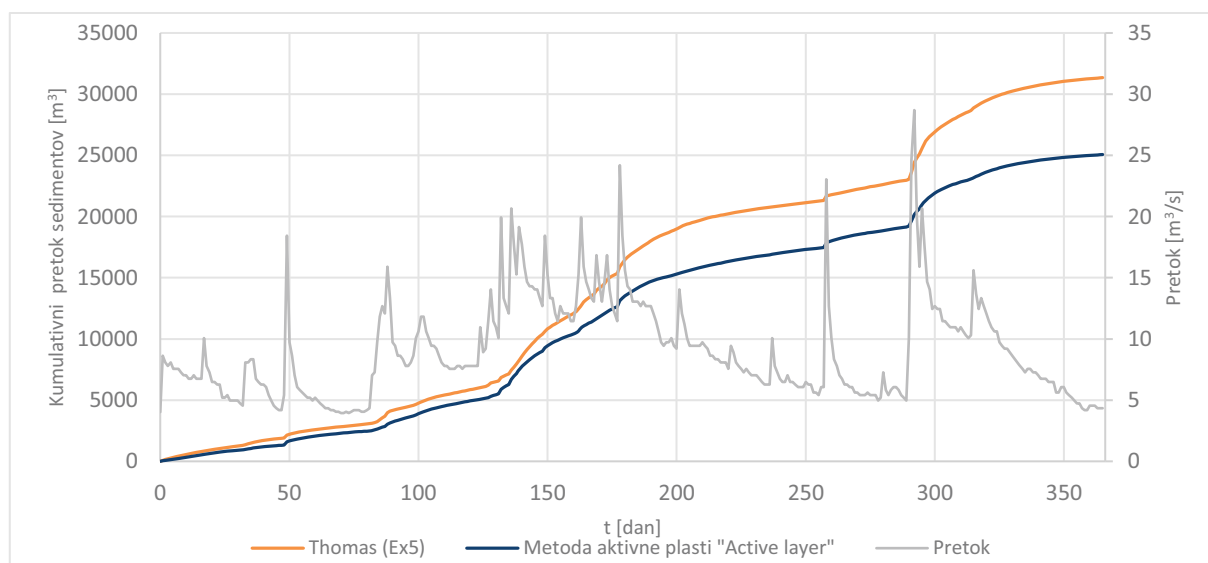
Graf 46: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV SPREMEMBE TRANSPORTNE FUNKCIJE.



Graf 47: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV SPREMEMBE TRANSPORTNE FUNKCIJE.

4.2.5 Vpliv spremembe metode sortiranja podlage na rezultate

Sprememba prodnosti na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica pri uporabi druge metode sortiranja podlage (Metoda Aktivne plasti) je prikazana na grafu 48. Vrednosti letne prodnosti so prikazane v preglednici 16. Prodnost je na tem delu pri uporabi metode sortiranja podlage z Aktivno plastjo nekoliko manjša, je pa opazna podobnost pri naraščanju kumulativnega pretoka sedimentov skozi leto pri obeh primerih.



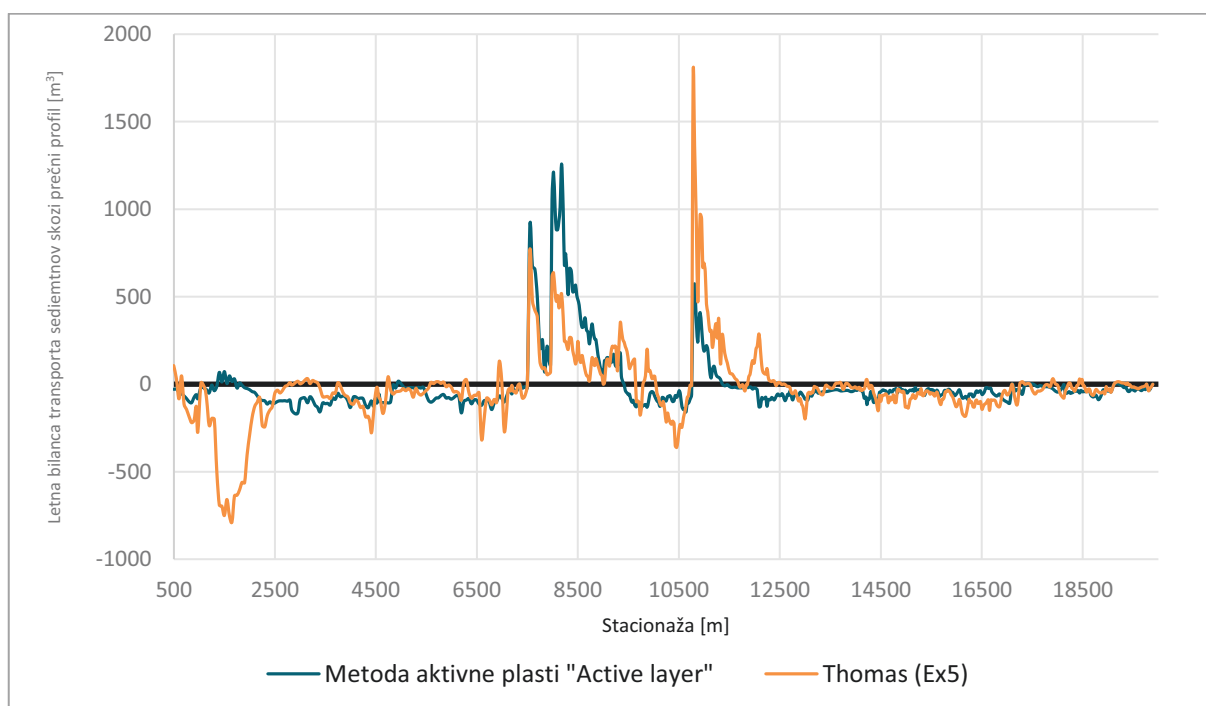
Graf 48: Letna prodnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica – VPLIV SPREMEMBE METODE SORTIRANJA PODLAGE.

Preglednica 16: Letne prodonosnosti na vtoku v zadrževalnik Hrušica pri spremembi metode sortiranja podlage.

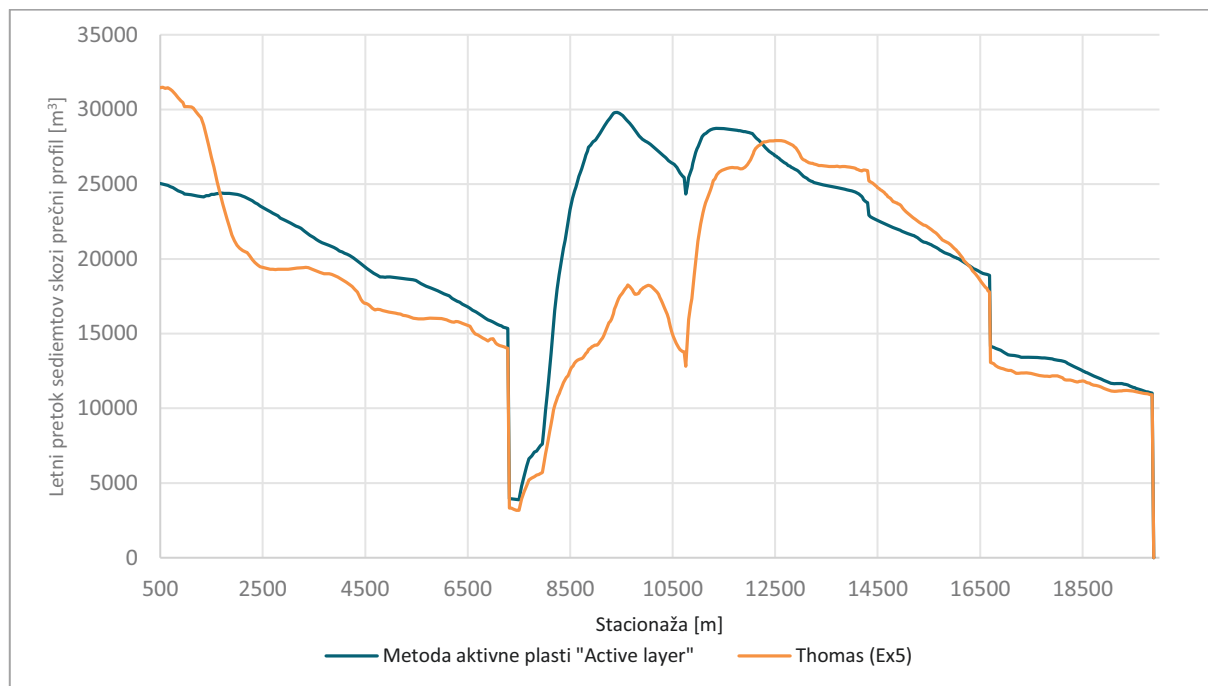
Metoda sortiranja podlage	Letna prodonosnost na vtoku v zadrževalnik Hrušica [m ³ /leto]
Thomas (Ex5)	31353,2
Metoda aktivne plasti	25069,4

Iz grafa 49 je razvidno, da pri obeh metodah sortiranja podlage procesi erozije in odlaganja sedimentov nastopajo na približno enakih delih odseka, le intenzitete teh procesov so različne. Izjema je območje večje erozije v spodnjem delu modela (med stacionažo 1200 m in 2300 m) pri uporabi metode Thomas (Ex5).

Kljub temu, da je pri uporabi metode Aktivne plasti prodonosnost na iztoku iz modela manjša, je iz grafa 50 razvidno, da na celotnem odseku temu ni tako. V zgornjem delu modela je količina premeščanja sedimentov pri obeh uporabljenih metodah približno enaka, v srednjem delu in spodnjem delu (z izjemo zadnjih 1700 m) pa je letni pretok sedimentov pri uporabi metode Aktivne plasti večji. Razlog za to je zmanjšanje transporta sedimentov pri uporabi metode Thomas (Ex5), kar je posledica intenzivnejšega odlaganja na stacionaži cca. 10800 m, to pa zmanjša količine premeščajočih se sedimentov.



Graf 49: Letna bilanca transporta sedimentov skozi prečni profil – VPLIV SPREMEMBE METODE SORTIRANJA PODLAGE.



Graf 50: Letni pretok sedimentov skozi prečni profil – VPLIV SPREMEMBE METODE SORTIRANJA PODLAGE.

4.2.6 Primerjava vpliva različnih dejavnikov

Iz analize rezultatov simulacij s spreminjanjem posameznih parametrov je opazno, da ima med vhodnimi podatki najbolj opazen vpliv na premeščanje sedimentov dinamika pretokov oz. vodnatost vodotoka. Vpliv spremembe zrnivosti in spremembe koeficienta hrapavosti na rezultate je manjši in je približno enakega velikostnega reda. Med parametri delovanja modela bistven vpliv predstavlja izbira transportne funkcije, vpliv metode sortiranja podlage na rezultate je manjši. Če povzamemo, sta hidrologija in izbira transportne funkcije glavna dejavnika delovanja modela. Vpliv zrnivosti, koeficienta hrapavosti in izbire metode sortiranja so manjšega velikostnega razreda.

4.3 Določitev povprečnih vrednosti premeščanja sedimentov in območij erozije in odlaganja

4.3.1 Določitev povprečnih vrednosti premeščanja sedimentov na posameznih odsekih

Za namen primerjave s študijo Strategija odvzema naplavin na porečju reke Save (Nivo Eko in sod., 2023) so bile ocenjene povprečne vrednosti premeščanja sedimentov za enaka območja, kot jih obravnava omenjena študija. Povprečna vrednost premeščanja za vsak odsek je bila pridobljena s povprečjem vrednosti letnega pretoka sedimentov vseh profilov, ki se nahajajo znotraj odseka. V študiji Strategija odvzema naplavin na porečju reke Save so bile količine transporta določene na podlagi rezultatov dvodimenzijskih modelov, ki so bili ločeno izdelani za vsak obravnavan odsek. Tudi v tej študiji je modeliran zgolj transport rinjenih plavin. Primerjava povprečnega letnega premeščanja sedimentov na posameznih odsekih je prikazana v preglednici 17.

Preglednica 17: Primerjava povprečnega letnega premeščanja sedimentov na posameznih odsekih.

Odsek	Povprečno letno premeščanje sedimentov [m ³]	
	Strategija odvzema naplavin na porečju reke Save	Rezultati magistrske naloge
Pišnica – odsek jezero Jasna – pregrada pri Leku	10000	/
Pišnica – pregrada pri Leku – sotočje s Savo Dolinko	5000	/
Sava Dolinka – Log – Martuljek	6000	11666
Sava Dolinka – Martuljek – Rute	20000	21457
Sava Dolinka – Rute – Belca	12000	25774
Sava Dolinka – Belca – Mojstrana	38000	13810
Sava Dolinka – Mojstrana – Dovje	10000	15585
Sava Dolinka – Dovje – Hrušica	10000	23578
Sava Dolinka – zadrževalnik Hrušica	30000	31459

Obe študiji podajata približno enako prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica. Pri količinah letnega transporta sedimentov na ostalih odsekih so odstopanja med študijama različna. Glede na razlike v metodologiji modeliranja, majhno količino podatkov za umerjanje (predvsem podatek o dotoku sedimentov) in veliko število predpostavk, ki jih je potrebno privzeti pri modeliranju sedimentov, odstopanja med rezultati niso pretirana. V študiji Strategija odvzema naplavin na porečju reke Save je bil namreč transport sedimentov za vsak odsek modeliran ločeno z dvodimenzijskim modelom s simulacijami krajšega trajanja. V okviru magistrske naloge pa je bil celoten odsek Save Dolinke, skupaj z izlivnimi deli pritokov, obravnavan kot enoten enodimenzionalen model, računi pa so bili izvedeni za daljša časovna obdobja z manjšo resolucijo spreminjanja pretokov.

4.3.2 Določitev območij erozije in odlaganja

Za boljši pregled nad dinamiko transporta sedimentov na odseku Save Dolinke je bil ta razdeljen na območja različnih razredov erozije in odlaganja sedimentov. Razredi so bili določeni glede na letno spremembo višine dna struge v posameznem prečnem profilu pri simulaciji za podatke povprečnega hidrološkega leta. Na območjih, kjer je letna sprememba manjša od 5 cm, razred erozije oziroma odlaganja ni definiran.

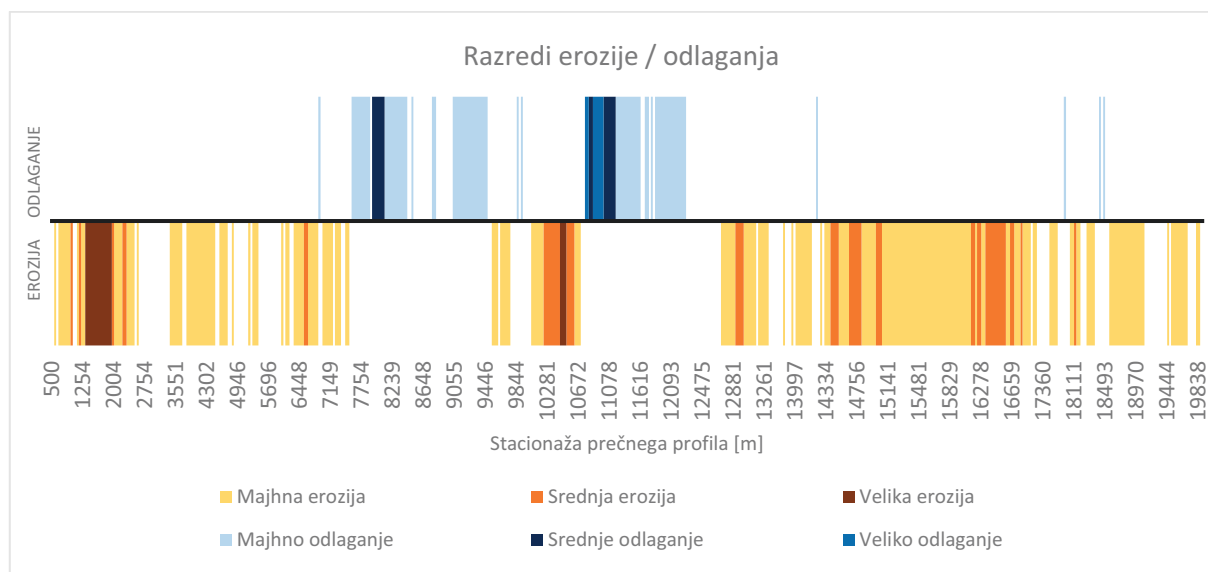
Razredi erozije so bili razdeljeni na:

- razred majhne erozije; kjer je letno zmanjšanje višine dna struge med 5 cm in 25 cm,
- razred srednje erozije; kjer je letno zmanjšanje višine dna struge med 25 cm in 50 cm in
- razred velike erozije; kjer je letno zmanjšanje višine dna večje od 50 cm.

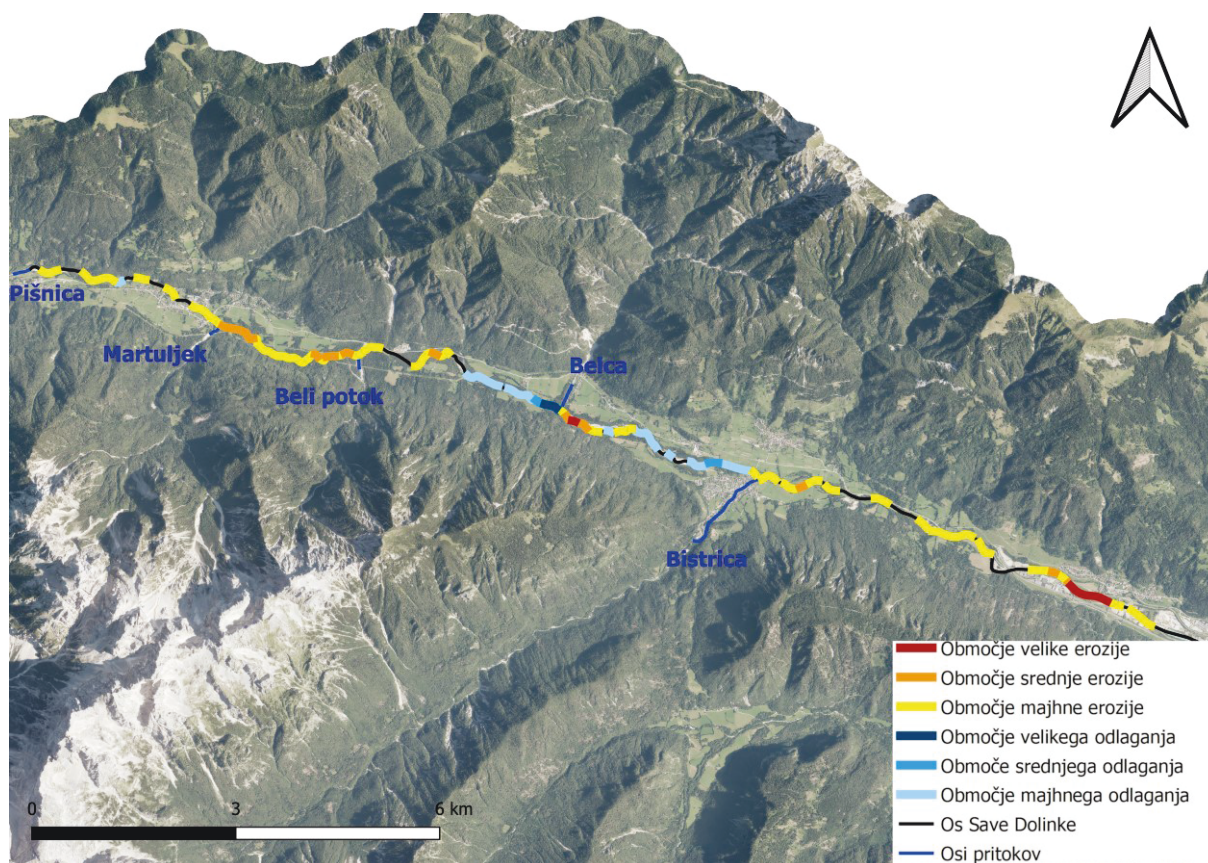
Razredi odlaganja so bili razdeljeni na:

- razred majhnega odlaganja; kjer je letno povečanje višine dna struge med 5 cm in 25 cm,
- razred srednjega odlaganja; kjer je letno povečanje višine dna struge med 25 cm in 50 cm,
- razred velikega odlaganja; kjer je letno povečanje višine dna struge večje od 50 cm.

Območja določenih razredov so v vzdolžnem profilu odseka na grafu 51. Dodatno so na sliki 20 prikazana območja vrisana na situacijo modeliranega odseka. Karta območij razredov erozije in odlaganja v polni velikosti je priložena v prilogi D.



Graf 51: Vzdolžni profil območij razredov odlaganja in erozije.



Slika 20: Prikaz območij razredov erozije in odlaganja sedimentov.

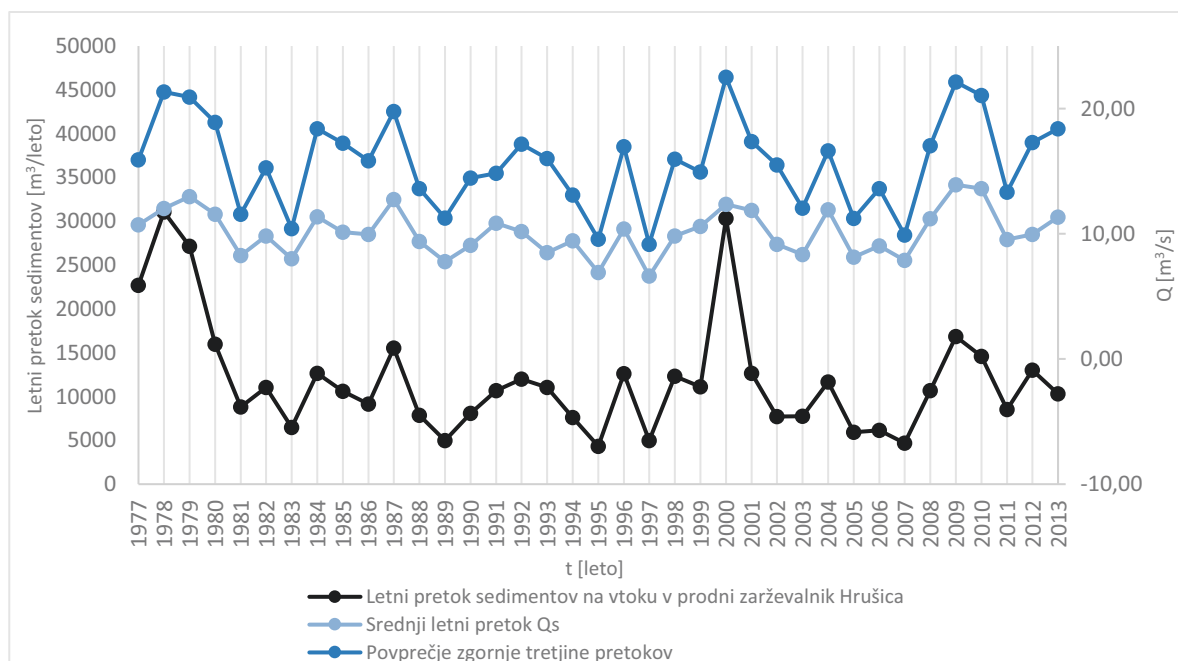
Na obravnavanem odseku so bolj zastopana območja erozije. To bi lahko bila posledica tega, da kljub triletnemu ogrevanju modela stabilno stanje še ni popolnoma doseženo. Na to nakazuje tudi podatek, da je povprečno letno premeščanje plavin pri simulaciji daljšega časovnega obdobja v poglavju 4.4 manjše od letne količine premeščenih sedimentov v simulaciji povprečnega hidrološkega leta. Območja odlaganja so večinoma vezana na lokacije gorvodno od regulacijskih objektov v strugi – največji

območji odlaganja sedimentov sta nad stopenjskimi pragovi pri vtoku Belce ter ob Mojstrani. Območje prodnega zadrževalnika Hrušica, kjer je prisotno največje akumuliranje sedimentov, v prikaz ni vključeno, iz analize je bilo izključeno zaradi bolj preglednega prikaza grafov vzdolžne dinamike transporta sedimentov.

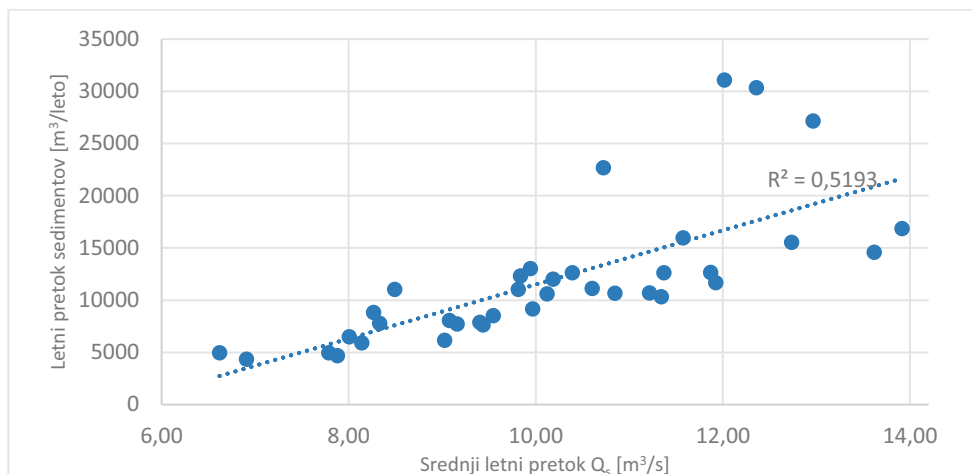
Vsa območja odlaganja, določena v magistrski nalogi, se ujemajo s tistimi, določenimi v študiji Strategija odvzema naplavin na porečju reke Save. V omenjeni študiji imajo sicer območja odlaganja večji obseg, vendar pa je potrebno poudariti, da je pri tem uporabljena druga metodologija določitve območij. V omenjeni študiji so bila območja odlaganja določena v primeru visokovodnega dogodka s 100-letno povratno dobo, kjer je dinamika transporta bistveno drugačna. V okviru magistrske naloge pa so območja določena na podlagi simulacije povprečnega hidrološkega leta, kjer so doseženi bistveno manjši pretoki. Prav tako so v omenjeni študiji območja odlaganja na posameznih odsekih določena tudi na podlagi odlaganja sedimentov na brežinah, kar je v primeru visokovodnih dogodkov pogosto. Območja, določena v okviru magistrske naloge, temeljijo zgolj na spreminjanju višine najnižje točke struge.

4.4 Rezultati simulacije daljšega časovnega obdobja

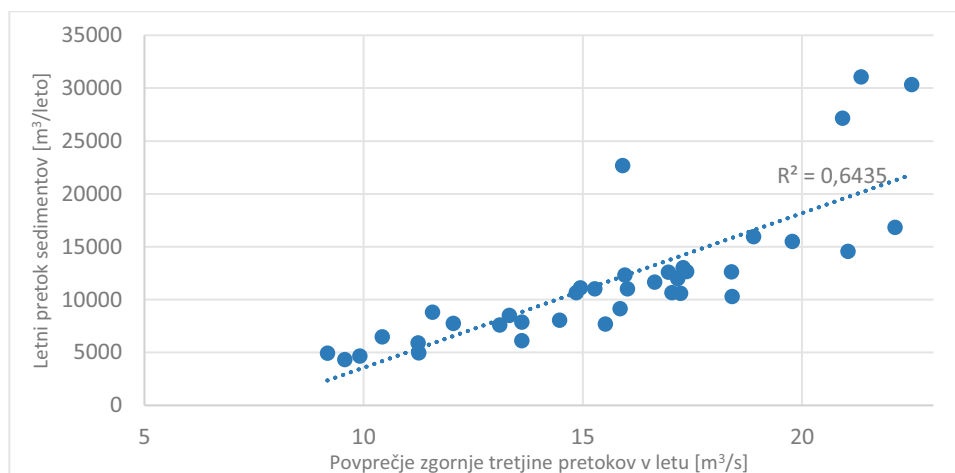
Vrednosti letnega pretoka sedimentov oz. letne prodonosnosti Save Dolinke na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica so prikazane na grafu 52. Poleg je za vsako leto prikazan srednji letni pretok Q_s in povprečje zgornje tretjine največjih pretokov v letu. Odvisnost med pretokom sedimentov in omenjenimi vrednostmi pretokov je prikazana na grafih 53 in 54. Iz grafov je dobro razviden vpliv hidrologije na količine transporta sedimentov. Odvisnost med transportom sedimentov in povprečjem zgornje tretjine pretokov v letu je boljša od tiste pri srednjem letnem pretoku. Iz tega lahko sklepamo, da imajo na dinamiko transporta sedimentov največji vpliv vrednosti visokih pretokov.



Graf 52: Spreminjanje letnega pretoka sedimentov na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica pri simulaciji daljšega časovnega obdobja.



Graf 53: Odvisnost med letnim pretokom sedimentov na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica in srednjim letnim pretokom v pripadajočem letu.



Graf 54: Odvisnost med letnim pretokom sedimentov na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica in povprečjem zgornje tretjine največjih pretokov v pripadajočem letu.

V preglednici 18 so prikazane količine transporta sedimentov v posameznih letih simulacije daljšega časovnega obdobja. Povprečni letni pretok sedimentov iz modela v obravnavnem obdobju znaša 11881 m³/leto. Ta vrednost je manjša od letnega pretoka plavin, določenega pri simulaciji povprečnega hidrološkega leta. To bi lahko bila posledica tega, da se model dokončno stabilizira šele po daljšem časovnem obdobju, kar dosežemo pri simulaciji daljšega časovnega obdobja. Drugi razlog za manjši pretok sedimentov pri večletni simulaciji bi lahko bile premajhne količine vtoka sedimentov v model, kar pride do izraza šele po daljšem časovnem obdobju, ko v modelu nastopi stabilno stanje. Tretji razlog bi lahko predstavljala specifična oblika hidrologije leta 1955 (uporabljeno za povprečno hidrološko leto), ki povzroči večje količine transporta sedimentov od povprečja.

Preglednica 18: Pretok sedimentov oz. prodonosnost na vtoku v prodni zadrževalnik Hrušica v posameznih letih simulacije daljšega časovnega obdobja.

Leto	Letna prodonosnost [m³/leto]	Leto	Letna prodonosnost [m³/leto]
1977	22681	1996	12621
1978	31077	1997	4961
1979	27161	1998	12327
1980	15960	1999	11127
1981	8814	2000	30336
1982	11033	2001	12654
1983	6482	2002	7706
1984	12636	2003	7772
1985	10614	2004	11676
1986	9158	2005	5923
1987	15520	2006	6140
1988	7877	2007	4675
1989	4971	2008	10683
1990	8065	2009	16856
1991	10675	2010	14581
1992	12004	2011	8516
1993	11040	2012	13028
1994	7615	2013	10316
1995	4332		

5 ZAKLJUČEK

Cilj magistrske naloge je bila analiza dinamike transporta plavin oziroma sedimentov na odseku Save Dolinke med sotočjem s Pišnico pri Kranjski Gori in prodnim zadrževalnikom Hrušica. Za ta namen je bil izdelan hidravlični model celotnega obravnavanega odseka, primeren za izračun transporta sedimentov. Enega glavnih ciljev je predstavljala določitev prodonosnosti Save Dolinke pred prodnim zadrževalnikom Hrušica, dodatno pa so bile določene tudi letne količine premeščanja sedimentov na drugih delih obravnavanega odseka. V nadaljevanju so predstavljene ugotovitve o lastnostih delovanja modela ter dejavnikih, ki imajo največji vpliv na dinamiko transporta sedimentov.

Uporabljen je bil enodimenzionalni model z uporabo metode kvazi-nestalnega toka. Prednost te vrste modela predstavlja njegova računska nezahtevnost, kar omogoča obravnavo celotnega odseka kot homogene povezane enote. Problem določitve dinamike je tako obravnavan celovito, od sproščanja plavin v zaledjih do njihovega premeščanja znotraj struge. Kot prvi korak je bilo določeno potencialno sproščanje sedimentov v zaledjih. Preko modelov pritokov, ki so direktno navezani na glavni model, pa je bil zagotovljen časovno realno razporejen dotok teh količin sedimentov v strugo Save Dolinke. S tem je bil dotok reguliran tako s strani potencialnega sproščanja, kot tudi s transportno zmogljivostjo strug pritokov. Zaradi uporabe enotnega modela je bila omogočena celovita obravnava transporta sedimentov vzdolž celotnega odseka. Pri simulacijah so bila uporabljena dejanska sosledja spreminjanja vrednosti pretokov, kar omogoča dobro posnemanje dejanskih razmer v naravi. Zaradi možnosti simulacij daljših časovnih nizov je bilo možno izvesti dovolj dolgo ogrevanje modela, s čimer so bili v največji meri zmanjšani vsi morebitni vplivi napačno določenih začetnih pogojev.

Negativno plat izbrane metode predstavlja v primerjavi z dvodimenzionalnim modelom relativno slaba natančnost, saj je dinamika sedimentov, kot tudi osnovna hidravlika, obravnavana zgolj v posameznih prečnih profilih. V dvodimenzionalnem modelu je mogoča natančnejša prostorska določitev območij erozije in odlaganja, vendar pa je zaradi večje računske zahtevnosti možen račun zgolj za manjša območja ter krajša časovna obdobja. V primeru Save Dolinke bi bilo potrebno posamezne odseke obravnavati ločeno, kjer bi težavo predstavljalo povezovanje dinamike transporta med posameznimi odseki. Ta način bi bil primeren za določanje transporta v primeru posameznih visokovodnih dogodkov. Za obravnavo dolgoročne dinamike transporta, kjer najbolj pomemben dejavnik predstavlja določitev dotoka sedimentov v model, pa se nam zdi uporabljena metoda z enodimenzijskim modelom bolj primerna. Glede na vse neznanke in predpostavke, ki jih je potrebno privzeti pri modeliranju sedimentov, je namreč natančnost enodimenzijskega modela zadostna, veliko prednost pa predstavlja možnost celovite obravnave procesov transporta sedimentov in računa daljših časovnih obdobj.

Na podlagi primerjave vplivov posameznih dejavnikov na rezultate izračunov smo ugotovili, da ima med lastnostmi vodotoka najpomembnejši vpliv na dinamiko transporta sedimentov njegova hidrologija oz. vodnatost. Vpliv hrapavosti dna struge in zrnivosti dna je manjši in pri obeh približno enakega velikostnega razreda. Ob tem je potrebno omeniti, da smo pri spreminjanju zrnivosti za fin in grob material uporabili skrajne vrednosti (najbolj fin/grob vzorec smo uporabili na celotnem odseku), uporabljene vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti pa so v povsem normalnem intervalu uporabe v praksi. Manjša uporabljena vrednost $n_g = 0,035$ je ena najbolj pogosto uporabljenih vrednosti v hidravličnem modeliranju, tudi večja uporabljena vrednost $n_g = 0,08$ pa je povsem realna ocena za

prodonosne vodotoke. Iz tega lahko sklepamo, da analiza zrnivosti, ki za natančno oceno predstavlja dokaj zamuden proces, nima izrazitega vpliva na rezultate. V primerjavi s tem, kako na rezultate vpliva spreminjanje hrapavosti znotraj povsem realnih ocen, lahko rečemo, da za oceno zrnivosti zadostujejo tudi manj natančne, a časovno bolj učinkovite metode od linijskih in sejalnih analiz. Ena takih metod je optična analiza v programu BASEGRAIN (Detert in Weitbrecht, 2013). Poleg dejavnikov, ki opisujejo lastnosti vodotoka, ima na rezultate velik vpliv (pri rezultatih, pridobljenih v okviru magistrske naloge, približno enakega velikostnega razreda kot hidrologija) tudi izbira transportne funkcije. Pri modeliranju sedimentov je zato bistveno izbrati ustrezno transportno funkcijo, katere območje uporabe ustreza lastnostim obravnavanega vodotoka.

Na koncu je potrebno omeniti, da zaenkrat pri modeliranju sedimentov lahko govorimo zgolj o grobi oceni. V večini primerov (med katere spada tudi modeliranje v tej magistrski nalogi) zaradi pomankanja terenske merjenih podatkov ni možno niti umerjanje klasičnega hidravličnega modela (brez računa sedimentov), ki predstavlja osnovo za račun transporta sedimentov. Največjo neznanko pri modeliranju predstavlja zgornji robni pogoj vtoka sedimentov, ki je na področju Slovenije merjen v zelo redkih primerih, na nekaj točkah v primeru lebdečih plavin, medtem ko se meritve rinjenih plavin ne izvajajo. Razpoložljivi podatki o transportu rinjenih plavin so zato posredni kot npr. zaprojevanje akumulacij. Zato je potrebna kvalitetna ocena te vrednosti, ki ima bistven vpliv na rezultate izračunov. Kot je bilo že omenjeno, je pri takih predpostavkah manj smiselna uporaba podrobnega dvodimenzionalnega modela. V zaključku tako lahko trdimo, da pri trenutno dostopnih podatkih za račun dolgoročne dinamike transporta sedimentov povsem zadošča enodimenzionalni model. Možnost uporabe dvodimenzionalnih modelov pa vidimo predvsem pri analizi krajših visokovodnih dogodkov, kjer je večjega pomena predvsem gibanje in dinamika sedimentov na lokalnem nivoju.

6 VIRI

Ackers, P., W. R. White. 1973. Sediment transport: New approach and analysis, ASCE Journal of the Hydraulics Division, Vol. 99, HY11.

Allen, J.R.L. 1992. Principles of Physical Sedimentology. London, Chapman&Hall: 272 str.

ARSO. 2023a. Arhiv hidroloških podatkov – dnevne vrednosti. https://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (Pridobljeno 10. 4. 2023.)

ARSO. 2023b. Arhiv – opazovani in merjeni meteorološki podatki po Sloveniji. <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive> (Pridobljeno 14. 4. 2023.)

Bosboom J., Stive M.J.F. 2023a. 6.3.1: Forces on a single grain. V: Bosboom J., Stive M.J.F. Coastal Dynamics Open Textbook. Open Education Resource (OER) LibreTexts. Project: str. 272-273. [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Coastal_Dynamics_\(Bosboom_and_Stive\)/06%3A_A_Sediment_transport/6.03%3A_Initiation_of_motion/6.3.01%3A_Forces_on_a_single_grain](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Coastal_Dynamics_(Bosboom_and_Stive)/06%3A_A_Sediment_transport/6.03%3A_Initiation_of_motion/6.3.01%3A_Forces_on_a_single_grain) (Pridobljeno 6.6.2023.)

Bosboom J., Stive M.J.F. 2023b. 6.3.2: Shields curve. V: Bosboom J., Stive M.J.F. Coastal Dynamics Open Textbook. Open Education Resource (OER) LibreTexts. Project: str. 274- 275. [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Coastal_Dynamics_\(Bosboom_and_Stive\)/06%3A_A_Sediment_transport/6.03%3A_Initiation_of_motion/6.3.2%3A_Shields_curve](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Oceanography/Coastal_Dynamics_(Bosboom_and_Stive)/06%3A_A_Sediment_transport/6.03%3A_Initiation_of_motion/6.3.2%3A_Shields_curve) (Pridobljeno 6.6.2023.)

Detert, M. in Weitbrecht, V. 2013. User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. https://people.ee.ethz.ch/~basement/baseweb/download/tools/basegrain/ISRS2013_MDEWV_225.pdf (Pridobljeno 27.4.2023.)

EHO Projekt. 2021. Analiza odseka Save dolinke. Primerjava stanja struge in prodišč. Zračni RTK posnetek. Ljubljana.

EHO Projekt. 2022. Snemanje batimetrije Pišnice in Save Dolinke na mestu pobud in modeliranja transporta plavin z RTK dronom. Ljubljana.

Gavrilović, S., 1970. Savremeni načini proračunavanja bujičnih nanosa i izrada karata erozije, in: Seminar Erozijska, Bujični Tokovi i Rečni Nanos. Belgrade, pp. 85–100.

Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS). 2023. E-geodetski podatki, Zbirka podatkov daljinskega zaznavanja. Ortofoto. <https://egp.gu.gov.si/egp/> (Pridobljeno 20. 7. 2023.)

Geodetski inštitut Slovenije. 2015. Izvedba laserskega skeniranja Slovenije, Blok 31, 36 in 37 – tehnično poročilo o izdelavi izdelkov. Ljubljana.

Geological Digressions, Earth science resources, images, glossaries, and SCICOMM for students and non-specialists. (b.d.). Sediment transport: Bedload and suspension load. <https://www.geological-digressions.com/sediment-transport-bedload-and-suspension-load/> (Pridobljeno 6.6.2023.)

GRASS Development Team, 2022. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 8.2. Open Source Geospatial Foundation. Electronic document. <https://grass.osgeo.org> (Pridobljeno 28.4.2023.)

HEC-RAS 6.3.1. 2023. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (Pridobljeno 2. 7. 2023.)

Hjulström, F., 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Bulletin of the Geological Institute of Uppsala 25, 221–527.

Mauro Hrvatin, Rok Ciglič, Dénes Lóczy, Matija Zorn. 2019. Določanje erozije v gričevjih severovzhodne slovenije z gavrilovićevo enačbo. Geografski vestnik 91-2: 105–124.

Meyer-Peter, E., Muller, R. 1948. Formulas for Bed Load Transport. Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, Delft, 7 June 1948, 39-64.

Mikoš, M. 1999. Navodila za uporabo programa ZPP. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 18 str.

Mikoš, M. 2000. Prodna bilanca reke Save od Jesenic do Mokric. Gradbeni vestnik 49, 9: 208–219.

Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov. Študijska skripta. Ljubljana.

Mikoš, M. 2012. Kalnost v rekah kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga. Gradbeni vestnik 61, 6: 129–142.

MKGP. 2022. Pedološka karta Slovenije. <https://rkg.gov.si/vstop/> (Pridobljeno 12. 4. 2022.)

NIVO EKO, HNG, EHO Projekt in sod.. 2023. Strategija odvzema naplavin na porečju reke save – poročilo, 7. Mejnik, Izdelek 11: Rezultati modela in interpretacija rezultatov. Celje, RS Ministrstvo za okolje in prostor: 65 str.

Ouyang, D. in Bartholic, J. 1997. Predicting Sediment Delivery Ratio in Saginaw Bay Watershed. Proceedings of the 22nd National Association of Environmental Professionals Conference, Orlando, 19-23 May 1997: str. 659-671.

Parker, G. 2006. 1D Sediment Transport Morphodynamics with applications to River and Turbidity Currents, e-book. http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm (Pridobljeno 28.5.2023.)

Petkovšek, G. 2000. Procesno utemeljeno modeliranje erozije tal. Acta hydrotehnica 18, 28: 41–60.

Petkovšek, G. 2002. Modeliranje in kvantifikacija erozije tal z aplikacijo na povodju Dragonje. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Petkovšek): 205 str.

Placer, L. 1996. O premiku ob Savskem prelomu. Geologija. 39: 283-387.

Poglajen, A. 2022. Določanje zrnastostne sestave rečnih plavin na naravnih prodiščih. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Poglajen): 49 str.

QGIS.org. 2023. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org> (Pridobljeno 2. 7. 2023.)

Rudolf, D. 2008. Poslovnik o obratovanju in vzdrževanju prodnega zadrževalnika Hrušica na Savi Dolinki. Kranj, VGP d.d. Kranj: 40 str.

Rusjan, S., Mikoš, M. 2006. Dinamika premeščanja lebdečih plavin v porečjih. Acta hydrotehnica 24, 40: 1–20.

Sherman D.J., Davis L., and Namikas S.L. 2013. Sediments and Sediment Transport. In: John F. Shroder (ed.) Treatise on Geomorphology, Volume 1, pp. 233-256. San Diego: Academic Press.

Wischmeier, W. H., Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook number 537, U.S. Washington (DC), Government Printing Office: 58 str.

Wong, M. 2003. Does the bedload equation of Meyer-Peter and Müller fit its own data?, Proceedings, 30th Congress, International Association of Hydraulic Research, Thessaloniki, J.F.K. Competition Volume: 73-80.

Wong, M. in Parker, G. 2006. Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database. Journal of Hydraulic Engineering, 132(11), 1159–1168.

PRILOGE

PRILOGA A: Prikaz lokacij odvzema vzorcev za linijsko analizo zrnastostne sestave podlage

PRILOGA B: Tabelarni prikaz rezultatov linijske analize zrnastosti na mestih odvzetih vzorcev

PRILOGA C: Tlorisni prikaz geometrije modeliranega odseka Save Dolinke

PRILOGA D: Karta območij razredov erozije in odlaganja

»Ta stran je namenoma prazna.«