

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidat:

Marko Trampuž

Ureditev Savinje v območju Luč

Diplomska naloga št.: 2922

Mentor:
prof. dr. Matjaž Mikoš

Somentor:
viš. pred. mag. Rok Fazarinc

Ljubljana, 27. 10. 2006

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MARKO TRAMPUŽ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»UREDITEV SAVINJE V OBMOČJU LUČ«.

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

Ljubljana, oktober 2006

(podpis)

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali profesorji:

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 004.42:556.53:627.1+627.4/.5(043.)
Avtor: Marko Trampuž
Mentor:izr. prof. dr. Matjaž Mikoš
Somentor: mag. Rok Fazarinc
Naslov: Ureditev Savinje v območju Luč
Obseg in oprema: 58 str., 6 pregl., 39 sl., 6 en.
Ključne besede: Savinja, Luče, sotočje, urejanje vodotokov, računalniško podprto projektiranje, poplave, hidravlični računski model, HEC-RAS, nestalni tok

Izvleček

V uvodu diplomske naloge sem opisal porečje Savinje od njenega izvira nad slapom Rinka do izliva v reko Savo pri Zidanem mostu. Navedel sem padavinske situacije, značilne pretoke reke Savinje ter topografske in hidrografske značilnosti njenega porečja. S pomočjo literature ter terenskega ogleda sem opisal osnovne hidrološke, topografske in hidrografske lastnosti obravnavanega odseka reke Savinje v območju Luč. Temu sledi opis naselja Luče ter njegove poplavne varnosti. V naslednjem poglavju sem predstavil programsko ter mersko opremo. Za hidravlični računski model sem uporabil program HEC-RAS 3.1.3, za načrtovane hidrotehnične ureditve pa programski paket Aquaterra. V sklopu diplomske naloge sem opravil tudi meritev hitrosti Savinje s hidrološkim krilom Valeport. Posebno pozornost sem namenil tudi razmeram na sotočju Savinje in Lučnice. Za računski model hidravlike stalnega toka sem podal pretoke za različne povratne dobe, ki sem jih pridobil v Hidrološki študiji Savinje. Pri nestalnem toku pa sem kot vhodni podatek podal interpolirani hidrogram pretokov za visokovodno situacijo novembra 2000. Vrh vala visoke vode je bil podoben 50-letni povratni dobi. Primerjavo med stalnim ter nestalnim tokom sem opravil za Q_{50} pri stalnem toku ter novembrski visokovodni val iz leta 2000 za nestalni tok. V nadaljevanju sem se osredotočil na hidrotehnične ukrepe za zagotovitev poplavne varnosti Luč. Glavne ureditve so: zamenjava obstoječega mostu, znižanje pragu, ureditev sotočja ter sanacija obstoječega nasipa. S hidrotehničnimi ureditvami sem znižal gladine za 0,50 m. Za konec pa sem prikazal vpliv spremembe zrnavosti dotekajočih plavin na premestitveno zmogljivost ter primerjal hitrosti toka izmerjenih s hidrološkim krilom, ter izračunanih s HEC-RAS-om.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDK: 004.42:556.53:627.1+627.4/.5(043.)
Author: Marko Trampuž
Supervisor: assoc. prof. dr. Matjaž Mikoš
Co-supervisor: M. Sc. Rok Fazarinc
Title: River engineering scheme of the Savinja river in Luče
Notes: 58 p., 6 tab., 39 fig., 6 ann.
Key words: Savinja, Luče, junction, river engineering, computer-aided design, floods, hydraulic computation model, HEC-RAS, unsteady flow

Abstract

The introduction of the graduation thesis presents a short description of the Savinja river watershed from the spring above the Rinka waterfall to the flow into the Sava river near Zidani most. Furthermore, it provides information on the rainfall pattern, the flow, and the topographical and hydrographical characteristics of the Savinja river watershed. The basic hydrological, topographical and hydrographical characteristics of the treated section of the Savinja river in the area of Luče are illustrated according to the field inspection and literature. Moreover, the thesis will discuss Luče in regard to flood safety. The next chapter of the graduation thesis presents the software and the measurement equipment. In the domain of software two programmes were used, namely the HEC-RAS 3.1.3. for the hydraulic computation model and the Aquaterra for the planning of regulation of the treated section. The practical part of the graduation thesis provides information on the velocity measurement of the Savinja river flow, which was performed with the Valeport open channel flow-meter. Moreover, special attention was devoted to the junction of the Savinja and the Lučnica rivers. The simulations of a steady flow were made for the flows with variety recurrence interval, which were acquired in the Hydrological Thesis on the Savinja river. While the model of an unsteady flow was made using the interpolated hydrograph of the flood in November 2000. The flow peak of flood was similar to that of the flow with recurrence interval of 50 years. In addition to this the steady flow (Q_{50}) and the unsteady flow (of november 2000) computations were also compared. A part of the graduation thesis focuses on the engineering of the Savinja river in order to protect the vulnerable sections of Luče from the danger of flood. The main regulations of river engineering are as follows; replacement of the existing bridge, lowering of the barrage, regulation of the junction and improvement of current levees. With such hydrotechnical river regulations the water level has lowered by 0,50 m. In conclusion, the final part of the thesis provides a description of how the changes in grain substance of inflowing sediment have influenced the moveable capacity and compares the velocity of the computed and measured flows.

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil vsem, ki so mi pomagali pri nastajanju diplomske naloge, še posebej mentorju izr. prof. dr. Matjažu Mikošu, somentorju mag. Roku Fazarincu ter zaposlenim na Inženiringu za vode.

Še posebej bi se rad zahvalil svoji družini ter dekletu Janji, ki so mi skozi vsa leta študija stali ob strani, me spodbujali in verjeli vame.

KAZALO VSEBINE

1	OPIS POREČJA SAVINJE.....	1
1.1	Osnovne značilnosti porečja Savinje	1
1.2	Topografske in hidrografske značilnosti	3
1.3	Padavinske situacije	3
2	OBRAVNAVAN ODSEK SAVINJE V OBMOČJU LUČ	5
2.1	Osnovne značilnosti odseka	5
2.1.1	Splošno o Lučah	5
2.1.2	Opis obravnavanega odseka	6
2.1.3	Osnovne lastnosti struge.....	6
2.1.4	Poplavna ogroženost območja	7
2.1.5	Hidrografska mreža	7
2.2	Raba tal.....	7
2.2.1	Območja stanovanjske rabe	7
2.2.2	Prometna infrastruktura	8
2.3	Topografske in hidromorfološke značilnosti – obstoječe stanje.....	9
2.3.1	Savinja od jezua do sotočja z Lučnico	9
2.3.2	Sotočje Savinje in Lučnice	13
2.3.3	Savinja pod sotočjem z Lučnico	14
3	RAČUNALNIŠKI PROGRAMI TER MERSKA OPREMA UPORABLJENA PRI PROJEKTIRANJU	15
3.1	O programih.....	15
3.2	AutoCad 2006.....	15
3.3	Aquaterra	16
3.3.1	Splošno o programu.....	16
3.3.2	Modul Situacija	17
3.3.3	Modul Osi.....	17
3.3.4	Modul Vzdolžni profili.....	18
3.3.5	Modul Prečni profili	19
3.3.6	Modul Vmesnik za HEC-RAS	20
3.4	HEC-RAS 3.1.3	21

3.5	Merska oprema - Hidrometrično krilo VALEPORT MODEL 002	22
4	HIDRAVLIČNI RAČUNSKI MODEL OBRAVNAVANEGA ODSEKA ZA STALNI TOK.....	24
4.1	Geometrija računskega modela - Aquaterra.....	24
4.2	Geometrija računskega modela – HEC-RAS	26
4.3	Karakteristični pretoki in robni pogoji.....	27
4.4	Umerjanje hidravličnega računskega modela.....	28
4.5	Rezultati hidravličnega računskega modela.....	28
5	HIDRAVLIČNI RAČUNSKI MODEL OBRAVNAVANEGA ODSEKA ZA NESTALNI TOK	33
5.1	Geometrija računskega modela	33
5.2	Hidrološki podatki	33
5.3	Robni in začetni pogoji	34
5.4	Rezultati	35
6	HIDROTEHNIČNE UREDITVE SAVINJE ZA ZAGOTOVITEV POPLAVNE VARNOSTI LUČ	36
6.1	Variante ureditve	36
6.1.1	Razbremenilni predor.....	36
6.1.2	Ureditev Savinje z izboljšanjem hidravličnih razmer	38
6.2	Ukrepi za izboljšanje poplavne varnosti na obravnavanem odseku	39
6.2.1	Zamenjava mostu	39
6.2.2	Znižanje jezu	40
6.2.3	Sanacija nasipa na desnem bregu Savinje gorvodno od mosta	42
6.2.4	Ureditev sotočja Savinje in Lučnice ter ureditev Savinje dolvodno od sotočja.....	45
6.3	Vpliv predlagane ureditve	47
6.4	Premestitvena zmogljivost Savinje	48
6.5	Kontrola izračunanih hitrosti	52
7	ZAKLJUČEK.....	53
	VIRI IN LITERATURA.....	56
	VIRI V ELEKTRONSKI OBLIKI.....	58

KAZALO SLIK

Slika 1: Topografija povodja Savinje (Kobold in Sušelj, 2004)	1
Slika 2: Specifični odtok v l/s km ² obdobja 1961 – 1990 (Vodno bogastvo Slovenije, 2003) ..	2
Slika 3: Karta vodomernih postaj ARSO na površinskih vodah (Kataster vodomernih postaj Agencija RS za okolje, 2003)	3
Slika 4: Padavinsko območje Zg. Savinje po šifrantu padavinskih območij RS (Šraj, 2000) ...	4
Slika 5: Ortofoto posnetek obravnavanega odseka (Geodetska uprava RS, 2005)	5
Slika 6: Obravnavani odsek s poimenovanimi prečnimi profili (Geo. uprava RS, 2005).....	6
Slika 7: Zemljiški kataster obravnavanega odseka (el. vir, kremen.arso.gov.si/nvatlas)	8
Slika 8: Lesen kaštni jez (foto:avtor, maj 2006).....	9
Slika 9: Poškodovana jezbrica, Slika 10:Ohranjena jezbrica (foto:avtor, maj 2006)	10
Slika 11: Zid ob DB izlivnega dela mlinščice Struge (foto:IZVODE, april 2004)	10
Slika 12: Visokovodni nasip gorvodno od mosta (foto:avtor, maj 2006)	11
Slika 13: Lesen most in jez (foto:avtor, marec 2006)	12
Slika 14: Dolvodno od mostu sta levi in desni breg varovana z zidom iz lomljenca v betonu (foto:avtor, maj 2006).....	12
Slika 15: Desno Savinja, levo Lučnica (foto:avtor, maj 2006)	13
Slika 16: Kamnometna ločilna zgradba (foto:avtor, marec 2006).....	13
Slika 17: Desna krivina pri dotoku Mlakarskega grabna (foto:avtor, junij 2006).....	14
Slika 18: Prikaz programa Aquaterra v okviru AutoCad 2006	16
Slika 19: Modul Vzdržni profil.....	19
Slika 20: Komplet VALEPORT 002 (foto:www.valeport.co.uk)	22
Slika 21: Meritev na terenu (foto:avtor, junij 2006).....	23
Slika 22: Situacija obravnavanega odseka Savinje in Lučnice.....	26
Slika 23: Obseg poplav za 100-letno visoko vodo	29
Slika 24: Prikaz gladin za obstoječe stanje.....	32
Slika 25: Spremenjena geometrija za račun nestalnega toka.....	33
Slika 26: Hidrogram pretokov za Savinjo in Lučnico novembra 2000	34
Slika 27: Primerjava gladin za stalni in nestalni tok pri Q_{50}	35
Slika 28: Mesto načrtovanega vtoka v razbremenilni predor (foto:IZVODE, junij 2005).....	36
Slika 29: Primerjava gladin z upoštevanjem plavja pri Q_{50}	39

Slika 30: Primerjava gladin v območju mostu pri pretoku Q_{100}	40
Slika 31: Primerjava gladin pri odstranitvi praga za Q_{100}	41
Slika 32: Prikaz geometrije v HEC-RAS-u za urejeno sotočje Savinje in Lučnice.....	46
Slika 33: Primerjava gladin Q_{100} pri obstoječem in projektiranem stanju	47
Slika 34: Primerjava hitrost za obstoječe in regulirano stanje za Q_{100}	48
Slika 35: Premestitvena zmogljivost Savinje m^3/h za Q_{50} pri padcu $I = 0,004$	49
Slika 36: Premestitvena zmogljivost Savinje m^3/h za Q_{50} pri padcu $I = 0,005$	50
Slika 37: Premestitvena zmogljivost Savinje m^3/h za Q_{50} pri padcu $I = 0,006$	50
Slika 38: Premestitvena zmogljivost Savinje za poplavni val novembra 2000	51
Slika 39: Primerjava hitrosti izračunanih s HEC-RAS-om in izmerjenih v P24	52

KAZALO PREGLEDNIC

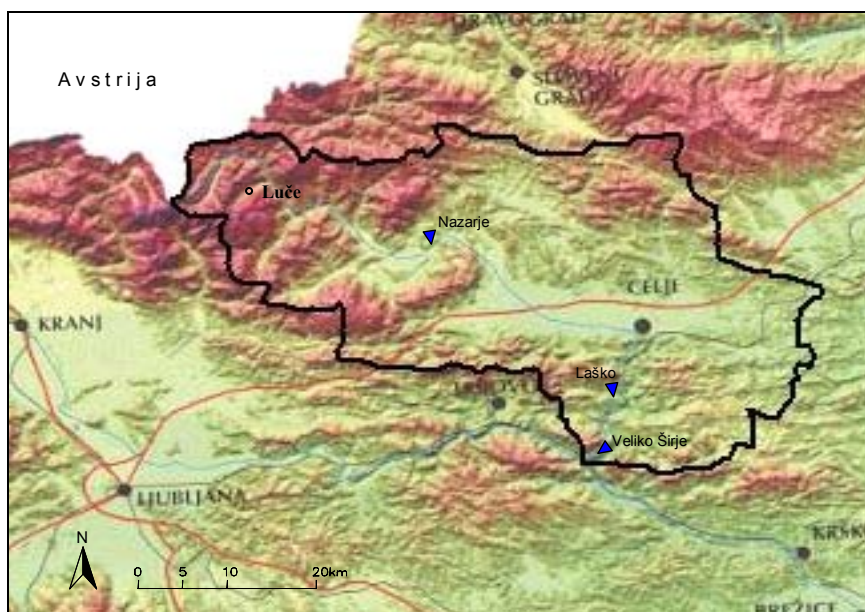
Preglednica 1: Prispevne površine povodja obravnavanega odseka (Šraj, 2000).....	4
Preglednica 2: Karakteristični pretoki Savinje za obravnavani odsek (Hidr. študija Savinje) 27	
Preglednica 3: Rezultati izračuna za stalni tok za Q_{100}	30
Preglednica 4: Minimalna zvišanja nad gladino vode v svetu (Brilly in sod., 1999)	38
Preglednica 5: Turbulentna napetost po Escarameia in May (1992)	43
Preglednica 6: Vrednost C -ja po Escarameia in May (1992).....	43

1 OPIS POREČJA SAVINJE

1.1 Osnovne značilnosti porečja Savinje

Savinja je najmočnejši pritok reke Save v Sloveniji in poplavno tudi najbolj ogroženo območje v Sloveniji. Njeno porečje se razprostira od Savinjskih Alp in Karavank preko Celjske kotline do izliva v Savo. Njen tok je dolg 102 km in obsega 1848 km² prispevne površine (Kolbezen in Pristov, 1998). Na porečje Savinje odpade 17 % ozemlja porečja Save. Povprečna gostota rečne mreže Savinje je 1,58 km/km². Med posameznimi pritoki Savinje se gostota mreže močno spreminja, od 1,00 km/km² pri Lučnici do 2,50 km/km² pri Velunji, pritoku Pake, ki ima gostoto 1,89 km/km². Pritok Savinje Bolska ima gostoto 1,43 km/km², Voglajna pa 1,66 km/km² (elektronski vir, www.arso.gov.si).

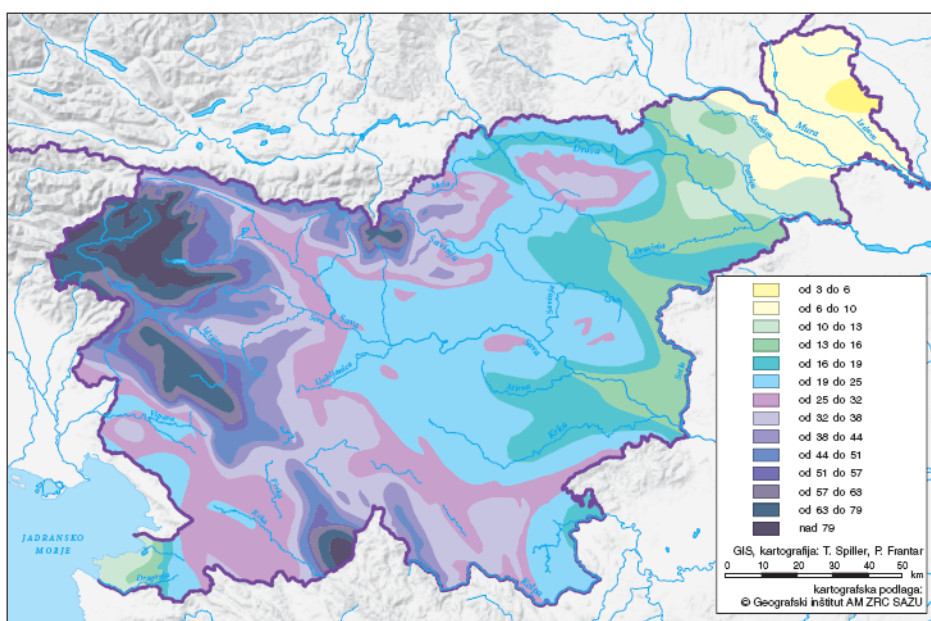
Prvi izvir Savinje je nad slapom Rinka, na nadmorski višini 1,380 m. Ostalo povirno vodo dobi iz območja Okrešlja. Vodotok Kotovec teče v zgornjem toku, večji del leta pod prodom, vzdolž uravnane struge do spodnjega konca Logarske doline. Drugi izvir Savinje ali tudi izvir Črne je na nadmorski višini 767 m.



Slika 1: Topografija povodja Savinje (Kobold in Sušelj, 2004)

Črna teče po spodnjem delu Logarske doline še 1,600 m in s pritokom Jezera tvori reko Savinjo.

Po naravi je Savinja hudourniška reka. Hudourniški značaj pa ima tudi pretežna večina njenih pritokov. Razlika med sušnim pretokom in visokimi vodami Savinje je lahko tudi več kot 300 kratna. Srednji letni pretok (sQ_s) Savinje v Laškem je $41,5 \text{ m}^3/\text{s}$, prispevna površina pa 1664 km^2 .



Slika 2: Specifični odtok v l/s km^2 obdobja 1961 – 1990 (Vodno bogastvo Slovenije, 2003)

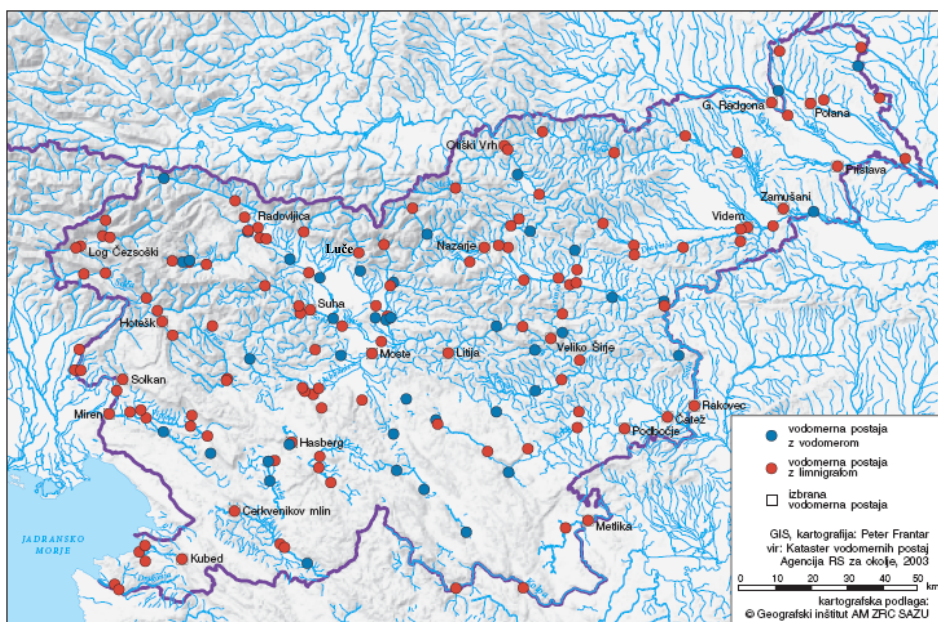
Specifični odtok na podlagi obdobjnega srednjega pretoka (sqs) je 25 l/s km^2 . Za vodomerno postajo Nazarje imamo podatke o največjih obdobjnih pretokih za različne povratne dobe. Tako znaša največji obdobjni pretok $Q_{5vk}=311,3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{20vk}=452,2 \text{ m}^3/\text{s}$ in za $Q_{100vk}=611,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Srednji letni pretok sQ_s je $17,87 \text{ m}^3/\text{s}$. Značilni pretoki za vodomerno postajo Veliko Širje, ki je zadnja postaja pred izlivom Savinje so $Q_{5vk}=859,3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{20vk}=1215 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{100vk}=1597 \text{ m}^3/\text{s}$ ter $sQ_s=44,71 \text{ m}^3/\text{s}$. (Vodno bogastvo Slovenije, 2003)

Njeno povodje sestavljajo tri geografska območja: Zgornja Savinjska dolina, srednja Savinjska dolina in dolina spodnje Savinje. V zgornjem toku reke Savinje je povodje gorato z nadmorskimi višinami preko 2000 metrov. Povodje sega od izvira Savinje do Soteske pod Mozirjem. Srednji, pretežno ravninski del leži med 200 in 400 metri nadmorske višine in

sega od Soteske do Celja. Dolina spodnje Savinje pa od Celja do izliva v Savo pri Zidanem mostu.

1.2 Topografske in hidrografske značilnosti

Tla so povečini plitva na apnenčasti podlagi ali zelo prepustne aluvialne prodne formacije. Skoraj 60 % povodja pokriva gozd. Aluvialne ravnine in rečne doline so gosteje naseljene in v glavnem namenjene kmetijstvu. Ta področja so tudi najbolj izpostavljena poplavam. Povirje Savinje in njeni pritoki dobivajo vodo iz Kamniško-Savinjskih Alp, Karavank ter deloma iz Posavskih gub.



Slika 3: Karta vodomernih postaj ARSO na površinskih vodah (Kataster vodomernih postaj Agencija RS za okolje, 2003)

1.3 Padavinske situacije

Topografija povodja Savinje ima močan vpliv na meteorološko dogajanje v porečju. V zgornjem goratem delu povodja znašajo povprečne letne padavine okrog 2000 mm, v srednjem in spodnjem delu pa okrog 1300 mm. Veliko snežnih padavin je v višje ležečih območjih, toda poplave v glavnem povzročijo močne jesenske padavine. Za povodje Savinje sta značilna dva tipa kritičnih vremenskih situacij: jesensko-zimski tip in poletni tip

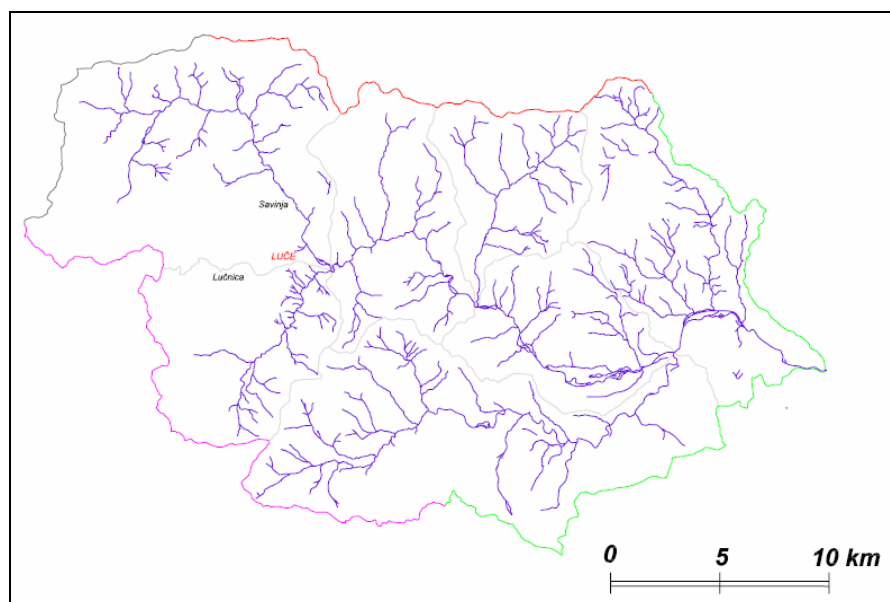
(Marinček, 1992). Za jesensko-zimske situacije so značilne orografske padavine, ki nastanejo ob gorskih pregradah. Relativno široko padavinsko območje in obilne padavine, ki trajajo tudi več dni, povzročijo nastop visokih voda, ki lahko ob intenzivnejših padavinah proti koncu dogodka vodi v poplave.

Preglednica 1: Prispevne površine povodja obravnavanega odseka (Šraj, 2000)

Šifra	Raven 3	Raven 4	Padavinsko območje	Površina (km ²)
161	Zgornja Savinja		Porečje Zgornje Savinje	536,17
1611		Solčavska Savinja	Povirje Savinje od izvira do sotočja z Lučnico	120,58
1612		Lučnica	Vodozbirna površina Lučnice	57,46

Za poletne padavinske situacije pa so značilne konvektivne padavine, kjer je intenziteta padavin neenakomerno porazdeljena. Te padavine zajamejo manjša območja, na katerih je intenzivnost padavin običajno velika, trajanje pa kratko, zato so poplave lokalnega značaja. Za nastop stoletnih visokih voda je na večjem delu povodja Savinje merodajna jesensko-zimska padavinska situacija (Kobold in Sušelj, 2004).

Povprečne izmerjene letne padavine za padavinsko postajo Luče v obdobju 1961-1990 so 1711 mm, korigirane pa 1763 mm (elektronski vir, www.arso.gov.si).



Slika 4: Padavinsko območje Zg. Savinje po šifrantu padavinskih območij RS (Šraj, 2000)

2 OBRAVNAVAN ODSEK SAVINJE V OBMOČJU LUČ

2.1 Osnovne značilnosti odseka

2.1.1 Splošno o Lučah

Luče so gručasto predalpsko naselje pod pobočjem Raduhe v Zgornji Savinjski dolini ob sotočju Savinje in potoka Lučnice. So tipična predalpska vasica, na nadmorski višini 522 metrov, stisnjena med sotočje Lučnice in Savinje, pod Raduho, porasel Rogatec in zakraselo Dleskovškovo planoto. Občina Luče obsega 109 km² predalpskega in alpskega sveta, kar 89% površine pa pokrivajo gozdovi.

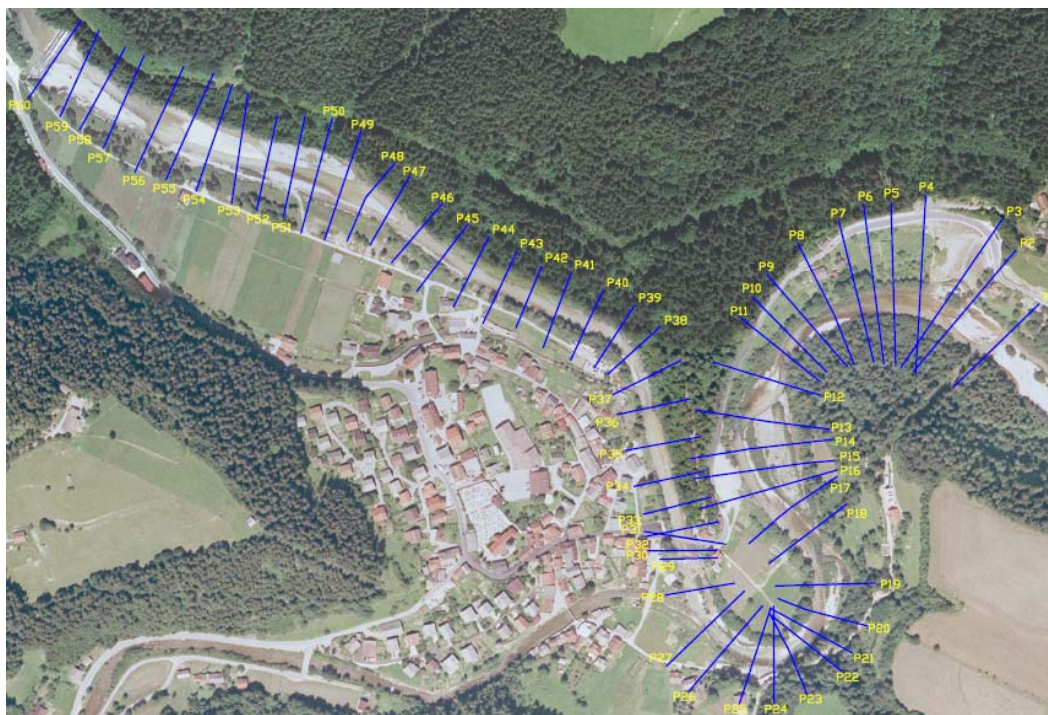
Na območju občine živi 1612 prebivalcev. Okoliške zaselke Konjski vrh, Krnico, Podvežo, Podvolovljek, Raduho in Strmec večji del sestavljajo samotne kmetije na strmih pobočjih. Kmetijstvo je pomemben dejavnik in soustvarjalec okolja. Večina kmetij v Lučah kmetuje sonaravno. Ljudje na tem območju že stoletja živijo in delajo z naravo.



Slika 5: Ortofotoposnetek obravnavanega odseka (Geodetska uprava RS, 2005)

2.1.2 Opis obravnavanega odseka

Obravnavan odsek se začne z lesenim kaštnim jezom nad Lučami in konča približno 1700 m dolvodno. Povprečni padec odseka je 0,5 %. Povprečna nadmorska višina brega je 515 m. Na odseku so visokovodni nasipi, jezbece, pragovi, lesen kaštni jez in lesen most v Lučah.



Slika 6: Obravnavani odsek s poimenovanimi prečnimi profili (Geo. uprava RS, 2005)

2.1.3 Osnovne lastnosti struge

Struga Savinje pod jezom je sprva široka (70 m), vendar se s tokom oža na normalno širino (30 - 40 m). Na celotnem odseku od jezua do sedanjega lesenega mostu z jeklenimi nosilci na regionalni cesti je na desni strani obdana z visokovodnim nasipom. Pod mostom je na obeh bregovih obrežni zid. Dolvodno od mostu je 1 m visok jez (prečkanje kanalizacije). Sotočje je dokaj neugodno, predvsem z vidika smeri toka Savinje, ki priteka pod velikim kotom na smer Lučnice. Obe reki se zaježujeta, hipna razširitev pa še dodatno zmanjšuje hitrosti vode na območju sotočja. Struga dolvodno od sotočja je neurejena. Tok Savinje se stabilizira pri prehodu v sotesko nad izlivom Rogačnika.

2.1.4 Poplavna ogroženost območja

Visoke vode Lučnice leta 1990 so zaradi porušitve pregrade iz splazele zemljine v Podvolovljeku presegle Q_{100} (stoletno povratno dobo) in poplavile precejšen del naselja. Na mostnem odseku je novembra leta 2000 Savinja preplavila nižinski del Luč. Mostni profil je bil praktično poln. Večina poplavne vode je pritekla za nasip skozi izliv Struge, ki je bil neustrezno urejen. Po ocenah Inženiringa za vode (IZVODE) je bil novembra leta 2000 pretok Savinje okrog $200 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je nekaj manj kot Q_{50} .

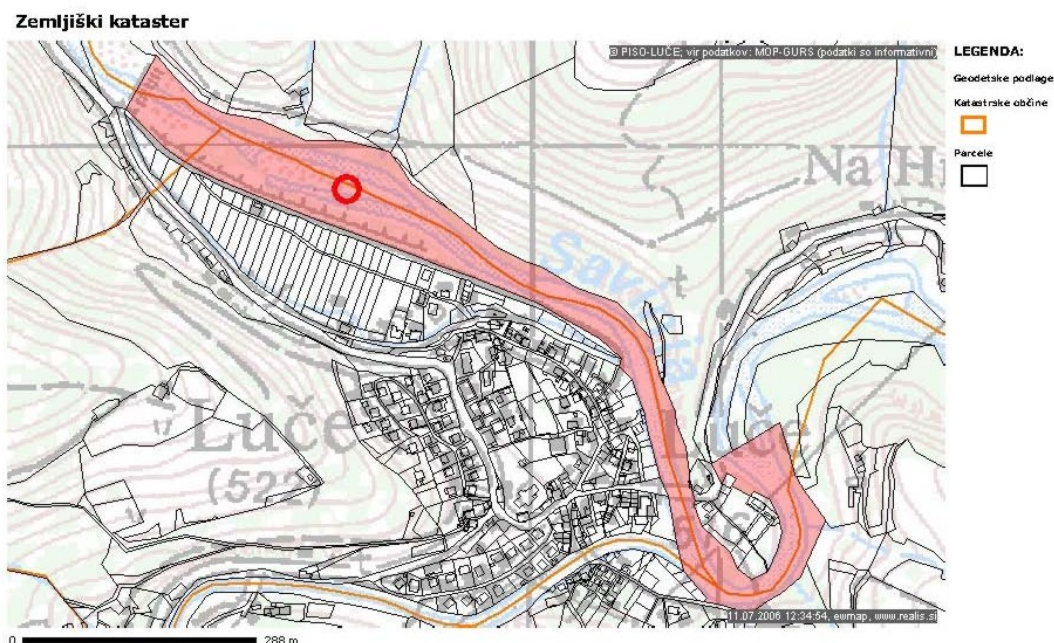
2.1.5 Hidrografska mreža

Lučnica je največji pritok na obravnavanem odseku. Struga Lučnice je bila regulirana po katastrofalnih poplavah novembra 1990. V okviru sanacije po poplavah so bili obnovljeni ali povišani obrežni zidovi, izvedene nove premostitve in izvedena regulacija. Glede na dimenzije in pristop k urejanju struga Lučnice verjetno prevaja visoke vode Q_{100} , vendar zaradi pomanjkanja podatkov ni možno določiti realne prevodnosti oziroma poteka gladin visokih vod in s tem varnosti Luč pred poplavami Lučnice (IZVODE, 2005). Ostali pritoki so še mlinščica Struga in Mlakarski graben. Struga je v bistvu kanal Savinje in se uporablja za pogon žag. Izlivni odsek Struge je bil prav tako saniran leta 2001 (po projektu IV-48/01, PUH d.d., 2001). Mlakarski graben se priključi Savinji v profilu P24.

2.2 Raba tal

2.2.1 Območja stanovanjske rabe

Stanovanjski objekti so zgrajeni na desnem bregu Savinje. Na levem bregu ni možna poselitev, ker se breg strmo dviguje v pobočje Breznice. Na desnem bregu pa je naselje omejeno s Lučnico.



Slika 7: Zemljiški kataster obravnavanega odseka (el. vir, kremen.arso.gov.si/nvatlas)

Poselitev je predvsem od profila P48 do profila P28. Na okljuku Savinje je čistilna naprava. V naselju je tudi osnovna šola, gasilski dom in pošta.

Večjih poslovnih objektov ni. V naselju se ukvarjajo predvsem z gozdarstvom (žage) in majhnimi zasebnimi podjetji.

2.2.2 Prometna infrastruktura

Na desnem bregu Savinje poteka regionalna cesta (RII-428/1249) iz Ljubnega skozi Luče proti Solčavi. Cestišče pred Lučami je močno poškodovano. Cesta je zožena in prevozna le za eno vozilo. Ob cesti Ljubno-Luča blizu naselja Luče izvajajo zaščito brežin.

Nad lesenim mostom je odcep za lokalno cesto Luče-Podvolovjek. Cesta prečka Lučnico z betonskim mostom iz leta 2001 in poteka ob njenem levem bregu do Podvolovjeka. Drugih cest razen dovoznih poti na odseku ni. Izdana je bila pobuda za gradnjo obvoznice za naselje Luče.

2.3 Topografske in hidromorfološke značilnosti – obstoječe stanje

Opis obstoječega stanja je narejen na podlagi geodetskega posnetka, pobudi o gradnji obvoznice (IZVODE, 2005) in terenskih ogledov ter meritev. Terenske ogledne in meritve sem opravil marca, maja in junija leta 2006. Ogledne sem opravil v različnih letnih časih in na podlagi tega lažje ocenil značilnosti Savinje.

Odsek sem razdelil na tri pododseke: Savinja od jezusa do sotočja z Lučnico, sotočje Savinje in Lučnice in Savinja pod sotočjem z Lučnico.

2.3.1 Savinja od jezusa do sotočja z Lučnico

Obravnavani pododsek se začne s lesenim kaštnim jezom nad Lučami, ki je bil pred manj kot 10 leti obnovljen.



Slika 8: Lesen kaštni jez (foto:avtor, maj 2006)

Struga pod jezom je zelo široka (70 m). Tik pod jezom na območju podslapja tok usmerja nekaj odbijačev – jezbic, ki so različne izvedbe in kvalitete ter so potrebni obnove.



Slika 9: Poškodovana jezbrica



Slika 10: Ohranjena jezbrica

(foto:avtor, maj 2006)

Levi breg je močno zaraščen z grmičevjem in drevesi. Prisotna je lokalna bočna erozija predvsem med profili P36 in P39. Približno do izliva mlinščice Struge Savinja prevaja visoke vode Q_{100} . Izlivni odsek Struge je bil do leta 2001 neustrezen. Savinja na iztoku zajezuje strugo oziroma je na prehodu mlinščice skozi nasip poplavljala nižinski predel Luč.



Slika 11: Zid ob DB izlivnega dela mlinščice Struge (foto:IZVODE, april 2004)

Po poplavi leta 2000 je bil narejen zid iz lomljenca v betonu na desnem bregu izlivnega odseka mlinščice. Zaradi slabih podatkov o izvedenih delih dejanske varnosti tega predela Luč brez ustrezne analize ni možno določiti (IZVODE, 2005).

Pod izlivom Struge višina nasipov s sedanjim mostom zagotavlja varnost za približno 20 do 50 letne visoke vode brez varnostne višine. Kritičen je predvsem odsek med stacionažama 840 m in 875 m. Nasip je iz kaštnega temelja, ki je nadgrajen z nasutjem neznane kvalitete. Vodna stran nasipa je obložena s skalami večjih dimenzij ($d_m = 50-70$ mm).



Slika 12: Visokovodni nasip gorvodno od mosta (foto:avtor, maj 2006)

Prevodnost odseka struge Savinje od izliva Struge do sotočja z Lučnico je omejena z vplivom sotočja z Lučnico, jezu (prečkanje kanalizacije) in samega mostu, ki Savinjo premošča s tremi polji (dva opornika sta na tretjinah struge).



Slika 13: Lesen most in jez (foto:avtor, marec 2006)



Slika 14: Dolvodno od mostu sta levi in desni breg varovana z zidom iz lomljenca v betonu (foto:avtor, maj 2006)

2.3.2 Sotočje Savinje in Lučnice

Savinja in Lučnica se združujeta pod kotom 32° , kar je precej neugodno, predvsem z vidika smeri toka Savinje, ki se priključuje na smer Lučnice pod velikim kotom. Zaradi tega se reki medsebojno zaježujeta in posledično vplivata gorvodno na poplavno varnost Luč. Ob prodonosnih pretokih je pričakovati povečano odlaganje proda. Zlasti v poletnih mesecih je struga močno poraščena in dodatno zmanjšuje prevodnost.



Slika 15: Desno Savinja, levo Lučnica (foto:avtor, maj 2006)



Slika 16: Kamnometna ločilna zgradba (foto:avtor, marec 2006)

2.3.3 Savinja pod sotočjem z Lučnico

Struga Savinje je neurejena. Pomika se proti vzhodu in erodira poraščeno desno brežino. Prodišče se postopoma zarašča. Nekatere jezovice na desnem bregu so poškodovane, druge pa so preveč obremenjene.



Slika 17: Desna krivina pri dotoku Mlakarskega grabna (foto:avtor, junij 2006)

3 RAČUNALNIŠKI PROGRAMI TER MERSKA OPREMA UPORABLJENA PRI PROJEKTIRANJU

3.1 O programih

Pri projektiranju in načrtovanju ureditve Savinje sem uporabljal programski paket Aquaterra 2006, Autodesk-ov AutoCad 2006, HEC-RAS 3.1.3 in programsko opremo MS-OFFICE. AutoCad 2006 sem uporabljal za predvsem za kartografska dela in kot osnovo za program Aquaterra. Za hidravlične izračune sem uporabil HEC-RAS 3.1.3, njegove rezultate pa prenesel kot vhodne podatke v program Aquaterra. Za dodatne izračune in predstavitev sem uporabil Excel.

3.2 AutoCad 2006

AutoCAD je najbolj razširjen programski paket za računalniško podprto konstruiranje (CAD computer - aided design) za tehnično risanje in projektiranje pri nas in po svetu. Registriranih uporabnikov je že več kakor štiri milijone. Autodesk je sčasoma poleg AutoCAD-a razvil še številne druge programe in platforme, ki zaokrožujejo paleto programske opreme, potrebne tipičnim inženirskim in projektnim organizacijam. Obsega 2D in 3D risanje, z dodatki pa je uporaben na različnih tehniških področjih: strojništvo, gradbeništvo, arhitektura, geodezija in elektrotehnika.

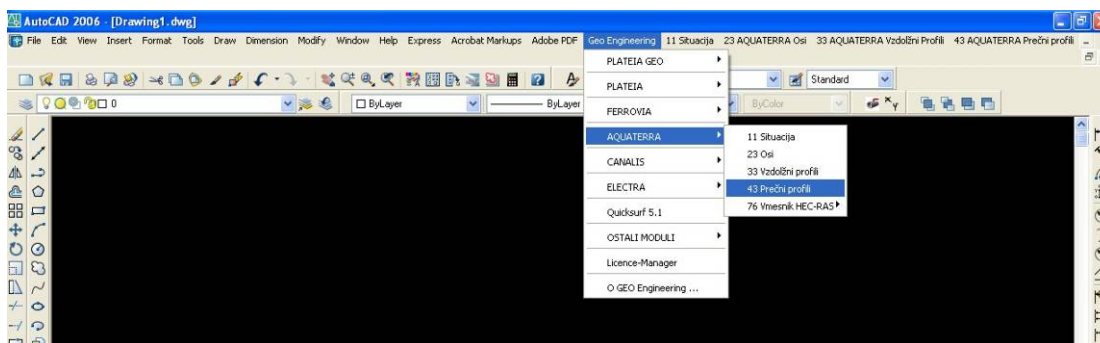
V mojem primeru predstavlja platformo za program Aquaterra in je tako uporabljen kot program za hidrotehnične probleme. (elektronski vir, www.autodesk.com)

3.3 Aquaterra

3.3.1 Splošno o programu

Aquaterra je program, namenjen načrtovanju regulacij in ureditev vodotokov. Z njim si lahko pomagamo pri risanju načrtov, pri tehnični dokumentaciji in hidravličnih izračunih. Pripada programom družine CGS GeoEngineering, ki delujejo v okolju AutoCAD, AutoCAD MAP in Autodesk CIVIL 3D.

Program sestavljajo moduli Situacija, Osi, Vzdolžni profili, Prečni profili in Vmesnik za HEC-RAS.



Slika 18: Prikaz programa Aquaterra v okviru AutoCad 2006

Običajno v eni risbi obdelujemo situacijo z moduloma Situacija in Osi, v drugi risbi urejamo Vzdolžne profile in v tretji Prečne profile. Risbe ter druge datoteke, ki nastanejo med projektiranjem ali jih dobimo od drugod, so medsebojno povezane preko projekta. Projekt je večja enota, ki lahko vsebuje večje število risb ter drugih podatkov, shranjenih v podatkovni bazi in drugih datotekah. S tem imamo omogočen tudi prenos podatkov med moduli (CGS, 2005).

3.3.2 Modul Situacija

Modul Situacija programske družine GeoEngineering je namenjen izdelavi geodetskih načrtov za merila od 1:100 do 1:10000. Ti načrti so uporabni kot podloge za projektiranje vodotokov ali drugih objektov nizke gradnje.

Osnovni podatki za izdelavo geodetskih načrtov z modulom Situacija so geodetske točke, ki jih odčitamo z geodetskimi instrumenti. Poleg podatkov o točkah lahko iz elektronskih instrumentov preberemo tudi podatke o povezavah med točkami, če so bili vneseni v geodetski instrument.

Geodetske načrte, izdelane z modulom Situacija, lahko združujemo s skeniranimi načrti. Ti morajo biti ustrezno umerjeni v koordinatni sistem. Načrte lahko obdelujemo v 2D ali 3D načinu. Z orodji za pretvorbo 2D podatkov o točkah in povezavah lahko pripravimo 3D risbo, ki je osnova za izračun digitalnega modela terena.

Izdelani geodetski načrt z modulom Situacija deluje kot inteligentna risba, v kateri so poleg geometrijskih podatkov lahko shranjeni tudi mnogi atributni podatki. Vnos točk v risbo lahko izvajamo na različne načine. Najpogostejši so paketni vnosi točk iz tekstovne datoteke ali interaktivno podajanje točk. Inteligentna risba je skladišče podatkov, iz katerega lahko izluščimo tiste, ki so za nas zanimivi (CGS, 2005).

3.3.3 Modul Osi

Modul Osi je namenjen točkovnemu določanju poteka osi vodotoka. Modul omogoča interaktivno ali paketno projektiranje horizontalnih elementov vzdolžne osi ter enostavno manipulacijo z njimi. Pomožni elementi - tangente in krožnice so konstrukcijski elementi za projektiranje vzdolžne osi vodotoka. V okviru projekta in risbe lahko obdelujemo poljubno število osi vodotoka.

Geometrijo osi lahko v programu podajamo na tri načine. Elemente, ki sestavljajo os, med seboj lepimo (metoda lepljenja), lahko izrišemo osi s tangentskimi poligoni in tako program samodejno izračuna in izriše preme in loke. Tretji način pa je pretvorba AutoCAD entitete polilinijske vzdolžne osi. Tak način sem uporabil tudi sam.

Prečne osi (prečne profile) lahko določimo na več načinov. Njihove lege lahko pokažemo v risbi, program jih lahko določi sam na izbranem razmiku ali pa jih preberemo iz datoteke. Prečne osi lahko narišemo tudi sami, tako da polilinije pretvorimo v prečno os.

Vzdolžni in prečni profili terena se v modulu Osi lahko določijo na dva načina. Prvi je s pomočjo digitalnega modela terena, kjer na projektirano os projiciramo modela terena in s projicirane osi odčitamo višinske koordinate osi. Drugi način pa je izračun vzdolžnih in prečnih profilov terena s pomočjo posnetih geodetskih točk v profilih. V modulu Situacija preberemo točke, ki so bile posnete v poljubnih profilih, ter jim pripišemo potrebne attribute za njihovo prepoznavanje. Program nato točke analizira, sortira v profile in jih projicira na podano vzdolžno os. Pri tem lahko izvedemo 2D ali 3D interpolacijo točk na posamezno prečno os in tako eliminiramo drobne napake pri snemanju točk (CGS, 2005).

3.3.4 Modul Vzdolžni profili

Modul Vzdolžni profili je namenjen izrisu vzdolžnega profila vodotoka in drugih nizko gradnih objektov (mostov, tunelov...). Podatki za izris vzdolžnih profilov se najhitreje pripravijo z ustreznimi ukazi v modulih Situacija in Osi. Lahko pa jih pripravimo tudi v ustreznih podatkovnih datotekah.

Izris vzdolžnega profila vodotoka vsebuje kote dna struge, levega in desnega brega, projektirane nivelete in gladin pri različnih pretokih ter druge geometrijske in hidravlične količine. Prikaz vzdolžnega profila je sestavljen iz grafičnega in tabelaričnega dela. Vzdolžni profil se riše v popačenem merilu, kar pomeni, da lahko določimo merilo posebej v vodoravni in navpični smeri.



Slika 19: Modul Vzdolžni profil

Teren, levi in desni breg vnašamo iz datotek, pripravljenih v modulih Situacija ali Prečni profili. Ob izrisu črt se višine vnašajo v profile kot tudi v tabelo. Pomemben sklop ukazov je risanje nivelete, ki jo lahko vnašamo interaktivno, s pretvorbo iz poliliniije ali z branjem datoteke, pri čemer najpogosteje uporabljamo prvi način. Po izrisu lahko niveleto, vzdolžne padce in stopnje tabeliramo. V vzdolžni profil lahko vnesemo prečne objekte na izbrani stacionaži ali pa v nizu na podani medsebojni razdalji.

V vzdolžni profil lahko vnesemo eno ali več gladin. Gladina se s pripadajočo oznako (npr. Q_{100}) izriše na grafu, kote pa se prikažejo v tabeli. Gladino lahko vnesemo iz datoteke, ki je rezultat hidravličnega računa s programom HEC-RAS ali pa njen potek sami vrišemo v risbo.

3.3.5 Modul Prečni profili

Modul Prečni profili je namenjen izdelavi načrtov prečnih profilov za potrebe projektiranja vodotokov in niskogradnih objektov. Uporabljamo ga za risanje in opremljanje novih prečnih profilov, načrtovanje novih pretočnih profilov, določanje Manningovih koeficientov, planimetriranje,...

Prečne profile obdelujemo na osnovi izračunanih terenskih črt v prečnih profilih in nivelete. Prečne profile obdelujemo s pomočjo elementov normalnega prečnega profila. Zelo pogosto iz prečnih profilov izračunavamo količine vkopov, nasipov in druge količine s pomočjo funkcij za planimetriranje.

Pri določanju hidravličnih količin moramo podati tudi Manningove koeficiente. Te lahko določamo bodisi po delih profila (levo poplavno območje, struga, desno poplavno območje), bodisi po elementih normalnega prečnega profila. Prav tako pa lahko te določimo tudi naknadno.

Na obstoječ teren, ki ga vnesemo iz datoteke, narejene v modulu Osi, lahko vnašamo že pripravljene elemente normalnega prečnega profila. Avtomatsko lahko izračunamo površine izkopov, nasipov, betona, zatraitve in ostalih elementov urejanja vodotokov.

V modulu Prečni profili so na voljo še mnogi drugi ukazi, na primer kotiranje nagibov, dolžin in višin, določitev presečnih točk vkopov in nasipov, priprava podatkov za kotirano projekcijo v situaciji. Na voljo je tudi knjižnica detajlov, ki jo lahko sami nadgrajujemo.

3.3.6 Modul Vmesnik za HEC-RAS

Modul Vmesnik za HEC-RAS je namenjen komunikaciji s programom HEC-RAS, s katerim na podlagi stacionaž, geometrije prečnih prereзов, podatkov o bregovih struge in Manningovih koeficientov pripravimo geometrijsko vhodno datoteko. Nato v programu HEC-RAS to datoteko preberemo ter določimo ostale podatke, potrebne za hidravlični izračun, kot so podatki o pretokih, robni pogoji in začetni pogoji. Izračun poženemo v HEC-RAS-u in rezultate iz preglednice shranimo v tekstovno datoteko (*.TXT). Nato v Aquaterru prevedemo tekstovno datoteko v količine, ki jih potrebujemo (Q_{100} , Q_{20} ,...). Izračunane gladine in geometrijo lahko prikažemo v vzdolžnih in prečnih profilih (CGS, 2005).

3.4 HEC-RAS 3.1.3

Računalniški program HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) je zasnovala skupina raziskovalcev pod okriljem ameriške vojske. Program omogoča račun enodimenzionalnega stalnega, nestalnega neenakomernega toka ter račun premeščanja sedimentov. Program sestavljajo: grafični vmesnik, modul za računanje stalnega toka, modul za računanje nestalnega toka ter sedimentacijski modul (simulacija rečnega premeščanja sedimentov). Vsi trije moduli koristijo skupno bazo podatkov o geometriji ter hidravličnih parametrih. V program lahko vnašamo tudi določene hidravlične objekte, s katerimi lahko ponazorimo realno načrtovano stanje na vodotoku. Program omogoča poenostavljen prikaz dvodimenzionalnega toka v vertikalnih lamelah prečnih prerezov (elektronski vir, www.hec.usace.army.mil).

HEC-RAS omogoča popolno analizo vodotokov pod različnimi pogoji. Pri računu uporablja enodimenzijsko rešitev energijske enačbe. Izgube so ocenjene z Manningovo enačbo, koeficientom razširitve oz. zožitve in geometrijskimi karakteristikami vodotoka. V primerih nenadne spremembe vodnega toka (mostovi, prepusti, sotočje,...) pa program uporabi momentno enačbo. Za hidravlični izračun tako potrebujemo geometrijo in hidravlične značilnosti vodotoka, robne pogoje in specifikacijo morebitnih hidrotehničnih objektov. Robne pogoje ločimo glede na vrsto toka. Tako potrebujemo za mirni tok robne pogoje na koncu vodotoka, za deroči tok na zgornjem koncu, za mešani režim pa oba robna pogoja.

3.5 Merska oprema - Hidrometrično krilo VALEPORT MODEL 002

Za podrobnejšo analizo sem opravil meritve hitrosti Savinje s hidrometričnim krilom. Uporabil sem hidrometrično krilo VALEPORT MODEL 002, ki se uporablja za meritve hitrosti v odprtih vodotokih. Celoten merilni komplet je sestavljen iz mini krila premera 50 mm, nosilne glave, sestavljive palice s centimetrsko razdelbo in podstavka digitalne enote za štetje obratov in preračun hitrosti s kablom ter kabla za prenos podatkov na PC. Štetje obratov deluje na principu magneta. Digitalna enota nam prikazuje trenutne vrednosti meritve, hkrati pa se podatki lahko tudi shranjujejo. Za izračun povprečnih vrednosti ima vgrajena dva načina: glede na podano število obratov in glede na podani čas. Na izbiro imamo štiri metode povprečenja meritev (elektronski vir, ksh.fgg.uni-lj.si).



Slika 20: Komplet VALEPORT 002 (foto:www.valeport.co.uk)



Slika 21: Meritev na terenu (foto:avtor, junij 2006)

Meritve sem izvajal dne 28.6.2006 v dveh različnih profilih. Tu sem uporabil znanje, ki sem si ga pridobil na fakulteti, ko smo na vajah uporabljali ta pripomoček. Savinjo sem razdelil na pododseke. Merilno vrv sem napel preko reke in v vsakem pododseku opravil meritev. Ti pododseki so bili na razdalji ca 1 m. Hitrosti sem odmeril na treh različnih globinah, z minutnim povprečenjem meritev. Odčitke sem zapisal v preglednico in jih uporabil za primerjavo izmerjenih in izračunanih meritev hitrosti.

4 HIDRAVLICNI RAČUNSKI MODEL OBRAVNAVANEGA ODSEKA ZA STALNI TOK

4.1 Geometrija računskega modela - Aquaterra

Geometrijo računskega modela sem pridobil na Inženiringu za vode (IZVODE). Profili od P1 do P29 so bili pripravljene za program Aquaterra. To pomeni, da so bili profili posneti in transformirani v Aquaterra kot situacijske oz. detajlne točke. V situacijski točki je podana oznaka točke, nadmorska višina, številka prečnega profila in simbol za izris v prečnem profilu. Za ostale profile od P30 do P60 pa sem imel na voljo geodetski posnetek vsakega prečnega profila posebej. Zato sem na situaciji dodal pomožne situacijske točke in sicer za vsak profil dve točki. Z ukazom polilinije sem narisal vseh 60 profilov tam, kjer so bili posneti.

Na Geodetski upravi RS sem pridobil ortofoto načrt – DOF 5 (Mozirje F26 32) in temeljni topografski načrt merila 1:10.000 (Gornji grad Mozirje F07 06). To sem uporabil kot podlogo v AutoCadu in tako dopolnil geometrijo. Najprej sem moral rastrske slike in ortofoto načrt postaviti koordinatni sistem Slovenije (kartezični ravninski Gauss-Kruger-jev). Uporabil sem tri sloje rastrskih slik in sicer podatkovni sloj, ki prikazuje vode, sloj s plastnicami in sloj z infrastrukturnimi objekti ter drugimi oznakami.

Os vodotoka sem določil tako, da sem v vsakem prečnem profilu predvideval os sredine korita srednjih vod. V modulu Os sem z ukazom 23F2 pretvoril polilinijo v vzdolžno os. Os sem poimenoval Savinja, smer stacionaže naraščajoča z začetno stacionažo 0 in smer pogleda proti toku. Na tej vzdolžni osi je izrisanih 60 profilov, skupna dolžina osi pa je 1698 m.

Ko sem imel vzdolžno os podano sem z ukazom 23G4 v modulu Osi določil prečne osi. To pomeni, da je Aquaterra zamenjala 60 polilinj s prečnimi osmi. Dodal sem opise prečnih profilov in zapis stacionaže vsakega prečnega profila posebej. Tako sem pripravil situacijo za zapis v tekstovno datoteko. Program je na osnovi situacijskih in poligonskih točk zapisal

prečne profile v datoteko tipa *.PRE in v datoteko *.VZD za vsak profil podane točke terena v osi in najnižje točke v profilih (globočnica).

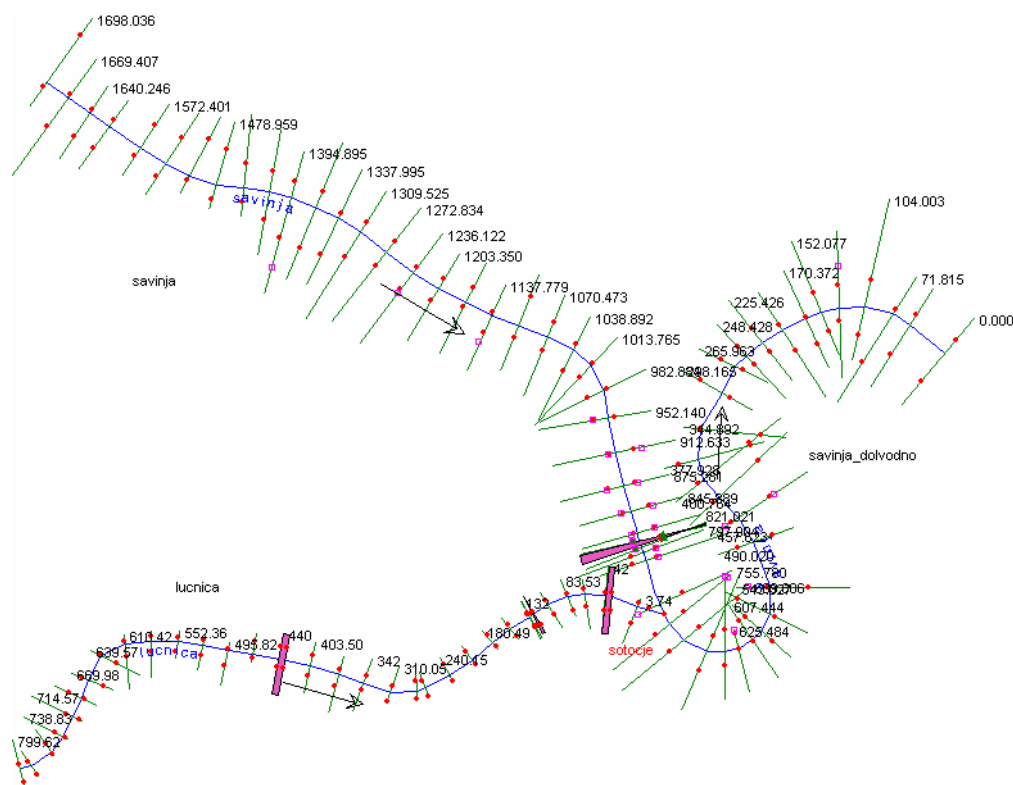
Nato sem z modulom Prečni profili izrisal prečne profile. Najprej sem določil tabele za profile. V tabele sem vnesel prečne profile iz datoteke *.PRE. Profili od P1 do P29 so bili ustrezni, ostale profile pa sem uporabil kot pomožne. Iz geodetskega posnetka sem skopiral vsak profil med P60 in P30 v pomožne profile. Te nove profile sem transformiral v NPP element in nato iz NPP elementa v nov teren. Z ukazom 43E4 sem sestavil teren in ga zapisal v novo datoteko *.PRE. V tej datoteki so bili zapisani vsi prečni profili ustrezno. V posameznih prečnih profilih sem določil točke levega in desnega brega in jih zapisal v datoteko *.PL. Manningovih koeficientov nisem določal v Aquaterri, ampak sem jih raje v HEC-RAS-u, kar program tudi omogoča.

Vzdolžni profil obravnavanega odseka sem naredil v modulu Vzdolžni profil. Določil sem tabelo in z datoteko *.VZD in datoteko *.PL izrisal potek dna ter levega in desnega brega. Za prenos geometrije v HEC-RAS je bilo potrebno ustvariti tudi datoteko *.IPP, v kateri so podatki o stacionažah profila, koordinatah x in y v osi prečnega profila ter smerni kot prečnega profila.

Pripravljene podatke o hidravličnem modelu sem z modulom Vmesnik za HEC-RAS izvozil v geometrijsko datoteko tipa HEC-RAS. Za vhodne podatke sem upošteval datoteke *.PRE, *.VZD, *.PL in *.IPP. Izhodno datoteko pa sem dobil v obliki *.G0*.

4.2 Geometrija računskega modela – HEC-RAS

V HEC-RAS-u sem tako dobil geometrijo obravnavanega odseka. Vendar je bila ta geometrija nepopolna. Manjkala je namreč še geometrija Lučnice. To sem pridobil na IZVODE. Geometrija je bila že pripravljena za program HEC-RAS. Med profiloma P28 in P27 sem Lučnico in Savinjo združil v sotočju. Upošteval sem zahteve, ki jih HEC-RAS zahteva za sotočja (junction).



Slika 22: Situacija obravnavanega odseka Savinje in Lučnice

V geometrijo sem vnesel premostitev (lesen most). Upošteval sem podatke o oddaljenosti premostitve od gorvodnega profila, širino premostitvenega objekta, podatke o geometriji premostitve za gorvodno in dolvodno stran. Te podatke sem dobil z meritvami na terenu. Na terenu sem izmeril tudi obliko in velikost mostnih opornikov ter jih vnesel v program. V območju mostu sem zaradi hitrih zožitvev in razširitvev določil tudi neaktivna območja. Koeficiente zožitve in razširitve sem pustil take kot jih program priporoča za postopno spreminjanje (Gradual transitions); za zožitvev 0,1 in za razširitvev 0,3.

V prečnih prerezih sem glede na strugotvorni pretok (je mejni pretok, pri katerem voda še ostane v svoji strugi v vseh profilih in se ne razlije v poplavno območje) določil nov levi in desni breg.

4.3 Karakteristični pretoki in robni pogoji

Za podatke o karakteristični pretokih sem uporabil Koncept ureditve Savinje – hidrološka študija iz leta 1992 in meritev na terenu.

Račun sem pognal za naslednje pretoke:

$$Q_{100}$$

$$Q_{50}$$

$$Q_{20}$$

$$Q_{10}$$

$$Q_5$$

$$Q_2$$

$$Q_{izmerjen} \text{ dne } 28.6.2006$$

Preglednica 2: Karakteristični pretoki Savinje za obravnavani odsek (Hidr. študija Savinje)

SAVINJA	POVRŠINA	TEREN	VODOTOK		Q_{100}	Q_{50}	Q_{20}	Q_{10}	Q_5	Q_2	$Q_{izmerjeno}$
HIDROLOŠKI PROFIL:	(km ²)	(%)	(km)	(%)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
Savinja do Lučnice	120	60,9	23,7	1,9	240	204	161	131	102	74	4,2
Savinja pod Lučnico	175,2	56,4	23,7	1,9	330	277	213	170	127	106	6,9

Za karakteristične pretoke Lučnice sem uporabil razliko med Savinjo do Lučnice in Savinjo pod Lučnico.

Hidravlični račun sem izvedel za "mešani režim" toka (Mixed flow) in zanj podal zgornji in spodnji robni pogoj. V situaciji imam Savinjo gorvodno od sotočja, Savinjo dolvodno in Lučnico. Za zgornji robni pogoj Savinje gorvodno in Lučnice sem podal kritično globino, za njun spodnji robni pogoj sem podal sotočje (junction). Zgornji robni pogoj Savinje dolvodno sem podal sotočje ter za spodnji robni pogoj predpostavljeno normalno pretočno gladino, pri padcu struge dolvodno od spodnjega profila, ki znaša 0,5 %.

4.4 Umerjanje hidravličnega računskega modela

Manningove koeficiente (n_g) sem določil s pomočjo literature (Hicks in Mason, 1998) in terenskim ogledom. Z njimi sem umeril računski model. Za strugo sem uporabil n_g med 0,035 in 0,045, ter za poplavna območja med 0,10 in 0,12. V programu sem uporabil tudi dodatno funkcijo določanja n_g po višini.

4.5 Rezultati hidravličnega računskega modela

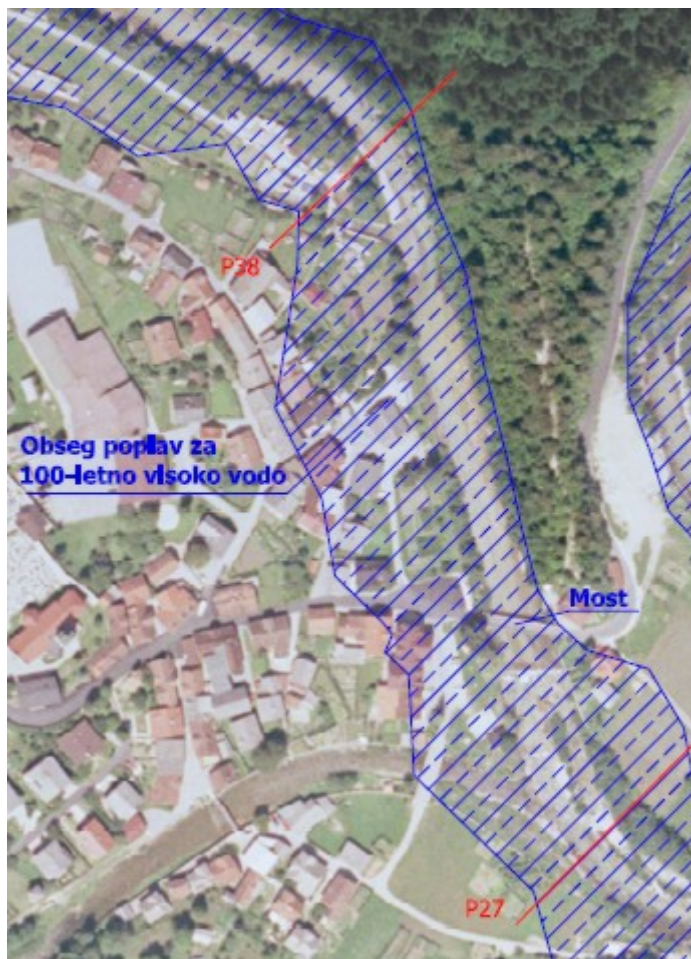
Predvideval sem, da na poplavno varnost Luč oziroma na potek gladin Savinje in Lučnice vplivajo naslednji dejavniki oziroma odseki:

- ✚ neustrezno urejen odsek Savinje pod sotočjem z Lučnico
- ✚ hidravlično neugodno sotočje Lučnice in Savinje,
- ✚ prag (jez) pod mostom na regionalni cesti,
- ✚ poddimenzioniran in hidravlično neustrezno oblikovan sedanji most na regionalni cesti v Luče in
- ✚ poddimenzionirani nasipi v Lučah pod izlivom Struge.

Hidravlični račun je to tudi potrdil. Pri pretoku $Q_{100} = 240 \text{ m}^3/\text{s}$ (do sotočja) je ogrožen odsek od profila P40 (stacionaža 1070 m) do sotočja z Lučnico na levem in desnem bregu.

Izračun kaže, da so protipoplavni nasipi v profilih od P36 (stacionaža 952 m) do P32 (stacionaža 821 m) prenizki tudi za več kot 40 cm, brez upoštevanja varnostne višine. Nasipi v povprečju zadostujejo za gladine pri pretokih z 20-letno povratno dobo.

Za pretoke s 50-letno povratno dobo ($Q_{50} = 204 \text{ m}^3/\text{s}$) so urbane površine na desnem bregu poplavljene na razdalji več kot 150 m, to je od profila P34 (stacionaža 875 m) do sotočja. Poplavljen je stanovanjski objekt v profilu P29 na levem bregu. Na desnem bregu pa je poplavljen gospodarsko poslopje v profilu P40. Poplavljena je tudi lokalna cesta med P40 in P53.



Slika 23: Obseg poplav za 100-letno visoko vodo

Pri 20-letnih visokih vodah je ogroženo gospodarsko poslopje v profilu P40.

Problematičen predel je tudi izlivni del Struge. Obnovljen je bil leta 2001, vendar so podatki o višinah zaščitnega zidu vprašljivi. Tako obstaja možnost, da poplavna voda priteče za nasip skozi izliv Struge in ogrozi poplavno varnost Luč. Zato dejanske varnosti tega predela Luč brez ustrezne analize ni mogoče določiti.

Rezultate hidravličnega izračuna s programom HEC-RAS sem prikazal v Preglednici 3 ter na Sliki 24, detajlneje pa v prilogi C.

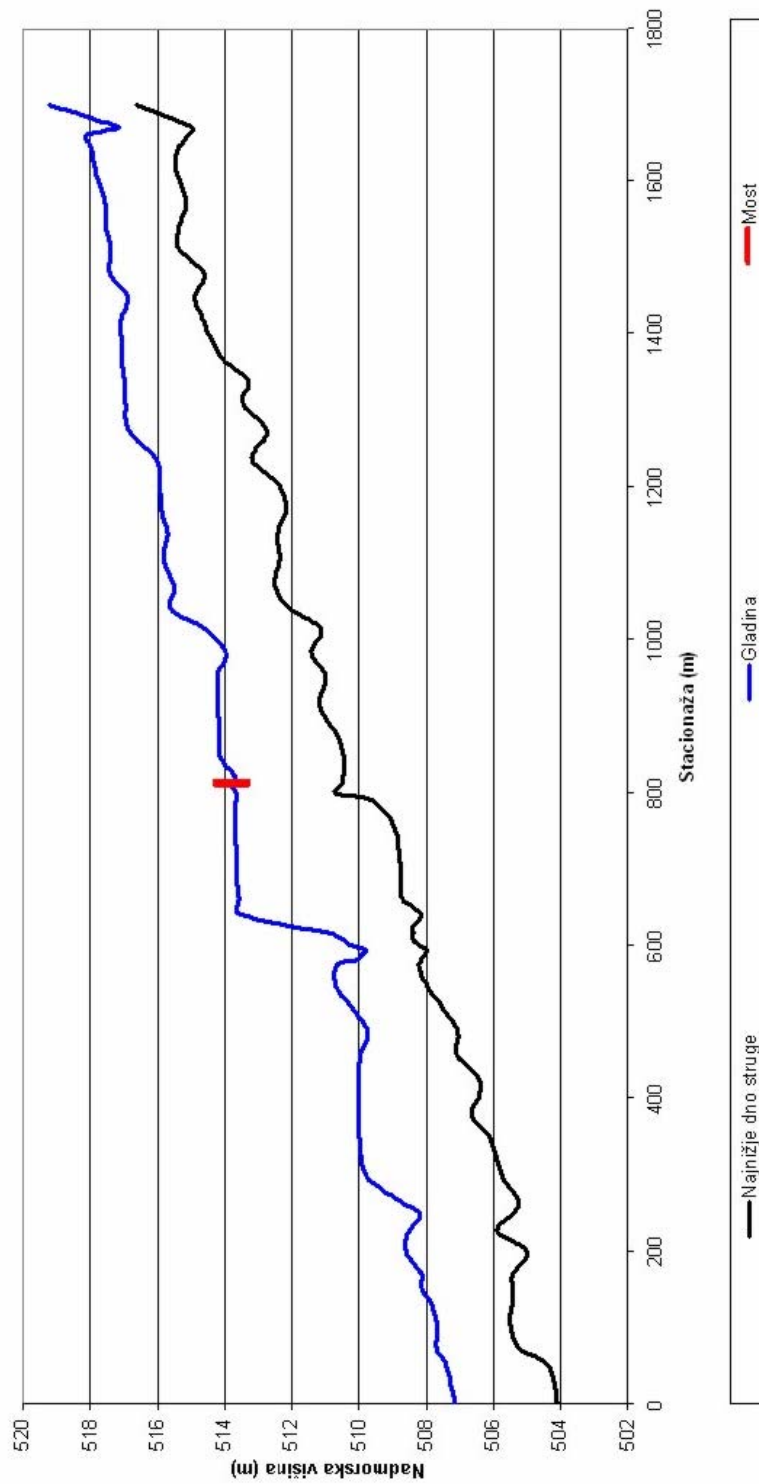
Preglednica 3: Rezultati izračuna za stalni tok za Q_{100}

Profil	Stacionaža	Pretok (m ³ /s)	Gladina (m)	Kritična gladina (m)	Energijska črta (m)	Hitrost (m/s)	Površina (m ²)	Froudovo št.
P60	1698.036	240	519.23	519.24	519.79	3.31	72.68	1.01
P60_a	1688.49*	240	518.44	518.76	519.55	4.66	51.52	1.58
P60_b	1678.95*	240	517.84	518.24	519.18	5.13	46.79	1.70
P59	1669.407	240	517.18	517.64	518.76	5.57	43.12	1.77
P59_a	1659.68*	240	518.13	517.61	518.55	2.86	85.57	0.64
P59_b	1649.96*	240	518.06		518.5	2.98	83.95	0.66
P58	1640.246	240	517.97		518.45	3.13	83.05	0.69
P57	1614.442	240	517.87		518.33	3.02	84.1	0.67
P56	1572.401	240	517.58		518.11	3.24	78.28	0.78
P55	1539.803	240	517.55		517.89	2.61	99.23	0.63
P54	1510.097	240	517.4		517.76	2.69	92.41	0.66
P53	1478.959	240	517.42		517.63	2	126.41	0.45
P52	1448.52	240	516.9	516.79	517.48	3.41	76.06	0.87
P51	1419.912	240	517.09		517.26	1.91	136.01	0.42
P50	1394.895	240	517.09	516.02	517.21	1.62	161.51	0.35
P49	1365.521	240	517.07		517.18	1.48	171.98	0.31
P48	1337.995	240	517		517.15	1.73	150.73	0.34
P47	1309.525	240	516.97		517.12	1.75	164.17	0.33
P46	1272.834	240	516.86		517.07	2.08	139.77	0.38
P45	1236.122	240	516.05	516.05	516.9	4.13	60.35	0.95
P44	1203.35	240	515.94	515.1	516.32	2.8	97.32	0.53
P43	1169.362	240	515.9		516.22	2.68	115.43	0.49
P42	1137.779	240	515.71	515.31	516.12	3.04	105.54	0.58
P41	1105.294	240	515.84		515.99	1.8	156.4	0.36
P40	1070.473	240	515.52		515.9	2.81	96.46	0.57
P39	1038.892	240	515.6		515.79	2.04	157.26	0.37
P38	1013.765	240	514.61	514.61	515.64	4.53	57.13	0.94
P37	982.884	240	513.98	514.33	515.24	5.05	55.84	1.13
P36	952.14	240	514.22	513.75	514.73	3.39	103.44	0.66
P35	912.633	240	514.21	513.48	514.54	2.74	124.1	0.53
P34	875.281	240	514.18	513.12	514.44	2.37	138.81	0.45
P33	845.889	240	514.15	512.82	514.38	2.29	148	0.4
P32	821.021	240	513.71	512.99	514.29	3.43	82.7	0.64
P31	812.163	240	513.83	512.72	514.2	2.68	91.33	0.49
	811.163	Most						
P30	797.904	240	513.64	512.89	513.97	2.7	129.83	0.51
P29	789.114	240	513.68	512.48	513.92	2.36	157.16	0.42
P28	755.78	240	513.71	511.78	513.82	1.55	212.32	0.27
P27	719.042	330	513.66	511.54	513.8	1.74	261.47	0.28
P26	689.806	330	513.66	511.52	513.77	1.63	303.48	0.26
P25	660.78	330	513.59		513.74	1.82	239.75	0.29
P24	641.613	330	513.58	510.92	513.72	1.75	244.55	0.27

se nadaljuje

nadaljevanje

P23	625.484	330	512.14	512.14	513.56	5.49	72.26	0.96
P22	616.464*	330	510.97	511.66	513.32	6.8	48.98	1.48
P22 a	607.444	330	510.49	511.24	512.98	7	47.15	1.65
P21	600.556*	330	510.28	511.01	512.68	6.86	48.1	1.72
P21 a	593.668	330	509.8	510.58	512.35	7.07	46.68	1.92
P20	586.893*	330	509.94	510.52	511.87	6.15	53.68	1.63
P20 a	580.118*	330	510.12	510.46	511.5	5.21	63.37	1.33
P20 b	573.344	330	510.67	510.39	511.34	3.62	92.34	0.81
P19	543.027	330	510.65		511.1	2.98	115.73	0.62
P18	490.02	330	509.78	509.78	510.71	4.3	80.15	0.99
P17	457.623	330	509.96	509.22	510.32	2.68	138.13	0.56
P16	427.079	330	510.02		510.21	1.95	187.87	0.4
P15	400.764	330	510.02		510.16	1.71	212.98	0.34
P14	377.928	330	510.01		510.14	1.57	213.29	0.31
P13	344.892	330	509.99		510.11	1.57	230.4	0.29
P12	298.165	330	509.79		510.05	2.3	163.69	0.39
P11	265.963	330	508.83	508.83	509.88	4.61	84.03	0.91
P10	248.428	330	508.2	508.53	509.66	5.38	64.55	1.16
P9	225.426	330	508.53	508.36	509.34	4.05	92.22	0.83
P8	199.582	330	508.61		509.13	3.29	125.96	0.63
P7	170.372	330	508.15	508.15	508.96	4.15	104.1	0.89
P6	152.077	330	508.16	507.8	508.6	3.08	134.8	0.67
P5	132.18	330	507.86	507.86	508.48	3.66	118.56	0.81
P4	104.003	330	507.69	507.37	508.12	2.94	120.87	0.71
P3	71.815	330	507.7		507.95	2.23	168.31	0.49
P2	49.775	330	507.41		507.85	2.99	126.62	0.66
P1	0	330	507.15	506.78	507.61	3.01	118.7	0.71

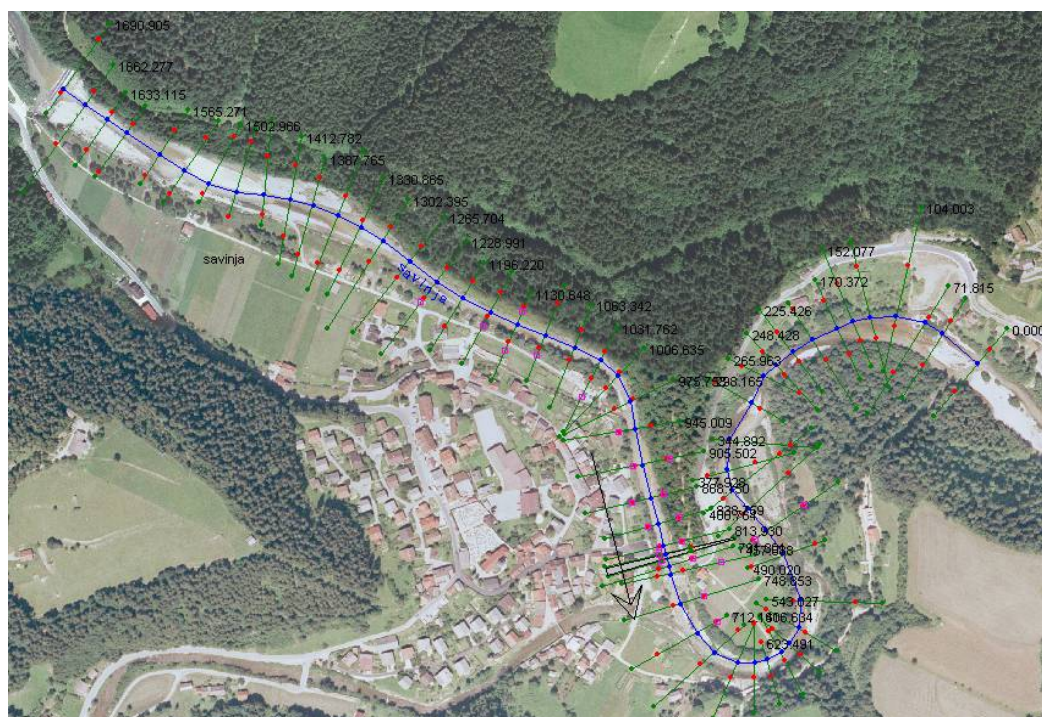


Slika 24: Prikaz gladin za obstoječe stanje

5 HIDRAVLIČNI RAČUNSKI MODEL OBRAVNAVANEGA ODSEKA ZA NESTALNI TOK

5.1 Geometrija računskega modela

Za izračun nestalnega toka sem moral geometrijo v HEC-RAS-u nekoliko spremeniti. HEC-RAS namreč ne omogoča računa za nestalni tok, če imamo več kot en odsek (reach) reke. Tako sem združil Savinjo gorvodno in Savinjo dolvodno v nov odsek. Sotočje sem odstranil in Lučnico prištel k Savinji v prvem dolvodnem profilu od sotočja. Koeficiente hrapavosti in ostale parametre potrebne za izračun pa sem pustil nespremenjene.



Slika 25: Spremenjena geometrija za račun nestalnega toka

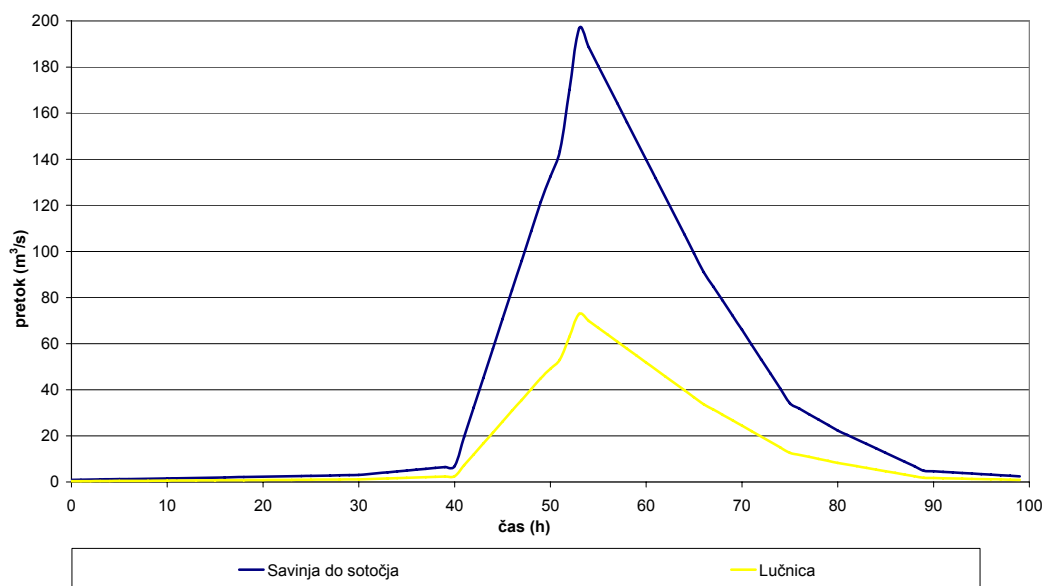
5.2 Hidrološki podatki

Za obravnavani odsek merjenih podatkov hidrograma pretokov za visokovodno situacijo ni bilo na razpolago, zato sem za izračun nestalnega toka uporabil hidrogram pretokov za VP Solčava za visokovodno situacijo leta 2000. Uporabil sem tabelo s seznamom vodomernih

postaj z nad pet letnim delovanjem (elektronski vir, www.arso.gov.si) in interpoliral hidrogram pretokov za VP Solčava tako, da je ustrezal Savinji nad sotočjem z Lučnico. Vrh vala interpoliranega hidrograma je dosegel $200 \text{ m}^3/\text{s}$, kar sem pričakoval in približno ustreza 50-letni povratni dobi Savinje. V profilu dolvodno od sotočja sem dodal še hidrogram Lučnice. Iz Hidrološke študije Savinje (Burja, 1992) sem določil karakteristične pretoke, ter vrh Lučnice, ki je znašal $73 \text{ m}^3/\text{s}$. Na ta vrh vala sem interpoliral hidrogram Lučnice.

5.3 Robni in začetni pogoji

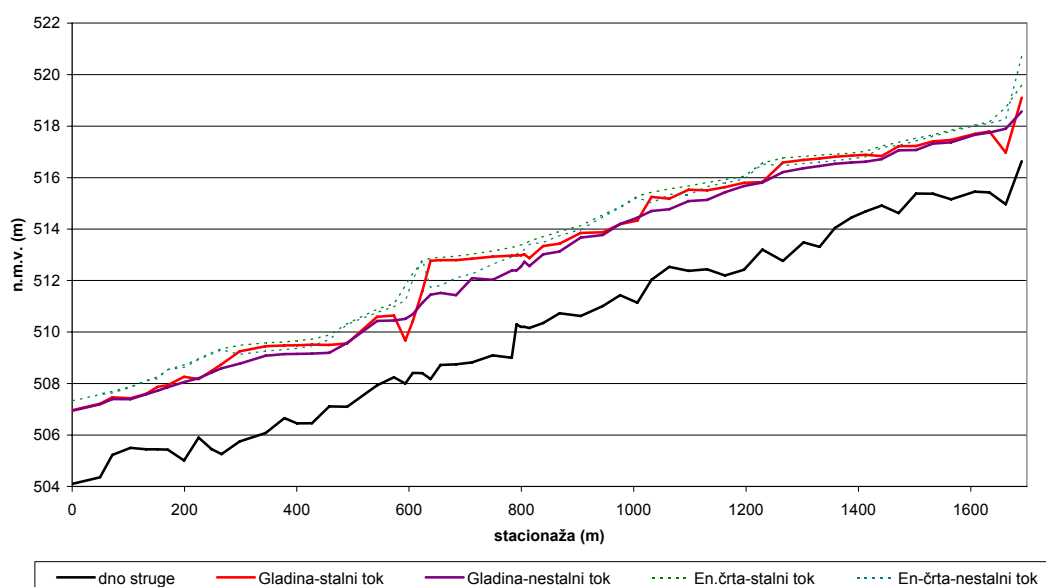
Za izračun nestalnega toka je potrebno v HEC-RAS-u podati začetno razporeditev pretokov po odseku (začetni pogoj) in robne pogoje na spodnjem in zgornjem prerezu obravnavanega odseka. Za začetni pogoj sem podal enakomerni pretok $Q = 5,36 \text{ m}^3/\text{s}$, to je pretok v štirideseti uri na urnem hidrogramu, uporabljenem v računu. Urni hidrogram (Slika 26) sem uporabil za določitev zgornjega robnega pogoja. Kot dodatni robni pogoj sem dodal stranski hidrogram pritoka Lučnice (Slika 26), kot spodnji robni pogoj pa normalno pretočno gladino (padec dna struge $I=0,005$).



Slika 26: Hidrogram pretokov za Savinjo in Lučnico novembra 2000

5.4 Rezultati

Primerjal sem rezultate v spremenjeni geometriji za stalni in nestalni tok. Pretok za stalni tok sem določil kot vrh hidrograma, to je $200 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je $4 \text{ m}^3/\text{s}$ manj kot 50-letna povratna doba Savinje nad sotočjem. Račun z nestalnim tokom je povzročal kar nekaj težav in sem šele z dolgotrajnim urejanjem nastavitvev programa dobil smiselne rezultate. V meniju za izračun nestalnega toka sem v opcijah pri nastavitvah programa nastavljal spremenljivke, ki jih HEC-RAS uporabi v računu, ter tolerance s katerimi računa. Izbral sem maksimalno število iteracij računa (40) ter zahteval od programa, da je 50 krat pognal račun preden je dokončno izvršil zahtevano operacijo. Za časovni korak sem določil 5 min in uporabil mešani režim toka.



Slika 27: Primerjava gladin za stalni in nestalni tok pri Q_{50}

Primerjava gladin izračunana s stalnim in nestalnim tokom je na Sliki 27. Opazimo lahko, da se gladine dokaj dobro ujemajo. Pričakovano so gladine za nestalni tok v povprečju 30 cm nižje kot gladine za stalni tok. V naravi pretok narašča postopoma, kar je hidravlično ugodneje. Velike razlike pa so v območju dolvodno od sotočja (med profiloma P27 in P23), kjer so te razlike tudi ca 1 m. Ker so gladine za stalni tok višje, sem hidrotehnične ureditve računal s stalnim tokom, kar pomeni, da sem na varni strani.

6 HIDROTEHNIČNE UREDITVE SAVINJE ZA ZAGOTOVITEV POPLAVNE VARNOSTI LUČ

6.1 Variante ureditve

6.1.1 Razbremenilni predor

Kot idejna zasnova je bila predlagana tudi rešitev, da bi z razbremenilnim predorom lahko izboljšali poplavno varnost Luč. Tako so v hidravlični študiji: "Hidravlične modelne raziskave ureditve Savinje v območju pritoka Lučnice" (idejne rešitve), ki ga je januarja 1995 izdelal VGI-VL (Vodnogospodarski inštitut), izdelovalci predlagali izvedbo razbremenilnega predora Savinje pod grebenom Breznice nad sotočjem z Lučnico. Z zmanjšanjem vodnih količin Savinje na območju sotočja s Lučnico se tako izboljša poplavna varnost Luč. Ker je bilo potrebno razbremenilnik obdelati na nivoju idejne zasnove, so zasnovali predor širine 11 m in višine 5,7 m. Padeč predora je približno 4,5%, kar je pogoj za deroči tok. Prav tako je potrebno poleg hidravlične prevodnosti preprečiti odlaganje proda, je nad razdelilnim objektom predvidena izvedba večje lovilne jame za prod s prostornino povprečne letne prodonosnosti, ki je v tem prerezu ocenjena na 20,000 m³.



Slika 28: Mesto načrtovanega vtoka v razbremenilni predor (foto:IZVODE, junij 2005)

V nasprotnem primeru bi obstajala velika nevarnost zaproditve struge Savinje tik pod razdelilnim objektom, kjer je že sedaj hidravlična prevodnost najbolj kritična (VGI, 1995). Na vtočni strani v objekt je po projektu VGI-VL predviden prelivni prag v obliki Creagerjevga preliva z osrednjim znižanim delom.

Na Savinji je predviden prag iz armiranega betona, ki je namenjen za omejevanje pretokov po strugi Savinje in stabilizacijo rečnega dna pod razdelilnim objektom. Ker je na obravnavanem odseku Savinja vodotok z naravno prodonosnostjo, bi ob visokih vodah, zaradi delitve pretokov prišlo do zastajanja in usedanja rinjenih plavin. Posledično se bo lahko struga Savinje pod razdelilnim objektom zaprodila in s tem dodatno zmanjšala pretočni prerez, kar bi ponovno povzročilo poplave. Zato je pred delitvijo predviden zadrževalnik plavin, ki se izvede na razširjenem in stabilnem delu struge pod zgornjim jezom v Lučah. Prostornina zadrževalnika naj bi bila ca 22,000 m³. Iztok iz predora je predviden v desni krivini Savinje pod cesto Ljubno – Luče (IZVODE, 2005).

V predoru bi se ustvaril kritični tok, ki bi mestoma prešel tudi v deroči tok in se nato z vodnim skokom na sotočju v Savinjo preoblikoval nazaj v mirni tok. Predor je sicer hidravlično predimenzioniran (vodni tok bi bil globok približno ½ višine predora), vendar so za prevodnost ključne hidravlične izgube na vtoku. Na podlagi izračuna je določeno, da je prevodnost predora pri Q_{100} Savinje približno 110 m³/s. Za detajlno delitev pretokov in prevodnost bi bilo potrebno objekt preizkusiti s fizikalnim hidravličnim modelom (IZVODE, 2005).

Varianta z razbremenjevanjem je zaradi rečne dinamike nenaraven pojav. Kljub načrtovanemu zadrževanju proda ni možno preprečiti negativnih posledic na območju ureditve. Hkrati je zaradi zastajanja plavin nad Lučami pričakovati povečano erozijo na odseku pod sotočjem z Lučnico. Tudi vzdrževanje vodnega režima v predoru in trasi Savinje do sotočja z Lučnico bi zahtevalo stalne posege (IZVODE, 2005). Zato sem na podlagi priporočila somentorja mag. Roka Fazarinca to možnost reševanja poplavne varnosti opustil.

6.1.2 Ureditev Savinje z izboljšanjem hidravličnih razmer

Iz rezultatov hidravličnega modeliranja (VGI-VL, 1995) je glede na sedanje stanje z ureditvami Savinje pod sotočjem in ureditvijo sotočja možno znižati gladino za največ 0,5 m.

Glede na možnost urejanja bom prikazal varianto ureditve Savinje z izboljšanjem hidravličnih razmer. Zagotoviti moramo poplavno varnost Luč. Glavne ureditve so:

- ✚ zamenjava lesenega mosta v profilu P31
- ✚ znižanje praga pod obstoječim mostom v Lučah
- ✚ sanacija nasipa na desnem bregu Savinje gorvodno od mosta
- ✚ ureditev sotočja Savinje in Lučnice ter ureditev Savinje dolvodno od sotočja

Predlagana varnostna višina za protipoplavne ukrepe s 100-letnim pretokom je 0,5 m, kar je trenutna praksa v Sloveniji. Minimalna zvišanja nasipov nad gladino vode v svetu se gibljejo od 0,5 m do 2,0 m (Brilly in sod., 1999).

Preglednica 4: Minimalna zvišanja nad gladino vode v svetu (Brilly in sod., 1999)

Država	Reka	Zvišanje (m)
ZDA	Mississippi	0,9
Italija	Po	0,8 - 1,0
Pakistan	Ind	1,2 - 1,8
Indija	Ganges	1,0 - 1,5
Kitajska	Hwang-Ho	1,6 - 2,0
Madžarska	Donava	0,5 - 1,0

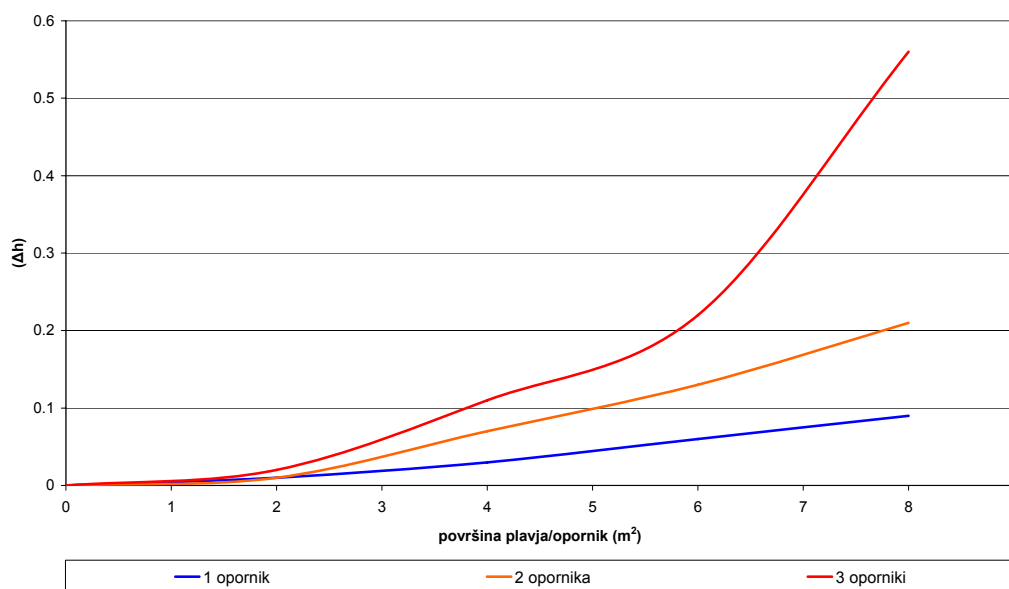
Varnostna višina je pogojena z visokimi hitrostmi vode (tudi več kot 4 m/s) in deročim tokom na posameznih odsekih, ki povzročata valovanje. Optimalna varnostna višina je pogojena s koeficientom energijskih izgub $\frac{v^2}{2g}$ in bi, ob že omenjeni hitrosti 4 m/s znašala 0,8 m. To varnostno višino sem upošteval le pod novim mostom. Na ostalih delih bi to pomenilo prevelike posege v prostor in večji finančni zalogaj.

6.2 Ukrepi za izboljšanje poplavne varnosti na obravnavanem odseku

6.2.1 Zamenjava mostu

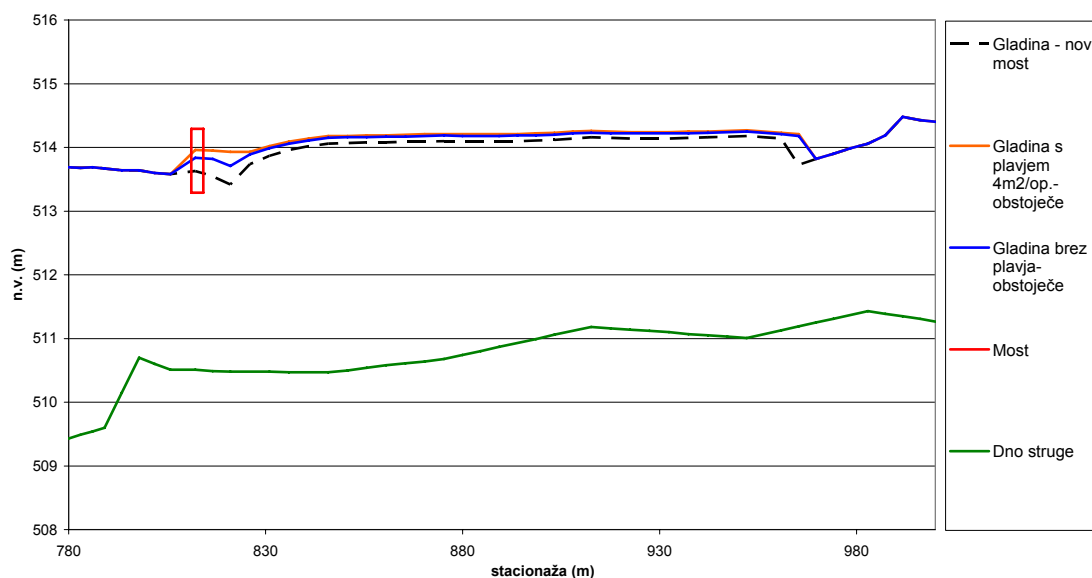
Obstoječi most ob visokih vodah nad Q_{20} povzroča zaježbo. Most Savinjo premošča s tremi polji (dva opornika sta na tretjinah struge). Na tem odseku je novembra leta 2000 Savinja preplavila nižinski del Luč. Mostni profil je bil praktično poln.

Po ocenah IZVODE je bil leta 2000 pretok Savinje okoli $200 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je približno Q_{50} . Na opornikih po poročanju opazovalcev ni bilo plavja. Ker pa plavje močno vpliva na pretočni prerez, sem za obstoječi most pripravil izračune gladin.



Slika 29: Primerjava gladin z upoštevanjem plavja pri Q_{50}

Izračun sem v HEC-RAS-u pognal za različne površine plavja na opornik. Površino plavja sem upošteval za dva, štiri, šest in osem $\text{m}^2/\text{opornik}$. To sem potem uporabil za enega, dva in vse tri opornike. Na y osi pa sem upošteval razmerje med gladino brez plavja in spremembo gladine za podano površino plavja. Relativno se je za površino plavja $8 \text{ m}^2/\text{opornik}$ in za vse tri opornike gladina pri pretoku $Q_{50} = 204 \text{ m}^3/\text{s}$, dvignila kar za 0,56 m (Slika 29).



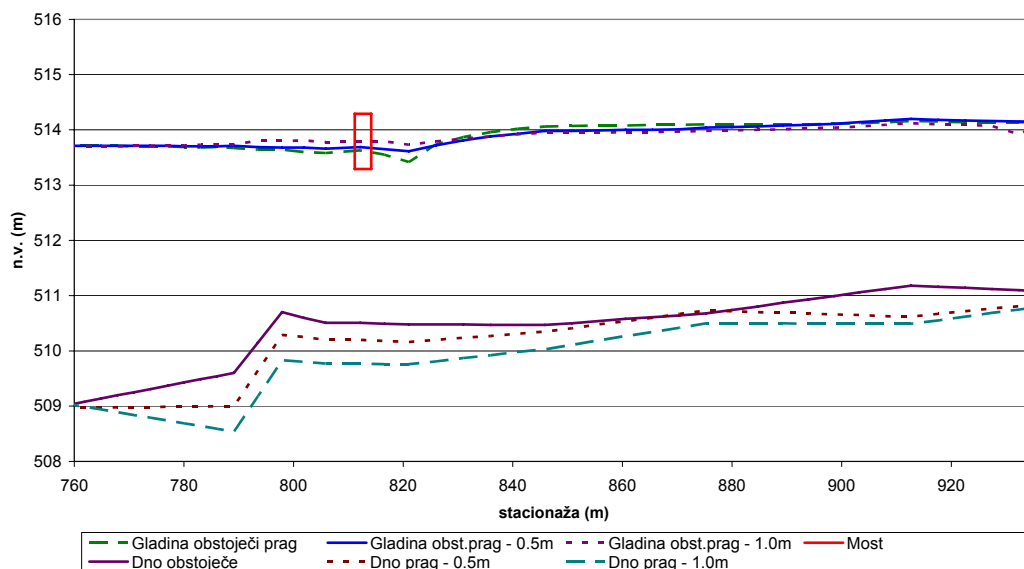
Slika 30: Primerjava gladin v območju mostu pri pretoku Q_{100}

Stacionaža mostu je 811 m (P31). Za določitev spodnje kote novega mostu sem najprej v HEC-RAS-u odstranil obstoječi most in izračunal gladine za novo geometrijo. Nato sem za 100-letno visoko vodo določil gladino v mostnem profilu. Ta gladina je v mostnem profilu 513,58 m.n.v. Nad to gladino sem za energijski potencial $\frac{v^2}{2g}$ za povprečno hitrost 4 m/s dvignil koto spodnjega roba mostu na 514,40 m.n.v.

Tako sem med stacionažama 812 m ter 821 m znižal gladine za 0,50 m do 0,30 m, glede na obstoječi most s plavjem. Gorvodno pa od stacionaže 821 m do 982 m za približno 0,10 m (Slika 30).

6.2.2 Znižanje jezua

Tik pod mostom v Lučah stoji manjši leseni jezu, ki povzroča stopnjo višine približno 1 meter. Pod jezom je speljana kanalizacija z desnega na levi breg Savinje. Ta jezu bi maksimalno znižali glede na prehod kanalizacije in temeljenje obrežnih zidov.



Slika 31: Primerjava gladin pri odstranitvi praga za Q_{100}

Gladina se z odstranitvijo praga v mostnem profilu poviša, gorvodno pa zniža (Slika 31). Z odstranitvijo praga, to pomeni, da bi niveleto znižali za 1 m bi dobili bolj enakomerno gladino po celotnem odseku (od mostu do stacionaže 930 m). Vendar bi ta odstranitev lokalno vplivala na dvig gladine v območju mostu za 0,20 m in s tem na dvig kote spodnjega roba mostu (zaradi zagotovitev varnostne višine 0,80 m). To bi pomenilo, da moramo dvigniti konstrukcijo mostu še za dodatnih 0,20 m. Ta dvig je težko uskladiti z naseljem Luče, ker bi bil most previsok in bi ga težko uskladili z urbanističnim načrtom. Zato sem izbral znižanje praga za 0,50 m. Gladina v mostnem profilu se dvigne za 0,08 m na 513,66 m.n.v. Kota spodnjega roba mostu bi ostala na 514,40 m.n.v., ker je mostna niveleta nagnjena in je to najnižja kota (levi breg). Na desnem bregu je kota 514,60 m.n.v in na sredini mostu 514,50 m.n.v.

Gorvodno pa smo do stacionaže 870 m znižali gladine za dodatnih ca 0,10 m zaradi ugodnejše nivelete dna struge Savinje.

6.2.3 Sanacija nasipa na desnem bregu Savinje gorvodno od mosta

Obstoječi nasip je izveden iz kaštnega temelja in nadgrajen s prodnim nasipom. Vodna stran nasipa je obložena s skalami dimenzij $d_m = 50-70$ mm. Predlagam, da se nasip dvigne in razširi na zaledno stran.

V HEC-RAS-u sem za geometrijo z novim mostom in znižanjem pragu za 0,50 m zapisal gladine v tekstovno datoteko in jo prevedel Aquaterro. Tam sem v modulu Vz dolžni profil za znižan prag in pripadajočo gladino 100-letnih visokih voda zapisal niveleto protipoplavnega nasipa, ki je bila višja za 0,50 m kot visoka voda. Tako sem dobil višino nasipov. V modulu Prečni prerezi sem vnesel niveleto protipoplavnega nasipa od profila P32 do profila P36. Na to višino sem postavil zgornjo koto nasipov. Nasip ima krono širine 3 m, nagib na vodni strani je 1:2, enak je tudi nagib proti terenu. Nasip se tesni z glinenim jedrom širine 1 m in globine 2 m pod zaledni teren. Tako podaljšamo precejno krivuljo skozi nasip. Površina nasipov se po izdelavi in komprimaciji nad načrtovano višino še humusira in zatravi. Strižne sile na vodni strani nasipa (nad gladino Q_5) so med 25 N/m² in 70 N/m². Za varovanje brežin lahko nad gladino 5-letne povratne dobe uporabimo travno rušo, za katero so mejne vrednosti med 50 N/m² in 80 N/m² (Mikoš, 2000).

Nasip pod gladino 5-letne povratne dobe pa zavarujemo s kamnometnim zavarovanjem v glavni strugi. Strižne napetosti na brežini, ki jih HEC-RAS izračuna so v povprečju med 100 N/m² ter 140 N/m². Za račun kamnometnega zavarovanja sem uporabil enačbe Escarameia in May (1992). Enačbe so uporabne za dimenzioniranje skalometov, prosto ali trdno spetih betonskih blokov in gabionov. To je edina poznana enačba v kateri je turbulentna napetost vključena v merljivem načinu. Faktor turbulence variira v sorazmerju s stanjem toka. Iz tabele za določanje vrednosti turbulence (Escarameia, 1998) sem izbral vrednost turbulentne napetosti (turbulent intensity) $TI = 0,6$ (Preglednica 5).

Preglednica 5: Turbulentna napetost po Escarameia in May (1992)

Nivo turbulence	
Po vrednosti	Turbulentna napetost TI
Normalna (nizka)	0,12
Normalna (višja)	0,20
Srednja do visoka	0,35 - 0,50
Zelo visoka	0,60

Enačba za določitev premera kamna:

$$D_{n50} = C \frac{U_b^2}{2g(s-1)} \quad (7.1)$$

kjer je D_{n50} = srednji premer kamna

C = koeficient, ki upošteva turbulentno napetost TI

g = gravitacijski pospešek

s = relativna specifična teža obloženega materiala

$$s = \frac{\rho}{\rho_s} = 2,65$$

U_b = hitrost v bližini dna (na 10% pretočne globine)

Vrednost C -ja določim iz Preglednice 6.

Preglednica 6: Vrednost C -ja po Escarameia in May (1992)

Tip obloge:	Vrednost C-ja	Opomba
skalomet	$12,3TI - 0,2$	vrednosti za $TI \geq 0,05$ in za dim. brežine in dna, nagib 1:2 ali več
prosti betonski bloki	$9,22TI - 0,15$	Vrednosti za $TI \geq 0,05$ in za dim. brežine in dna, nagib 1:2,5 ali več
gabioni	$12,3TI - 1,65$	Vrednosti za $TI \geq 0,05$ in za dim. brežine in dna, nagib 1:2 ali več

Za turbulentno napetost $TI \leq 0,50$ je povezava z U_b in povprečno hitrostjo v vertikali U_d .

Če ne moremo dobiti vrednosti za U_b uporabimo izraz:

$$U_b = (-1,48TI + 1,04)U_d \quad \text{za } TI \leq 0,50 \quad (7.2)$$

Za turbulentno napetost $TI > 0,50$ je povezava med U_b in U_d :

$$U_b = (-1,48TI + 1,36)U_d \quad \text{za } TI > 0,50 \quad (7.3)$$

V enačbi 7.1 je že upoštevan varnostni faktor za premer kamna D_{n50} .

V mojem primeru sem dobil vrednosti za $C = (12,3 \cdot 0,6 - 0,2) = 7,18$. Za povprečno hitrost U_d sem na obravnavanem odseku predpostavil vrednost 3,5 m/s in z enačbo 7.3 dobil vrednost $U_b = 1,65$ m/s. Za določitev premera kamna sem uporabil enačbo 7.1 in dobil vrednost $D_n = 0,60$ m.

Kamnomet je sestavljen iz kamnov s srednjim premerom 0,60 m. Peta nasipa se po priporočilu Escarameia in May (1992) varuje z 2-kratno debelino premera kamnov uporabljenih v kamnometnem zavarovanju. V našem primeru je to 1,20 m. Zaradi nevarnosti notranje erozije moramo dodati še filtrski sloj, kjer je premer zrn filtrskega sloja večji od velikosti odprtin med kamni ali pa uporabimo geotekstil.

Sam sem se odločil za uporabo geotekstila. Geotekstil mora v hidrotehničnih ureditvah zadostiti predvsem pogojema prepustnosti vodnega toka in zadrževanja zemeljskih delcev. Torej mora geotekstil preprečevati večjim delcem izpiranje, manjšim delcem pa prosto prehajanje. Večji delci tako ostanejo blizu geotekstila, manjši pa zapolnijo luknje med večjimi. Zagotoviti moramo dober kontakt med zemljino in geotekstilom. Če hočem izpolniti prvi pogoj – prepustnost je potrebno zagotoviti, da ima geotekstil večjo prepustnost (k_g), kot zemljina pod njim (k_s), ter da so tlačne izgube v predpisanih mejah (CUR, 1995). Enačba za prepustnost:

$$k_g \geq M \cdot k_s \quad (7.4)$$

kjer je M = koeficient, odvisen od tipa geotekstila

$M = 10$ za neobdelan geotekstil

$M = 50$ za (mehansko, kemijsko) obdelan geotekstil

k_s = prepustnost zemljine, dobljena v laboratoriju

Ker nisem imel podatkov, sem si pomagal z enačbo $k_s = 0,01 \cdot D_{10}^2$, kjer je D_{10} v mm in k_s v m/s.

Za določitev velikosti odprtin v geotekstilu pa uporabimo enačbi (Rankilor, 1997):

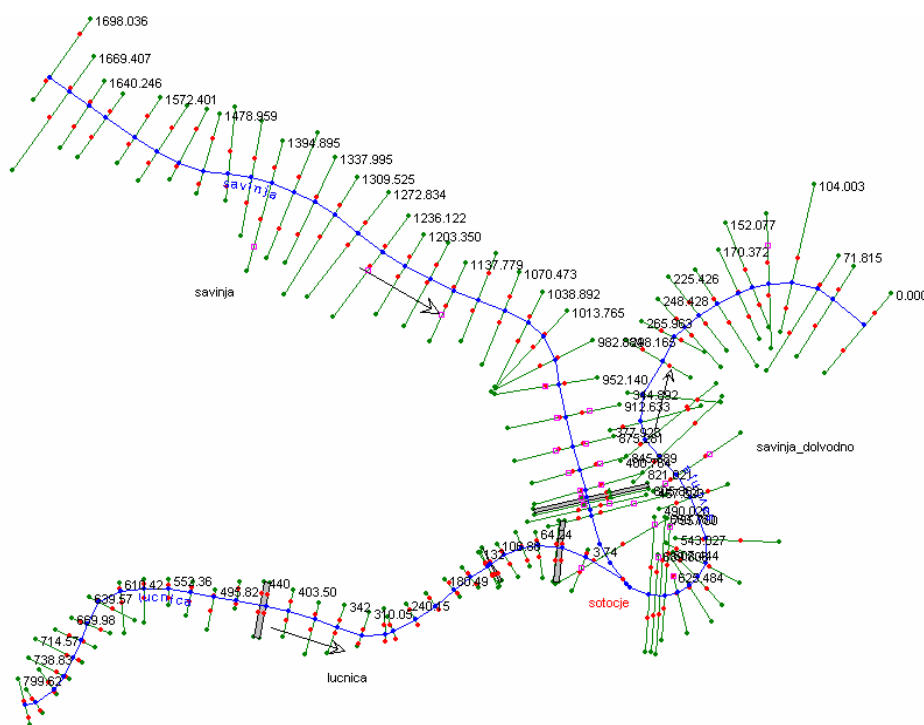
$$O_{90} \leq 2,5D_{90} \quad \text{za neobdelan geotekstil} \quad (7.5)$$

$$O_{90} \leq 5D_{90} \quad \text{za obdelan geotekstil} \quad (7.6)$$

Karakteristik zemljine nisem poznal in sem jih določil. $D_{10} = 0,01$ mm in $D_{90} = 0,60$ mm. Tako sem lahko izračunal $k_s = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s. Izbral sem obdelan geotekstil in s enačbo 7.6 določil odprtine v geotekstilu $O_{90} \leq 3$ mm. Za račun prepustnosti k_g sem uporabil enačbo 7.4 in določil $k_g \geq 5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Končne karakteristike geotekstila pa določimo skupaj s proizvajalcem. Detajli nasipa so prikazani v prilogi G.

6.2.4 Ureditev sotočja Savinje in Lučnice ter ureditev Savinje dolvodno od sotočja

Na območju sotočja je predvidena ureditev ostre leve krivine tik pod sotočjem, zožitev struge Lučnice in usmeritev struge Savinje z delilno zgradbo kot podaljšek obstoječega zidu ob Savinji oziroma Lučnici. Z ureditvijo oziroma skrajšanjem razdalje se skuša znižati potek gladin na območju sotočja, preprečiti zastajanje voda na sotočju ter izvesti čim bolj tangencialno sotočje Savinje in Lučnice, kar bi zmanjšalo hidravlične izgube na območju sotočja.



Slika 32: Prikaz geometrije v HEC-RAS-u za urejeno sotočje Savinje in Lučnice

Savinja in Lučnica se priključujeta pod kotom 32° . Z delilno zgradbo, ki jo načrtujemo se ta kot približa 20° . Tako smo dosegli tangencialno združitev. Razdalja se je skrajšala in struga Savinje se je pomaknila bolj na levo. Desno – konkavno brežino moramo obložiti z oblogo iz lomljenca v betonu, na manj izpostavljenih delih pa samo z oblogo iz skal (priloga F).

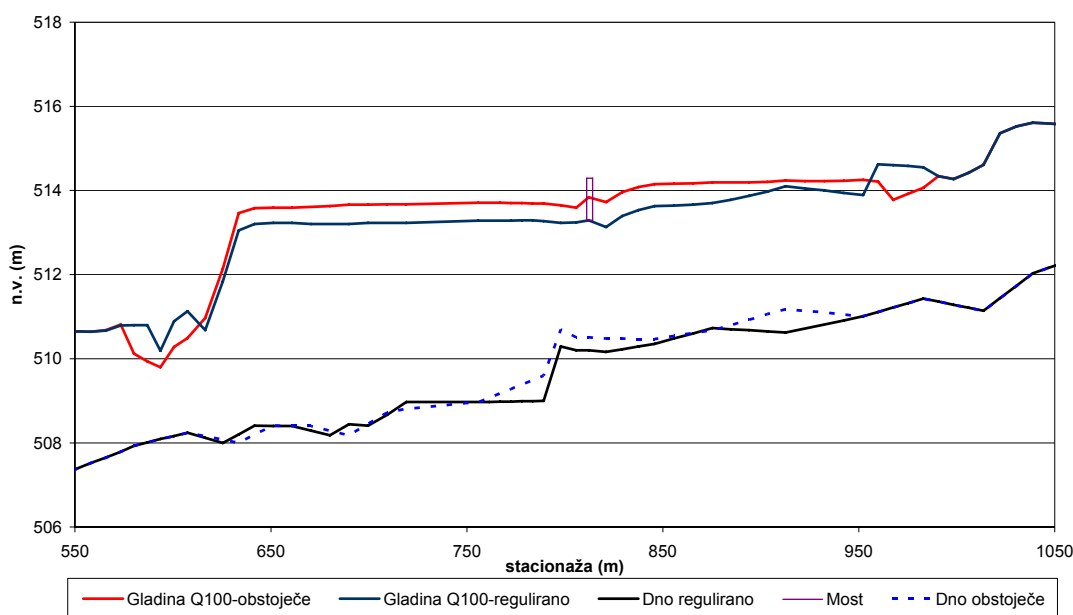
Določitev premera skal je povsem enaka kot v primeru nasipov gorvodno od mostu. Hitrosti na konkavni brežini so 4 m/s. Vrednost za turbulentno napetost (TI) sem vzel prav tako 0,6. Iz Preglednice 6 sem dobil vrednost za $C = 7,18$, iz enačbe 7.3 pa vrednost $U_b = 1,89$ m/s. Za določitev premera kamna sem uporabil enačbo 7.1 in dobil vrednost $D_n = 0,80$ m. Geotekstil, ki ga uporabim kot filter, pa ima enake karakteristike kot tisti, ki sem ga uporabil v nasipih gorvodno. Leva brežina se izvede v blagem nagibu 1:4 do 1:7 in se ne varuje s kamnito oblogo. V profilih, kjer je potrebno, oblikujemo normalno širino dna $B = 30$ m. To je v profilih P24, P25 in P26. Detajl za izvedbo ureditve krivine je prikazan v prilogi F.

Za preprečevanje poplavljanja moramo obstoječ obrežni zid med profiloma P30 in P28 nadvišat. Obrežni zid se dvigne na levem in desnem bregu za ca 0,70 m. Tako zagotovimo varnostno višino 0,50 m. Zid se izvede iz lomljenca v betonu. Naprej se nadaljuje v delilno

zgradbo. Ta se prav tako izvede iz lomljenca v betonu. Zgornja kota zgradbe je kota stoletne vode + 5,0 cm. Položaj delilne zgradbe je razviden v prilogi B, detajl pa v prilogi F.

6.3 Vpliv predlagane ureditve

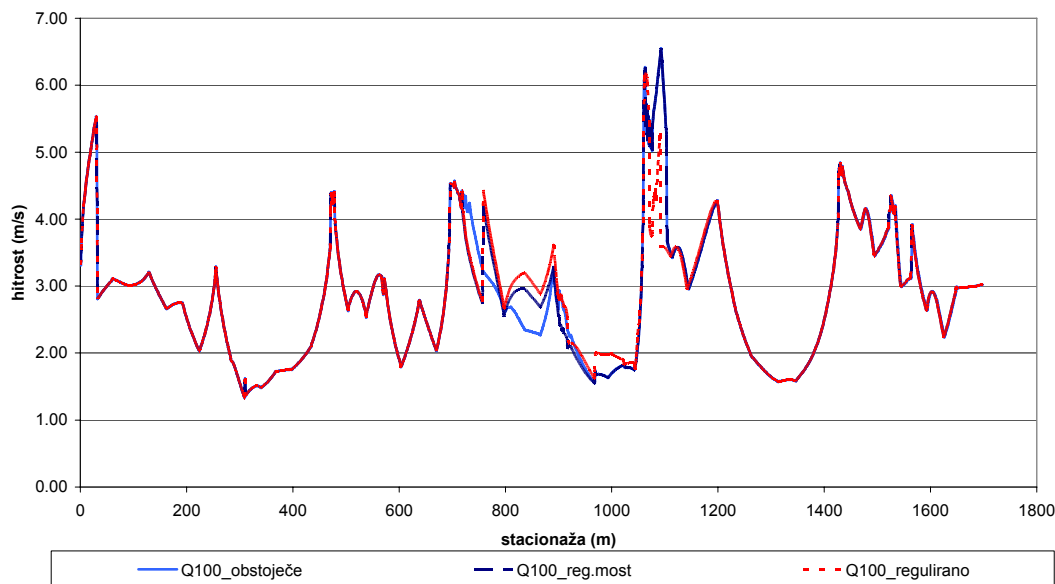
Prikazal sem rezultate pred ureditvijo, rezultate zamenjave mostu in znižanja jezua, ter končno varianto z ureditvijo sotočja. Primerjava gladin je prikazana na Sliki 33 ter podrobneje v prilogi C in D. Gladine sem znižal v stacionaži 952 m (P36) za ca 0,40 m in v stacionaži 641 m (P24) za ca 0,35 m. Vrednosti med tema profiloma pa se spreminjajo med 0,20 m in 0,60 m. Med tema stacionažama Savinja najbolj ogroža naselje Luče. Na profilih gorvodno od P36 bo cestni nasip projektirane obvoznice dodatno ščitil Luče in preprečeval poplavljanje.



Slika 33: Primerjava gladin Q_{100} pri obstoječem in projektiranem stanju

Ocenjeno skupno znižanje gladin zaradi projektirane ureditve, ki vključuje zamenjavo mostu, znižanje pragu in ureditev sotočja je v povprečju 0,5 m.

Na Sliki 34 je prikazan graf, ki prikazuje primerjavo hitrosti za obstoječe in regulirano stanje pri pretokih s 100-letno povratno dobo.



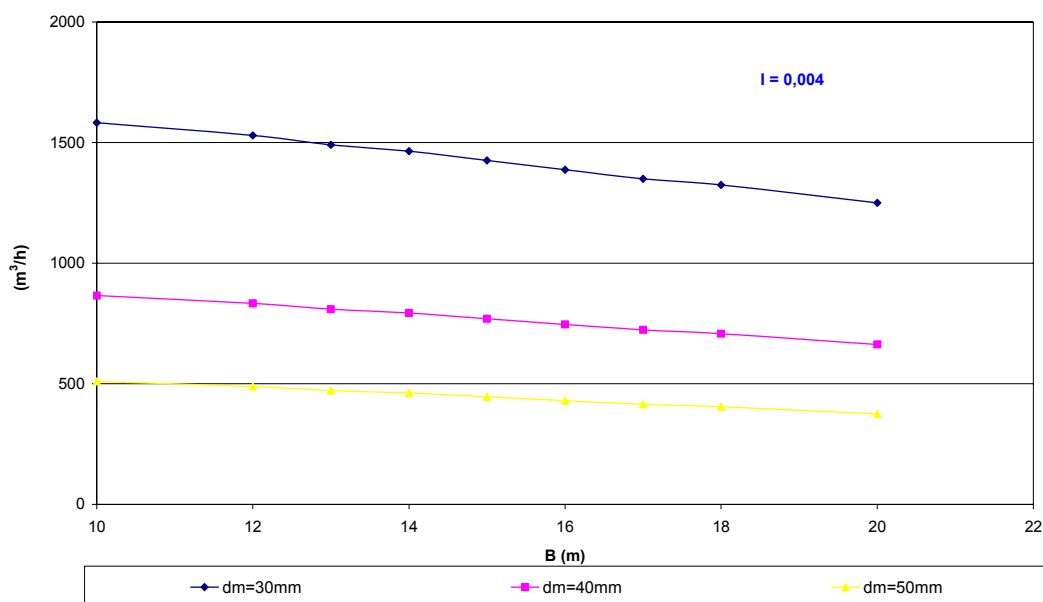
Slika 34: Primerjava hitrost za obstoječe in regulirano stanje za Q_{100}

Povprečne hitrosti se za celoten odsek le malenkostno spremenijo. Povprečna hitrost reguliranega stanja (2,83 m/s) je malo večja kot povprečna hitrost obstoječega stanja (2,81 m/s). Če pa se osredotočimo le na kritični odsek med stacionažami 700 in 1200 so te vrednosti nekoliko drugačne. Povprečna hitrost obstoječega stanja je 3,03 m/s, za regulirano stanje pa 3,08 m/s. Predvidene regulacije ne poslabšujejo razmer dolvodno od obravnavanega odseka.

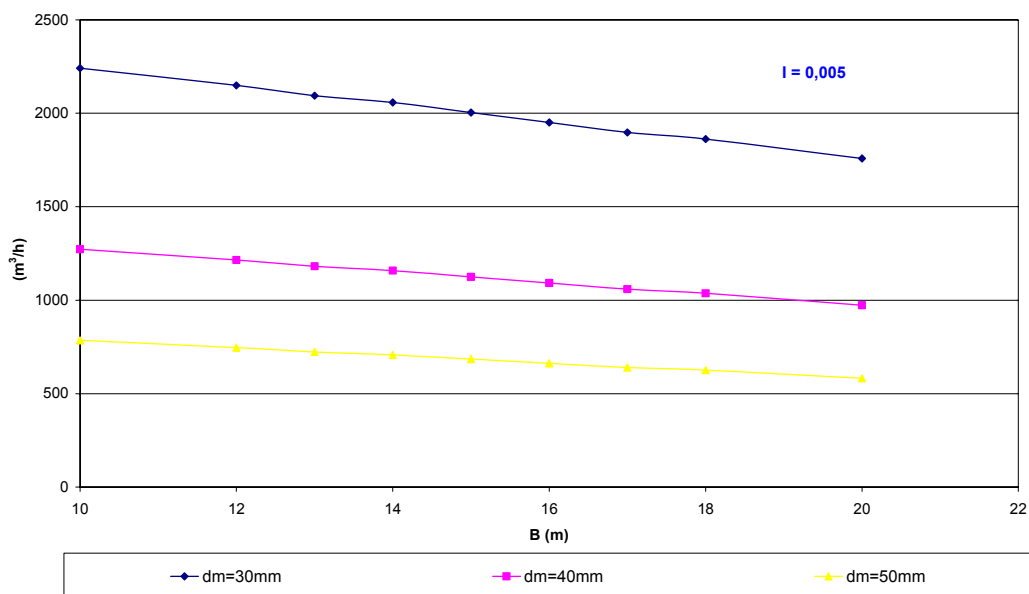
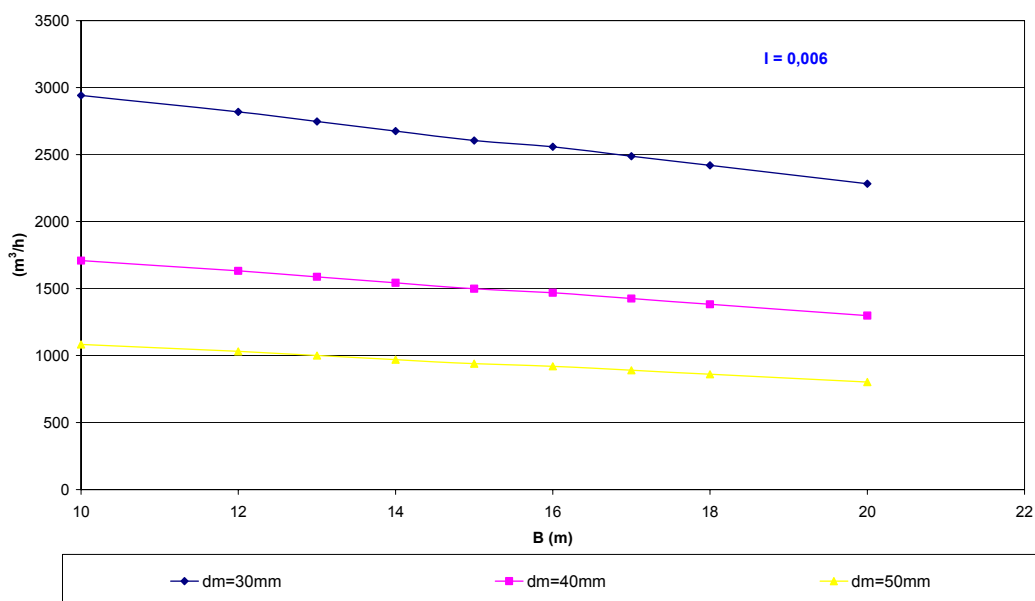
6.4 Premestitvena zmogljivost Savinje

Vodotoki so po naravi dinamični. To velja še posebej za struge vodotokov, kjer voda ne teče po stabilni kamniti podlagi, ampak v svojih lastnih naplavinah. Če dotok plavin (peska in proda), iz zaledja ne poteši premestitvene zmogljivosti vodotoka, je dejanski pretok plavin premajhen – delno zasičen vodni tok. Vodotok tako pogloblja strugo. Izoblikuje se posteljica struge, ki je bolj grobe strukture kot je njena podlaga. Nasprotno pa pretiran dotok predvsem drobnozrnatih plavin vodi k zasičenju vodnega toka. Ob takih razmerah voda ne more premeščati več plavin, kot je njena premestitvena zmogljivost. Vse to vodi k dvigovanju dna strug vodotokov, pogostemu razlivanju vodnih tokov in škodljivim vplivom poplav (Mikoš, 1998).

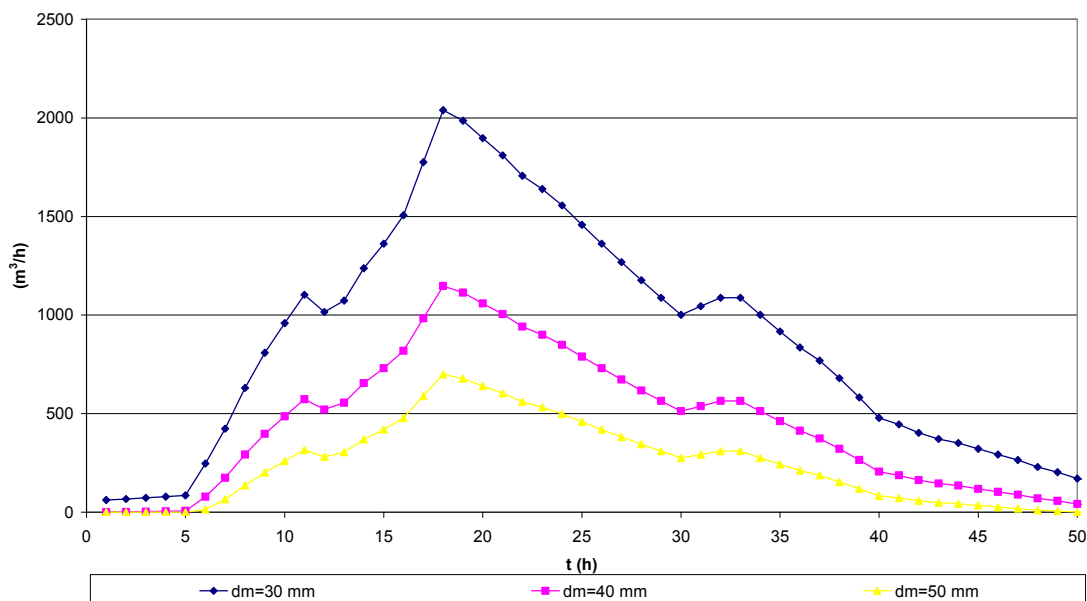
Za račun profilne premestitvene zmogljivosti sem uporabil brezdimenzijsko MPM enačbo (Mikoš, 2000), ki omogoča izračun premestitvene zmogljivosti vodnih tokov za rinjene plavine v izbranem prerezu vodotokov. Kot vhodni hidrološki podatek sem podal vrednost 50-letne visoke vode in čas trajanja 1 h. Padec dna struge Savinje sem spreminjal med $I = 0,004$, $I = 0,005$ ter $I = 0,006$. Širino dna struge sem spreminjal od 10 do 20 m, da bi prikazal vpliv spremembe širine dna vodotoka na njegovo premestitveno zmogljivost. Nagib brežin prečnega prereza sem prevzel kot 1:2, kar sem upošteval v zasnovi nasipov gorvodno od mostu. Aritmetično zrno plavin sem spreminjal od 30 mm do 50 mm. S tem sem prikazal vpliv spremembe zrnivosti dotekajočih plavin na premestitveno zmogljivost.



Slika 35: Premestitvena zmogljivost Savinje m^3/h za Q_{50} pri padcu $I = 0,004$

Slika 36: Premestitvena zmogljivost Savinje m^3/h za Q_{50} pri padcu $I = 0,005$ Slika 37: Premestitvena zmogljivost Savinje m^3/h za Q_{50} pri padcu $I = 0,006$

Pričakovano so največje zmogljivosti Savinje pri padcu $I = 0,006$ za najmanjše srednje zrno $d_m = 30$ mm. Ta vrednost se za Q_{50} približuje 3000 m^3 plavin na uro v izbranem karakterističnem prerezu (Slika 37).



Slika 38: Premestitvena zmogljivost Savinje za poplavni val novembra 2000

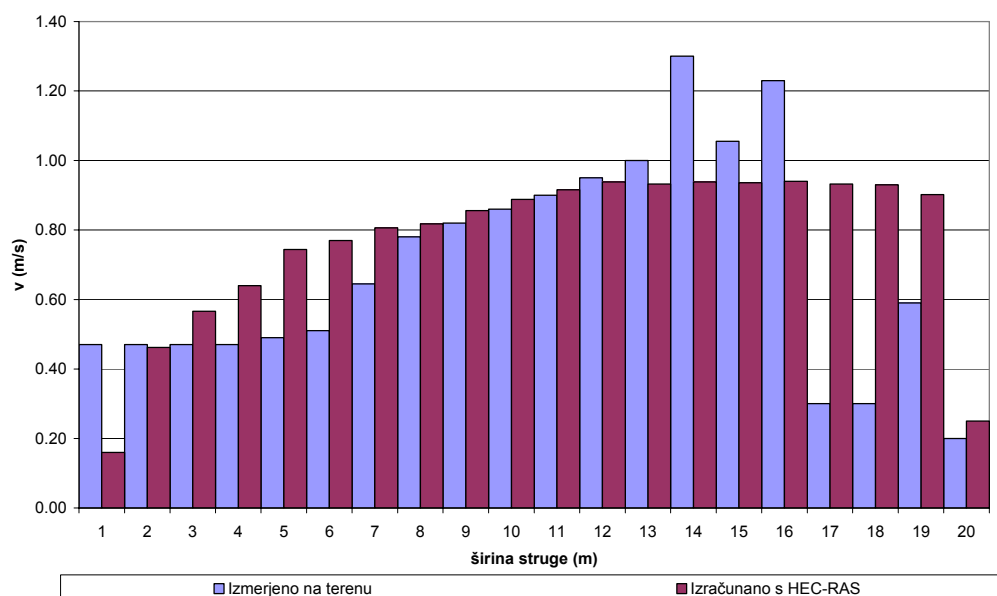
Za točno določeni profil na stacionaži 952 m sem pognal simulacijo v HEC-RAS-u za nestalni tok (hidrogram november 2000) in za različna srednja zrna primerjal premestitveno zmogljivost Savinje. Na Sliki 38 lahko vidimo, kako se je premestitvena zmogljivost spreminjala po času ter vpliv lokalne značilnosti prereza (hidravlični radij) na zmožnost premeščanja rinjenih plavin. V 50 urah se potencialno premesti 42225 m^3 pri $d_m = 30 \text{ mm}$, 22559 m^3 pri $d_m = 40 \text{ mm}$ ter 12347 m^3 pri $d_m = 50 \text{ mm}$.

Takšna analiza lahko da le prvi vpogled v primernost izbranih širin in vzdolžnih padcev strug vodotoka, saj ne upošteva dinamike razvoja strug: predvsem vplivov dotokov rinjenih plavin iz zaledja na zasičenost vodnih tokov, časovnega spreminjanja pretokov ter nenehnega prilagajanja struge pretokom voda in plavin (Mikoš in sod., 2002).

6.5 Kontrola izračunanih hitrosti

Z meritvijo na terenu sem opravil meritve hitrosti Savinje s hidrometričnim krilom.

Meritev sem izvedel v profilu P30 ter v profilu P24. V profilu P30 je bila povprečna gladina pri pretoku $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ $0,37 \text{ m}$. V profilu P24 pa pretok $6,9 \text{ m}^3/\text{s}$ in povprečna globina $0,46 \text{ m}$. Te količine sem upošteval kot kontrolo za Manningove koeficiente upoštevane v HEC-RASu. Podatke, ki jih je program izračunal v obdelovanih profilih, sem primerjal s izmerjenimi vrednostmi.



Slika 39: Primerjava hitrosti izračunanih s HEC-RAS-om in izmerjenih v P24

Na Sliki 39 vidimo, da vrednosti dokaj sovpadajo. Malenkostno so večje vrednosti hitrosti izračunane s programom. To je posledica n_g , ki sem ga predpostavil, točnosti meritve ter natančnosti hidrometričnega krila. Najvišje hitrosti pa so večje v primeru izmerjenih vrednosti, kar pa je posledica tega, da sem meritve izvajal v treh različnih višinah, HEC-RAS pa računa hitrost v eni višini.

Povprečna vrednost hitrosti je $0,70 \text{ m/s}$ (izmerjene) in $0,77 \text{ m/s}$ (izračunane). Program torej prevzame bolj gladke razmere, kot sem jih jaz izmeril.

7 ZAKLJUČEK

Savinja je najmočnejši pritok reke Save v Sloveniji in poplavno tudi najbolj ogroženo območje v Sloveniji. Po naravi je Savinja hudourniška reka. Razlika med sušnim pretokom in visokimi vodami Savinje je lahko tudi več kot 300 kratna. Relativno široko padavinsko območje in obilne padavine, ki trajajo tudi več dni, povzročijo nastop visokih voda, ki lahko ob intenzivnejših padavinah proti koncu dogodka vodi v poplave. Obravnavani odsek se nahaja na sotočju Savinje in Lučnice. Na tem sotočju stoji gručasto predalpsko naselje Luče. Poplave s povratno dobo daljšo kot 20 let prelivajo levi in desni breg v območju mostu in obstoječega nasipa ter poplavlajo urbane površine.

Struga Savinje je v območju kaštnega jezusa zelo široka (ca 70 m), dolvodno pa se oža na normalno širino ca 30 m – 40 m. Na levem bregu se teren strmo dviguje v pobočje Breznice, desni breg pa je primeren za kmetovanje ali poselitev. Na celotnem odseku od jezusa do sedanjega lesenega mostu je desni breg obdan z visokovodnim nasipom, ki pa je neustrezne višine in kvalitete. Dolvodno od mostu je 1 m visok jez. Sotočje je neugodno, ker Savinja priteka pod velikim kotom na smer Lučnice in se reki medsebojno zaježujeta. Struga se dolvodno hipoma razširi, kar zmanjšuje hitrosti ter poslabša pretočno zmogljivost.

Za oceno poplavne varnosti ter za potrebe načrtovanja hidrotehničnih ureditev sem izdelal hidravlični računski model. Na podlagi geodetskih podlog in ortofoto posnetkov sem s pomočjo programske opreme Aquaterra pripravil vhodne geometrijske podatke za hidravlični paket HEC-RAS 3.1.3. S HEC-RAS-om sem opravil hidravlične izračune za stalni ter nestalni tok. Za hidravlični račun stalnega toka sem upošteval pretoke s 100, 50, 20, 10, 5 in 2-letno povratno dobo ter za izmerjen pretok dne 28.6.2006. Pri nestalnem toku pa sem kot vhodni podatek podal interpolirani hidrogram pretokov za visokovodno situacijo novembra 2000. Konica teoretične visoke vode je bila podobna 50-letni povratni dobi za stalni tok. Za ti dve količini sem opravil tudi primerjavo med stalnim in nestalnim tokom. Ta primerjava je pokazala določene slabosti programske opreme. Predvsem to velja za omejitve pri vnosih posameznih odsekov vodotokov. Gladine, ki so bile izračunane za nestalni tok so v povprečju

za 15% do 30% nižje kot gladine izračunane za stalni tok pri isti konici visoke vode ($Q_{50} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$).

Rezultati, ki sem jih dobil z programom HEC-RAS so potrdili poplavno ogroženost naselja Luče. Ogroženo je zlasti območje med stacionažo 1070 m in sotočjem. Nasipi so preplavljeni za vse visoke vode z povratno dobo večjo kot 20 let. Za pretoke s 100-letno povratno dobo pa so urbanizirane površine poplavljenе še na razdalji 70 – 80 m od desnega brega Savinje. S hidrotehničnimi ureditvami opisanimi v diplomski nalogi sem poskušal zagotoviti poplavno varnost Luč.

Osredotočil sem se na izboljšanje hidravličnih razmer z zamenjavo lesenega mostu, znižanjem obstoječega pragu ter ureditvijo sotočja Savinje in Lučnice. Kot dodaten ukrep pa sanacijo in nadvišanje obstoječega protipoplavnega nasipa. Pri obstoječem mostu sem primerjal pretočnost sposobnost brez in s plavjem. Z računom sem dokazal, da se gladine dvignejo v sorazmerju s površino plavja na oporniku. Z zamenjavo mostu sem lokalno znižal gladine za povprečno 0,20 m. Tik pod mostom v Lučah stoji manjši leseni jez pod katerim je speljana kanalizacijska cev iz desnega na levi breg. Z odstranitvijo pragu bi dobili bolj enakomerno niveleto ter znižali gladine. Na podlagi računa in primerjanja gladin sem kot najustreznejšo varianto izbral znižanje pragu za 0,50 m ter tako znižal gladine gorvodno od mostu za dodatnih ca 0,10 m. Prevladujoči vpliv na poplavno varnost pa ima predvsem sotočje. Z delilno zgradbo sem dosegel tangencialno priključitev Savinje in Lučnice. Struga Savinje se je pomaknila bolj na levo. Desno brežino je potrebno obložiti s kamnometno oblogo, levo brežino pa se lahko pusti nezavarovano. Skupno znižanje gladin zaradi projektirane ureditve je v povprečju 0,50 m.

Posebej sem obdelal tudi sanacijo obstoječega poplavnega nasipa gorvodno od mostu do izliva Struge. Projektirano višino nasipov sem določil tako, da sem pri gladini Q_{100} dodal priporočeno varnostno nadvišanje 0,50 m. Nasip se izvede na desnem bregu s krono širine 3 m, ki omogoča strojno vzdrževanje in nagibom 1:2. Da bi preprečil precejanje vode skozi nasip sem vanj vgradil glineno jedro. Za varovanje brežine nad gladino 5-letne visoke vode sem uporabil travno rušo, pod to gladino pa dimenzioniral kamnometno zavarovanje. Dodatno

pa sem vzdolž celotnega nasipa okrepil peto nasipa. Za preprečevanje izpiranja in notranje erozije sem dimenzioniral geotekstilno zavarovanje.

V nadaljevanju sem prikazal račun premestitvene zmogljivosti Savinje. V računu je prikazana odvisnost med premerom srednjega zrna, širino dna struge ter padcem struge. Za izbrani karakteristični prerez sem za določeno visokovodno situacijo primerjal premestitveno zmogljivost Savinje glede na izbrano srednje zrno d_m . Za $d_m = 30$ mm se v 50-ih urah potencialno premesti 44225 m^3 pri pretoku s konico $Q_{50} = 204 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na reki Savinji sem v dveh profilih opravil meritve hitrosti vodotoka s hidrometričnim krilom. Rezultate, ki sem jih pridobil s hidrometričnim krilom Valeport sem uporabil za primerjavo s hitrostmi dobljenimi s programom HEC-RAS. Program je prevzel bolj ugodne razmere, kot pa sem jih dobil. Te vrednosti so v mejah natančnosti našega izračuna ter so odvisne od točnosti meritve, natančnosti hidrometričnega krila ter predpostavljenega Manningovega števila.

Predlagane ureditve obsegajo klasične hidrotehnične ukrepe, ki zagotavljajo zahtevano varnost pred 100 – letnimi visokimi vodami le z izvedbo vseh naštetih ukrepov. Te ureditve zagotavljajo naravni potek Savinje in Lučnice brez prevelikih dinamičnih sprememb. Dodatno je potrebno preučiti izlivni del Struge in določiti nasip bodoče obvoznice. S programom , ki omogoča večdimenzionalen račun hitrosti bi lahko podrobneje analizirali sotočje, kjer je tok izrazito dvodimenzionalen. Vendar to presega obseg te diplomske naloge.

VIRI IN LITERATURA

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj M. 1999. Vodne ujme: varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.

Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov, Skripta, verzija 01.2000. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 182 f.

Mikoš, M., Petkovšek, G., Štraus, L., Brilly, M., 2002. Prodna bilanca povodja reke Koritnice. Ljubljana, Gradbeni vestnik, letnik 51: 340-341 str.

Mikoš, M. 1998. Erozija v Sloveniji. Delo, Znanje za razvoj: 23-24 str.

Escarameia, M. 1998. River and channel revetments. A design manual. London, Thomas Telford Publishing: 245 str.

Muškatirović, D. 1979. Regulacija reka. Beograd, Građevinski fakultet Beograd, Katedra za primenjenu hidrotehniku: 429 str.

CGS. 2006. Uporabniški priročnik Aquaterra. Ljubljana, CGS: 252 str.

HEC 2005a. User's manual version HEC-RAS 3.1.3. U.S. Army Corps of Engineers River Analysis System.

HEC 2005b. Hydraulic reference manual. U.S. Army Corps of Engineers River Analysis System

Hicks, D. M., Mason, P.D. 1998. Roughness Characteristic of New Zealand Rivers. National Institute of Water and Atmospheric Research, Water Resources Publications, Christchurch, New Zealand: 329 str.

Brilly, M., Šraj, M. 1998. Digitalna prostorska baza vodnih območij SRS – Topologija in atributi GIS. Poročilo KHS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 11 f.

Kolbezen, M. in Pristov, J., 1998. Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije: 98 str.

Ortofoto. 2005. Geodetska uprava republike Slovenije

Temeljni topografski načrt merila 1:10 000. 1993. Geodetska uprava republike Slovenije

Autodesk. 2006. AutoCad 2006 Help and Support. Autodesk inc.

Kobold, M., Sušelj, K. 2004. Padavinske napovedi in njihova nezanesljivost v hidrološkem prognoziranju. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 61-75 str.

Vodno bogastvo Slovenije. 2003. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje: 131 str.

Kataster vodomernih postaj. 2003. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje

Marinček, M. 1992. Vzroki poplave v Celju 1. novembra 1990. Zbornik Poplave v Sloveniji. Ljubljana, RS, Ministrstvo za obrambo: 155-161 str.

Šraj, M. 2000. Uporaba šifrantna padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije za pripravo hidroloških modelov, Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 109 str.

Hidravlične modelne raziskave ureditve Savinje v območju pritoka Lučnice. 1995. Idejni projekt. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut: 20 f.

Vodnogospodarske ureditve in poplavna varnost Luč z vidika predvidene gradnje obvoznice.
2005. Poročilo. Ljubljana, Inženiring za vode

Burja, D. 1992. Hidrološka študija Savinje. Ljubljana, Vodnogospodarski inštitut: 3 str.

Escarameia, M., May, R.W.P. 1992. Channel protection downstream of structures. HR
Wallingford: 212 str.

Rankilor, P.R. 1997. Geosynthetics design notes. Course on practical application of
Geotextiles to civil engineering problems. Ascot, United Kingdom: 283 str.

VIRI V ELEKTRONSKI OBLIKI

The Hydrologic Engineering Center:

www.hec.usace.army.mil

Valeport Ltd:

www.valeport.co.uk

Agencija RS za okolje:

www.arso.gov.si

CGS:

www.cgsplus.si