

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:

Gajić, S., 2016. Uporaba poenostavljenih programov za račun valov vsled porušitve pregrad. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Četina, M., somentor Krzyk, M.): 27 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5947/>

Datum arhiviranja: 5-10-2016

University
of Ljubljana
Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Gajić, S., 2016. Uporaba poenostavljenih programov za račun valov vsled porušitve pregrad. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Četina, M., co-supervisor Krzyk, M.): 27 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5947/>

Archiving Date: 5-10-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

STEVAN GAJIĆ

**UPORABA POENOSTAVLJENIH PROGRAMOV ZA
RAČUN VALOV VSLED PORUŠITVE PREGRAD**

Diplomska naloga št.: 275/B-GR

**USE OF SIMPLIFIED PROGRAMS FOR CALCULATION
OF WAVES FOLLOWING DAM BREAK**

Graduation thesis No.: 275/B-GR

Mentor:

prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:

doc. dr. Mario Krzyk

Ljubljana, 22. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

STRAN Z NAPAKO	VRSTICA Z NAPAKO	NAMESTO	NAJ BO
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

Spodaj podpisani/-a študent/-ka _____, vpisna številka _____, avtor/-ica
pisnega zaključnega dela študija z naslovom: _____

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

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

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

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

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

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

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

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

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	004.4:532.5:622.515(497.4)(043.2)
Avtor:	Stevan Gajić
Mentor:	prof. dr. Matjaž Četina
Somentor:	doc. dr. Mario Krzyk
Naslov:	Uporaba poenostavljenih programov za račun valov vsled porušitev pregrad
Tip dokumenta:	Diplomska naloga
Obseg in oprema:	27 str., 12 pregl., 8 sl., 5 graf., 32 en., 3 pril.
Ključne besede:	porušitev pregrad, poenostavljene metode, uporabnost programa, navodila za uporabo

Izvleček

V diplomski nalogi je obravnavana porušitev treh zemeljskih pregrad. Porušitev smo analizirali s pomočjo poenostavljenega modela za izračun posledic popolne porušitve pregrad. Računali smo čas potovanja čela porušitvenih valov, maksimalne gladine vode ter maksimalne pretoke v izbranih računskih točkah. Rezultati so izvednoteni grafično in analitično ter primerjani z že opravljenimi raziskavami, ki so uporabljaje popolne metode za reševanje St. Venantovih enačb. Zapisana so tudi navodila za uporabo programa SMPDBK, ki je bil uporabljen v raziskavi.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 004.4:532.5:622.515(497.4)(043.2)
Author: Stevan Gajić
Supervisor: prof. Matjaž Četina, Ph.D.
Cosupervisor: assist. prof. Mario Krzyk, Ph.D.
Title: Use of simplified programs for calculation of waves following dam break
Document type: Graduation Thesis
Notes: 27 p., 12 tab., 8 fig., 5 graph., 32 eq., 3ann.
Key words: dam failure, simplified methods, usefulness of model, user manual.

Abstract:

In Graduation Thesis I analyze the failure of 3 different dams. The dam failure was analyzed with the help of a simplified model for calculation of dam failure consequences. We calculated wave flood times, maximum depths of waves and maximum flow in certain calculation points. Results are shown graphically and analytically and compared to results of complete methods for calculation of St. Venant equations. There is also a written user manual of the SMPDBK model, which was used in analysis.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO SLIK.....	VI
KAZALO PREGLEDNIC.....	VII
1 UVOD.....	1
2 PROGRAM SMPDBK.....	2
2.1 Osnovne informacije o programu.....	2
2.1.1 Opis delovanja modela.....	2
2.2 Enačbe, uporabljene v programu SMPDBK.....	3
2.2.1 Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka.....	3
2.2.2 Izračun maksimalnega iztoka.....	4
2.2.3 Izračun globine vode v prvem dolvodnem profilu.....	4
2.2.4 Izračun koeficienta potopljenosti.....	6
2.2.4.1 Propagacija valov dolvodno.....	6
2.2.4.2 Propagacijski parametri.....	8
2.2.4.3 Propagacijske krivulje največjega vala.....	9
2.3 Navodila za uporabo programa.....	10
3 PODATKI ZA MODELIRANJE.....	13
3.1 Pregrada Loče.....	13
3.1.1 Tehnični podatki.....	13
3.2 Pregrada Domajinci.....	13
3.2.1 Tehnični podatki.....	14
3.3 Pregrada Pikolud.....	14
3.3.1 Tehnični podatki.....	14
4 IZRAČUN PORUŠITEV PREGRAD	15
4.1 Pridobitev vhodnih podatkov.....	15
4.2 Pregrada Loče.....	15
4.2.1 Vhodni podatki.....	15
4.3 Pregrada Domajinci.....	16
4.3.1 Vhodni podatki.....	16
4.4 Pregrada Pikolud.....	17
4.4.1 Vhodni podatki.....	17
5 REZULTATI	18
5.1 Pregrada Loče.....	18
5.2 Pregrada Domajinci.....	21
5.3 Pregrada Pikolud.....	23
5.4 Ugotovitve.....	24
6 ZAKLJUČEK.....	26
VIRI.....	27

KAZALO SLIK

Slika 1: Videz uporabniškega vmesnika SMPDBK GUI	11
Slika 2: Zamenjava decimalnih ločil v programu beležnica.....	12
Slika 3: Graf maksimalnih vrednosti gladine vode v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Loče.....	18
Slika 4: Graf potovanja čela vala v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Loče	20
Slika 5: Graf maksimalnih vrednost gladine vode v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Domajinci.....	21
Slika 6: Graf časa potovanja čela vala v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Domajinci.....	22
Slika 7: Graf maksimalnih vrednosti gladine vode v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Pikolud	23
Slika 8: Graf časa potovanja čela v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Pikolud .	24

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Privzete vrednosti parametrov, uporabljenih v programu SMPDBK	3
Preglednica 2:	Tehnični podatki pregrade Loče (SLOCOLD 2016)	13
Preglednica 3:	Tehnični podatki pregrade Domajinci (SLOCOLD 2016).....	14
Preglednica 4:	Tehnični podatki pregrade Pikolud (SLOCOLD 2016).....	14
Preglednica 5:	Prvi niz vhodnih podatkov za pregrado Loče (Rajar, 1979)	15
Preglednica 6:	Drugi niz vhodnih podatkov za pregrado Loče (Rajar, 1979)	16
Preglednica 7:	Tretji niz vhodnih podatkov za pregrado Loče (Rajar, 1979).....	16
Preglednica 8:	Vhodni podatki za pregrado Domajinci (Rajar, 1978).....	16
Preglednica 9:	Vhodni podatki za pregrado Pikolud (Rajar, 1989)	17
Preglednica 10:	Primerjava rezultatov maksimalnih pretokov v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade Loče	19
Preglednica 11:	Primerjava rezultatov maksimalnih pretokov v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade Domajinci	21
Preglednica 12:	Primerjava rezultatov maksimalnih pretokov v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade Pikolud	23

1 UVOD

Porušitev pregrad ima lahko zelo velike negativne posledice za okolico in ljudi v njihovi bližini. V svetu je po podatkih Mednarodne komisije za visoke pregrade (ICOLD) 58.402 pregrad, ki dosega višino nad 15 metrov, zabeleženih pa je že preko 900 primerov porušitev takšnih pregrad. V Sloveniji od leta 1993 deluje društvo SLOCOLD (Slovenski nacionalni komite za velike pregrade), ki obravnava 40 pregrad, vključenih tudi v register združenja ICOLD. V okviru diplomske naloge bomo obravnavali morebitne primere porušitev treh izmed teh pregrad, in sicer pregrad Loče, Domajinci in Pikolud.

Za analizo popolne ali delne porušitve pregrad se v praksi uporabljajo popolne metode z uporabo osnovnih St. Venantovih enačb. Ker pa so te metode dokaj zahtevne, vzamejo veliko časa in zahtevajo veliko količino vhodnih podatkov, bomo v okviru diplomske naloge izvedli oceno ustreznosti modela, ki uporablja poenostavljeno metodo izračuna St. Venantovih enačb. Analizo bomo opravili s programom SMPDBK, ki ga je razvila ameriška agencija za vreme *National Weather Service* (NWS). Program je enostaven za uporabo in daje dovolj dobre rezultate z malo potrebnimi vhodnimi podatki, glavni namen diplomske naloge pa je ugotovitev točnosti s programom pridobljenih rezultatov. Analizirali bomo pretoke, čas potovanja čela valov in pa gladine vode v dolvodnih profilih od pregrad ob njihovi porušitvi. Ustreznost rezultatov programa SMPDBK bomo primerjali z rezultati analize porušitve pregrad s popolnimi St. Venantovimi enačbami, ki jih je Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo opravila v sedemdesetih in osemdesetih letih in so kasneje bile zbrane v okviru projekta VODPREG.

V diplomskem delu bodo opisani tudi delovanje programa SMPDBK in enačbe, ki jih uporablja, navodila za uporabo programa ter morebitne težave ob uporabi programa in njihovo reševanje.

2 PROGRAM SMPDBK

2.1 Osnovne informacije o programu

Leta 1983 je organizacija *National Weather Service* (NWS) razvila enostaven postopek za napovedovanje poplavljanja dolvodnih območij velikih pregrad, ki lahko na podlagi nekaj vhodnih parametrov poda podatke za opis poplavnih območij dolvodno od pregrad. Model so poimenovali *Simplified Dam Break (SMPDBK) Flood Forecasting Model*. Program je bil osnovan na zahtevnejšem programu DAMBRK. Ta je na takrat zelo zmogljivih računalnikih v svojih izračunih oblikoval iztočni hidrogram pri postopni porušitvi pregrad in ga nato dolvodno propagiral s pomočjo popolnih St. Venantovih enačb za enodimenzijski nestalni tok z upoštevanjem vplivov dolvodnih mostov in pregrad. Ker je program zahteval velike količine podatkov in bil hkrati zelo zahteven za uporabo, so na NWS razvili model SMPDBK. Model SMPDBK je v nasprotju z modelom DAMBRK zelo enostaven, saj za osnovno delovanje potrebuje le nekaj podatkov, hkrati pa zaradi majhnega števila uporabljenih enačb in procesov nudi hitre rešitve pri napovedovanju poplav, ko je za njihovo napoved na voljo malo časa. Osnovni model je bil narejen za programski jezik FORTRAN, kasneje pa je bil razvit grafični uporabniški vmesnik SMPDBK GUI. Osnovni podatki, ki jih program potrebuje za približno napoved, so kota višine gladine vode v zbiralniku ali akumulaciji, površina ali volumen vode v zbiralniku in pa oblika dveh dolvodnih prerezov odvodnika v obliki ZZ-BB. Če v program vnesemo dodatne podatke, npr. predpostavke o širini porušitve, koto dna porušitve, Manningov koeficient hrapavosti, začetni pretok, več dolvodnih prerezov odvodnika itd., so rezultati veliko bolj natančni in primerljivi z rezultati popolnih St. Venantovih enačb.

2.1.1 Opis delovanja modela

Model za napoved posledic porušitve deluje v treh korakih:

1. Izračun maksimalnega iztoka na podlagi časovnih in geometrijskih karakteristik porušne odprtine in volumna zbiralnika.
2. Približno oblikovanje odvodnika s prizmatično obliko.
3. Izračun brezdimenzijskih parametrov propagacije maksimalnega pretoka s pomočjo brezdimenzijskih propagacijskih krivulj za določitev maksimalnega pretoka v izbranih dolvodnih profilih.

Program omogoča izračun postopne porušitve pregrade v časovnem intervalu, ki ga določi uporabnik. Edina omejitev je, da program predpostavlja pravokotno porušno odprtino, medtem ko je v večini primerov porušitev odprtina trapezne oblike. Temu se lahko izognemo tako, da predpostavimo pravokotno odprtino s širino, enako povprečni širini trapezne porušne odprtine.

Za izračun maksimalnega iztoka skozi porušno odprtino program uporablja samo eno enačbo, od uporabnika pa zahteva le 5 parametrov: površina ali volumen akumulacije, kota gladine vode pred porušitvijo, čas, potreben za oblikovanje porušne odprtine, koto dna končne porušne odprtine in pa končna širina porušne odprtine. Ker nas navadno zanimata ravno čas in širina porušitve, ima program nastavljene tudi privzete vrednosti teh parametrov, če uporabnik s temi podatki ne razpolaga:

Preglednica 1: Privzete vrednosti parametrov, uporabljenih v programu SMPDBK

Parameter:	Privzeta vrednost:
Končna širina odprtine	Trikratna višina nasute pregrade Petkratna višina težnostne pregrade 90% širine ločne pregrade na strani akumulacije
Čas oblikovanja porušne odprtine (v minutah)	H/10 za nasute pregrade H/40 za težnostne pregrade H/50 za ločne pregrade (pri čemer je H višina pregrade v čevljih)
Kota dna porušne odprtine	Kota dna v prvem gorvodnem profilu

Na podlagi največjega iztoka se lahko s pomočjo Manningove enačbe določi globina vode v prvem dolvodnem profilu (tik ob pregradi). Manningova enačba vključuje obliko prvega dolvodnega profila, Manningov koeficient hrapavosti in naklon struge. Globina vode v profilu se nato primerja z globino vode v zbiralniku, kar omogoča pregled nad tem, ali je zaradi vpliva spodnje vode potrebno korigiranje s koeficientom potopljenosti.

Obliko odvodnika uporabnik poda v obliki ZZ-BB, hkrati pa je potrebna tudi stacionaža posameznega profila. Program vse podane profile izvednoti in jih uteženo pretvori v en sam prizmatični kanal, ki je rezultat povprečja oblik vseh dolvodnih profilov. Na osnovi tega prizmatičnega profila program nato izračuna maksimalne vrednosti pretokov skozenj.

Ko ima program podatke o maksimalnem iztoku in gladini zaledne vode, lahko izvrši račun propagacije toka dolvodno. Račun se vrši na podlagi brezdimenzijskih propagacijskih krivulj najvišjega pretoka (priloga A), ki so bile razvite s pomočjo prej omenjenega modela DAMBRK. Te krivulje nadomeščajo St. Venantove enačbe in zato poenostavijo izračun propagacije toka. Podane so v obliki grafov, ki imajo na abscisi brezdimenzijsko razmerje (X^*), razmerje med razdaljo pregrade do kateregakoli dolvodnega profila in karakterističnim parametrom razdalje, na ordinati pa razmerje (Q^*), razmerje med pretokom v izbranem profilu in maksimalnim pretokom na mestu porušitve. Krivulje so združene v družine na podlagi Froudovega števila (Fr) toka v strugi. Glavni parameter za izbiro posamezne krivulje znotraj njene družine je brezdimenzijski volumski parameter (V^*). Znotraj družine krivulj je na podlagi Fr in (V^*) možna tudi interpolacija vrednosti. Čas propagacije največjega vala do izbranega dolvodnega profila je vsota časa porušitve pregrade in časa potovanja vodnega vala do profila. Čas potovanja vala je izračunan s pomočjo kinematične hitrosti vala, tj. funkcije povprečne hitrosti vodnega toka na odseku med pregrado in izbranim profilom.

2.2 Enačbe, uporabljene v programu SMPDBK

2.2.1 Vhodni podatki za izračun maksimalnega iztoka

Kot smo omenili, je za delovanje programa dovolj že nekaj osnovnih parametrov, če pa želimo natančnejše izračune, mu podamo več možnih parametrov:

- kota gladine vode pred porušitvijo,
- kota dna porušitve,
- volumen vode v zbiralniku/akumulaciji,
- površina vode v zbiralniku/akumulaciji,

- končna širina porušne odprtine,
- čas rušenja,
- pretok pred začetkom rušenja,
- razdalja do zelene točke,
- model ZZ-BB oblike dolvodnih profilov,
- Manningov koeficient hrapavosti,
- višina, na kateri je poplavljanje problematično (v vsakem dolvodnem profilu posebej),
- razdalja dolvodnega profila od pregrade.

Treba je upoštevati, da je program razvila ameriška vladna organizacija, zato za vnos vhodnih podatkov in prikaz rezultatov uporablja imperialne merske enote. Vse podatke je torej treba pretvoriti v imperialni merski sistem in nato nazaj v metričnega. Pri diplomski nalogi smo za pretvorbe uporabili naslednje vrednosti:

- 1 ft (čevelj) = 0,3048 m
- 1 mile (milja) = 1609 m
- 1 sqft = ft² = 0,0929 m²
- 1 acre (jutra) = 4046,7 m²
- 1 acre-ft = 1233 m³
- 1 cft = 0,02832 m³/s

2.2.2 Izračun maksimalnega iztoka

Za izračun maksimalnega iztoka (Q_{bmax}) iz porušne odprtine so potrebni naslednji parametri:

- A_s – površina vode v zbiralniku/akumulaciji [acre]
- H – razlika med koto gladine vode pred poružitvijo in koto dna poružitve [ft]
- B_r – povprečna končna širina porušne odprtine [ft]
- t_f – čas rušenja [min]
- Q_0 – začetni pretok pred poružitvijo [cft]

Maksimalni iztok je s pomočjo teh parametrov določen z enačbo:

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

Pri tem je:

$$C = \frac{23,4 A_s}{B_r} \quad (2)$$

2.2.3 Izračun globine vode v prvem dolvodnem profilu

Po izračunu maksimalnega iztoka je treba določiti maksimalno globino toka h_{max} v prvem dolvodnem profilu. Globina je izračunana na podlagi Manningove enačbe:

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

Pri tem je:

$$S = S_0 + \frac{\Delta y}{\Delta t} \left(\frac{1}{c} + \frac{VB}{gA} \left(1 - \frac{V}{c} \right) \right) - \frac{1}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4)$$

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

Pri tem so:

Q	=	maksimalni iztok,
A	=	omočeni obod,
R	=	hidravlični radij,
n	=	Manningov koeficient hrapavosti,
S	=	naklon gladine,
S ₀	=	naklon dna med dvema sosednjima profiloma,
Δy	=	višinska razlika med gladinama pri maksimalnem in osnovnem iztoku,
ΔV	=	razlika hitrosti vode pri maksimalnem in osnovnem iztoku,
Δt	=	čas rušenja,
g	=	gravitacijski pospešek,
c	=	kinematična hitrost vala,
ΔB	=	razlika širine kanala pri maksimalnem in osnovnem iztoku.

A, R in n so nelinearne funkcije vodne globine h, zato se enačba (3) rešuje iterativno z Newton-Raphsonovo iterativno tehniko. Po tej metodi se za prvo iteracijo uporabi vrednost h*:

$$h^* = 0,5 \cdot (h_{min} + h_{max}) \quad (6)$$

Pri tem je h_{min} minimalna možna globina, navadno 0, h_{max} pa maksimalna možna globina, prvotno predpostavljena kot dvakratna višina pregrade. Nova vrednost h* je:

$$h_{new}^* = h^* - \left(\frac{Q^* - Q}{dQ^*} \right) \quad (7)$$

Pri tem je:

$$dQ^* = Q^* \left(\frac{-dn}{n} + \frac{5B}{3A} - \frac{2}{3} \frac{dB}{B} \right) \quad (8)$$

To je izpeljanka Manningove enačbe, kjer je Q znani iztok iz enačbe (3), dB sprememba zgornje širine v odvisnosti od globine in dn sprememba Manningovega koeficienta hrapavosti v odvisnosti od globine. Program postopek ponavlja toliko časa, dokler ni razlika med h* in h*_{new} manjša od 0,01 ft. Če tega pogoja ne doseže v 15 iteracijskih korakih ali če račun divergira, program uporabi bisekcijsko metodo.

2.2.4 Izračun koeficienta potopljenosti

Če je globina vode v prvem dolvodnem profilu dovolj velika, se bo maksimalni iztok zmanjšal, kar pomeni nepopolni iztok. Program to reši s pomočjo koeficienta potopljenosti. Maksimalni iztok skozi porušno odprtino se iterativno korigira, če je razlika med koto maksimalne gladine zaledne vode E_t in koto dna porušitve E_b večja kot $0,67 \cdot h_{weir}$, kjer je h_{weir} prelivna višina vode nad dnom porušne odprtine v času t_f , E_t je vsota maksimalne gladine vode pred porušitvijo in kote dna zbiralnika/akumulacije v prvem zalednem profilu. h_{weir} je tako določena z enačbo:

$$h_{weir} = \left(\frac{C}{\frac{t_f}{60} + \frac{C}{\sqrt{H}}} \right)^2 \quad (9)$$

C je bil določen že v enačbi (2), H in t_f pa v enačbi (1).

Če je izpolnjen pogoj:

$$E_t - E_b > 0,67 \cdot h_{weir} \quad (10)$$

je koeficient potopljenosti izračunan po naslednji enačbi:

$$K_s^* = 1,0 - 27,8 \left(\frac{E_t - E_b}{h_{weir}} - 0,67 \right)^3 \quad (11)$$

Vrednost K_s^* je nadomeščena z vrednostjo iz enačbe (12), s čimer pridobimo povprečni koeficient potopljenosti:

$$K_s^k = \frac{K_s^* + K_s^{k-1}}{2} \quad (12)$$

Pri tem je zgornja prepona k zaporedna številka iteracije, vrednost K_s^0 v prvi iteraciji pa je 1. K_s^k je nato uporabljen pri izračunu korigiranega iztoka po enačbi:

$$Q_{bmax}^k = K_s^k \cdot Q_{bmax} \quad (13)$$

Korigirani iztok Q_{bmax}^k je dalje uporabljen v izračunu nove globine zaledne vode h_{max}^k z uporabo enačbe (6). Zaradi zmanjšane pretoka skozi porušno odprtino pa je treba izračunati še novo prelivno višino h_{weir} :

$$h_{weir}^k = H - Q_{bmax}^k \frac{t_f(60)}{2A_s(43560)} \quad (14)$$

Ta postopek ponavljamo, dokler se novi maksimalni iztoki, dobljeni z enačbo (13), med seboj ne razlikujejo za manj kot 0,5%.

2.2.4.1 Propagacija valov dolvodno

Propagacijo valov dolvodno izračunamo z uporabo brezdimenzijskih propagacijskih krivulj (priloga A). Preden pa lahko definiramo propagacijske parametre, je treba določiti obliko struge odvodnika. Struga je definirana kot prizmatičen kanal, izračunan kot povprečje vseh dolvodnih profilov in utežen z razdaljo profila od pregrade. Povprečna širina gladine toka med dvema sosednjima profiloma $B_{i,j}$ pri

določeni globini $h_{i,j}$ je določena z enačbo:

$$\overline{B}_{l,j} = 0,5 (B_{l,j} + B_{l,j+1}) \quad (15)$$

Povprečna širina gladine toka, utežena z razdaljo od pregrade med pregradnim in računskim profilom, je določena z enačbo:

$$\widehat{B}_{l,j} = \frac{\sum_{k=1}^j (X_{k+1} - X_k) \overline{B}_{l,k}}{X_{j+1} - X_1} \quad (16)$$

Pri tem so:

i = indeks gladine i = 1,2,3...I,
j = indeks profila j = 1,2,3...J,
 X_j = razdalja od pregradnega do j-tega profila,

pri čemer je I število vseh podanih širin profila, J pa število vseh profilov.

Povprečni presek profilov, prav tako utežen z razdaljo profila od pregrade, pa je določen z enačbo:

$$\widehat{A}_{l,j} = \widehat{A}_{l-1,j} + 0,5 (\widehat{B}_{l-1,j} + \widehat{B}_{l,j})(h_{i,j} - h_{i-1,j}) \quad (17)$$

i = 2,3...I
j = 2,3...J

Pri tem so:

$\widehat{A}_{l,j}$ = 0,
 h_i = i-ta globina,
 $B_{i,j}$ = širina kanala pri i-ti globini v j-tem profilu,
 $\overline{B}_{i,j}$ = povprečna širina pri i-ti globini v j-tem profilu,
 $\widehat{B}_{i,j}$ = povprečna širina prizmatičnega kanala pri i-ti globini na odseku med pregradnim in izbranim j-tim profilom,
 $\widehat{A}_{i,j}$ = povprečni presek prizmatičnega kanala pri i-ti globini na odseku med pregradnim in izbranim j-tim profilom,
 X_j = razdalja j-tega profila od pregrade.

Za izračun maksimalne globine v posameznem profilu moramo določiti še oblikovni koeficient \widehat{m} :

$$\widehat{m}_i = \frac{\log \overline{B}_i - \log \overline{B}_{i+1}}{\log h_i - \log h_{i+1}} \quad (18)$$

2.2.4.2 Propagacijski parametri

Parameter razdalje X_c v miljah je določen z enačbo:

$$X_c = \frac{43560 VOL_r}{5280 \hat{A}} \left(\frac{6}{1+4(0,5)^{m+1}} \right) \quad (19)$$

Pri tem so:

- VOL_r = volumen zbiralnika/akumulacije [acre-ft],
 \hat{A} = presek povprečnega prečnega profila odseka pri h_{max} [sqft],
 X_c = karakteristični parameter razdalje [mile].

Znotraj razdalje X_c v dolvodnem odseku se maksimalna globina vode od pregradnega profila h_{max} manjša do globine vode h_x v točki X_c . Če predpostavimo, da je sprememba gladine od h_{max} do h_x linearna, potem je povprečna globina vode \bar{h} v tem odseku:

$$\bar{h} = \frac{h_{max} + h_x}{2} = \theta \cdot h_{max} \quad (20)$$

θ je utežni faktor, ki je določen iterativno, njegova začetna vrednost pa je vedno 0,95.

Povprečna hidravlična globina \hat{D} na izbranem odseku je podana z enačbo:

$$\hat{D} = \frac{\hat{A}}{\hat{B}} \quad (21)$$

Pri tem sta \hat{A} in \hat{B} povprečna površina prereza in širina kanala prizmatičnega odseka na globini \bar{h} . Povprečna hitrost \hat{V} v prizmatičnem propagacijskem odseku je:

$$\hat{V} = \frac{1,486}{n} S^{1/2} (\hat{D})^{2/3} \quad (22)$$

Pri tem je S naklon kanala med pregradnim in izbranim profilom.

Povprečna hitrost \hat{V} in hidravlična globina \hat{D} sta uporabljeni za določitev Froudovega števila (Fr):

$$Fr = \frac{\hat{V}}{\sqrt{g\hat{D}}} \quad (23)$$

Pri tem je $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ (gravitacijski pospešek).

Za določitev ustrezne propagacijske krivulje, ki ustreza izračunanemu Froudovemu številu, potrebujemo še brezdimenzijski volumen V^* . V^* je razmerje med volumnom zbiralnika/akumulacije in povprečnim volumnom vode znotraj odseka X_c . Določen je z enačbo:

$$V^* = \frac{VOL_r 43560}{\hat{A} X_c 5280} \quad (24)$$

2.2.4.3 Propagacijske krivulje največjega vala

S poznanimi vrednostmi Fr , V^* in $X^* = 1$, lahko določimo ustrezno propagacijsko krivuljo. S pomočjo te krivulje lahko določimo Q^* , na podlagi tega določimo Q v točki X_c z enačbo $Q = Q^*Q_{bmax}$. S tako pridobljenim Q lahko iterativno izračunamo globino h_x v točki X_c . Utežni faktor Θ vstavimo v enačbo (20) in jo preuredimo ter tako dobimo novo vrednost Θ' :

$$\Theta' = \frac{h_{max} + h_x}{2 h_{max}} \quad (25)$$

Če se Θ' preveč razlikuje od prvotno predpostavljene vrednosti Θ ($\pm 1\%$), je treba iterativno ponavljati enačbe (21)–(24), dokler ne dobimo sprejemljive vrednosti Θ' .

Ko poznamo ustrezno propagacijsko krivuljo vala, lahko normiramo razdaljo do računske točke:

$$X_i^* = \frac{X_i}{X_c} \bar{d} \quad (26)$$

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

Maksimalni pretok v točki X_i določimo s pomočjo krivulj, ki ustrezajo izračunanemu Fr (enačba 23), V^* (enačba 24) in razdalji X_i . Možna je tudi interpolacija med družinami krivulj, ki ustrezajo vrednostim Fr in V^* . Brezdimenzijski propagirani pretok Q^* je določen z enačbo:

$$Q^* = \frac{Q_{pi}}{Q_{bmax}} \quad (27)$$

Če pomnožimo vrednosti Q^* in Q_{bmax} , dobimo maksimalni pretok Q_{pi} na razdalji X_i milj dolvodno od pregrade.

Čas propagacije čela vala do točke X_i je izračunan tako, da se najprej izračuna referenčna hitrost vala na polovici razdalje med pregrado in profilom v točki X_i . Iz propagacijske krivulje določimo maksimalni pretok Q_x v točki $X_i/2$ dolvodno od pregrade. Pretok Q_x pomnožimo s faktorjem $(0,3 + \hat{m}/10)$, da dobimo karakteristični pretok Q_{xc} , ki predstavlja kinematično hitrost vala. Ta nam omogoča določitev referenčne globine h_{ref} .

Referenčna hidravlična globina \widehat{D}_{xl} je izračunana s pomočjo enačbe (22), kjer sta \hat{A} in \hat{B} izračunana za referenčno globino h_{ref} .

Referenčna pretočna hitrost V_{xi} je določen z enačbo:

$$V_{xi} = Q_{xc} / \hat{A} \quad (28)$$

V tej enačbi je hidravlični radij R iz enačbe (6) približno določen s hidravlično globino D . S pomočjo zgoraj dobljene vrednosti V_{xi} [ft/s] lahko določimo kinematično hitrost vala C [mi/h]:

$$C = 0,682 \cdot \widehat{V}_{xl} \left[5/3 - 2/3 \left(\frac{\hat{m}_i}{\hat{m}_i + 1} \right) \right] \quad (29)$$

Čas, ki je potreben, za nastop največjega pretoka t_{pi} (v urah), dobimo iz enačbe:

$$t_{pi} = t_f/60 + X_i/C \quad (30)$$

Pri tem je:

t_f = čas porušitve pregrade [min]

Možen je tudi izračun časa, pri katerem globina naraste ali upade pod določeno mejo. Uporabnik sam poda poplavno globino vode, ki bi lahko bila nevarna za okolico. Pretok Q_f , ki pripada določeni poplavni globini h_f , se na podlagi enačbe (3) izračuna za določeni prečni profil. Z določenim Q_f lahko izračunamo čas, ko voda naraste nad kritično globino t_{fd} :

$$t_{fd} = t_{pi} - \left(\frac{Q_{pi} - Q_f}{Q_{pi} - Q_0} \right) \cdot \frac{t_f}{60} \quad (31)$$

Pri tem je Q_0 osnovni pretok pred poružitvijo pregrade.

Čas, ko vodna gladina upade nazaj pod kritično globino, pa se določi iz enačbe:

$$t_d = t_{pi} + \left[\frac{24,2 VOL_r}{Q_{pi} - Q_0} - \frac{t_f}{60} \right] \left(\frac{Q_{pi} - Q_f}{Q_{pi} - Q_0} \right) \quad (32)$$

Za izračun maksimalnega pretoka, globine itd. v vsakem dolvodnem profilu moramo izračunati parametre povprečnih prečnih profilov \hat{B} , \hat{A} , \hat{D} , pri katerih je utež razdalja od pregrade. Dobimo jih iz enačb (15)–(17) za vsako i -to gladino in vsak j -ti odsek. S temi parametri lahko izračunamo še oblikovni koeficient \hat{m} (18). Na osnovi teh podatkov lahko potem iterativno določimo maksimalni pretok in globino.

2.3 Navodila za uporabo programa

Za program SMPDBK je bil leta 1991 izdelan grafični uporabniški vmesnik SMPDBK GUI. Uporabniški vmesnik lajša uporabo programa, za katerega je bilo prej treba uporabljati programski jezik Fortran. Za delovanje uporabniškega vmesnika potrebujemo različico programa Java Run Time Environment 1,6 ali novejšo. Videz programa je enostaven, zato ga lahko uporablja vsak, ki razpolaga z zadostno količino podatkov. Treba se je zavedati, da je program razvila organizacija NWS, ki ima sedež v ZDA, kar pomeni, da uporablja enote imperialnega merskega sistema. Evropski uporabnik mora zato sam pretvoriti podatke iz metričnega merskega sistema v imperialni merski sistem in obratno. Pretvorbe za posamezne enote so navedene v poglavju 3.2.1.

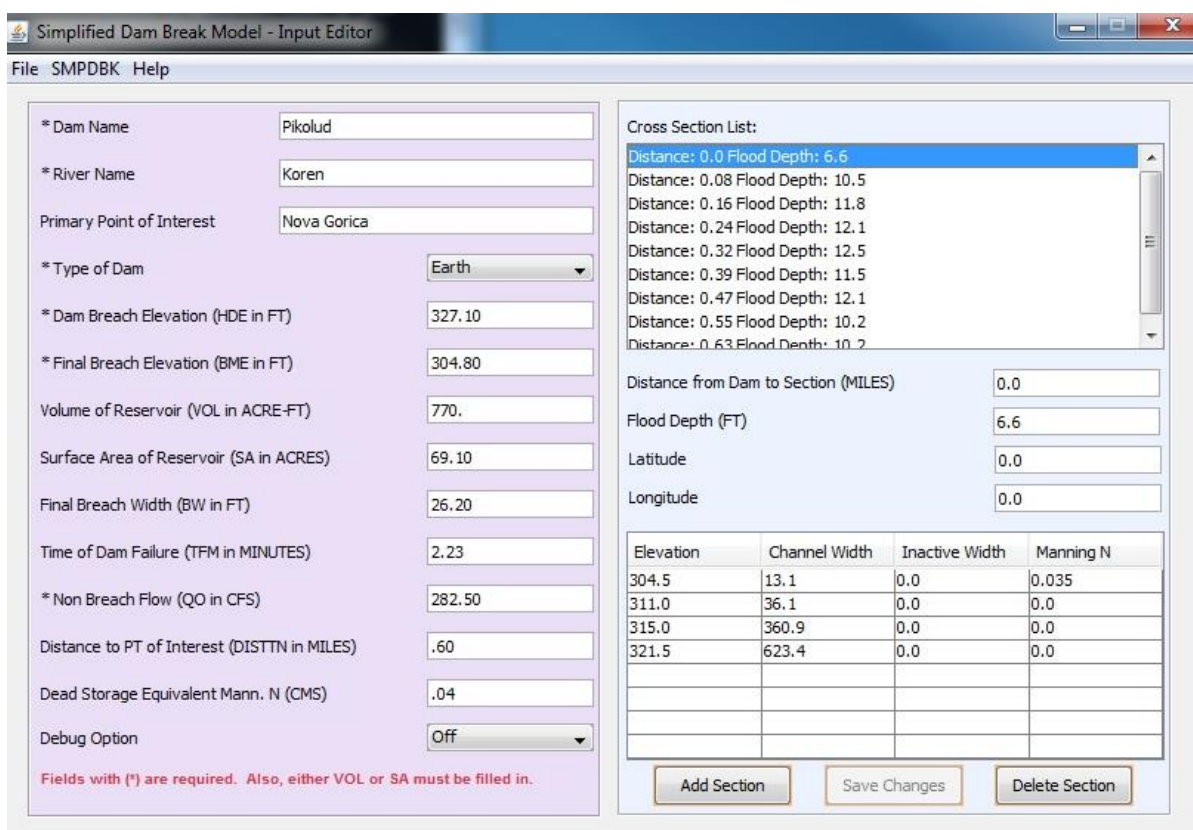
Na sliki [1] je prikazan videz uporabniškega vmesnika z že vnesenimi vhodnimi podatki. Nujni podatki, ki jih mora uporabnik vnesti v program, so:

- tip pregrade (Type of Dam),
- kota gladine vode pred poružitvijo pregrade (Dam Breach Elevation),
- kota dna porušne odprtine (Final Breach Elevation),
- volumen ali površina vode v zbiralniku/akumulaciji (Volume of Reservoir ali Surface Area of

Reservoir),

- osnovni pretok pred porušitvijo (Non Breach Flow),
- geometrija (oblika ZZ-BB) vsaj dveh dolvodnih profilov odvodnika ter njihova oddaljenost od pregrade (Elevation, Channel Width, Distance from Dam to Section) –program pri vnosu geometrijskih parametrov zahteva, da je število podatkov ZZ-BB za vsak prečni profil enako.

Ko vhodne podatke vstavimo, jih moramo shraniti s klikom na gumb File > Save. Preostala prazna polja program po shranjevanju podatkov izpolni sam s privzetimi vrednostmi, opisanimi v poglavju 3.1.2.



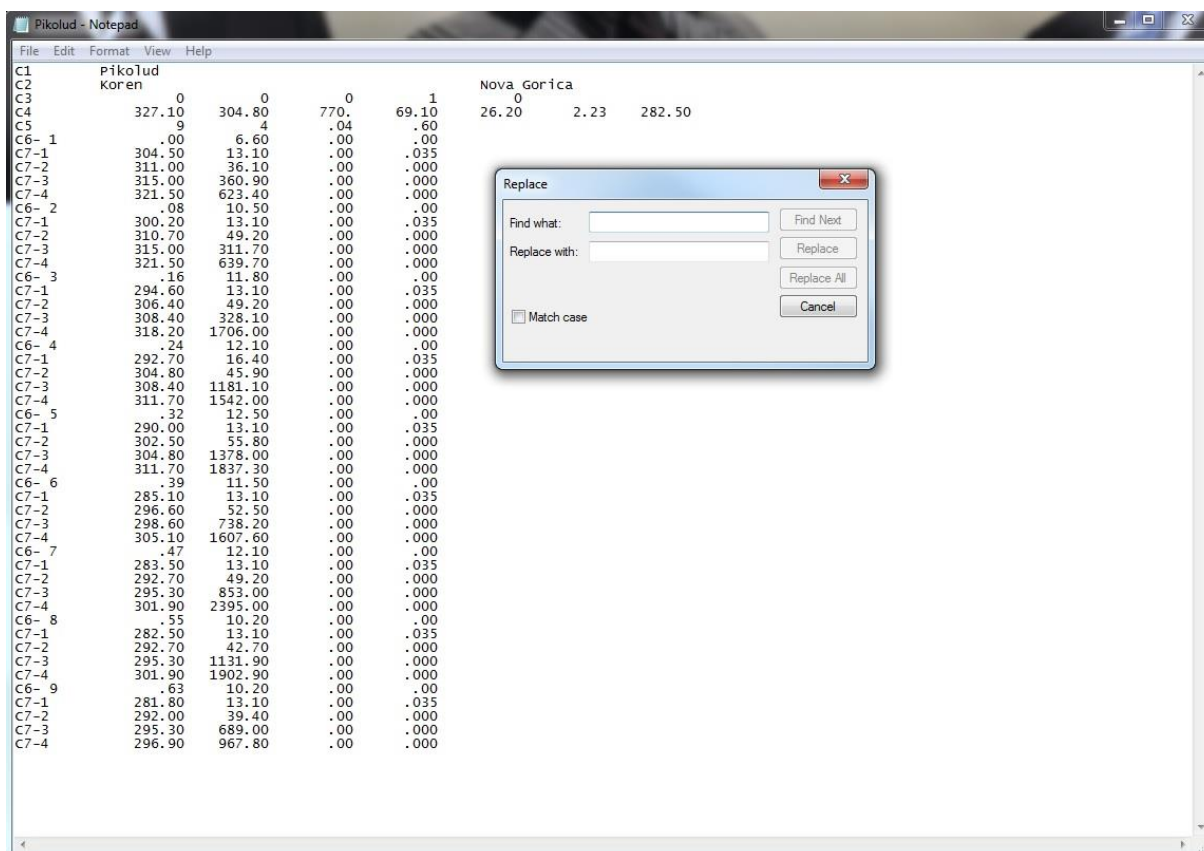
Slika 1: Videz uporabniškega vmesnika SMPDBK GUI

Pri vnosu vhodnih podatkov moramo paziti na ločilo za decimalna mesta. V nasprotju z evropskim sistemom se v ameriškem kot decimalno ločilo uporablja pika. Paziti moramo tudi po tem, ko podatke shranimo, saj evropski računalniki nize podatkov shranjujejo z vejico kot decimalnim ločilom, zato je treba niz ročno odpreti podatkov z urejevalnikom besedila (najlažje z beležnico) in vse vejice zamenjati s pikami. To storimo tako, da v beležnici kliknemo na gumb Edit > Replace in nato izberemo možnost, naj program vse vejice zamenja s pikami (slika 2).

Ko niz podatkov za izbrano pregrado shranili, lahko zaženemo program. To storimo s klikom na gumb SMPDBK > Run SMPDBK. Pojavi se pogovorno okno, v katerega vpišemo ime izhodnih podatkov in shranimo. Program nato prebere niz podatkov iz datoteke, ki smo jo predhodno shranili, in vrne rezultate v grafični obliki.

Rezultati, ki jih program izračuna, so grafični model pregrade in dolvodnih prečnih profilov, tabela, v kateri so prikazani stacionaža dolvodnega profila, maksimalni pretoki, maksimalne kote gladine vode, maksimalne globine vode, časovne vrednosti maksimalne globine vode, časovne vrednosti, pri katerih voda naraste preko kritične globine, časovne vrednosti, pri katerih se voda vrne pod kritično globino, in poplavne globine na posamezni stacionaži. Poleg tega je prikazan še grafikon poteka maksimalne gladine vode in terena ter graf, na katerem je prikazan maksimalni pretok v odvisnosti od časa. Grafična oblika rezultatov je podana v prilogi B.

Ker so vsi rezultati v imperialnih enotah, nam grafična oblika ponuja le okviren vpogled v posledice porušitve pregrade. Da bi lahko rezultate izvednotili v metričnih enotah, je najlažje tabelo z rezultati (priloga B2) kar kopirati v program Excel in za rezultate, ki nas zanimajo, izrisati posamezne grafikone.



Slika 2: Zamenjava decimalnih ločil v programu beležnica

3 PODATKI ZA MODELIRANJE

Slovensko združenje SLOCOLD je izdelalo register pregrad v Sloveniji, ki presegajo višino 15 metrov ali so visoke med 5 in 15 metrov ter zadržujejo vsaj 3 milijone kubičnih metrov vode. Pregradi Domajinci in Loče sta opisani v registru, medtem ko je pregrada Pikolud premajhna, da bi bila vanj vključena, a je kljub temu opisana na spletni strani združenja SLOCOLD v posebni rubriki.

3.1 Pregrada Loče

Pregrada Loče je nasuta zemeljska pregrada v kraju Loče nad naseljem Dobrova. Zgrajena je bila leta 1970 in tvori umetni zadrževalnik padavin s povodja Koprivnice, imenovan Šmartinsko jezero. Predvideni namen jezera je zadrževanje visokih voda Koprivnice, ribištvo, turizem ter šport in rekreacija. Do porušitve pregrade bi lahko prišlo zaradi nepredvidenih visokih voda ali pa zaradi človeškega dejavnika. Nepredvidene visoke vode bi predstavljale problem, če bi dotoki dalj časa presegali odtok iz jezera z več kot 1000-letno povratno dobo. Človeški dejavnik pa bi lahko vključeval slabo vzdrževanje opreme in objektov, malomarnost ali pa trenutno manj verjetna bojna dejanja, na primer vojno bombardiranje ali terorizem. Pregrada Loče je pomembna za okolico Celja, zato je zanj v nasprotju z drugimi manjšimi pregradami na voljo veliko podatkov.

3.1.1 Tehnični podatki

Preglednica 2: Tehnični podatki pregrade Loče (SLOCOLD 2016)

Telo pregrade	
Leto izgradnje	1970
Višina	16 m
Kota krone pregrade	267,75 m
Dolžina krone	205 m
Širina krone	3 m
Kota temeljev pregrade	251,30 m
Volumen	96.000 m ³
Akumulacijski bazen	
Maks. kota zajezbe	266,50 m
Normalna kota zajezbe	265,40 m
Volumen vode v bazenu	6.500.000 m ³
Površina zajezbe	1.130.000 m ²
Dolžina zajezbe	2 km
Prispevna površina	12.000 m ²
Prelivno polje	
Kapaciteta prelivanja	75 m ³ /s

3.2 Pregrada Domajinci

Pregrada Domajinci je nasuta zemeljska pregrada v bližini naselja Domajinci. Zgrajena je bila leta 1976 zaradi regulacije toka reke Ledave, ker je ta prej pogosto poplavljalna, in tvori Ledavsko jezero. Ker se v akumulacijo zaradi reke Ledave steka veliko mulja iz okoliških njiv, ki se nalaga na dno jezera, se njegova globina postopoma zmanjšuje. Zaradi tega in pa zaradi neurejenega čiščenja odpadnih voda, ki pritekajo vanj, jezero ni primerno za kopanje in se večinoma uporablja le za ribolov.

Do porušitve bi lahko prišlo zaradi nepredvidenih visokih voda, ki bi dalj časa presegle kapaciteto odvajanja.

3.2.1 Tehnični podatki

Preglednica 3: Tehnični podatki pregrade Domajinci (SLOCOLD 2016)

Telo pregrade	
Leto izgradnje	1976
Višina	8 m
Dolžina krone	180 m
Akumulacijski bazen	
Maks. kota zajezbe	225 m
Normalna kota zajezbe	223,5 m
Volumen vode v bazenu	5.660.000 m ³
Površina zajezbe	2.180.000 m ²
Dolžina zajezbe	1,5 km

3.3 Pregrada Pikolud

Pregrada Pikolud je nasuta zemeljska pregrada na območju mesta Nova Gorica. Načrtovana je bila za potrebe sploščitve visokovodnega vala in za zadrževanje visokih voda vodotoka Koren, zgrajena pa je bila leta 1989. Edina predvidena funkcija na območju akumulacije je bilo varovanje naselja pod pregrado. Ker sta bila pregrada in njeno območje dimenzionirana glede na 100-letne vode, največja nevarnost porušitve predstavlja ravno preseganje sposobnosti pregrade.

3.3.1 Tehnični podatki

Preglednica 4: Tehnični podatki pregrade Pikolud (SLOCOLD 2016)

Telo pregrade	
Leto izgradnje	1989
Višina	10 m
Dolžina krone	250 m
Volumen	11.000 m ³
Akumulacijski bazen	
Maks. kota zajezbe	100 m
Normalna kota zajezbe	99,7 m
Volumen vode v bazenu	868.000 m ³
Površina zajezbe	250.000 m ²
Dolžina zajezbe	1,3 km
Prispevna površina	5 km ²

4 IZRAČUN PORUŠITEV PREGRAD

Porušitev pregrad bomo izračunali s pomočjo programa SMPDBK. Izračunali bomo maksimalni iztok skozi porušno odprtino, maksimalne pretoke v dolvodnih profilih in časovne vrednosti, pri katerih nastopijo, čas vzpostavitve porušne odprtine, največje globine vode v dolvodnih profilih, časovne vrednosti teh globin ter časovne vrednosti, pri katerih se vode vrnejo nazaj pod kritično globino. Te količine bomo kasneje primerjali z že prej izračunanimi vrednostmi, ki jih je pridobila Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo in so bile kasneje zbrane v okviru projekta VODPREG.

4.1 Pridobitev vhodnih podatkov

Večino vhodnih podatkov smo pridobili iz poročil analiz, ki jih je opravila FGG in ne sovpadajo popolnoma s podatki društva SLOCOLD. Za namene diplomske naloge jih bomo uporabili, ker bodo tako primerjave rezultatov bolj merodajne. Večji problem je predstavljalo pridobivanje dimenzij prečnih prereзов dolvodnih profilov. Te smo v večini primerov pridobili s pomočjo topografskih kart, saj je dokumentacija analiz opravljena s strani FGG pomanjkljiva in teh podatkov v večini primerov ne vsebuje. Zaradi tega so vse dimenzije prečnih prereзов, pridobljene s pomočjo topografskih kart, le približne, a vseeno zadosti natančne za računsko analizo. Kar se tiče števila prečnih prereзов dolvodnih profilov in njihovih stacionaž, pa smo uporabili enake ali vsaj približno enake vrednosti kot v izračunih FGG.

4.2 Pregrada Loče

Pregrada Loče je ena izmed najbolj opisanih pregrad v Sloveniji. Zanj je na voljo veliko podatkov za izvedbo izračuna, saj jo je analiziralo veliko različnih družb. V diplomski nalogi bomo uporabili 3 različne nize podatkov, ki so podani v Rajar (1979). Razlikujejo se v koti gladine vode in povprečni širini porušne odprtine. Velik problem pri pregradi Loče pa se je pojavil pri izbiri in predpostavljajanju dimenzij ter stacionaž prečnih prereзов dolvodnih profilov. V projektni dokumentaciji so sicer podane razdalje posameznih profilov od pregrade, problem pa je nastopil pri določanju teh dolžin s topografskih kart, saj ne moremo točno določiti dolžin, kot so bile določene v projektu. V projektu je bilo določenih 30 prečnih dolvodnih profilov, program SMPDBK omogoča analizo do 25 prečnih profilov, mi pa smo jih predpostavili 18.

4.2.1 Vhodni podatki

Vhodni podatki za pregrado Loče, pridobljeni iz Rajar (1979):

1. niz:

Preglednica 5: Prvi niz vhodnih podatkov za pregrado Loče (Rajar, 1979)

Kota gladine vode	265,4 m
Kota dna porušitve	254 m
Povprečna širina odprtine	15 m
Površina akumulacije	1.070.000 m ²
Osnovni pretok pred poružitvijo	3 m ³ /s
Manningov koeficient hrapavosti	0,035
Število dolvodnih profilov	18

2. niz:

Preglednica 6: Drugi niz vhodnih podatkov za pregrado Loče (Rajar, 1979)

Kota gladine vode	263 m
Kota dna porušitve	254 m
Povprečna širina odprtine	13 m
Površina akumulacije	1.070.000 m ²
Osnovni pretok pred porušitvijo	3 m ³ /s
Manningov koeficient hrapavosti	0,035
Število dolvodnih profilov	18

3. niz:

Preglednica 7: Tretji niz vhodnih podatkov za pregrado Loče (Rajar, 1979)

Kota gladine vode	260 m
Kota dna porušitve	254 m
Povprečna širina odprtine	11 m
Površina akumulacije	1.070.000 m ²
Osnovni pretok pred porušitvijo	3 m ³ /s
Manningov koeficient hrapavosti	0,035
Število dolvodnih profilov	18

4.3 Pregrada Domajinci

Vsi vhodni podatki za pregrado Domajinci so bili pridobljeni iz Rajar (1978). Za analizo smo predpostavili 8 prečnih profilov, kolikor je predpostavljenih tudi v projektni dokumentaciji. Dimenzije prečnih profilov smo pridobili iz skic v projektni dokumentaciji, predpostavili pa smo pozicije stacionaž, ki so bile v dokumentaciji samo opisane. Zaradi dobrega opisa vhodnih podatkov v Rajar (1978) predpostavljamo, da bodo rezultati in njihova primerjava za oceno uporabnosti programa najbolj merodajni.

4.3.1 Vhodni podatki

Potrebni vhodni podatki za izračun iskanih količin, pridobljeni iz Rajar (1978):

Preglednica 8: Vhodni podatki za pregrado Domajinci (Rajar, 1978)

Kota gladine vode	223,5 m
Kota dna porušitve	215,7 m
Povprečna širina odprtine	14 m
Volumen vode v akumulaciji	8.300.000 m ³
Osnovni pretok pred porušitvijo	0 m ³ /s
Manningov koeficient hrapavosti	0,035
Število dolvodnih profilov	8

4.4 Pregrada Pikolud

V primeru pregrade Pikolud je bila večina vhodnih podatkov pridobljena iz Rajar (1989). V poročilu je bilo predpostavljeno 12 dolvodnih profilov, mi pa smo jih predpostavili 9, saj se po deveti stacionaži struga razširi in rezultati programa ne bi bili več merodajni.

4.4.1 Vhodni podatki

Vhodni podatki, pridobljeni iz Rajar (1989):

Preglednica 9: Vhodni podatki za pregrado Pikolud (Rajar, 1989)

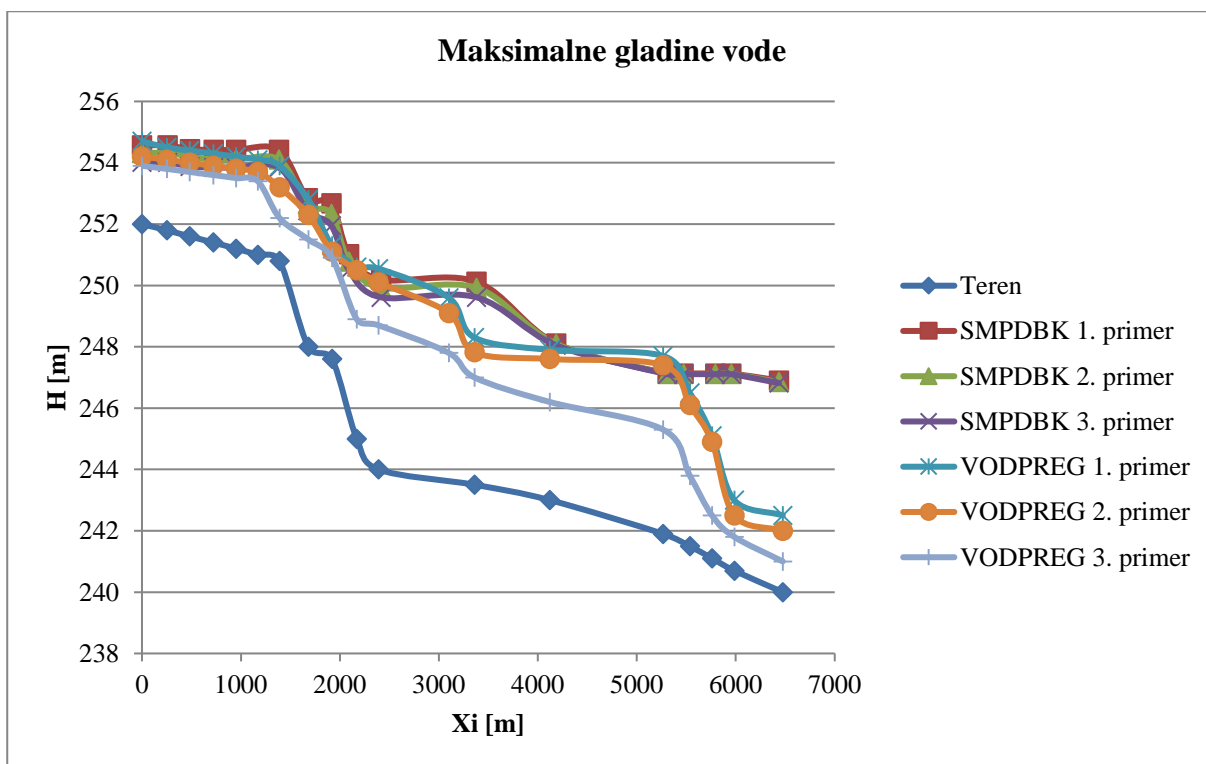
Kota gladine vode	99,7 m
Kota dna porušitve	92,9 m
Povprečna širina odprtine	8 m
Volumen vode v akumulaciji	950.000 m ³
Osnovni pretok pred porušitvijo	8 m ³ /s
Manningov koeficient hrapavosti	0,035
Število dolvodnih profilov	9

5 REZULTATI

Rezultate, pridobljene s pomočjo programa SMPDBK, bomo primerjali z rezultati popolnih metod. Zanima nas odstopanje rezultatov programa, ki uporablja poenostavljene St. Venantove enačbe, od rezultatov projekta, v katerem so bile uporabljene popolne St. Venantove enačbe. Primerjali bomo maksimalne gladine vode in časovne vrednosti potovanja čela valov v odvisnosti od razdalje dolvodnih profilov od pregrade ter maksimalne pretoke v določenih točkah na razdalji X od pregrade. Rezultati bodo prikazani v obliki grafov, podana pa bo tudi ocena odstopanja rezultatov programa od rezultatov projekta. Odstopanje rezultatov bomo ocenili tako, da bomo izračunali odstopanje vsake izmed računskih točk posebej in nato izračunali povprečje odstopanja. Problem pri primerjavi rezultatov je predstavljala oblika v kateri so bili podani rezultati pridobljeni s strani FGG. Ti so bili podani v obliki skeniranih risb grafov, kar je otežilo primerjavo rezultatov. Težavo smo reševali tako, da smo slike uvozili v Autocad in odčitavali vrednosti posameznih točk ter jih vnašali v Excel, kar pa prinaša določena odstopanja že v začetku.

5.1 Pregrada Loče

Maksimalne gladine vode:



Slika 3: Graf maksimalnih vrednosti gladine vode v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Loče

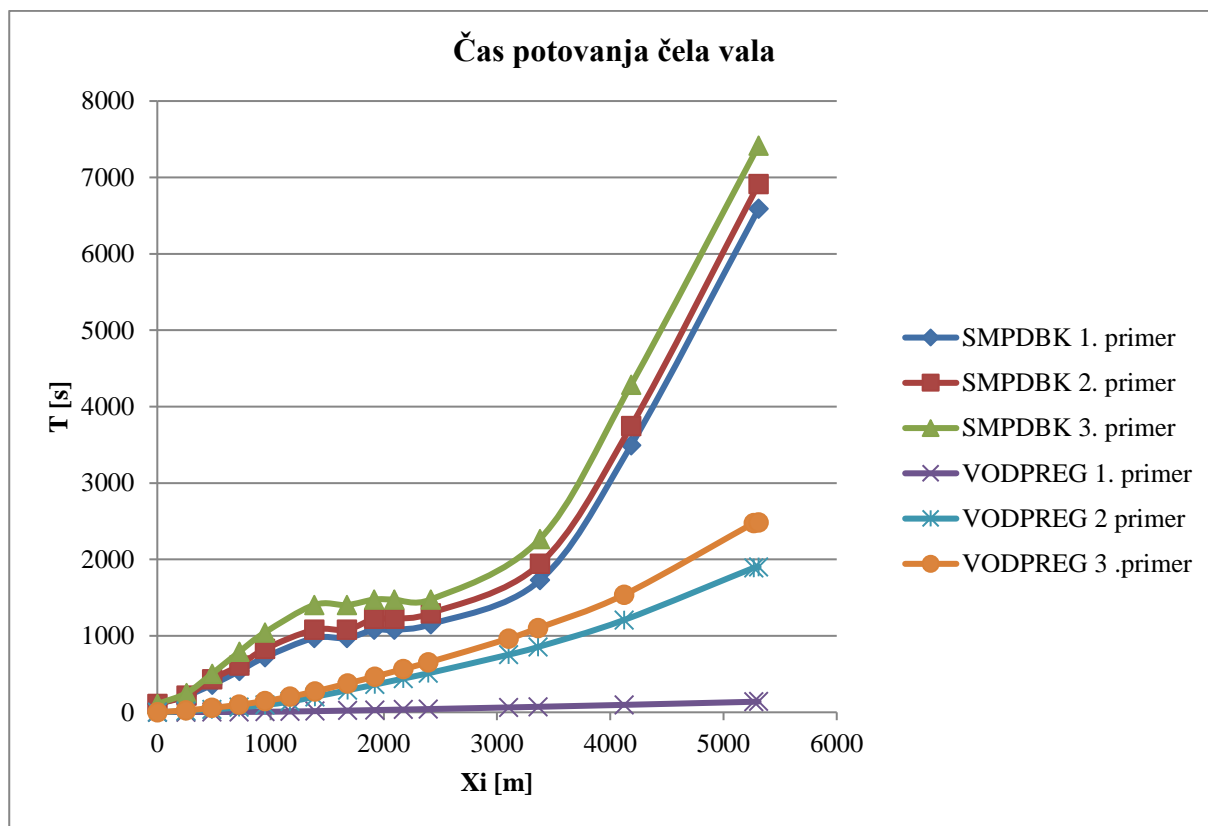
Zaradi konsistence s tekstom je priložena slika grafa maksimalnih gladin vode poleg tega pa je graf zaradi boljše preglednosti podan še posebej v prilogi C. Ker smo predpostavili računske profile na različnih stacionažah, kot so podane v Rajar (1979), smo rezultate programa SMPDBK interpolirali, da smo jih lahko primerjali. Za prvi niz podatkov smo tako zabeležili 10,46-% povprečno odstopanje, za drugi niz podatkov 10,02-% povprečno odstopanje ter za tretji niz podatkov 15,08-% povprečno odstopanje rezultatov programa SMPDBK od rezultatov popolne metode.

Maksimalni pretoki v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade:

Podobno kot pri primerjavi rezultatov maksimalnih vrednosti gladine vode, smo tudi pri primerjavi maksimalnih pretokov v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade rezultate programa SMPDBK interpolirali, da smo dobili vrednosti, ki ustrezajo stacionažam, navedenim v Rajar (1979).

Preglednica 10: Primerjava rezultatov maksimalnih pretokov v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade Loče

SMPDBK			
	1. niz podatkov	2. niz podatkov	3. niz podatkov
X [m]	Qmax [m ³ /s]	Qmax [m ³ /s]	Qmax [m ³ /s]
1000	624,12	384,45	160,29
3040	578,23	322,72	135,20
5265	222,98	168,31	132,08
VODPREG			
	1. niz podatkov	2. niz podatkov	3. niz podatkov
X [m]	Qmax [m ³ /s]	Qmax [m ³ /s]	Qmax [m ³ /s]
1000	1200	800	230
3040	1050	650	210
5265	1000	600	200
Odstopanje			
	1. niz podatkov	2. niz podatkov	3. niz podatkov
X [m]			
1000	47,99%	51,94%	30,31%
3040	44,93%	50,35%	35,62%
5265	77,70%	71,95%	33,96%
Povprečno odstopanje	56,87%	58,08%	33,30%

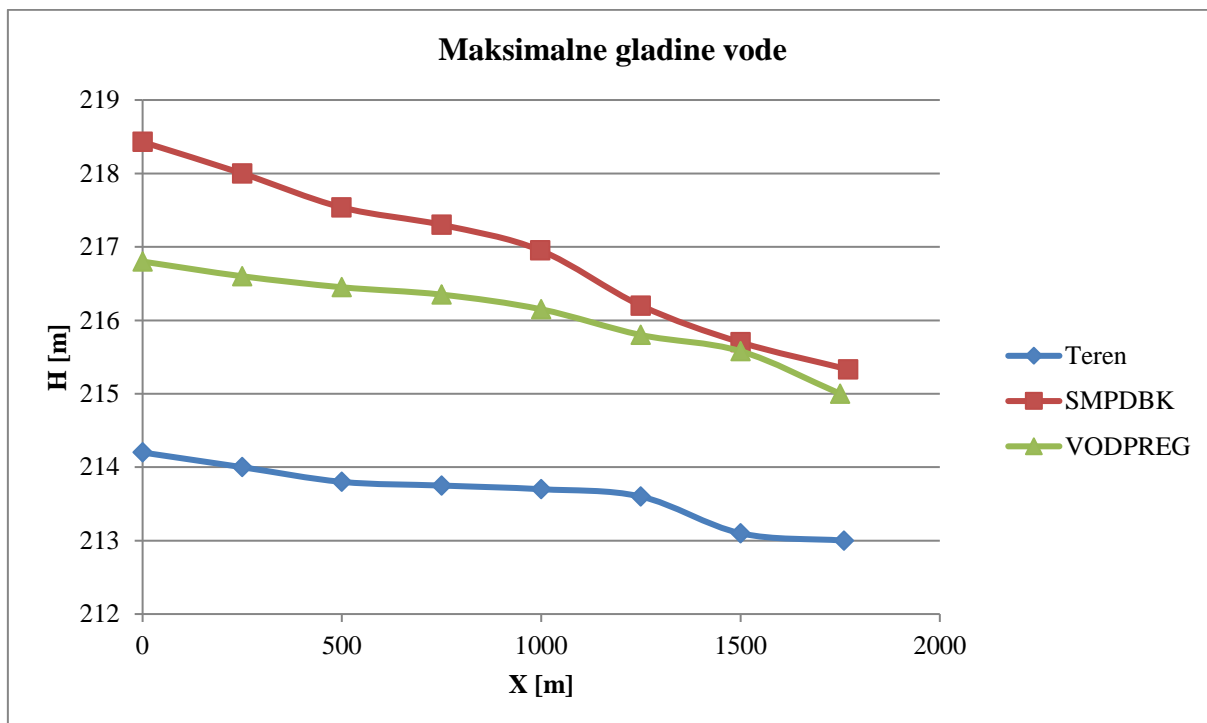
Čas potovanja čela vala:

Slika 4: Graf potovanja čela vala v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Loče

Tudi ta graf je zaradi boljše preglednosti podan še v prilogi C. Pri času potovanja čela vala smo zabeležili velika odstopanja rezultatov programa SMPDBK od rezultatov popolne metode, in sicer za prvi niz podatkov 86,05-% povprečno odstopanje, za drugi niz podatkov 83,68-% povprečno odstopanje in 81,49-% povprečno odstopanje za tretji niz podatkov.

5.2 Pregrada Domajinci

Maksimalne gladine vode:



Slika 5: Graf maksimalnih vrednost gladine vode v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Domajinci

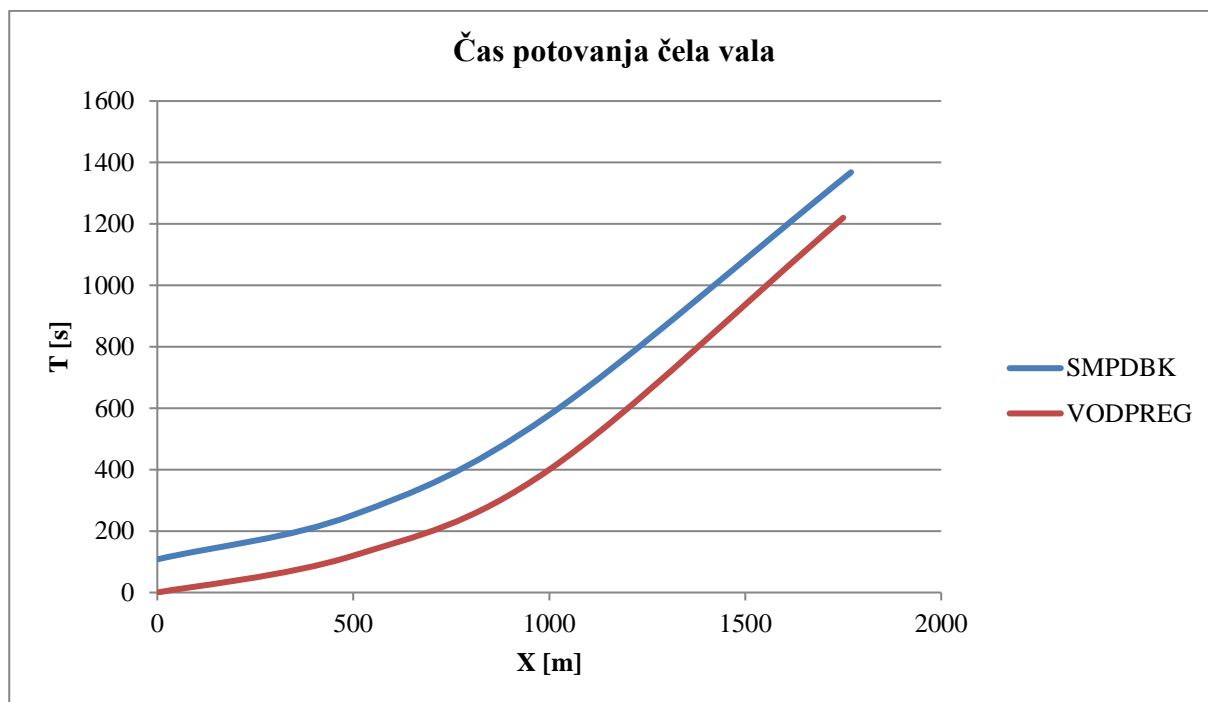
Pri rezultatih določanja maksimalne vrednosti gladine vode smo zabeležili 23,30-% povprečno relativno odstopanje rezultatov programa SMPDBK od rezultatov popolne metode.

Maksimalni pretoki v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade:

V Rajar (1978) je za pregrado Domajinci zabeležena le maksimalna vrednost pretoka ob pregradi, zato bomo to vrednost primerjali z našo izračunano vrednostjo.

Preglednica 11: Primerjava rezultatov maksimalnih pretokov v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade Domajinci

	SMPDBK	VODPREG
Qmax [m ³ /s]	503,64	750
Odstopanje:	32,85%	

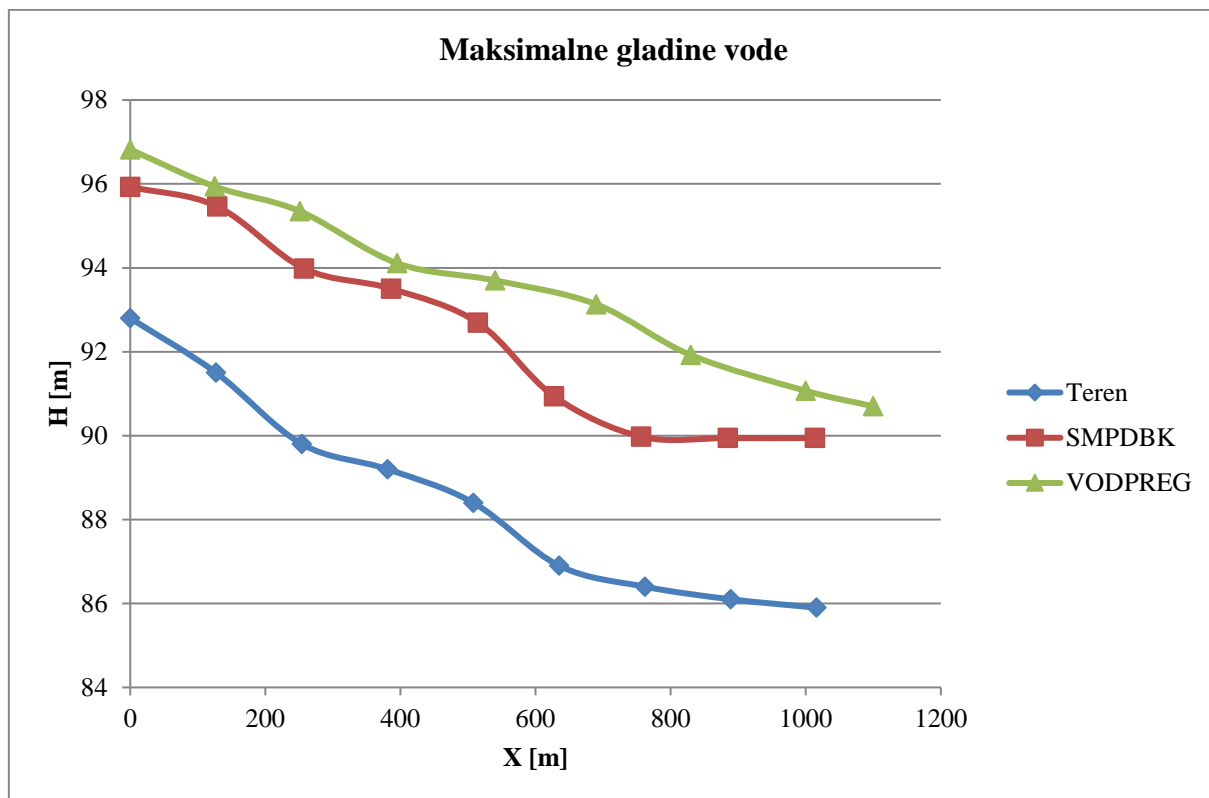
Čas potovanja čela vala:

Slika 6: Graf časa potovanja čela vala v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Domajinci

Pri primerjavi rezultatov časa potovanja čela vala smo zabeležili 42,50-% povprečno odstopanje rezultatov programa SMPDBK od rezultatov popolne metode.

5.3 Pregrada Pikolud

Maksimalne gladine vode:



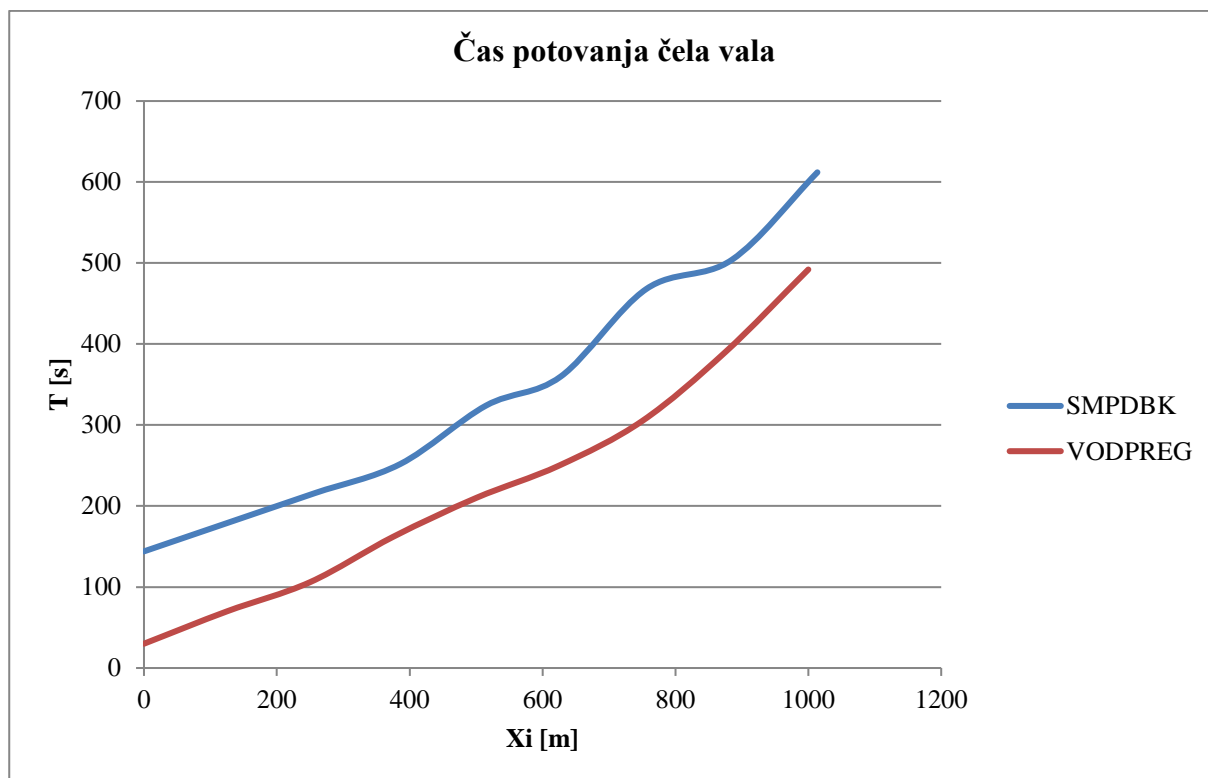
Slika 7: Graf maksimalnih vrednosti gladine vode v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Pikolud

Pri rezultatih določitve maksimalne gladine vode smo zabeležili 21,97-% povprečno relativno odstopanje rezultatov programa SMPDBK od rezultatov popolne metode.

Maksimalni pretoki v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade:

Preglednica 12: Primerjava rezultatov maksimalnih pretokov v odvisnosti od razdalje dolvodnega profila od pregrade Pikolud

SMPDBK		VODPREG			
X [m]	Qmax [m3/s]	X [m]	Qmax [m3/s]		
0	248,17	0	187	Odstopanje	24,65%
1013,67	208,78	1000	165	Odstopanje	20,97%
				Povprečno odstopanje	22,81%

Čas potovanja čela vala:

Slika 8: Graf časa potovanja čela v odvisnosti od razdalje računskega profila od pregrade Pikolud

Pri času potovanja čela vala smo zabeležili 41,08-% povprečno odstopanje rezultatov programa SMPDBK od rezultatov popolne metode.

5.4 Ugotovitve

Pri izračunih **maksimalnih vrednosti gladine** v vseh primerih opazimo relativno majhna relativna in absolutna odstopanja rezultatov. Relativna odstopanja se vrtijo v okolici 10-20%, medtem ko gladine absolutno odstopajo od 20 cm do 1,2 m, kar nakazuje, da je model v tem pogledu zelo dobro umerjen. Razlog za to je verjetno, da oblika gladine vode ni toliko odvisna od oblike terena, po katerem se poplavni val širi.

Maksimalni pretoki pri manjših absolutnih vrednostih odstopajo do 30%, pri večjih vrednostih pa do 50%. Razlog za tako velika odstopanja je verjetno v definiranih oblikah prečnih prereзов dolvodnih profilov, po katerih se poplavni val širi, saj smo njihovo obliko določili s pomočjo topografskih kart. Problematično je, da so pri pregradah Loče in Domajinci pretoki, izračunani s programom SMPDBK, manjši od pretokov, dobljenih z uporabo popolnih St. Venantovih enačb pri analizi FGG.

Pri **časovnih vrednostih propagacije vala** nas program SMPDBK omejuje, saj največji pretok predpostavi šele pri popolni porušitvi pregrade, kar poveča vse čase potovanja valov in zaradi tega ustvari velika odstopanja v rezultatih.

Iz primerjav rezultatov lahko zaključimo, da je najpomembnejši dejavnik pri izračunih prav oblika prizmatičnega profila, po katerem se po porušitvi pregrade širi voda, zato rezultati pri pregradi Loče

močno odstopajo tudi v primerjavi s preostalima dvema pregradama. Temu se lahko izognemo z bolj natančnim definiranjem geometrijskih karakteristik prečnih prereзов računskih profilov. Problem lahko rešimo tako, da uporabimo podatke, pridobljene s pomočjo posnetkov LIDAR, namesto da podatke pridobivamo s pomočjo topografskih kart. Čeprav smo v okviru te naloge predpostavili, da so oblike prečnih profilov, pridobljene s pomočjo topografskih kart, za uporabo v izračunih dovolj natančne, se je izkazalo, da so ravno ti parametri najpomembnejši in jih je treba bolje definirati.

6 ZAKLJUČEK

V nalogi smo izvedli izračun hidravličnih posledic porušitve pregrad, in sicer s pomočjo poenostavljenega enodimenzijskega programa SMPDBK. Rezultate, pridobljene s tem programom, smo primerjali z rezultati, pridobljenimi z uporabo popolnih St. Venantovih enačb.

Ugotovili smo, da program za delovanje ne potrebuje veliko vhodnih podatkov, je pa zelo odvisen od tega, kako natančno opredelimo dimenzije prečnih prerezov računskih profilov, po katerih se poplavni val širi. Dodatna omejitev je tudi, da je program enodimenzijski, kar pomeni, da struga, po kateri se val širi, ne sme imeti prevelikih razširitev, ker se tam tok lahko spremeni v dvodimenzijskega, zaradi česar rezultati in izračuni niso več natančni.

Čeprav je uporaba programa razmeroma enostavna in ne zahteva veliko vhodnih parametrov, pa je program za evropskega uporabnika lahko zapleten, saj mora vse vrednosti pretvarjati iz metričnih v imperialne merske enote in obratno.

Na podlagi dobljenih rezultatov lahko trdimo, da je program primeren za uporabo v zgodnjih fazah projektov, ko potrebujemo samo približno oceno posledic porušitve pregrad, za bolj natančne izračune pa je treba uporabiti programe, ki za izračun hidravličnih posledic porušitve pregrad uporabljajo modele s popolnimi St. Venantovimi enačbami. Nenatančnost modela, uporabljenega v programu, lahko pripišemo tudi starosti programa, saj v tistem času ni bilo na voljo tako zmogljivih računalnikov, danes pa to ne predstavlja več problema. Program lahko nadomestimo z modelom HEC-RAS, ki je prav tako zelo enostaven za uporabo, saj od uporabnika ne zahteva posebne izurjenosti, poleg tega pa v svojih izračunih uporablja popolne St. Venantove enačbe, kar je tudi razlog, da je postal zelo popularno orodje za izvajanje večine hidravličnih izračunov, uporabljenih v študijah po celem svetu.

VIRI

Domajinci. 2016.

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Domajinci> (Pridobljeno 23. 8. 2016.)

Društvo SLOCOLD. 2016.

<http://www.slocold.si/index.htm> (Pridobljeno 30.8. 2016.)

Ledavsko jezero. 2016.

https://sl.wikipedia.org/wiki/Ledavsko_jezero (Pridobljeno 23. 8. 2016.)

Organizacija ICOLD. 2016.

<http://www.icold-cigb.net/> (Pridobljeno 30. 8. 2016.)

Podobnik, I., Ponikvar, J. 2009. Pregled stanja zadrževalnikov na območju povodja reke Soče - Vogršček, Pikolud, Pikol: Ljubljana, UL FGG: 39 str.

<http://mvd20.com/LETO2009/R6.pdf> (Pridobljeno 24. 8. 2016.)

Rajar, R. 1978. Hidravlični preračun posledic porušitve pregrade Domajinci. Ljubljana, UL FAGG: 9 str.

Rajar, R. 1979. Račun vala, ki bi nastal pri poružitvi pregrade Loče. Ljubljana, UL FAGG: 13 str.

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

Rajar, R., Četina, M., Zakrajšek M. 1989. Račun vala ki bi nastal pri poružitvi pregrade Pikolud. Ljubljana, UL FGG: 13 str.

Sylvestre, J., 2016. Navodila za uporabo programa SMPDBK. Osebna komunikacija. (3. 9. 2016.)

Wetmore, J. N., Fead, D. L. (ur.), Lewis, J. M.(ur.), Wiele, S. M.(ur.). 1991. The NWS Simplified Dam-Break flood forecasting model. Silver Spring, National Weather Service: 46 str.

Zupančič, Z., Senič, D. 2008. Načrt zaščite in reševanja ob poružitvi pregrade Loče na akumulaciji Šmartinsko jezero Celje. Ljubljana, UL FGG: 19 str.

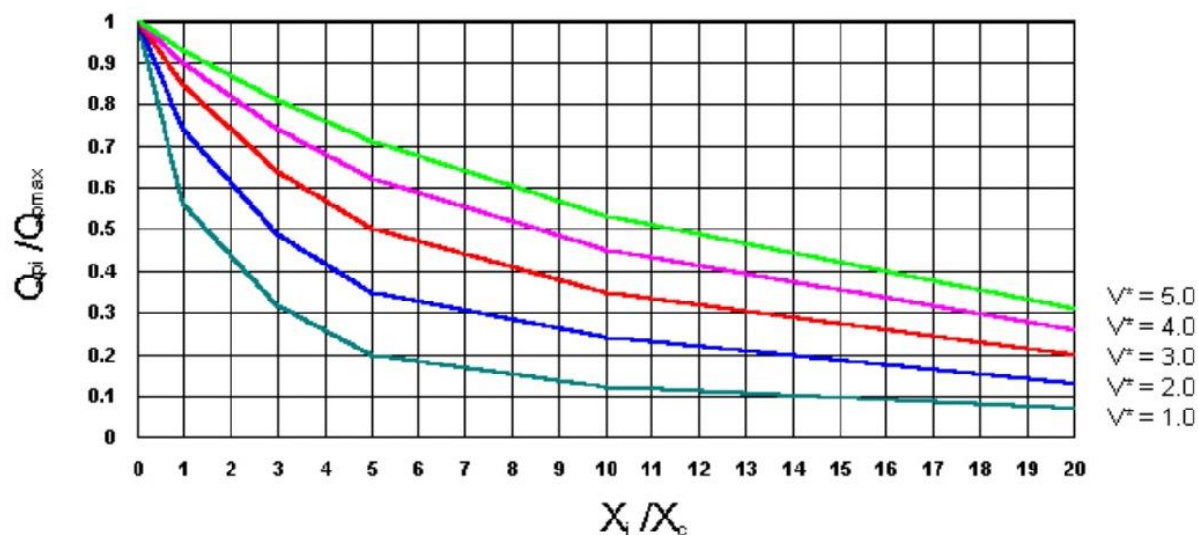
http://www.nivo.si/filelib/vgd/nart_zir-poruitev_pregrade_martinsko-nivo.pdf (Pridobljeno 24. 8. 2016.)

PRILOGE**PRILOGA A: BREZDIMENZIJSKE PROPAGACIJSKE KRIVULJE****PRILOGA B: GRAFIČNI PRIKAZ REZULTATOV ZNOTRAJ GRAFIČNEGA
UPORABNIŠKEGA VMESNIKA SMPDBK GUI****PRILOGA C: GRAFIČNA PRIMERJAVA REZULTATOV PRI PREGRADI LOČE**

PRILOGA A: BREZDIMENZIJSKE PROPAGACIJSKE KRIVULJE

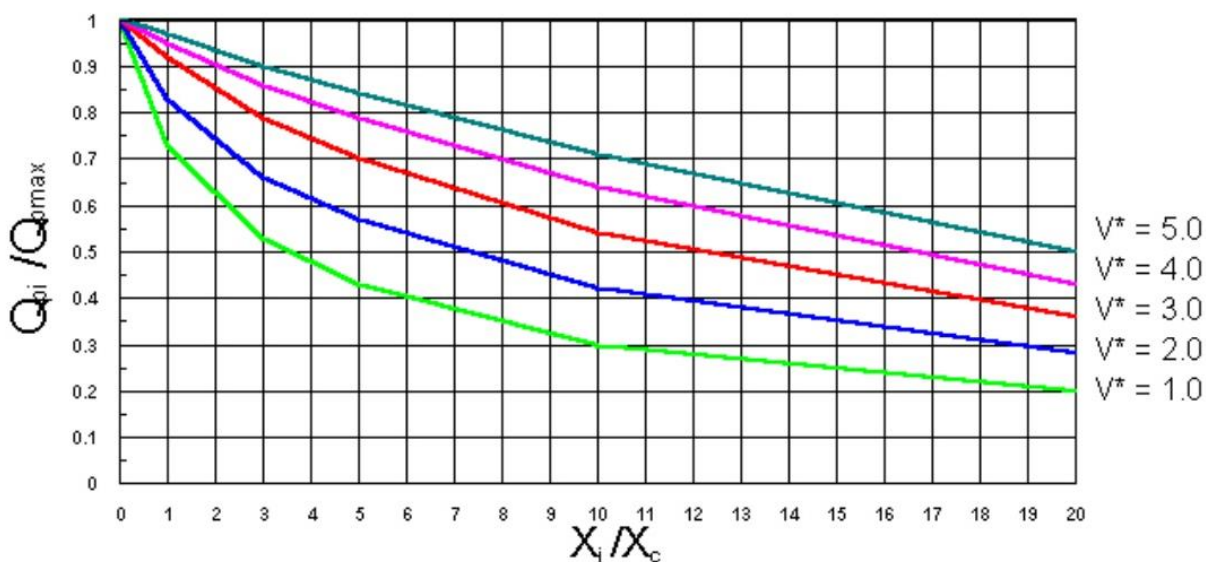
Simplified Dambreak Routing Curves

$F = 0.25$



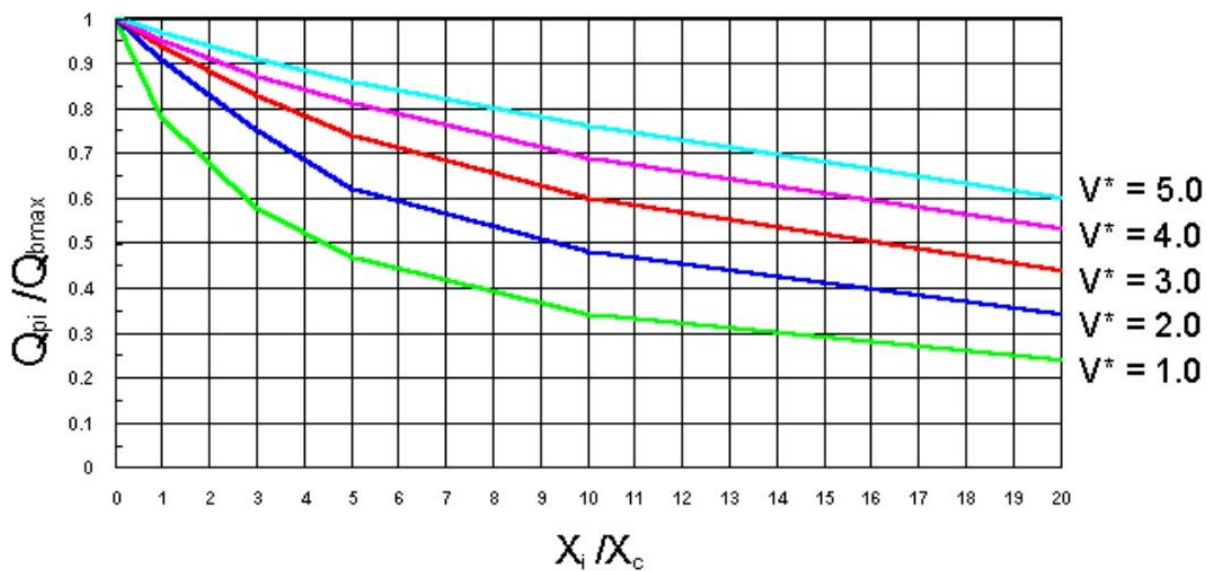
Simplified Dambreak Routing Curves

$F = 0.50$

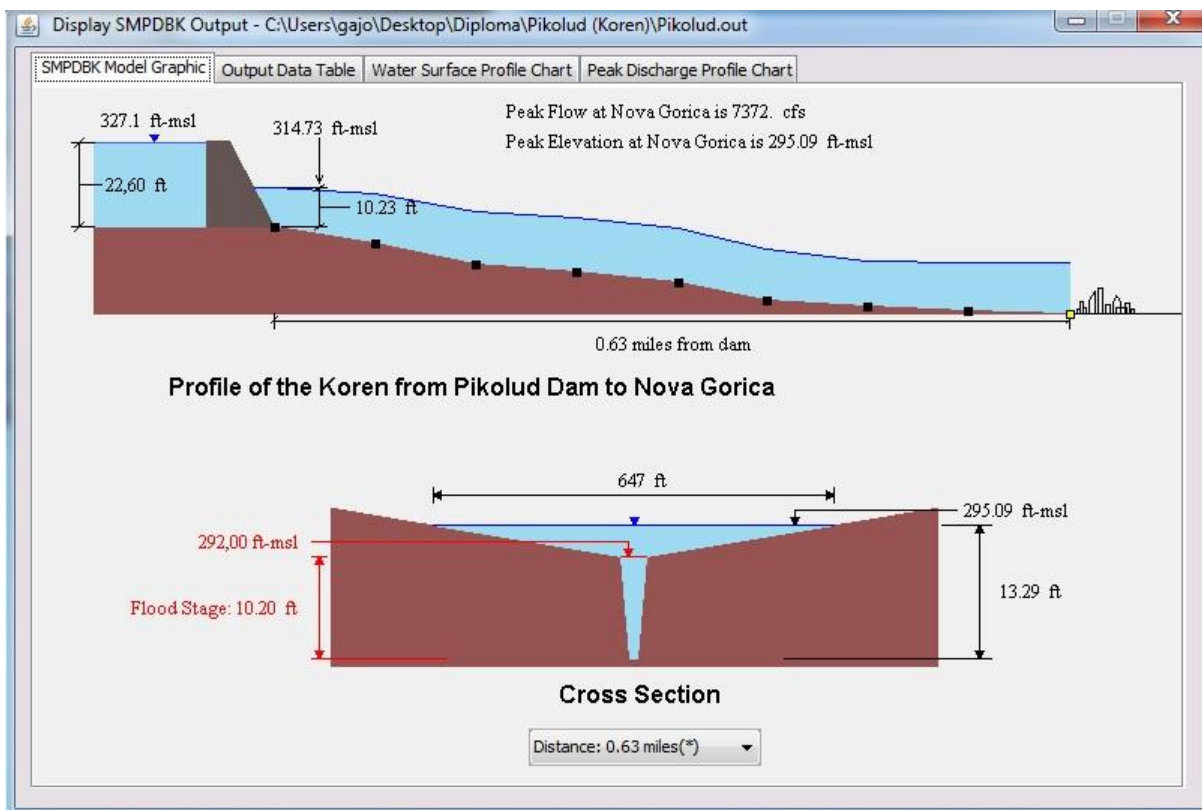


Simplified Dambreak Routing Curves

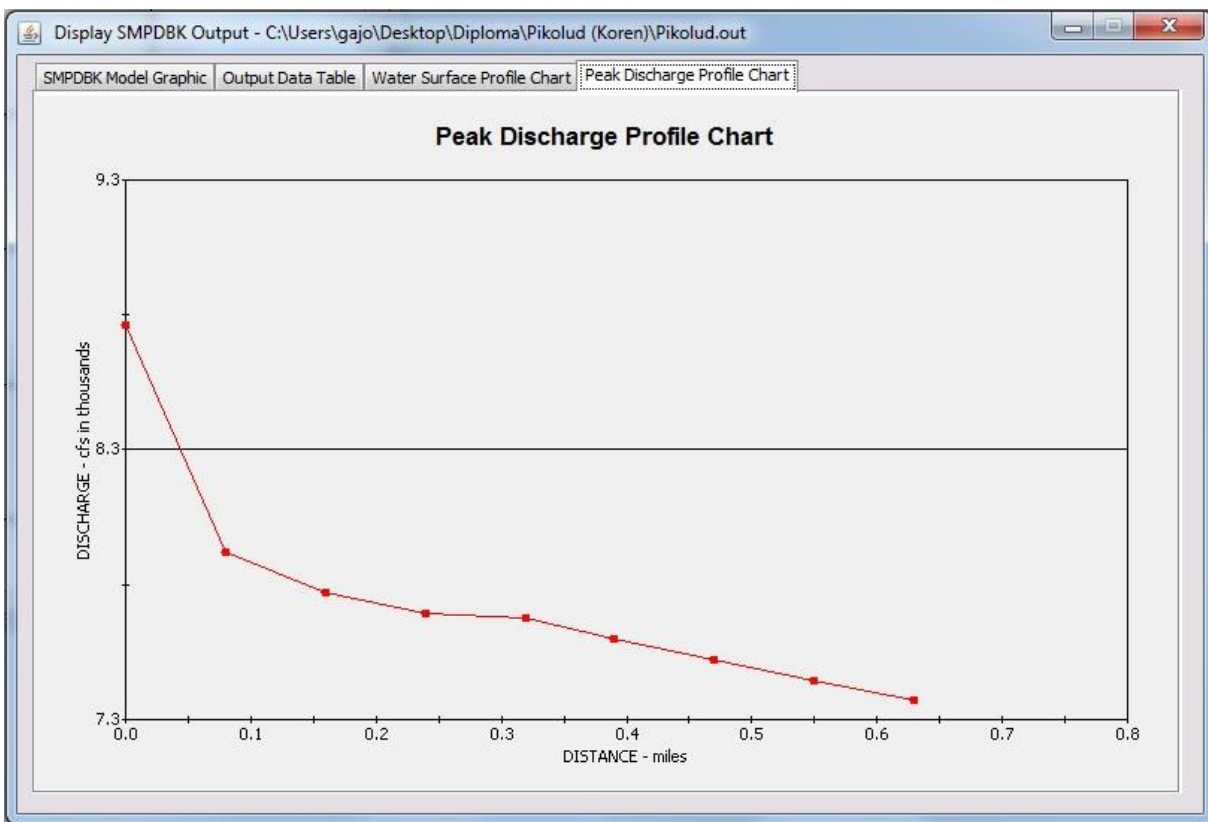
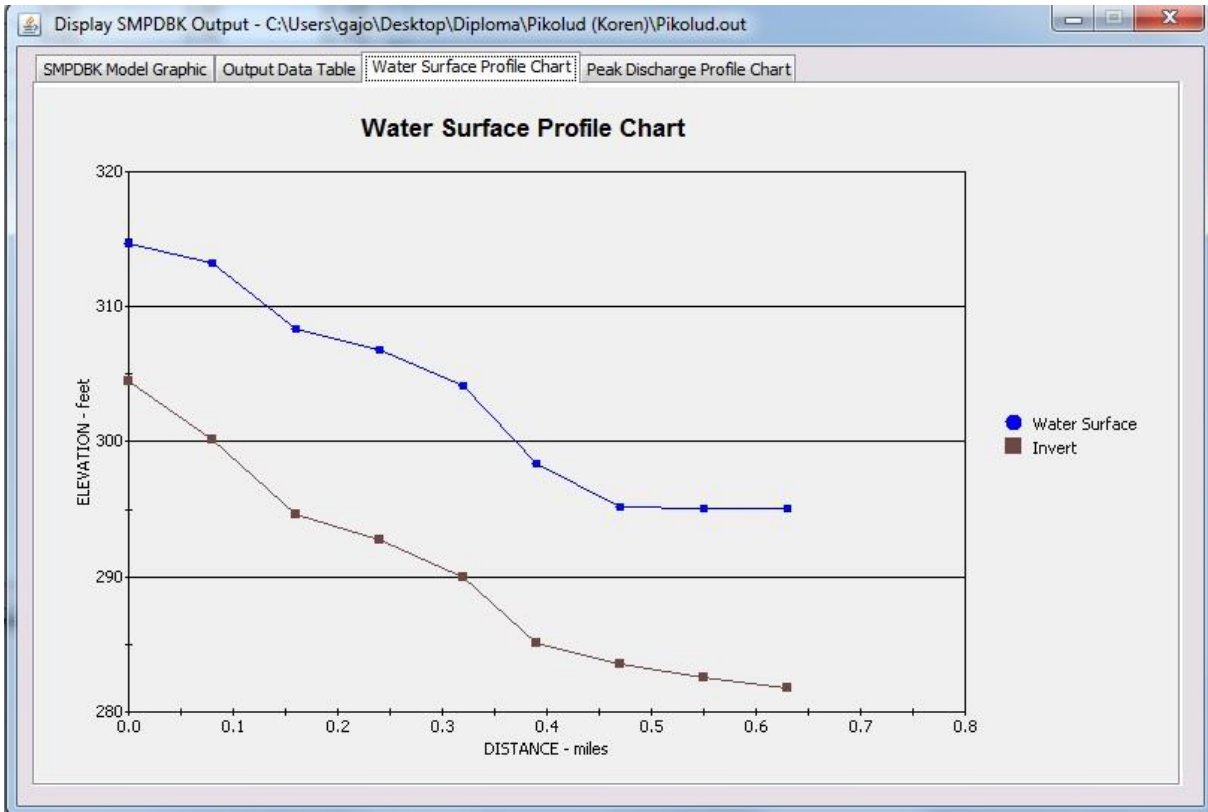
$F = 0.75$



PRILOGA B: GRAFIČNI PRIKAZ REZULTATOV ZNOTRAJ GRAFIČNEGA UPORABNIŠKEGA VMESNIKA SMPDBK GUI



River Mile	Max Flow	Max Elevation	Max Depth	Max Depth Time	Flood Time	De-flood Time	Flood Depth
0.00	8763.	314.73	10.23	0.04	0.01	1.72	6.60
0.08	7921.	313.20	13.00	0.05	0.04	0.54	10.50
0.16	7770.	308.34	13.74	0.06	0.00	0.00	11.80
0.24	7692.	306.77	14.07	0.07	0.00	0.00	12.10
0.32	7674.	304.10	14.10	0.09	0.00	0.00	12.50
0.39	7597.	298.35	13.25	0.10	0.10	0.20	11.50
0.47	7521.	295.20	11.70	0.13	0.00	0.00	12.10
0.55	7446.	295.09	12.59	0.14	0.13	1.40	10.20
0.63	7372.	295.09	13.29	0.17	0.15	1.61	10.20



PRILOGA C: GRAFIČNA PRIMERJAVA REZULTATOV PRI PREGRADI LOČE



