

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Strnad, T., 2016. Idejna zasnova ureditve razbremenilnega kanala za visoke vode. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Rusjan, S., somentor Sodnik, J.): 40 str.
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5957/>

Datum arhiviranja: 3-10-2016

University
of Ljubljana
Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Strnad, T., 2016. Idejna zasnova ureditve razbremenilnega kanala za visoke vode. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Rusjan, S., co-supervisor Sodnik, J.): 40 pp.
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5957/>

Archiving Date: 3-10-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO**

Kandidat:

TADEJ STRNAD

**IDEJNA ZASNOVA UREDITVE RAZBREMENILNEGA
KANALA ZA VISOKE VODE**

Diplomska naloga št.: 72/B-VOI

**CONCEPTUAL PLAN OF BYPASS CHANNEL FOR
FLOOD WATERS**

Graduation thesis No.: 72/B-VOI

Mentor:

doc. dr. Simon Rusjan

Somentor:

viš. pred. mag. Jošt Sodnik

Ljubljana, 22. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

| Stran z napako | Vrstica z napako | Namesto | Naj bo |
|----------------|------------------|---------|--------|
| | | | |

»Ta stran je namenoma prazna.«

IZJAVE

Podpisani študent Tadej Strnad, vpisna številka 26300350, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Idejna zasnova ureditve razbremenilnega kanala za visoke vode**,

IZJAVLJAM:

1. obkrožite eno od variant a) ali b):

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani,

September 2016

Podpis študenta: Tadej Strnad

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|--|
| UDK: | 556.536:626.861/.862(043.2) |
| Avtor: | Tadej Strnad |
| Mentor: | doc. dr. Simon Rusjan, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž. |
| Somentor: | viš. pred. mag. Jošt Sodnik, univ. dipl. inž. grad |
| Naslov: | Idejna zasnova ureditve razbremenilnega kanala za visoke vode |
| Tip dokumenta: | diplomska naloga – univerzitetni študij |
| Obseg in oprema: | 40 str., 21 sl., 6 pregl., 6 graf. |
| Ključne besede: | Vodogradbeni ukrepi, hidrološka analiza, hidravlična analiza, razbremenilni kanal, vodomerna postaja, hidravlična prevodnost. |

IZVLEČEK

Primarna funkcija razbremenilnega kanala izhaja iz njegovega imena, razbremenjevanje visokih voda. Razbremenilni kanal je eden od mnogih vodogradbenih ukrepov, s katerim zagotavljamo poplavno varnost. V praksi se uporablja bolj redko, saj ga je po eni strani težko prostorsko umestiti, po drugi pa predstavlja umetno strugo, ki razdvoji območje na dve enoti.

V diplomski nalogi se soočimo s problematiko nepremišljenih posegov v prostor, kjer se omenjeni ukrep izvaja zgolj na lokalni ravni, brez poznavanja teoretičnega ozadja. Omenjeni vodogradbeni ukrep predstavimo v širšem pogledu, kjer opredelimo tako njegove vzroke kot posledice umestitve v prostor in njegovega obstoja nasploh. V vzročnem smislu se opredelimo na sam izvor potrebe po gradnji razbremenilnega kanala, to so predvsem naravnogeografske lastnosti, vezane na vodotok z njegovim zaledjem. Po končani vzorčni analizi preidemo na proučevanje posledic. V tem sklopu, predvsem z različnimi hidrološkimi in hidravličnimi analizami, poskušamo poiskati ustrezen rešitev in omejiti posledice.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

| | |
|-------------------------|--|
| UDC: | 556.536:626.861/.862(043.2) |
| Author: | Tadej Strnad |
| Supervisor: | prof. Simon Rusjan, Ph. D. |
| Co supervisor: | assist. Jošt Sodnik, M. Sc. |
| Title: | Conceptual plan of bypass channel for flood waters |
| Document type: | graduation thesis – university studies |
| Scope and tools: | 40 p., 21 fig., 6 tab., 6 graph. |
| Keywords: | Water construction, hydrological and hydraulic analysis, bypass channel, water measure station, hydraulic channel conductivity. |

ABSTRACT

Main function of the bypass channel is evident from its name- it means relieving high waters. The bypass channel is one of many water related construction measures, which we use to ensure flood safety. In practice it is used quite rarely, firstly because it is hard to spatially place it and secondly it represents artificial channel which divides the area into two units.

In this diploma thesis we face the problematic question of unthoughtful interventions where the mentioned measure is only used on local basis, without knowing the theoretical background. We present the water construction measure in wider perspective where we define its causes as well as its consequences of placement in the space and its existence in general. Regarding to the cause we define the background of needs to construct the bypass channel. These are natural-geographical characteristics connected to watercourse and its surrounding area. After the finished sample analysis we pass to researching the consequences. In this area of research especially with different hydrological and hydraulic analysis we try to find the perfect solution and reduce the consequences.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Prvotno se Iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Simonu Rusjanu in somentorju viš. pred. mag. Joštu Sodniku za vso strokovno pomoč pri realizaciji diplomskega dela.

Zahvalil bi se tudi Urški Marinčič in Maji Lorger za pomoč pri oblikovanju in lekturi.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

| | |
|---|-------------|
| BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK..... | V |
| BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT | VII |
| KAZALO SLIK..... | XIII |
| KAZALO PREGLEDNIC | XV |
| KAZALO GRAFIKONOV..... | XVII |
| | |
| 1 UVOD..... | 1 |
| 2 OPIS TEORETIČNIH IZHODIŠČ | 2 |
| 2.1 Varnostni ukrepi za zagotavljanje poplavne varnosti | 2 |
| 2.1.1 Vodogradbeni ukrepi | 2 |
| 2.1.1.1 Nasipi | 3 |
| 2.1.1.2 Zadrževalniki | 4 |
| 2.1.1.3 Kanaliziranje vodotokov..... | 4 |
| 2.1.1.4 Urejanje povirij..... | 4 |
| 2.1.1.5 Oddušni in razbremenilni kanali..... | 5 |
| 2.1.1.6 Premestitev celotnega (urbanega) območja..... | 5 |
| 2.1.2 Negradbeni ukrepi | 6 |
| 2.3 Projektni pretok | 6 |
| 2.4 Omejitve v prostoru (Natura 2000)..... | 7 |
| 3 NARAVNOGEOGRAFSKE ZNAČILNOSTI OBMOČJA REČNE STRUGE LOŽNICA IN NJENEGA ZALEGJA..... | 8 |
| 3.1 Splošna opredelitev in omejitev na območje izbranega odseka, predvidenega za urejanje razbremenilnega kanala | 8 |
| 3.2 Geografske značilnosti vodotoka | 8 |
| 3.3 Topografske lastnosti prispevnega območja..... | 9 |
| 3.3.1 Pretežna raba tal na prispevnem območju..... | 10 |
| 3.4 Pedološke lastnosti, vezane na vodotok | 10 |
| 3.5 Hidrografski oris prispevnega območja in njenega zaledja | 12 |
| 3.6 Pretekli poplavni dogodki..... | 13 |
| 3.6.1 Značilnosti poplavnega dogodka leta 1991 | 15 |
| 3.7 Razporeditev padavin..... | 15 |
| 4. HIDROLOŠKA ANALIZA IZBRANEGA POREČJA NA VODOTOKU LOŽNICE | 16 |
| 4.1 Namen analize | 16 |
| 4.2 Metode uporabljene pri analizi..... | 16 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3 Ocena Q100 na podlagi linearne regresije..... | 16 |
| 4.3.1 Teoretične osnove | 16 |
| 4.3.1.1 Regresija in korelacija..... | 17 |
| 4.3.2 Linearna korelacija vodomerne postaje Levec 1 in Brezovec..... | 17 |
| 4.3.2.1 Kontrola medsebojne odvisnosti vodomernih postaj | 18 |
| 4.3.3 Izračun maksimalnih letnih pretokov za vodomerno postajo Brezovec..... | 22 |
| 4.3.4 Ocene pretokov s pripadajočo povratno dobo..... | 22 |
| 4.4 Določanje površinskega odtoka po Kresnikovi enačbi | 23 |
| 4.4.1 Teoretična izhodišča..... | 23 |
| 4.4.2 Ocene pretokov s pripadajočo povratno dobo..... | 23 |
| 4.5 Ugotovitve | 24 |
| 5 HIDRAVLIČNA ANALIZA..... | 25 |
| 5.1 Namen analize | 25 |
| 5.2 Način dela | 25 |
| 5.3 Teoretične osnove | 25 |
| 5.3.1 Hidravlični izračun z uporabo Manningove enačbe | 25 |
| 5.3.2 Določanje koeficienta hrapavosti v praksi | 26 |
| 5.3.3 Bočni preliv za režim mirnega toka | 27 |
| 5.3.4 Izračun prevodnosti | 28 |
| 5.4 Predhodne raziskave..... | 28 |
| 5.5 Analiza obstoječega stanja | 30 |
| 5.6 Hidrotehnični objekti, ki omejujejo prevodnost struge | 31 |
| 5.7 Določitev kritičnega objekta | 33 |
| 5.8 Izboljšanje prevodnosti | 35 |
| 6 SKLEP..... | 37 |
| VIRI..... | 38 |

KAZALO SLIK

| | |
|---|----|
| Slika 1: Vodotok Ložnica s prikazano referenčno točko (Geopedia, 2013). | 9 |
| Slika 2: Levo – prispevno območje, desno – dolžina najdaljše vodne poti (ARSO, 2006). | 9 |
| Slika 3: Raba tal prispevnega območja (Geopedia, 2013). | 10 |
| Slika 4: Shematski prikaz predvidene ureditve. | 11 |
| Slika 5: Pedološka karta (Geopedia, 2013). | 12 |
| Slika 6: Struga ob vstopu na Zaloško ravnico v normalnem stanju (terenski ogled, 2013). | 13 |
| Slika 7: Struga v času poplav Tavčar, 2007). | 13 |
| Slika 8: Gosta mreža manjših hudourniških pritokov Ložnice (ARSO, 2006). | 14 |
| Slika 9: Shematski prikaz ocene 100-letnega pretoka. | 16 |
| Slika 10: Shematski prikaz podatkov za obe vodomerni postaji | 18 |
| Slika 11: Statistično izvedenost korelacijskega faktorja. | 21 |
| Slika 12: Trapezno korito kot računski model za izračune hidravlične prevodnosti. | 28 |
| Slika 13: Razbremenilni kanal Ložnice (ARSO, 2006), hidrografski in topografski podatki (ARSO, 2006) in povprečni rezultati terenskih meritev (avtor, terenski ogled, 2016). | 30 |
| Slika 14: Premostitev 1 (Skok, 2016). | 32 |
| Slika 15: Premostitev 2 (Skok, 2016). | 32 |
| Slika 16: Premostitev 3 (Skok, 2016). | 32 |
| Slika 17: Premostitev 4 (Skok, 2016). | 32 |
| Slika 18: Premostitev 5 (Skok, 2016). | 32 |
| Slika 19: Splošna poplavna karta (Geopedia, 2013). | 35 |
| Slika 20: Razdelilni objekt, desno razbremenilnik, naravnost Ložnica (Skok, 2016). | 36 |
| Slika 21: Slabo vzdrževanje na razdelilnem objektu (Skok, 2016). | 36 |

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|---|----|
| Preglednica 1: Izmerjen maks. pretoki v letu na vodomerni postaji Levec 1 in Brezovec za časovno obdobje 1976-1982 (ARSO, 2006) in preračunani pretoki na podlagi linearne korelacije, prikazano s pripadajočim odstopanjem vrednosti. | 20 |
| Preglednica 2: Rezultati hidrološke analize. | 24 |
| Preglednica 3: Parametri za določanje koeficienta nG (Steinman, 2010). | 27 |
| Preglednica 4: Pretočna sposobnost razbremenilnika za prevajanje 100-letnega pretoka. . | 33 |
| Preglednica 5: Pretočna sposobnost razbremenilnika za prevajanje 50-letnega pretoka. ... | 33 |
| Preglednica 6: Pretočna sposobnost razbremenilnika za prevajanje 10-letnega pretoka. ... | 34 |

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO GRAFIKONOV

| | |
|---|----|
| Grafikon 1: Zvišanje nasipov nad projektno vodno gladino (prirejeno po: Chow, 1959; Brilly, Mikoš in Šraj, 1999). | 3 |
| Grafikon 2: Hidrogram največjih letnih pretokov vodomerne postaje Levec 1 in Brezovec za časovno obdobje 1966-1983..... | 19 |
| Grafikon 3: Razsevni graf merjenih pretokov na postajah Brezovec in Levec 1, s pripadajočo regresijsko premico..... | 20 |
| Grafikon 4: Grafično odstopanje merjenih od izračunanih gladin za vodomerno postajo Brezovec..... | 21 |
| Grafikon 5: Maksimalne konice pretokov v odvisnosti od časa..... | 22 |

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Zametki o vodogradbenih ukrepih, z namenom poplavne varnosti, segajo že obdobje antike. Človek si po naravi želi neposredno bližino vodnega vira, hkrati pa se ne želi počutiti ogroženega. V sodobnem času lahko, predvsem z boljšim poznavanjem teoretičnih ozadij hidrologije, meteorologije in s pomočjo tehnologije, izvajamo ukrepe na globalni ravni, to pa nam omogoča varno bivanje na predhodno nevarnih območjih.

Osnovni namen diplomske naloge je, preveriti pretočno sposobnost razbremenilnega kanala in predstaviti idejno zasnovo za prevajanje 100-letnega pretoka. Kanal optimiziramo na maksimalno prevodnost z namenom zagotavljanja poplavne varnosti posameznih objektov in kmetijskih površin.

V osnovi lahko diplomsko nalogo razčlenimo na tri podpoglavja. V prvem delu so predstavljena temeljna teoretična ozadja vodogradbenih ukrepov. Le-te opredelimo predvsem glede na omejitve prostora in določanje projektnega pretoka. V nadaljevanju predstavimo naravnogeografske značilnosti vodotoka. Omejimo se na opazovano območje in predstavimo predvsem hidrografske in topografske lastnosti v smeri gorvodno od omenjenega območja, referenčne točke. V tem delu si pomagamo s spletnimi atlasi, predvsem z Geopedio in Atlasom okolja, zato je poglavje obsežno z grafičnimi podlogami.

V tretjem sklopu se osredotočimo na hidrološko in hidravlično analizo. Namen hidrološke analize je pridobiti ocene visokih vod (Q_{100} , Q_{50} , Q_{10}). S pridobljenimi podatki sledi prehod na hidravlično analizo, kjer predstavimo idejno zasnovo ureditve razbremenilnega kanala. Pri omenjeni analizi in nasploh izhajamo iz starejše literature, saj gre zgolj za idejno zasnovo, ki v celoti izhaja iz Manningove enačbe in ne iz modeliranja. Ker je vključenih veliko predpostavk, pridobljeni podatki niso primerni za dimenzioniranje, niso pa napačni in lahko z njimi pridobimo okvirno predstavo o problematiki.

2 OPIS TEORETIČNIH IZHODIŠČ

2.1 Varnostni ukrepi za zagotavljanje poplavne varnosti

Vedno bolj intenzivna raba pokrajine zahteva učinkovito varstvo pred poplavami, urejen vodotok. Cilj obrambe pred poplavami je v nekem smislu gospodarjenje s posledicami oz. škodo, ki jo lahko povzročijo poplave, in prizadevanje za zmanjšanje učinkov poplav na družbeno sprejemljivo raven (Brilly, 1991).

Slovenija leži na stičišču Alp, Panonske nižine, dinarsko-kraškega sveta in Sredozemlja. Omenjeni pokrajinski tipi zaznamujejo življenjski prostor Slovenije z izjemno pokrajinsko pestrostjo in naravnimi lepotami, obenem pa tudi številne naravne nesreče. Davek, ki ga vsako leto poberejo poletna neurja, vodne ujme, žled, zemeljski plazovi in druge naravne nesreče v povprečju, presega dva odstotka bruto domačega proizvoda (BDP) (Frnetič, 2005).

Obramba pred vodno ujmo, kot jo poznamo v Sloveniji, zahteva specifičen pristop in ukrepe, ki jih delimo na aktivne (sprememba režima voda) in pasivne (brez sprememb režima voda). V zadnjem času se vse bolj uveljavlja delitev na ukrepe z gradnjo objektov (urejanje vodotokov, gradnja zadrževalnikov, nasipov, odtočnih kanalov ipd.) in ukrepe brez gradnje objektov (zmanjšanje občutljivosti območja na škodo ob poplavah oz. prilagajanje izrabe prostora nevarnosti poplav). V obrambi pred poplavami uporabljamo vodogradbene in negradbene ukrepe. Vodogradbeni ukrepi pomenijo gradnjo objektov, s katerimi vplivamo na razmere v vodotoku. Za oblikovanje ustreznih vodogradbenih ukrepov velja uporabljati dobro izdelane hidrološke, hidravlične in ekonomske modele (Brilly, 1991).

Zagotavljanje poplavne varnosti v sodobni družbi je ključnega pomena. Pomembnost obravnavane tematike lahko ponazorimo z naslednjim citatom:

»Če na poplavo nismo ustrezno pripravljeni, je vsaka, tudi najmanjša poplava, lahko katastrofalna« (Vodopivec, 2005).

2.1.1 Vodogradbeni ukrepi

Vodogradbeni oz. strukturni ukrepi predstavljajo pomemben del obvladovanja poplavnega tveganja. Njihov osnovni namen je zmanjšanje poplavne nevarnosti na poplavnih območjih. Z njimi lahko vplivamo na nastanek ali vir nevarnosti (na primer z zadrževalniki, ki zmanjšujejo konico poplavnega vala) ali pa branimo območje pred škodljivim delovanjem voda (na primer z nasipi ali regulacijami vodotoka skozi naselje) (Kozelj in sod., 2008). Brilly, Mikoš in Šraj (1999) opredeljujejo vodogradbeni ukrep kot graditev hidrotehničnega objekta, s katerim

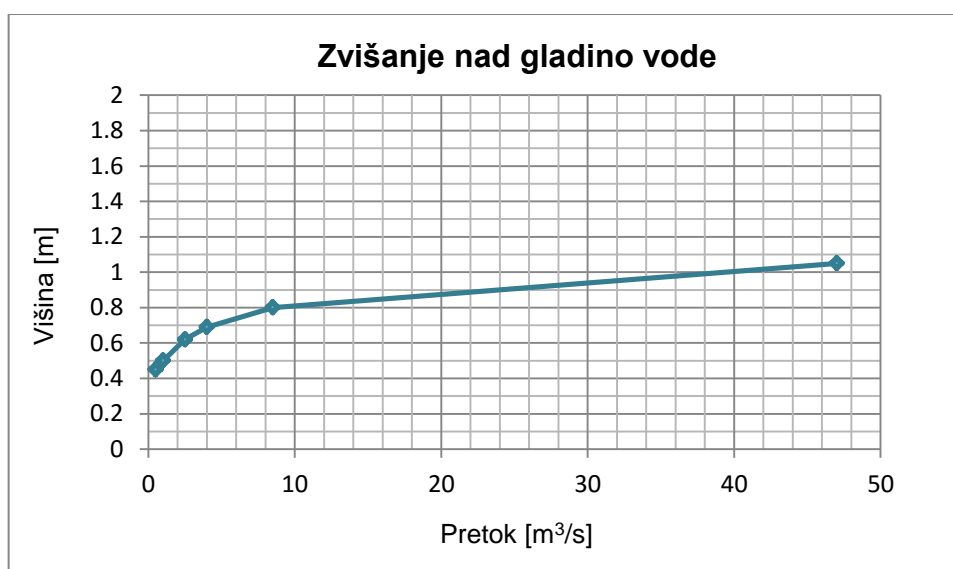
vplivamo na verjetnost pojava, pretočno krivuljo in krivuljo gladina – škoda (t.i. škodne krivulje).

2.1.1.1 Nasipi

Nasipi, kot ukrep varstva pred poplavami, so ena najbolj tradicionalnih metod. V zgodovini so imele porušitve nasipov večkrat katastrofalne posledice z izjemno veliko škodo in številnimi žrtvami. Ob porušitvi nasipa voda nenadoma poplavi dotlej varna območja in katastrofa je neizbežna (Brilly, 1991).

Graditev nasipov v Sloveniji ni tako zahtevno, ker poplave ne trajajo dolgo. Čas trajanja poplave je prekratek, da bi voda lahko prevlajala nasipe. Velja omeniti, da glavni problem pri vodotokih hudourniškega značaja ni pronicanje, ampak izjemno velike hidravlične obremenitve na vodno stran nasipov. Za graditev nasipov lahko tako uporabimo prepustnejše materiale, ki pa morajo biti zgrajeni z dovolj varnim zvišanjem ter morajo biti skrbno vzdrževani, saj je ob pojavu poplave na voljo premalo časa za kakršno koli ukrepanje (Brilly, Mikoš, Šraj, 1999). V praksi se pogosto za izvedbo nasipa uporabijo lokalni (dostopni) materiali.

Tehnični normativi za projektiranje kanalov, ki jih je izdelal leta 1952 Bureau of reclamation (Chow, 1959), upoštevajo tudi pretoke v strugi, tako da zvišanje objekta nad projektno gladino znaša od 30 do 120 centimetrov.



Grafikon 1: Zvišanje nasipov nad projektno vodno gladino (prirejeno po: Chow, 1959; Brilly, Mikoš in Šraj, 1999).

Petersen (1986) je predvidel nekoliko višje vrednosti. Zvišanje za 60 centimetrov pri nasipih za zaščito kmetijskih površin in 90 centimetrov za zaščito urbaniziranih površin. Višje

vrednosti se priporočajo v neposredni bližini mostov, ki povzročajo upore in zaježitve toka vode (Petersen, 1986, cit. po Brilly, Šraj, 2005).

2.1.1.2 Zadrževalniki

Zadrževalniki, suhi ali mokri, vplivajo na zmanjšanje maksimalnih pretokov in na ublažitev poplavnega vala. Zaradi izgradnje zadrževalnika se spremeni režim vodotoka. Dolgoročne spremembe vodotoka se kažejo v strugi s poglobljanjem ali naplavljanjem (pojav erozije in akumulacije). Občutek pretirane varnosti na nekdanjih poplavnih območjih povečuje gospodarski razvoj, hkrati pa se je treba zavedati, da morebitna katastrofa prinese večje posledice. Vedno obstaja nevarnost, da se bo zadrževalnik porušil. Zadrževalnik pomeni večji vodnogospodarski potencial območja in možnost večnamenskega izkoriščanja vode. Sistem zadrževalnikov s sinhronim delovanjem omogoča večjo kontrolo vode oziroma poplav (Brilly, 1991).

2.1.1.3 Kanaliziranje vodotokov

Urejanje vodotokov, regulacija vodotokov ali kanaliziranje vodotokov obsegajo vrsto ukrepov, s katerimi zmanjšamo erozijo in povečamo pretočno sposobnost struge. V preteklosti je bil osnovni cilj urejanja utesniti delovanje vode na čim manjši prostor, površine, na katerih je bilo občasno poplavljanje, naplavljanje materiala ali erozija, pa prepustiti kakšni drugi gospodarski dejavnosti (Brilly, Mikoš, Šraj, 1999).

Pretok v strugi lahko povečamo z rednim vzdrževanjem. Še večje vplive dosežemo z razširitvijo struge ali s kanaliziranjem in z oblaganjem brežin z (gladkimi) betonskimi oblogami (npr. Ljubljana, Gradaščica). Nenaravni materiali so lahko ekološko sporni in imajo negativno posledico za okolje. Povečanje pretočne sposobnosti struge lahko neposredno vpliva na pretočno krivuljo. Dolgoročno lahko ukrep povzroči nezaželene spremembe v morfologiji struge. V kanaliziranem delu se struga pogloblja zaradi povečanih hitrosti vode, dolvodno pa naplavlja. Razširitev struge nam povzroči spremembe v dolvodno od razširjene struge (Brilly, 1991; Brilly, Mikoš, Šraj, 1999).

2.1.1.4 Urejanje povirij

Urejanje povirij obsega vrsto ukrepov za zmanjšanje površinskega odtoka in zadrževanje vode v podpovršinskih akumulacijah povirja še pred preoblikovanjem površinskega odtoka vode. Tu so predvsem različni hudourniški protierozijski ukrepi:

- pogozdovanje,
- trasiranje,

- oranje prečno na padec terena ipd.

Ukrepi vplivajo na verjetnostno krivuljo in splošno izboljšujejo odtočne razmere oziroma izravnavajo odtok v povodju. Vpliv ukrepov je podoben vplivu zadrževalnikov (Brilly, Mikoš, Šraj, 1999).

2.1.1.5 Oddušni in razbremenilni kanali

Oddušni kanali prevajajo strugo po suhi ali mokri strugi mimo ogroženega območja in zmanjšujejo nevarnost oziroma vplivajo na spremembo verjetnosti poplav. V preteklosti so kanale pospešeno gradili z namenom ščitenja urbanih površin, koncentriranega naselja. V Ljubljani je tako nastal t.i. – Grubarjev kanal (Brilly, Mikoš, Šraj, 1999).

Prednosti oddušnih kanalov so v nespremenjeni pretočni krivulji in manjši nevarnosti potencialno ogroženega območja. Razvoj drugih dejavnosti se lahko nadaljuje na varnejših območjih, brez vidnih posegov v prostor, kot je zadrževalnik ali nasip. Prostor postane s tem vodogradbenim ukrepom dodatno obogaten z vodo, ki jo lahko izkoriščamo v različne namene (ribolov, rekreacijski prostori, razvoj manjših gospodarskih dejavnosti) (Brilly, Mikoš, Šraj, 1999). Po drugi strani lahko dodatna količina vode na nekem prostoru predstavlja slabost. Omenjeni ukrep nam lahko prostor razdvoji, potrebni so dodatni ukrepi z umeščanjem prečnih vodogradbenih ukrepov na sam kanal. Brilly, Mikoš in Šraj (1999) trdijo, da v daljšem časovnem obdobju lahko povzroči nezaželene spremembe v obliki struge dolvodno od *bifurkacije*¹. Manjši pretoki in bolj počasen tok povzročata posedanje sedimentov, zaraščanje in zamočvirjanje struge.

Oddušni kanali se sicer uporabljajo bolj v smislu kanalizacije (tok s prosto gladino in tok pod tlakom), bolj običajna uporaba izraza za rečne struge je razbremenilni kanal.

2.1.1.6 Premestitev celotnega (urbanega) območja

Omenjeni ukrep velja kot alternativa predstavljenim, a vseeno ga uvrščamo med gradbene. Za premestitev se odločimo, če na določenem območju ni možnosti zagotoviti poplavne varnosti.

Poplava ni katastrofa, ampak je naravni pojav. Če bi imeli ljudje boljše zavedanje glede poplav in jih opazovali s stališča pojava, najverjetneje do katastrof sploh ne bi prišlo oziroma bi bilo teh znatno manj. Glede na gostoto poselitve in površino urbanega naselja se izvedejo

¹ Bifurkacija (tudi viličenje ali raztočje reke): je pojav, kjer se reka razcepi v dva toka, ki se načeloma ne združita več in tečeta v različni porečji (Wikipedija, 2013).

študije, če je realizacija premestitve sploh možna. V tem primeru ne vplivamo neposredno na samo strugo vodotoka. Glede na opravljene analize, predvsem poplavne študije, urbano območje premestimo na varno oddaljenost.

2.1.2 Negradbeni ukrepi

Administrativni in upravni ukrepi morajo biti usmerjeni na zmanjšanje potencialne škode ob poplavah. V območjih, ki jih ogrožajo poplave, naj ne bo posebno občutljivih objektov (arhiv, skladišč ipd.), tu naj bodo zelene površine oziroma take dejavnosti, ki jim poplave ne morejo povzročiti večjih škod, v deželah z razvitim tržnim gospodarstvom si pomagajo tudi tako, da so zavarovalne premije v takih območjih znatno višje. V postopkih lokacijske dokumentacije mora biti znana nevarnost poplav in predvideni morajo biti ustrezni zaščitni ukrepi. Zelo pomembno je varstvo pred poplavami, ki delimo na več faz:

- ugotavljanje dejanskega stanja na ogroženih območjih in izdelava hidroloških in hidravličnih modelov;
- preverjanje in potrditev metodologije za izdelavo projektne dokumentacije;
- izdelava več možnih rešitev in ovrednotenje z analizo »cost-benefit«;
- ocena neekonomskih vplivov na posamezno rešitev in izbor odločitev o najustreznejši varianti (Brilly, 1991).

Ustrezne rešitve problema bi morali iskati predvsem s preventivnimi ukrepi:

- celovito urejanje povirij,
- izgradnja in ureditev najrazličnejših objektov,
- izboljšanje prognostične službe,
- ustrezna organiziranost službe za varstvo pred poplavami,
- varovanje vseh večjih (nad 1000 ha) obdelovalnih površin in urbaniziranih območjih (Brilly, 1991).

2.3 Projektni pretok

Protipoplavni ukrepi imajo omejen obseg, ki je določen s projektnim pretokom (npr. Q50, Q100), na katerega so v projektni dokumentaciji dimenzionirani objekti, naprave in ureditve. Katastrofalni dogodki v preteklosti so pokazali, da ni absolutne varnosti za varovanje pred poplavami (Kozelj in sod., 2008). Projektni pretok je pri nas na urbanih površinah navadno vezan na t. i. stoletne vode (Q100) (Brilly, Mikoš, Šraj, 1999).

Varovanje pred vodami lahko razdelimo na dva dela:

- grajeni odseki vodotoka, kjer z izbiro projektnega pretoka že predvidevamo morebitno nastalo škodo ob visokih vodah;
- neurejeni vodotoki, kjer se vsaka višja voda šteje kot višja sila (Kozelj in sod., 2008).

Ustrezno zmanjšanje posledic ob morebitni prekoračitvi projektnega pretoka lahko ponazorimo s citatom:

»Dogodke ob visokih vodah, kjer je pretok višji od projektnega pretoka, imenujemo ujme. Doseg osnovnih ukrepov za varovanje v takšnih primerih je presežen, zato je treba predvideti rezervni scenarij (intervencijo, morda ostale infrastrukture znotraj poplavnih območij, zmanjševanje prostora za razlivanje vode ob ekstremnih dogodkih, zagotavljanje zgolj minimalnih varnostnih ukrepov in njihovo neprimerno vzdrževanje itd.« (Loat in Zimmermann, 2003, cit. po Kozelj in sod., 2008).

2.4 Omejitve v prostoru (Natura 2000)

Območja Natura 2000 so življenjski prostor živalskih in rastlinskih vrst ter habitatov, ki so na ravni Evropske unije redki ali ogroženi. Tako se mora urejanje voda na tem območju opravljati prijazno naravi, z namenom varstva habitatov in vrst. V ta namen je bil v letu 2007 sprejet Program upravljanja območij Natura 2000 za obdobje 2007–2013 (PUN2k) z varstvenimi ukrepi in cilji, ki poudarjajo ohranjanje morfologije struge rek in hidrološkega režima, zagotavljanje prehodnosti vodnih objektov in prepoved črpanja voda. Vsebina PUN2k je bila preko naravovarstvenih smernic Zavoda RS za varstvo narave (ZRSVN) povzete tudi v Načrtu upravljanja voda (NUV). Čeprav se pri urejanju voda vedno bolj upoštevajo cilji varovanja narave, še vedno prihaja do neprimerne urejanja vodotokov (Naglič, 2013).

3 NARAVNOGEOGRAFSKE ZNAČILNOSTI OBMOČJA REČNE STRUGE LOŽNICA IN NJENEGA ZALEGJA

3.1 Splošna opredelitev in omejitev na območje izbranega odseka, predvidenega za urejanje razbremenilnega kanala

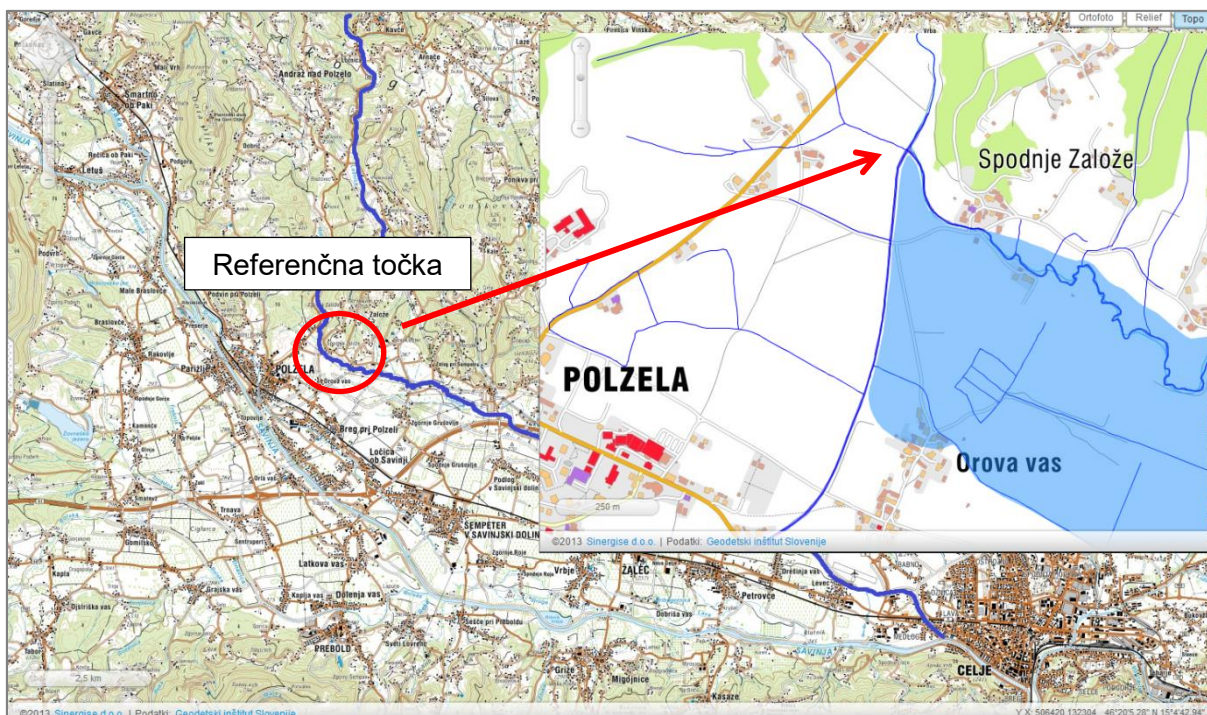
Posplošena predstavitev značilnosti vodotoka je odvisna od opazovane referenčne točke. V našem primeru je ta točka »sotočje« razbremenilnega kanala Ložnice in vodotoka Ložnica. V splošnem lahko rečemo tudi, da nam to referenčno točko predstavlja (severno) območje Zaloške ravnice (slika 1). V osnovi se opredelimo na lastnosti v gorvodni smeri, saj nas zanimajo predvsem karakteristike izbranega prispevnega območja, po drugi strani pa moramo zaradi boljšega razumevanja prikazati tudi posamezne lastnosti vodotoka in njenega zaledja kot celoto.

Prispevno območje se nanaša na kakršno koli območje, ne glede na njegovo velikost ali regionalno zaključenost in ne glede na obliko voda v njem. Uporabiti ga je mogoče na kakršno koli izhodišče v porečju, npr. za zaledje poljubnega dolžinskega kilometra vodnega toka (Radinja, 1991).

3.2 Geografske značilnosti vodotoka

Potok Ložnica izvira malo nad krajem Ložnica. Približno 300 metrov ob vznožju naselja so številni manjši pritoki, ki polnijo strugo. Pot nato nadaljuje prek občin Polzela in Žalec do Celja, kjer se izlije v reko Savinja.

Značilno je, da jo na svoji poti od izvira do izliva napajajo številni manjši pritoki. V ravnini padec dna struge upada in moč vodotoka znatno slabi, čeprav tudi na sami poti od izvira do srednjega toka – ravninskega dela ni nekega večjega padca ali visokega vodostaja in z njim povezanega velikega pretoka, ki bi ga lahko izrabljali za pridobivanje energije. Ravnina je po večini iz ilovnate naplavine, ki je vlažna in mokra. Ložnica po njej teče v počasnem vijugavem toku in velikokrat še danes poplavlja ravno pokrajino. Značilnost Ložnice je, da vodotoka ne spremljajo terase. Vodotok teče v mnogih vijugah, v senci Jelš in Vrb, v zadnjem času pa prihaja do sečenj teh in posledično do negativnega vpliva na življenje živali v obrežnem pasu, čeprav lahko še vedno govorimo, da je prostor ekološko bogat in da je človek v vodni on obvodni svet posegal relativno malo. Ob samem potoku je tudi značilen obrežni pas visoke zelene in lesne vegetacije, ki členi kmetijski prostor ter nudi ustrezne pogoje za rastline in živali (Vogrin idr., 2009).

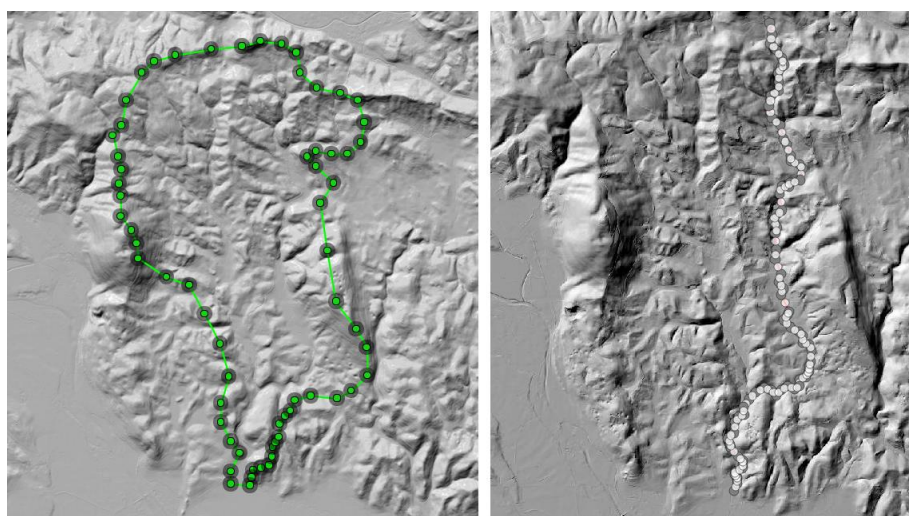


Slika 1: Vodotok Ložnica s prikazano referenčno točko (Geopedia, 2013).

3.3 Topografske lastnosti prispevnega območja

Po Geopediji (2013) so podatki o topografiji terena naslednji:

- površina prispevnega območja znaša 16 km² (15.95 km²)
- dolžina najdaljše vodne poti je 9.91 km
- maksimalna višina znaša 513.5 m, najnižja približno na koti nadmorske višine občine Polzela, 288.8 m in
- pripadajoči povprečni naklon znaša približno 2.3 %.



Slika 2: Levo – prispevno območje, desno – dolžina najdaljše vodne poti (ARSO, 2006).

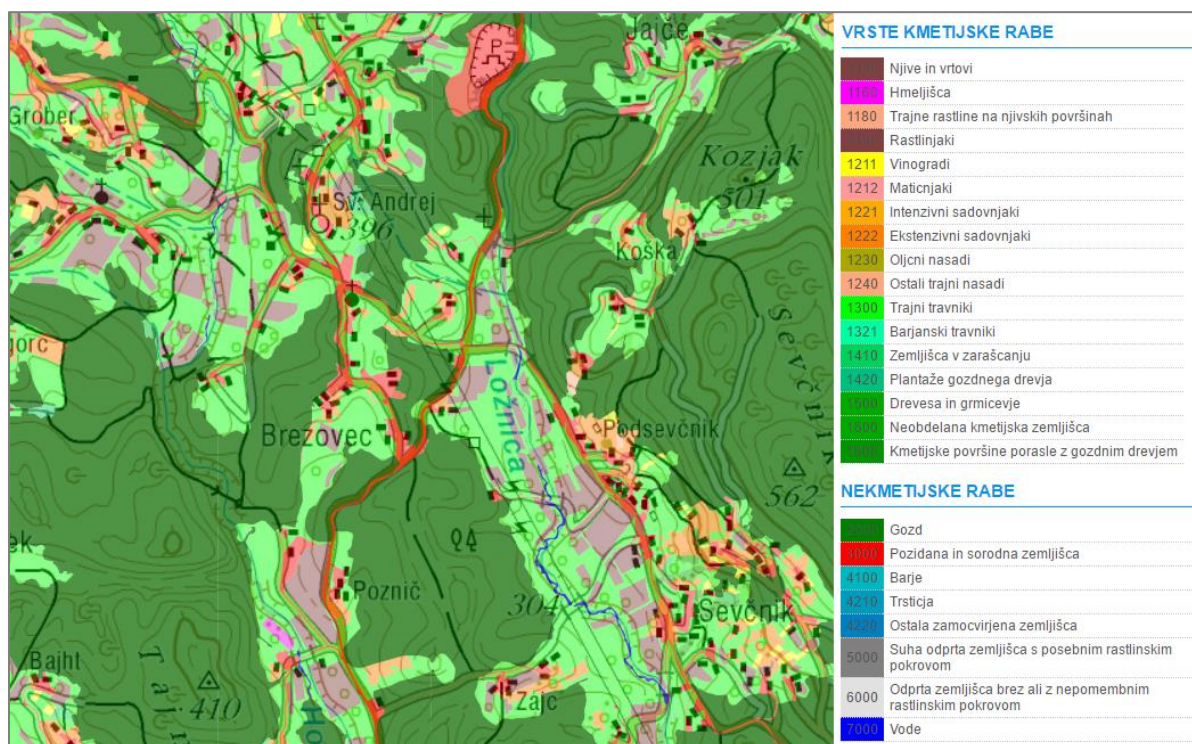
3.3.1 Pretežna raba tal na prispevnem območju

Izpostaviti je treba, da gre za relativno razgiban teren. Več kot 90 % prispevnega območja predstavljajo gozdovi, njive oziroma travniki. Posebnost prispevnega območja je v prsti z relativno visoko vlažnostjo in visoko vrednostjo koeficienta odtoka. V primeru večdnevni zveznih padavin lahko vrednosti še dodatno narastejo. Koeficient odtoka je definiran na intervalu med 0 in 1.

Zaradi omenjene vlažnosti zemljine je na tem območju tudi nekaj kmetijstva, ki je specializirano v gojenje korus, ki uspeva tudi takrat, ko je Savinjska dolina pod vplivom suše. Tveganje ne tem območju je večje, da rastlina umre zaradi prevelike količine vode kot pa premajhne.

Po podatkih, pridobljenih iz Geopedije (2013), je posplošena raba tal naslednja:

- mešani gozd 50 %,
- travniki in njive 40 % in
- naselja individualnih objektov 10 %.



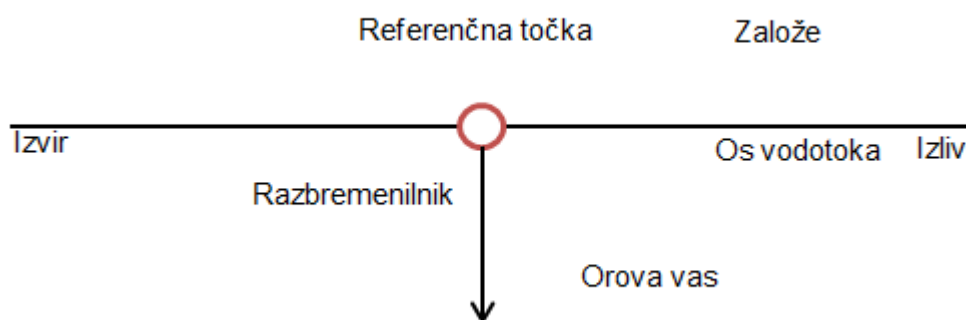
Slika 3: Raba tal prispevnega območja (Geopedia, 2013).

3.4 Pedološke lastnosti, vezane na vodotok

Glavna prodna trasa, kot posledica sedimentnih nanosov reke Savinje, prehaja na severni strani brez kakršnega koli zaznavnejšega površinskega pregiba v aluvialno ravnico Ložnice

(Radinja, 1960, cit. po Natek, 1984). To ugotovitev dopolnjujejo tudi proučevanja, da med Savinjo in spodnjim ravninskim tokom Ložnice ni izrazitega razvodja. Aluvialna ilovnata ravnica Ložnice na južnem robu polagoma prehaja v za 1 do 2 metra višji svet, ki je zgrajen iz savinjskega apniškega proda (Natek, 1984).

Na tej strukturi je Orova vas, za katero na severni strani proti Založam izvajamo ureditev razbremenilnega kanala in samega dotoka v kanal, da zagotovimo poplavno varnost bližnjih objektov in povezovalne ceste (slika 4). Dalje proti vzhodu so kraji Grušovlje, Podlog, Gotovlje itd. Če skozi omenjena naselja potegnemo navidezno črto, dobimo linijo stika med prodnimi nanosi Savinje in pretežno ilovnatim naplavinam Ložnice. Ložnica je v preteklosti s svojimi nanosi prekrila naplavine Savinje, ki segajo vse do severnega roba (Zaloško Hribovje).

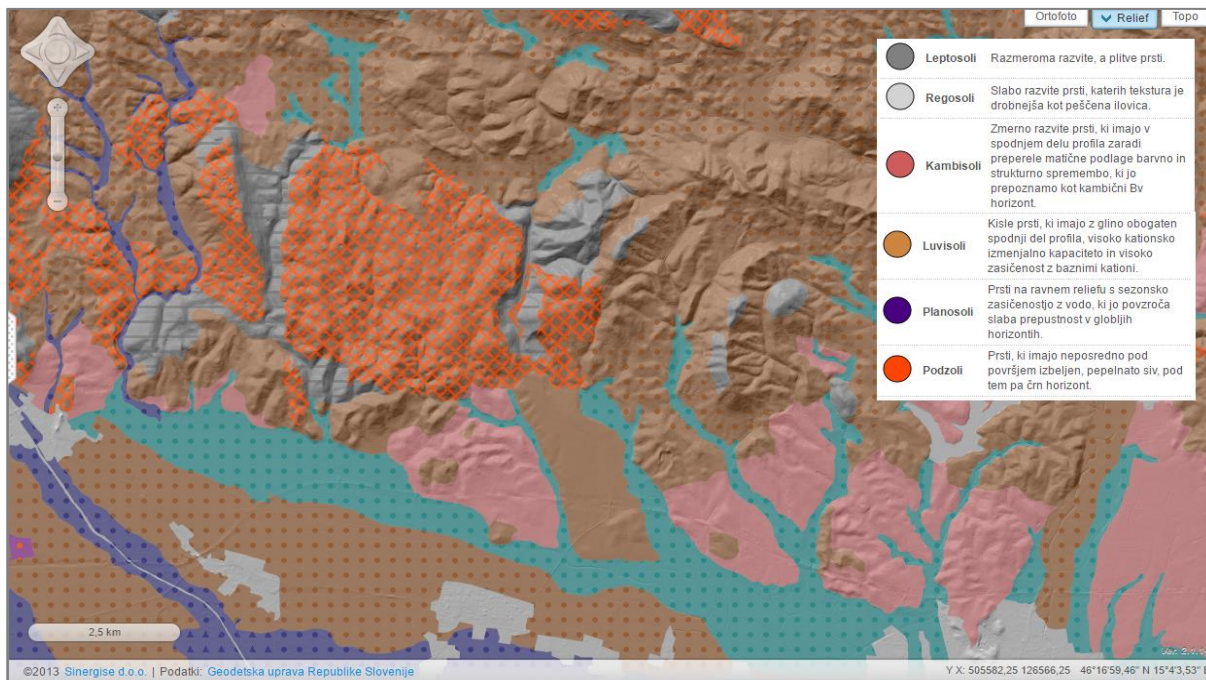


Slika 4: Shematski prikaz predvidene ureditve.

Aluvialno ravnino, ki je še pogosto poplavljen, sestavljajo do 3 metre debele ilovnate plasti. Med ilovico so tudi tanki sloji proda in peska. Zgoraj je ilovica močno humizirana, spodaj pa umazana, sivorjave barve. Najnižje dele sestavlja modra glina, pod njo so plasti proda (Natek, 1984).

Melik s sodelavci je izvedel analizo podrobnejše sestave tal ravnice pri Založah in dobil naslednje rezultate:

- pod travno rušo je 1.8 m svetlo rjave ilovice, ki je precej rahla in vsebuje organske primesi;
- sledi 30 cm debela plast peščene ilovice, ki jo spremljata pesek in prod;
- v globini 2.2 m je tanek sloj črne sestave;
- pod njim je sivomodra ilovica (Melik, 1957 idr., cit. po Natek, 1984).



Slika 5: Pedološka karta (Geopedia, 2013).

3.5 Hidrografski oris prispevnega območja in njenega zaledja

Ložnica je levi pritok reke Savinje, zato njeno porečje spada med porečje Savinje.

»Savinja, katere porečje obsega 1858 km², ima izrazit hudourniški značaj. Zanj so značilna velika nihanja v pretokih, razmerje med sušnim pretokom in visokimi vodami je lahko celo več kot 100-kratno. Večinoma hudourniškega značaja so tudi njeni pritoki. Njeni največji pritoki so: Lučnica, Ljubnica, Dreta, Paka, Bolska, Ložnica, Voglajna s Hudinjo in Gračnica« (Ministrstvo za okolje in prostor RS, 2013).

Na tukajšnjem območju je Savinja največja in najpomembnejša reka, ki ima že od nekdaj pomembno vlogo v vsakdanjem življenju prebivalstva. Reka ni nikdar ločevala ljudi, temveč jih je združevala, še posebej ob nadlogah, ki so jih prinašale povodnji (Natek, 1984).

Severno in nekaj časa skoraj vzporedno s Savinjo teče (približno v dolžini 14 kilometrov) (Podvinska) Struga. Profesor Melik je domneval, da je Struga nasledek nekdanjega (naravnega) korita Savinje (Melik, 1957, cit. po Natek, 1984).

Po skrajnem severnem robu ravnine teče Ložnica, ki zbira padavine z zahodnega dela Ložniškega gričevja. Še danes ima njena struga na ravnini izredno veliko število zavojev, ki kličejo po regulaciji. Njen ravninski tok je izredno počasen in ob vsakem večjem deževju se voda razlije. V preštevilnih vijugah in kolenih ter v premajhnem strmecu njenega ravninskega toka je osnovni vzrok za povodnji. Njen strmec znaša od zaloškega razbremenilnika (10 km) dolvodno manj kot 1 odstotek (približno 6 promila) (Natek, 1984).

Profesor I. Gams je v knjižnem poročilu o poplavnih območjih o Spodnji Savinjski dolini postavil domnevo oziroma možnost, da je današnja ložniška struga lahko tudi rezultat človekovega posega v srednjem veku (Gams, 1979, cit. po Natek, 1984). Vsi dosedANJI geomorfološki izsledki kažejo, da gre v tem primeru za odrinjen potok. Zaradi izredno močnega nasipavanja je Savinja v preteklosti z ogromnimi prodnimi nanosi odpravila izliv Ložnice in njeno strugo potiskala proti severnemu obrobju doline. To je osnovni vzrok, da tečeta Savinja in Ložnica vsaka po enem obrobju Celjske kotline (Melik idr., 1957, cit. po Natek, 1984).

3.6 Pretekli poplavni dogodki

Z namenom omejevanja poplav ob Ložnici so na začetku 50 let (1951–53) izkopali razbremenilnik med Založami in Bregom, po katerem odteče del ložniške visoke vode v Savinjo. Z razbremenilnikom so omejili poplavni svet pod Založami. Ob večjih povodnjih so nastopile nove težave, kleti objektov v neposredni bližini razbremenilnega kanala so bile zalite. To težavo so se in se še danes rešujejo z »impregnacijo« korita (Natek, 1984).

Ložnica je znana po tem, da se ji v času obilnih padavin vodostaj in pretok močno povečata, razlike so lahko za faktor 100 (sliki 6 in 7). Razlog je predvsem v sami legi struge in njenem porečju (slika 8), ki jo napajajo številni manjši hudourniški pritoki, ki so lahko v normalnem obdobju tudi presušeni.



Slika 6: Struga ob vstopu na Zaloško ravnico v normalnem stanju (terenski ogled, 2013).



Slika 7: Struga v času poplav Tavčar, 2007).

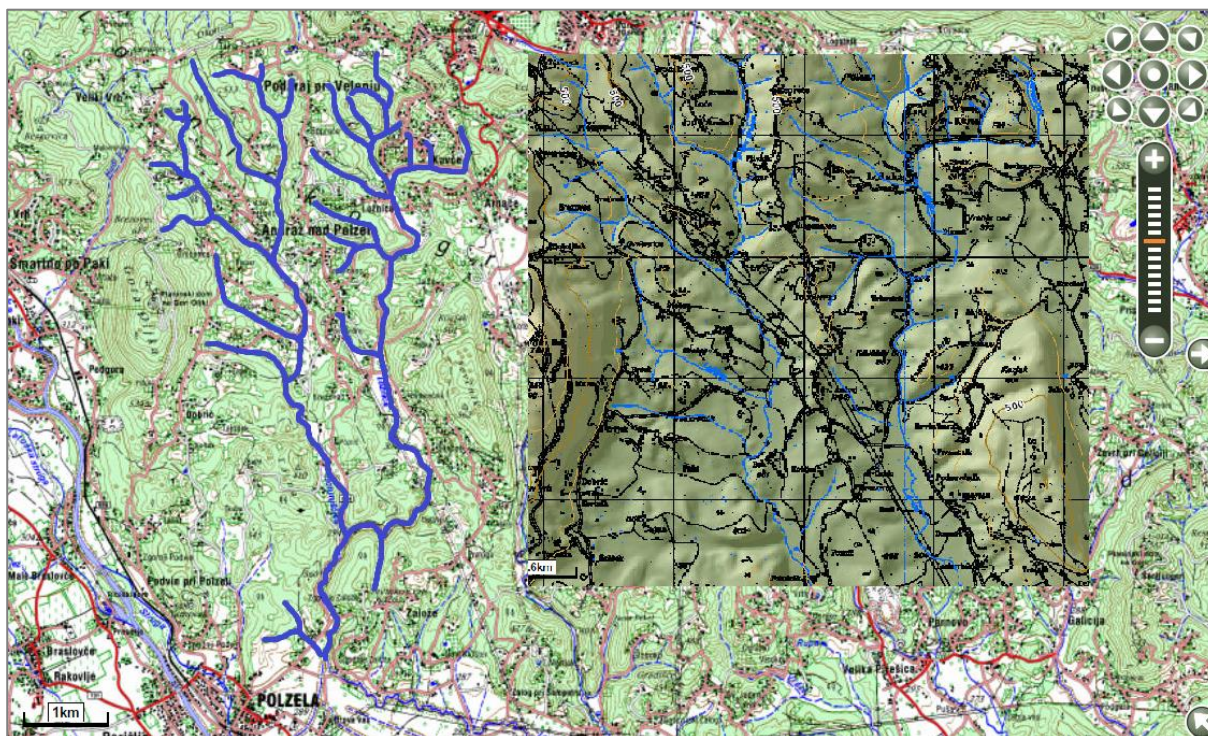
Mikoš (2012) opredeljuje hudournik kot gorski ali hribinski potok z relativno velikim naklonom struge in tudi z naglimi ter močno spreminjajočimi se pretočnimi razmerami.

Vodotoka samega po sebi ne moremo opredeliti kot hudournik, njegova struga nima izrazitejšega padca niti v zgornjem delu. Že prej smo omenili, da z vstopom na Zaloško

ravnico in naprej dolvodno struga pada s premajhnim naklonom, da se ne bi razlivala na okoliške travnike in njive. Majhen naklon pride zaradi meandriranja še do toliko večjega izraza.

Posebnost Ložnice je njena pot gorvodno od Zaloška ravnice oziroma bifurkacije z razbremenilnim kanalom do izvira. Struga je z obeh strani v večjem delu omejena s pogozdenimi gričevji in v določenih odsekih daje občutek soteske, kjer se na posameznih delih pojavljajo zamočvirjene mrtvice. V tem delu so manjša razlivanja prisotna ob vsakih obilnejših padavinah.

Kot smo že omenili, ne moremo Ložnice umestiti med hudournike, čeprav je njeno obnašanje v času poplav popolnoma hudourniško. Zaradi izrazite vodne mreže manjših hudournikov iz okoliškega gričevja jo lahko opredelimo kot ravninski vodotok s »hudourniškim pridihom«.



Slika 8: Gosta mreža manjših hudourniških pritokov Ložnice (ARSO, 2006).

Glavni hudourniški pritoki so:

- Hotunjščica (glavni pritok),
- Laščica (pritok Hutunjščice),
- Pivkov graben (pritok Hutunjščice) in
- Arnaščica (ARSO, 2006).

3.6.1 Značilnosti poplavnega dogodka leta 1991

Zaradi prehoda padavin in premočenosti terena so padavine v nalihiv močne intenziteta prešle direktno v odtok, kar je povzročilo nagel porast voda. Ložnica kot pritok Savinje je v Levcu dosegla višino 320 cm in 82 m³/s (v tem primeru gre za 100-letno vodo) (Kolbezen, 1990).

Od Podloga oziroma Zaloga navzgor struga ni več regulirana. Tu je povodnja segala do sotočja Hutunjščice in Ložnice. Tudi ob obeh povirnih krakih je bila poplava, najobsežnejša pa v ravnini pod Svečnikom (562 m). V Zgornjih Založah, kjer je začetek razbremenilnika (Ložnica–Savinja pri Bregu), voda pogosto udari preko desnega brega in zalila polja in travnike vse do Orove vasi (Natek, 1990).

Tudi povodnja leta 1990 je zalila dva objekta v Orovi vasi, vse druge, ki imajo kleti pod nivojem dvorišč, je zalila podtalna voda. Samo v letu 1989 so bile na tem območju tri večje povodnje s podobnimi posledicami (Natek, 1990).

3.7 Razporeditev padavin

Zaledno območje je v letih 1901–1925 v povprečju dobilo 1.255 mm (oz. litrov padavin na kvadratni meter) (Natek, 1984). V obdobju od leta 1971 do 2000 se povprečna letna količina padavin giblje med 1200–1300 mm (ARSO, 2006). Dejanska količina padavin niha iz leta v leto.

Padavine niso enakomerno razporejene med letom. Na poletne mesece odpade skoraj tretjina povprečne letne količine padavin, jesenske mesece 27.5 %, spomladi 23 % in blizu 17 % zimske mesece (Natek, 1984).

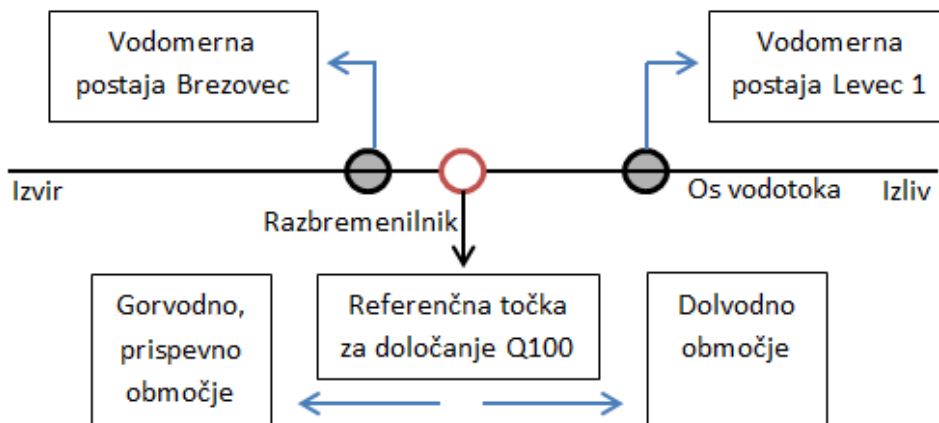
4. HIDROLOŠKA ANALIZA IZBRANEGA POREČJA NA VODOTOKU LOŽNICE

4.1 Namen analize

Osnovna ideja je ocena 100-letnega pretoka, pridobljenega na dva načina (slika 9):

- v smeri dolvodno od referenčne točke s statistično obdelavo podatkov in
- v smeri gorvodno od referenčne točke z uporabo empirične enačbe za določanje površinskega odtoka.

Pridobljena podatka med sabo primerjamo in iz vrednotimo še rezultate za pretoke z 10-letno in 50-letno povratno dobo.



Slika 9: Shematski prikaz ocene 100-letnega pretoka.

4.2 Metode uporabljene pri analizi

- Metoda obdelave podatkov z uporabo linearne korelacije in statistične analize pretokov.
- Kresnikova enačba za določanje površinskega odtoka.

4.3 Ocena Q100 na podlagi linearne regresije

4.3.1 Teoretične osnove

Na tem mestu je treba poudariti, da so enačbe posplošene in omejene na dvodimenzionalni prostor. Predmet proučevanja ni ozadje statistične analize, ta nam služi zgolj kot orodje, zato bodo predstavljena le temeljna teoretična ozadja.

4.3.1.1 Regresija in korelacija

Korelacija nam opisuje medsebojno povezanost dveh ali več spremenljivk, regresija pa njihovo medsebojno odvisnost. Regresija je prilagajanje ustrezne matematične funkcije empiričnim podatkom. Zanima nas odvisnost dane spremenljivke Y od druge neodvisne spremenljivke X ali več drugih neodvisnih spremenljivk $X_1, X_2 \dots X_n$, z namenom, da bi lahko predvideli vrednost spremenljivke Y , če poznamo vrednosti $X_1, X_2 \dots X_n$ (Brilly, Šraj, 2005).

Primer takšne regresijske analize v hidrologiji bi bila ocena volumna površinskega odtoka Y iz meritev, kot so padavine X_1 , intenziteta padavin X_2 , infiltracija X_3 itd. Ker imamo v tem primeru eno odvisno in več neodvisnih spremenljivk, govorimo o multivariatni regresiji (Brilly, Šraj, 2005).

V konkretni analizi bo predstavljen primer odvisnosti, kjer se bomo omejili na dvodimenzionalni prostor in se spraševali po odvisnosti spremenljivke Y od X . Prijemi, ki bodo uporabljeni, se nanašajo na linearno regresijo (metoda najmanjših kvadratov), ki se v praksi največkrat uporablja. Pri linearni regresiji iščemo premico, ki se najbolje prilega danim vrednostim oz. točkam.

Korelacijski koeficient r je glavni parameter izračunan v analizi, na podlagi katerega lahko sklepamo o medsebojni soodvisnosti. Koeficient korelacije se giblje med -1 in $+1$. Ko se vrednosti koeficienta odmikajo od mejnih vrednosti, se večajo odstopanja od linearne soodvisnosti spremenljivk in pri vrednosti 0 med spremenljivkama ni linearne odvisnosti. Matematično določene meje sprejemljivosti linearne soodvisnosti so (Jevđević, 1956, cit. po Brilly, Šraj, 2005):

$$r \geq 0,6 \tag{1}$$

$$r \leq -0,6 \tag{2}$$

Za testiranje domnev o koeficientu korelacije uporabimo statistiko T . Če je vrednost statistike znotraj intervala zaupanja ničelne domneve ne moremo zavrnila in lahko s predpisanim (predpostavljenim) tveganjem α trdimo, da slučajni spremenljivki nista linearno povezani (Brilly, Šraj, 2005).

4.3.2 Linearna korelacija vodomerne postaje Levec 1 in Brezovec

Na spletnih portalih Ministrstva za okolje in prostor RS, iz arhiva površinskih voda (javno dostopno), lahko pridobimo podatke o (samodejnih) merskih postajah vodotoka Ložnice. Za omenjeni vodotok sta arhivirani dve vodomerni postaji (*gorvodno*² Brezovec, *dolvodno*³

² Gorvodno je poslovenjen izraz za ang. upstream in pomeni v smeri proti rečenemu toku.

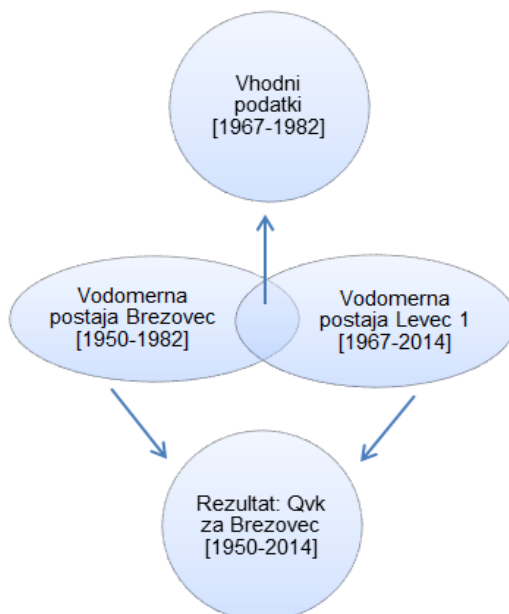
Levec 1). Vodomerne postaja Brezovec je delovala v časovnem obdobju od leta 1950 do 1982, medtem ko je vodomerne postaja Levec 1 od leta 1967 še vedno aktivna.

Osnovni namen analize je, da ugotovimo medsebojno korelacijo obeh vodomernih postaj in na podlagi znanih podatkov prve vodomerne postaje ocenimo manjkajoče za drugo. S to analizo si povečamo vzorec, na podlagi katerega lahko s teoretičnimi porazdelitvami ocenimo pretok s stoletno povratno dobo (Q100). Za namen statistične analize povratnih dob pretokov in poplavnih dogodkov se v praksi najpogosteje uporablja (log) Pearsonova porazdelitev III.

4.3.2.1 Kontrola medsebojne odvisnosti vodomernih postaj

Za Ložnico so v povprečju značilni nizki pretoki, zaradi boljše preglednosti korelacijo preverjamo na izmerjenih maksimalnih letnih pretokih (konicah). Ko bomo dokazali, da korelacija obstaja, lahko po analogiji (z izračunano regresijsko premico) izračune ponovimo za pretoke, katerih podatki nam niso bili dani, zaradi prenehanja delovanja vodomerne postaje Brezovec.

Za obdobje 1967-1982 preverimo medsebojno povezavo med pretoki dveh vodomernih postaj. Korelacijo lahko seveda iščemo zgolj med izmerjenimi podatki na obeh vodomernih postajah (slika 10). Podatki so pridobljeni iz arhiva površinskih voda (preglednica 1).



Slika 10: Shematski prikaz podatkov za obe vodomerne postaji

³ Dolvodno je poslovenjen izraz za ang. downstream in pomeni v smeri rečnega toka.

Na podlagi pridobljenih podatkov lahko prikažemo *hidrogram*⁴ in grafično predstavimo medsebojno korelacijo. Razvidna je povezava med obema postajama (grafikon 2). Nekoliko nepričakovana rezultata sta zgolj konici pretokov za leto 1981, kar pa ne bi smelo bistveno vplivati na naše končne rezultate.

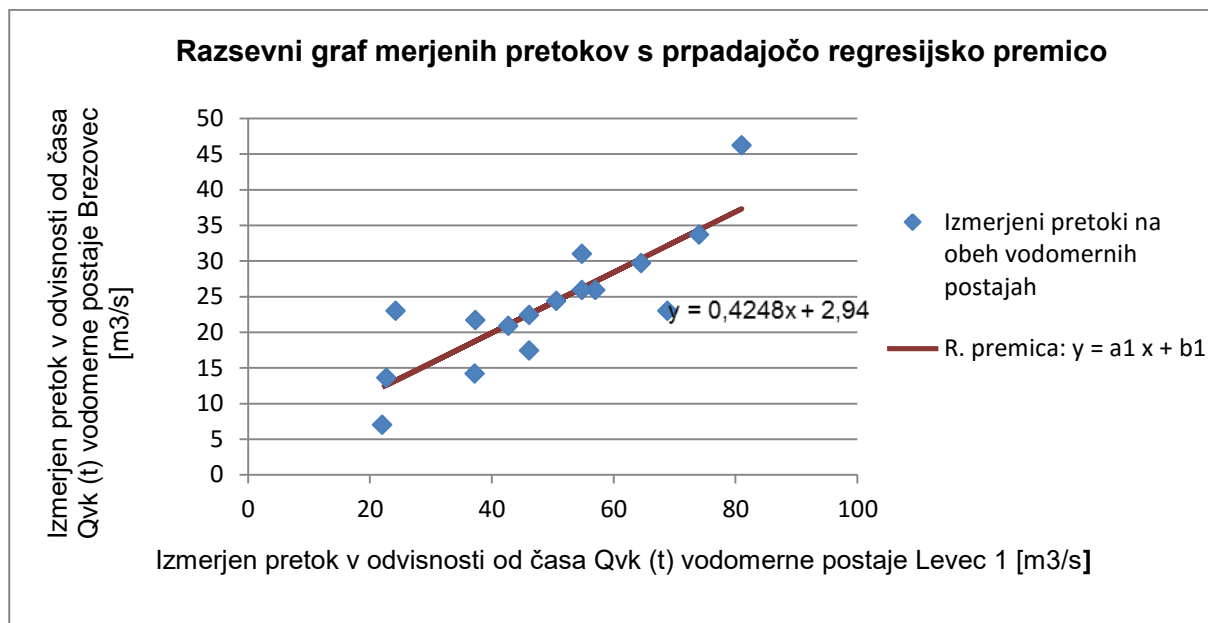


Grafikon 2: Hidrogram največjih letnih pretokov vodomerne postaje Levec 1 in Brezovec za časovno obdobje 1966-1983.

Izračunali smo vrednost koeficienta korelacije ($r \approx 0.84$) in določili pripadajoči regresijski premici ($\hat{Y} = 0.425X + 2.940$, $\hat{X} = 0.606Y - 1.315$) ter kot med njima ($\gamma \approx 8.5^\circ$). Mi iščemo korelacijo za Brezovec na podlagi Levec 1, zato je za naš izračun pomembna samo regresijska premica: $\hat{Y} = 0.425X + 2.940$. V praksi se koeficient ne preračunava analitično, kot je predstavljeno v (Brilly, Šraj, 2005), poglavje uporaba teorije verjetnosti in statistike v hidrologiji. V tej analizi je bila za izračun uporabljena integrirana funkcija »Correl« v Excelu. Grafični prikaz je razviden na grafikonu 3.

Vrednost $r \approx 0,84$ nam pove, da smo matematično dokazali medsebojno korelacijo ($r \geq 0,6$). Kljub temu da podatke zgolj ocenjujemo, se moramo zavedati, da za podrobnejše inženirske izračune težimo k vrednostim $r \geq 0,8$.

⁴ Hidrogram: Graf, ki prikazuje spreminjanje pretoka v odvisnosti od časa.



Grafikon 3: Razsevni graf merjenih pretokov na postajah Brezovec in Levec 1, s pripadajočo regresijsko premico.

S pomočjo izračunane medsebojne odvisnosti vodomernih postaj smo, na podlagi znanih podatkov za vodomerno postajo Levec 1, pridobili manjkajoče za postajo Brezovec. V tem primeru smo zgolj kontrolirali ustreznost analize in lahko posledično izračunane podatke preverjali z dejanskimi. Tabelarično in grafično smo prikazali odstopanje med izmerjeno in izračunano gladino za obdobje 1967-1982, z namenom, da prikažemo tveganje za napačno oceno, ko bomo korelirali podatke, ki jih ni v preseku podatkov obeh vodomernih postaj (slika 10).

Preglednica 1: Izmerjen maks. pretoki v letu na vodomerni postaji Levec 1 in Brezovec za časovno obdobje 1976-1982 (ARSO, 2006) in preračunani pretoki na podlagi linearne korelacije, prikazano s pripadajočim odstopanjem vrednosti.

| Leto | Qvk [m ³ /s] | | | [%] Odstopanje |
|------|-------------------------|-----------|------------|-------------------|
| | Levec 1* | Brezovec* | Brezovec** | |
| 1967 | 22.0 | 7.0 | 12.3 | 43.1 |
| 1968 | 37.2 | 14.2 | 18.7 | 24.1 |
| 1969 | 64.5 | 29.7 | 30.3 | 2.0 |
| 1970 | 42.7 | 20.9 | 21.1 | 0.9 |
| 1971 | 22.7 | 13.6 | 12.6 | 7.9 |
| 1972 | 57.0 | 25.9 | 27.2 | 4.8 |
| 1973 | 81.0 | 46.2 | 37.3 | 23.9 |
| 1974 | 68.8 | 23.0 | 32.2 | 28.6 |
| 1975 | 74.0 | 33.7 | 34.4 | 2.0 |
| 1976 | 46.1 | 22.4 | 22.5 | 0.4 |
| 1977 | 46.1 | 17.4 | 22.5 | 22.7 |

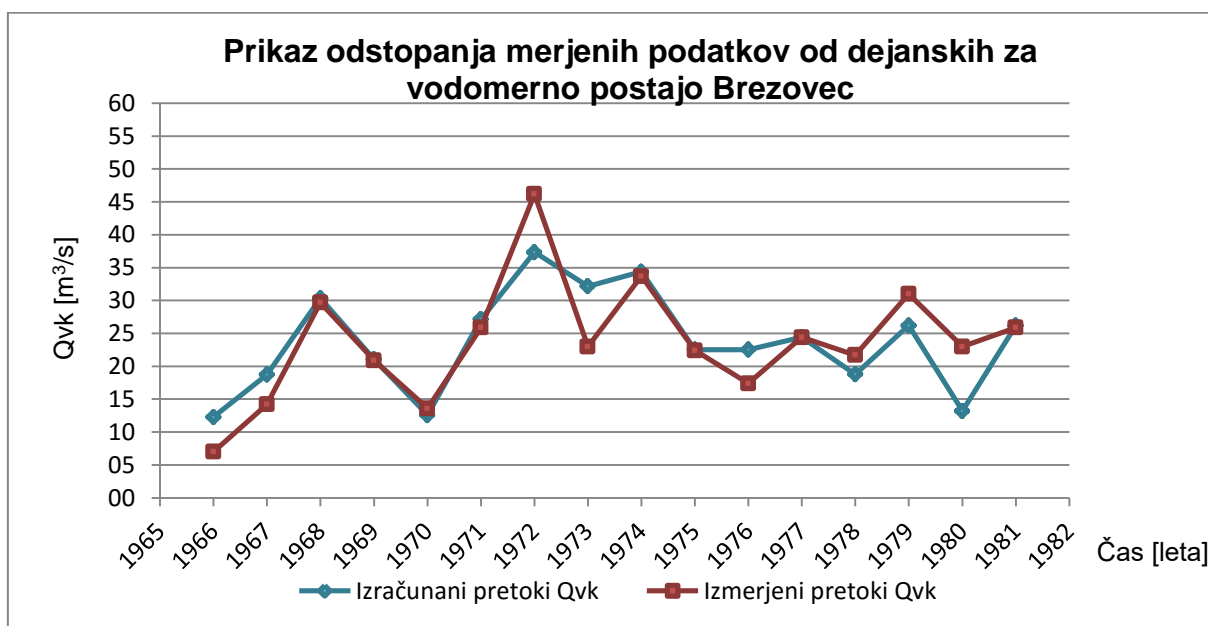
se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

| | | | | |
|------|------|------|------|------|
| 1978 | 50.6 | 24.4 | 24.4 | 0.1 |
| 1979 | 37.3 | 21.7 | 18.8 | 15.4 |
| 1980 | 54.8 | 31.0 | 26.2 | 18.3 |
| 1981 | 24.8 | 23.0 | 13.2 | 74.2 |
| 1982 | 54.8 | 25.9 | 26.2 | 1.1 |

* pomeni izmerjen pretok

**pomeni izračunan pretok na podlagi regresijske premice



Grafikon 4: Grafično odstopanje merjenih od izračunanih gladin za vodomerno postajo Brezovec.

Ovisnost med gladinama je takšna, da lahko pridobljene podatke uporabimo za oceno (reda velikosti) pretoka. Dokazali smo tudi, da je korelacija statistično signifikantna. $p < 0.001$.

| SUMMARY OUTPUT | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------|------------------------|----------------|------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Regression Statistics | | | | | | | |
| Multiple R | | 0,836629371 | | | | | |
| R Square | | 0,699948704 | | | | | |
| Adjusted R Square | | 0,678516469 | | | | | |
| Standard Error | | 4,299551946 | | | | | |
| Observations | | 16 | | | | | |
| ANOVA | | | | | | | |
| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>Significance F</i> | | |
| Regression | 1 | 603,7333 | 603,7333179 | 32,6586887 | 0,00 | | |
| Residual | 14 | 258,8061 | 18,48614693 | | | | |
| Total | 15 | 862,5394 | | | | | |
| | Coefficients | Standard t Stat | P-value | Lower 95% | Upper 95% | Lower 95,0% | Upper 95,0% |
| Intercept | 7,111399388 | 3,102559 | 2,29210752 | 0,457071609 | 13,76572717 | 0,457071609 | 13,76572717 |
| Brezovec* | 0,700309499 | 0,122544 | 5,714778097 | 0,037913187 | 0,437479611 | 0,963139388 | 0,437479611 |

Slika 11: Statistično iz vrednotenje korelacijskega faktorja.

4.3.3 Izračun maksimalnih letnih pretokov za vodomerno postajo Brezovec

Po analognem izračunu lahko na podlagi linearne korelacije (z določeno regresijsko premico $\hat{Y} = 0.425X + 2.940$) določimo maksimalne letne pretoke za časovno obdobje 1983–2014. Ker smo se sklicevali na majhen vzorec in želimo biti na varni strani, smo pri izračunu upoštevali še 20 % dodatne varnosti (navzgor).

Kot rezultat lahko s hidrogramom grafično prikažemo spreminjanje maksimalnih letnih pretokov za časovno obdobje 1951–2014.



Grafikon 5: Maksimalne konice pretokov v odvisnosti od časa.

4.3.4 Ocene pretokov s pripadajočo povratno dobo

Za oceno pretokov s povratno dobo 10, 50 in 100-let smo uporabili troparemetrsko asimetrično porazdelitev Pearson III. Analizirali smo vzorec s (predhodno) podanim in (naknadno) izračunanim podatkom o maks. pretokih za vodomerno postajo Brezovec (grafikon 6). Parametri so srednja vrednost, standarda deviacija in koeficient asimetrije, rezultati pa naslednji:

$$(S_x = 12.03, \bar{X} = 27.2, C_s \approx 0.8)$$

$$T(X) = 100 \rightarrow F(X) = 0,99 \rightarrow X(T) = 62 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3)$$

$$T(X) = 50 \rightarrow F(X) = 0,98 \rightarrow X(T) = 58 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

$$T(X) = 10 \rightarrow F(X) = 0,90 \rightarrow X(T) = 43 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5)$$

4.4 Določanje površinskega odtoka po Kresnikovi enačbi

4.4.1 Teoretična izhodišča

Največji pretoki so odvisni predvsem od velikosti in oblike povodja, najmanjši pretoki pa so posledica izcejanja podzemnih voda, pogojenih z geološko sestavo povodja. Zakonitosti o pretokih lahko analitično pridobimo s pomočjo verjetnostnih analiz, za manjša povodja se pogosto zgodi, da imamo pomanjkljivo število merjenih podatkov ali pa jih sploh nimamo. V primeru, ko omenjenih podatkov nimamo na razpolago, si pomagamo z empiričnimi enačbami (Brus, 1981, cit. po Brilly, Šraj, 2005).

Enačbe veljajo predvsem za povodja s podobnimi lastnostmi, temeljijo pa na preteklih meritvah in eksperimentalnih določitvah. Kresnikova enačba ima naslednjo obliko (Brilly, Šraj, 2005; Šauta 2010):

$$Q_{100} = \frac{S \cdot \alpha \cdot 30}{0,5 + \sqrt{S}} \quad (6)$$

$$Q_{50} = Q_{100} \cdot \left(\frac{\mu_{100}}{\mu_{50}} \right)^\beta \quad (7)$$

$$Q_{10} = Q_{100} \cdot \left(\frac{\mu_{100}}{\mu_{10}} \right)^\beta \quad (8)$$

kjer je:

S ... površina povodja [km²]

α ... koeficient odvisen od konfiguracije terena (vrednost 0.6–6)

β ... koeficient enakomernosti (konstanta, vrednost 0.25)

μ_{100} ... verjetnost pojava 100-letne vode (vrednost 0.01)

μ_{50} ... verjetnost pojava 50-letne vode (vrednost 0.02)

μ_{10} ... verjetnost pojava 10-letne vode (vrednost 0.10)

4.4.2 Ocene pretokov s pripadajočo povratno dobo

Pomembno je, da pri hidravličnem izračunu upoštevamo več kot stoletne izkušnje slovenskih hudourničarjev, ki so v preteklosti preračunavali količine visokih hudournih voda v alpskem in predalpskem prostoru. Včasih so za izračun odtočnega koeficienta (α) po formuli Kresnika na alpski konfiguraciji terena upoštevali vrednost $\alpha = 0.8$, za katerega so kasneje ugotovili, da je vrednost nekoliko previsoka in značilna bolj za visokogorje. V predalpskem prostoru pa so za odtočni koeficient uporabljali $\alpha = 0.6$. (PUH, 2008, cit. po Šauta, 2010).

Zaledje Ložnice opredelimo z gričevnato predalpsko konfiguracijo za izračun vzamemo vrednost koeficienta $\alpha = 0.6$ in dobimo naslednje rezultate (potrebni podatki o topografiji terena so predstavljeni v poglavju 3.2):

$$Q_{100} (\alpha = 0.6, S = 16 \text{ km}^2) = 64 \text{ m}^3/\text{s} \quad (9)$$

$$Q_{50} (\alpha = 0.6, S = 16 \text{ km}^2) = 54 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10)$$

$$Q_{10} (\alpha = 0.6, S = 16 \text{ km}^2) = 36 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

4.5 Ugotovitve

Preglednica 2: Rezultati hidrološke analize.

| Metoda | Q100 [m ³ /s] | Q50 [m ³ /s] | Q10 [m ³ /s] |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Verjetnostna analiza | 62 | 58 | 43 |
| Kresnik | 64 | 54 | 36 |

Za oceno 100-letnega pretoka bi sicer zadoščala verjetnostna analiza, ker pa smo morali za omenjeno analizo večji del podatkov pridobiti s pomočjo linearne korelacije, smo določili visoke vode tudi po Kresnikovi metodi. Odstopanje ocenjenih pretokov po obeh metodah je relativno majhno, za dimenzioniranje (na pretok Q10, Q50 ali Q100) izberemo maksimalno izračunano vrednost.

5 HIDRAVLIČNA ANALIZA

5.1 Namen analize

Za pridobljene pretoke iz hidrološke analize: $Q_{100} = 64 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{50} = 58 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{10} = 43 \text{ m}^3/\text{s}$ preverimo pretočno sposobnost razbremenilnega kanala. Z namenom zagotavljanja poplavne varnosti kanal optimiziramo na Q_{100} in podamo predvidene potrebne ukrepe.

5.2 Način dela

- Manningova enačba,
- terenske meritve in ogledi,
- predhodne raziskave.

5.3 Teoretične osnove

Osnovni lastnosti toka s prosto gladino ($v > 0$) sta:

- vzdolž toka ima oblikovano t.i. prosto gladino,
- vsaj na del površine vodnega telesa (na gladino) lahko deluje atmosferski tlak okolice p_0 (Steinman, 2010).

Za izračun stanja v vodotokih potrebujemo kot vhodne podatke izmerjene pretoke na vodomernih postajah, rezultate izračunov odtoka z vodozbirnih območij ali pa statistično določene pretoke z določeno povratno dobo. V sklope te analize smo za hidravlične izračune obravnavali razmere, ki so značilne za enodimenzijski (1-D) stalni enakomerni ($Q = \text{const.}$, $S = \text{const.}$) tok (Steinman, 2010).

5.3.1 Hidravlični izračun z uporabo Manningove enačbe

Za praktične izračune povprečno hitrost enakomernega toka izračunamo po eni izmed številnih *pol-empiričnih enačb*⁵ enakomernega toka. Vse takšne enačbe imajo v osnovi naslednjo obliko:

$$\bar{u} = C \cdot R^x \cdot I_0^y \quad (12)$$

kjer imajo parametri naslednji pomen:

\bar{u} ... povprečna hitrost po prerezu

⁵ Pol-empirične enačbe so enačbe, določene na podlagi eksperimentov, v ozadju pa so upoštevane fizikalne osnove.

R ... hidravlični radij ($R = S/O$)

I_0 ... vzdolžni padec kanal

C ... koeficient

x, y ... eksponenta

V praksi sta se uveljavili predvsem uporabi De Chezyjeve (razvita leta 1769) in Manningove enačbe (razvita leta 1899) (Steinman, 2010).

Vse spodnje navedbe se nanašajo na vodotoke s stabilno strugo, kjer privzamemo lastnosti struge preko hidravličnega radija R . V aluvialnih koritih, kjer so prisotni še drugi vplivi in prisotnost plavin, je analiza veliko bolj zahtevna. Pri vodotokih z zarastjo je treba upoštevati še vpliv letnih časov in z njimi povezana različna vegetacijska obdobja. Za isto pretočnost je potreben večji pretočni prerez, če se v vodotoku dodaja zarast in plavine (Steinman, 2010).

5.3.2 Določanje koeficienta hrapavosti v praksi

Steinman (2010) opisuje problematiko določanja vrednosti koeficienta trenja n_G , saj je ta funkcija več spremenljivk. V skupnem parametru – koeficientu hrapavosti morajo biti zajeti vsi možni vplivi:

- hrapavost ostenja,
- rastlinstvo in vegetacija,
- poljubna spremenljivost,
- prepreke in ovire,
- trasa vodotoka,
- transport plavin in izpodjedanje ter
- vodostaj in pretok.

W. H. Shen je leta 1972 podal enega od primernejših načinov izbire ustrezne vrednosti koeficienta n_G . Podal je enačbo, ki pregledno upošteva vrsto vplivov:

$$n_G = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m \quad (13)$$

kjer pomenijo:

n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 ... vpliv materiala, hrapavost, ovire v koritu, zaraslost z vegetacijo in

m ... vpliv stopnje meandriranja vodotoka.

Vrednost faktorjev n_i je treba izbrati glede na razmere v praktičnem primeru, če faktorjev ne morem izračunati na podlagi terenskih meritev, je priporočljiva primerjava rezultatov s tabelami, ki jih najdemo v različni literaturi.

Preglednica 3: Parametri za določanje koeficienta nG (Steinman, 2010).

| VPLIV | STANJE KORITA | VREDNOSTI PARAMETROV | |
|------------------------------------|--|----------------------|--|
| Material, ki sestavlja korito | zemlja izkop v skali fini gramoz grobi gramoz | n_0 | 0.020 0.025 0.024 0.028 |
| Stopnja hrapavosti območnega oboda | zablateno korito majhna srednja velika | n_1 | 0.000 0.005 0.010 0.020 |
| Neprizmatičnost | postopna občasna pogosta | n_2 | 0.000 0.005 0.010 - 0.015 |
| Relativni vpliv ovir v koritu | zanemarljiv majhen znaten velik | n_3 | 0.000 0.010 - 0.015 0.020 - 0.030 0.040 - 0.060 |
| Zaraslost z vegetacijo | nizka srednja visoka ekstremna | n_4 | 0.005 - 0.010 0.010 - 0.025 0.025 - 0.050 0.050 - 0.100 |
| Stopnja meandriranja | majhna srednja velika | m | 1.00 1.15 1.30 |

V praksi se vrednost Manningovega koef. določi na podlagi različnih, elektronsko dostopnih tabel, redko po Preglednici 3.

5.3.3 Bočni preliv za režim mirnega toka

Bočni prelivi lahko služijo kot odzemni objekt ali kot razbremenilni objekt. Konstrukcija omogoča, da odteka del vodne količine preko krone, ki je vzporedna oziroma tvori majhen kot z vzdolžno osjo glavnega vodnega toka. Kadar imamo odjem voda za občasni pogon vodne naprave, je lahko korito dolvodno od bočnega odvzema enake širine, pri razbremenilnikih je korito ožje, saj naprej odteka zmanjšana količina vode (Steinman, 2010).

$$Q_{bočno} = Q_{dotok} - Q_{odtok} \quad (14)$$

Izračun prelivne površine po enačbi Polenija (Steinman, 2010):

$$Q_{bočno} = 2.8 \cdot \mu \cdot L h_{pr}^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

kjer je μ koeficient preliva (oblika krone, ..) in L dolžina bočnega preliva /m/.

5.3.4 Izračun prevodnosti

V analizi izhajamo iz osnovne predpostavke; kjer korito razbremenilnega kanala, korito rečne struge same in pretok skozi mostno odprtino, matematično opišemo z modelom trapeznega korita. Za trapezno korito nekoliko preoblikujemo Manningovo enačbo v računsko uporabno in dobimo naslednjo obliko (Steinman, 2010):

$$Q = \frac{\sqrt{I_0}}{n_G} \cdot \frac{S^{5/3}}{O^{2/3}} \quad (16)$$

$$S = b \cdot h + m \cdot h^2 \quad (17)$$

$$O = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2} \quad (18)$$

$$Q = \frac{\sqrt{I_0}}{n_G} \cdot \frac{(b \cdot h + m \cdot h^2)^{5/3}}{(b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2})^{2/3}} \quad (19)$$

kjer je:

Q ... pretok

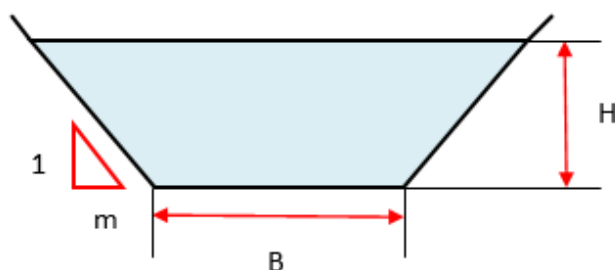
S ... presek prečnega prereza

O ... omočeni obod prečnega prereza

I_0 ... (povprečen) padec dna struge

n_G ... koeficient hrapavosti oz. trenja

m ...naklon brežine



Slika 12: Trapezno korito kot računski model za izračune hidravlične prevodnosti.

5.4 Predhodne raziskave

Leta 2007 je bil predstavljen državni lokacijski načrt za ureditev Savinje za zagotavljanje poplavne varnosti urbaniziranih območij od Ločice ob Savinji do Letuša (študija variant in

okoljsko poročilo). V obsežni dokumentaciji je (zgolj) omenjen tudi razbremenilni kanal Ložnice.

V predhodnih analizah so kanal zgolj lokacijsko umestili oz. opredelili ter poudarili njegovo funkcijo razbremenjevanja dela visokih vod Ložnice proti Savinji. Omenili so zaraščenost korita s travo, razdelilni objekt na začetku trase in fekalno kanalizacijo, speljano v spodnji del trase razbremenilnega kanala (MOP⁶, 2007).

V sklopu vrednotenja in primerjave variantnih rešitev so opredelili nekatere tehnične karakteristike razbremenilnega kanala. Podali so predlagano ureditev za izenačitev prevodnosti. Na podlagi hidravličnih analiz so ugotovili, da je mogoče pretočnost povečati iz tedanjih $Q_1 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ na $Q_2 = 30 \text{ m}^3/\text{s}$. Za zagotovitev povečane prevodnosti so predvideli naslednje ukrepe:

- Povečanje pretočnosti preлива proti razbremenilniku na prelivnem objektu. Nov preliv naj bi imel širino prelivnega polja $b = 6.3 \text{ m}$ in naklon brežin $m = 1 : 1.5$ (prevodnost $Q = 30 - 35 \text{ m}^3/\text{s}$). Poleg preлива so predvideli tudi sanacijo razdelilnega objekta in ureditev odseka proti stari Ložnici s sanacijo preлива in ureditvijo osnovnega toka.
- Čiščenje dna struge s poglobitvijo spodnjega dela trase do 1 m . Dno razbremenilnika so predvideli z ureditvijo širine $b = 2 \text{ m}$ in naklonom brežin $m = 1 : 2$.
- Izdelava nasipov ob razbremenilniku na mestih, kjer je teren prenizek. Gradnja nasipov naj bi potekala v zgornjem delu trase v dolžini 700 m na obeh brežinah, na območju Orove na levem bregu v dolžini 174 m , na odseku pod regionalno cesto na obeh straneh v dolžini 85 oziroma 125 m in na območju železniškega prehoda na dolžini 196 m . Nasip je bil predviden kot zemeljski z zatravljeno površino.
- Tlakovanje območja premostitev z gladko oblogo iz lomljenca v betonu.
- Predvideli so redno vzdrževanje s košnjo in sezonskim čiščenjem. Na podlagi hidravličnega izračuna so ugotovili, da je prevodnost zelo odvisna od hrapavosti. Pri slabo vzdrževanem stanju ($nG = 0,05$) so gladine za 0.4 m pri pretoku $Q_r = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ višje kot pri vzdrževanem stanju ($nG = 0,03$) (MOP, 2007).

Ugotovili so, da je bil vpliv razbremenilnika Ložnice na visoke vode Ložnice ob tedanjih razmerah in glede na dimenzije objekta sorazmerno majhen, s predlaganimi ukrepi pa bi bil zmeren (MOP, 2007).

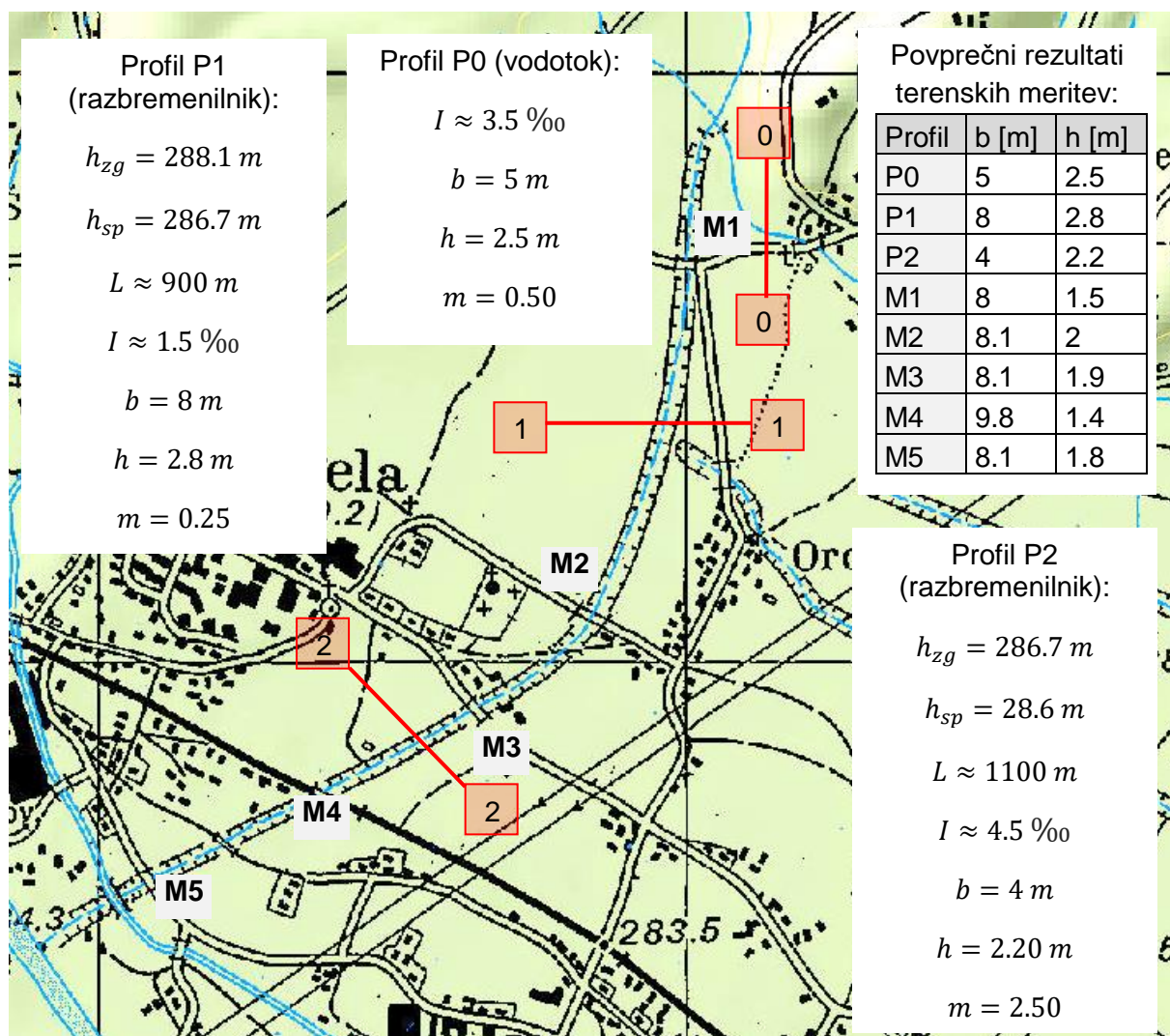
Predstavljena analiza je v večini ostala nerealizirana. Na kanalu so se izvajali zgolj lokalni ukrepi. Omembe vredno je (individualno) oranje v zgornjem in spodnjem delu trase, z

⁶ MOP: Ministrstvo za okolje in prostor RS.

namenom poglobljanja struge in tesnjenja brežin ter z namenom uravnavanja nivoja podzemne vode (zaščita pred zalitjem kleti v primeru visokih vod). Oba ukrepa sta bila narejena brez (javno dostopne) dokumentacije. Po terenski oceni bi današnja pretočna sposobnost zaradi omenjenega lokalnega urejanja lahko znašala, kot je bil predviden projektni pretok iz leta 2007, $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, vendar pa je potrebno upoštevati še premostitve, ki nam to omejujejo.

5.5 Analiza obstoječega stanja

Glede na lastnosti terena razdelimo razbremenilni kanal na dva odseka. Vsak odsek ima pripadajoče hidrografske in topografske lastnosti (maksimalne, minimalne nadmorske višine, naklon in obliko oz. dimenzije korita). Prav tako v prerezu P0 preverimo pretočno sposobnost struge.



Slika 13: Razbremenilni kanal Ložnice (ARSO, 2006), hidrografske in topografske podatki (ARSO, 2006) in povprečni rezultati terenskih meritev (avtor, terenski ogled, 2016).

V profilu P0 smo na podlagi preglednice 3 iz vrednotili vrednost Manningovega koeficienta trenja $n_G = 0.045$, v profilih P1 in P2 smo se navezali na preteklo analizo (poglavje 5.4) in uporabili že hidravlično določene vrednosti $n_G(\text{vzdrževano}) = 0.03$ in $n_G(\text{nevzdrževano}) = 0.05$. Dejansko stanje je po terenskem ogledu ocenjeno na vrednost med obema, $n_G(\text{dej}) = 0.04$. Rezultati hidravlične prevodnosti po posameznih profilih so naslednji:

$$P0: Q = 27 \text{ m}^3/\text{s} \quad (20)$$

$$P1: Q_{vzd.} = 46 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{nvzd.} = 28 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{dej.} = 35 \text{ m}^3/\text{s} \quad (21)$$

$$P2: Q_{vzd.} = 49 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{nvzd.} = 30 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{dej.} = 37 \text{ m}^3/\text{s} \quad (22)$$

5.6 Hidrotehnični objekti, ki omejujejo prevodnost struge

V tej analizi smo uporabili osnovno predpostavko, da je padec dna mostnega prepusta enak povprečnemu padcu dna korita razbremenilnika. Kanal smo po terenski oceni že razdelili na dva odseka in na podlagi »topografskih kart« določili pripadajoče naklone (slika13). V osnovi torej za izračun pretočne sposobnosti dane premostitve uporabimo dva različna naklona, odvisno od profila razbremenilnega kanala v katerem se objekt nahaja ($P1: I_1 \approx 1.5 \text{ ‰}$ in $P2: I_2 \approx 4.5 \text{ ‰}$).

Pri izračunu smo upoštevali tudi varnostno višino: $\Delta H = \frac{v^2}{2 \cdot g}$, pri čemer smo hitrost pridobili iz profila razbremenilnega kanala. Tudi v tem primeru smo uporabili predpostavko, da se hitrost pri pretoku skozi mostno odprtino ne spremeni, čeprav gre za zožitev, kjer se nam hitrost dejansko nekoliko poveča. Dobili smo naslednje rezultate:

$$P1: v_1 = 1.08 \text{ m/s} \rightarrow \Delta H_1 \approx 10 \text{ cm} \quad (23)$$

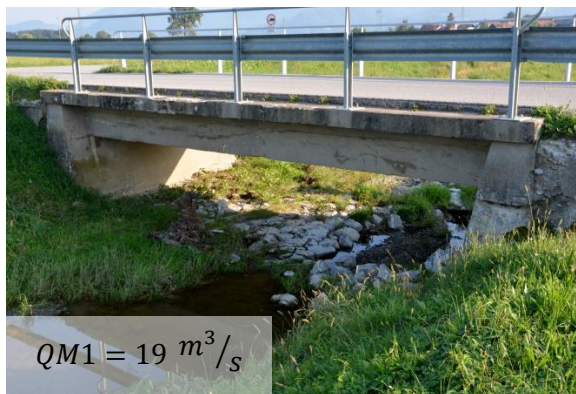
$$P2: v_2 = 1.62 \text{ m/s} \rightarrow \Delta H_2 \approx 15 \text{ cm} \quad (24)$$

Steinman (2010) določa Manningov koeficient hrapavosti v odvisnosti od stanja betonskih površin v betonskih prepustih z naslednjimi vrednostmi:

- zelo gladka površina $\rightarrow n_G = 0.010$,
- gladka površina $\rightarrow n_G = 0.011 - 0.015$,
- betonirano na mestu $\rightarrow n_G = 0.015 - 0.020$.

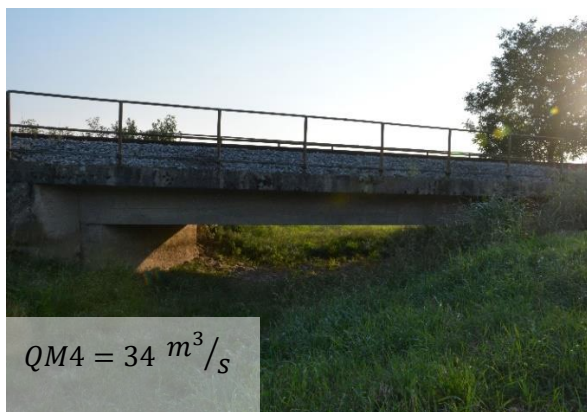
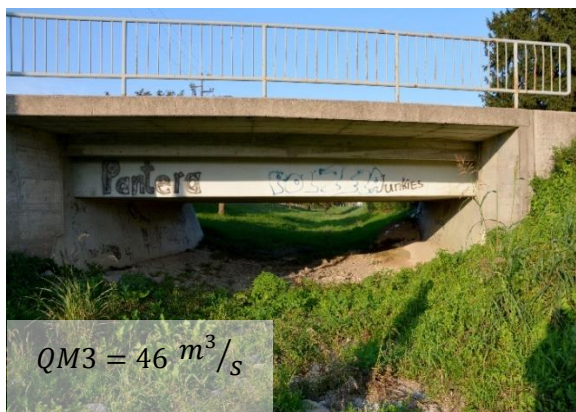
Omenjene vrednosti se uporabljajo predvsem pri cevni prepustih. Ker je trenje na dnu mostne odprtine večje kot po ostenju, izberemo vrednost $n_G = 0.025$.

Premostitve in njihova maksimalna pretočna sposobnost:



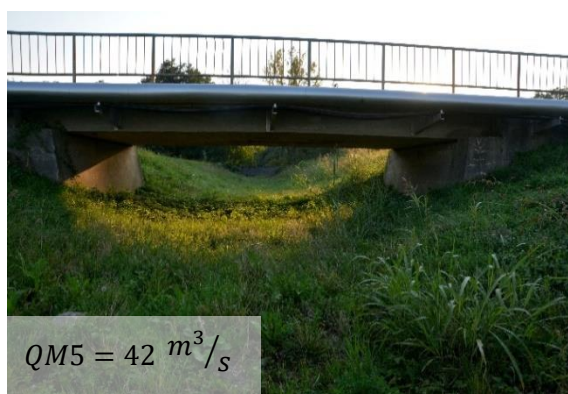
Slika 14: Premostitev 1 (Skok, 2016).

Slika 15: Premostitev 2 (Skok, 2016).



Slika 16: Premostitev 3 (Skok, 2016).

Slika 17: Premostitev 4 (Skok, 2016).



Slika 18: Premostitev 5 (Skok, 2016).

5.7 Določitev kritičnega objekta

Pretočna sposobnost struge vodotoka Ložnice dolvodno od bifurkacije z razbremenilnim kanalom znaša $27 \text{ m}^3/\text{s}$. Zaradi omejitev v prostoru (Natura 2000) predpostavimo, da vodotoka (dolvodno spada pod omenjeno omejitev), ne moremo urejati, zato je ta vrednost konstantna. Pretočno sposobnost razbremenilnega kanala preverjamo za naslednje vrednosti:

$$Q_X = (Q_{\text{vodotok}} = \text{const.} = 27 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}) + Q_{\text{razbremenilnik}}(X) \quad (25)$$

$$X = 100 \rightarrow Q_{100} = 64 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \rightarrow Q_r = 37 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (26)$$

$$X = 50 \rightarrow Q_{50} = 58 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \rightarrow Q_r = 31 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (27)$$

$$X = 10 \rightarrow Q_{10} = 43 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \rightarrow Q_r = 16 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (28)$$

Preglednica 4: Pretočna sposobnost razbremenilnika za prevajanje 100-letnega pretoka.

| Kritični prerez/objekt za prevajanje pretoka Q100 | Q dej. [m ³ /s] | Qvzd. [m ³ /s] | Qnevzd. [m ³ /s] | ΔQdej. [m ³ /s] | ΔQvzd. [m ³ /s] | ΔQnevzd. [m ³ /s] |
|---|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| P0: Prerez vodotoka | 27 | | | | | |
| P1: Prerez razbremenilnika | 35 | 46 | 28 | -2 | 9 | -9 |
| P2: Prerez razbremenilnika | 37 | 49 | 30 | 0 | 12 | -7 |
| M1: Premostitev (cestna) | 19 | | | -18 | | |
| M2: Premostitev (cestna) | 49 | | | 12 | | |
| M3: Premostitev (cestna) | 46 | | | 9 | | |
| M4: Premostitev (želez.) | 34 | | | -3 | | |
| M5: Premostitev (cestna) | 42 | | | 5 | | |

Preglednica 5: Pretočna sposobnost razbremenilnika za prevajanje 50-letnega pretoka.

| Kritični prerez/objekt za prevajanje pretoka Q50 | Q dej. [m ³ /s] | Qvzd. [m ³ /s] | Qnevzd. [m ³ /s] | ΔQdej. [m ³ /s] | ΔQvzd. [m ³ /s] | ΔQnevzd. [m ³ /s] |
|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| P0: Prerez vodotoka | 27 | | | | | |
| P1: Prerez razbremenilnika | 35 | 46 | 28 | 4 | 15 | -3 |
| P2: Prerez razbremenilnika | 37 | 49 | 30 | 6 | 18 | -1 |
| M1: Premostitev (cestna) | 19 | | | -12 | | |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 5

| | | | | | | |
|--------------------------|----|--|--|-----------|--|--|
| M2: Premostitev (cestna) | 49 | | | 18 | | |
| M3: Premostitev (cestna) | 46 | | | 15 | | |
| M4: Premostitev (želez.) | 34 | | | 3 | | |
| M5: Premostitev (cestna) | 42 | | | 11 | | |

Preglednica 6: Pretočna sposobnost razbremenilnika za prevajanje 10-letnega pretoka.

| Kritični prerez/objekt za prevajanje pretoka Q10 | Q dej. [m ³ /s] | Qvzd. [m ³ /s] | Qnevzd. [m ³ /s] | $\Delta Q_{dej.}$ [m ³ /s] | $\Delta Q_{vzd.}$ [m ³ /s] | $\Delta Q_{nevzd.}$ [m ³ /s] |
|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| P0: Prerez vodotoka | 27 | | | | | |
| P1: Prerez razbremenilnika | 35 | 46 | 28 | 19 | 30 | 12 |
| P2: Prerez razbremenilnika | 37 | 49 | 30 | 21 | 33 | 14 |
| M1: Premostitev (cestna) | 19 | | | 3 | | |
| M2: Premostitev (cestna) | 49 | | | 33 | | |
| M3: Premostitev (cestna) | 46 | | | 30 | | |
| M4: Premostitev (želez.) | 34 | | | 18 | | |
| M5: Premostitev (cestna) | 42 | | | 26 | | |

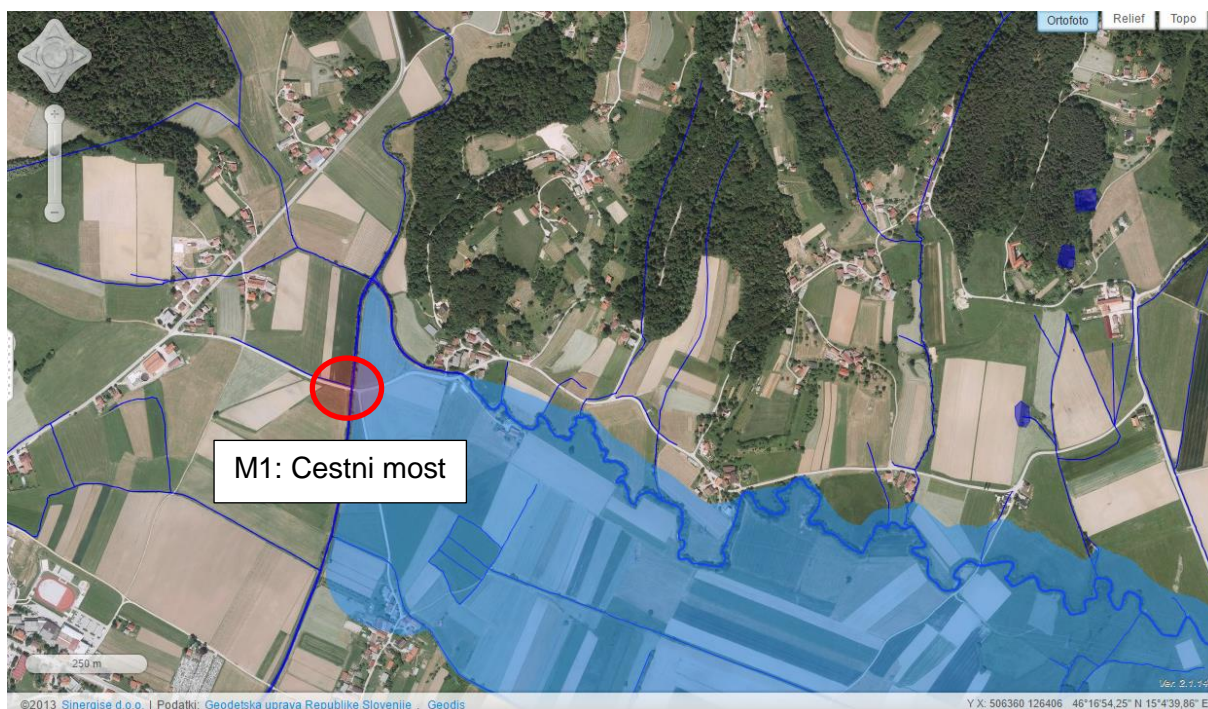
Hidravlična analiza je pokazala, da s samo strugo nimamo težav za zagotovitev pretočne sposobnosti. Vseeno pa je potrebno izpostaviti, da za 100 (50)-letno vodo prereza razbremenilnika (P1 in P2), v primeru zelo zanemarjenega korita ne zagotavljata zadostne poplavne varnosti (preglednici 4 in 5).

Pri premostitvenih objektih se izkaže za najbolj kritičnega most 1 (M1), ki je cestni in ni sposoben prevajati 100-letne in 50-letne visoke vode. Zgolj minimalna prevodnost je zagotovljena tudi za pretoke z 10-letno povratno dobo. V analizi smo uporabili različne predpostavke, zato prihaja do zajeze najverjetneje že pri Q10. Pri višjih pretokih je zajeza še večja in posledično prihaja do poplavljanja. Gorvodno je bifurkacija, v neposredni bližini pa so objekti, ki so pri Q100 že poplavljeni. Cestna infrastruktura, manjši kmetijski objekti in površine so poplavljeni že pri nižjem pretoku.

Za 100-letne vode je kritičen tudi premostitveni objekt št. 3 (M3), ki predstavlja železniški prehod (slika 17). Prekoračitev prevodnosti je majhna, pri izračunih pa je bilo upoštevano tudi varnostno višino. Prevajanje Q100 lahko zagotovimo z manjšo rekonstrukcijo (npr. čiščenjem in utrditvijo dna). Objekt lahko postane kritičen v primeru pretoka višjega od Q100, takrat prihaja do zajeze tudi na tem objektu. Posledično prihaja do razlivanja na okoliške njive. V

tem delu so kmetje že lokalno preorali in poglobili strugo, najverjetneje z razlogom ščitenja poljščin.

Za najbolj kritičen objekt se torej izkaže M1, ki ga je potrebno v celoti rekonstruirati (zamenjati). Našo ugotovitev prikazemo oz. potrdimo še s spodnjo poplavno karto.



Slika 19: Splošna poplavna karta (Geopedia, 2013).

5.8 Izboljšanje prevodnosti

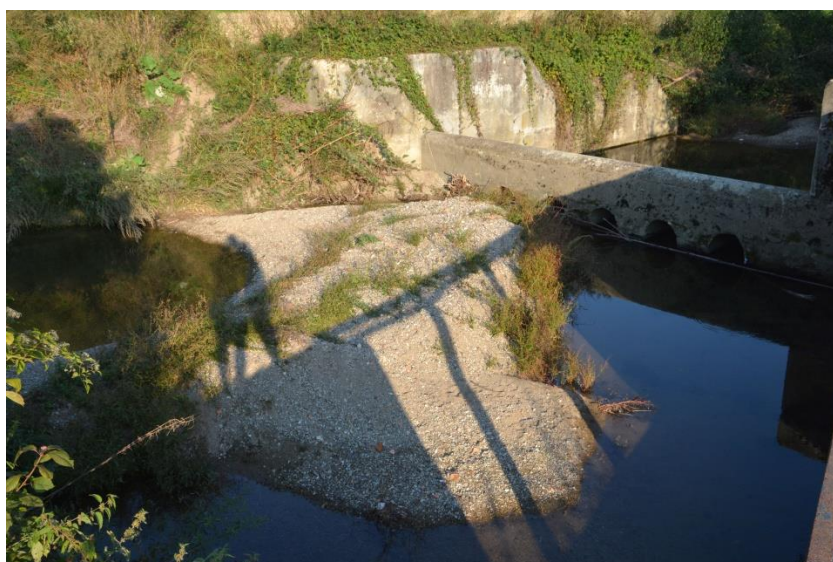
Če želimo zagotoviti prevodnost razbremenilnega kanala za Q100 (Q50) in vsaj zmanjšati prelivanja v zgornjem delu, moramo izvesti naslednje ukrepe:

- rekonstrukcija objekta M1, kjer se poveča prevodnost iz obstoječih $Q = 19 \text{ m}^3/\text{s}$ na min. $37 \text{ (40) m}^3/\text{s}$, pripadajoče dimenzije mostne odprtine, ki nam omogočajo omenjeni pretok, z upoštevanjem varnostno višino so (npr.): $b = 8 \text{ m}$, $h = 2.3$,
- vzdrževalna dela na objektu M3, kjer se izvede čiščenje in utrditev dna mostne odprtine, z namenom povečanja pretočne sposobnosti za $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$,
- redno vzdrževanje celotnega kanala (košnja, čiščenje mostnih odprtin),
- povečati dimenzije prelivnega objekta med vodotokom in razbremenilnim kanalom, te je že določilo MOP leta 2007 za pretoke $Q = 30 - 35 \text{ m}^3/\text{s}$, kar bi morale zadostovati (poglavje 5.4), oz.

- dimenzioniranje novega prelivnega objekta na dimenzije $L = 6.3m$, $h_{pr} = 2.0m$, dimenzije so ocenjene na podlagi predhodnih raziskav in Polinejeve enačbe (dimenzioniranje HNP^7 , z vrednostjo koeficienta $\mu = 0.75$),
- nasipi po potrebi, navezava na študijo iz leta 2007 (poglavje 5.4) in
- redno vzdrževanje celotnega razdelilnega objekta, ki je zaradi različnih nanosov vodotoka v slabem stanju in posledično izgublja na funkcionalnosti (slika 21).



Slika 20: Razdelilni objekt, desno razbremenilnik, naravnost Ložnica (Skok, 2016).



Slika 21: Slabo vzdrževanje na razdelilnem objektu (Skok, 2016).

⁷ HNP: Hidravlično najugodnejšo prelivno polje.

6 SKLEP

Vodogradbeni ukrepi za zagotavljanje poplavne varnosti so v sodobni družbi ključnega pomena. Osnovni namen diplomske naloge je preveriti obstoječe stanje za enega izmed ukrepov, konkretno za razbremenilni kanal in kot rezultat tudi predvideti potrebni idejni ukrep.

Raziskovanje naravnogeografskih značilnosti vodotoka Ložnice nam je dalo podatke o karakteristikah prispevnega območja. Z raziskovanjem smo se zavedali o kompleksnosti vodotokov s prosto gladino. Za vsako urejanje oz. dimenzioniranje bodisi samega vodotoka, bodi objektov na njem, so potrebne dobre hidrološke analize. Ker je uporaba empiričnih enačb za določanje površinskega odtoka zelo omeja, smo svoje rezultate preverili še z nekoliko kompleksno, statistično obdelavo podatkov. Pridobljene rezultate smo uporabili kot vhodni podatek za hidravlično analizo. V tej analizi smo veliko predpostavljali, to nam je bilo dovoljeno, saj kot končni rezultat predstavimo zgolj idejno zasnovo. V pomoč nam je bila tudi predhodna, sicer ne povsem obdelana raziskava, ki smo jo lahko uporabili kot smernice.

Rezultat, v prvi vrsti hidravlične analize, posplošeno pa lahko rečemo tudi diplomskega dela, je potrebna rekonstrukcija mostnega objekta. Ne glede, na že večkrat omenjene predpostavke, lahko trdimo, da je omenjeni objekt kritičen in ne omogoča poplavne varnosti za dane projektne pretoke.

Osredotočili smo se na hidrološke in hidravlične modele, v našem primeru analize. V praksi pa ne smemo pozabiti še na ekonomski model, ki je dandanes temeljni in določa smernice praktično vsakega gradbenega projekta.

VIRI

ARSO. 2006. Atlas okolja. ARSO.

http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso

(Pridobljeno 2. 9. 2016.)

Brilly, M. 1991. Varnostni ukrepi pri obrambi pred poplavami. *Ujma*, revija za vprašanje varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 5, 150–151.

Brilly, M. 1994. Zaščita pred poplavami. Priročnik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo.

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

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Chow, V. T. 1959. *Open-channel hydraulics*. New York, McGraw-Hill.

Franetič, J. 2005. Mesto v objemu voda: poplave v Celju v 20. stoletju: Zaščita, reševanje in pomoč ob naravnih in drugih nesrečah. Celje, Zgodovinski arhiv Celje: str. 77.

Geopedia. 2013. Interaktivni spletni atlas in zemljevid Slovenije.

http://www.geopedia.si/#T1344_L6234_x513094.25_y128950.25_s13_b3

(Pridobljeno 14. 9. 2016.)

Kolbezen, M. 1991. Hidrološke značilnosti novembrske visoke vode leta 1990. *Ujma*, revija za vprašanje varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 5, 16–18.

Kozelj, D., Kozelj, K., Steinman, F., Gosar, L., 2008. Poplavna ogroženost in posledice dogodkov preostalega tveganja. *Ujma* 22, 145–151

<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2008/145.pdf> (Pridobljeno 12. 8. 2016.)

Mikoš, M. 2012. Prispevek k zgodovinskemu pregledu razvoja hudourništva in hudourničarstva v Sloveniji. *Gozdarski vestnik* 70, 10: 429–439.

Ministrstvo za okolje in prostor RS. 2013. Zagotovitev poplavne varnosti na porečju Savinje.

http://www.porecje-savinje.si/Reka_Savinja/O_Savinji/ (Pridobljeno 1. 9. 2016.)

Naglič, M. 2013. Urejanje voda na območjih Natura 2000. Slovenski vodar, 26: 64–68.
http://www.drustvo-vodarjev.si/SLIKE/04_SLOVENSKI_VODAR/SV26.pdf (Pridobljeno 5. 9. 2016.)

Natek, 1984. Polzela: Geografske značilnosti Polzele in njenega zaledja. Žalec, kulturna skupnost občine Žalec: str. 38–81.

Natek, M. 1991. Nekateri geografski vidiki in učinki povodnji v Spodnji Savinjski dolini 1. novembra 1990. Ujma, revija za vprašanje varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 5, 66–75.

Radinja, M. 1991. Porečje – povodje – vodozbirno območje in podobno. Ujma, revija za vprašanje varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 5, 270.

RS, Ministrstvo za okolje in prostor. 2007. Študija variant s predlogom najustreznejše variantne rešitve za ureditev Savinje za zagotavljanje poplavne varnosti urbaniziranih območij od Ločice ob Savinji do Letuša. Mapa 1, zvezek 2. Vrednotenje in primerjava variantnih rešitev. Ljubljana, Ljubljanski urbanistični zavod: 63 str.

RS, Ministrstvo za okolje in prostor. 2007. Študija variant s predlogom najustreznejše variantne rešitve za ureditev Savinje za zagotavljanje poplavne varnosti urbaniziranih območij od Ločice ob Savinji do Letuša. Mapa 1, zvezek 2. Predhodne analize in določitev variant. Ljubljana, Ljubljanski urbanistični zavod: 63 str.

Steinman, F. 2010. Hidravlika. 2. ponatis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo in Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem.

Šauta, M. 2010. Hidrološka analiza hudournika Kroparica s pritoki. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šauta): 71 str.

Vodopivec, J. 2005. Mesto v objemu voda: poplave v Celju v 20. stoletju: Reševanje poplavljenega arhivskega in knjižničnega gradiva, vzroki poplav. Celje, Zgodovinski arhiv Celje: str. 83.

Vogrin, M., ZRSVN, OE Celje in Kopitar, M. Žalec, 2009. Reka Ložnica s poplavnim območjem.

http://www.turizemzalec.si/upload/DirectoryEntry/27/attachments/zlozenka%20loznica_LOW.pdf (Pridobljeno 20. 8. 2016.)

Wikipedija. 2013. Bifurkacija.

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Bifurkacija> (Pridobljeno 2. 9. 2016.)