

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:

Čož, N., 2013. Okvirna ocena posledic porušitve štirih slovenskih zemeljskih pregrad. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Četina, M., somentor Širca, A.): 64 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Čož, N., 2013. Okvirna ocena posledic porušitve štirih slovenskih zemeljskih pregrad. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Četina, M., co-supervisor Širca, A.): 64 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

**NEJC ČOŽ**

**OKVIRNA OCENA POSLEDIC PORUŠITVE ŠTIRIH  
SLOVENSkih ZEMELJSKIH PREGRAD**

Diplomska naloga št.: 3340/HS

**PRELIMINARY DAM-BREAK FLOW ANALYSIS OF  
FOUR EMBANKMENT DAMS IN SLOVENIA**

Graduation thesis No.: 3340/HS

**Mentor:**

prof. dr. Matjaž Četina

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

dr. Andrej Širca

**Član komisije:**

doc. dr. Andrej Kryžanowski

doc. dr. Simon Schnabl

Ljubljana, 26. 11. 2013

## STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
59	17	XXX	neupoštevani

**IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Nejc Čož izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »Okvirna ocena posledic porušitve štirih slovenskih zemeljskih pregrad«.

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

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

Ljubljana, 7.11.2013

---

(podpis kandidata)

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali naslednji profesorji:

**BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>627.13:627.82(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Nejc Čož</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Matjaž Četina</b>
<b>Somentor:</b>	<b>dr. Andrej Širca</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Okvirna ocena posledic porušitve štirih slovenskih zemeljskih pregrad</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>64 str., 10 pregl., 38 sl., 37 en., 3 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>pregrada, porušitev pregrad, parametri porušitve, poenostavljene metode, matematični model, SMPDBK</b>

**Izvleček**

V diplomski nalogi smo obravnavali posledice porušitve štirih pregrad na celjskem območju: Trnava, Lahovnica, Loče in Radigaj. Vse štiri pregrade so bile zgrajene v drugi polovici dvajsetega stoletja in so v zadnjih letih slabo vzdrževane. V okviru projekta VODPREG jim je bila dodeljena zelo slaba ocena, kar pomeni, da predstavljajo visoko stopnjo ogrožanja dolvodnega prostora. Nas je zanimala določitev vsaj okvirne stopnje ogrožanja dolvodnega prostora. Analizo smo opravili z uporabo poenostavljenega matematičnega modela SMPDBK, ki je bil razvit pri National Weather service. Najprej smo ocenili primernost poenostavljenih metod za preliminarne ocene posledic na primeru pregrad Trnava in Loče, kjer smo rezultate primerjali z že obstoječimi poročili porušitev. Izračune smo nato izvedli za različne scenarije rušenja, ki zajemajo trenutno in postopno porušitev. Rezultati izračunov so ocene največjih pretokov in največjih globin vodnega toka dolvodno od pregrade ter časi propagacije vala. Na podlagi teh rezultatov smo na situacijo vrisali obseg poplavljenega območja. Na ta način smo določili okvirno stopnjo ogroženosti dolvodnega prostora zaradi posledic porušitve pregrad.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>627.13:627.82(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Nejc Čož</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Prof. Matjaž Četina, Ph.D.</b>
<b>Co-advisor:</b>	<b>Andrej Širca, Ph.D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Preliminary Dam-Break Flow Analysis of Four Embankment Dams in Slovenia</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis – University studies</b>
<b>Notes:</b>	<b>64 p., 10 tab., 38 fig., 37 eq., 3 ann.</b>
<b>Key words:</b>	<b>Dam, Dam-break, Break parameters, Simplified methods, Mathematical model, SMPDBK</b>

### **Abstract**

Graduation thesis is discussing dam-break flow of four embankment dams in Celje region: Trnava, Lahovnica, Loče and Radigaj. All four objects were constructed in the second half of twentieth century. They have not been maintained properly in the last decade and according to findings of project VODPREG they do not meet the sufficient safety criteria. This means that these four dams represent high level of hazard for downstream area. We were interested on determining estimative hazard rating for downstream area using Simplified Dam-Break (SMPDBK) Flood Forecasting Model, developed by National Weather Service. First we evaluated how suitable simplified methods are for preliminary analysis by comparing the results of Trnava and Loče with already existing reports in which calculations were made by using proper 1D dam-break models. The calculations were made for instantaneous and gradual breach formations. The result consists of peak flow values at specific cross sections, their respective depths and time required for the peak to reach each cross section. Based on the results of the analysis flood maps of downstream areas were created. This is how we have defined the preliminary dam-break flood hazard rating for all four downstream areas.

**ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Matjažu Četini in somentorju dr. Andreju Širci za usmerjanje in pomoč pri pisanju diplomske naloge.

Še posebej se zahvaljujem svoji družini, dekletu in prijateljem, ki so mi v času študija stali ob strani.



## KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE .....	I
IZJAVA O AVTORSTVU .....	II
IZJAVE O PREGLEDU NALOGE .....	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....	IV
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....	V
ZAHVALA .....	VI
KAZALO VSEBINE .....	VII
KAZALO SLIK .....	IX
KAZALO PREGLEDNIC .....	XI
KRATICE .....	XII
SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK .....	XIII
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 SPLOŠNO .....</b>	<b>2</b>
2.1 Splošno o poružitvah pregrad .....	2
2.2 Mehanizmi rušenja .....	4
2.3 Zakonodaja .....	6
<b>3 TEORETIČNE OSNOVE IN UPORABLJENI MATEMATIČNI MODEL .....</b>	<b>8</b>
3.1 Osnovne enačbe za račun nestalnega toka .....	8
3.1.1 Matematični modeli za simulacijo poružitvenih valov .....	9
3.1.2 Opis modela SMPDBK .....	10
3.1.2.1 Odprtina poružitve .....	11
3.1.2.2 Geometrija doline .....	11
3.1.2.3 Propagacija vala dolvodno .....	12
3.1.3 Račun največjega iztoka skozi odprtino, nastalo po poružitvi .....	12
3.1.3.1 Postopna poružitev .....	12
3.1.3.2 Trenutna poružitev .....	13
3.1.3.3 Račun največje globine v prvem profilu dolvodno .....	13
3.1.3.4 Korekcija zaradi potopitve .....	15
3.1.4 Propagacija vala dolvodno .....	16
3.1.4.1 Dimenzije doline .....	16
3.1.4.2 Parametri propagacije .....	17
3.1.4.3 Brezdimenzijske propagacijske krivulje in izračun pretoka .....	18
3.1.4.4 Čas nastopa največjega pretoka .....	20
3.1.5 Shema algoritma .....	21

<b>4 VHODNI PODATKI IN RAČUN .....</b>	<b>22</b>
4.1 Opis obstoječega stanja pregrad .....	22
4.1.1 Trnava.....	24
4.1.2 Lahovnica .....	26
4.1.3 Loče .....	28
4.1.4 Radigaj.....	30
4.2 Priprava vhodnih podatkov.....	32
4.2.1 Priprava podatkov – parametri za račun iztoka .....	33
4.2.1.1 Trnava.....	33
4.2.1.2 Lahovnica .....	34
4.2.1.3 Loče .....	35
4.2.1.4 Radigaj.....	36
4.2.2 Priprava podatkov – geometrija doline.....	37
<b>5 ANALIZA REZULTATOV.....</b>	<b>38</b>
5.1 Primerjava z obstoječimi poročili.....	38
5.1.1 Trnava.....	38
5.1.2 Loče .....	40
5.1.3 Sklepne ugotovitve .....	42
5.2 Analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti na primeru pregrade Trnava.....	43
5.2.1 Prikaz rezultatov .....	43
5.2.2 Sklepne ugotovitve .....	45
5.3 Analiza posledic porušitve z različnimi scenariji rušenja.....	46
5.3.1 Prikaz rezultatov .....	46
5.3.1.1 Trnava.....	47
5.3.1.2 Lahovnica .....	49
5.3.1.3 Loče .....	52
5.3.1.4 Radigaj.....	54
5.3.2 Podaljšanje dolvodnega območja na primeru pregrade Loče.....	57
5.3.3 Sklepne ugotovitve .....	59
<b>6 .ZAKLJUČEK .....</b>	<b>60</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>62</b>

## KAZALO SLIK

Slika 2-1: Vzroki za porušitev pregrad v odstotkih na podlagi 114 primerov porušitev.....	2
Slika 2-2: Vzroki za porušitev zemeljskih pregrad na podlagi 36 porušitev zemeljskih pregrad v obdobju 1951 – 1976.....	3
Slika 3-1: Shema algoritma modela SMPDBK.....	21
Slika 4-1: Pogled na telo pregrade Trnava, levo Žovneško jezero (Pregrada Trnava, 2012).....	24
Slika 4-2: Ortofoto posnetek akumulacije Žovneško jezero in dolvodnega območja (ARSO, Atlas okolja) .....	25
Slika 4-3: Pogled na telo pregrade Lahovnica (Pregrada Lahovnica, 2012).....	26
Slika 4-4: Ortofoto posnetek zadrževalnika Lahovnica in dolvodnega območja (ARSO, Atlas okolja) .....	27
Slika 4-5: Pogled na telo pregrade Loče, levo Šmartinsko jezero (Pregrada Loče, 2012).....	28
Slika 4-6: Ortofoto posnetek akumulacije Šmartinsko jezero in dolvodnega območja (ARSO, Atlas okolja) .....	29
Slika 4-7: Pogled na telo pregrade Radigaj, desno Braslovškoko jezero (Pregrada Radigaj, 2012).....	30
Slika 4-8: Ortofoto posnetek akumulacije Braslovško jezero in dolvodnega območja (ARSO, Atlas okolja) .....	31
Slika 5-1: Primerjava največjih pretokov izračuna SMPDBK z izračunom iz poročila NIVO .....	38
Slika 5-2: Največje globine izračunane s programom SMPDBK .....	39
Slika 5-3: Primerjava največjih pretokov izračuna SMPDBK s poročilom FAGG .....	40
Slika 5-4: Primerjava med časom nastopa največjega pretoka (SMPDBK) in časom potovanja čela vala (poročilo FAGG) .....	41
Slika 5-5: Primerjava nivojev gladin med izračunom SMPDBK in poročilom FAGG .....	42
Slika 5-6: Kote gladin - analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti.....	44
Slika 5-7: Globine - analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti .....	44
Slika 5-8: Največji pretoki - analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti .....	45
Slika 5-9: Časi nastopa konice - analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti .....	45
Slika 5-10: Največji pretoki vzdolž podolžnega profila – pregrada Trnava .....	47
Slika 5-11: Kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila - pregrada Trnava.....	48
Slika 5-12: Globine vzdolž podolžnega profila - pregrada Trnava .....	48
Slika 5-13: Časi nastopa največjih pretokov - pregrada Trnava.....	49
Slika 5-14: Največji pretoki vzdolž podolžnega profila – pregrada Lahovnica .....	50
Slika 5-15: Kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila - pregrada Lahovnica.....	50

---

Slika 5-16: Globine vzdolž podolžnega profila - pregrada Lahovnica.....	51
Slika 5-17: Časi nastopa največjih pretokov - pregrada Lahovnica .....	51
Slika 5-18: Največji pretoki vzdolž podolžnega profila – pregrada Loče .....	52
Slika 5-19: Kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila - pregrada Loče .....	53
Slika 5-20: Globine vzdolž podolžnega profila - pregrada Loče.....	53
Slika 5-21: Časi nastopa največjih pretokov - pregrada Lahovnica .....	54
Slika 5-22: Največji pretoki vzdolž podolžnega profila - pregrada Radigaj .....	55
Slika 5-23: Kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila - pregrada Radigaj.....	55
Slika 5-24: Globine vzdolž podolžnega profila - pregrada Radigaj .....	56
Slika 5-25: Časi nastopa največjih pretokov - pregrada Lahovnica .....	56
Slika 5-26: Globine vzdolž podaljšanega podolžnega profila - pregrada Trnava.....	57
Slika 5-27: Kote največjih gladin vzdolž podaljšanega podolžnega profila - pregrada Trnava .....	58

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1: Uporabljene pretvorbe merskega sistema.....	11
Preglednica 3.2: Privzete vrednosti za porušitveno odprtino (Wetmore in Fread, 1991) .....	11
Preglednica 3.3: Vrednosti koeficienta hrapavosti po SMPDBK .....	14
Preglednica 4.1: Primerjava podatkov obravnavanih pregrad.....	22
Preglednica 4.2: Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka pri pregradi Trnava .....	33
Preglednica 4.3: Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka pri pregradi Lahovnica .....	34
Preglednica 4.4: Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka pri pregradi Loče .....	35
Preglednica 4.5: Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka pri pregradi Radigaj.....	36
Preglednica 4.6: Število uporabljenih profilov.....	37
Preglednica 5.1: Vpliv koeficienta hrapavosti na rezultate v zadnjem profilu.....	43

**KRATICE**

ID	enodimenzionalno
AC	avtocesta
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
DAMBRK	matematični model za račun posledic porušitve pregrad (ang. <u>DAM-BReaK Flood Forecasting Model</u> )
ICOLD	Mednarodna komisija za velike pregrade (ang. The <u>I</u> nternational <u>C</u> ommission on <u>L</u> arge <u>D</u> ams)
LIDAR	tehnologija daljinskega zaznavanja (ang. <u>L</u> ight <u>D</u> etection <u>A</u> nd <u>R</u> anging)
NWS	National Weather Service (Ameriška agencija za vreme)
SLOCOLD	Slovenski nacionalni komite za velike pregrade (ang. <u>S</u> LOvenian <u>C</u> ommittee on <u>L</u> arge <u>D</u> ams)
SMPDBK	poenostavljen matematični model za račun posledic porušitve pregrad (ang. <u>S</u> i <u>M</u> PLified <u>D</u> am- <u>B</u> rea <u>K</u> Flood Forecasting Model)
VODPREG	projekt Evidentiranje in pregled stanja zemeljskih in betonskih pregrad

## **SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK**

Ortofoto – aerofotografski posnetek, ki je z upoštevanjem podatkov o reliefu in absolutni orientaciji fotografskega posnetka pretvorjen v ortogonalno projekcijo.

Propagacija – širjenje (npr. propagacija poplavnega vala po dolini).





## 1 UVOD

Ob porušitvi vodne pregrade se v relativno kratkem času sprostijo ogromne količine vode. Pri tem nastane poplavni val, ki z rušilno močjo potuje dolvodno. Posledice takšnega dogodka so lahko katastrofalne. Osnova za preprečitev nastanka velike gospodarske škode in izgube življenj na dolvodnih območjih je izračun hidravličnih posledic porušitve pregrade. V Sloveniji obstaja veliko število vodnih pregrad, za katere so ocene posledic starejšega datuma in zato premalo natančne ali pa sploh niso bile izdelane. V to kategorijo sodijo tudi pregrade Tmava, Loče, Lahovnica in Radigaj, ki jih bomo obravnavali v diplomski nalogi.

Zaradi potreb po določitvi vsaj okvirne stopnje ogrožanja dolvodnega prostora bomo za obravnavane pregrade izvedli izračune porušitev z uporabo poenostavljenih metod. Pri tem bomo uporabili poenostavljen matematični model SMPDBK. V primerjavi s kompleksnejšimi modeli je SMPDBK hitrejši in preprostejši za uporabo ter potrebuje manj vhodnih podatkov. Rezultati izračuna so ocene največjih pretokov, največjih globlin in časa, ko so te dosežene.

Cilj diplomske naloge je na izbranih primerih oceniti primernost poenostavljenih metod za preliminarno oceno posledic porušitve pregrad. Z analizo rezultatov želimo tudi določiti okvirno stopnjo ogroženosti dolvodnih naselij ter infrastrukture.

Diplomska naloga je vsebinsko razdeljena v štiri sklope. V prvem bomo na splošno predstavili pomen določanja posledic porušitve pregrad. Opisali bomo tudi vzroke za porušitve in mehanizme rušenja ter se dotaknili pomanjkljivosti slovenskih predpisov. V drugem sklopu bomo predstavili teoretične osnove računa porušitvenega vala. Podrobneje bomo opisali uporabljen matematični model, s katerim bomo v tretjem sklopu izvedli izračun posledic za obravnavane primere. V zadnjem sklopu sledi analiza rezultatov in povzetek glavnih ugotovitev.

## 2 SPLOŠNO

### 2.1 Splošno o poružitvah pregrad

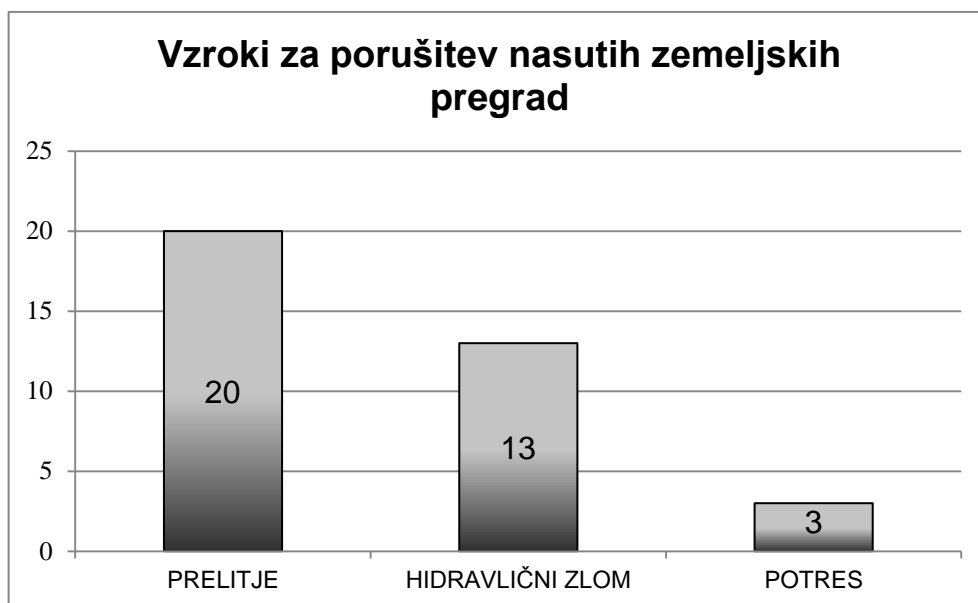
Pregrada je definirana kot objekt, ki je zgrajen z namenom akumuliranja vode. Za današnjo družbo so pregrade življenjsko pomembne, saj zagotavljajo preskrbo s pitno vodo, preskrbo z vodo za namakanje in druge gospodarske dejavnosti, nudijo zaščito pred škodljivim delovanjem visokih voda in omogočajo proizvodnjo elektrike. Pregrade so že tako integrirane v našo družbo, da se jih velikokrat sploh ne zavedamo, dokler ni z njimi kaj narobe in je že prepozno za ukrepanje. Poplavni val, ki sledi poružitvi takšnega objekta, se razlije po dolvodni dolini v veliko večjem obsegu kot pri poplavah zaradi visokih voda. Takšen poplavni val lahko dosega velike hitrosti toka in zato povzroča veliko škodo. Gospodarska škoda je v takih primerih vedno velika, v primeru poselitve dolvodnega območja pa so ogrožena tudi človeška življenja.

V preteklosti se je zgodilo že veliko število porušitev pregrad, kljub temu pa je statistično gledano to zelo redek pojav. Na podlagi 15.000 velikih pregrad po svetu in v povprečju 1,5 porušitve letno je verjetnost porušitve pregrade na leto  $10^{-4}$  (Goubet v Širca in Četina, 2010). Costa (1980) ugotavlja, da je bilo v zadnjih 100 letih zabeleženih približno 200 omembe vrednih porušitev, ki so terjale več kot 11.100 življenj. Od tega je kar 6.800 žrtev posledica največjih treh porušitev: Vajont, Italija, 1963, 2.600 žrtev; South Fork Pennsylvania, ZDA, 1889, 2.200 žrtev; Machhu II, Indija, 1974, 2000 žrtev.

Na sliki 2.1 in sliki 2.2 je prikazana statistika porušitev pregrad, ki sta jo opravila Johnson in Illes leta 1979 (Širca in Četina, 2010).



Slika 2-1: Vzroki za porušitev pregrad v odstotkih na podlagi 114 primerov porušitev



**Slika 2-2: Vzroki za porušitev zemeljskih pregrad na podlagi 36 porušenih zemeljskih pregrad v obdobju 1951 – 1976**

K statistiki o poružitvah pregrad je v preteklih letih veliko prispevala tudi Mednarodna komisija za velike pregrade ICOLD, ki vodi register vseh večjih svetovnih pregrad in nesreč. Širca in Četina (2010) povzemata novejšo ugotovitve ad-hoc komiteja ICOLD za statistično interpretacijo poškodb pregrad iz leta 1995. Ugotovljeno je bilo, da se je odstotek porušenih pregrad po letu 1951 zmanjševal. Pregrade z majhno višino predstavljajo najštevilčnejšo skupino obravnavanih pregrad, hkrati pa tudi največji odstotek porušenih pregrad. Do porušitve največkrat pride kmalu po izgradnji. Pri betonskih pregradah so najpogostejši vzroki za porušitev notranja erozija pod temeljem in zdrs temeljev. Pri nasutih je glavni vzrok prelivanje pregrade, sledita mu notranja erozija telesa pregrade in notranja erozija temelja. Pri zidanih kamnitih pregradah porušitev največkrat povzročita prelivanje in notranja erozija tal. Odstotek porušenih je najnižji pri ločnih pregradah, olajšane težnostne in več-ločne pregrade so bolj občutljive, vse pa zahtevajo dobro temeljenje, saj običajno pride do rušenja zaradi preobremenjenosti temeljnih tal ali bokov.

Nujni ukrep za zaščito pred poružitvijo pregrade je monitoring in redno vzdrževanje objektov. V Sloveniji je bilo leta 2011 in 2012 v okviru projekta VODPREG – *Evidentiranje in pregled stanja zemeljskih in betonskih pregrad* ugotovljeno, da je stanje vodnogospodarskih pregrad v splošnem slabo (DELO, 2013). Med glavnimi vzroki za slabo oceno je navedeno ravno neredno vzdrževanje objektov, odsotnost hidroloških meritev in pomanjkljiva ali izgubljena projektna in obratovalna dokumentacija. Takšno stanje pomeni manjšo varnost pregrade in s tem povečano stopnjo ogrožanja.

Za zaščito pred poružitvijo pregrade pa je zelo pomembna tudi ocena ogroženosti (ang. dam-break hazard analysis). Zagotavlja jasne in natančne informacije službam in ustanovam, ki nastopajo v postopkih umeščanja pregrad v prostor (Širca in Četina, 2010). Na podlagi analize ogroženosti se izdelajo načrti za ukrepanje in reševanje v primeru porušitve, pri tem pa glavno vlogo igra račun posledic porušitve dolvodno od pregrade. Širca in Četina (2010) navajata štiri korake za izdelavo ocene ogroženosti:

- 1) Definicija (statistična) in simulacija (modelna) primera porušitve, ki predstavlja robni pogoj za račun posledic dolvodno od pregrade.
- 2) Račun ali fizično modeliranje širjenja porušitvenega vala na podlagi robnega pogoja iz točke 1 (matematično modeliranje).
- 3) Na podlagi rezultatov iz točke 2) se naredi kartiranje obsega poplave, vrednotenje ogroženosti in načrtovanje reševanja v primeru porušitve.
- 4) Presoja različnih kombinacij kritičnih dogodkov in račun verjetnosti njihovega sočasnega nastopa. Na podlagi najkritičnejših se nato pripravi še ocena tveganja.

## 2.2 Mehanizmi rušenja

Vzroke za poškodbe in v skrajnem primeru rušenje pregrad, ki povzročijo porušitvene valove dolvodno od pregrade, lahko razdelimo v tri velike skupine: konstrukcijske napake, prelivanje, človekovi vplivi (Širca in Četina, 2010). Sam način porušitve pa ločimo na trenutno in postopno porušitev, pri čemer se lahko pregrada poruši v celotnem profilu ali pa se poruši samo omejena širina pregrade.

Med trenutne porušitve spadajo tiste, ki se zgodijo v relativno kratkem času. Te so značilno predvsem za betonske ločne pregrade, pri čemer se poruši praktično celoten pregradni presek. Bolj pogoste so delne in postopne porušitve, kjer lahko od začetka rušenja in do končne širine porušitve, mine od nekaj minut do več ur. Takšen tip porušitve je značilen za nasute zemeljske pregrade. Povzroči ga lahko tako konstrukcijska napaka kot tudi prelivanje čez telo pregrade. Možna je tudi delna trenutna porušitev, ki pa se pojavi pri masivnih in olajšanih betonskih pregradah.

V diplomski nalogi obravnavamo nasute zemeljske pregrade, zato bomo to skupino bolj podrobno predstavili. Kot že rečeno je rušenje nasutih pregrad v večini primerov postopno. Ogromna masa nasutega materiala v pregradi (tudi do več milijonov kubičnih metrov) ne more kar izginiti, ampak jo lahko voda le postopoma erodira (Rajar in Zakrajšek, 1993). Pri tem gre lahko za konstrukcijsko napako, ki privede do notranje erozije. Primera konstrukcijske napake sta hidravlični zlom (ang. piping failure) in razpoke v telesu pregrade. Erozijo povzroči tudi prelivanje, ki je lahko posledica

nezadostne pretočne sposobnosti prelivnih organov, neustreznega obratovanja ali nepričakovanih izrednih dogodkov v bazenu kot so zdrsi večjih zemeljskih mas z bregov, rušenje gorvodne pregrade ipd. (Širca in Četina, 2010). Nezanemarljiv dejavnik pa so tudi živali, predvsem glodavci, katerih rovi oslabijo telo pregrade in pospešijo notranjo erozijo. Trenutno porušitev lahko povzroči samo človeški dejavnik kot je sabotaža oziroma teroristično dejanje v mirnem času in miniranje ali bombardiranje v vojnem času (Širca in Četina, 2010).

Do hidravličnega zloma pride zaradi prevelikih tlačnih razlik med dolvodno in gorvodno stranjo pregrade. Začne se, ko so količine pronicajoče vode večje od kapacitet drenažnega sistema in ta začne odtekati iz pregrade na dolvodni strani. Pri tem voda odnaša delce iz pregrade, pojav pa se progresivno širi proti gorvodni strani in lahko razmeroma hitro privede do porušitve pregrade. Glavni vzrok za to vrsto poškodbe sta neobstoj ali neustrezno dimenzioniranje filtrskih slojev pregrade (Širca in Četina, 2010). Pojavu se tako lahko izognemo z ustrezno konstrukcijsko zasnovo pregrade, tako da podaljšamo poti precejanja vode skozi pregrado, uporabo geotekstilov ali klasičnih filtrov in s tesnilnimi ukrepi (Širca in Četina, 2010). Za preprečitev porušitve je zelo pomemben stalen monitoring precejanja, saj se nekontrolirano precejanje lahko zazna še preden je ogrožena stabilnost samega objekta. Takrat je potrebno hitro izvesti ukrepe za zakasnitev rušenja oziroma, če je možno, preprečiti porušitev. Najbolj znan primer takšnega dogodka je porušitev pregrade Teton v ZDA leta 1976. Voda je zaradi napake v gradnji začela pronicati skozi pregrado in v roku treh ur izjedla luknjo. Zgornji del pregrade se je posul vanjo, potem je tok erodiral še približno tretjino pregradnega preseka. Časa za opozorilo prebivalstva in za umik je bilo dovolj, žrtve so bile minimalne, seveda je nastala ogromna materialna škoda (Sylvester, 2005).

Zelo pogost vzrok porušitve pregrad je tudi prelivanje čez telo pregrade. Pri tem pride do erozije dolvodne strani in postopnega širjenja prelivne odprtine. Erozija se začne, ko je dosežena kritična prelivna višina oziroma kritičen pretok, ki sta odvisna od naklona dolvodne brežine in njene zaščite (Širca in Četina, 2010). Hitrost odnašanja materiala in s tem širjenja porušne odprtine je v nadaljevanju odvisna še od granulacije in materiala nasutja (dimenzije in teže zrn) ter stopnje zbitosti (Širca in Četina, 2010). Erozija se navadno začne v manjši odprtini trikotnega preseka, ki se s časom pogloblja in preide v trapezno obliko (Rajar in Zakrajšek, 1993). V večini primerov sega trapezna odprtina do dna nasipa, lahko pa se tudi zgodi, da se erozija konča, še preden odprtina doseže dno, pri tem se praviloma ne razširi čez celotno dolžino pregradnega telesa (Fread, 1988). Velikost odprtine (višina in širina) in hitrost formacije odprtine določata magnitudo in obliko iztočnega hidrograma. Vzrok za začetek erozije je lahko nezadostna pretočnost prelivnih organov pri odvajanju visokih voda ali pa neustrezno obratovanje. Možni so tudi nepričakovani izredni dogodki v bazenu akumulacije, kot je zdrs večjih zemeljskih mas z bregov in rušenje morebitne gorvodne pregrade. Porušitev zaradi prelivanja se navadno pojavi tudi pri naravnih zemeljskih pregradah, ki so posledica zemeljskega

plazu. V Sloveniji je iz novejšega obdobja znan primer prebitja plazu na Lučnici v Podvolovjeku, ki je nastal v času vodne ujme leta 1990 (Rajar in Zakrajšek, 1993).

V zadnjem času je tudi vse več govora o nevarnosti, ki jih povzročajo male živali kot so npr. voluharji. Rovi, ki jih kopljejo v pregradno telo, lahko močno oslabijo strukturo pregrade. Če jih zalije voda, to lahko hitro vodi k pojavu hidravličnega zloma in porušitve. Problemu se najlažje izognemo z rednim vzdrževanjem pregrade. V letu 2012 je znan primer dogodka s takšnim vzrokom porušitve iz Utaha v Združenih državah Amerike. Porušila se je 93 let stara homogena nasuta pregrada, ki je služila kot suhi zadrževalnik. Po poročanju medijske hiše KSL Utah (2012) so za porušitev krivi ravno voluharji, ki so rove skopali v sušnem obdobju. Do preboja je prišlo ob prvem deževju, ko je voda zrasla nad nivo normalne zaježitve. V zadnjem letu so bile krtine in luknje voluharjev opažene tudi na nekateri slovenskih pregradah, med drugimi tudi na pregradi Trnava (Pregrada Trnava, 2012).

Obstaja tudi možnost popolne in trenutne porušitve pregrade, ki je obravnavana v starem Jugoslovanskem pravilniku. Ta kot vzrok za porušitev navaja miniranje ali bombardiranje pregrade v času vojnega stanja. Takšen ekstremen primer porušitve danes v Sloveniji praktično ni več upoštevan, v Evropi le še Švica zahteva upoštevanje takšnega scenarija.

### **2.3 Zakonodaja**

V Sloveniji trenutno ni veljavnih zakonskih predpisov, ki bi urejali izdelavo poročil o posledicah porušitve pregrad. Do leta 1996 je bil v uporabi pravilnik za izdelavo poročil iz Jugoslavije: »Uputstvo o izradi dokumentacije za određivanje posledica usled iznenadnog rušenja ili preliivanja visokih brana, Savezni komitet za poljoprivredu Jugoslavije, januar 1975« (Navodila za pripravo dokumentacije za določanje posledic zaradi nenadne porušitve ali preliivanja visokih pregrad, Zvezni odbor za kmetijstvo Jugoslavije). Pravilnik je predpisoval, da je potrebno za vsako visoko pregrado v državi izdelati izračune hidravličnih posledic morebitne porušitve in izdelati vso predpisano dokumentacijo (Četina, 1995).

Leta 1996 je bil izdelan osnutek »Navodila za izdelavo dokumentacije o oceni ogroženosti zaradi porušitev pregrad, (Uradni list RS 64/94, 4/93, 67/94)« (v nadaljevanju Navodila). V njem so upoštewane vse spremembe in dopolnila, ki so se na podlagi dolgoletnih izkušenj možnih porušitev, kot tudi na osnovi raznih domačih in mednarodnih sodelovanj, pokazale za nujne (Četina, 1995). Ena bistvenih novosti novih Navodil je določba, da se namesto nerealne trenutne in popolne porušitve pregrade upošteva postopna in delna, še zlasti pri nasutih zemeljskih pregradah (Četina, 1995). Druga pomembna novost pa je, da je v primeru razširitve toka iz ožjih dolin v ravnine možno uporabiti dvodimenzijske (2D) matematične modele, ki so mnogo cenejši od fizičnih, ki so se uporabljali v

preteklosti (Četina, 1995). Zaradi nesoglasij med pristojnimi institucijami, nova Navodila še niso pravno formalno veljavna, vendar so v slovenski inženirski praksi splošno priznana kot merodajna.

Ker je od nastanka Navodil minilo že skoraj dvajset let, bo v bližnji prihodnosti potrebna njihova novelacija, predvsem zaradi napredka tehnologije. Glavni vzroki za nujno novelacijo navodil so (Rajar, 2012):

- metode meritve topografije in natančnost topografskih podatkov se je od leta 1996 bistveno spremenila (npr. LIDAR takrat ni bil razvit);
- razviti so novejši, točnejši numerični modeli, ki lahko nadomeščajo hidravlične modele;
- nekatere začetne in robne pogoje za izračune v Navodilih je treba preštudirati in prilagoditi (npr. izbira načina porušitve, določitev začetnega pretoka pred porušitvijo, pregrade v nizu...);
- navodila niso bila dovolj usklajena (in sploh pregledana) od nekaterih organov, ki morajo pri novelaciji nujno sodelovati s svojimi mnenji (npr. Republiški štab za zaščito in reševanje, Ministrstvo za okolje in prostor, SLOCOLD...);
- nujno je, da se nova Navodila sprejmejo kot zakonski akt.

Pregrade, ki so bile zgrajene pred letom 1996, imajo zato pomanjkljiva ali pa za današnje razmere premalo natančna poročila o poružitvah. Ponovni izračuni in dopolnitve so potrebni pri večini pregrad, zgrajenih pred letom 1996. Izjema so zlasti velike pregrade, ki se uporabljajo v energetiki. Poročila poružitev so pri teh večinoma izvršene z večjo natančnostjo, zato potrebujejo le manjše dopolnitve.

### 3 TEORETIČNE OSNOVE IN UPORABLJENI MATEMATIČNI MODEL

#### 3.1 Osnovne enačbe za račun nestalnega toka

Poplavni val, ki potuje dolvodno od porušene pregrade, je tipičen primer nestalnega toka. Večinoma ima strmo ali celo navpično čelo in obliko potujočega vodnega skoka. Tok za čelom vala je kljub temu relativno počasi spremenljiv, tako da ga lahko računamo po istih osnovnih enačbah, kot ostale vrste valov (Rajar, 1980). To sta kontinuitetna in dinamična enačba, ki ju rešujemo ob upoštevanju ustreznih začetnih in robnih pogojev. Pri tem veljajo sledeče hipoteze (Rajar, 1980):

- tok je v tlorisu enodimenzionalen in voda teče le v smeri osi  $x$ . Komponente hitrosti pravokotno na to smer ni.
- vertikalna komponenta hitrosti je zanemarljivo majhna (ne moremo opisati strmega čela vala).
- razdelitev hitrosti v profilu je enakomerna in je zato razdelitev pritiskov v preseku hidrostatična.
- naklon dna je majhen ( $\sin\alpha = \tan\alpha = I_0$  in  $\cos\alpha = 1$ ).
- notranjega trenja v tekočini ni, trenje med tekočino in steno kanala pa obravnavamo kot zunanjo silo (Manningova enačba). Drugih izgub zaradi trenja v toku ni.

1D model temelji na osnovnih Saint Venantovih enačbah v t.i. konservativni obliki (Četina, 1995):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gSI. \quad (3.3)$$

Znani sta pod imenom I. in II. Saint Venantova enačba. Pri tem so:

$x$  ... vzdolžna razdalja,

$t$  ... čas,

$v$  ... komponenta hitrosti v smeri  $x$ ,

$S$  ... prečni presek,

$Q$  ... pretok,

$z$  ... kota gladine,

$g$  ... gravitacijski pospešek,

$I = Q^2 \cdot n^2 / S^2 \cdot R^{4/3}$  ... naklon energijske črte, kjer je  $R$  hidravlični radij,  $n$  pa Manningov koeficient hrapavosti.



Obe enačbi predstavljata sistem dveh parcialnih diferencialnih enačb hiperboličnega tipa. Sistem je nelinearen in je praktično nerešljiv z analitičnimi metodami. Rešuje se ga z numeričnimi metodami ob uporabi ustreznih začetnih in robnih pogojev.

### **3.1.1 Matematični modeli za simulacijo porušitvenih valov**

Obstaja veliko število matematičnih modelov, od preprostih empiričnih enačb, razvitih na podlagi znanih zgodovinskih porušitev, do sofisticiranih modelov, za katere potrebujemo zmogljive računalnike. Namen modelov je določitev osnovnih lastnosti posledic porušitve kot so največji pretok, največje gladine in čas, ko nastopijo.

V Sloveniji so se v zadnjih letih večinoma uporabljali 1D matematični modeli, ki jih zelo dobro opisuje Rajar (1978). Modeli temeljijo na Saint Venantovih enačbah (3.1) in (3.2), ki ju rešujemo numerično z uporabo Lax-Wendroffove metode končnih razlik. Širca in Četina (2010) omenita še modele HEC-RAS (razvit pri US Army Corps of Engineers), MIKE 11 (Danish Hydraulic Institute) in RUBAR3 (CEMAGREF Lyon), ki se tudi uporabljajo v Sloveniji za račun 1D nestalnih tokov in bi jih bilo možno uporabiti za račun valov zaradi porušitve pregrad.

Pri izdelavi diplomske naloge smo uporabil matematični model NWS SMPDBK (»The NWS simplified dam-break flood forecasting model«). Razvit je bil leta 1983 v agenciji National Weather Service (v nadaljevanju NWS) v Združenih državah Amerike. Model SMPDBK je poenostavitev zmogljivejšega modela NWS DAMBRK, ki deluje na osnovi 1D Saint Venantovih enačb za račun nestalnega toka. Sistem parcialnih diferencialnih enačb rešuje numerično z implicitno metodo končnih razlik in ustrezno določenimi začetnimi in robnimi pogoji (Fread, 1980).

Program DAMBRK torej omogoča zelo natančen račun posledic porušitve pregrad, vendar za to potrebuje zelo zmogljive računalniške procesorje, veliko število natančnih meritev in strokovno izurjenost uporabnika. V nekaterih primerih je to lahko zelo zamudno in neekonomično. Takrat se pokaže prednost poenostavljenega modela SMPDBK, ki deluje na vsakem tudi manj zmogljivem osebнем računalniku in zahteva le minimalno količino vhodnih podatkov. Z uporabo tega modela lahko že v nekaj minutah dobimo oceno največjih dolvodnih pretokov, maksimalnih globlin in čas, ko so te globine dosežene. Uporaben je torej v vseh primerih, ko ni na voljo ne veliko časa in ne dovolj natančnih vhodnih podatkov (pre-event dam failure analysis) ali pa ko račun z natančnejšimi metodami preprosto ni ekonomičen (Wetmore in Fread, 1991).

### 3.1.2 Opis modela SMPDBK

Model SMPDBK ohranja ključne deterministične komponente numeričnega modela DAMBRK, pri čemer ne potrebuje velikih računalniških zmogljivosti (Wetmore in Fread, 1991). Glavna prednost modela SMPDBK je, da za račun propagacije vala ne uporablja parcialnih diferencialnih enačb, temveč brezdimenzijske propagacijske krivulje, ki so določene z uporabo modela DAMBRK. S tem se izogne numeričnemu reševanju, za katerega bi potrebovali zelo zmogljive računalnike. Uporabniku prav tako ni potrebno določiti začetnih in robnih pogojev, saj so ti že zajeti v brezdimenzijskih propagacijskih krivuljah.

Poenostavitve, ki jih zajema SMPDBK:

- namesto celotnega iztočnega hidrograma program izračuna le podatek o največjem pretoku skozi odprtino porušitve;
- geometrijo doline aproksimira s prizmatično obliko;
- računa samo največje pretoke, največje globine in čas, ko te globine nastopijo v vsakem posameznem profilu.
- za račun propagacije maksimalnega pretoka uporablja brezdimenzijske propagacijske krivulje, ki so bile razvite s pomočjo modela DAMBRK.

Vendar pa te poenostavitve prinašajo tudi nekaj ključnih omejitev modela. Prva pomanjkljivost je, da je natančnost rezultatov močno odvisna od natančnosti vhodnih podatkov. Razlika je, če so podatki natančno izmerjeni ali pa uporabimo privzete vrednosti, ki jih model predlaga za najbolj verjetne. Druga pomanjkljivost pa je, da model ne zna upoštevati zajezev zaradi dolvodnih objektov kot so mostovi ali pregrade (Wetmore in Fread, 1991).

Testni izračuni na teoretičnih primerih so pokazali, da je povprečno odstopanje rezultatov modela SMPDBK od rezultatov modela DAMBRK manj kot deset procentov (Wetmore in Fread, 1991).

Ker je model nastal v Združenih državah Amerike, so vse količine v imperialnih enotah. Vsi vhodni podatki morajo biti podani v tem merskem sistemu. Pretvorbe, ki smo jih pri tem uporabili, so prikazane v preglednici 3.1.

### Preglednica 3.1: Uporabljene pretvorbe merskega sistema

Pretvorbe merskega sistema			
1	milja [mi]	1609	m
1	čevelj [ft]	0,3048	m
1	akra [acre]	4046,7	m <sup>2</sup>
1	akra-čevelj [acre-ft]	1233	m <sup>3</sup>
1	kubični čevlji na sekundo [cfs]	0,02832	m <sup>3</sup> /s

#### 3.1.2.1 Odprtina porušitve

Model omogoča izračun maksimalnega iztoka tako v primeru trenutne porušitve celotnega pregradnega profila kot tudi v primeru postopne in delne porušitve. Predvideva odprtino pravokotne oblike. Za analizo pretoka skozi trapezno odprtino je zato potrebno vzeti povprečno širino odprtine. Za izračun iztoka je potrebnih samo pet podatkov: 1) kota gladine vode v akumulaciji pred začetkom rušenja; 2) kota spodnjega roba končne porušitvene odprtine; 3) površina in/ali prostornina akumulacije; 4) širina končne porušitvene odprtine; in 5) čas trajanja porušitve. Za primere, kjer parametri porušitvene odprtine niso znani, program predlaga privzete vrednosti, prikazane v preglednici 3.2.

#### Preglednica 3.2: Privzete vrednosti za porušitveno odprtino (Wetmore in Fread, 1991)

Parameter	enota	opis	Privzeta vrednost
<i>Br</i>	ft	končna širina odprtine	3 <i>H</i> za nasute zemeljske pregrade 5 <i>H</i> za težnostne betonske pregrade 90% širine pregradnega profila ločne pregrade
<i>tf</i>	min	čas rušenja	0,1 <i>H</i> za nasute zemeljske pregrade 0,025 <i>H</i> za težnostne betonske pregrade 0,02 <i>H</i> za ločne pregrade
<i>hr</i>	ft	spodnji rob odprtine	Enak koti dna prvega dolvodnega profila

Opomba: vrednost *H* je hidravlična višina pregrade v čevljih.

#### 3.1.2.2 Geometrija doline

Vsak odsek doline (od prvega dolvodnega profila do vsakega naslednjega profila) je aproksimiran kot prizmatični kanal. Profili morajo biti izbrani tako, da kar najbolje opišejo spremembe v širini doline in hkrati zajamejo spremembe naklona dolinskega dna. Program namreč uporablja za račun gladine največjega vala v nekem profilu in pripadajoči čas propagacije vala en sam prizmatični kanal, ki je povprečje vseh profilov med pregrado in računanim profilom.

### 3.1.2.3 Propagacija vala dolvodno

Račun propagacije vala dolvodno do vsakega profila se izračuna z uporabo brezdimenzijskih propagacijskih krivulj. Krivulje so bile določene s programom DAMBRK in nadomeščajo uporabo Saint Venantovih enačb. Združene so v družine krivulj glede na njihovo Froudovo število. Abscisa predstavlja brezdimenzijsko vrednost  $X^*$ , ki je enaka razmerju razdalje med pregrado in računanim profilom in karakterističnim prametrom razdalje. Ordinata krivulj pa je vrednost  $Q^*$ , ki predstavlja razmerje med največjim pretokom v računanim profilu in največjim pretokom v prvem profilu. Posamezno krivuljo izberemo glede na brezdimenzijski parameter  $V^*$ , ki je razmerje med volumnom akumulacije in povprečnim volumnom vode na računanim odseku. Če  $V^*$  zavzema vmesno vrednost med dvema krivuljama, program naredi interpolacijo glede na omenjeno vrednost.

Čas, ko je dosežen maksimalni pretok v računanim profilu, je enak vsoti trajanja rušenja pregrade in trajanja propagacije vala do tega profila. Čas, ko je dosežen maksimalni pretok, se izračuna iz kinematične hitrosti vala, ki je funkcija povprečne hitrosti vodnega toka na odseku med pregrado in računanim profilom.

### 3.1.3 Račun največjega iztoka skozi odprtino, nastalo po poružitvi

#### 3.1.3.1 Postopna porušitev

V primeru postopne porušitve se za določitev največjega iztoka  $Q_{bmax}$  uporabi izraz:

$$Q_{bmax} = Q_0 + 3,1 \cdot B_r \cdot \left( \frac{C}{\frac{t_f}{60} + \frac{C}{\sqrt{H}}} \right)^3, \quad (3.3)$$

$$C = \frac{23,4 \cdot A_s}{B_r}, \quad (3.4)$$

kjer so:

$Q_{bmax}$ ..... največji iztok skozi odprtino porušitve [cfs],

$Q_0$ ..... začetni pretok (skozi preliv, temeljni izpust, turbine, ...) [cfs],

$B_r$ ..... povprečna širina odprtine [ft],

$t_f$ ..... čas rušenja – od začetka rušenja do končne velikosti odprtine [min],

$H$ ..... hidravlična višina (razlika med koto gladine in koto dna odprtine) [ft],

$A_s$ ..... površina polne akumulacije [acre].

### 3.1.3.2 Trenutna porušitev

V primeru trenutne porušitve na iztok močno vpliva tudi pojav negativnega vala v akumulaciji. Kadar je izpolnjen pogoj,  $t_f < 0,001 \cdot H_d$ , kjer je  $H_d$  hidravlična višina pregrade v čevljih, vpliv negativnega vala ni več zanemarljiv. Za izračun iztoka  $Q_{bmax}$  se v takšnem primeru uporabi izraz:

$$Q_{bmax} = 3,1 \cdot B_r \cdot (I_v \cdot I_n) \cdot H_d^{3/2}, \quad (3.5)$$

$$I_v = \left[ 1,0 + 0,148 \cdot \left(\frac{B_r}{B}\right)^2 \cdot (m+1)^2 - 0,083 \cdot \left(\frac{B_r}{B}\right)^3 \cdot (m+1)^3 \right]^{3/2}, \quad (3.6)$$

$$I_n = \left[ 1,0 - 0,5467 \cdot \left(\frac{B_r}{B}\right) \cdot (m+1) + 0,2989 \cdot \left(\frac{B_r}{B}\right)^2 \cdot (m+1)^2 - 0,1634 \cdot \left(\frac{B_r}{B}\right)^3 \cdot (m+1)^3 + 0,0893 \cdot \left(\frac{B_r}{B}\right)^4 \cdot (m+1)^4 - 0,0488 \cdot \left(\frac{B_r}{B}\right)^5 \cdot (m+1)^5 \right]^{3/2}; \quad (3.7)$$

kjer so:

$B_r$  ..... širina odprtine [ft],

$B$  ..... širina profila v višini krone pregrade [ft],

$H_d$  ..... višina pregrade [ft].

Koeficient  $m$  je določen z izrazom:

$$m = \frac{\log B_1 - \log B_2}{\log h_1 - \log h_2}, \quad (3.8)$$

kjer indeks 1 pomeni vrednost pri tisti širini profila, ki je enaka globini; indeks 2 pa pomeni vrednost pri širini profila, kjer je kota gladine.

### 3.1.3.3 Račun največje globine v prvem profilu dolvodno

Na podlagi izračunanega največjega iztoka  $Q_{bmax}$  se določi največja globina vode v prvem profilu dolvodno  $h_{max}$ . Za ta račun se uporabi Manningova enačba (3.9):

$$Q = \frac{1,486}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}}, \quad (3.9)$$

$$S = S_0 + \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot \left( \frac{1}{c} + \frac{v \cdot B}{g \cdot A} \cdot \left( 1 - \frac{v}{c} \right) \right) - \frac{1}{g} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (3.10)$$

$$C = \left( \frac{5}{3} - \frac{2A}{3B^2} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta h} \right) \cdot V; \quad (3.11)$$

kjer so:

$A$ ..... prečni presek vodnega telesa [ft<sup>2</sup>],

$R$ ..... hidravlični radij [ft],

$n$ ..... Manningov koeficient [s/m<sup>1/3</sup>],

$S$ ..... naklon gladine,

$S_0$ ..... naklon dna med prvima dvema profiloma,

$\Delta y$ ..... višinska razlika med gladino  $Q_0$  in največjo gladino [ft],

$\Delta V$ ..... razlika med največjo in najmanjšo hitrostjo vode ( $V = Q/A$ ),

$\Delta t$ ..... čas največje porušitvene odprtine [s],

$S_0$ ..... naklon dna med prvima dvema profiloma,

$g$ ..... gravitacijski pospešek,

$C$ ..... kinematična hitrost vala [mile/h],

$\Delta B$ ..... razlika med začetno širino gladine in širino pri največjem pretoku.

Program pri tem predvideva ocene vrednosti koeficienta  $n$ , kot so prikazane v preglednici 3.3.

### Preglednica 3.3: Vrednosti koeficienta hrapavosti po SMPDBK

Površje	Vrednost koeficienta $n$ [s/m <sup>1/3</sup> ]
Zelenice in kmetijske obdelovalne površine	0,04 – 0,05
Grmovja in nižje drevje	0,06
Urbane površine	0,07
Gozd	0,08

Spremenljivke  $A$ ,  $R$  in  $n$  so nelinearne funkcije globine. Globino se z enačbo (3.9) zato določi iterativno z Newton-Raphsonovo metodo. Za prvo iteracijo se uporabi:

$$h^* = 0,5 \cdot (h_{min} + h_{max}); \quad (3.12)$$

kjer se za  $h_{min}$  navadno vzame kar vrednost nič, za  $h_{max}$  pa dvakratna višina pregrade. Iz predpostavljene višine  $h^*$  se z enačbo (3.9) izračuna pretok  $Q^*$ .

Nato se izračuna nova vrednost  $h_{new}^*$ :

$$h_{new}^* = h^* - \left( \frac{Q^* - Q}{dQ^*} \right); \quad (3.13)$$

kjer je:

$$dQ^* = Q^* \cdot \left( \frac{-dn}{n} + \frac{5}{3} \cdot \frac{B}{A} - \frac{2}{3} \cdot \frac{dB}{B} \right); \quad (3.14)$$

kar je izpeljanka Manningove enačbe (3.9), pri čemer sta  $dn$  sprememba Manningovega koeficienta in  $dB$  sprememba širine vodne gladine zaradi spremenjene globine. Iteracije se ponavlja, dokler razlika med  $h^*$  in  $h_{new}^*$  ni manjša od stotinke čevlja:

$$\epsilon_h = |h^* - h_{new}^*| < 0,01 \text{ ft}. \quad (3.15)$$

Če ta pogoj ni izpolnjen po 15 korakih oziroma če račun divergira, program uporabi bisekcijsko metodo.

#### 3.1.3.4 Korekcija zaradi potopitve

V primeru velike globine vode v prvem profilu dolvodno lahko pride do oviranega iztoka iz akumulacije. Korekcijo program opravi z uporabo koeficienta potopitve, tako da kompenzira hidravlično višino nad prelivom. Koeficient upoštevamo, kadar je razlika med koto izračunane gladine  $E_t$  in koto dna  $E_b$  takoj za pregrado večja od  $0,67h_{weir}$ , kjer  $h_{weir}$  predstavlja prelivno višino skozi končno porušeno odprtino in je določena z enačbo:

$$h_{weir} = \left( \frac{C}{\frac{t_f \cdot C}{60 + \sqrt{H}}} \right)^2; \quad (3.16)$$

kjer je  $C$  določen z enačbo (3.4),  $H$  in  $t_f$  pa sta enaka kot pri enačbi (3.3).

Če je izpolnjen pogoj:

$$(E_t - E_b) > 0,67 \cdot h_{weir}; \quad (3.17)$$

se koeficient potopitve  $K_s^*$  določi po enačbi:

$$K_s^* = 1,0 - 27,8 \cdot \left[ \frac{E_t - E_b}{h_{weir}} - 0,67 \right]^3 \quad (3.18)$$

Preko korigiranega toka:

$$Q_{bmax}^K = K_s^K \cdot Q_{bmax}; \quad (3.19)$$

dobimo novo prelivno višino:

$$h_{weir}^K = H - Q_{bmax}^K \cdot \frac{t_f \cdot 60}{2 \cdot A_s \cdot 43560} \quad (3.20)$$

Račun se vrši iterativno. Navadno  $K_s$  konvergira že po dveh ali treh iteracijskih korakih.

### 3.1.4 Propagacija vala dolvodno

Propagacija izračunanega največjega pretoka  $Q_{bmax}$  se določi s pomočjo brezdimenzijskih propagacijskih krivulj, ki so prikazane v prilogi A.1. Primerno krivuljo se izbere glede na izračunane parametre propagacije vala.

#### 3.1.4.1 Dimenzije doline

Program dolvodno dolino aproksimira kot prizmatični kanal. Obliko kanala določajo profili, ki se jih poda v obliki ZZ – BB (širina kanala pri izbrani višinski koti). Povprečna širina med dvema profiloma pri določeni globini je:

$$\bar{B}_{i,j} = 0,5 \cdot (B_{i,j} + B_{i,j+1}); \quad (3.21)$$

povprečna širina pri določeni globini na odseku med prvim in računanim profilom pa:

$$\hat{B}_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^j (X_{k+1} - X_k) \cdot \bar{B}_{i,k}}{X_{j+1} - X_1}; \quad (3.22)$$

kjer je:

$i$ ..... indeks izbrane globine,  $i = 1, 2, 3, \dots, I$ ;

$j$ ..... indeks profila,  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ ;

$X_j$ ..... razdalja med prvim in  $j$ -tim profilom.



Na enak način se določi tudi povprečni presek pri določeni globini:

$$\hat{A}_{i,j} = \hat{A}_{i-1,j} + 0,5 \cdot (\hat{B}_{i-1,j} + \hat{B}_{i,j}) \cdot (h_{i,j} - h_{i-1,j}); \quad (3.23)$$

kjer so:

$$\hat{A}_{1,j} = 0$$

$i$  ..... indeks izbrane globine,  $i = 1, 2, 3, \dots, I$ ;

$j$  ..... indeks profila,  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ ;

$I$  ..... število širin v  $j$ -tem profilu,

$J$  ..... naslednji profil po zadnjem profilu,

$h_j$  .....  $i$ -ta globina v  $j$ -tem profilu,

$B_{i,j}$  ..... širina pri  $i$ -ti globini v  $j$ -tem profilu,

$\bar{B}_{i,j}$  ..... povprečna širina pri  $i$ -ti globini med profiloma  $j$  in  $j+1$ ,

$\hat{B}_{i,j}$  ..... povprečna širina pri  $i$ -ti globini na odseku med prvim in  $j$ -tim profilom,

$\hat{A}_{i,j}$  ..... povprečni presek pri  $i$ -ti globini na odseku med prvim in  $j$ -tim profilom.

Tabela vrednosti, ki nastane z definiranjem povprečne širine kanala  $\hat{B}_i$  za vsako globino  $\hat{h}_i$ , se uporabi tudi pri določitvi oblikovnega koeficienta kanala  $\hat{m}$  z enačbo (3.8) in pri določitvi razmerja širine  $B$  proti globini  $h$  v enačbi  $B = kh^{\hat{m}}$  za določitev prizmatične oblike kanala.

### 3.1.4.2 Parametri propagacije

Parameter razdalje  $X_c$  v miljah se izračuna z enačbo:

$$X_c = \frac{43560 \cdot VOL_r}{5280 \cdot \hat{A}} \cdot \left( \frac{6}{1 + 4 \cdot (0,5)^{\hat{m}+1}} \right); \quad (3.24)$$

kjer so:

$X_c$  ..... karakteristični parameter razdalje [mile],

$VOL_r$  ..... volumen akumulacije [acre-ft],

$\hat{A}$  ..... ploščina povprečnega prečnega profila odseka pri  $h_{max}$  [ft<sup>2</sup>].

Globina se iz  $h_{max}$  zniža na  $h_x$  na razdalji  $X_c$ . Povprečna globina na tem odseku je:

$$\bar{h} = \frac{h_{max} + h_x}{2} = \Theta \cdot h_{max}; \quad (3.25)$$

kjer se utežni faktor  $\Theta$  določi iterativno, začetni približek za utežni faktor pa je vedno 0,95.

Povprečna hidravlična globina na računskem odseku je tako:

$$\hat{D} = \frac{\hat{A}}{\hat{B}}; \quad (3.26)$$

kjer sta  $\hat{A}$  in  $\hat{B}$  povprečna površina prereza in povprečna širina prizmatičnega kanala na globini  $\bar{h}$ .

Povprečna hitrost se izračuna po Manningovi enačbi:

$$\hat{V} = \frac{1,486}{n} \cdot S^{1/2} \cdot (\hat{D})^{2/3}; \quad (3.27)$$

Kjer je  $S$  naklon kanala med prvim profilom in računanim profilom.

Izraza za povprečno hitrost (3.27) in povprečno hidravlično globino (3.26) vstavimo v enačbo (3.28), da določimo povprečno Froudovo število na izbranem odseku:

$$Fr = \frac{\hat{V}}{\sqrt{g \cdot \hat{D}}}; \quad (3.28)$$

kjer se za gravitacijski pospešek vzame  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ .

Za izbiro krivulje propagacije največjega vala je potrebno določiti še brezdimenzijski volumen  $V^*$ , ki je razmerje volumna akumulacije s povprečnim volumnom vode na računskem odseku:

$$V^* = \frac{VOL_r \cdot 43560}{\hat{A} \cdot X_c \cdot 5280}. \quad (3.29)$$

### 3.1.4.3 Brezdimenzijske propagacijske krivulje in izračun pretoka

Na podlagi izračunanih parametrov  $Fr$ ,  $V^*$  in  $X^*$  se izbere primerna brezdimenzijska propagacijska krivulja. Na osnovi izbrane krivulje določimo  $Q^*$  in z enačbo  $Q = Q_{bmax} \cdot Q^*$  izračunamo pretok v profilu na razdalji  $X_c$ . Iz pretoka se z enačbo (3.9) iterativno določi globina  $h_x$ . Pri tem se utežni faktor normira:

$$\Theta' = \frac{h_{max} + h_x}{2 \cdot h_{max}}. \quad (3.30)$$

Če je razlika med novim  $\theta'$  in začetno oceno manjša od 1%, se postopek zaključi, sicer se ponovi račun po enačbah (3.27) – (3.29).

Ko je krivulja izbrana, se lahko razdaljo do računske točke normira:

$$X_i^* = \frac{X_i}{X_c}, \quad (3.31)$$

kjer je  $X_i$  dolvodna razdalja do  $i$ -tega računskega profila,  $i = 1, 2, 3, \dots$

Za določitev največjega pretoka na razdalji  $X_i$  se uporabi družino krivulj s pripadajočim Froudovim številom (določenim z enačbo (3.28)), skupaj s parametroma  $V^*$  (določen z enačbo (3.29)) in  $X_i^*$ . Možna je interpolacija med krivuljami zaradi  $Fr$  in  $V^*$ . Primer določitve največjega pretoka z uporabo krivulj je prikazan v prilogi A.2.

Brezdimenzijski pretok je definiran kot:

$$Q^* = \frac{Q_{pi}}{Q_{bmax}}. \quad (3.32)$$

Z množenjem  $Q^*$  s  $Q_{bmax}$  dobimo največji pretok  $Q_{pi}$  na dolvodni razdalji  $X_i$ .

Čas propagacije vala do razdalje  $X_i$  se določi v dveh korakih. Najprej se izračuna referenčna hitrost toka na polovici računskega odseka. Iz krivulje se odčita največji pretok  $Q_x$  na razdalji  $X_i/2$  dolvodno od pregrade. Referenčni pretok se nato pomnoži s faktorjem  $(0,3 + m^*/10)$ , da tako dobimo karakteristični pretok  $Q_{xc}$ , ki predstavlja kinematično hitrost vala in s katerim s pomočjo Manningove enačbe (3.27) določimo referenčno globino  $h_{ref}$ . Referenčna hitrost toka je enaka:

$$V_{xi} = Q_{xc} / \widehat{A}. \quad (3.33)$$

V tej enačbi je hidravlični radij iz Manningove enačbe (3.27) aproksimiran s hidravlično globino  $D$ .

Kinematična hitrost vala  $C$  v enotah [mile/h] se izračuna s spodnjo enačbo (3.34), pri čemer se za  $\widehat{V}_{xi}$  vstavi referenčna hitrost  $V_{xi}$  v enotah [ft/s]:

$$C = 0,682 \cdot V_{xi} \cdot \left[ \frac{5}{3} - 2/3 \cdot \left( \frac{\widehat{m}_1}{\widehat{m}_1 + 1} \right) \right]. \quad (3.34)$$

### 3.1.4.4 Čas nastopa največjega pretoka

Čas nastopa največjega pretoka v računskem profilu v urah  $t_{pi}$  se izračuna po formuli:

$$t_{pi} = \frac{t_f}{60} + \frac{X_i}{C}; \quad (3.35)$$

kjer se za čas porušitve  $t_f$  vstavi čas v minutah.

Izračunati se da tudi čas, ko globina naraste čez ali upade pod določeno mejo. Uporabnik določi mejno globino  $h_f$ , iz katere se določi mejni pretok  $Q_f$  (preko Manningove enačbe). Da dobimo čas, ko globina naraste čez določeno mejo, uporabimo enačbo:

$$t_{fld} = t_{pi} - \left( \frac{Q_{pi} - Q_f}{Q_{pi} - Q_0} \right) \cdot \frac{t_f}{60}; \quad (3.36)$$

pri čemer je  $Q_0$  začetni pretok.

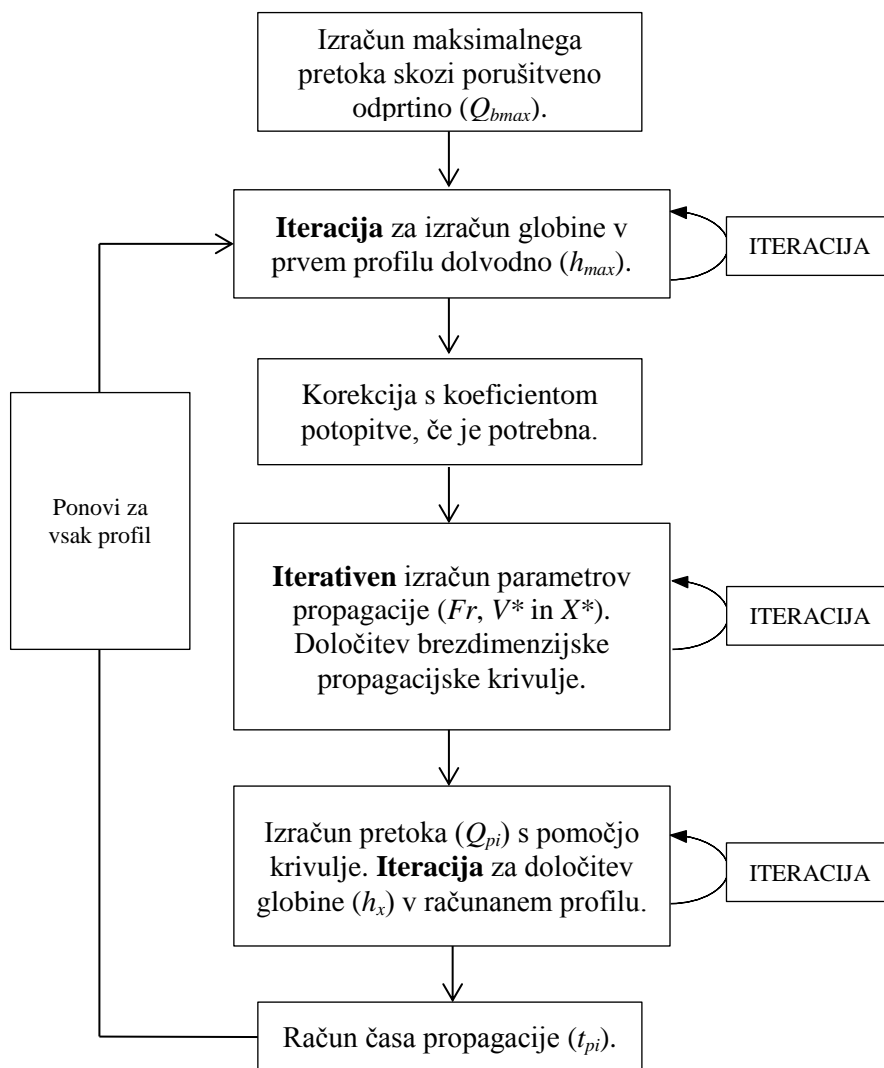
Čas upada gladine pod to mejo pa se določi z enačbo:

$$t_d = t_{pi} + \left( \frac{24,2 \cdot VOL_r}{Q_{pi} - Q_0} - \frac{t_f}{60} \right) \cdot \left( \frac{Q_{pi} - Q_f}{Q_{pi} - Q_0} \right). \quad (3.37)$$

Za račun največjega pretoka, globine itd. v vsakem profilu dolvodno od pregrade so parametri povprečnih prečnih profilov  $\hat{B}$ ,  $\hat{A}$  in  $\hat{D}$  za vsak računski odsek določeni z enačbami (3.21) – (3.23) za vsako i-to globino in vsak j-ti računski odsek. S temi vrednostmi je z enačbo (3.8) določen koeficient oblike  $\hat{m}$ . Na osnovi vsega tega sta potem iterativno določena največji pretok in globina.

### 3.1.5 Shema algoritma

Čeprav je uporaba programa relativno enostavna, se v ozadju skriva zapleten algoritem. Za boljšo predstavo je na sliki 3-1 predstavljen shematski prikaz postopka izračuna.



Slika 3-1: Shema algoritma modela SMPDBK

## 4 VHODNI PODATKI IN RAČUN

Obravnavane so štiri pregrade v povodju Savinja-Sotla: Trnava, Loče, Radigaj in Lahovnica. Od naštetih prvi dve spadata v kategorijo velikih pregrad po klasifikaciji ICOLD, drugi dve pa veljata za manjši pregradi. Akumulacije prvih treh imajo stalno ojezeritev (Žovneško jezero, Šmartinsko jezero in Braslovško jezero), zadnja pa je klasificirana kot suhi zadrževalnik. Vse štiri so nasute zemeljske pregrade, zgrajene v drugi polovici dvajsetega stoletja. Njihov primarni namen je v vseh primerih varnost pred škodljivim delovanjem poplav. Večji dve sta bili v preteklosti namenjeni tudi oskrbi z industrijsko (Loče) in namakalno (Trnava) vodo, na vseh štirih pa se še vedno odvijajo dejavnosti turizma in ribolova. Za večji dve je bilo pred gradnjo izdelano poročilo o poružitvi, kjer so za račun poplavnega vala dolvodno uporabili polne 1D Saint Venantove enačbe. Za manjši dve pregradi takšen izračun ni bil izveden.

### 4.1 Opis obstoječega stanja pregrad

V preglednici 4.1 so predstavljeni osnovni podatki vseh štirih pregrad, pridobljeni iz tehničnih poročil projekta VODPREG (glej: Pregrada Trnava, 2012; Pregrada Lahovnica, 2012; Pregrada Loče, 2012; Pregrada Radigaj, 2012).

**Preglednica 4.1: Primerjava podatkov obravnavanih pregrad**

Pregrada	Trnava	Lahovnica	Loče	Radigaj
Vodotok	Trnava	Lahovnica	Koprivnica	Trnavca
Tip zadrževalnika	mokri	suhi	mokri	mokri
Projektna raba	N, VV, R	VV	OV, VV, R	n.p.
Leto izgradnje	1978	1988	1970	1961
Kota krone	302,50 m n.m.	253,45 m n.m.	267,75 m n.m.	n.p.
Maks. kota gladine	301,00 m n.m.	253,00 m n.m.	266,50 m n.m.	n.p.
Višina pregrade	13,50 m	3,45 m	15,75 m	n.p.
Akumulacija	Žovneško jezero	Lahovnica	Šmartinsko jezero	Braslovško jezero
Površina pri maksimalni koti	50,00 ha	n.p.	113,00 ha	n.p.
Volumen pri maksimalni koti	1720,00 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	22,25 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	6500,00 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	n.p.
Poročilo o poružitvi	NIVO (1975)	Ne	FAGG (1979)	Ne

Legenda: N - namakanje; VV – poplavna varnost; OV – oskrba z vodo; R – ribištvo in turizem.

Podatke o obstoječem stanju pregrad smo pridobili iz omenjenih tehničnih poročil. V poročilu za pregrado Radigaj zaradi pomanjkljive tehnične dokumentacije ni znanih podatkov o karakteristikah pregrade in akumulacije. V tem primeru smo jih pridobil iz drugih virov in sicer iz spletne aplikacije Atlas okolja (ARSO) ter raziskovalne naloge učencev Osnovne šole Braslovče. Opravili smo tudi terenski pregled vseh štirih pregrad. Povzetki opisa obstoječega stanja objektov so zbrani v naslednjih podpoglavjih.

#### 4.1.1 Trnava

Pregrada Trnava se nahaja na potoku Trnavca, približno 450 m gorvodno od sotočja s potokom Jelovnik. Zgrajena je bila leta 1978 po smernicah Vodnogospodarskih osnov povodja Savinje. Tip pregrade je homogena zemeljska pregrada s tesnilno peto, segajočo v neprepustno sivico. Brežina na zračni strani je zasajena s travno rušo, vodna stran pa je obložena z betonskimi ploščami na peščenem filtru. Pregrada je visoka 9,75 m s krono dolžine 333,00 m, širine 3,00 m na koti 302, 50 m n.m., konstrukcijska višina pa znaša 12,55 m. Kota visokovodnega preliva je na 300,20 m n.m., čez katerega se prelivajo visoke vode z maksimalno koto gladine 301 m n.m. Talni izpust se nahaja na desnem bregu potoka Trnavca in služi za odvzem vode za kritje obveznega minimalnega pretoka, za potrebe namakanja, morebitno praznjenje akumulacije in za odvajanje vsakoletnih visokih voda (povzeto po: Pregrada Trnava, 2012).



**Slika 4-1: Pogled na telo pregrade Trnava, levo Žovneško jezero (Pregrada Trnava, 2012)**

Zajezitev tvori večnamenski zadrževalnik Žovneško jezero in je eden izmed treh realiziranih zadrževalnikov te vrste na povodju Savinje (druga dva sta Šmartinsko jezero in Slivniško jezero). Je najpomembnejši izmed možnih zadrževalnikov pod Dobrovljami, ki so upoštevani v predhodnih študijah in vodnogospodarskih osnovah. Služi večnamenskemu izkoriščanju: zadrževanju visokih



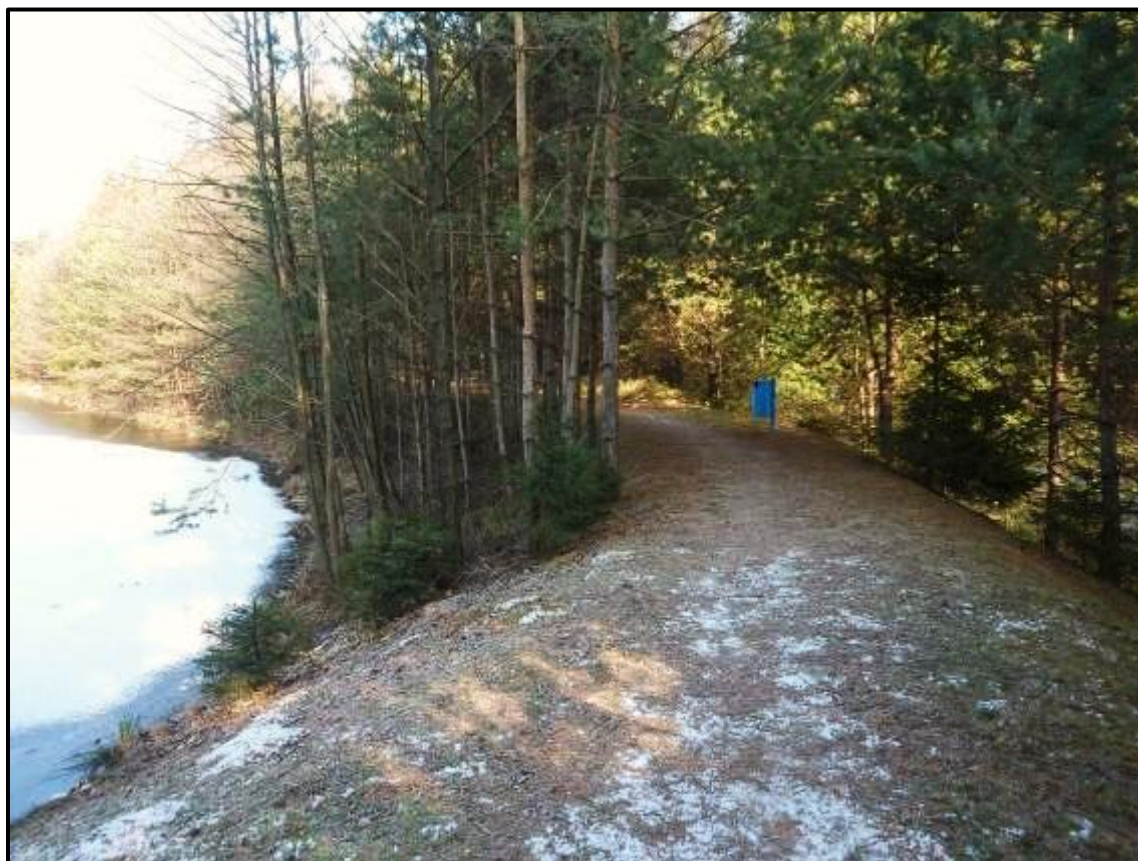
voda, dobavi vode za namakanje kmetijskih zemljišč, ribištvu in turizmu. V dolžino meri približno 1,5 km, v širino pa približno 350 m, kar znaša okrog 42,2 ha vodne površine pri stalni gladini in 49,0 ha ob visokih prelivnih vodah. Pri maksimalni gladini zaježitve je volumen akumulacije 1.720.000 m<sup>3</sup>, pri minimalni pa približno 300.000 m<sup>3</sup> vode. Srednji letni dotok v akumulacijo znaša 6.000.000 m<sup>3</sup>/leto, nizki letni dotok pa okrog 3.500.000 m<sup>3</sup>/s. Akumulacija prekriva 30% gozdnih in 70% travniških zamočvirjenih površin, na skrajnem severozahodnem koncu pa se nahaja tudi še aktivna ribogojnica (povzeto po: Pregrada Trnava, 2012).



**Slika 4-2: Ortofoto posnetek akumulacije Žovneško jezero in dolvodnega območja (ARSO, Atlas okolja)**

#### 4.1.2 Lahovnica

Suha pregrada na Lahovnici je infrastrukturni objekt za zagotavljanje zaščite pred vdori hudournih voda na področju naselja Spodnja Hudinja, zgrajena leta 1988. Nahaja se približno 500 m severno od avtoceste Ljubljana-Maribor. Je nasuta zemeljska pregrada, ki je na zračni in vodni strani izdelana iz komprimirane gline. V pregrado pod nasipom je vgrajen dvoslojni filter, zaradi naknadnega posedanja pa je krona pregrade ustrezno nadvišana. Naklon brežin nasipa na vodni strani je 1:2, na zračni pa 1:1,5. Kota krone pregrade je na 253,45 m n.m., kota preлива na 252,62 m n.m., kota dna akumulacije pa na 250,00 m n.m. Za odvajanje visoke vode je na desnem boku pregrade zgrajen bočni preliv, utrjen z lomljencem v betonu. Odvodni kanal za odvajanje prelite vode je dimenzioniran na maksimalni pretok 4,5 m<sup>3</sup>/s. V pregradi je izveden talni izpust z vtočnim objektom, zgrajen iz armirano betonske cevi premera 600 mm. Do vtočnega objekta je urejen dostop s krone pregrade (povzeto po: Pregrada Lahovnica, 2012).



**Slika 4-3: Pogled na telo pregrade Lahovnica (Pregrada Lahovnica, 2012)**

Vodno telo v akumulaciji nima imena, saj je v sušnem obdobju zadrževalnik prazen in je takrat v tem prostoru še možna agrarna proizvodnja. Zadržuje praktično vse vodne količine na vodozbirnem

območju Lahovnice, ki padejo v času nalivov. Polna akumulacija lahko zadrži volumen 22.250 m<sup>3</sup> vode (povzeto po: Pregrada Lahovnica, 2012).



**Slika 4-4: Ortofoto posnetek zadrževalnika Lahovnica in dolvodnega območja (ARSO, Atlas okolja)**

### 4.1.3 Loče

Zemeljska pregrada Loče je zgrajena v kraju Loče nad naseljem Dobrova. Dokončana je bila leta 1970. Pregrada je nasutega tipa, zgrajena iz materialov, večinoma pridobljenih v bližini lokacije ali v njeni okolici. Osrednji del je iz glinastega kompaktnega jedra, zagotavlja tesnjenje in je globoko vkopan v neprepustno osnovno hribino. Zračna stran pregrade je iz delno premešanega glinasto peščenega tufa, ki se spaja z glinastim jedrom v zgornjem delu, v spodnjem delu pa ju loči filtrski vložek. Na obeh brežinah je obloga iz težkega kamnometala iz obstoječega kamna lomljenca, ki varuje pregradno telo pred zdrsom v akumulacijski prostor. Kota krone pregrade znaša 267,75 m n.m. v dolžini 205,00 m, gradbena višina pa znaša 15,75 m. Za odvodnjavanje visoke vode je na desni brežini akumulacije zgrajen bočni objekt, sestavljen iz prelivnega roba, zbiralnega žleba, zgornjega odvodnega kanala, drče, podslapja in spodnjega odvodnega kanala. Objekt je v celoti izveden v pregradnem nasipu in fundiran v trdno tufno podlago. Le podslapje je delno v naplavini. Prelivni rob je izoblikovan tako, da je pretočna zmogljivost čim večja. Sestavljen je iz bočnega betonskega preliva, ki je fiksni (na koti 265,40 m n.v.) in čelnega preliva (na koti 264,50 m n.v.), ki je opremljen s tablastimi zapornicami. Cev za talni izpust je speljana v podslapje talnega izpusta. Podslapje je opremljeno z razbijači energije. Dolžina podslapja je izvedena tako, da se velika hitrost vode po naglem skoku zmanjša in nato čez prelivni rob prelije v podslapje drče (povzeto po: Pregrada Loče, 2012).



Slika 4-5: Pogled na telo pregrade Loče, levo Šmartinsko jezero (Pregrada Loče, 2012)

Šmartinsko jezero je umetni večnamenski zadrževalnik padavinskih voda s povodja Koprivnice. Akumulacija je bila predvidena za: zadrževanje visokih voda Koprivnice, akumuliranje padavinske vode za takratne potrebe celjske industrije, ribištvo, turizem, šport in rekreacijo. Za pregrado se zbirajo vode iz 12,6 km<sup>2</sup> velikega območja povodja Koprivnice. Pri maksimalni koti gladine, ki znaša 266,50 m n.m., znaša površina jezera 113 ha, v zadrževalniku pa se nabere 6,5 milijonov m<sup>3</sup> vode. Srednji letni dotok v akumulacijo znaša 6.650.000 m<sup>3</sup>/leto, nizki letni dotok pa okrog 2.320.000 m<sup>3</sup>/s. Dejanska kota ojezeritve je med 263,50 in 263,70 m n.m. Slednja je kota, ki zagotavlja, da je iztok iz jezera lahko 48 ur zaprt, pri nastopu poplavnega vala s povratno dobo 200 let (povzeto po: Pregrada Loče, 2012).



Slika 4-6: Ortofoto posnetek akumulacije Šmartinsko jezero in dolvodnega območja (ARSO, Atlas okolja)

#### 4.1.4 Radigaj

Pregrada Radigaj je v najslabšem stanju izmed izbranih pregrad. Na voljo ni nobene tehnične dokumentacije, tako da je bilo podatke o pregradi potrebno pridobiti iz drugih virov. Glede na to, da računamo okvirno oceno posledice, bodo tudi grobe ocene karakteristik pregrade zadostovale za namen diplomske naloge. V seminarski nalogi učencev osnovne šole Braslovče je zapisano, da je jezero naredilo Turistično društvo Braslovče leta 1961 z namenom, da bi se trg Braslovče začel razvijati kot turistični kraj. Jezero naj bi nastalo v predelu, kjer je bil v preteklosti ribnik Celjskih grofov. Velikost so ocenili nekje med 4 ha in 5 ha, kar se tudi ujema z izmerami v Atlasu okolja. Iz pregledne karte sem odčital, da je kota krone pregrade na 310,40 m n.m.



**Slika 4-7: Pogled na telo pregrade Radigaj, desno Braslovškoko jezero (Pregrada Radigaj, 2012)**

Jezero se primarno še vedno uporablja v rekreativne namene. Zaradi pomanjkanja podatkov je bil 26. 1. 2013 v okviru projekta VODPREG opravljen tudi terenski ogled, kjer je bilo ugotovljeno, da je objekt v slabem stanju. Predlagan je bil tudi podvodni pregled, vendar do zaključka diplomske naloge še ni bil opravljen. Ugotovljeno je bilo, da je izpust na dolvodni strani pregrade poškodovan in zaraščen. Krona je urejena kot sprehajalna steza, zračna stran pa je v veliki meri zaraščena z grmovjem in mlajšo drevino. Čez enega izmed prelivov je speljana brv, ki lahko v primerih visokih voda

povzročajo oviro za plavje. Odvzemni objekt in temeljni izpust sta v slabem stanju, predlagan je bil podvodni pregled. Monitoring se ne izvaja, saj ni opaženih nobenih geodetskih točk, piezometrov ali drenaž. Akumulacija očitno služi predvsem rekreacijskemu in ribiškemu namenu. Iz spletnih virov je razvidno, da so se ob poplavih na objektih pojavile tudi kritične poškodbe (erozija prelivnega pragu na desnem boku), ki bi lahko privedle do rušenja (povzeto po: Pregrada Radigaj, 2012).



**Slika 4-8: Ortofotoposnetek akumulacije Braslovško jezero in dolvodnega območja (ARSO, Atlas okolja)**

## 4.2 Priprava vhodnih podatkov

Priprava podatkov je za vsako pregrado sestavljena iz dveh sklopov. Prvi so parametri, potrebni za račun največjega iztoka iz akumulacije skozi odprtino porušitve. Navezujejo se na tehnične karakteristike pregrade in na izbran scenarija rušenja (trenutno, postopno). Drugi sklop pa predstavljajo parametri, ki opisujejo geometrijo dolvodne doline, po kateri bo potoval poplavni val.

Uporabili smo enake oznake parametrov, kot jih uporablja program:

- *HDE*.....kota gladine, pri kateri se začne porušitev (podano v čevljih)
- *BME*.....kota dna končne odprtine (podano v čevljih);
- *VOL* .....prostornina akumulacije pri maksimalni koti gladine (podano v jutro-čevljih);
- *SA*.....površina akumulacije, pri maksimalni koti gladine (podano v jutrih)
- *BW* .....širina končne odprtine (v čevljih)
- *TFM* .....čas od začetka rušenja do končne velikosti odprtine (v minutah)
- *QO* .....začetni pretok skozi preliv, temeljni izpust, turbine, ... (v kubičnih čevljih na sekundo)

Parametre porušitve in scenarije rušenja smo določili za vsako pregrado posebej in jih uredili v preglednice 5.2 do 5.5. V preglednici 5.6 smo zbrali podatke o geometrije doline.

Pri napovedi porušitve je čas rušenja pregrade pomemben podatek, ki pa ga ne poznamo. V navodilih programa je na podlagi statističnih podatkov predlagano, da čas rušenja v minutah določimo kot desetino vrednosti hidravlične višine pregrade v čevljih oz. tretjino v metrih. Ker so dimenzije naših pregrad relativno majhne, to pomeni zelo kratek čas (od 1 do 4 minute). V poročilu pregrade Trnava je na primer čas rušenja ocenjen na najmanj 30 minut. To je tudi razlog, da smo za vsako pregrado scenarij postopne porušitve izračunali dvakrat, prvič s časom kot ga predlagajo navodila programa, drugič pa s podaljšanim časom.



## 4.2.1 Priprava podatkov – parametri za račun iztoka

### 4.2.1.1 Trnava

V preglednici 4.2 so prikazani vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka v primeru porušitve pregrade Trnava. Podatka *BW* in *TFM* sta določena na podlagi privzetih vrednosti programa SMPDBK (preglednica 3.2).

**Preglednica 4.2: Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka pri pregradi Trnava**

Oznaka	Metrične enote		Imperialne enote	
<i>HDE</i>	301,00	m n.m.	987,28	ft
<i>BME</i>	292,30	m n.m.	958,70	ft
<i>VOL</i>	1.720	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	1.395	acre-ft
<i>SA</i>	500.000	m <sup>2</sup>	123,56	acre
<i>BW</i>	26,10	m	85,61	ft
<i>TFM</i>	3,0	min	3,0	min
<i>QO</i>	0,19	m <sup>3</sup> /s	6,71	cfs

Račune smo izvedli za tri različne scenarije rušenja, pri katerih smo upoštevali odprtino kot jo predlaga SMPDBK – pravokotne oblike, njena končna širina znaša 26,10 m in sega do dna doline:

- TRENUTNA PORUŠITEV,
- POSTOPNA PORUŠITEV,  $T_f = 3,0$  min,
- POSTOPNA PORUŠITEV,  $T_f = 30,0$  min.

Izvedli smo en izračun za primerjavo z obstoječimi izračuni iz poročila NIVO:

- TRENUTNA PORUŠITEV z odprtino enakovredno tisti, upoštevani pri izračunu v poročilu NIVO (1975). Širina odprtine je 13 m.

Izvršili smo še dva primera POSTOPNE PORUŠITVE  $T_f = 3,0$  min s spremenjenim koeficientom hrapavosti, ki bosta služila za analizo občutljivosti koeficienta.

#### 4.2.1.2 Lahovnica

V preglednici 4.3 so prikazani vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka v primeru porušitve pregrade Lahovnica. Podatka *BW* in *TFM* sta določena na podlagi privzetih vrednosti programa SMPDBK (preglednica 3.2).

**Preglednica 4.3: Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka pri pregradi Lahovnica**

Oznaka	Metrične enote		Imperialne enote	
	<i>HDE</i>	253,00	m n.m.	829,84
<i>BME</i>	250,00	m n.m.	820,00	ft
<i>VOL</i>	22,25	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	18,05	acre-ft
<i>SA</i>	0	m <sup>2</sup>	0	acre
<i>BW</i>	9,00	m	29,52	ft
<i>TFM</i>	1,0	min	1,0	min
<i>QO</i>	0	m <sup>3</sup> /s	0	cfs

Račune smo izvedli za tri različne scenarije rušenja, pri katerih smo upoštevali odprtino kot jo predlaga SMPDBK – pravokotne oblike, njena končna širina znaša 9,00 m in sega do dna doline:

- TRENUTNA PORUŠITEV,
- POSTOPNA PORUŠITEV,  $T_f = 1,0$  min,
- POSTOPNA PORUŠITEV,  $T_f = 10,0$  min.

#### 4.2.1.3 Loče

V preglednici 4.4 so prikazani vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka v primeru porušitve pregrade Loče. Podatka *BW* in *TFM* sta določena na podlagi privzetih vrednosti programa SMPDBK (preglednica 3.2).

**Preglednica 4.4: Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka pri pregradi Loče**

Oznaka	Metrične enote		Imperialne enote	
<i>HDE</i>	266,50	m n.m.	874,12	ft
<i>BME</i>	255,00	m n.m.	836,40	ft
<i>VOL</i>	5.250	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	4.258	acre-ft
<i>SA</i>	937.000	m <sup>2</sup>	231,55	acre
<i>BW</i>	34,50	m	113,16	ft
<i>TFM</i>	4,0	min	4,0	min
<i>QO</i>	3,00	m <sup>3</sup> /s	106,00	cfs

Račune smo izvedli za tri različne scenarije rušenja, pri katerih smo upoštevali odprtino kot jo predlaga SMPDBK – pravokotne oblike, njena končna širina znaša 34.50 m in sega do dna doline. Pri tem smo upoštevali maksimalno kote gladine (266,5 m n.m.):

- TRENUTNA PORUŠITEV,
- POSTOPNA PORUŠITEV,  $T_f = 4,0$  min,
- POSTOPNA PORUŠITEV,  $T_f = 30,0$  min.

Izvedli smo še izračun za primerjavo z obstoječimi izračuni iz poročila FAGG, pri katerem smo upoštevali obratovalno koto gladine (265,4 m n.m.):

- TRENUTNA PORUŠITEV z odprtino enakovredno tisti, upoštevani pri izračunu v poročilu FAGG (1979). Širina odprtine je 18,60 m.

#### 4.2.1.4 Radigaj

V preglednici 4.5 so prikazani vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka v primeru porušitve pregrade Radigaj. Podatka *BW* in *TFM* sta določena na podlagi privzetih vrednosti programa SMPDBK (preglednica 3.2).

**Preglednica 4.5: Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka pri pregradi Radigaj**

Oznaka	Metrične enote		Imperialne enote	
	<i>HDE</i>	310,40	m n.m.	1018,11
<i>BME</i>	308,00	m n.m.	1010,24	ft
<i>VOL</i>	0	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	0	acre-ft
<i>SA</i>	45.000	m <sup>2</sup>	11,12	acre
<i>BW</i>	7,20	m	23,62	ft
<i>TFM</i>	1,0	min	1,0	min
<i>QO</i>	0	m <sup>3</sup> /s	0	cfs

Račune smo izvedli za tri različne scenarije rušenja, pri katerih smo upoštevali odprtino kot jo predlaga SMPDBK – pravokotne oblike, njena končna širina znaša 7,20 m in sega do dna doline:

- TRENUTNA PORUŠITEV, odprtina kot jo predlaga SMPDBK,
- POSTOPNA PORUŠITEV,  $T_f = 1,0$  min, odprtina kot jo predlaga SMPDBK,
- POSTOPNA PORUŠITEV,  $T_f = 7,0$  min, odprtina kot jo predlaga SMPDBK.

#### 4.2.2 Priprava podatkov – geometrija doline

Program SMPDBK zahteva podatek za vsaj prvi in zadnji profil doline, vendar pa večje število profilov poveča natančnost (Wetmore in Fread, 1991). Za najboljši približek dejanski dolini je potrebno pri izbiri profilov slediti spremembam geometrije. Obliko profila programu podamo v obliki parov nadmorske višine in pripadajoče širine doline (v slovenski praksi je to t.i. format »zz-bb«). Podati je potrebno tudi koeficient hrapavosti, ki se nanaša na poraščenost terena.

Podatke o geometriji doline dolvodno smo določili s pomočjo temeljnega topografskega načrta merila 1:5000. Profile smo postavil na medsebojne razdalje od 100 do 400 m na način, da bi čim bolje zadostil zahtevam programa. Koeficient hrapavosti smo določili s pomočjo ortofoto posnetkov v spletnem Atlasu okolja (slike 5-2, 5-3, 5-4 in 5-8). Površje poplavljenega območja v povprečju prekrivajo zelenice in njive, kar ustreza vrednosti koeficienta 0,05. Zaradi nezanesljivosti koeficienta bomo izvedli tudi analizo občutljivosti na primeru pregrade Trnava. Naredili bomo izračun z zmanjšanim koeficientom 0,04 za nizko travo in povečanim koeficientom 0,06 za grmovja in nizko drevje.

Pri izbiri profilov in dolžini odseka doline smo upoštevali tudi omejitve programa. Zaradi poenostavitve model ni zmožen upoštevati zajezev, ki nastanejo zaradi dolvodnih prečnih objektov (mostovi, nasipi, ipd.). Hkrati je nenatančen pri hitrih spremembah širine doline.

Dolino Trnave smo iz vrednotili vse do nasipa z avtocesto (AC) Ljubljana-Maribor, ki se nahaja približno 2065 m dolvodno. Pri tem poplavni val potuje približno 1 km po relativno ozki dolini, po petem profilu pa se dolina razširi. Ozka dolina Lahovnice doseže AC po približno 415 metrih. Pregrada Loče je od AC oddaljena približno 2445 metrov. Pri pregradi Radigaj pa imamo najprej zelo ozko dolino, ki po približno 1095 metrih doseže vas Braslovče, potem pa se razlije na obsežno poplavno ravnico.

**Preglednica 4.6: Število uporabljenih profilov**

<b>Pregrada</b>	<b>Število profilov</b>	<b>Oddaljenost zadnjega profila od pregrade</b>
Trnava	10	2065
Lahovnica	4	415
Loče	12	2445
Radigaj	6	1095

## 5 ANALIZA REZULTATOV

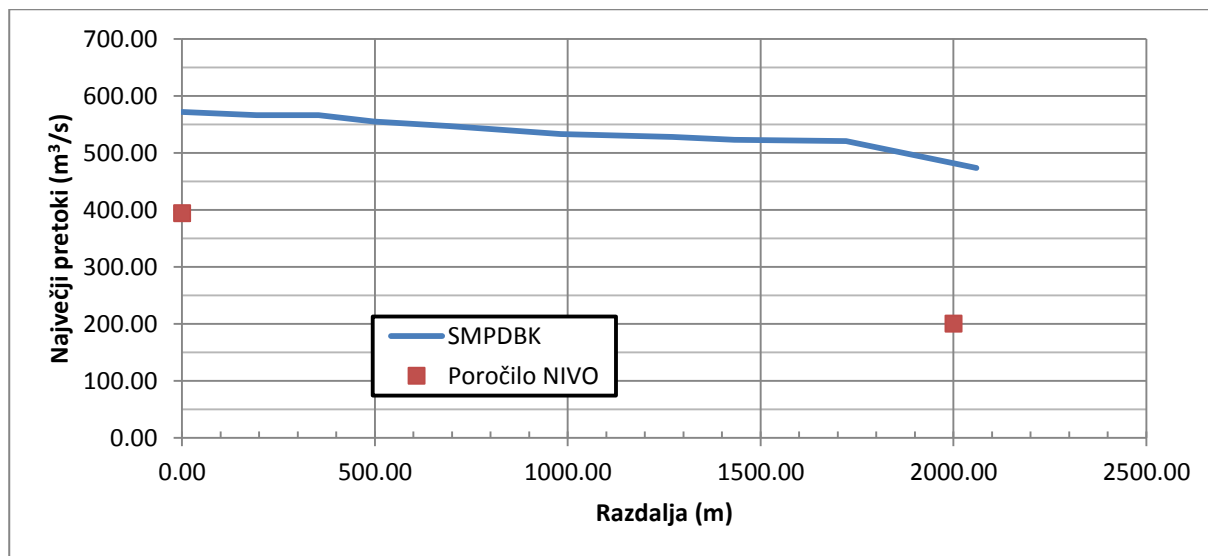
### 5.1 Primerjava z obstoječimi poročili

Za pregradi Trnava in Loče za primerjavo rezultatov že obstajata poročili o poružitvi pregrad, kjer so bile uporabljene polne 1D Saint Venantove enačbe. Na podlagi teh primerjav bomo poskušali oceniti primernost približnih metod za preliminarne ocene poružitiev.

#### 5.1.1 Trnava

V prvotnem poročilu je bil izračun narejen na NIVO Celje (Rajar in Verbovšek, 1975). Za takrat načrtovano pregrado se je upoštevala trenutna poružitev zaradi miniranja telesa pregrade. Pri tem se predpostavlja odprtina trapezne oblike, ob dnu široka 5 m, z naklonom stranic 1:1. Izračun je narejen za trenutno poružitev kot posledico namernega rušenja. Prečni profili so bili le približno izvrednoteni iz situacije 1:5000. Za območje od pregrade do AC, kar je tudi enako območju, obravnavanemu v diplomski nalogi, so bili izračuni narejeni v dveh fazah. V prvi je bil izračunan samo največji pretok skozi odprtino, ki je znašal 394 m<sup>3</sup>/s. V drugi fazi je bil z brezdimenzijsko metodo (Rajar, 1973), določen pretok na mestu AC, ki znaša približno 200 m<sup>3</sup>/s in na katerega naj bi se projektiral prepust. Takoj pod pregrado so bile izračunane največje možne globine približno 2 m, po približno 1 km dolvodno pa med 1 in 1,5 m.

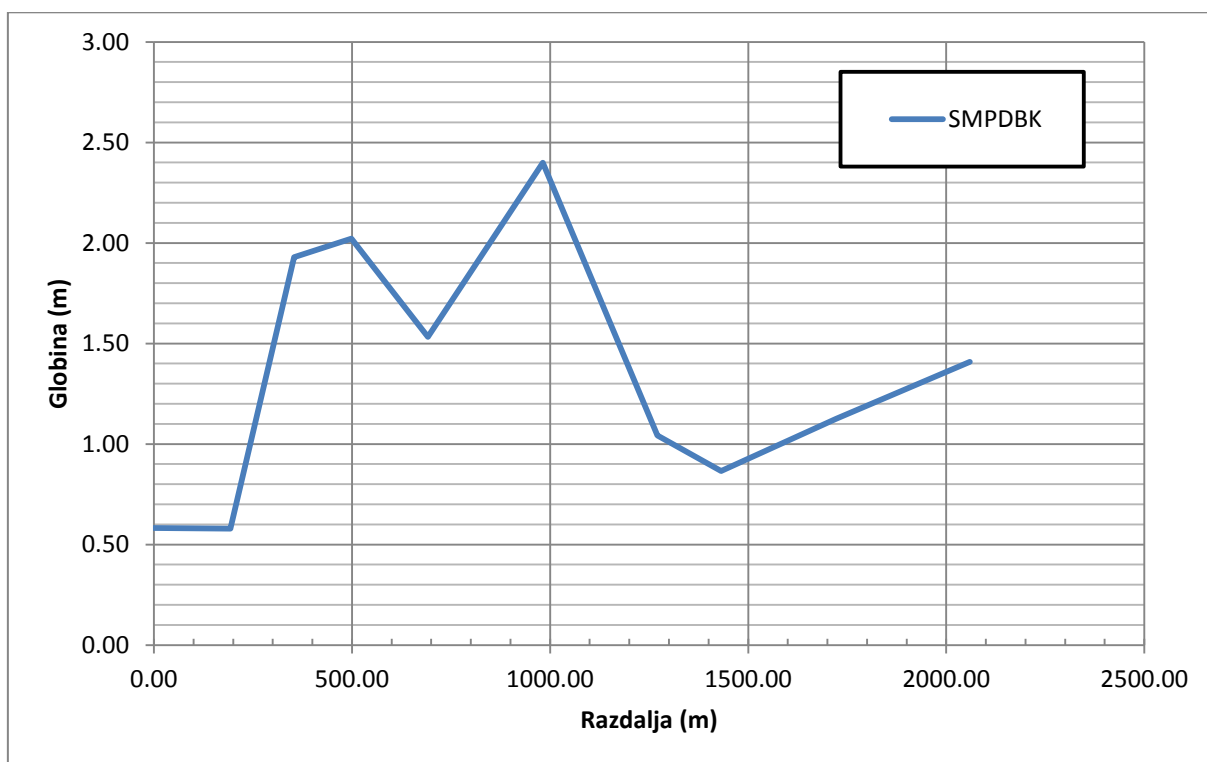
Za primerjavo s programom SMPDBK smo določili enakovreden scenarij rušenja. Trapezno porušno odprtino smo povprečili v pravokotno obliko, s povprečno širino 13 m in upoštevali trenutno poružitev.



Slika 5-1: Primerjava največjih pretokov izračuna SMPDBK z izračunom iz poročila NIVO

Slika 5-1 prikazuje primerjavo največjih izračunanih pretokov. Največji iztok iz akumulacije je za približno  $170 \text{ m}^3/\text{s}$  večji v primerjavi z rezultati poročila NIVO, kar znaša nekaj več kot 40 % razlike. Pri izračunu SMPDBK se pretok zmanjša iz  $570 \text{ m}^3/\text{s}$  v prvem profilu na  $470 \text{ m}^3/\text{s}$  v zadnjem profilu, kar pomeni okrog 20 % zmanjšanje, medtem ko se v izračunu poročila NIVO pretok prepolovi.

Na sliki 5-2 so prikazane največje globine, izračunane s programom SMPDBK. V poročilu NIVO so bile globine podane samo opisno, tako da jih ne moremo primerjati grafično. Takoj pod pregrado smo izračunali veliko manjše globine, kot so bile predvidene v poročilu NIVO. Poročilo predpostavlja globine približno 2 m, kakršne je program SMPDBK izračunal šele v tretjem in četrtem profilu, medtem ko je v prvih dveh globina okrog 60 cm. Boljše ujemanje se pokaže v območju po 1 km od pregrade, kjer izračunane globine znašajo med 1 in 1,5 m, tako kot v poročilu NIVO. To območje sicer predstavlja razširitev na poplavno ravnino, ki se na razdalji približno 2 km od pregrade zaključi z AC nasipom.



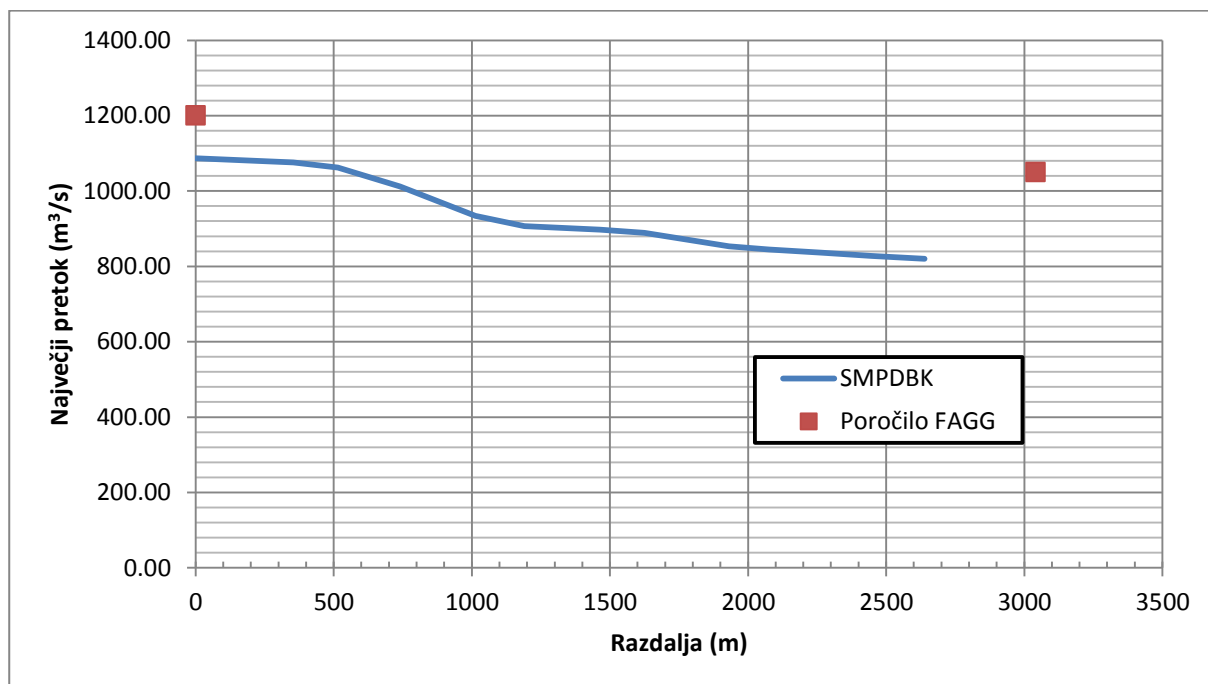
Slika 5-2: Največje globine izračunane s programom SMPDBK

### 5.1.2 Loče

Izračun je bil narejen na FAGG (Rajar, 1979) na podlagi polnih 1D Saint Venantovih enačb. Poročilo predvideva tri variante izračuna pri različnih kotah zaježitve. Varianta 1 predvideva normalno koto gladine pri 265,4 m n.m., drugi dve varianti sta z nižjima kotama 263,0 m n.m. in 260,0 m n.m. Preverjal se je samo scenarij trenutne porušitve v primeru vojne nevarnosti. Topografija doline je bila iz vrednotena s prečnimi profili, pridobljenimi iz situacije 1:5000. Upoštevan je bil tudi vpliv projektirane AC, tako da je bila kot spodnji robni pogoj postavljena krivulja  $Q(h)$  za kritičen tok skozi prepust pod AC.

Za primerjavo s programom SMPDBK smo določili enakovreden scenarij rušenja. Trapezno porušno odprtino smo povprečili v pravokotno obliko s povprečno širino 18,60 m. Izvedli smo račun s trenutno porušitvijo za varianto 1, kar pomeni začetno koto gladine 265,4 m n.m. v akumulaciji.

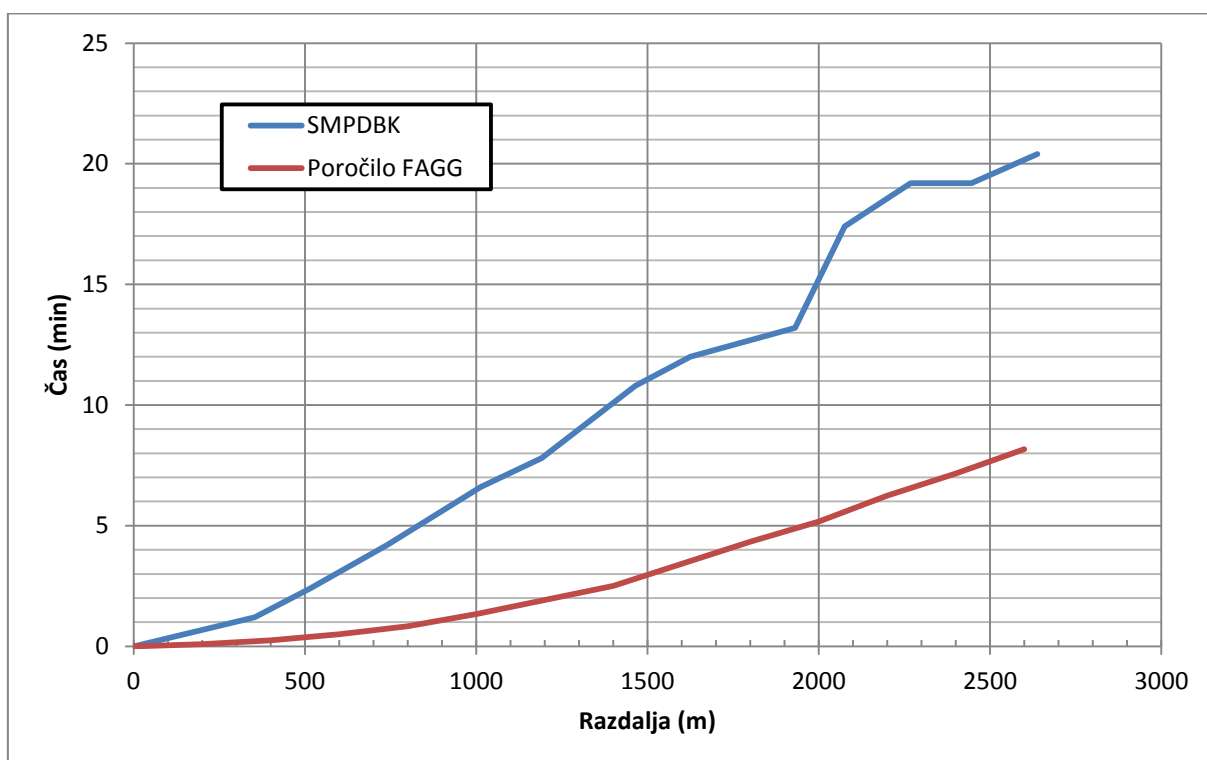
Slika 5-3 prikazuje primerjavo največjih izračunanih pretokov. Vrednosti največjih pretokov v prvem profilu so pri računu SMPDBK približno za 10 % nižje kot vrednosti v poročilu FAGG. Pri tem je SMPDBK izračunal hitrejši trend padanja, saj pri njem pretok upade iz začetnih 1100 m<sup>3</sup>/s na nekaj več kot 800 m<sup>3</sup>/s, kar znaša približno 300 m<sup>3</sup>/s in pomeni približno 25 % zmanjšanje. V poročilu FAGG se pretok iz začetnih 1200 m<sup>3</sup>/s zmanjša na 1050 m<sup>3</sup>/s, kar znaša 150 m<sup>3</sup>/s in pomeni približno 13 % zmanjšanje.



Slika 5-3: Primerjava največjih pretokov izračuna SMPDBK s poročilom FAGG

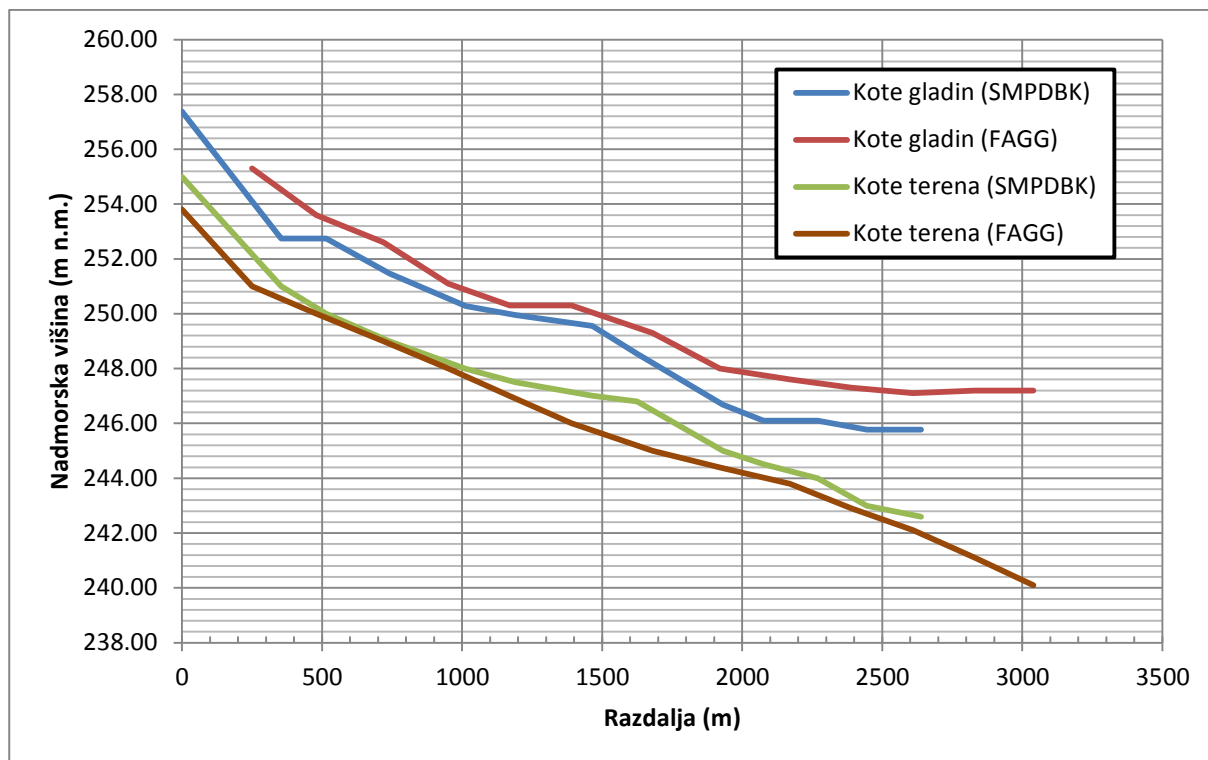


V poročilu FAGG je priložen tudi graf potovanja čela vala s časom vzdolž podolžnega profila. Ker program SMPDBK namesto čela vala določi nastop največjega pretoka, direktna primerjava obeh rezultatov ni možna. Največji pretok namreč v posameznem profilu vedno nastopi kasneje kot ga doseže čelo vala. Iz slike 5-4 je razvidno, da čelo vala doseže zadnji profil po približno 8 minutah. Nastop največjega pretoka po izračunu SMPDBK se v zadnjem profilu pojavi po nekaj več kot 20 minutah od začetka rušenja. Pri programu SMPDBK je opazno tudi bolj izrazito strmo dviganje krivulje med devetim in desetim profilom. Razlog za to bi lahko bila lokalna razširitev doline zaradi izrazite neprizmatičnosti. Ker se voda razlije na širše območje, se hitrosti zmanjšajo, val pa potuje počasneje. V poročilu FAGG takšen skok ni bil zaznan, krivulja časa se dviga relativno enakomerno.



**Slika 5-4: Primerjava med časom nastopa največjega pretoka (SMPDBK) in časom potovanja čela vala (poročilo FAGG)**

Na sliki 5-5 je prikazana primerjava poteka gladin. Pri tem sta prikazani tudi obe liniji terena, ki se ne pokrivata, saj so bili za oba primera prečni profili različno izvrednoteni. Glede na to kote gladin v zgornjem delu doline kažejo še razmeroma sprejemljivo ujemanje. Pri tem so izračuni SMPDBK ves čas nižji od tistih iz poročila, kar se ujema z ugotovitvami Brenčiča (1991) na primeru akumulacije Piševce. Po sedmem profilu vrednosti računa SMPDBK občutneje padejo pod vrednosti iz poročila FAGG. Razlog za to bi lahko bila AC, ki predstavlja zajezev. SMPDBK nima možnosti računa takšnega spodnjega robnega pogoja. Program predvideva, da voda prosto odteče naprej po dolini, kar posledično pomeni nižje gladine kot v primeru zajezev.



Slika 5-5: Primerjava nivojev gladin med izračunom SMPDBK in poročilom FAGG

### 5.1.3 Sklepne ugotovitve

Razlike med največjimi pretoki so lahko posledica različne definicije dinamike rušenja obeh primerjanih metod. Izračun iztoka je pri programu SMPDBK namreč odvisen od volumna in površine akumulacije, hidravlične višine pregrade in časa rušenja, medtem ko je bil v poročilih zgornji robni pogoj določen bolj kompleksno. Kljub temu lahko ocenimo, da je natančnost ocene pretoka za potrebe diplomske naloge zadovoljiva.

Ujemanje gladin je bilo v obeh primerih zadovoljivo. Pri Trnavi bi lahko bil razlog za prenizke globine v prvih dveh profilih to, da program globino izračuna iz največjega pretoka, ki v primeru trenutne porušitve nastopi v trenutku rušenja. Logično bi bilo, da bi največje globine nastopile nekoliko kasneje, ko bi se pretok že malo zmanjšal in bi zaradi tega tudi bile večje. Neujemanje gladin v zadnjih profilih pregrade Loče je lahko posledica neupoštevanja zaježitve zaradi nasipa AC. Iz istega razloga so vprašljive tudi globine v zadnjih profilih Trnave. Na tem mestu bi bilo smiselno izvesti informativen izračun pretočne sposobnosti prepusta pod AC, katerega zaradi podatkovnih omejitev nismo izvedli. V kolikor prepust ne bi prevajal kritičnega pretoka, bi to pomenilo, da izračun globin v zadnjih nekaj profilih ni realen.

Model SMPDBK torej kaže relativno dobro ujemanje rezultatov in je primeren za približne (preliminarne) račune posledic porušitve. Pri tem je pri izračunih potrebno upoštevati omejitve programa in na podlagi teh omejitev tudi kritično presoditi realno sliko rezultatov.

## 5.2 Analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti na primeru pregrade Trnava

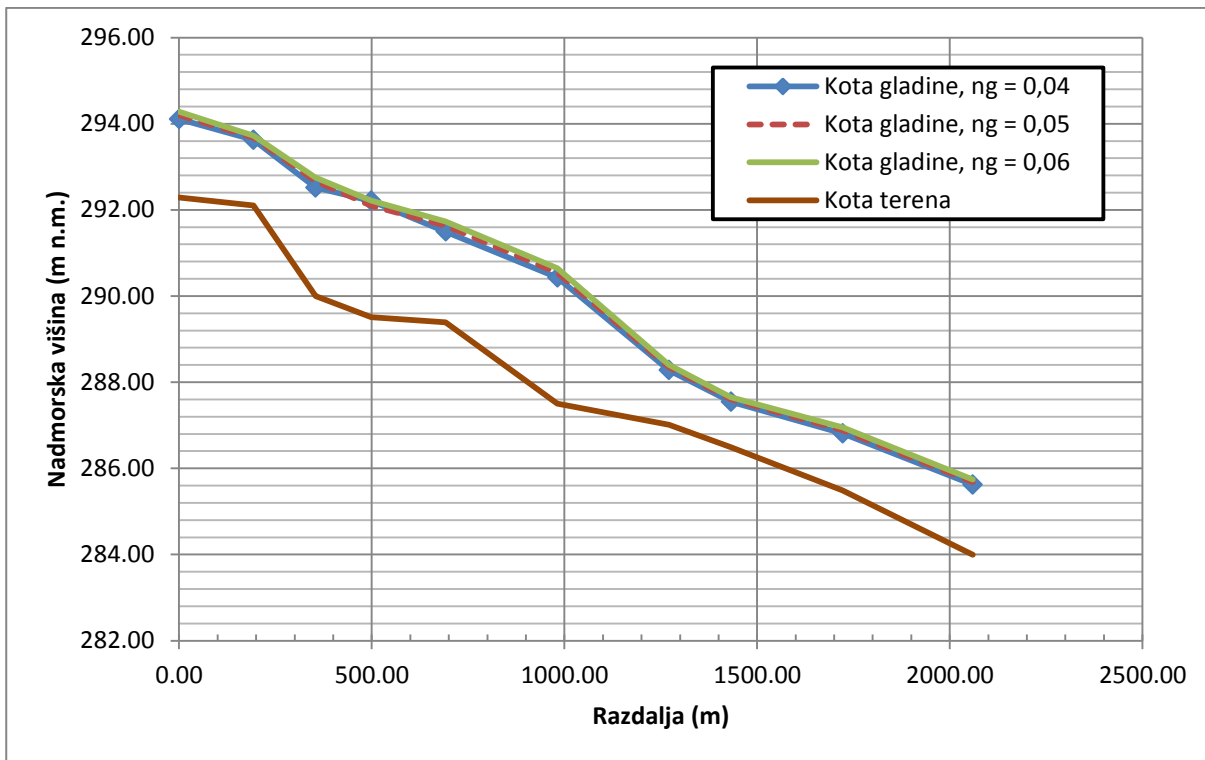
Analizo občutljivosti smo izvedli na primeru postopne porušitve pregrade Trnava s časom rušenja 3 minute. S tem smo preverili vpliv izbire koeficienta hrapavosti na rezultate. V prvotnih izračunih smo v vseh profilih uporabili vrednost koeficienta  $0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ , saj smo ocenili, da v povprečju prevladujejo travnate površine. Tokrat smo izvedli še dva dodatna izračuna, kjer smo koeficient povečali in zmanjšali za vrednost  $0,01 \text{ s/m}^{1/3}$ . Vrednost koeficienta  $0,04 \text{ s/m}^{1/3}$  predstavlja nizko travo, vrednost  $0,06 \text{ s/m}^{1/3}$  pa grmovja in nizko drevje (preglednica 3.3).

### 5.2.1 Prikaz rezultatov

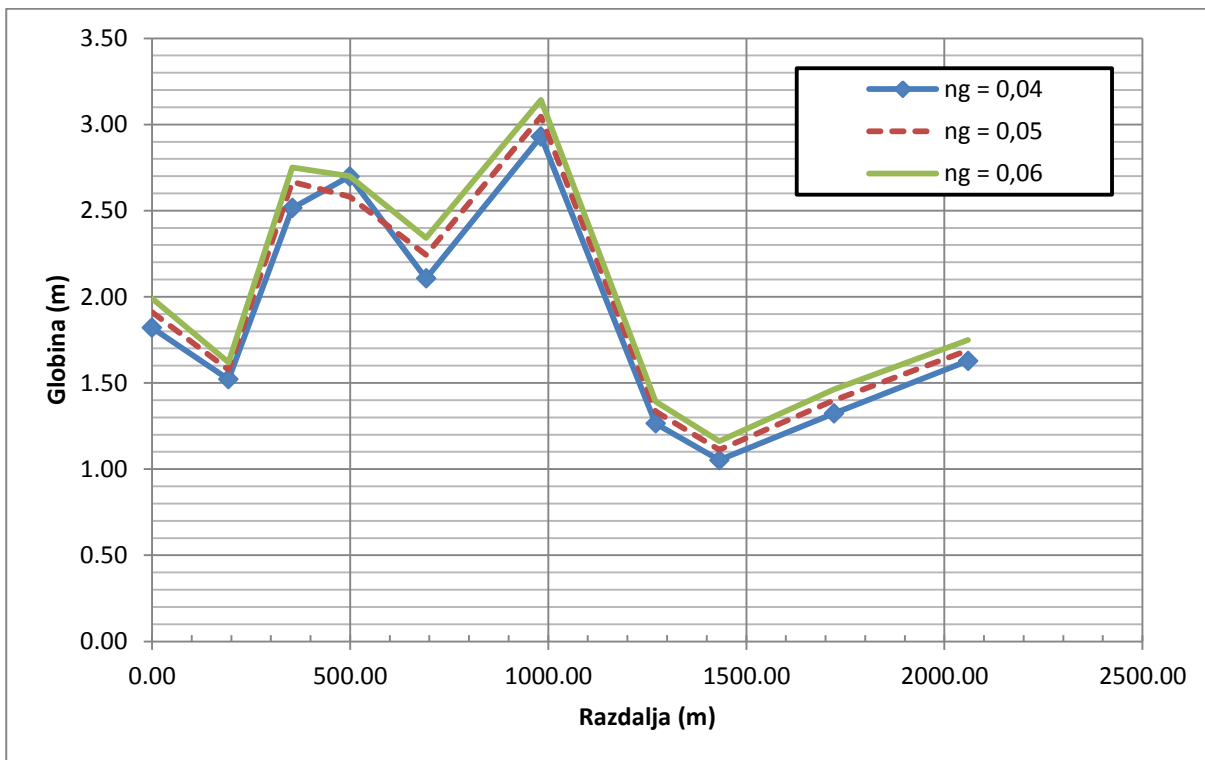
Rezultati so prikazani na slikah 5-6 do 5-9. Vpliv spremembe koeficienta hrapavosti na globino toka je razmeroma majhen. Vrednosti globin se razlikujejo za manj kot 10 cm, kar pomeni 3,6 % relativne napake. Ker v našem primeru uporabljamo približne metode, ki že same po sebi pomenijo večjo napako, takšna sprememba ne igra pomembne vloge. Pri največjih pretokih in času potovanja se razlike v globini povečujejo z naraščanjem razdalje od pregrade. V prvem profilu rezultati zavzamejo identično vrednost pri vseh treh izračunih, z vsakim naslednjim profilom pa se razlika povečuje. Manjši koeficient povzroči večji pretok in krajši čas do nastopa konice pretoka. Z večanjem koeficienta se pretok zmanjšuje, čas nastopa maksimalnega pretoka v posameznem profilu pa je vse daljši. Rezultati v zadnjem profilu, kjer so razlike tudi največje, so prikazani v preglednici 5.1. Iz nje lahko razberemo, da se pri zmanjšanju koeficienta pretok poveča za približno 10 %, čas nastopa konice pa skrajša za približno 15 %. V primeru povečanja hrapavosti pretok upade za približno 6 %, čas potovanja konice pa se podaljša za približno 10 %.

**Preglednica 5.1: Vpliv koeficienta hrapavosti na rezultate v zadnjem profilu**

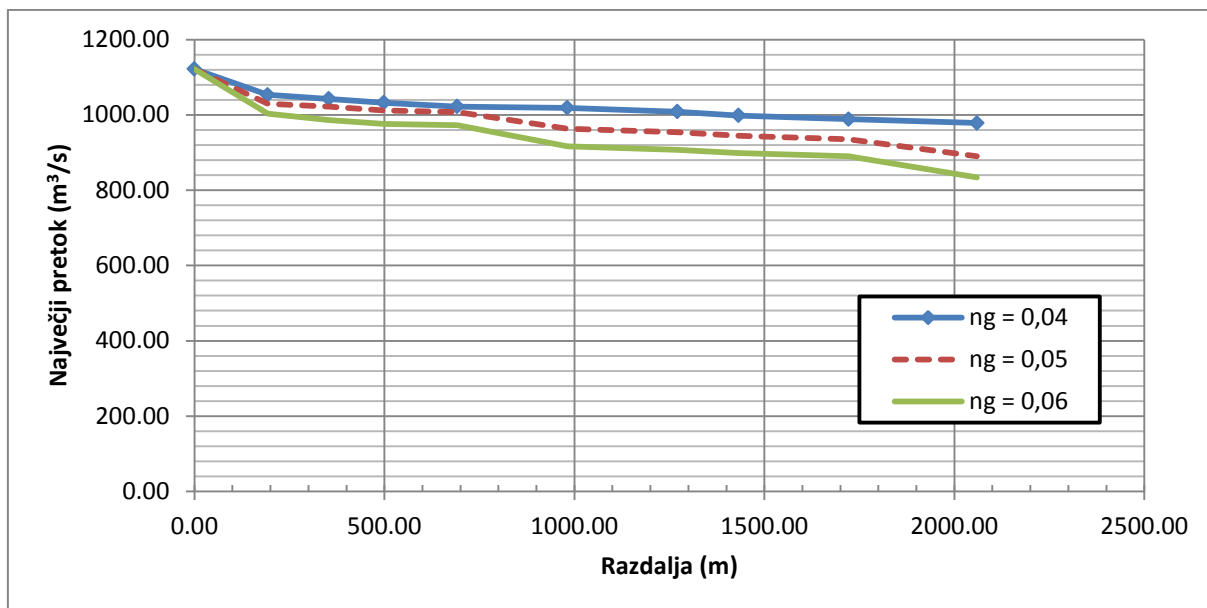
Koef. hrapavosti [ $\text{s/m}^{1/3}$ ]	Gladina [m n.m.]	Globina [m]	Pretok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Čas [min]
0,04	285,62	1,63	978,48	25,8
0,05	285,68	1,69	889,90	30,0
0,06	285,74	1,75	834,00	33,6



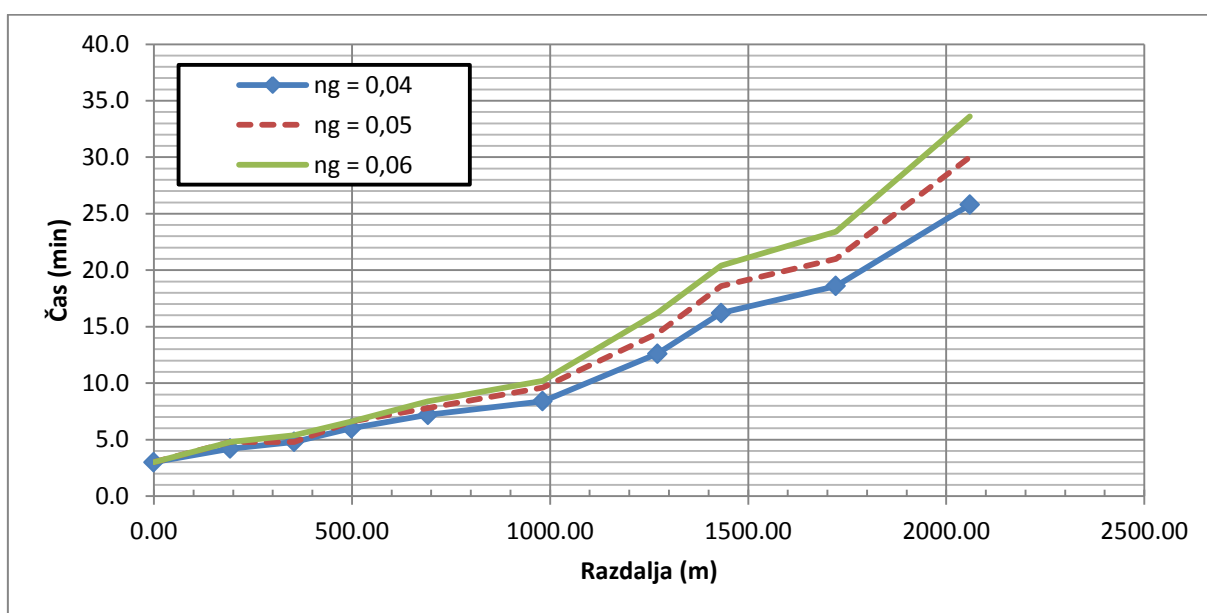
Slika 5-6: Kote gladin - analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti



Slika 5-7: Globine - analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti



Slika 5-8: Največji pretoki - analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti



Slika 5-9: Časi nastopa konice - analiza občutljivosti koeficienta hrapavosti

### 5.2.2 Sklepne ugotovitve

Iz rezultatov lahko sklepamo, da izbira koeficient hrapavosti najbolj vpliva predvsem na hitrosti toka. Večji koeficient, ki pomeni večjo hrapavost površja, bo povzročil zmanjšanje pretoka in s tem tudi upad hitrosti. Posledično se s tem podaljša čas potovanja konice. Lahko še sklepamo, da so razlike v primerjanih izračunih iz prvega dela posledica konceptualnih razlik med uporabljenima modeloma, saj spremenjen koeficient hrapavosti vpliva na rezultate v majhni meri.

### 5.3 Analiza posledic porušitve z različnimi scenariji rušenja

V drugem sklopu bomo analizirali primere, pri katerih so bili vhodni podatki izbrani glede na privzete vrednosti v programu SMPDBK. Za vsako pregrado so bili narejeni izračuni za trenutno porušitev, postopno porušitev s privzetim časom rušenja in postopno s podaljšanim časom rušenja. Rezultati računskih obdelav so:

- največji pretoki vzdolž podolžnega profila,
- kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila,
- časi, ko so doseženi največji pretoki,
- največje globine vzdolž podolžnega profila, ki predstavljajo razliko med koto gladine in koto dna doline v izbranem profilu.

#### 5.3.1 Prikaz rezultatov

Rezultati spreminjanja največjega pretoka vzdolž podolžnega profila za vse štiri pregrade so prikazani v obliki grafov na slikah 5-10, 5-14, 5-18 in 5-22. Iz njih je razviden značilen trend padanja krivulje pretokov. V prvem profilu, ki predstavlja mesto pregrade, je tako pretok vedno največji in upada proti zadnjemu profilu. Največje vrednosti pretokov povzroči trenutna porušitev, s podaljševanjem časa rušenja pa se vrednosti zmanjšujejo.

Potek kot najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila za vse štiri pregrade je prikazan v obliki grafov na slikah 5-11, 5-15, 5-19 in 5-23. Pri vseh pregradah se proti koncu doline kote gladin različnih scenarijev rušenja skoraj pokrijejo. Razlika je v profilu pregrade, kjer trenutna porušitev povzroči najnižje gladine. S podaljševanjem časa rušenja se nivo gladine v prvih profilih zvišuje. Takšni rezultati so na daljših odsekih v primeru računov s polnimi Saint Venantovimi enačbami neobičajni, saj trenutna porušitev praviloma povzroči višje kote gladin kot postopna. Razliko med nivojem gladine in koto terena predstavljajo globine, ki so prikazane v obliki grafov na slikah 5-12, 5-16, 5-20 in 5-24. Globine vzdolž podolžnega profila pri vseh štirih primerih zelo nihajo.

Časi nastopa največjega pretoka vzdolž podolžnega profila so prikazani v obliki grafov na slikah od 5-13, 5-17, 5-21 in 5-25. Iz grafov je lepo razvidno, da program predvideva nastop največjega pretoka v prvem profilu v trenutku dokončne porušitve pregrade. Časovne krivulje se pri različnih scenarijih rušenja ujemajo po obliki, vendar so med seboj zamaknjene za vrednost, ki je enaka času rušenja pregrade.

### 5.3.1.1 Trnava

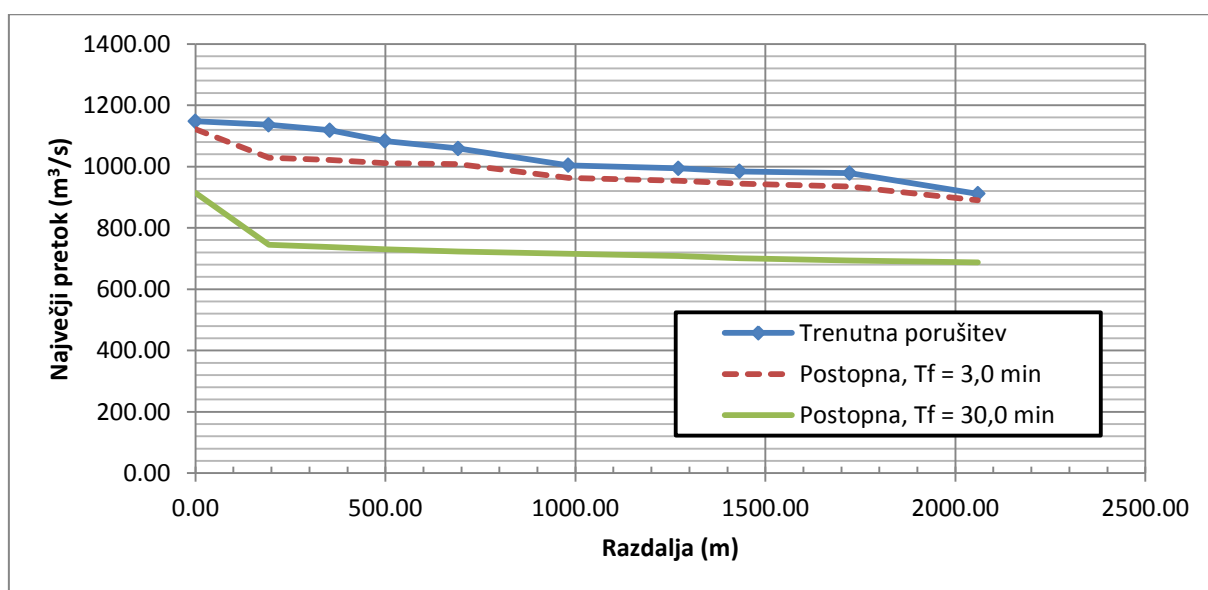
Krivulja največjih pretokov (slika 5-10) pri scenariju trenutne porušitve pada relativno enakomerno. Pri scenarijih s postopno porušitvijo se pojavi malo hitrejši padec na razdalji od prvega do drugega profila, po drugem profilu pa je bolj položen in enakomeren do konca doline. Trenutna porušitev in postopna porušitev s krajšim časom rušenja povzročita v prvem profilu največji pretok nekaj čez 1.100 m<sup>3</sup>/s. Pri postopni porušitvi z daljšim časom rušenja je pretok v prvem profilu manjši, okrog 900 m<sup>3</sup>/s.

Iz slike 5-11 je razvidno, da daljši čas rušenja povzroči višje gladine v prvem profilu. Po petem profilu, ko se ozka dolina razlije na širšo poplavno ravnico, se gladine vseh treh scenarijev rušenja praktično pokrijejo.

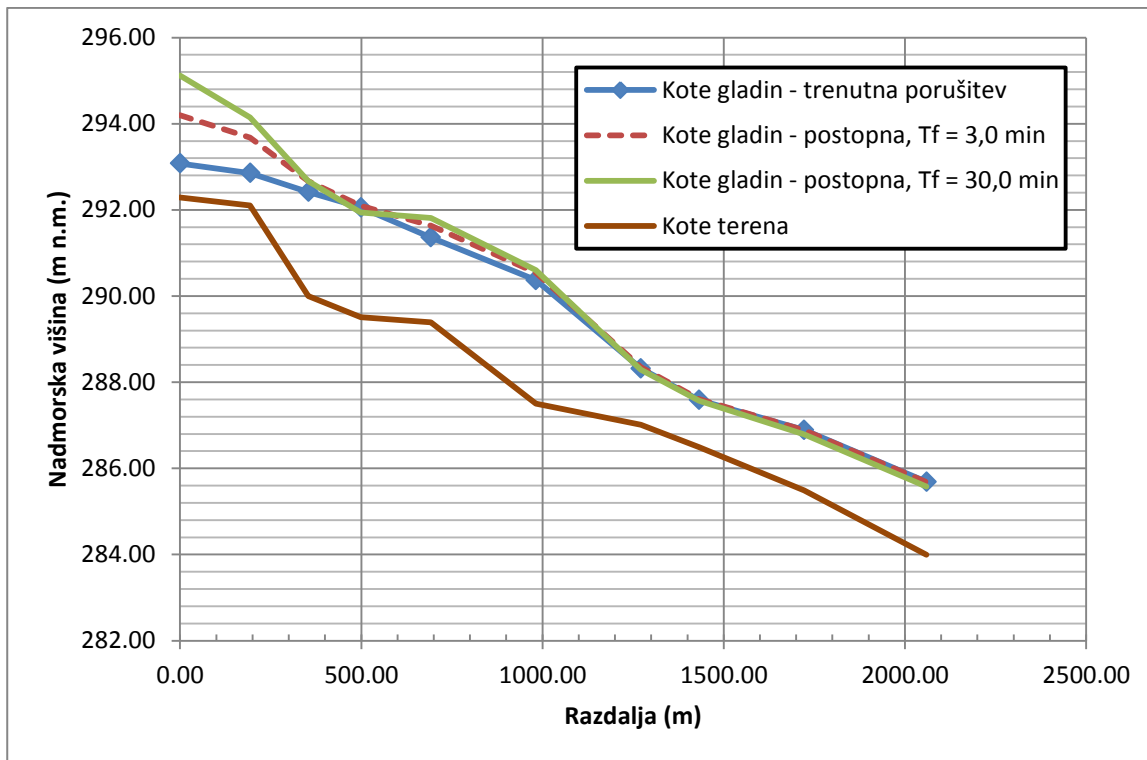
Krivulje globin so prikazane na sliki 5-12. Na razdalji od tretjega do šestega profila, kjer je dolina še relativno ozka, so dosežene največje globine. Takoj pred izlivom na poplavno ravnico znašajo do 3 m, po petem profilu pa se gibljejo med 1 in 1,5 m.

V zadnjem profilu bi maksimalni pretok pri trenutni in postopni porušitvi s krajšim časom rušenja nastopil približno 30 min po začetku rušenja, pri postopni z daljšim časom rušenja pa približno po eni uri (slika 5-13).

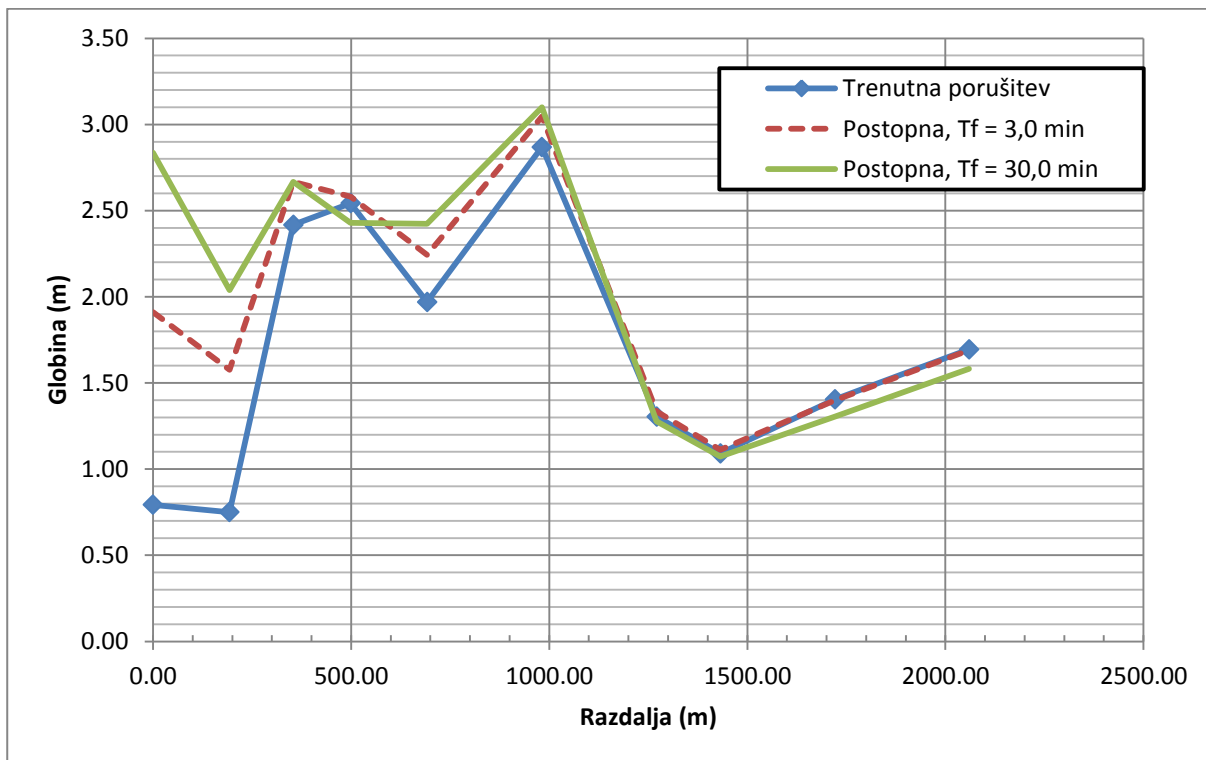
Priloga B.1 prikazuje situacijo z izbranimi prečnimi profili in vrisano poplavljenno območje. Na računem odseku, od pregrade do AC, so ogrožene tri vasi - Glinje in Zakl ter južni del Poljč. Šmatevž in Kamenče sta izven dosega poplavnega vala.



Slika 5-10: Največji pretoki vzdolž podolžnega profila – pregrada Trnava

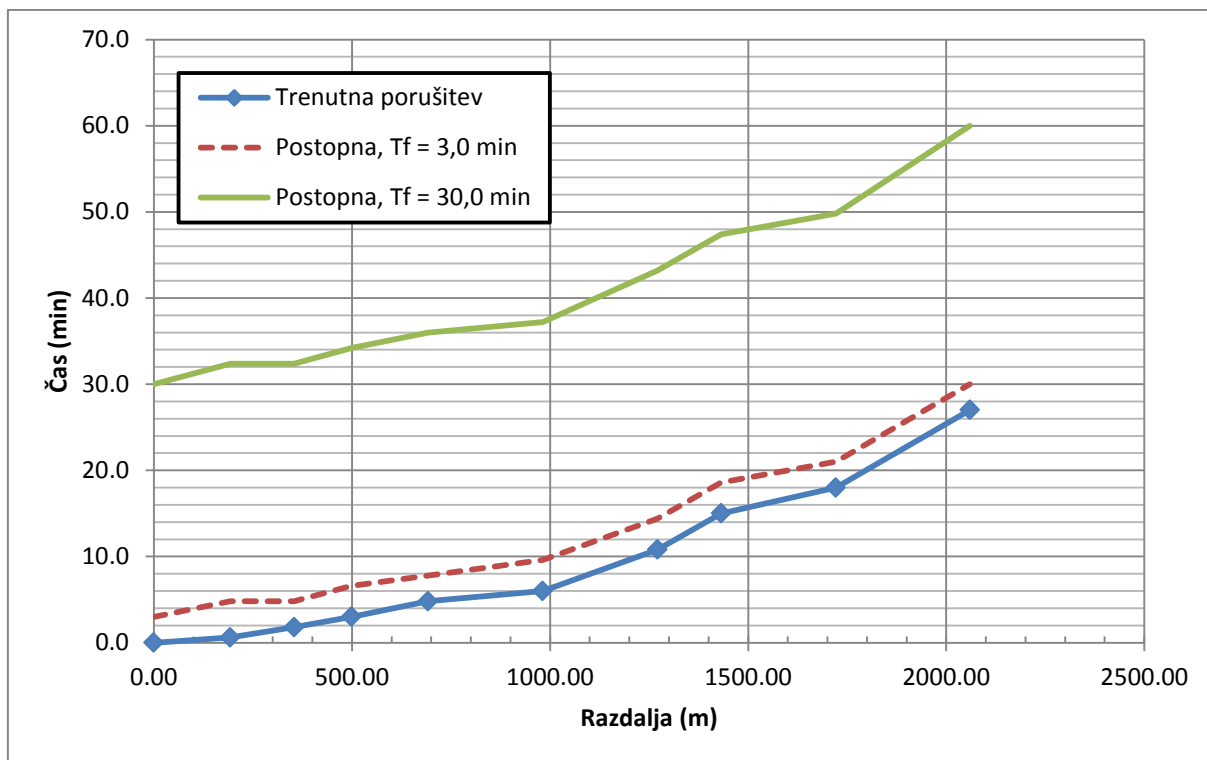


Slika 5-11: Kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila - pregrada Trnava



Slika 5-12: Globine vzdolž podolžnega profila - pregrada Trnava





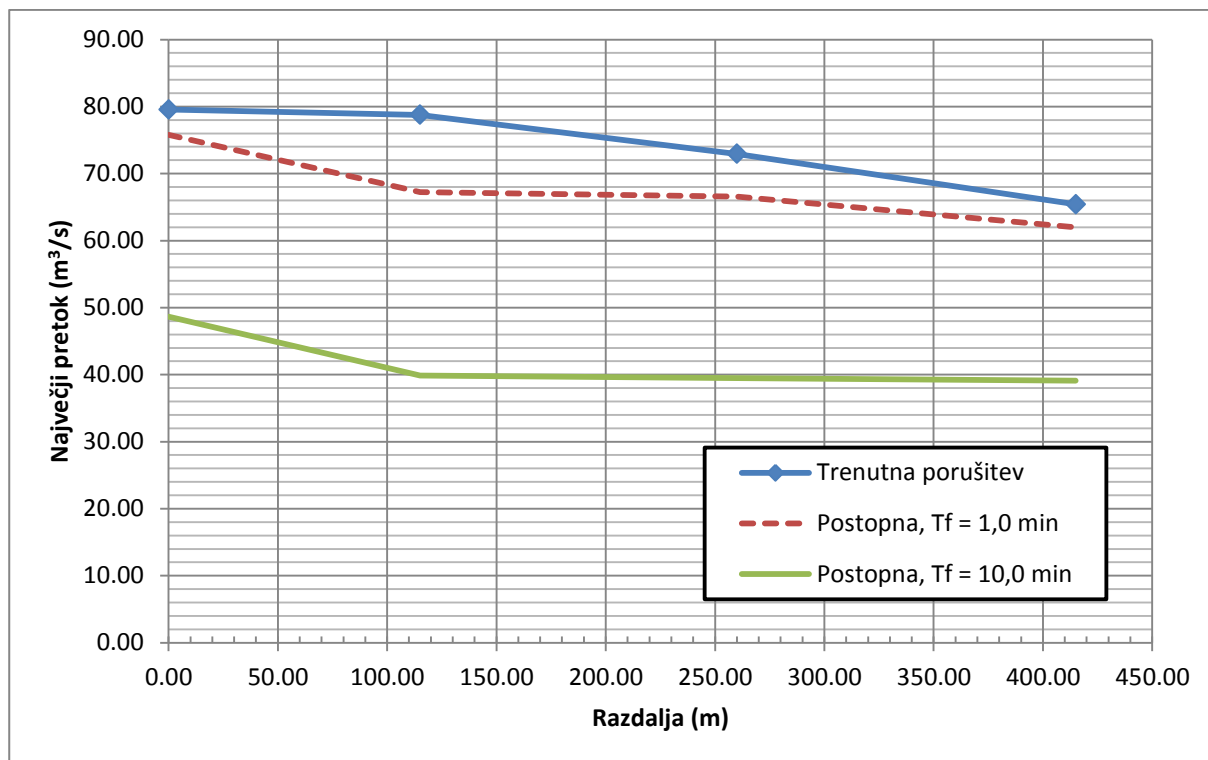
Slika 5-13: Časi nastopa največjih pretokov - pregrada Trnava

### 5.3.1.2 Lahovnica

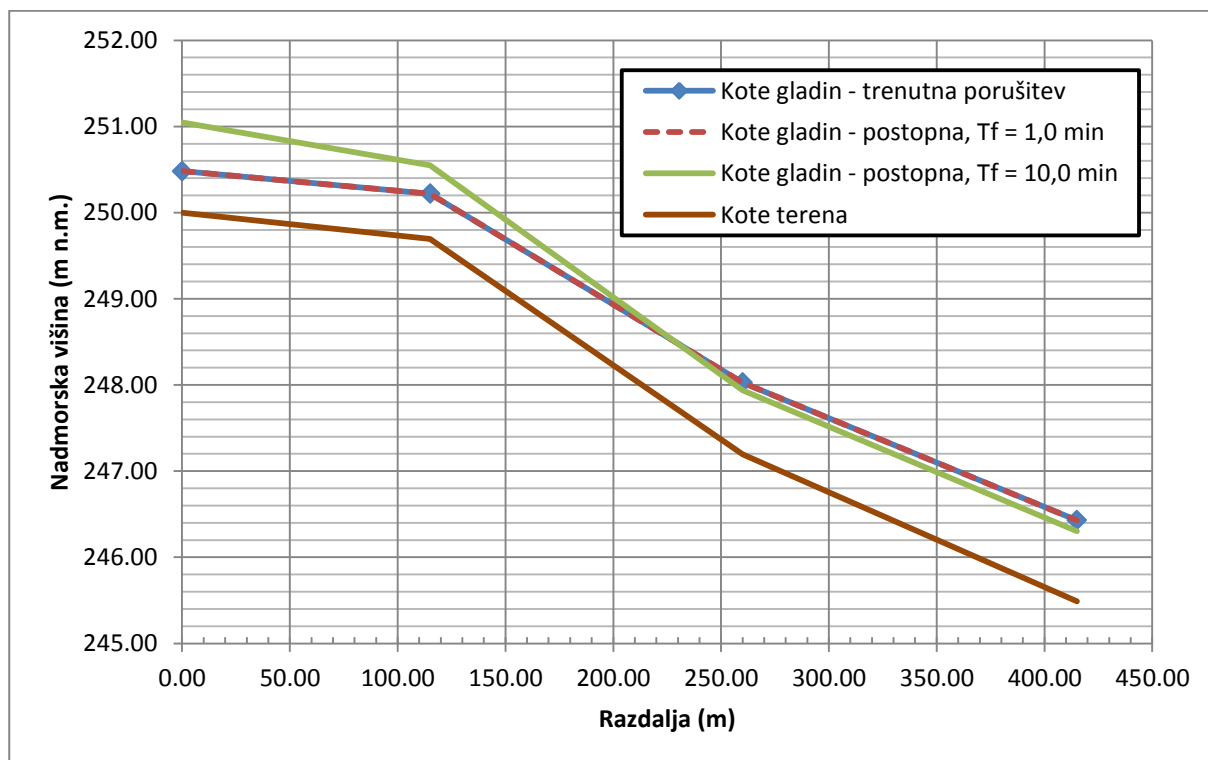
Krivulje največjih pretokov (slika 5-14) padajo relativno enakomerno. Pri trenutni porušitvi je pretok v prvem profilu okrog  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , do zadnjega profila, ki je oddaljen nekaj več kot 400 m, se zmanjša na približno  $65 \text{ m}^3/\text{s}$ . Postopna porušitev s časom rušenja 1 min bi povzročila pretok  $75 \text{ m}^3/\text{s}$  v prvem profilu, do zadnjega profila bi se pretok zmanjšal na približno  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Postopna porušitev s časom rušenja 10 min povzroči najmanjše pretoke, v prvem profilu okrog  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  in v zadnjem okrog  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Na sliki 5-15 so prikazani nivoji gladin, na sliki 5-16 pa globine za vse tri scenarije. Pri tem sta rezultata trenutne porušitve in postopne porušitve s časom rušenja 1 minuto skoraj enaka, razlika je samo v času, ko največje globine nastopijo (slika 5-17). V zadnjem profilu se to zgodi po 3 minutah pri trenutni porušitvi, pri postopni z daljšim časom rušenja pa po približno 14 minutah. Globine se v prvih dveh profilih gibljejo okrog vrednosti 0,50 m in se proti zadnjemu profilu dvigajo do skoraj 1 m. Postopna porušitev z daljšim časom rušenja povzroči malo drugačno sliko, globine so namreč največje v prvem profilu in znašajo okrog 1 m, proti zadnjim profilom pa upadejo malo pod to vrednost.

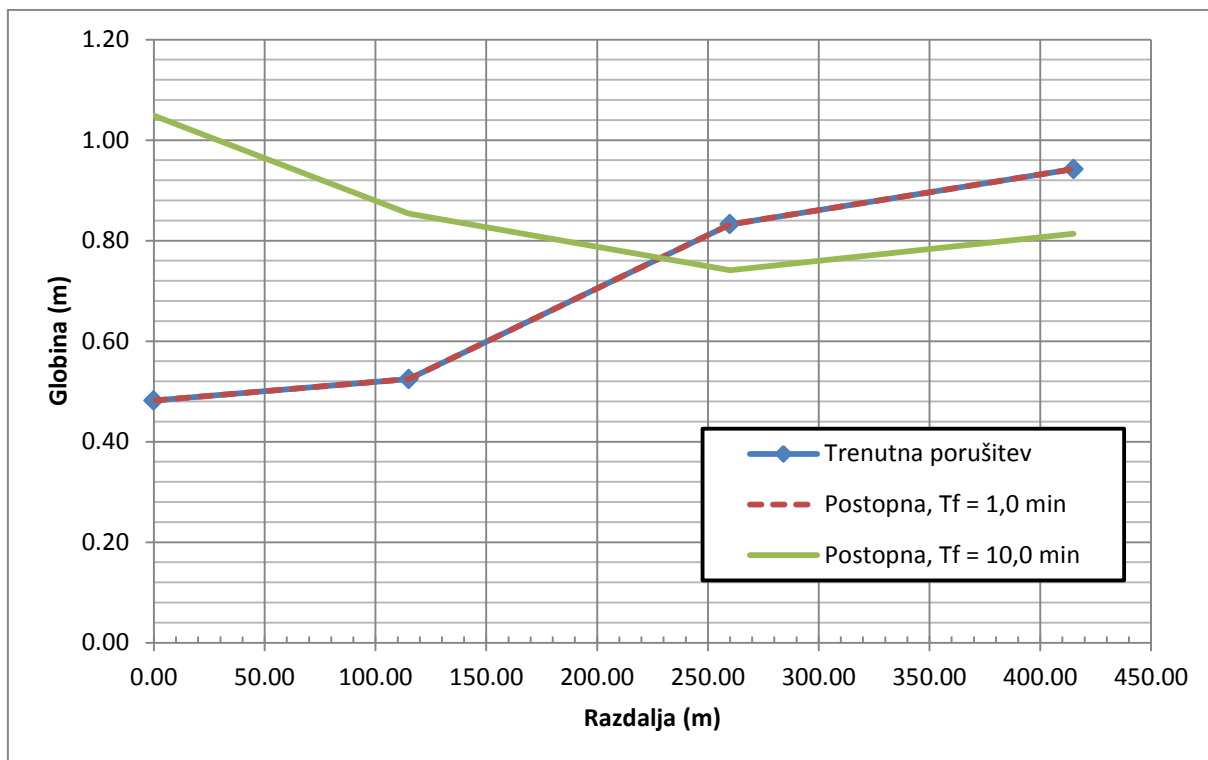
Priloga B.2 prikazuje situacijo z izbranimi prečnimi profili in vrisano poplavljenno območje. Iz nje je razvidno, da je zaradi morebitne porušitve ogrožen del naselja Hudinja, ki leži nad AC.



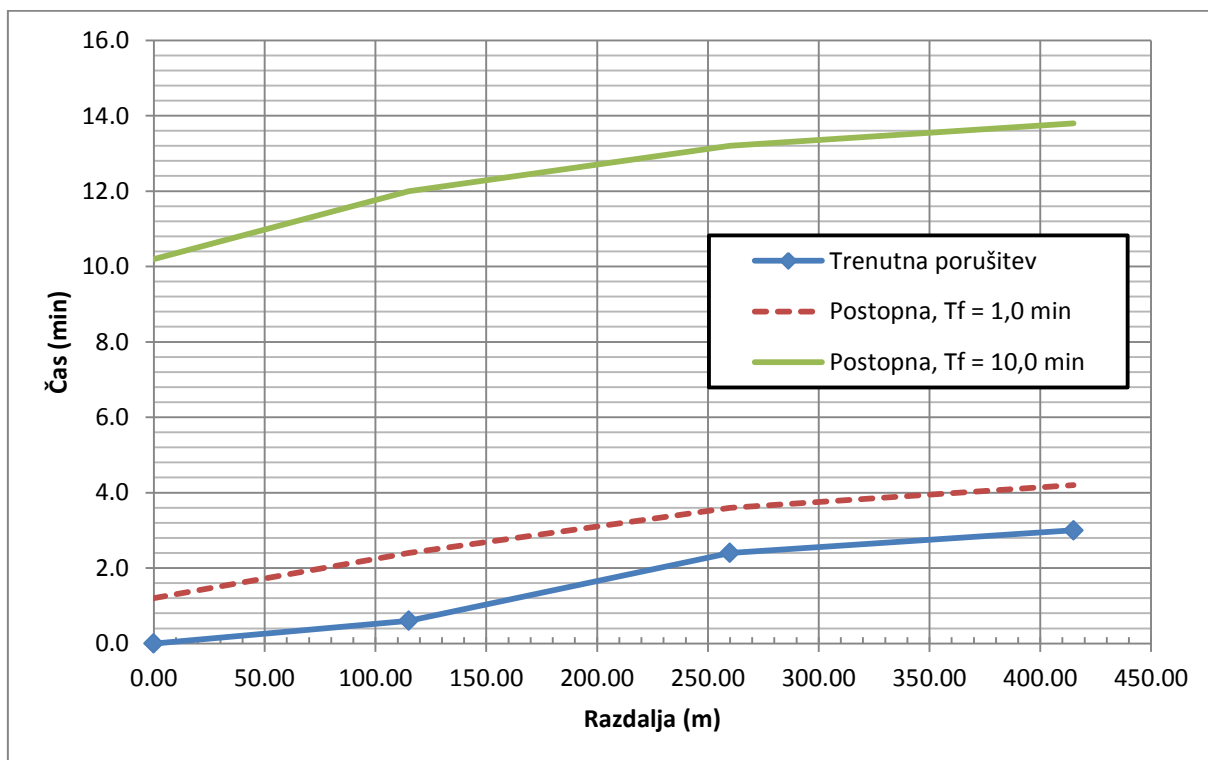
Slika 5-14: Največji pretoki vzdolž podolžnega profila – pregrada Lahovnica



Slika 5-15: Kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila - pregrada Lahovnica



Slika 5-16: Globine vzdolž podolžnega profila - pregrada Lahovnica



Slika 5-17: Časi nastopa največjih pretokov - pregrada Lahovnica

### 5.3.1.3 Loče

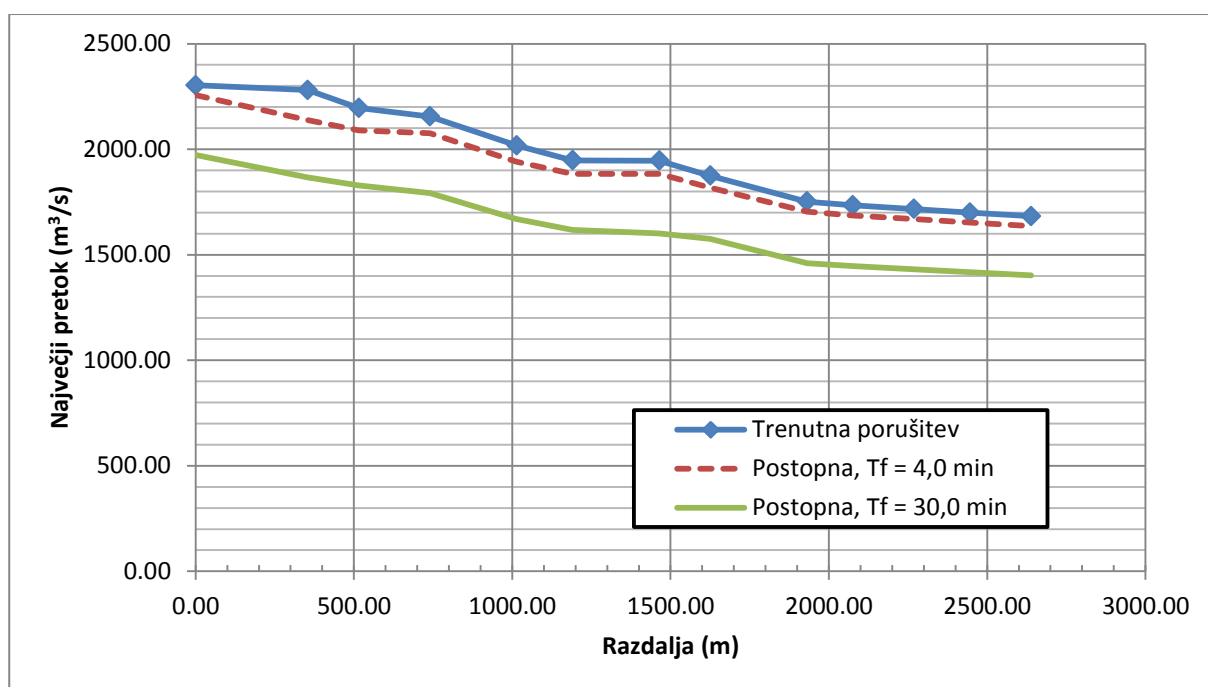
Krivulje največjih pretokov so predstavljene na sliki 5-18. Trenutna porušitev in porušitev s časom rušenja 4 min povzročita pretok velik približno  $2.300 \text{ m}^3/\text{s}$  v prvem profilu, postopna porušitev z daljšim časom rušenja pa malo manj od  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vse tri krivulje padajo relativno enakomerno. Do zadnjega profila se pretok pri trenutni porušitvi zmanjša na nekaj manj kot  $1.700 \text{ m}^3/\text{s}$ , pri postopni s časom rušenja 1 min na nekaj več kot  $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ , pri postopni s podaljšanim časom rušenja pa na približno  $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Kote gladin (slika 5-19) so v prvih profilih pri trenutni porušitvi nižje, od gladin ki jih povzročita postopni porušitvi. V zadnjih petih profilih se nivoji gladin vseh treh scenarijev pokrijejo.

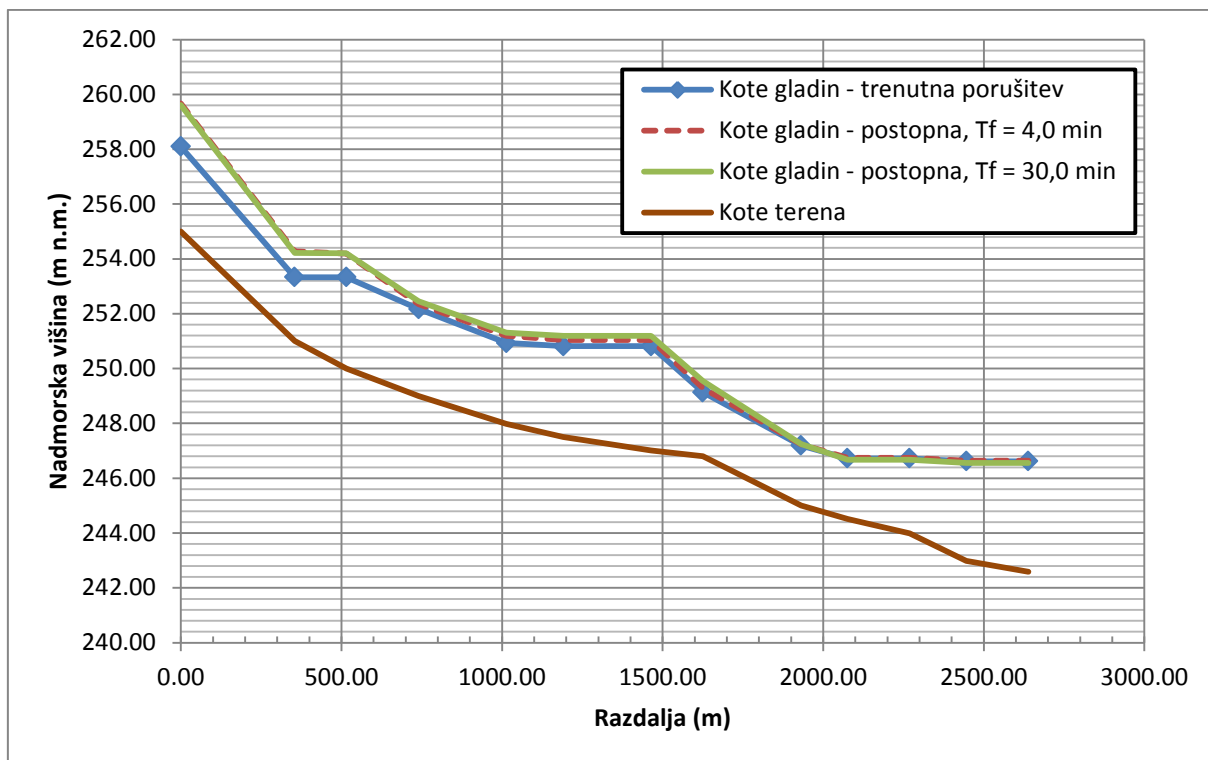
Krivulje globin so prikazane na sliki 5-20. V prvih 1500 m doline se globine trenutne porušitve gibljejo med 2,50 in 4,00 m, postopne pa med 3,00 in 4,50 m. Na odseku od 1500 do 2100 m padejo globine malo pod 2,5 m in se v zadnjih profilih spet dvignejo na 4 m.

V zadnjem profilu bi maksimalni pretok pri trenutni porušitvi nastopil približno 17 minut po začetku rušenja, pri postopni porušitvi s krajšim časom rušenja približno 21 minut in pri postopni porušitvi z daljšim časom rušenja približno 48 minut po začetku rušenja (slika 5-21).

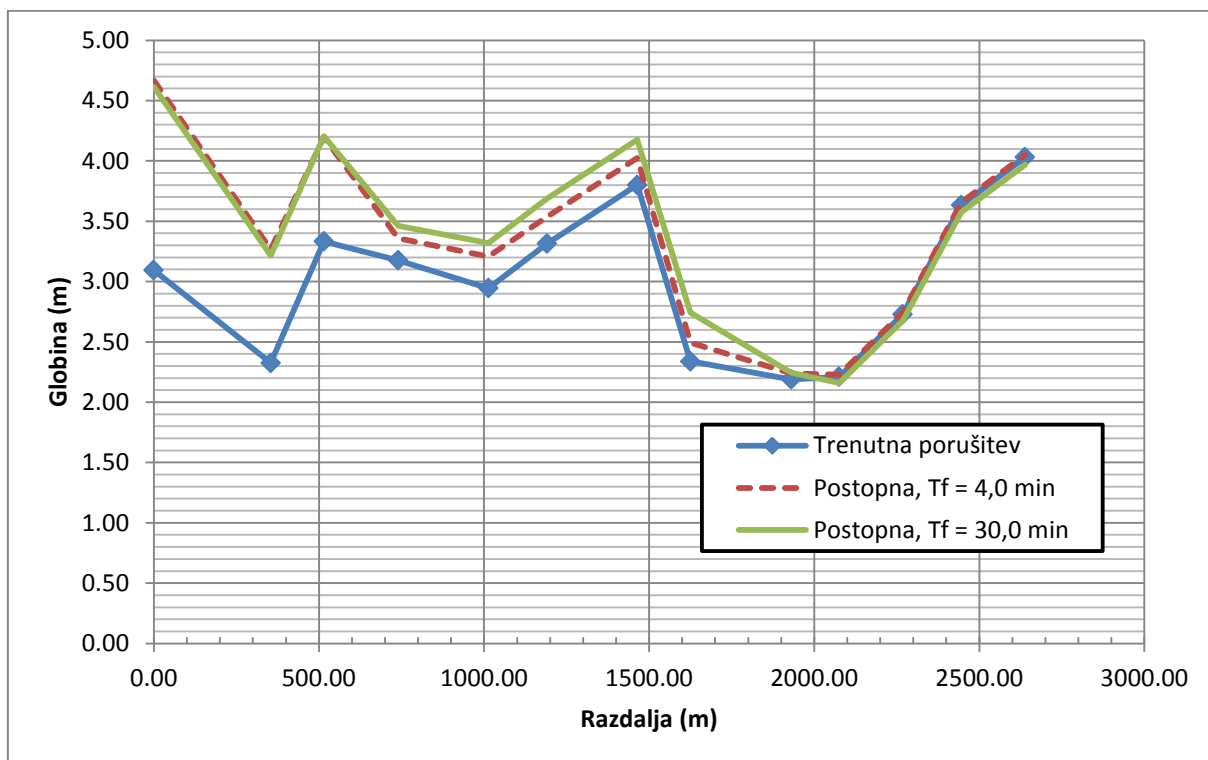
Priloga B.2 prikazuje situacijo z izbranimi prečnimi profili in vrisano poplavljenno območje.



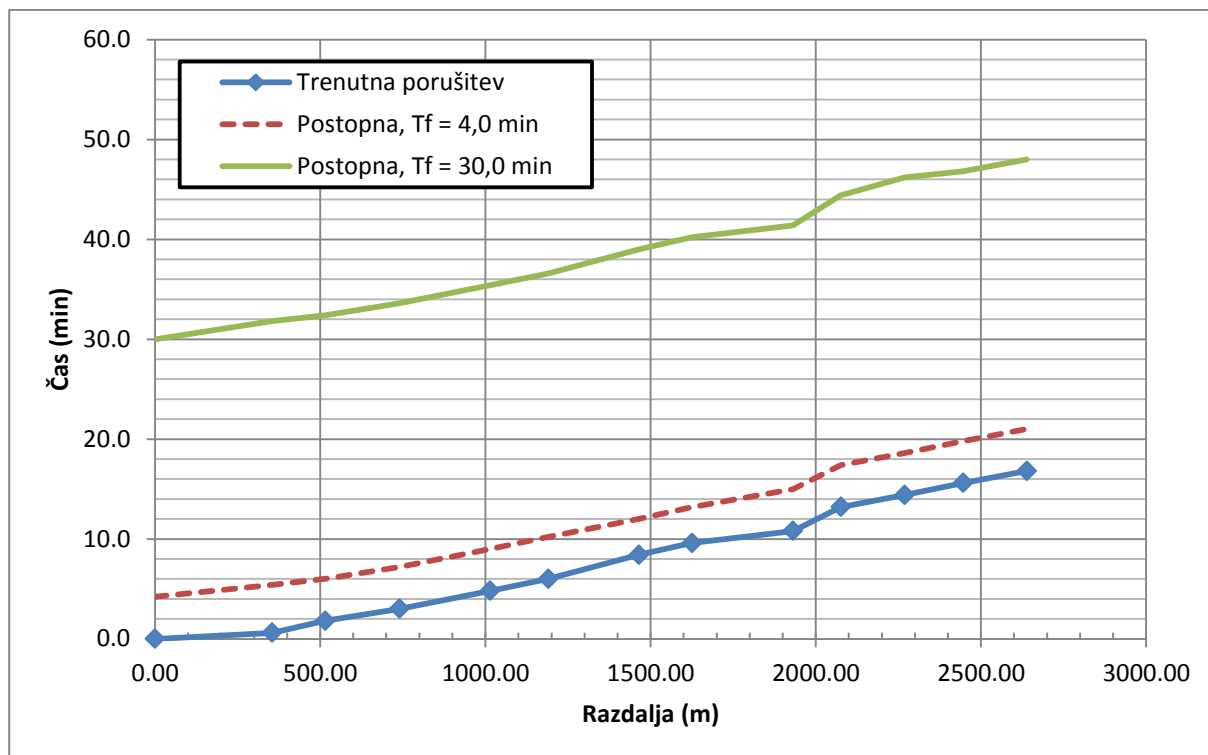
Slika 5-18: Največji pretoki vzdolž podolžnega profila – pregrada Loče



Slika 5-19: Kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila - pregrada Loče



Slika 5-20: Globine vzdolž podolžnega profila - pregrada Loče



Slika 5-21: Časi nastopa največjih pretokov - pregrada Lahovnica

#### 5.3.1.4 Radigaj

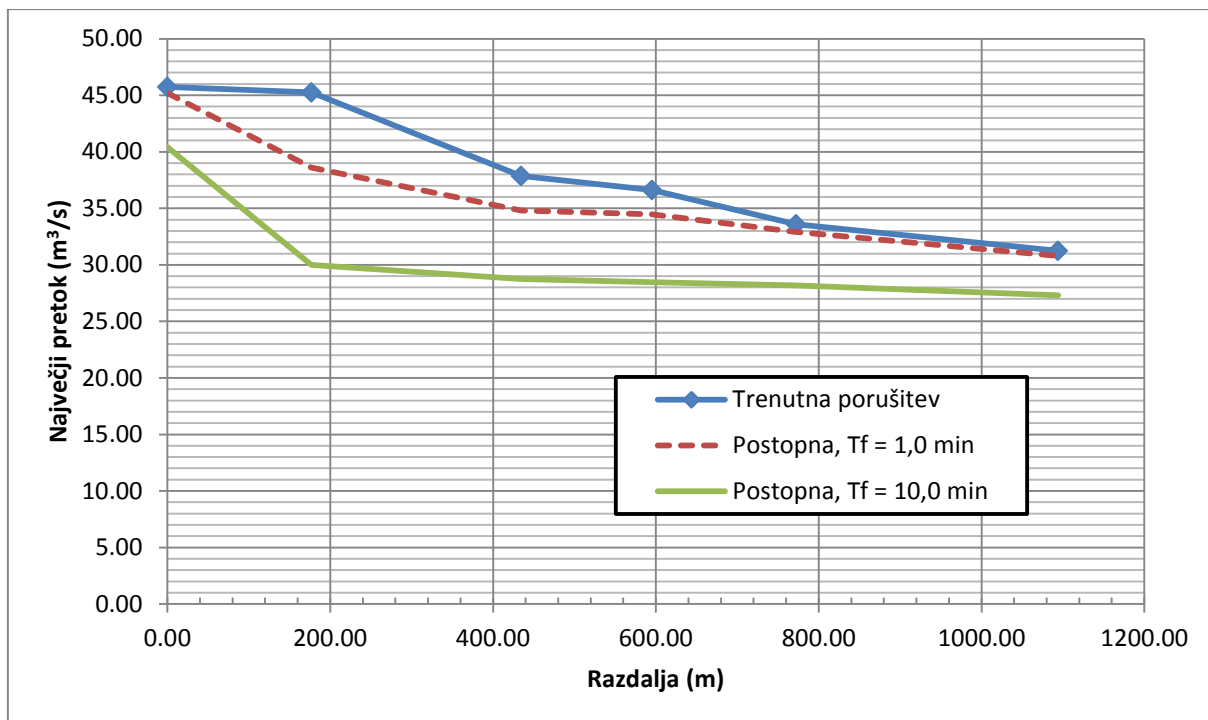
Krivulje največjih pretokov so predstavljene na sliki 5-22. Trenutna porušitev in porušitev s časom rušenja 1 min povzročita pretok velik približno  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  v prvem profilu, postopna z daljšim časom rušenja pa približno  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vse tri krivulje padajo relativno enakomerno. Do zadnjega profila se pretok prvih dveh scenarijev zmanjša na  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , pri postopni porušitvi s podaljšanim časom pa na približno  $27 \text{ m}^3/\text{s}$ .

V prvih treh profilih povzroči trenutna porušitev najnižje kote gladin, največje pa postopna s časom rušenja 10 min (slika 5-23). V zadnjih treh profilih se gladine vseh treh scenarijev pokrijejo.

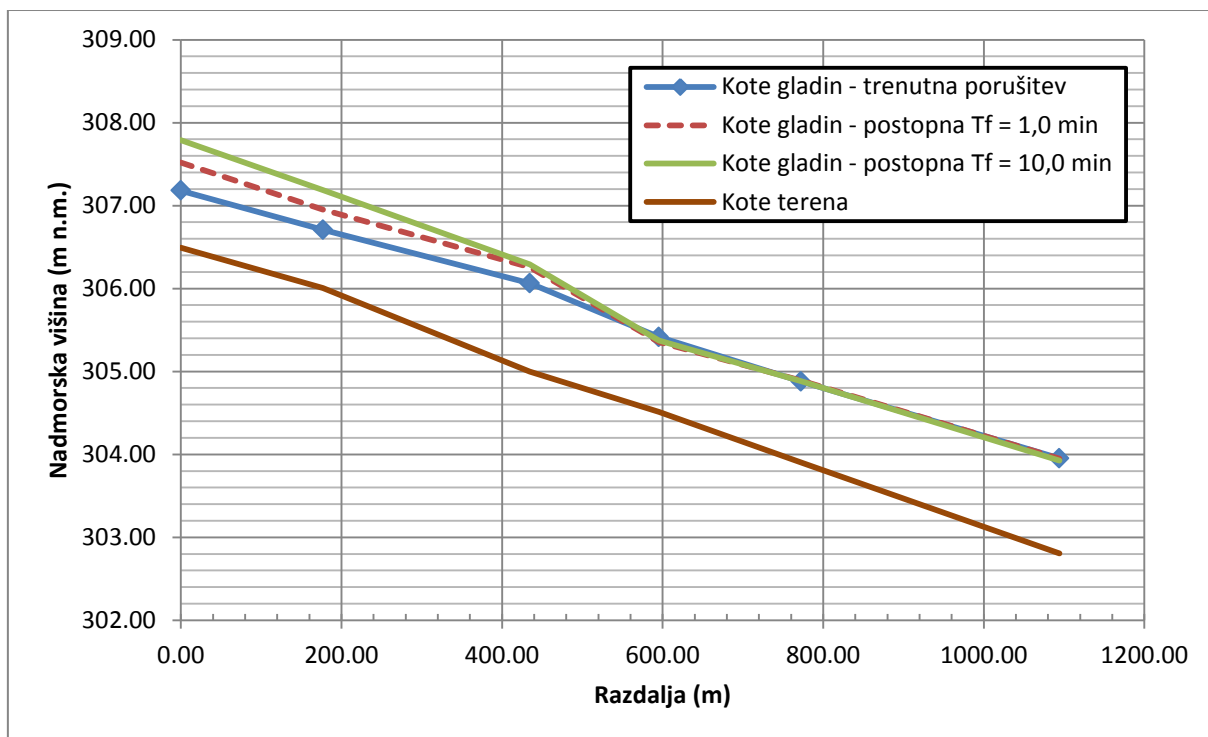
Potek globin je prikazan na sliki 5-24. V zgornjem delu nihajo med 0,70 m in 1,10 m pri trenutni porušitvi in med 0,80 m in 1,30 m pri obeh scenarijih s postopnim rušenjem. Na razdalji zadnjih treh profilov se globine vseh treh scenarijev enakomerno povečujejo in na koncu dosežejo globino nekaj manj kot 1,20 m.

V zadnjem profilu bi maksimalni pretok nastopil po nekaj več kot 15 min pri trenutni in postopni porušitvi s krajšim časom rušenja, pri postopni porušitvi z daljšim časom rušenja pa po nekaj manj kot 30 min (slika 5-25).

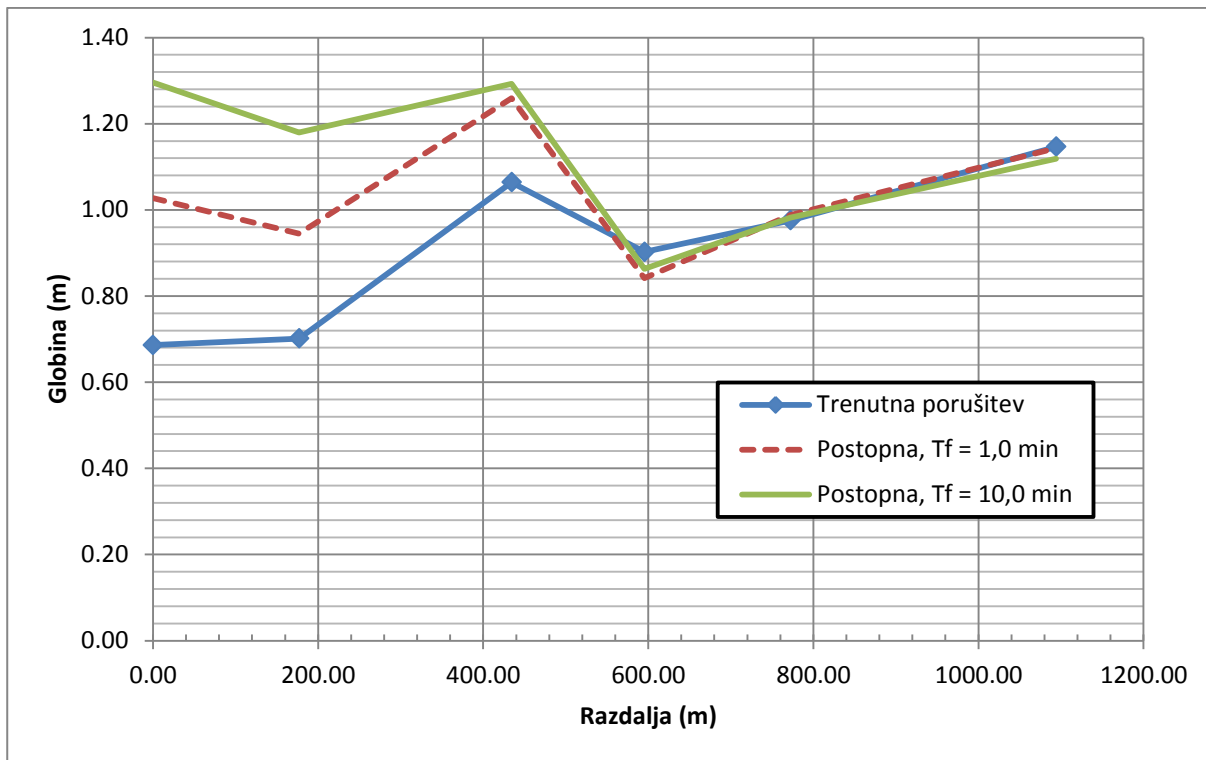
V prilogi B.4 je na situacijo vrisano poplavljeno območje. Poplavljene so večinoma kmetijske površine in travniki. Med petim in šestim profilom voda doseže tudi nekaj poslopij v vasi Braslovče.



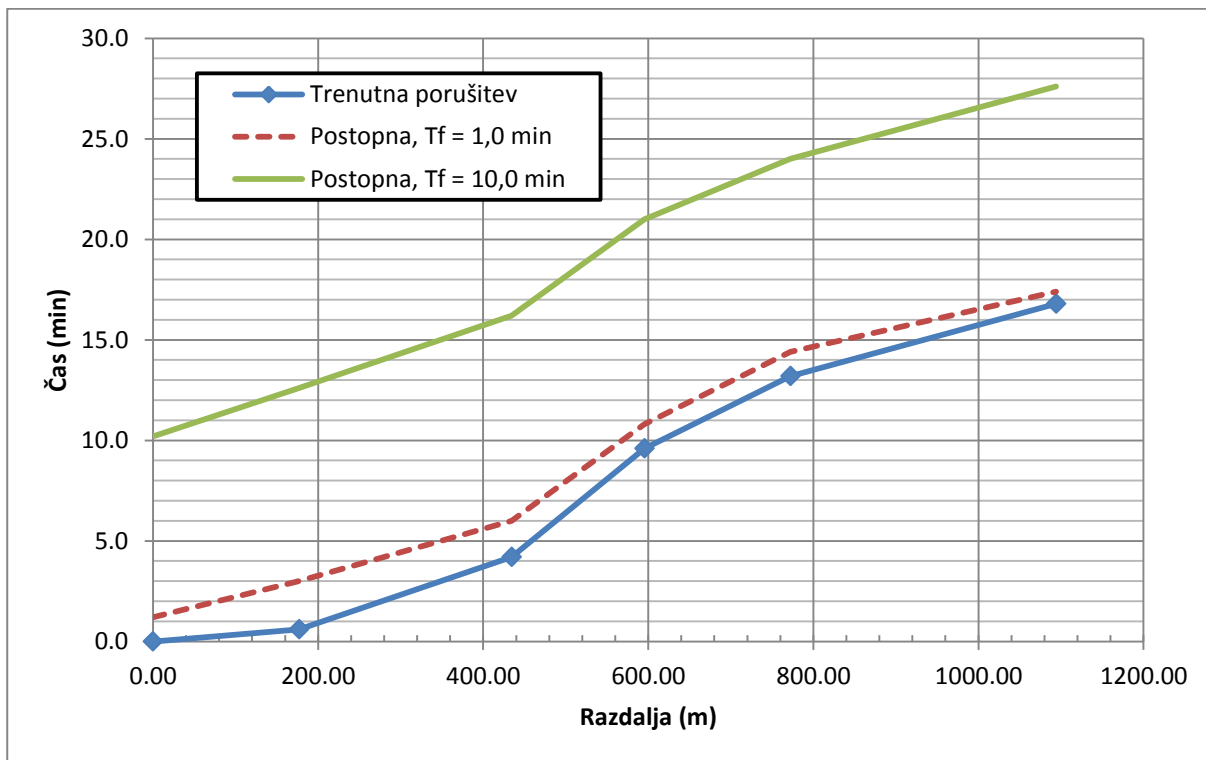
Slika 5-22: Največji pretoki vzdolž podolžnega profila - pregrada Radigaj



Slika 5-23: Kote najvišjih gladin vzdolž podolžnega profila - pregrada Radigaj



Slika 5-24: Globine vzdolž podolžnega profila - pregrada Radigaj



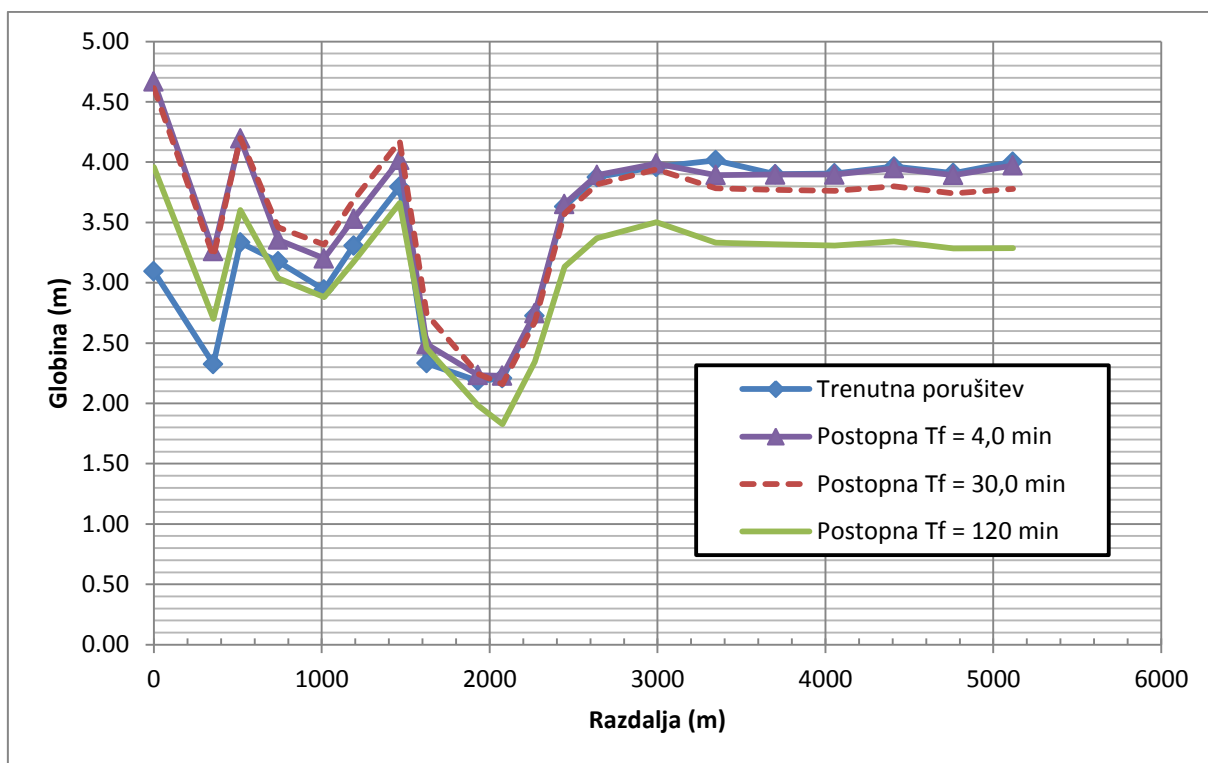
Slika 5-25: Časi nastopa največjih pretokov - pregrada Lahovnica



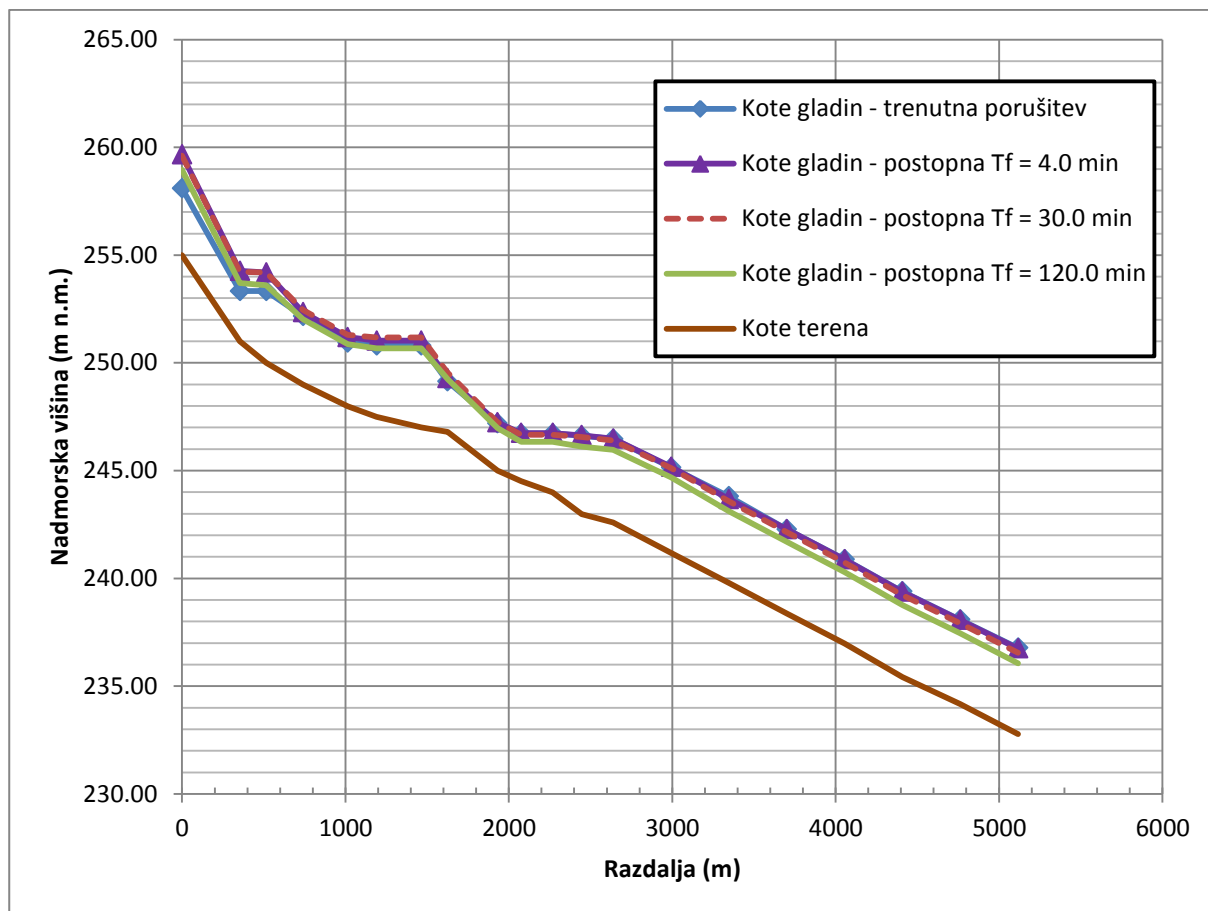
### 5.3.2 Podaljšanje dolvodnega območja na primeru pregrade Loče

Da bi preverili, zakaj so kote gladin pri trenutni porušitvi nižje kot pri postopni, smo pri pregradi Loče podaljšali dolvodno področje. Zadnji profil smo ponovili na vsake 350 m do razdalje približno 5 km. Pri tem smo upoštevali enakomeren padec struge, enak padcu med zadnjima dvema profiloma. Dodali smo še scenarij porušitve s časom rušenja 120 minut.

Globine vzdolž podolžnega profila so prikazane na sliki 5-26, na sliki 5-27 pa so prikazane kote največjih gladin. Iz rezultatov je razvidno, da se nekje po razdalji 3000 m trend obrne in postanejo globine scenarija trenutne porušitve večje od globin pri postopni porušitvi. Razlika je še očitnejša, če primerjamo rezultate trenutne porušitve z rezultati močno podaljšanega časa rušenja. Zanimivo je tudi, da v prvih profilih pod pregrado primer s časom rušenja 120 minut povzroči nižje kote gladin kot porušitev s časom rušenja 30 minut. Kljub temu pa so te kote še vedno višje kot pri trenutni porušitvi.



Slika 5-26: Globine vzdolž podaljšanega podolžnega profila - pregrada Trnava



**Slika 5-27: Kote največjih gladin vzdolž podaljšanega podolžnega profila - pregrada Trnava**

Ti dopolnilni računi predstavljajo dodatno potrditev, da je poenostavljen program SMPDBK pri izračunanih kotah gladin v področju pod pregrado premalo natančen, da pa so rezultati boljši v večji oddaljenosti od pregrade. Program za izračun globine uporablja Manningovo enačbo za stalni tok (enačba 3.9), kar pomeni, da bi premajhne globine lahko bile posledica nastopa deročega toka v profilih na odseku pod pregrado.

Na primeru pregrade Loče smo zato izvedli ročni izračun kritičnih razmer v prvem dolvodnem profilu. Pri tem smo upoštevali največji pretok in globino, ki jo je program izračunal pri trenutni porušitvi. Dobili smo vrednost Froudovega števila večjo od ena ( $Fr = 2,53 > 1,0$ ), kar potrjuje, da je tok na tem mestu v deročem režimu. S tem tudi lahko razložimo obrat trenda globin, ki smo ga dobili s podaljšanjem dolvodnega območja, kjer tok večinoma postane miren in se kote gladin trenutne porušitve dvignejo na kote gladin postopne porušitve. Po dovolj dolgi razdalji kinetična energija toka upade pod kritično mejo. Po tej točki se kote gladin trenutne porušitvi dvignejo nad kote gladin postopne porušitve.

### 5.3.3 Sklepne ugotovitve

Na podlagi rezultatov vidimo, da so pri poružitvah vseh štirih pregrad ogrožena dolvodna naselja. Ker smo uporabili poenostavljene metode, vemo, da rezultati niso dovolj natančni, da bi lahko na njihovi osnovi izdelali načrte ukrepanja in reševanja v primeru poplave. Za to bi bili potrebni kompleksnejši in natančnejši izračuni.

Iz dobljenih rezultatov je takoj razvidno, da pri oceni ogroženosti veliko vlogo igra scenarij rušenja. V primeru postopne porušitve pregrade je namreč čas nastopa poplave veliko daljši kot v primeru trenutne porušitve, kar pomeni, da imamo na voljo več časa za izvedbo zaščitnih ukrepov. Trenutna porušitev tudi povzroči večje pretoke in s tem večje hitrosti, kar prav tako predstavlja večjo nevarnost za dolvodno območje.

Problem predstavljajo prenizke kote gladin v prvih nekaj profilih dolvodno pri trenutni oziroma hitri postopni poružitvi. Tudi v primerjavi računov pregrad Loče in Trnava s poročili poružitve, pri katerih so bile uporabljene polne Saint Venantove enačbe, so rezultati poenostavljenega programa SMPDBK dali precej nižje kote gladin kot bi jih pričakovali oziroma so jih pokazali računi s polnimi Saint Venantovimi enačbami v območju pod pregrado. Razliko gre pripisati premajhni točnosti programa SMPDBK, ki jo zaradi poenostavljene metode izračuna posebej izrazito v področju pod pregrado, kjer imajo XXX vztrajnostni členi v dinamični enačbi še posebej veliko vlogo.

## 6 .ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo izvedli analizo posledic porušitve štirih vodnogospodarskih pregrad na povodju Savinja-Sotla. Analizo smo izvedli z uporaba poenostavljenega matematičnega modela SMPDBK. Hkrati smo na primeru pregrade Trnava in Loče ocenili primernost poenostavljenih metod za preliminarne ocene posledic.

Iz primerjave dobljenih rezultatov z že obstoječimi izračuni smo ugotovili, da je model SMPDBK primeren za približno oceno hidravličnih posledic porušitev. Zaradi poenostavitev ima program tudi določene omejitve. Predviden je za relativno pravilne geometrije doline, kjer veljajo predpostavke za 1D model toka. Ker uporabniku ne omogoča izbire spodnjega robnega pogoje, ne zna upoštevati zavezitev zaradi morebitnih dolvodnih pregrad ali mostov. Ta omejitev se je lepo pokazala v primerjavi z izračuni za pregrado Loče, kjer so gladine v zadnjih profilih pred nasipom avtoceste občutno prenizke.

Prednost poenostavljenega modela pa se je pokazala v tem, da smo lahko grobe ocene ogroženosti določili že z minimalnimi podatki kot so osnovne karakteristike pregrade in akumulacije ter podatki o geometriji doline, pridobljeni iz temeljnega topografskega načrta. S tem se tudi pokaže smiselnost uporabe takšnega modela v zgodnjih fazah projektov, saj takrat še nimamo na voljo natančnih podatkov, izračuni pa lahko izvedemo hitro in z malo stroškov.

Za dolvodna območja vseh štirih pregrad smo ugotovili ogroženost nekaterih naselji. Obseg poplavljenih površin smo tudi vrisali na topografski načrt. V primeru pregrad Trnava, Loče in Lahovnica so rezultati v zadnjih profilih vprašljivi, saj na koncu doline naletimo na oviro v obliki avtocestnega nasipa. Na tem mestu bi bilo smiselno izvesti še informativen izračun pretočne sposobnosti prepusta pod AC, ki ga zaradi podatkovnih omejitev nismo izvedli. V primeru, da prepust ovira prost iztok, bi bile gladine v zadnjih profilih še višje.

Pri vseh primerih so se pojavile tudi težave z globinami v prvih nekaj profilih pod pregrado. Na tem mestu primerjava z izračuni s polnimi Saint Venantovimi enačbami pokaže, da gladine morale biti višje od izračunanih s poenostavljenim modelom SMPDBK. Problem predstavlja tudi dejstvo, da so izračunane kote gladin na daljšem odseku pod pregrado nižje pri trenutni porušitvi v primerjavi s kotami gladin pri postopni porušitvi. Izkazalo se je, da je razlog za prenizke globine poenostavitve programa SMPDBK, da za račun globin uporabi enačbo za stalni tok in s tem seveda tudi zanemari vztrajnostne člene. Če se tik pod pregrado lokalno pojavi deroči tok v posameznem profilu, ga program SMPDBK zaradi povprečenih profilov upošteva na predolgem odseku. V primeru postopnih

porušitev so rezultati globin zato bolj realni, pri trenutni in hipni postopni porušitvi pa je pri analizi potrebno upoštevati ugotovljeno dejstvo in se zavedati negotovosti izračunanih gladin pod pregrado.

Program je napisan v programskem jeziku FORTRAN, od leta 2009 pa je na voljo tudi grafični vmesnik, izdelan v Javi. Navkljub enostavnosti uporabe ima program nekaj uporabniških slabosti. Največ nerodnosti je povzročala predvsem transformacija sistema merskih enot, saj enačbe modela temeljijo na ameriškem (imperialnem) merskem sistemu. V prihodnje bi bilo smiselno v program integrirati možnosti za pretvarjanje parametrov iz metrične oblike v imperialno in obratno. S tem bi bilo prihranjenega še nekaj časa pri izvajanju računov, kar bi pomenilo še boljšo uporabnostno izkušnjo.

**VIRI**

Agencija RS za okolje, 2013. Atlas okolja. <http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/> (Pridobljeno 30.10.2013)

Brenčič, M. 2001. Hidravlični problemi nasute zemeljske pregrade. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Brenčič): 49 f.

Costa, J.E. 1985. Floods from Dam Failures. U.S. Geological Survey, Report 85-560: 54 str.

DELO. 2013. Kako varne so vodne pregrade v Sloveniji: Delo (21. feb. 2013), 55, 43: str. 17.

Četina, M. 1995. Hidravlični izračuni valov vsled porušitve pregrad. V: Krupenko, A (ur.). in Zadnik B. (ur.). 2. Posvetovanje Slovenski nacionalni komite za velike pregrade – SLOCOLD, Ljubljana, Slovenija, april 1995. Ljubljana, SLOCOLD: str. 9-14.

Fread, D.L. 1980. DAMBRK: The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model. Office of Hydrology, National Weather Service (NWS), Silver Spring, Maryland: 56 str.

Pregrada Lahovnica. 2012. Delovno poročilo projekta VODPREG. Ljubljana, IBE, 27. november 2012: 8 str.

Pregrada Loče. 2012. Delovno poročilo projekta VODPREG. Ljubljana, IBE, 16. december 2012: 11 str.

Pregrada Radigaj. 2012. Delovno poročilo projekta VODPREG. Ljubljana, IBE, 27. november 2012: 9 str.

Pregrada Trnava. 2012. Delovno poročilo projekta VODPREG. Ljubljana, IBE, 27. november 2012: 13 str.

KSL Utah. 2012. High-hazard dam deemed safe 5 months before rupture. Spletna stran: [http://www.ksl.com/index.php?sid=22121718&nid=148&title=high-hazard-dam-deemed-safe-5-months-before-rupture&goback=%2Egde\\_3806641\\_member\\_163356722](http://www.ksl.com/index.php?sid=22121718&nid=148&title=high-hazard-dam-deemed-safe-5-months-before-rupture&goback=%2Egde_3806641_member_163356722) (pridobljeno 20.9.2012)

Rajar, R. 1973. Modèle mathématique et abaqes sans dimensions pour la détermination de l'écoulement qui suit la rupture d'un barrage. IX Congres CIGB, Madrid, 1973: str. 503-521.

Rajar, R. 1978. Mathematical Simulation of Dam-Break Flow. Journal of The Hydraulics Division, HY7: str. 1011-1026.

Rajar, R. 1979 Račun vala, ki bi nastal pri porušitvi pregrade Loče. Poročilo. Ljubljana, LMTe, april 1979: 11 str..

Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 279str.

Rajar, R. 2012. Analiza stanja pregrad. Fazno poročilo. Ljubljana, VODPREG, 12. nov. 2012: 9 str.

Rajar, R., Verbovšek, V. 1975. Približni preračun vala, ki bi nastal pri porušitvi pregrade Trnava. Poročilo PR.70 C/74. Ljubljana, julij 1975: 11 str..

Rajar, R., Zakrajšek, M. 1993. Modeliranje poplavnega vala pri prelivanju plazu na Lučnici. UJMA 7: str. 77-80.

Sylvester, A.G. 2005. Teton Dam Failure. spletna stran:

[http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton\\_Dam/welcome\\_dam.html](http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton_Dam/welcome_dam.html) (pridobljeno 5.10.2013)

Širca, A., Četina, M. 2010. Porušitve pregrad. Slovenski vodar 21-22: str. 18-26.

Wetmore, J.N., Fread, D.L. 1991. The NWS Simplified Dam-Break Flood Forecasting Model. Office of Hydrology, National Weather Service (NWS), Silver Spring, Maryland: 46 str.

»Ta stran je namenoma prazna«



## **SEZNAM PRILOG**

### **PRILOGA A: BREZDIMENZIJSKE PROPAGACIJSKE KRIVULJE V SMPDBK**

Priloga A.1: Družine brezdimenzijskih propagacijskih krivulj

Priloga A.2: Uporaba brezdimenzijskih propagacijskih krivulj

### **PRILOGA B: SITUACIJA PREGRAD Z VRISANIM POPLAVLJENIM OBMOČJEM**

Priloga B.1: Situacija – pregrada Trnava

Priloga B.2: Situacija – pregrada Lahovnica

Priloga B.3: Situacija – pregrada Loče

Priloga B.4: Situacija – pregrada Radigaj

### **PRILOGA C: PREČNI PROFILI**

Priloga C.1: Prečni profili – pregrada Trnava

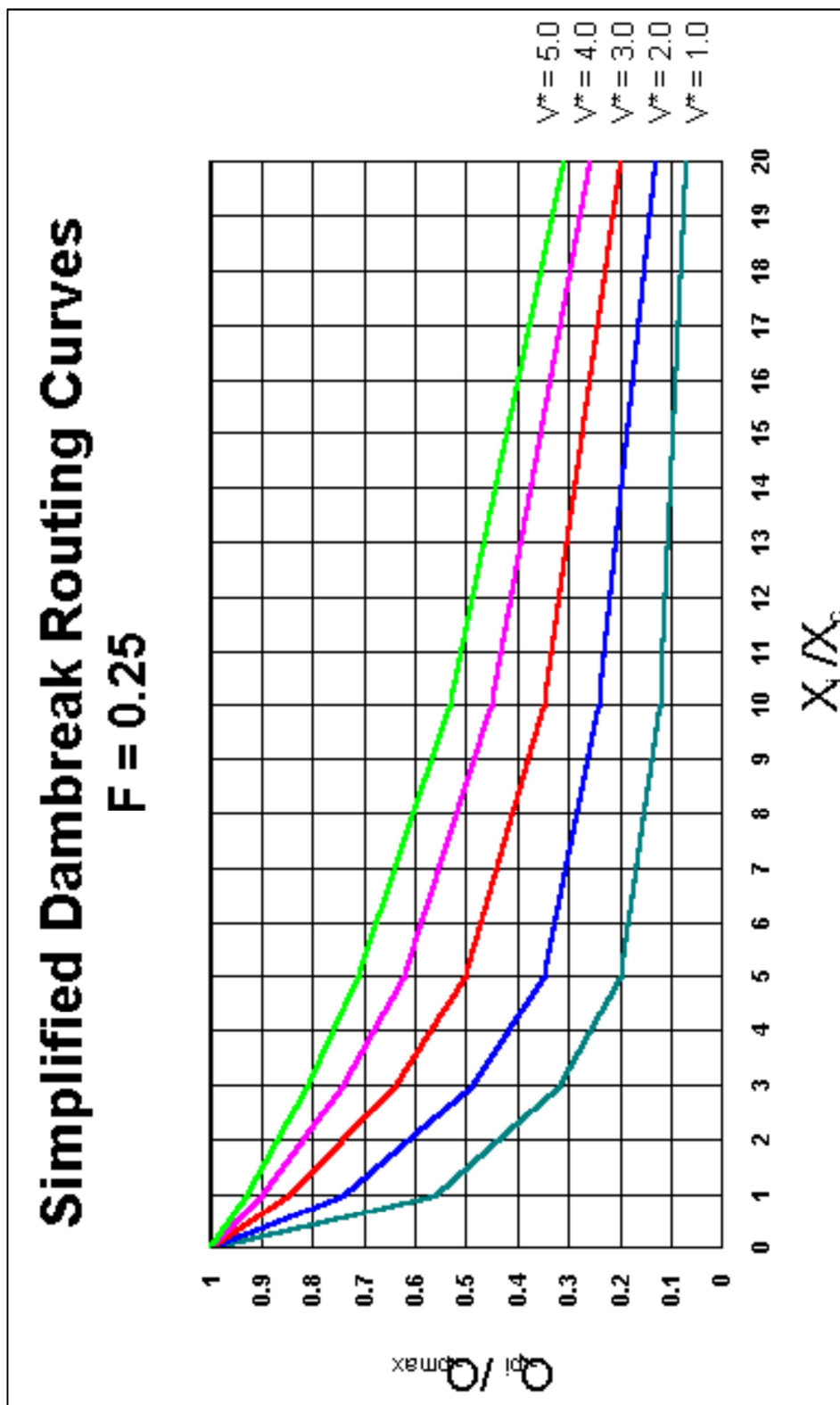
Priloga C.2: Prečni profili – pregrada Lahovnica

Priloga C.3: Prečni profili – pregrada Loče

Priloga C.4: Prečni profili – pregrada Radigaj

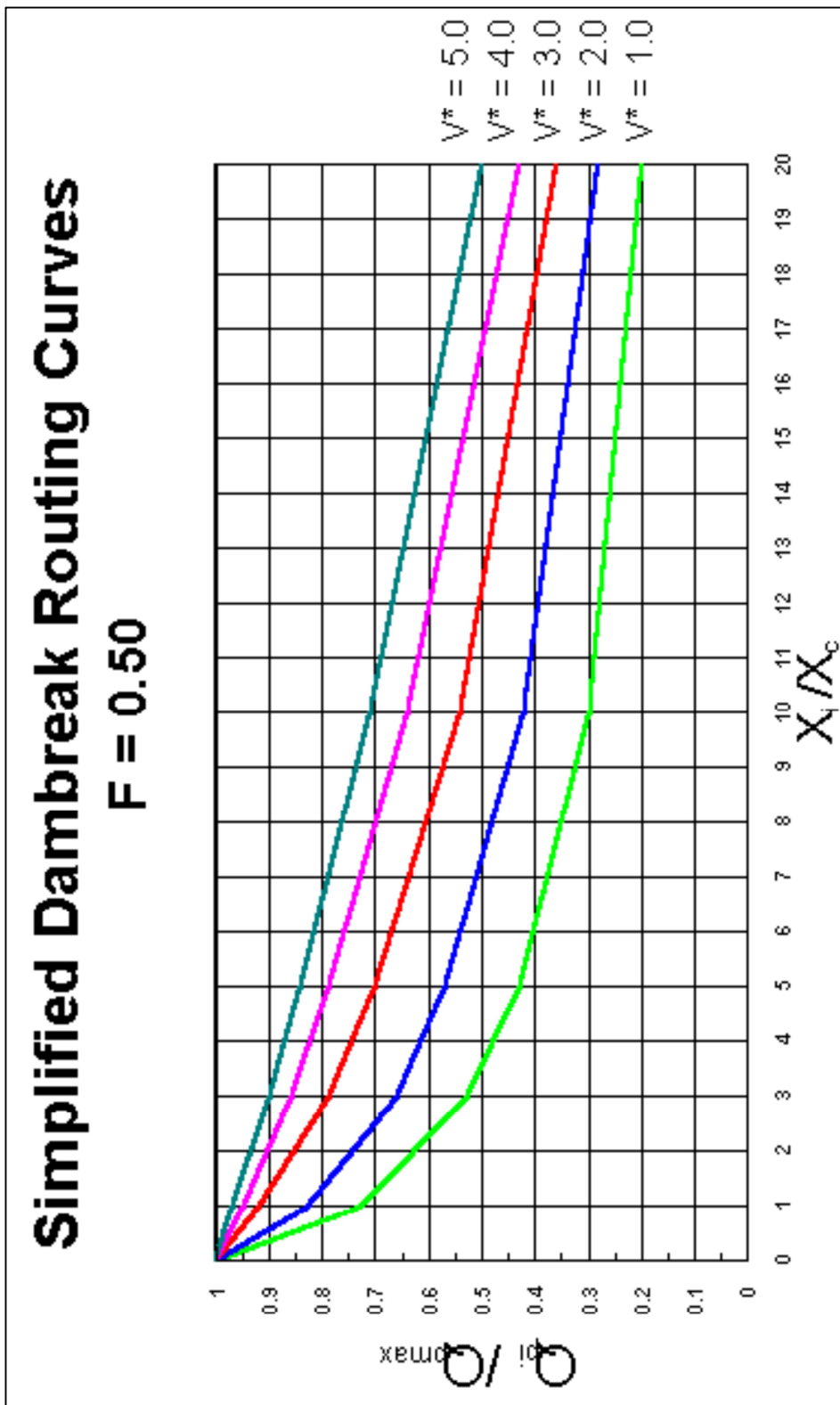
»Ta stran je namenoma prazna«

a) Družina SMPDBK krivulj z Froudom številom  $Fr = 0,25$ .



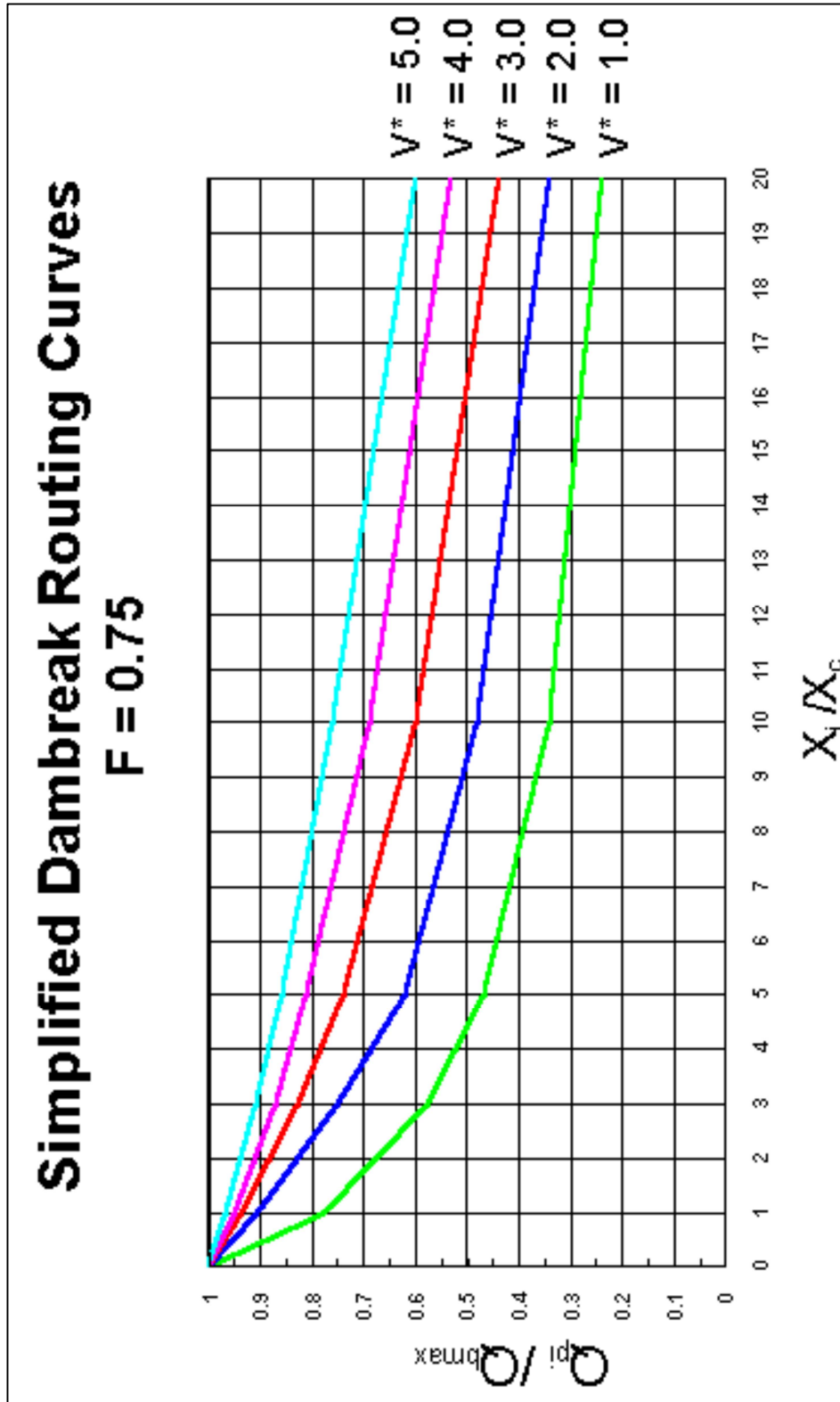
Slika 1: Družina SMPDBK krivulj z Froudom številom  $Fr = 0,25$  (Wetmore in Fread, 1991).

b) Družina krivulj z Froudom številom  $Fr = 0,50$ .



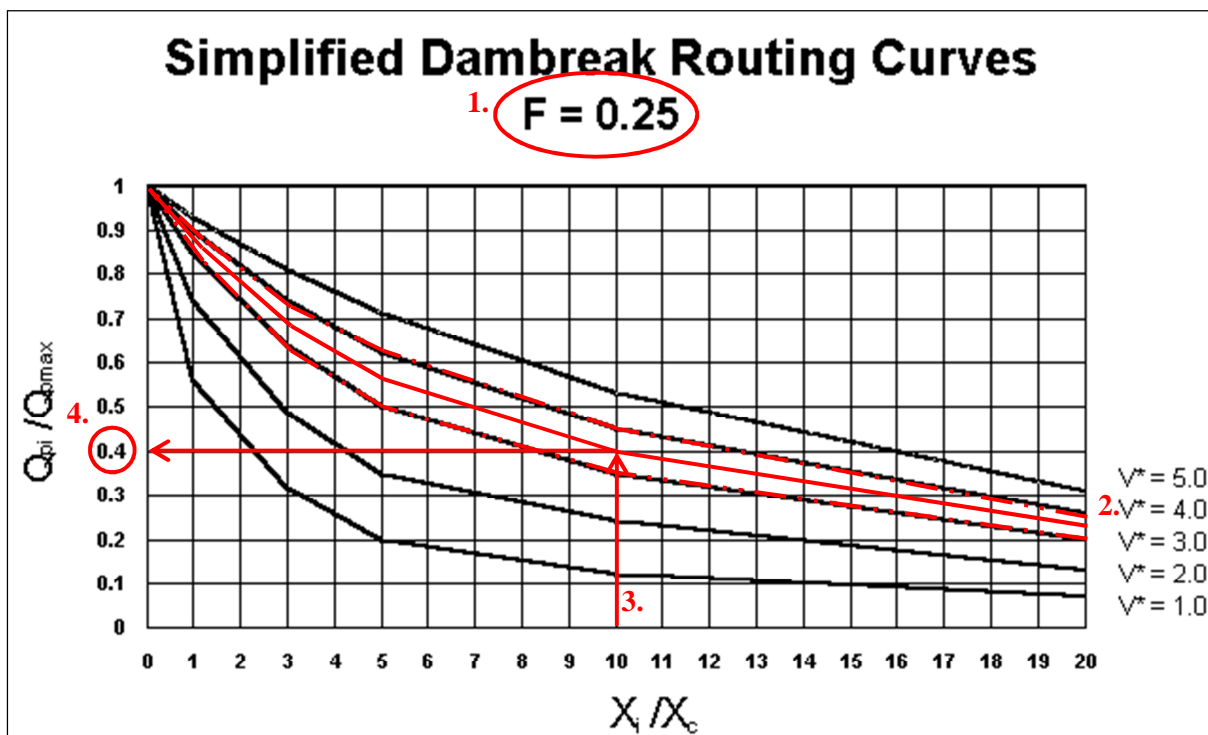
Slika 2: Družina SMPDBK krivulj z Froudom številom  $Fr = 0,50$  (Wetmore in Fread, 1991)

c) Družina krivulj z Froudom številom  $Fr = 0,75$ .



Slika 3: Družina SMPDBK krivulj z Froudom številom  $Fr = 0,75$  (Wetmore in Fread, 1991)

Prikaz določitve pretoka s pomočjo brezdimenzijskih propagacijskih krivulj.



Slika 1: Primer družine brezdimenzijskih propagacijskih krivulj (Wetmore in Fread, 1991).

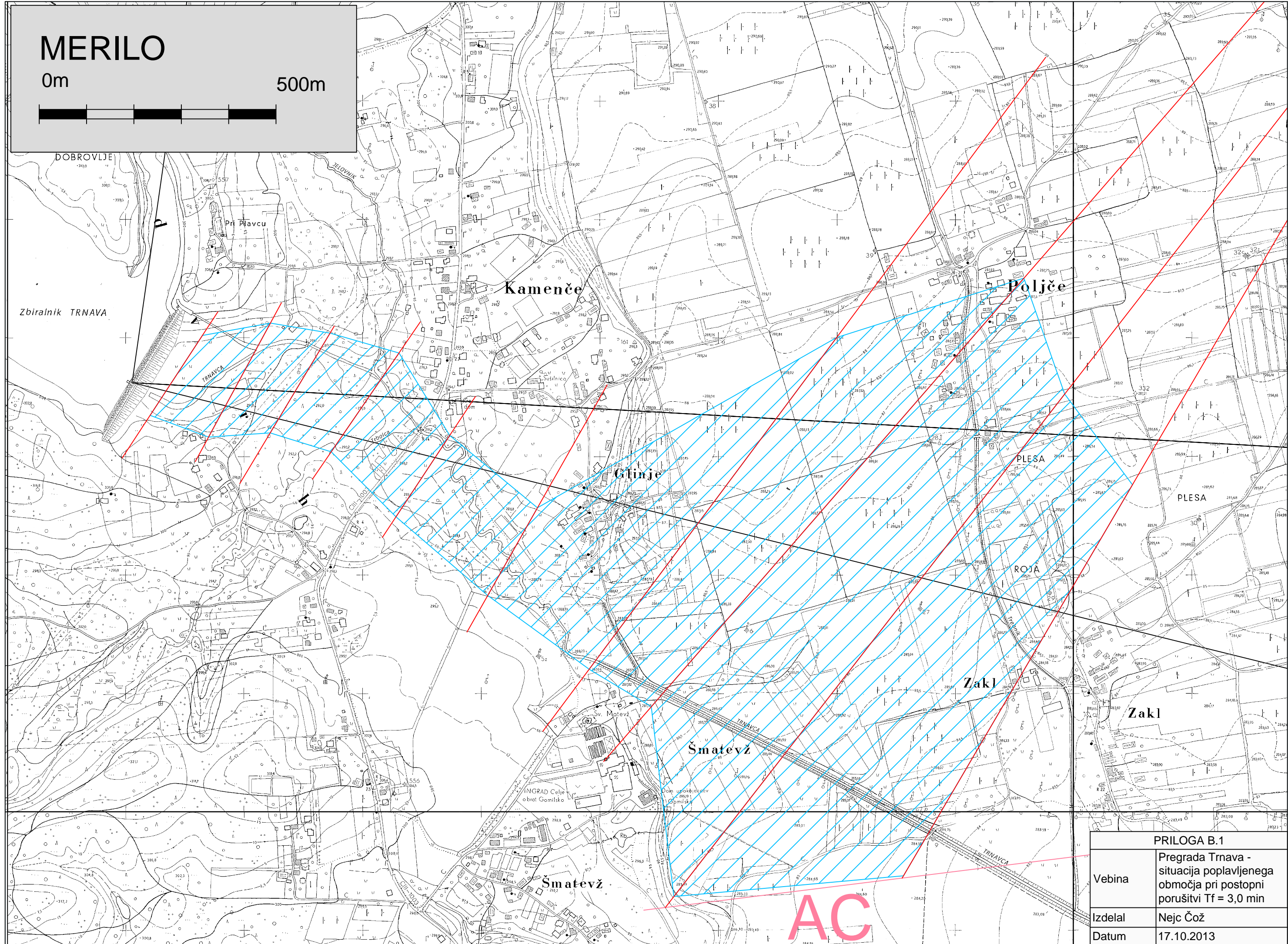
Za prikaz uporabimo fiktivni primer, pri katerem predpostavimo, da smo predhodno izračunali vse potrebne parametre:

1.  $Fr = 0,25$  ... izberem družino krivulj z ustreznim Froudovim številom;
2.  $V^* = 3,5$  ... interpolacija glede na izračunani brezdimenzijski volumen  $V^*$ , ki je razmerje volumna akumulacije z povprečnim volumnom vode na računanim odseku;
3. ... vrednost razmerja med razdaljo do računanega profila in vrednostjo karakterističnega parametra razdalje;
4. Odčitamo vrednost:  $Q^* = Q_{pi}/Q_{pmax} = 0,4$ ;
5. Vrednost maksimalnega pretoka v računanim profilu je  $Q_{pi} = 0,4 \cdot Q_{pmax}$

# MERILO

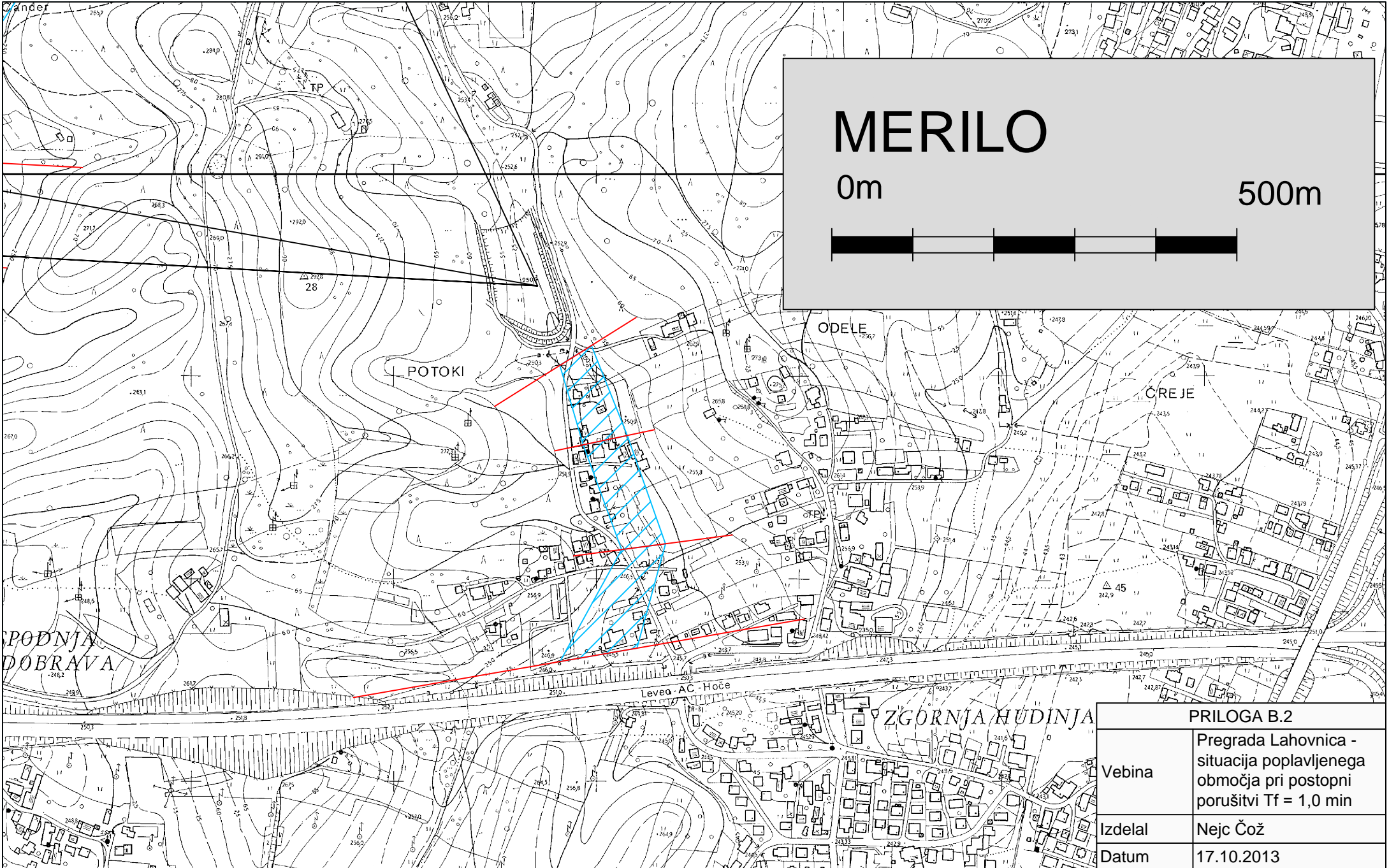
0m

500m



## PRILOGA B.1

Vebina	Pregrada Trnava - situacija poplavljenega območja pri postopni porušitvi $T_f = 3,0$ min
Izdelal	Nejc Čož
Datum	17.10.2013



# MERILO

0m

500m



PODNIJA DOBRAVA

POTOKI

ODELE

ČREJE

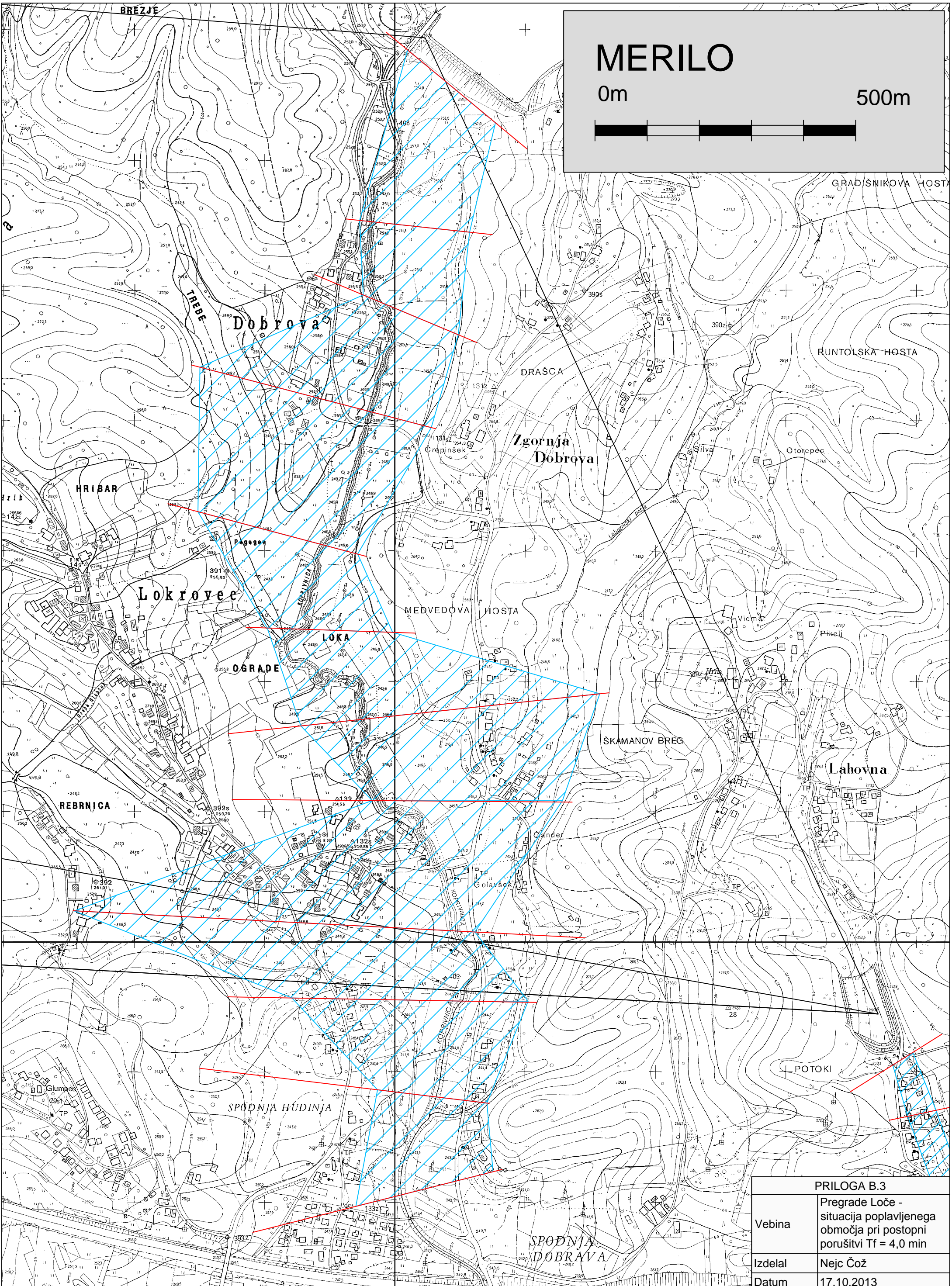
Leva AC - Hoče

ZGORNJA HUDINJA

## PRILOGA B.2

Vebina	Pregrada Lahovnica - situacija poplavljenega območja pri postopni porušitvi Tf = 1,0 min
Izdelal	Nejc Čož
Datum	17.10.2013





**MERILO**

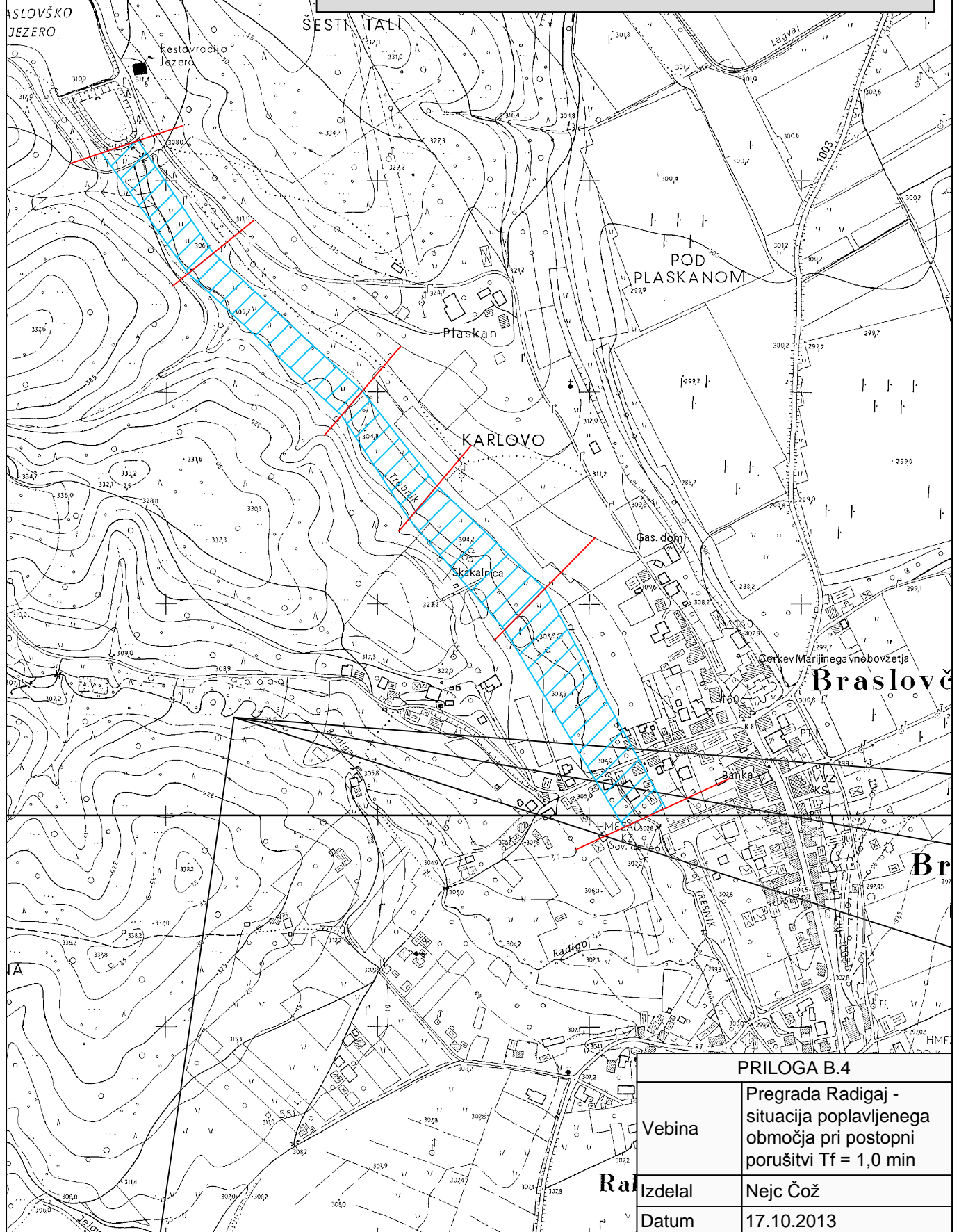
0m 500m

<b>PRILOGA B.3</b>	
Vebina	Pregrade Loče - situacija poplavljenega območja pri postopni porušitvi Tf = 4,0 min
Izdelač	Nejc Čož
Datum	17.10.2013

# MERILO

0m

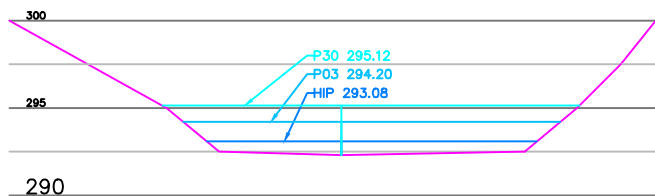
500m



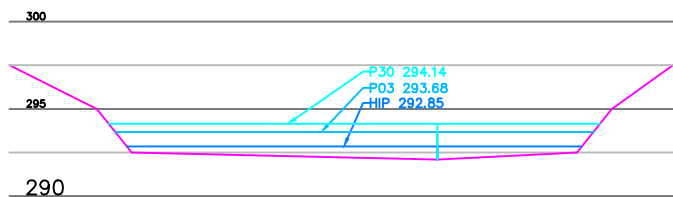
## PRILOGA B.4

Vebina	Pregrada Radigaj - situacija poplavljenega območja pri postopni porušitvi Tf = 1,0 min
Izdelal	Nejc Čož
Datum	17.10.2013

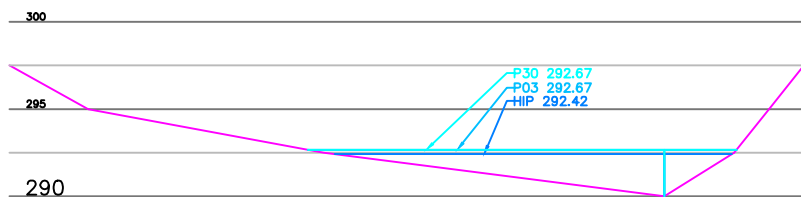
PROFIL 1 – 0 m



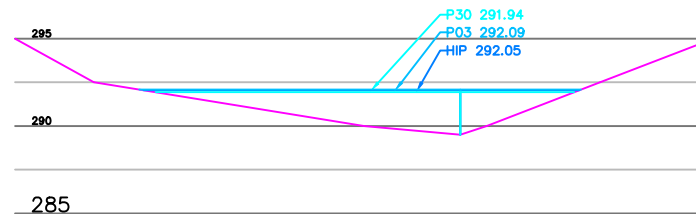
PROFIL 2 – 195 m



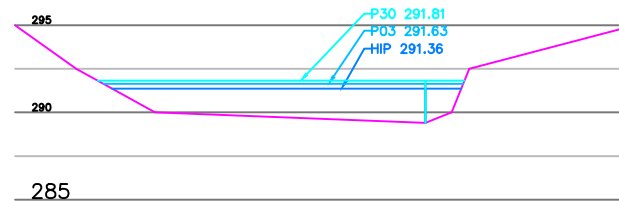
PROFIL 3 – 355 m



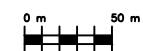
PROFIL 4 – 500 m



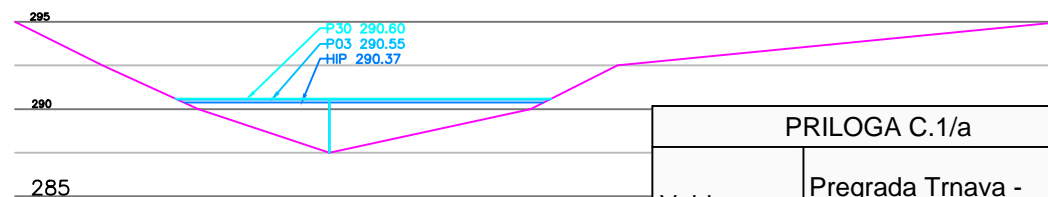
PROFIL 5 – 695 m



MERILO



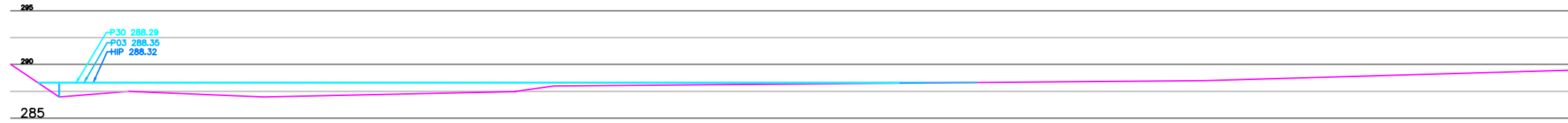
PROFIL 6 – 980 m



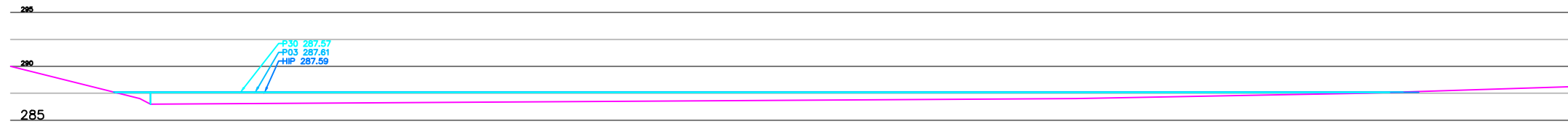
PRILOGA C.1/a

Vebina	Pregrada Trnava - prečni profili 1 do 6
Izdelač	Nejc Čož
Datum	17.10.2013

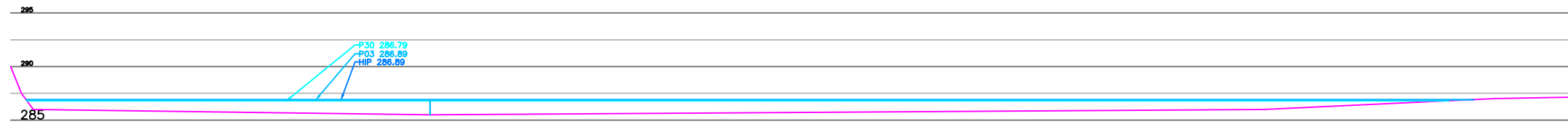
PROFIL 7 – 1270 m



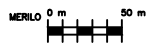
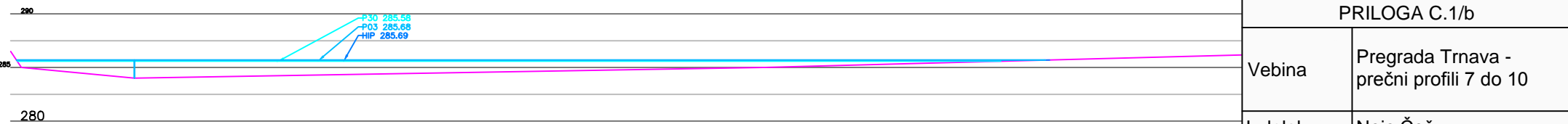
PROFIL 8 – 1430 m



PROFIL 9 – 1715 m

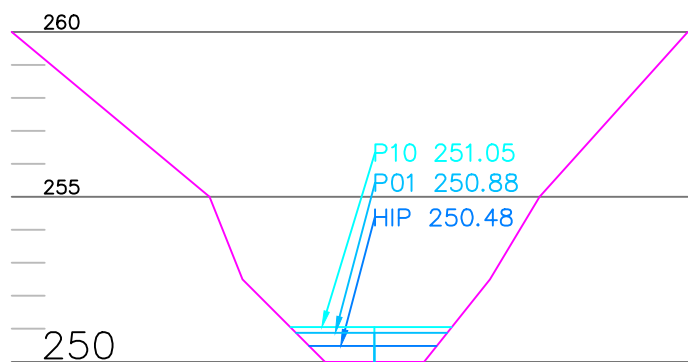


PROFIL 10 – 2065 m

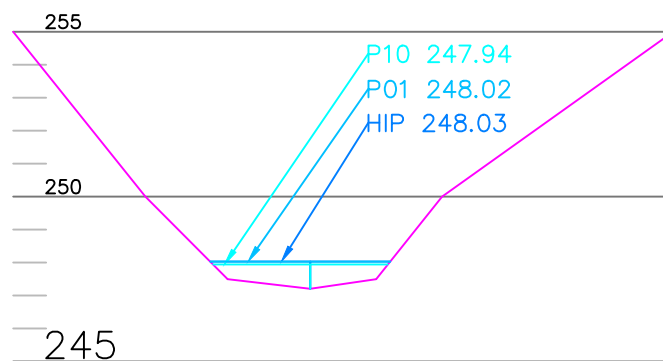


PRILOGA C.1/b	
Vebina	Pregrada Trnava - prečni profili 7 do 10
Izdelal	Nejc Čož
Datum	17.10.2013

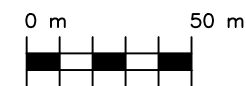
PROFIL 1



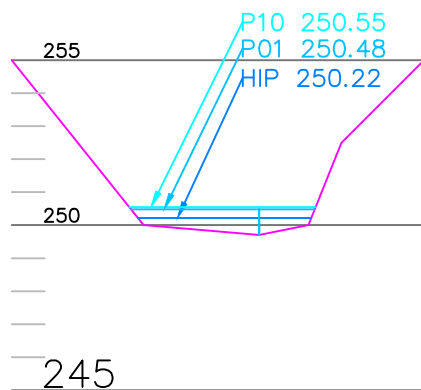
PROFIL 3



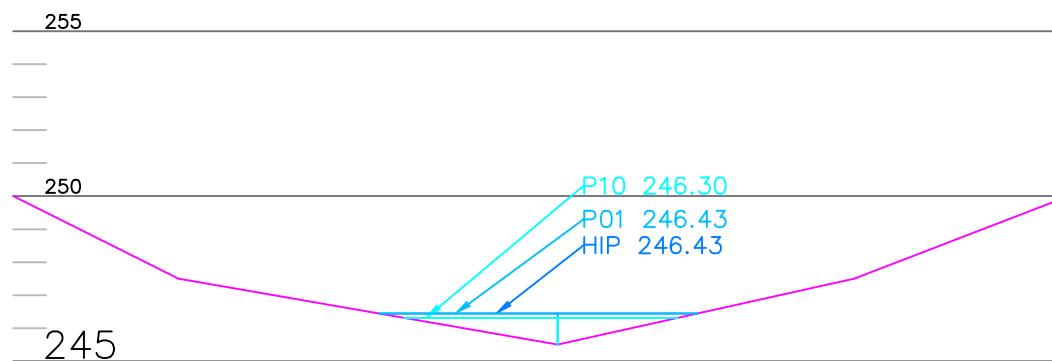
MERILO



PROFIL 2



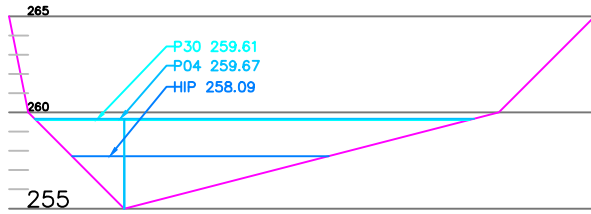
PROFIL 4



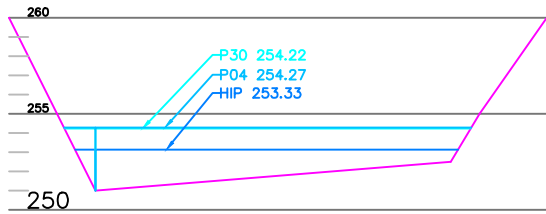
PRILOGA C.2

Vebina	Pregrada Lahovnica - prečni profili 1 do 4
Izdelal	Nejc Čož
Datum	17.10.2013

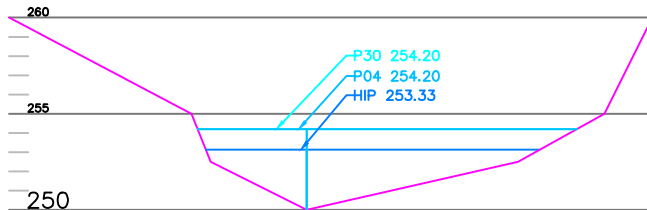
PROFIL 1 – 0 m



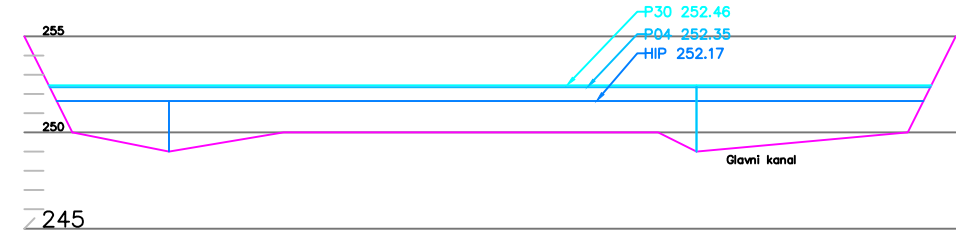
PROFIL 2 – 360 m



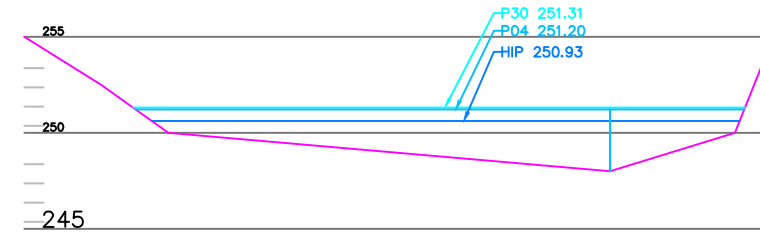
PROFIL 3 – 510 m



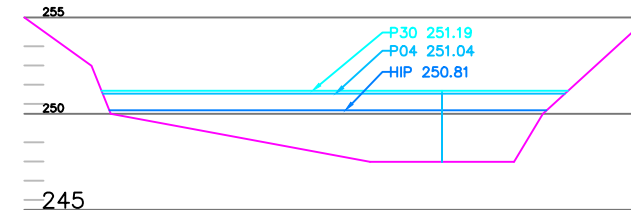
PROFIL 4 – 735 m



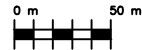
PROFIL 5 – 1015 m



PROFIL 6 – 1190 m



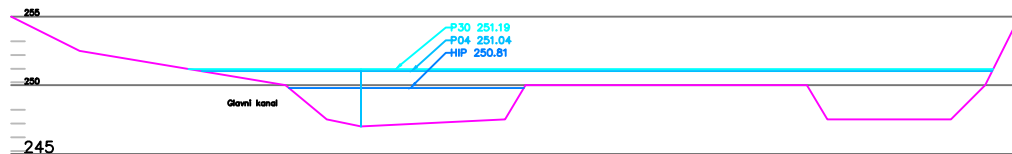
MERILO



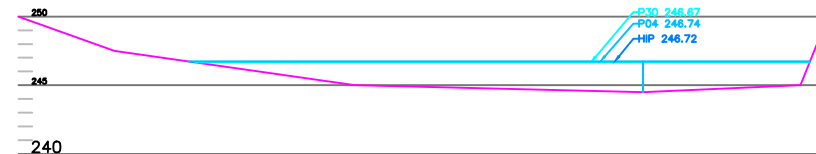
PRILOGA C.3/a

Vebina	Pregrada Loče - prečni profili od 1 do 6
Izdelač	Nejc Čož
Datum	17.10.2013

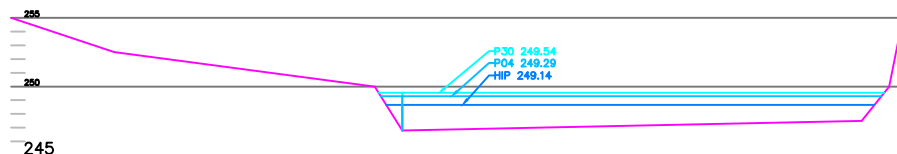
PROFIL 7 – 1460 m



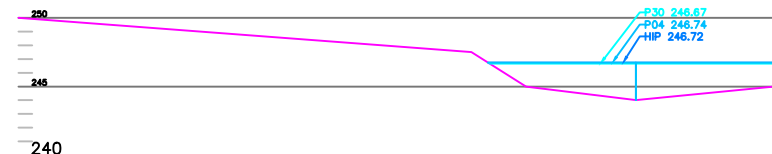
PROFIL 10 – 2080 m



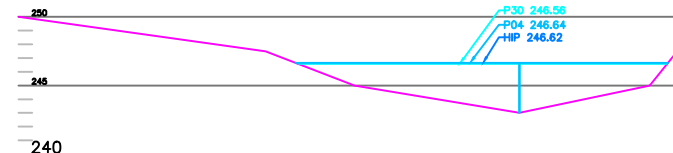
PROFIL 8 – 1625 m



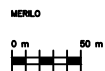
PROFIL 11 – 2275 m



PROFIL 12 – 2445 m



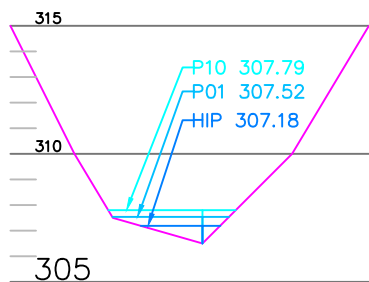
PROFIL 9 – 1935 m



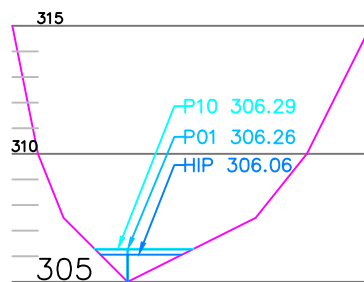
PRILOGA C.3/b

Vebina	Pregrada Loče - prečni profili od 7 do 12
Izdelač	Nejc Čož
Datum	17.10.2013

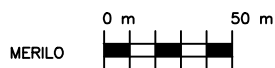
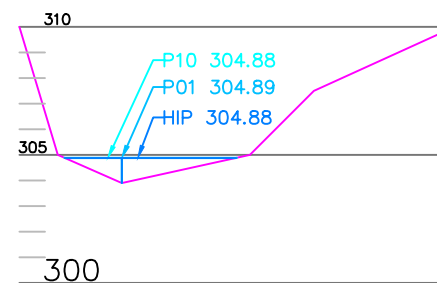
PROFIL 1 – 0



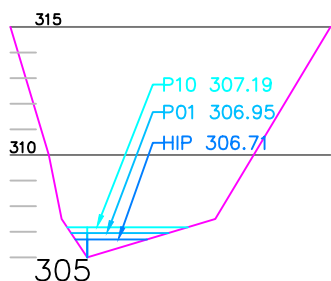
PROFIL 3 – 440 m



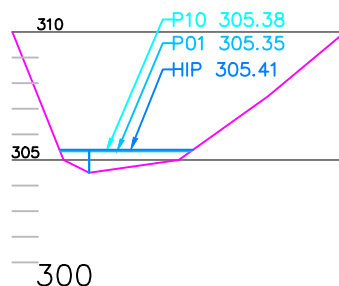
PROFIL 5 – 780 m



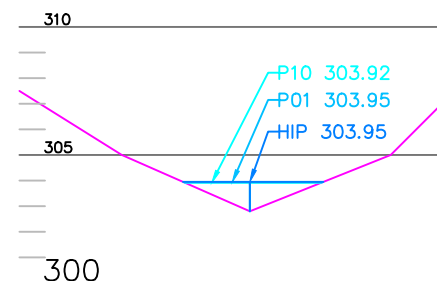
PROFIL 2 – 170 m



PROFIL 4 – 590 m



PROFIL 6 – 1095 m



PRILOGA C.4

Vebina	Pregrada Radigaj - prečni profili 1 do 6
Izdelal	Nejc Čož
Datum	17.10.2013