

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:

Umek, A., 2016. Uporaba poenostavljenih metod za račun valov vsled porušitev pregrad. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Četina, M.): 71 str.

Datum arhiviranja: 02-09-2016

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:

Umek, A., 2016. Uporaba poenostavljenih metod za račun valov vsled porušitev pregrad. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Četina, M.): 71 pp.

Archiving Date: 02-09-2016

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 VODARSTVO IN  
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

**ANDREJ UMEK**

**UPORABA POENOSTAVLJENIH METOD ZA RAČUN  
VALOV VSLED PORUŠITEV PREGRAD**

Diplomska naloga št.: 305/VKI

**APPLICATION OF SOMPLIFIED METHODS FOR DAM-  
BREAK WAVES COMPUTATION**

Graduation thesis No.: 305/VKI

**Mentor:**

prof. dr. Matjaž Četina

Ljubljana, 30. 08. 2016

Ta stran je namenoma prazna.

**STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA****Stran z napako****Vrstica z napako****Namesto****Naj bo**

Spodaj podpisani študent, vpisna številka 26105706, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Uporaba poenostavljenih metod za račun valov vsled porušitev pregrad

### 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:

\_\_\_\_\_

**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

UDK:	626.8:911.372.7(043.2)
Avtor:	Andrej Umek
Mentor:	prof. dr. Matjaž Četina
Naslov:	Uporaba poenostavljenih metod za račun valov vsled porušitev pregrad
Obseg in oprema:	71 str., 17 pregl., 59 sl., 24 en.
Ključne besede:	Zemeljska pregrada, porušitev pregrade, porušitveni valovi, pretok, St.Venant-ove enačbe, poenostavljena metoda brezdimenzijskih koeficientov, Vogršček, Vanganel, Loče

**IZVLEČEK**

V diplomski nalogi so s poenostavljenimi metodami preračunani parametri porušitvenih valov, za izbrane pregrade, za katere obstajajo računi porušitvenih valov s polnimi St.Venant-ovimi enačbami. Na kratko so najprej predstavljene metode in rezultati računov porušitvenih valov s polnimi St. Venant-ovi enačbami za izbrane pregrade, ki bodo služili za nadaljnjo primerjavo. V nadaljevanju je nato opisana poenostavljena metoda za računanje porušitvenih valov. Metoda vsebuje brezdimenzijske koeficiente in dva nomograma, s katerima določimo tri vrednosti. Te vrednosti so največji pretok na pregradi ter čas in razdalja, ko se pretok porušitvenega vala zmanjša na polovično vrednost glede na vrednost največjega pretoka na pregradi ob porušitvi. Pred izračunom so opisane metode in problematika določevanja vhodnih podatkov, ki so potrebni za izračun. V osrednjem delu diplomske naloge so izvedeni izračuni parametrov porušitvenih valov. Rezultate, dobljene s poenostavljenimi metodami, smo primerjali z rezultati, dobljenimi s polnimi St.Venant-ovimi enačbami. Na osnovi opravljene analize odstopanj med obema metodama smo ocenili točnost poenostavljenih metod in njihovo uporabnost za račun porušitvenih valov v hidrotehnični praksi.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

UDC: 626.8:911.372.7(043.2)

Author: Andrej Umek

Supervisor: prof. dr. Matjaž Četina

Title: Application of simplified methods for dam-break waves computation

Notes:: 71 p., 17 tab., 59 fig., 24 eq.

Key words: Earth dam, dam failure, dam-break wave, flow, St.Venant 's equations, simplified method of dimensionless coefficients, Vogršček, Vanganel, Loče

## **ABSTRACT**

The thesis uses the simplified methods for calculating the dam-break wave parameters for selected dams, for which the dam-break wave calculations with the full Saint-Venant equations also exist. First, the methods and the results of the dam-break wave calculations with the full Saint-Venant equations for selected dams are briefly presented. They will serve as a basis for further comparison. Then, the simplified method for calculating the dam-break waves is presented. This method contains dimensionless coefficients and two nomograms for determining three values. These values are the maximum flow at the dam, the time, and the distance, when the flow of the dam-break wave is reduced to half the value by reference to the value of the maximum flow at the dam at the time of the dam break. The methods and the problem of determining the input data needed for the calculation are described, followed by the calculation itself. The calculations of the dam-break wave parameters can be found in the main part of the thesis. The results derived from the simplified methods were compared to the results derived from the full Saint-Venant equations. The analysis of the deviations between the methods served as a basis for evaluating the accuracy of the simplified methods and their usefulness in the dam-break wave calculation in the hydraulic engineering practice.

**ZAHVALA**

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

Še posebej se zahvaljujem svojim staršem, ženi in hčerki, ki so mi v času študija stali ob strani.



## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Popolne metode za izračun porušitvenih valov .....</b>	<b>3</b>
2.1	Osnovne enačbe.....	3
2.1.1	Kontinuitetna enačba .....	3
2.1.2	Dinamična enačba .....	4
2.1.3	Druge oblike Saint-Venant-ove enačbe .....	4
2.1.4	Konservativna oblika Saint-Venant-ove enačbe .....	4
2.2	Uporaba enačb v praksi .....	5
<b>3</b>	<b>Rezultati popolnih metod za račun porušitvenih valov .....</b>	<b>7</b>
3.1	Porušitveni val za pregrado Vogršček .....	7
3.1.1	Podatki za račun .....	7
3.1.2	Rezultati .....	7
3.2	Porušitveni valovi za pregrado Vanganel .....	8
3.2.1	Podatki za račun .....	8
3.2.2	Rezultati .....	9
3.3	Porušitveni valovi za pregrado Loče.....	10
3.3.1	Podatki za račun .....	11
3.3.2	Rezultati .....	11
<b>4</b>	<b>Poenostavljene metode brezdimenzijskih parametrov .....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Vhodni podatki .....</b>	<b>19</b>

5.1	Določitev porušitvenih modelov .....	19
5.2	Določitev vhodnih podatkov.....	19
5.2.1	Podatki o pregradi.....	20
5.2.2	Podatki o akumulaciji .....	21
5.2.3	Podatki o poplavnem območju.....	31
<b>6</b>	<b>Izračun s poenostavljenimi metodami.....</b>	<b>33</b>
6.1	Pregrada Vogršček – izračun po poenostavljenih metodah.....	33
6.1.1	Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vogršček za trenutno popolno porušitev pregrade .....	35
6.1.2	Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vogršček za trenutno delno porušitev pregrade .....	36
6.2	Pregrada Vanganel – izračun po poenostavljenih metodah.....	38
6.2.1	Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vanganel za trenutno delno porušitev pregrade – primer 1 .....	38
6.2.2	Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vanganel za trenutno delno porušitev pregrade – primer 2 .....	43
6.2.3	Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vanganel za trenutno delno porušitev pregrade – primer 3 .....	45
6.3	Pregrada Loče – izračun po poenostavljenih metodah .....	49
6.3.1	Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Loče za trenutno delno porušitev pregrade – primer 1 .....	49
6.3.2	Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Loče za trenutno delno porušitev pregrade – primer 2 .....	52
6.3.3	Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Loče za trenutno delno porušitev pregrade – primer 3 .....	55
<b>7</b>	<b>Analiza rezultatov .....</b>	<b>59</b>

7.1	Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vogršček .....	59
7.2	Primerjava rezultatov obeh metod za delno porušitev pregrade Vogršček.....	60
7.3	Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vanganel .....	62
7.3.1	Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vanganel za primer 1 .....	62
7.3.2	Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vanganel za primer 2.....	63
7.3.3	Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vanganel za primer 3.....	64
7.4	Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Loče.....	65
<b>8</b>	<b>Zaključki .....</b>	<b>67</b>
<b>Viri</b>	<b>.....</b>	<b>70</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Rezultati računa porušitvenega vala za pregrado Vogršček (prirejeno po Rajar, 1983) ..8	8
Preglednica 2: Rezultati računov porušitvenih valov za pregrado Loče (prirejeno po Rajar, 1979) .....11	11
Preglednica 3: Interpolirane vrednosti rezultatov dobljenih s popolno metodo za pregrado Vogršček.60	60
Preglednica 4: Primerjava rezultatov za pregrado Vogršček .....62	62
Preglednica 5: Ekstrapolacija rezultatov, dobljenih s popolno metodo za pregrado Vanganel za primer 1 .....63	63
Preglednica 6: Primerjava rezultatov za pregrado Vanganel za primer 1 .....63	63
Preglednica 7: Interpolacija rezultatov dobljenih s popolno metode za pregrado Vanganel za primer 2 .....63	63
Preglednica 8: Določitev časa, ko je na razdalji $x$ največji pretok za pregrado Vanganel - primer 2 ....64	64
Preglednica 9: Primerjava rezultatov obeh metod za pregrado Vanganel za primer 2 .....64	64
Preglednica 10: Interpolacija rezultatov, dobljenih pri popolni metodi za pregrado Vanganel za primer 3 .....64	64
Preglednica 11: Določitev časa, ko je na razdalji $x$ največji pretok za pregrado Vanganel - primer 3 ..65	65
Preglednica 12: Primerjava rezultatov za pregrado Vanganel za primer 3.....65	65
Preglednica 13: Vrednosti pretokov pri porušitvi pregrade Loče z metodo s polnimi enačbami .....65	65
Preglednica 14: Primerjava rezultatov za pregrado Loče za primer 1 .....65	65
Preglednica 15: Primerjava rezultatov za pregrado Loče za primer 2 .....66	66
Preglednica 16: Primerjava rezultatov za pregrado Loče za primer 3 .....66	66
Preglednica 17: Odstopanje rezultatov pri uporabi popolne in poenostavljene metode za računanje poplavnih valov .....67	67

## KAZALO SLIK

Slika 1: Nomogram za določanje parametra $q$ .....	16
Slika 2: Nomogram za določanje parametra $\tau$ .....	17
Slika 3: Prečni presek pregrade in dela pregrade, ki se poruši.....	20
Slika 4: Primer izpisa podatkov o 3D modelu iz AutoCad-a.....	20
Slika 5: Primer vhodnih podatkov za DMR v ASCII obliki.....	22
Slika 6: Primer določanja izohips iz OTR-ja za Šmartinsko jezero brez DOF-a (levo) in z DOF-om (desno).....	22
Slika 7: Višinske linije za pobočje ob Šmartinskem jezeru.....	23
Slika 8: Primerjava višinske linije s koto 280 m.....	24
Slika 9: Določitev linije vodne gladine na podlagi DOF-a za Šmartinsko jezero.....	25
Slika 10: Kombinacija kart z izohipsami in DOF-om za Šmartinsko jezero.....	26
Slika 11: Določitev glavne oz. primarne linije dna akumulacije za Šmartinsko jezero.....	27
Slika 12: Določitev sekundarnih linij dna akumulacije za Šmartinsko jezero.....	28
Slika 13: Določitev poligona na najvišjo možno koto vodne gladine za Šmartinsko jezero.....	29
Slika 14: Določitev poligonov, kjer vsak poligon predstavlja svojo koto za Šmartinsko jezero.....	30
Slika 15: 3D model poligonov, kjer vsak poligon predstavlja svojo koto.....	30
Slika 16: Primer izpisa podatkov o 3D modelu iz AutoCAD-a.....	31
Slika 17: Določanje parametra $i$ .....	32
Slika 18: Vzdolžni presek in tloris 3D modela pregrade in akumulacije Vogršček.....	33
Slika 19: Podatki za akumulacijo Vogršček.....	34

---

Slika 20: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Vogršček za trenutno popolno porušitev pregrade .....	34
Slika 21: Določitev naklona dna za poplavno območje pod pregrado Vogršček. ....	35
Slika 22: Prečni presek pregrade, ki se poruši .....	35
Slika 23: Podatki za pregrado Vogršček - popolna trenutna porušitev .....	35
Slika 24: Podatki za pregrado Vogršček - delna trenutna porušitev.....	37
Slika 25: Prečni presek neporušenega dela pregrade Vogršček - delna trenutna porušitev .....	37
Slika 26: Podatki za akumulacijo Vanganel - primer 1.....	39
Slika 27: 3D model pregrade Vanganel - primer 1 .....	40
Slika 28: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Vanganel - primer 1.....	40
Slika 29: Določitev naklona dna za poplavno območje pod pregrado Vanganel. ....	41
Slika 30: Prečni presek neporušenega dela pregrade Vanganel – primer 1.....	41
Slika 31: Podatki za pregrado Vanganel - primer 1 .....	42
Slika 32: Podatki za akumulacijo Vanganel - primer 2.....	43
Slika 33: 3D model pregrade Vanganel - primer 2 .....	43
Slika 34: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Vanganel - primer 2.....	44
Slika 35: Prečni presek neporušenega dela pregrade Vanganel – primer 2.....	44
Slika 36: Podatki za pregrado Vanganel - primer 2 .....	44
Slika 37: Podatki za akumulacijo Vanganel - primer 3.....	46
Slika 38: 3D model pregrade Vanganel - primer 3 .....	46
Slika 39: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Vanganel - primer 3.....	47
Slika 40: Prečni presek neporušenega dela pregrade Vanganel – primer 3.....	47
Slika 41: Podatki za pregrado Vanganel - primer 3 .....	48

Slika 42: Podatki za akumulacijo Šmartinsko jezero - primer 1 .....	49
Slika 43: 3D model pregrade Loče - primer 1 .....	50
Slika 44: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Loče - primer 1 .....	50
Slika 45: Prečni presek neporušenega dela pregrade Loče – primer 1 .....	51
Slika 46: Podatki za pregrado Loče - primer 1 .....	51
Slika 47: Podatki za akumulacijo Šmartinsko jezero - primer 2 .....	52
Slika 48: 3D model pregrade Loče - primer 2 .....	53
Slika 49: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Loče - primer 2 .....	53
Slika 50: Prečni presek neporušenega dela pregrade Loče – primer 2 .....	54
Slika 51: Podatki za pregrado Loče - primer 2 .....	54
Slika 52: Podatki za akumulacijo Šmartinsko jezero - primer 3 .....	55
Slika 53: 3D model pregrade Loče - primer 3 .....	56
Slika 54: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Loče - primer 3 .....	56
Slika 55: Prečni presek neporušenega dela pregrade Loče – primer 3 .....	57
Slika 56: Podatki za pregrado Loče - primer 3 .....	57
Slika 57: Graf odvisnosti pretoka od oddaljenosti od pregrade Vogršček .....	60
Slika 58: Graf odvisnosti pretoka od oddaljenosti od pregrade za pregrado Vogršček .....	61
Slika 59: Graf odvisnosti časa od oddaljenosti od pregrade za pregrado Vogršček .....	61

**KAZALO PRILOG****PRILOGE A:**

PRILOGA A.1: IZSEK IZ RAČUNALNIŠKEGA IZPISA PROGRAMA LAXPOR ZA RAČUN PORUŠITVENAGA VALA PREGRADE VANGANEL - VARIANTA A

PRILOGA A.2: IZSEK IZ RAČUNALNIŠKEGA IZPISA PROGRAMA LAXPOR ZA RAČUN PORUŠITVENAGA VALA PREGRADE VANGANEL - VARIANTA B

PRILOGA A.3: IZSEK IZ RAČUNALNIŠKEGA IZPISA PROGRAMA LAXPOR ZA RAČUN PORUŠITVENAGA VALA PREGRADE VANGANEL - VARIANTA C

**PRILOGE B:**

PRILOGA B.1: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO VOGRŠČEK ZA TRENUTNO PORUŠITEV CELOTNE PREGRADE

PRILOGA B.2: DOLOČITEV PARAMETRA  $\tau$  ZA PREGRADO VOGRŠČEK ZA TRENUTNO PORUŠITEV CELOTNE PREGRADE

PRILOGA B.3: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO VOGRŠČEK ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE

PRILOGA B.4: DOLOČITEV PARAMETRA  $\tau$  ZA PREGRADO VOGRŠČEK ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE

PRILOGA B.5: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO VANGANEL ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 1

PRILOGA B.6: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO VANGANEL ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 1

PRILOGA B.7: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO VANGANEL ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 2

PRILOGA B.8: DOLOČITEV PARAMETRA  $\tau$  ZA PREGRADO VANGANEL ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 2

PRILOGA B.9: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO VANGANEL ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 3



PRILOGA B.10: DOLOČITEV PARAMETRA  $\tau$  ZA PREGRADO VANGANEL ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 3

PRILOGA B.11: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO LOČE ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 1

PRILOGA B.12: DOLOČITEV PARAMETRA  $\tau$  ZA PREGRADO LOČE ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 1

PRILOGA B.13: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO LOČE ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 2

PRILOGA B.14: DOLOČITEV PARAMETRA  $\tau$  ZA PREGRADO LOČE ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 2

PRILOGA B.15: DOLOČITEV PARAMETRA  $q$  ZA PREGRADO LOČE ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 3

PRILOGA B.16: DOLOČITEV PARAMETRA  $\tau$  ZA PREGRADO LOČE ZA TRENUTNO DELNO PORUŠITEV PREGRADE, PRIMER 3

Ta stran je namenoma prazna.

## 1 UVOD

Voda je vir življenja. Z naraščanjem števila prebivalstva se potreba po vodi stalno povečuje. S tem namenom gradimo pregrade, ki za seboj ustvarjajo akumulacije. Pregrade, ki jih gradimo, nam nudijo možnost namakanja, pridobivanja električne energije, zaščite pred poplavami, športne aktivnosti,... Poleg vsega naštetega pa nam prinašajo še en negativni dejavnik in sicer tveganje pred poružitvijo. Porušitev pregrade ima za posledico nastanek poružitvenega vala, ki lahko dolvodno od pregrade povzroči katastrofalne posledice.

Pri načrtovanju, gradnji, vzdrževanju in upravljanju pregrad stremimo k temu, da je vedno zagotovljena ustrezna varnost pregrad pred poružitvijo. Ker se tekom življenjske dobe pregrade lahko zgodijo ekstremni ali pa celo nepredvideni dogodki, se lahko pregrada kljub zagotavljanju varnosti poruši. V primeru poružitve pregrade sta poznavanje poteka poružitvenega valu izrednega pomena, saj s tem lahko omilimo posledice, ki jih povzroči poružitveni val.

Potek poružitvenega vala lahko zadovoljivo opišemo s kontinuitetno in dinamično enačbo. Reševanje omenjenih diferencialnih parcialnih enačb je relativno zahtevno, zato so se kazale težnje po iskanju poenostavljenih metod za reševanje problemov računa poružitvenih valov. V preteklosti je bilo s tem namenom razvitih več poenostavljenih empiričnih metod.

Ena od takšnih metod je tudi poenostavljena metoda računa poružitvenih valov, ki jo je leta 1973 v Madridu predstavil prof. dr. Rudi Rajar. Metoda je pol-empiričnega tipa brezdimenzijskih koeficientov, ki jih določimo s pomočjo linearnih enačb in nomogramov.

Namen diplomske naloge je preveriti primernost uporabe poenostavljene metode za račun poružitvenih valov vsled porušitev za splošno uporabo.

Diplomska naloga je razdeljena na osem poglavij, od katerih prvo poglavje opisuje uvod in namen diplomske naloge. V drugem delu so na kratko predstavljene popolne metode za račun poružitvenih valov. V tem poglavju so tudi predstavljene enačbe, ki se uporabljajo pri standardnih metodah računa poružitvenih valov. V tretjem delu so opisani primeri izračunov računov poružitvenih valov po popolnih metodah in predstavljeni njihovi rezultati. Četrto poglavje predstavlja poenostavljeno metodo za reševanje poružitvenih valov. V petem poglavju so obravnavani vhodni podatki, ki so potrebni za izvedbo izračunov po poenostavljeni metodi. V šestem poglavju so narejeni primeri izračunov za izbrane primere porušitev pregrad po poenostavljenih metodah. Analiza in primerjava rezultatov

dobljenih pri popolnih in poenostavljenih metodah je opisana v šestem poglavju. V sedmem poglavju so predstavljeni končni rezultati, v osmem pa zaključki o uporabi poenostavljenih metod v hidrotehnični praksi.

## 2 POPOLNE METODE ZA IZRAČUN PORUŠITVENIH VALOV

Pri porušitvi pregrade nastanejo poplavni valovi. Za porušitvene valove je značilno navpično čelo in tipična oblika potujočega vodnega skoka. Kljub velikim hitrostim je tok za čelom vala počasi spremenljiv, zato ga lahko računamo z osnovnimi enačbami za tok v telesu vala (Rajar, 1980).

Tok v telesu vala lahko opišemo s kontinuitetno in dinamično enačbo, vendar moramo v tem primeru upoštevati določene hipoteze, ki omejujejo uporabo omenjenih enačb (Rajar, 1980). Predpostavljene hipoteze so:

- Tok je v tlorisu enodimenzionalen in teče samo v smeri osi  $x$ . Pravokotne hitrosti glede na smer  $x$  ni.
- Vertikalna komponenta hitrosti je zanemarljiva, tako da je  $v_z=0$ .
- Hitrost je enakomerna po celotnem prečnem profilu in razdelitev pritiskov je hidrostatična.
- Naklon dna je majhen, tako da je  $I = \operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$ , oziroma  $\cos \alpha = 1$ .
- Notranjega trenja ne upoštevamo. Upoštevamo le trenje med tekočino in stenami profila in jo obravnavamo kot zunanjo silo.

Vse našteje hipoteze so v večini primerov običajno izpolnjene. Potrebno pa je vedeti, da v primerih, ko zgornje hipoteze niso v celoti izpolnjene, enačbi le približno opišeta tok vala.

### 2.1 Osnovne enačbe

#### 2.1.1 Kontinuitetna enačba

Za preračun vala lahko uporabimo osnovno obliko kontinuitetne enačbe (Rajar, 1980):

$$\iint_S \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_P \rho \, dP$$

(1)

Ob predpostavki, da obravnavamo nestisljivo tekočino, kjer je  $\rho = \text{const.}$ , jo lahko preoblikujemo v drugo obliko kontinuitetne enačbe, ki jo pogosto imenujemo I. St. Venant-ovo enačbo (Rajar, 1980):

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

### 2.1.2 Dinamična enačba

Dinamično enačbo lahko izpeljemo iz osnovne Eulerjeve enačbe za idealno tekočino, kjer smo trenje upoštevali kot zunanjo silo. Končna oblika dinamične enačbe je (Rajar, 1980):

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I_0 - I) \quad (3)$$

To enačbo imenujemo tudi II. St. Venant-ova enačba.

### 2.1.3 Druge oblike Saint-Venant-ove enačbe

S preoblikovanjem I. in II. St. Venant-ove enačbe ob upoštevanju odvisnih spremenljivk  $v - z$  lahko dobimo novi obliki enačb (Rajar, 1980):

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{B}{S} \left( \frac{\partial z}{\partial x} v + \frac{\partial h}{\partial t} \right) = - \frac{v}{S} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_{z=\text{konst.}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} = -gI \quad (5)$$

### 2.1.4 Konservativna oblika Saint-Venant-ove enačbe

Konservativni obliki enačb za razliko od prejšnjih enačb (3) in (5) nista omejeni s hipotezo o zanemaritvi notranjega trenja, ki je pomembno pri večji vertikalni komponenti hitrosti. Za preračun sta na voljo dve enačbi, ki ju lahko uporabimo v kombinaciji enačbo (2) (Rajar, 1980):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{S} \right)}{\partial x} + gS \frac{\partial h}{\partial x} = gS(I_0 - I) \quad (6)$$

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

(7)

## 2.2 Uporaba enačb v praksi

V preteklosti je bilo narejenih veliko računov valov vsled porušitev pregrad. Za večji del računov sta bili uporabljeni enačbi (2) in (7) (Rajar, 1980):

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

(2)

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

(7)

Naklon energijske črte  $I$ , ki je člen v enačbi (7), je računano po Manning-u (Rajar, 1980):

$$I = \frac{Q^2 n_G^2}{S^2 R^{4/3}}$$

(8)

Parameter hidravlični radij  $R$  predstavlja volumen tekočine na enoto površine v katerem se porazgubi turbulenca, ki je nastala na enoti površine ostenja. (Steinman, 1999):

$$R = \frac{S}{O}$$

(9)

Členi v enačbah (2), (7), (8) in (9) so:

$x$ ... razdalja na abscisni osi

$t$ ... čas (od trenutka porušitve)

$S$ ... prečni presek

$Q$ ... pretok

$z$ ... kota gladine (nadmorska višina)

$g$ ... zemeljski pospešek

$n_G$ ...Manning-ov koeficient

$R$ ... hidravlični radij

Za točne rezultate v enačbah (2) in (7) se ne sme zanemariti nobenega izmed členov, saj imam vsak člen svoj pomen in pomembno vpliva na končni rezultat.

Za reševanje enačb (2) in (7) se običajno uporablja eksplicitna metoda končnih razlik drugega reda točnosti, kakršna je tudi uporabljena Lax-Wendroff metoda.

Stabilnost omenjene metode zahteva relativno kratke časovne korake  $\Delta t$ , zato so računi razmeroma dolgi. Omejitev časovnega koraka  $\Delta t$  je podana v naslednji enačbi s tako imenovanim Courant-ovem pogojem stabilnosti (Rajar, 1980):

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{v + \sqrt{g \frac{S}{B}}}$$

(10)

kjer je:

$v$ ... hitrost toka

$S$ ... prečni presek

$g$ ... zemeljski pospešek

$B$ ... širina gladine pri določeni koti gladine

Stabilnost omenjene metode pomeni, da kljub napaki, ki jo povzročimo pri vsakem naslednjem računskem koraku, prevlada tendenca konvergiranja k točni vrednosti. V kolikor bi bilo obratno in bi se z vsakim naslednjim računskim korakom napaka samo stopnjevala, govorimo o nestabilni shemi.



### 3 REZULTATI POPOLNIH METOD ZA RAČUN PORUŠITVENIH VALOV

#### 3.1 Porušitveni val za pregrado Vogršček

Pregrada Vogršček je bila zgrajena leta 1988. Pred izgradnjo pregrade je bil narejen račun porušitvenega vala. Račun porušitvenega vala je bil izdelan na FAGG, sedaj FGG, leta 1983 (Rajar, Zakrajšek, 1983).

Za račun nestalnega toka sta bili uporabljeni osnovni St. Venat-ovi enačbi. Naklon energijske črte je bil izračunan po Manningu. Za reševanje enačb je bila uporabljena metoda končnih razlik drugega reda točnosti in sicer metoda Lax-Wendroff. Slednja metoda zahteva sorazmerno kratek časovni interval, kar pa posledično pomeni dolg izračun in pa enakomerne razdalje med profili. Implicitne metode zaradi mestoma deročega toka porušitvenega vala niso primerne. Račun porušitvenega vala je bil izdelan z računalniškim programom za račun porušitvenih valov LAXPOR.

##### 3.1.1 Podatki za račun

Za določitev oblike terena so bile uporabljene topografske karte v merilu 1:5000, na podlagi katerih so bili narejeni prečni profili. Vseh profilov je skupno 39, od tega jih je 12 v akumulaciji, eden je na sami pregradi in še 26 profilov je dolvodno od pregrade.

Volumen akumulacije je bil ocenjen na 8.150.000 m<sup>3</sup> in osnovni pretok na 2,5 m<sup>3</sup>/s. Kota zaježitve je pri 100 m.n.v.. Manning-ov koeficient hrapavosti je bil ocenjen na 0,045.

Ker gre za zemeljsko pregrado je skoraj nemogoče, da bi prišlo do trenutne porušitve celotne pregrade, zato je bila predpostavljena trapezna porušitvena odprtina. Dimenzija površine odprtine je bila 20 m na koti 72,5 m in 70 m na koti 100 m.

##### 3.1.2 Rezultati

Točnost rezultatov, ki so bili dobljeni pri izračunu, je bila ocenjena s pomočjo modelih meritev na  $\pm 15 - 20 \%$ . Rezultati v študiji porušitvenega vala pregrade Vogršček so podani brez upoštevanja dodatne varnosti.

Rezultati so podani v preglednici (*preglednica 1*), kjer so razvidni podatki o najvišjih višinah porušitvenega vala, o pretoku in hitrosti vala, ter čas potovanja čela vala za posamezni profil. V

dokumentaciji sta podana še dva grafa in sicer prvi, ki prikazuje višine dna ter najvišje kote vala po stacionažah dolvodno od pregrade in drugi, ki prikazuje časovni potek čela vala dolvodno od pregrade.

**Preglednica 1: Rezultati računa porušitvenega vala za pregrado Vogršček (prirejeno po Rajar, 1983)**

x (m)	$Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$T_{z_{\max}}$ s
0	17555,5	12,12
200	11309,3	77,48
400	11369,6	145,75
600	10761,0	169,46
800	10627,3	187,52
1000	10681,8	357,90
1200	10191,4	370,70

### 3.2 Porušitveni valovi za pregrado Vanganel

Pregrada Vanganel je najstarejša zemeljska pregrada v Sloveniji. Zgrajena je bila leta 1964. Zaradi ogroženosti dolvodnih naselij je bil leta 1984 narejen račun vala, ki bi nastal pri porušitvi pregrade. Račun porušitvenega vala je bil izdelan na FAGG, sedaj FGG (Rajar, Četina, 1984).

Račun porušitvenega vala je bil izveden z matematičnim modelom na podlagi St. Venat-ovih enačb v konzervativni obliki. Zaradi točnosti rezultatov so bili zajeti vsi členi v enačbi. Naklon energijske črte je bil izračunan po Manning-ovi enačbi. Za reševanje enačb je bila uporabljena metoda končnih razlik drugega reda točnosti in sicer metoda Lax-Wendroff. Račun je bil izveden s programom za račun porušitvenih valov LAXPOR.

#### 3.2.1 Podatki za račun

Topografija dna akumulacije je bila narejena na podlagi kart merila 1:1000, topografija poplavnega področja pa na podlagi kart merila 1:5000. Na podlagi omenjenih kart je bilo izvednotenih 91 prečnih profilov, od katerih jih je 6 v sami akumulaciji, 83 pa dolvodno no poplavnem področlju. 6. in 7. profil prestavlja pregrada na gorvodni in dolvodni strani.

Upoštevana je bila kota akumulacije in sicer 46 m kot najnižja točka in 61,3 m, kot najvišja točka. Gradbena višina pregrade je 19 m z volumnom 46.835 m<sup>3</sup> in dolžino krone 130,2 m. Volumen akumulacije je bil pri koti 61,3 m ocenjen na 244.000 m<sup>3</sup>, pri koti 57 m na 230.000 m<sup>3</sup> in pri koti 53 m le še 40.000 m<sup>3</sup>.

Za največjo prepustnost preлива je bil upoštevan pretok  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  in za največjo propustno moč temeljnega preлива  $4,15 \text{ m}^3/\text{s}$  pri vodni gladini na koti  $61,3 \text{ m}$ . Za stalni tok po celotnem odseku je bila upoštevana količina  $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Račun je bil izveden za tri variante in sicer:

Varianta A: Pri tem primeru je bila upoštevana delna trenutna porušitev pregrade pri najvišji možni gladini akumulacije, to je na koti  $61,3 \text{ m}$ . Odprtina, ki bo v hipu nastala v pregradi bo na koti  $56,3 \text{ m}$  široka  $5 \text{ m}$ , nagib brežin pa bo v razmerju  $1:1$ . Nadalje se bo odprtina linearno povečevala in v eni uri dosegla koto  $46 \text{ m}$ , nagib brežin pa bo ostal enak.

Varianta B: Pri tem primeru gre za podobno trenutno delno porušitev, le da je gladina znižana na koto  $57 \text{ m}$ . Hipna odprtina, ki bo nastala, bo imela dno na koti  $52 \text{ m}$  in naklon brežin  $1:1$ . Nadalje se bo odprtina linearno povečevala in v eni uri dosegla koto  $46 \text{ m}$ , nagib brežin pa bo ostal enak.

Varianta C: Pri tem primeru gre za trenutno delno porušitev, kjer je bila predpostavljena kota akumulacije  $53 \text{ m}$ . Pri tem bi v hipu nastala odprtina, ki bi segala do dna pregrade (kota  $46 \text{ m}$ ) s širino  $5 \text{ m}$  in nagibom brežin  $1:1$ .

### 3.2.2 Rezultati

Pri podobnih primerih je bilo z meritvami na hidravličnih modelih ugotovljeno, da je točnost matematičnega modela približno  $\pm 15 \%$ . Ker je bila za topologijo uporabljena karta v merilu  $1:5000$ , pomeni, da so bili podatki o geometriji razmeroma netočni, kar pomeni točnost reda  $\pm 15 \%$ . Skupno pomeni, da je točnost rezultata reda  $\pm 30 \%$ .

Rezultati so znani v obliki računalniškega izpisa iz programa za račun porušitvenih valov LAXPOR. Ker so izpisi relativno obsežni, bomo pregledali le izseke rezultatov, ki so pomembni v okviru obsega diplomske naloge:

Varianta A: *Priloga A.1* prikazuje največji možni pretok na pregradi, ki je bil izračunan v trenutku  $25,64 \text{ s}$  po porušitvi in ga bomo zaradi poenostavitve vzeli za začetni pretok, ker je to glede na prikaz rezultatov v študiji porušitve najboljši podatek, ki nam je na voljo.

Pretok znaša:

$$Q_{max}(t = 25,64 \text{ s}; x = 0 \text{ m}) = 138,296 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Iz *Priloge A.1* so razvidni še podatki, ki bodo potrebni za primerjalno analizo v nadaljevanju.

Varianta B: *Priloga A.2* prikazuje največji možni pretok na pregradi, ki je bil izračunan v trenutku 2,30 s po poružitvi in ga bomo zaradi poenostavitve vzeli za začetni pretok, ker je to glede na prikaz rezultatov v študiji porušitve, najboljši podatek, ki nam je na voljo.

Pretok znaša:

$$Q_{max}(t = 2,30 \text{ s}; x = 0 \text{ m}) = 164,294 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Iz *Priloge A.2* so razvidni še podatki, ki bodo potrebni za primerjalno analizo v nadaljevanju.

Varianta C: *Priloga A.3* prikazuje največji možni pretok na pregradi, ki je bil izračunan v trenutku 3,55 s po poružitvi in ga bomo zaradi poenostavitve vzeli za začetni pretok, ker je to glede na prikaz rezultatov v študiji porušitve, najboljši podatek, ki nam je na voljo.

Pretok znaša:

$$Q_{max}(t = 3,55 \text{ s}; x = 0 \text{ m}) = 304,630 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Iz *Priloge A.3* so razvidni še podatki, ki bodo potrebni za primerjalno analizo v nadaljevanju.

### 3.3 Porušitveni valovi za pregrado Loče

Pregrada Loče je zemeljska pregrada, ki zadržuje vodo v akumulaciji, imenovani Šmartinsko jezero. Pregrada je bil zgrajena leta 1970. Leta 1979 je bila na FAGG, zdaj FGG, izvedena študija porušitvenih valov na pregradi Loče za tri variante (Rajar, 1979).

Tudi računi porušitvenih valov pri primerih porušitve pregrade Loče so bili izvedeni s pomočjo matematičnih modelov na podlagi St. Venat-ovih enačb v konzervativni obliki. Zaradi točnosti rezultatov so bili zajeti vsi členi v enačbi. Naklon energijske črte je bil izračunan po Manning-ovi enačbi. Za reševanje enačb je bila uporabljena eksplicitna metoda končnih razlik drugega reda točnosti in sicer metoda Lax-Wendroff. Za računanje po metodi Lax-Wendroff so bile uporabljene tri variante in sicer v prvem delu s programom SLAPRE, v drugem delu (od avtoceste dalje) s programom PRLAX, v tretjem delu, ko teče tok praktično samo po strugi pa s programom RAGLA.

### 3.3.1 Podatki za račun

Topografija akumulacije in poplavnega območja je bila določena za 40 profilov, od tega 10 za samo akumulacijo in 30 za dolino pod pregrado, na podlagi kart merila 1:5000. Profili so določeni na medsebojni razdalji 200 m na 2 do 6 višinskih točk natančno.

Upoštevan je bil osnovni pretok pred pregrado in sicer velikosti  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pri računu je bil določen Manning-ov koeficient  $n_G = 0,035$  od pregrade do točke, kjer voda teče le še po strugi, kjer je bil  $n_G = 0,025$ .

Predpostavljen način porušitve pregrade je delna trenutna porušitev v obliki trapeza. Na koti 254,8 m je odprtina širine 3 m in nagib brežin je v razmerju 1:1,5.

Račun je bil izveden za tri variante, ki se med sabo razlikujejo le v višini akumulacije in sicer:

- Varianta 1: Kota gladine vode v akumulacije je 265,4 m.
- Varianta 2: Kota gladine vode v akumulacije je 263,0 m.
- Varianta 3: Kota gladine vode v akumulacije je 260,0 m.

### 3.3.2 Rezultati

Analiza rezultatov je na podlagi uporabljene metode in meritev na modelu je pokazala točnost rezultatov reda  $\pm 15 \%$  in le deloma  $\pm 20 \%$ . Zaradi neprizmatične oblike doline je odstopanje od meritev še nekoliko višje in sicer reda  $\pm 20 - 25 \%$ .

**Preglednica 2: Rezultati računov porušitvenih valov za pregrado Loče (prirejeno po Rajar, 1979)**

Prečni profil	x	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Pregrada	0	1200	800	230
Avtocesta	3040	1050	650	210
Ložnica	5265	1000	600	200

#### 4 POENOSTAVLJENE METODE BREZDIMENZIJSKIH PARAMETROV

Popolne metode za račun porušitvenih valov vsled porušitev pregrad so bile opisane v enem od prejšnjih poglavij. Pri teh metodah uporabljamo enačbe, ki vsebujejo naslednje parametre  $h$ ,  $Q$ ,  $x$ ,  $t$ ,  $i$ ,  $n_G$ ,  $g$ ,  $h_0$  in podatke o geometriji poplavnega področja. Določevanje vrednosti parametrov je v praksi zelo zahtevna naloga, saj točnost vhodnih podatkov neposredno vpliva na točnost končnih rezultatov. Poleg reda točnosti vhodnih podatkov, ki so nam na voljo, uporabljamo še enačbe, pri katerih upoštevamo določene hipoteze, čeprav v celoti niso povsem izpolnjene. Za reševanje problema imamo na volje več enačb in ne glede na to, katere enačbe bomo uporabili, bomo reševali sistem dveh parcialnih diferencialnih enačb prvega reda. Za reševanje kompleksnih sistemov enačb imamo na voljo različne metode, ki pa za reševanje zahtevajo potrebno stopnjo znanja, predvsem pa čas, ki ga potrebujemo za reševanje.

V večini primerov so metode, ki uporabljajo Saint-Venant-ove enačbe, zelo primerno matematično orodje za reševanje problemov porušitvenih valov. V določenih primerih pa uporaba teh metod ni vedno upravičena oziroma nujno potrebna. Zatorej bi takrat, kadar gre za porušitev pregrade in bi hoteli hitro in približno oceno nastalih pretokov, potrebovali enostavnejšo, predvsem pa hitrejšo metodo.

Takšen primer je nastanek naravne pregrade, ki nastane zaradi plazov. Takšne pregrade omejujejo ali celo popolnoma zaustavijo pretok vode in gorvodno ustvarijo akumulacijo. Ko gladina akumulacije preseže višino pregrade, pride do preliva in erodiranja, ki v relativno kratkem času povzroči porušitev pregrade. Pri tem nastane porušitveni val, ki lahko s svojo rušilno močjo povzroči katastrofalne posledice. Glavna težava takšnih pregrad je čas, ki preteče od trenutka, ko je pregrada zaznana in časom, ko pride do porušitve. Običajno gre za relativno kratek časovni interval, v katerem pa ni možno izvesti računa porušitvenega vala z uporabo klasičnih metod in s tem napovedati posledice, ki jih takšen val povzroči. V takšnih primeru potrebujemo hitre in poenostavljene metode, ki nam bodo podale zadovoljiv rezultat, s katerim bo možna napoved nevarnosti in s tem preprečiti materialno škodo ali pa celo človeške žrtve.

Poenostavljenih metod za določitev pretokov pod porušeno pregrado je več. V diplomski nalogi se bom omejil na brezdimenzijsko metodo, ki jo je leta 1973 predstavil prof. dr. Rudi Rajar na 11. Kongresu Mednarodne komisije za velike pregrade v Madridu (Rajar, 1973).

S poenostavljeno brezdimenzijsko metodo je avtor poskušal z minimalnimi in enostavno določljivimi vhodnimi podatki relativno hitro določiti rezultat pri trenutnih porušitvah. Zavedal se je, da z nobeno metodo ni možno do potankosti opisati dogodkov, ki nastanejo vsled porušitve, ampak da ima vsaka metoda določen red točnosti. Pri tej metodi je bil le-ta po avtorjevem mnenju ocenjen na  $\pm 35\%$ . Glede na to, da nam podajo običajne metode natančnost rezultatov reda 15 – 25 %, je rezultat poenostavljene metode glede na vodne parametre in postopek reševanja relativno zadovoljiv.

Cilj poenostavljene brezdimenzijske metode je določitev dveh parametrov in sicer prvi je pretok  $Q_m$  na sami pregradi v času  $t = T_0 \approx 0$  in drugi je čas  $T_L$ , ki predstavlja čas, ko se pretok zmanjša za polovico. Poleg tega nam metoda poda še razdaljo  $x$ , ki nam določi razdaljo od pregrade do točke, ko se maksimalni pretok v primerjavi z maksimalnim pretokom na pregradi zmanjša za polovico.

Metoda predvideva določitev sedmih parametrov in sicer  $Q$ ,  $t$ ,  $h_0$ ,  $B_b$ ,  $V$ ,  $l_g$  in  $g$ , ki pomembno opisujejo problem in so opisani v nadaljevanju.

Metoda ima tudi nekaj predpostavk, ki vplivajo na račun in so pomembne pri interpretaciji rezultata in sicer:

- da je osnovni pretok pod pregrado zanemarljiv,
- upoštevamo, da gre za kritični tok,  $F_r = 1$  in s tem odstopanje znotraj 20 %,
- Manning-ov koeficient je predpostavljen na vrednost  $n_G = 0,025$ , medtem ko je v akumulaciji zaradi majhne hitrosti upor zanemarljiv,
- ker akumulacija nima vedno konstantno širino, enotni naklon in da je prečni profil trikotne oblike, da bi lahko definirali akumulacijo s parametri  $h_0$ ,  $V$  in  $L$ , uvedemo  $l_g$ , ki določa težišče akumulacije od pregrade in s tem čas potovanja valov do pregrade.
- da je geometrijska oblika porušenega dela pregrade približno pravokotne oblike.

Vse našteje predpostavke vplivajo na rezultat, zato sta ciljni količini, ki jih pričakujemo, približek dejanskim vrednostim.

Pri poenostavljeni brezdimenzijski metodi imamo naslednje vhodne podatke:

$S_b$  ... predstavlja prečni presek porušenega dela pregrade

$h_0$  ... je višina porušenega dela pregrade

$B_b$  ... je srednja širina porušenega dela pregrade, ki jo določimo po enačbi (Rajar, 1973)

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} \quad (11)$$

$V$  ... je volumen akumulacije, ki se prelije preko porušenega dela pregrade.

$l_g$  ... je oddaljenost težišča akumulacije od pregrade

$g$  ... težnostni pospešek

Na podlagi Buckingham-ovega  $\pi$  izreka iz sedmih parametrov  $Q$ ,  $t$ ,  $h_0$ ,  $B_b$ ,  $V$ ,  $l_g$  in  $g$ , določimo brezdimenzijske parametre (Rajar, 1973).

Brezdimenzijski parameter  $q$  (Rajar, 1973):

$$q = \frac{Q_m}{h_0^{5/2} g^{1/2}} \quad (12)$$

Brezdimenzijski parameter  $P$  (Rajar, 1973):

$$P = \frac{V}{h_0^3} \quad (13)$$

Brezdimenzijski parameter  $b$  (Rajar, 1973):

$$b = \frac{B_b}{h_0} \quad (14)$$

Brezdimenzijski parameter  $\lambda$  (Rajar, 1973):

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} \quad (15)$$

Brezdimenzijski parameter  $\tau$  (Rajar, 1973):



$$\tau = T_1 \sqrt{\frac{g}{h_0}}$$

(16)

Parametri so v medsebojni povezavi s funkcijo (Rajar, 1973):

$$(q, \tau) = f(P, \lambda, b)$$

Vrednosti  $Q_m$  in  $T_l$  določimo po naslednjih korakih:

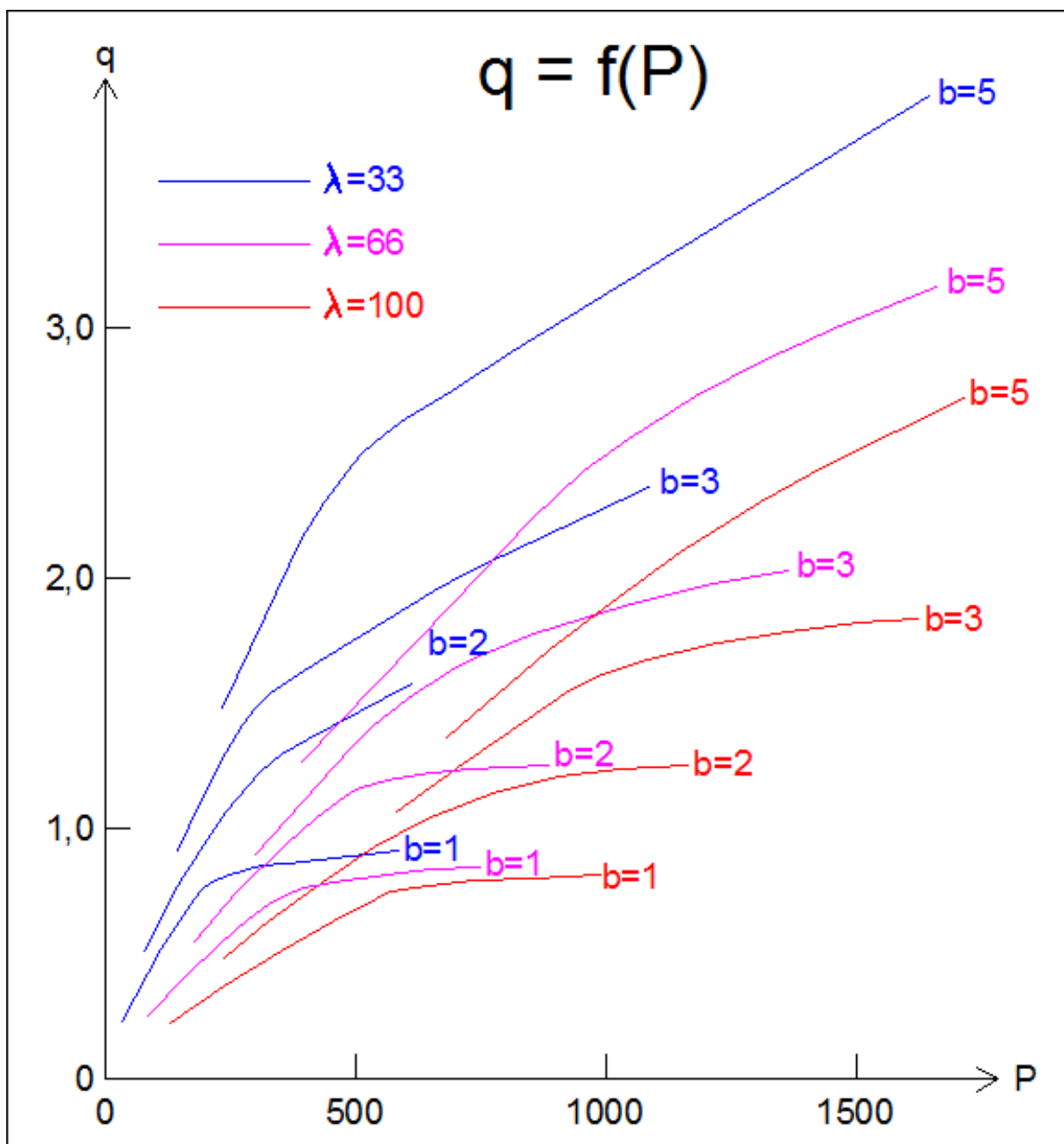
- Določimo vhodne podatke  $h_0$ ,  $B_b$ ,  $V$  in  $l_g$ ,
- Izračunamo parametre  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ ,
- S pomočjo nomogramov (slika 1 in slika 2) določimo  $q$  in  $\tau$ ,
- Izračunamo  $Q_m$  in  $T_l$  s pomočjo enačb (Rajar, 1973)

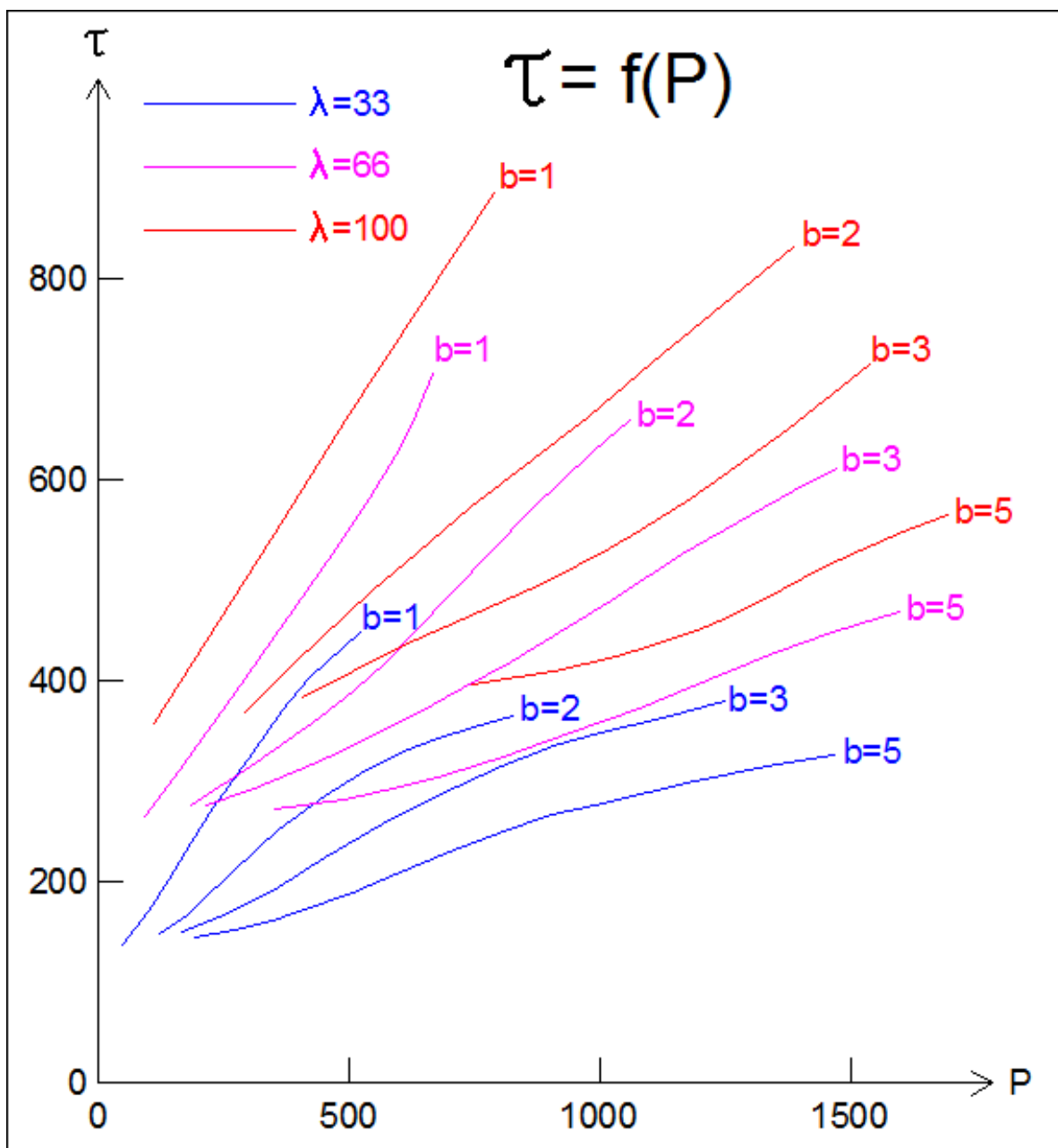
$$Q_m = q h_0^{5/2} g^{1/2}$$

(17)

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}}$$

(18)

Slika 1: Nomogram za določanje parametra  $q$



Slika 2: Nomogram za določanje parametra  $\tau$

Avtor omenja tudi brezdimenzijsko razdaljo, kjer je vpliv vztrajnostnih sil zanemarljiv (Rajar, 1973):

$$\bar{x} = \frac{x \cdot i}{h_0} \cong 0,2$$

(19)

Pri čemer oznaka  $i$  predstavlja naklon dna.

Če enačbo preoblikujemo, dobimo količino  $x$  (Rajar, 1973):

$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} \tag{20}$$

ki predpostavlja, razdaljo od pregrade do točke, kjer je vrednost pretoka  $Q$  zmanjšana na polovično vrednost  $Q_m$  (Rajar, 1973).

$$Q = \frac{Q_m}{2} \tag{21}$$

## 5 VHODNI PODATKI

V prejšnjem poglavju je bila opisana poenostavljena brezdimenzijska metoda, ki za izračun porušitvenih valov vsled porušitev pregrad potrebuje naslednje vhodne podatke:  $h_0$ ,  $B_b$ ,  $V$ ,  $l_g$  in  $i$ .

### 5.1 Določitev porušitvenih modelov

V diplomski nalogi bo v nadaljevanju analizirana primerjava rezultatov računov porušitvenih valov po poenostavljenih metodah v primerjavi s klasičnimi matematičnimi modeli na podlagi St. Venant-ovih enačb. Zato se je za obravnavane primere poskušalo pripraviti vhodne podatke za poenostavljene porušitvene modele tako, da bodo primerljivi s porušitvenimi modeli, ki so bili obravnavani pri klasičnih metodah. V nasprotnem primeru primerjava rezultatov, izračunanih po različnih metodah nebi bila smiselna.

V nadaljevanju so obravnavane le zemeljske pregrade, kjer trenutna in popolna porušitev pregrade praktično ni možna, saj je pri zemeljskih pregradah nemogoče v hipu transportirati tako velikih količin zemljine, ki je sestavni del pregrade. Tudi zaradi izbrane metode, ki omogoča samo hipne dogodke, so obravnavani le primeri trenutne in delne porušitve. Izračunali bomo pretoke  $Q_m$ , ki nastanejo v trenutku porušitve in pretoke  $Q$ , ki nastanejo od nekaj sekund do nekaj minut po porušitvi. Ker primeri načina porušitve trajajo le kratek časovni interval, bomo zanemarili erozijo in s tem nadaljnjo rušitev pregrade.

Porušitveni modeli so zato enaki porušitvenim modelom, ki so jih različni avtorji predvideli v študijah, kjer so računali porušitvene valove, ki nastanejo pri porušitvah pregrad s klasičnimi metodami.

Običajno so za porušitev predvidene odprtine trapeznih oblik s podano širino trapeza in spodnje kote trapeza ter naklonom brežin. S tem je natančno definirana odprtina, ki nastane. Poleg podatkov o odprtini, ki nastane, je uporabljen še podatek o začetni gladini akumulacije.

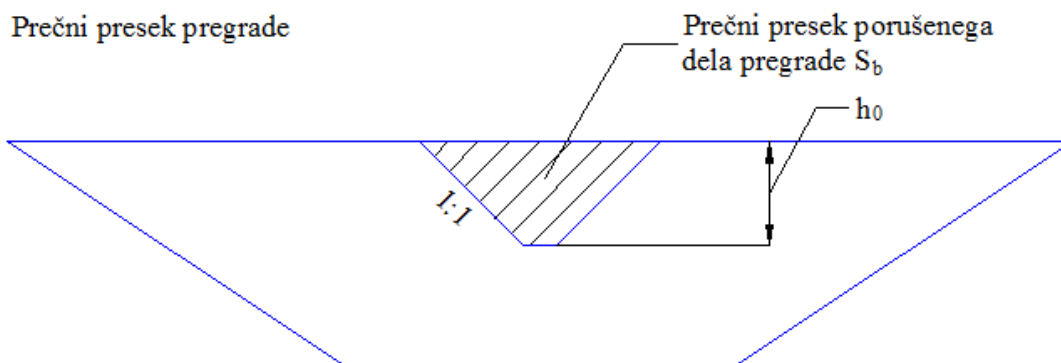
### 5.2 Določitev vhodnih podatkov

Določitev vhodnih podatkov je izrednega pomena, saj ti neposredno vplivajo na rezultat. Zato si bomo v nadaljevanju pogledali načine določevanja vhodnih podatkov.

### 5.2.1 Podatki o pregradi

Pri računu poplavnega vala so obravnavali le primeri delne porušitve, zato podatki o sami pregradi niso neposredno pomembni, saj metoda zahteva le podatka o porušenem delu pregrade in sicer podatek o višini  $h_0$  in podatek o ploščini preseka  $S_b$ . Parametra določimo na podlagi izbranega porušitvenega modela. Potrebno je le paziti, saj je parameter  $h_0$  navzgor omejen z višino pregrade in parameter  $S_b$  s prečnim presekom pregrade.

Višina  $h_0$  je višina porušenega dela pregrade. V primerih, ki so obravnavani, bo višina  $h_0$  razlika med koto gladine akumulacije in spodnjo koto porušenega dela pregrade.



Slika 3: Prečni presek pregrade in dela pregrade, ki se poruši

Površina  $S_b$  je bila za vse modele določena s programom AutoCAD in sicer na podlagi 3D modela z globinsko dimenzijo 1 m, kar pomeni, da lahko podatek *Volume* po absolutni velikosti enačimo s površino.

```

----- SOLIDS -----
Mass:                3070.2692
Volume:              3070.2692
Bounding box:        X: 401508.7770  -- 401521.9535
                    Y: 85306.8328   -- 85480.4761
                    Z: 71.0595     -- 101.5595
Centroid:            X: 401515.1463
                    Y: 85390.5337
                    Z: 89.7628

```

Slika 4: Primer izpisa podatkov o 3D modelu iz AutoCad-a

Pri zgornjem izpisu so pomembni podatki še podatki *Centroid*, ki nam podajo koordinate  $X$  in  $Y$ , ki bodo v nadaljevanju pomembne za določitev oddaljenosti težišča akumulacije od pregrade. Koordinati sta zapisani v koordinatnem sistemu D48/GK.

### 5.2.2 Podatki o akumulaciji

Metoda zahteva o akumulaciji dva podatka in sicer volumen  $V$  in podatek o težišču, preko katerega se izračuna oddaljenost težišča akumulacije od pregrade  $l_g$ .

Ker so akumulacije nepravilnih in kompleksnih oblik, je določitev volumna in težišča telesa akumulacije z običajnimi geometrijskimi orodji zelo obsežna naloga. V izogib obsežnejšim »pešč« računom so bila uporabljena razpoložljiva programska orodja. S programskim orodjem AutoCAD so bila izrisani različni 3D modeli za posamezno akumulacijo, upoštevaje kote višin, ki izhajajo iz predpostavljenega porušitvenega modela in so potrebni za izračun porušitvenih valov.

Za določitev modela akumulacije potrebujemo dovolj natančno obliko dna pod vodno gladino. V nadaljevanju bomo predstavili možnosti za pridobitev topoloških podatkov, ki bi nam podale zadostne podatke, preko katerih bi določili obliko dna pod akumulacijo. Na voljo imamo več načinov, ki bodo predstavljeni v nadaljevanju.

Podatke o globini akumulacije je možno dobiti s soniranjem, a bi izvedba tega pomenila ogromne finančne stroške, ki so pri izdelavi diplomske naloge v takšnem obsegu nesprejemljivi. Zaradi finančnih omejitev smo morali poiskati druge načina za določitev dna akumulacije.

Za določevanje topografije terena je zelo primeren DMR (Digitalni Model Reliefa). DMR1 je sloj točk v pravilni mreži 1 m x 1 m s podanimi višinskimi točkami, ki je interpoliran iz originalnih točk sloja OTR-ja (georeferenciran oblak točk reliefa), ki so bile klasificirane v razred reliefa (Pegan, 2014). Sloj OTR je bile posnet s laserskimi sistemi imenovani LIDAR. Za področje Slovenije je bila izvedena laserska izmera z uporabljen valovno dolžino 1064 nm, kar pomeni, da je odbojnost žarka na gladini vode zelo majna in sicer reda manj kot 1%. Majhna odbojnost pomeni, da so vodna telesa za to valovno dolžino praktično nevidna. Če bi imeli na voljo žarek z valovno dolžino, ki je za polovico manjša, to je 532 nm, bi lahko zajeli tudi točke dna akumulacije. Žarek z valovno dolžino 532 nm namreč prode tudi več kot 50 m v globino vodnega telesa, če je vodno telo relativno čisto in mirno (Čekada, 2011). Določevanje topologije dna s podatki DMR-ja, ki so bili pridobljeni z LIDAR-jem, je v našem primeru nemogoča.

Glede na geometrijsko obliko akumulacije lahko pričakujemo največji doprinos volumna akumulacije v zgornjih plasteh akumulacije, saj je v teh plasteh površina največja. Z drugimi besedami lahko opišemo, da zgornje plasti akumulacije bistveno bolj vplivajo na volumen in lokacijo težišča, kot spodnje plasti akumulacije. Iz tega razloga lahko sklepamo, da je natančnost določevanja reliefa in

posledično geometrije telesa akumulacije na zgornjih kotah veliko pomembnejša kot natančnost določevanja v spodnjih plasteh.

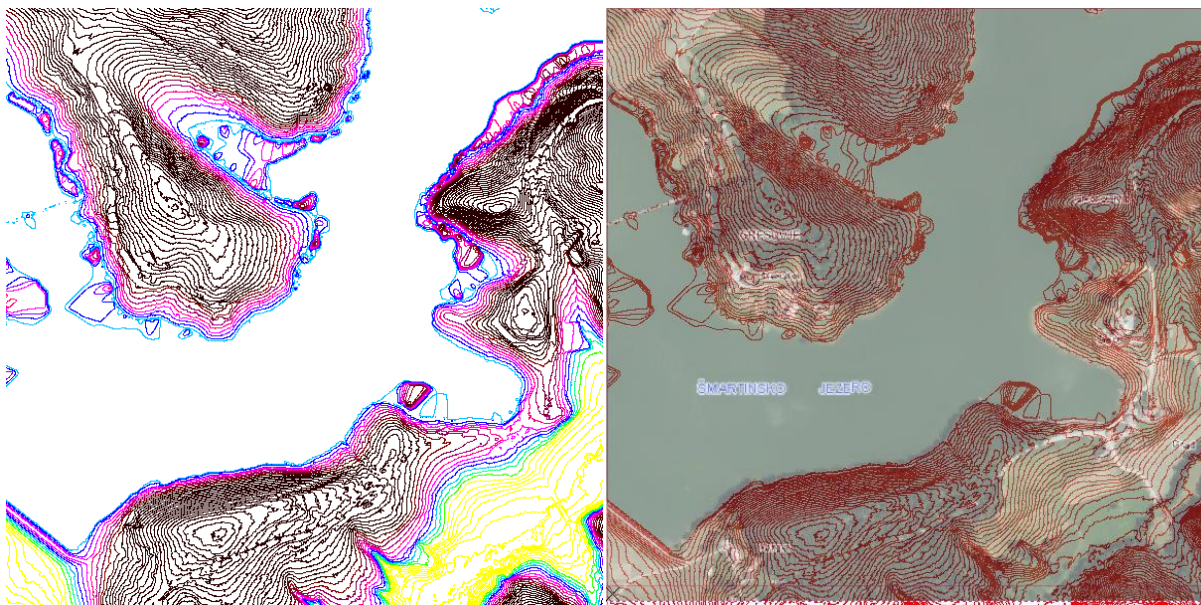
Zaradi omenjenega problema se pojavlja vprašanje o uporabi DMR-ja za določevanje oblike reliefa za območje akumulacije, ki v času snemanja ni bilo pod vodno gladino. V nadaljevanju si bomo pogledali primer za Šmartinsko jezero. Na podlagi podatkov aplikacije LIDAR (Vir: ARSO) so bili dobljeni podatki DMR1 za blok *b\_22*, kvadrant *520\_126*. Podatki so bili v ASCII obliki (*X;Y;Z*) v koordinatnem sistemu D48/GK. Primer DMR podatkov:

```
519999.50;125999.50;253.58  
519999.50;126000.50;253.72  
519999.50;126001.50;253.88  
519999.50;126002.50;254.02
```

Slika 5: Primer vhodnih podatkov za DMR v ASCII obliki

Na podlagi ASCII podatkov smo s pomočjo programskega orodja ComputationalCAD v programu AutoCAD izdelali višinske linije z višinskim korakom 1 m v območju  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ . Korak 1 m pomeni natančnost višinske linije  $\pm 0,5 \text{ m}$ .

Vodna gladina je na pretežnem delu akumulacije na koti 264 m. Glede na način izdelave višinskih linij, lahko zaradi natančnosti določevanja višinske linije rečemo, da je dejanska gladina vode med 263,5 m in 264,5 m.



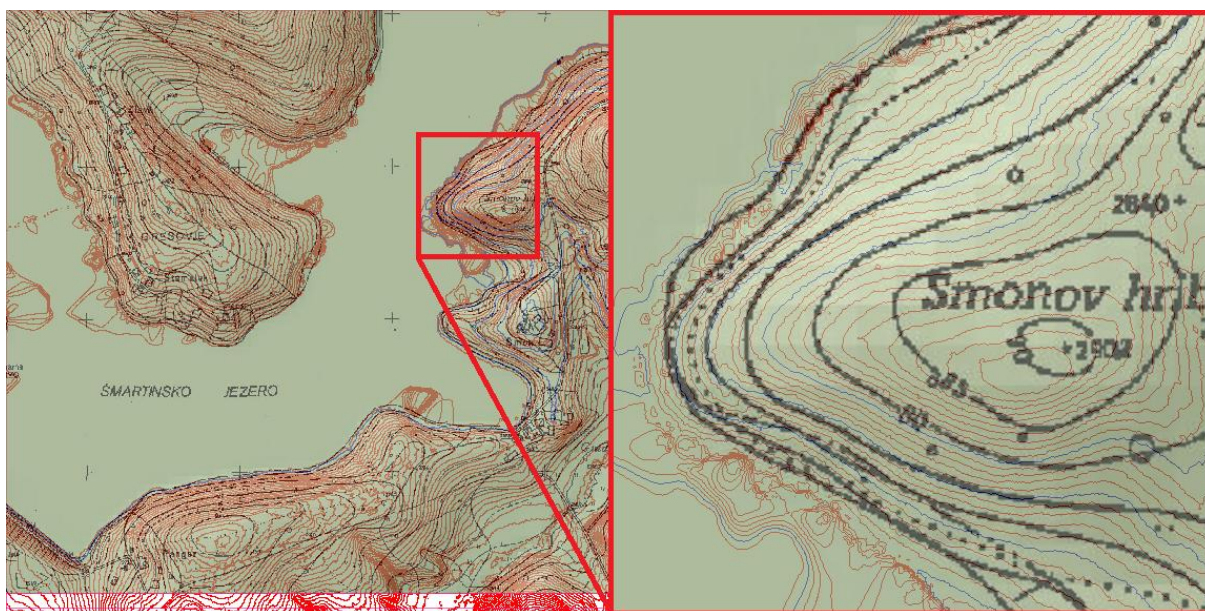
Slika 6: Primer določanja izohips iz OTR-ja za Šmartinsko jezero brez DOF-a (levo) in z DOF-om (desno)



Predpostavili smo, da je na celotnem območju gladina akumulacije konstantna in da je padec vodne gladine proti pregradi, kjer je iztok, zanemarljiv. Rob vodne gladine na koti 264 m lahko določimo na podlagi DOF posnetkov. Glede na podatke (slika 6) vidimo, da višinska linija s koto 264 m (svetlo modra) ni skladna z robom vodnega telesa, razvidnega iz DOF (GURS2014) posnetka. Glede na ugotovljeno lahko sklepamo, da podatki o reliefu ob vodni gladini, dobljeni z LIDAR-jem, niso zanesljivi, saj so rezultati mestoma nesmiselni in za našo potrebo neuporabni. Nemogoče je, da bi vodna gladina mestoma nihala tudi za več metrov. Na podlagi ugotovljenih dejstev lahko zaključimo, da si s podatki DMR-je ne bomo mogli pomagati.

Naslednja možnost je bila uporaba kart z izohipsami, s katerimi bi lahko približno opisali dno akumulacije. Problem se pojavi, ker karte na območjih vodnih teles nimajo izrisanih višinskih linij. Rešitev bi lahko poiskali v kartah starejših datumov, ki so bile narejene pred izgradnjo pregrad, ko akumulacije še ni bilo.

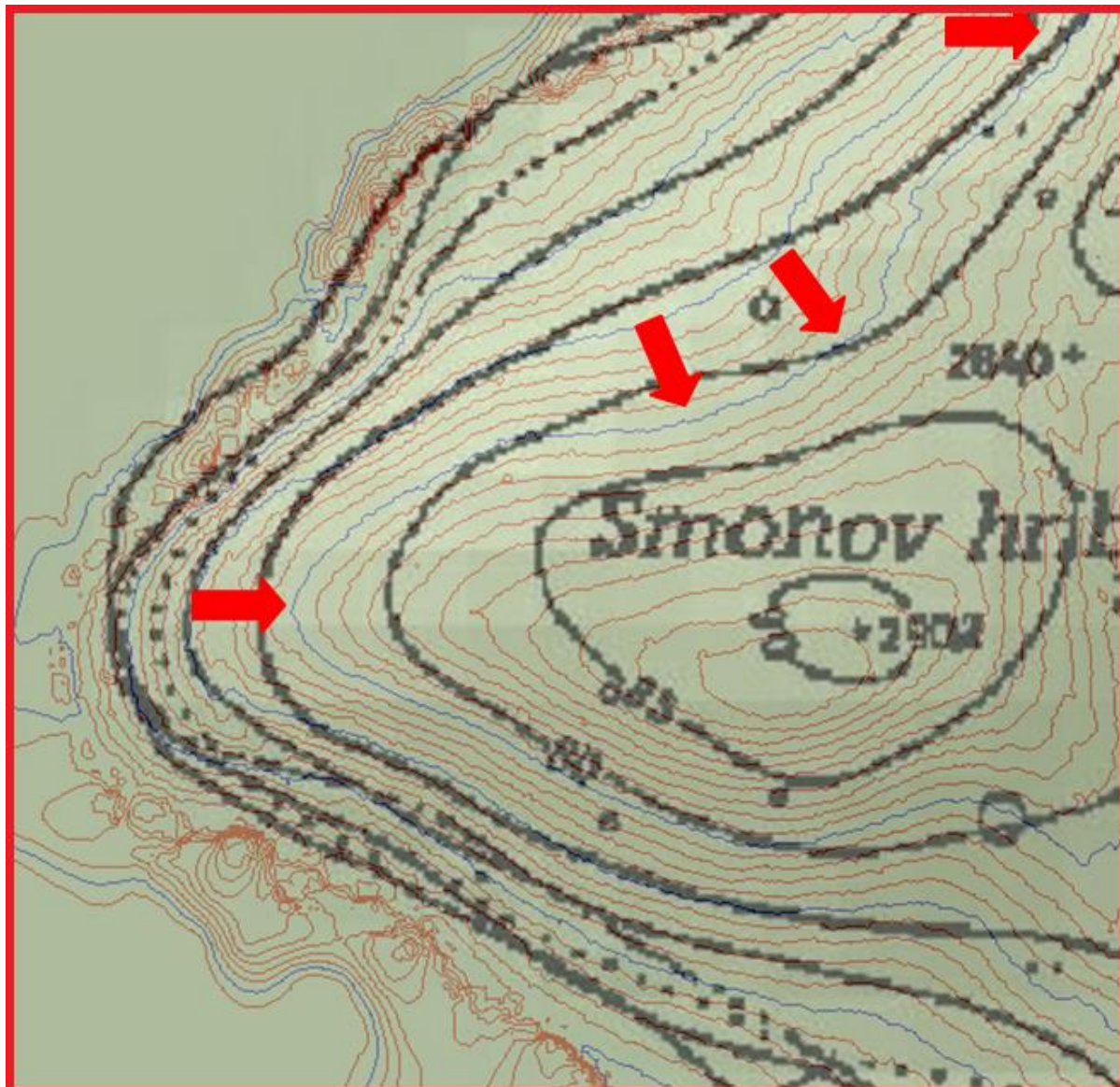
Takšne karte bi bile primerne ob dveh predpostavkah. Prva predpostavka je, da je natančnost izrisa višinskih linij na kartah zadovoljiva in druga predpostavka je, da v akumulaciji ni bilo prevelikega zamuljevanja, ki bi bistveno spremenile obliko dna akumulacije. Natančnost kart lahko preverimo z DMR-jem na bližnjih pobočjih akumulacije.



**Slika 7: Višinske linije za pobočje ob Šmartinskem jezeru**

S primerjavo višinskih linij kart in višinskih linij, pridobljenih z DMR-jem lahko ugotovimo, da je natančnost višinskih linij vprašljiva. Primer primerjave linij je bil izveden na višinski liniji 280 m

(slika 8), kjer se je pokazalo odstopanje višin tudi za več kot 5 m. Tako velika odstopanja lahko pri določevanju volumna pomenijo tudi nekaj 10% odstopanja.



Slika 8: Primerjava višinske linije s koto 280 m

Glede na dejstvo, da smo zelo omejeni s pridobivanjem podatkov o reliefu, bi bili takšni podatki kljub temu, da ne zadovoljijo obeh zgoraj omenjenih predpostavk, trenutno najboljši približek dejanskemu stanju oziroma modelu, ki je bil uporabljen za izračun porušitvenega vala s klasičnimi metodami.

Problem kart starejših datumov je tudi njihov obstoj oziroma dostopnost. GURS takšnih kart ne hrani, saj so s takšnimi kartami razpolagali takratni lokalni geodetski zavodi. Geodetski zavodi, ki so takšne karte imeli pa so se tekom let privatizirali in njihovi arhivi so se razdelili po različnih podjetjih ali pa

so bili celo uničeni, zato je večina takšnih kart praktično izgubljenih ali pa zasebnih lastništev nedostopnih. Karte starejših datumov bi lahko bile shranjene tudi v Arhivu Republike Slovenije, vendar je uporabnost kart zaradi natančnosti višinskih linij zelo vprašljiva.

Zaradi pomanjkanja vhodnih podatkov, s katerimi bi določili telo akumulacije, smo morali poiskati druge metode, s katerimi bo mogoče zadovoljivo in z največjo možno natančnostjo določiti 3D model akumulacije.



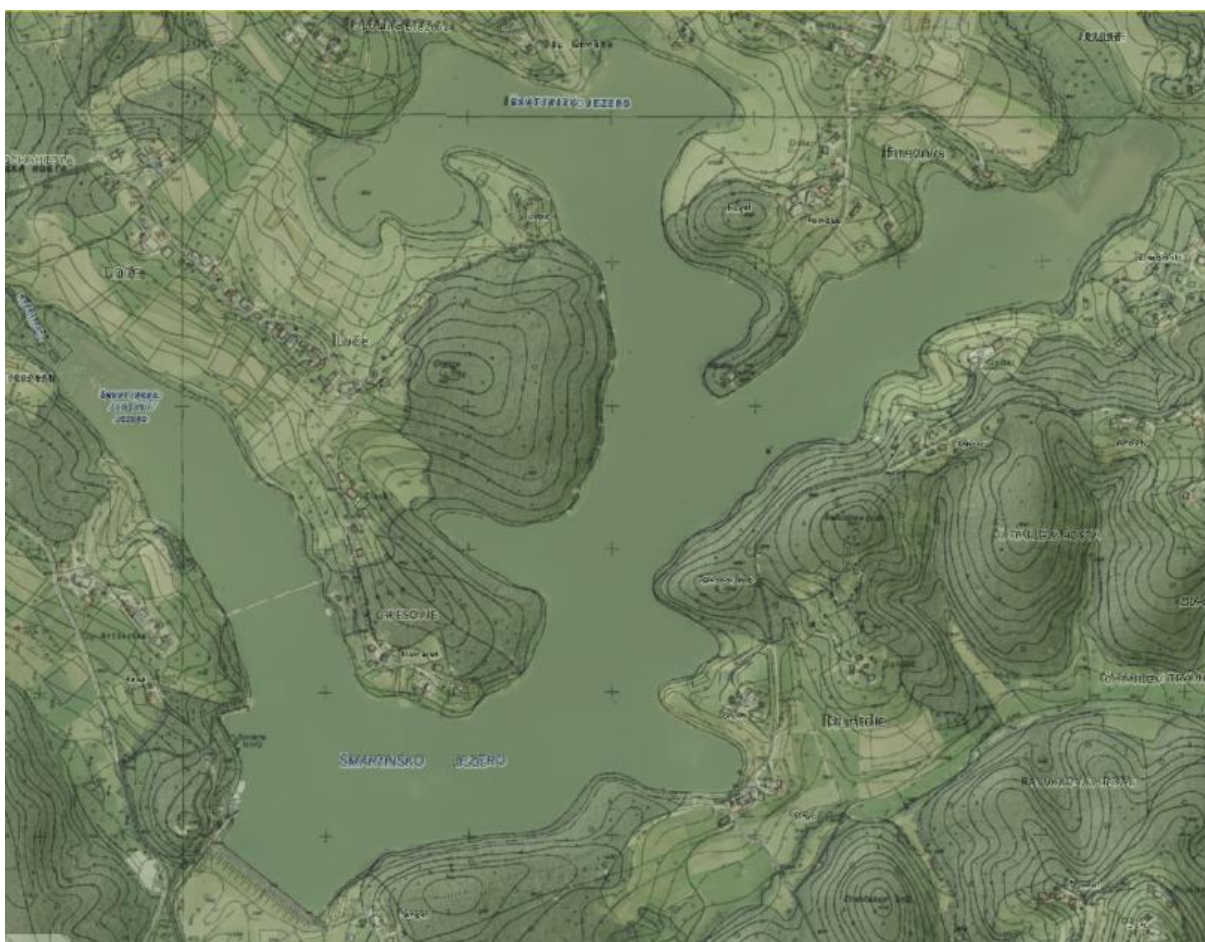
**Slika 9: Določitev linije vodne gladine na podlagi DOF-a za Šmartinsko jezero**

V nadaljevanju bo prikazan primer določitve 3D modela telesa akumulacije. Postopek bo opisan na primeru Šmartinskega jezera. Izhajali smo iz znanih vhodnih podatkov. Prvi znani podatek je oblika površine akumulacije, ki smo jo dobili s pomočjo digitalizacije na podlagi DOF posnetkov. S tem smo dobili poligon, ki določa obliko akumulacije na vodni gladini, kot je prikazano na sliki 9. S pomočjo DMR-ja v aplikaciji LIDAR smo določili povprečno višino vodne gladine, ki je bila 264 m (vir:

ARSO). Ker gre za vodno gladino z relativno majhnim pretokom bomo predpostavili, da je višina po celotnem poligonu enaka.

Naslednji podatek, ki ga bomo upoštevali, je višina temelja pregrade oziroma najnižja točka dna akumulacije ob pregradi, ki jo dobimo iz podatkov o pregradi. Ta podatek je dostopen iz projektne dokumentacije pregrade ali pa iz tehničnih opisov pregrad. Lahko pa ga izračunamo tudi kot razliko med višino kote krone pregrade in samo višino pregrade, brez upoštevanja temeljev.

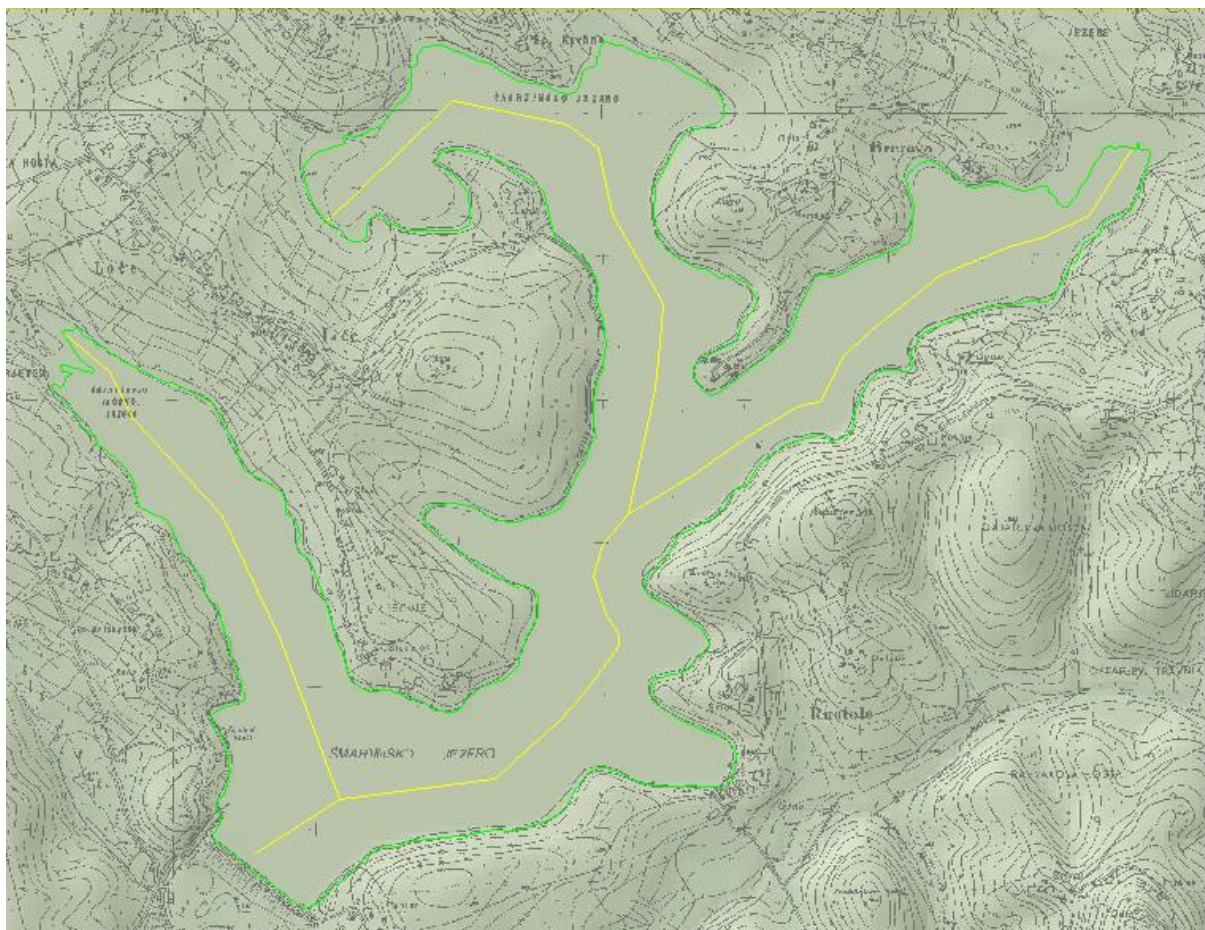
Eden od pomembnih podatkov je tudi nagib brežin ob akumulaciji. Nagib je tem večji, čim gostejše so izohipse. Podatek o gostoti izohips bo povzet iz kart s pomočjo višinskih točk kot kaže slika 10.



**Slika 10: Kombinacija kart z izohipsami in DOF-om za Šmartinsko jezero**

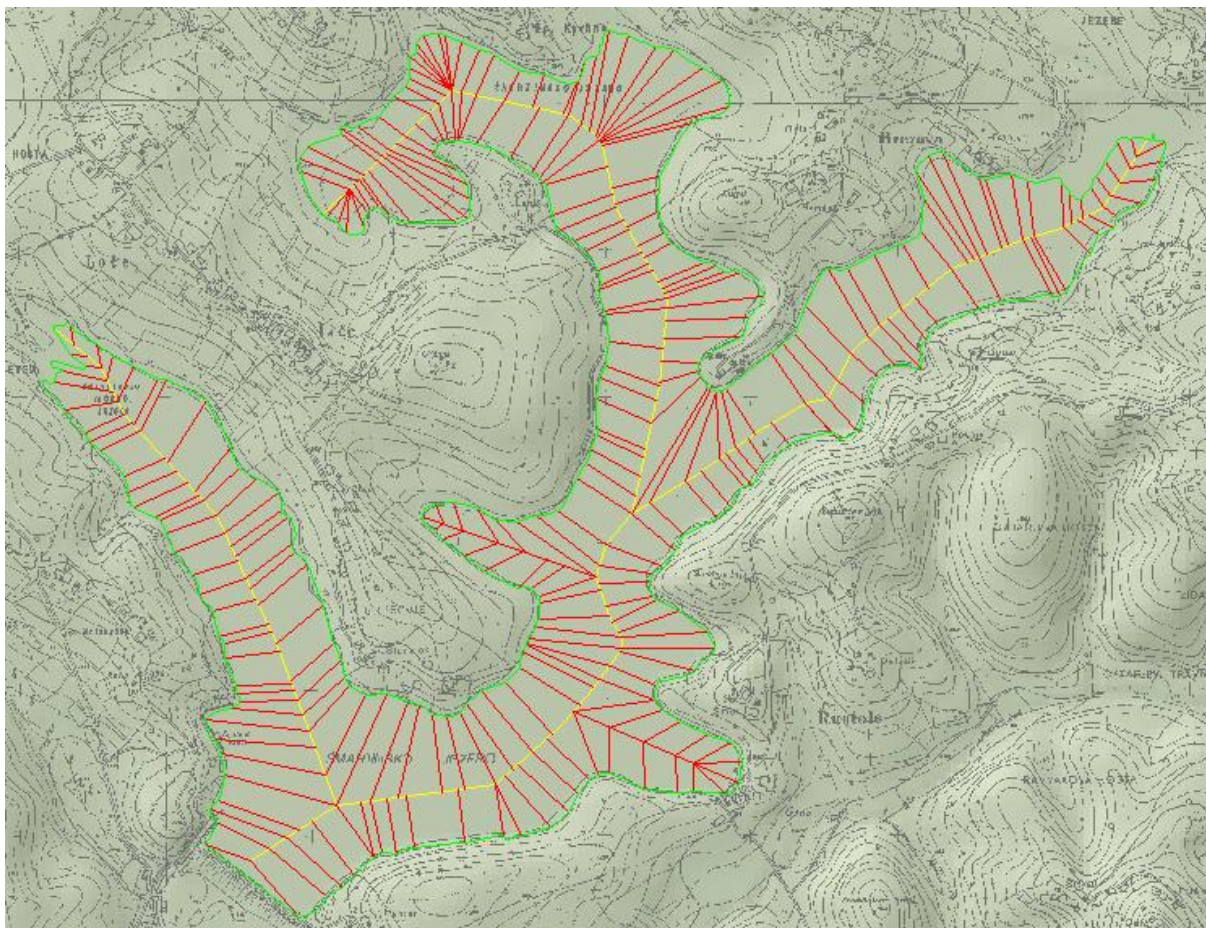
Sedaj imamo na voljo nekaj podatkov, iz katerih bomo s pomočjo metode interpolacije določili 3D model akumulacije. Predem smo določili 3D model akumulacije je potrebno izpostaviti še nekaj predpostavk, ki so definirale 3D model. Predpostavili smo, da je celotno dno akumulacije trikotne oblike. Hkrati bo nagib brežin v akumulaciji sledil nagibu brežin na pobočjih nad akumulacijo. To

smo izvedli tako, da je linija dna akumulacije določena bližje brežini z večjim nagibom, sorazmerno z gostoto izohips. Naslednja predpostavka je, da dno akumulacije po dolžini poteka pod enakomernih padcem od najbolj oddaljene točke do dna pregrade. Ker so akumulacije razvejanih oblik, smo vsako vejo obravnavali posebej. Za vsako posamezno vejo smo določil potek linije na podoben način kot za glavno linijo, le da bo najnižji del linije v stiku z glavno linijo dna akumulacije. Potek dna akumulacije je razviden z rumeno linijo iz slike 11.



**Slika 11: Določitev glavne oz. primarne linije dna akumulacije za Šmartinsko jezero**

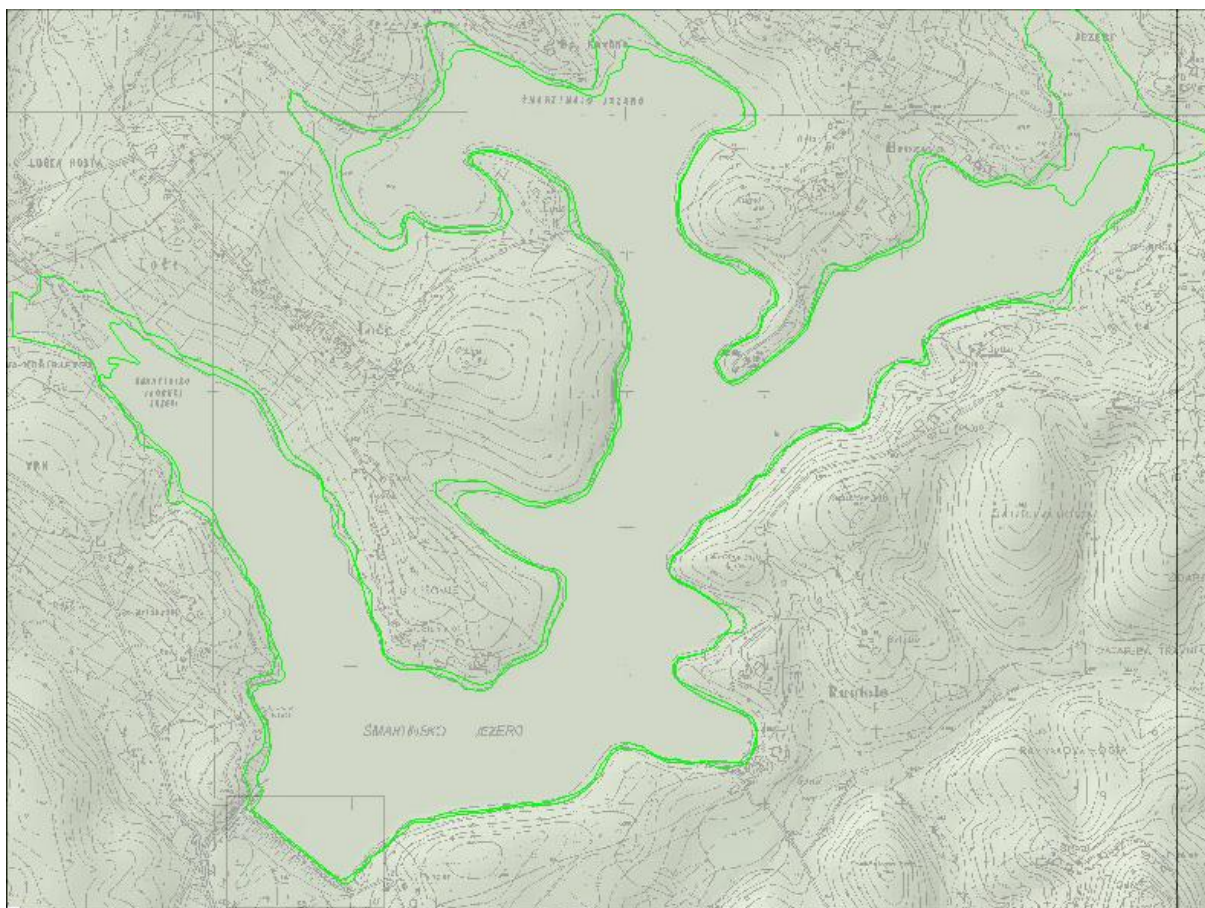
Ko imamo določeno linijo poteka dna akumulacije in robove vodne gladine, lahko z linearno povezavo skupaj povežemo robove akumulacije z linijo, ki določa dno akumulacije. Dobili smo trikotno obliko prečnega profila akumulacije. Potek postopka je razviden iz slike 12.



Slika 12: Določitev sekundarnih linij dna akumulacije za Šmartinsko jezero

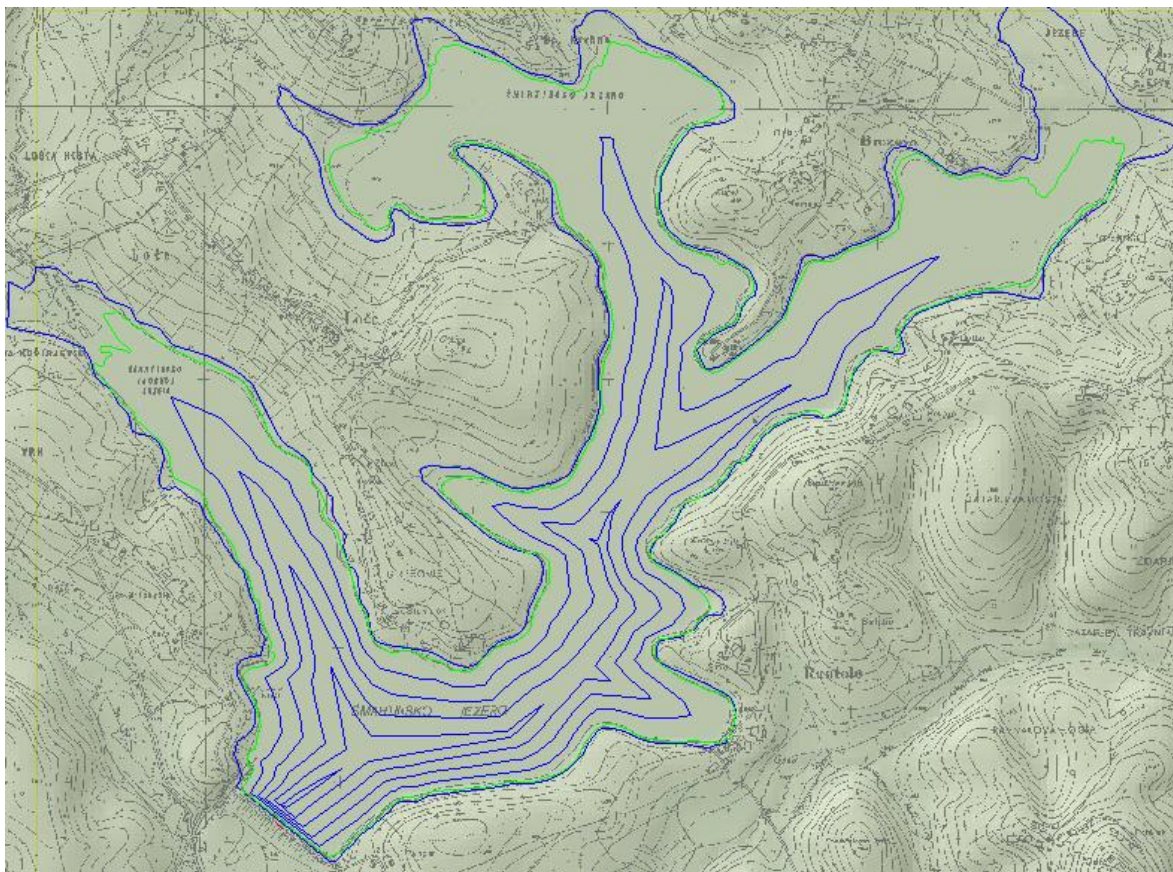
Nadalje smo na podlagi dobljenih linij določili še poligone akumulacije za posamezno višinsko koto. Ker smo uporabili poenostavljeno metodo za določanje oblike dna akumulacije, na podlagi katere smo le približno predpostavili obliko dna, je potrebno določiti primeren korak določanja višinskih poligonov. Glede na zanesljivost interpolacijske metode smo vzeli korak med posameznimi višinami 1,5 m.

Hkrati smo na podlagi izohips določili tudi dodatni poligon na najvišjo možno koto vodne gladine v akumulaciji, kar je razvidno iz slike 13.



**Slika 13: Določitev poligona na najvišjo možno koto vodne gladine za Šmartinsko jezero**

Rezultat določevanja poligonov (modra barva) je prikazan na sliki 14, kjer vsak poligon predstavlja svojo koto.



**Slika 14: Določitev poligonov, kjer vsak poligon predstavlja svojo koto za Šmartinsko jezero**

Dobljenim poligonom določimo dejanske višinske kote v razmiku 1,5 m in jim določimo višino 1,5 m, da dobijo 3D obliko. Vse modele posameznih višinskih odsekov spojimo v skupni model kot kaže slika 15.



**Slika 15: 3D model poligonov, kjer vsak poligon predstavlja svojo koto**



S programom AutoCAD v nadaljevanju enostavno določimo tako volumen akumulacije, kot koordinate težišča 3D modela, ki predstavlja akumulacijo.

```
----- SOLIDS -----  
Mass:                4680689.332  
Volume:              4680689.332  
Bounding box:       X: 519878.425 -- 522057.703  
                   Y: 125606.672 -- 127207.259  
                   Z: 254.000 -- 265.400  
Centroid:           X: 520882.842  
                   Y: 126352.169  
                   Z: 262.752
```

Slika 16: Primer izpisa podatkov o 3D modelu iz AutoCAD-a

### 5.2.3 Podatki o poplavnem območju

Pri določevanju razdalje  $x$ , ki nam pove, pri kateri oddaljenosti od pregrade se pretok  $Q_m$  zmanjša za polovico na  $Q$ , je v enačbi potreben parameter  $i$ . Kot je bilo že omenjeno, predstavlja  $i$  naklon dna področja, kamor se bo razlila voda iz akumulacije. Potrebno je določiti naklon dna dolvodno od pregrade.

Naklon dna je bil določen kot sprememba višinske kote dolvodno od pregrade na določeni razdalji. Pri določevanju razdalje je bilo potrebno upoštevati, da mora biti dolžina obravnavanega območja približno enaka dolžini  $x$ , kar prikazuje enačba 22.

$$\sum l \approx x \tag{22}$$

Ker poplavni val ne potuje premočrtno, ampak potuje glede na obliko poplavnega območja, je bila razdalja  $\sum l$  določena kot vsota delnih razdalj  $l_x$  glede na DMR (slika 17), ki so bile pridobljene s pomočjo aplikacije LIDAR (vir: ARSO).

$$\sum l = l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} + l_n \tag{23}$$

Višinske točke (slika 17) so bile ravno tako pridobljene s pomočjo aplikacije LIDAR (vir: ARSO).

Povprečni nagib je bil izračunan kot razmerje med spremembo višine na skupni oddaljenosti od pregrade po formuli:

$$i = \frac{\Delta h}{\sum l} = \frac{h_1 - h_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} + l_n} \quad (24)$$

$h_1$ ...začena kota

$h_n$ ...končna kota

$l_x$ ...delna razdalja pri čemer  $x=1,2, \dots,n-1,n$

$\sum l$ ...skupna razdalja

Za primer Šmartinskega jezera naklon  $i$  znaša:



Slika 17: Določanje parametra  $i$

$$i = \frac{(253,5 \text{ m} - 245,5 \text{ m})}{246 \text{ m} + 273 \text{ m} + 235 \text{ m} + 167 \text{ m} + 174 \text{ m} + 290 \text{ m}} = 0,0058$$

## 6 IZRAČUN S POENOSTAVLJENIMI METODAMI

V nadaljevanju bodo obravnavane porušitve treh zemeljskih pregrad in sicer pregrad Vogršček, Vanganel in Loče. Za vsako pregrado bo obravnavanih več variant porušitve.

### 6.1 Pregrada Vogršček – izračun po poenostavljenih metodah

Najprej bomo predstavili vhodne podatke za pregrado Vogršček.

Gradbena višina pregrade je:

$$h_0 = 35,4 \text{ m}$$

Volumen akumulacije pri koti vodne gladine 101 m je izračunan s pomočjo računalniškega programa AutoCAD na:

$$V = 8.116.254 \text{ m}^3$$



Slika 18: Vzdolžni presek in tloris 3D modela pregrade in akumulacije Vogršček

```

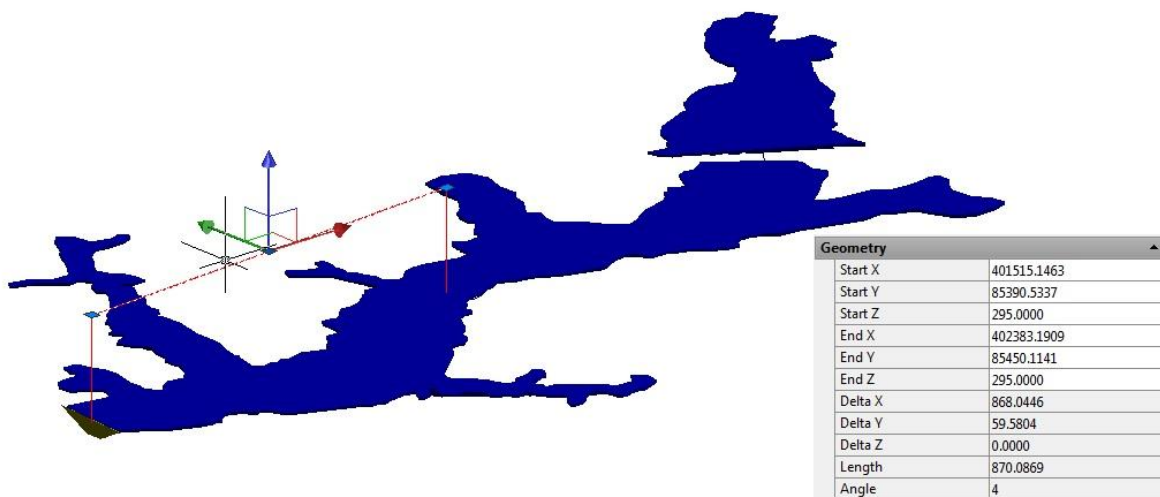
----- SOLIDS -----
Mass:                8116254.2583
Volume:              8116254.2583
Bounding box:        X: 401514.4307 -- 403694.3581
                    Y: 84873.6783 -- 86131.5415
                    Z: 63.9000 -- 101.0000
Centroid:            X: 402383.1909
                    Y: 85450.1141
                    Z: 92.6566

```

Slika 19: Podatki za akumulacijo Vogršček

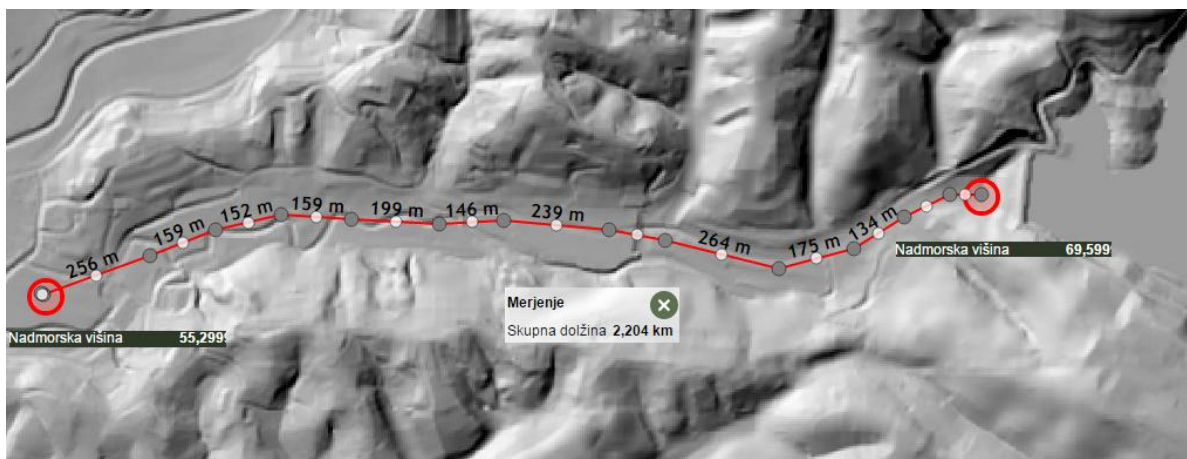
Oddaljenost težišča akumulacije je izračunana s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in znaša:

$$l_g = 870,1 \text{ m}$$



Slika 20: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Vogršček za trenutno popolno porušitev pregrade

Naklon dna območja, kjer bi se razlila voda iz akumulacije, je bil izračunan na podlagi kote terena in oddaljenih stacionaž dolvodno od pregrade.

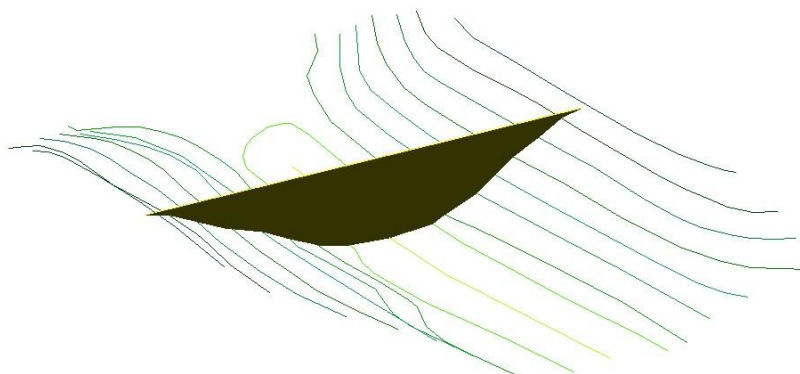


Slika 21: Določitev naklona dna za poplavno območje pod pregrado Vogršček.

$$i = \frac{(69,6 - 55,3)}{2.204} = 0,00649$$

### 6.1.1 Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vogršček za trenutno popolno porušitev pregrade

Določitev parametra  $S_b$ :



Slika 22: Prečni presek pregrade, ki se poruši

----- SOLIDS -----			
Mass:	3070.2692		
Volume:	3070.2692		
Bounding box:	X: 401508.7770	--	401521.9535
	Y: 85306.8328	--	85480.4761
	Z: 71.0595	--	101.5595
Centroid:	X: 401515.1463		
	Y: 85390.5337		
	Z: 89.7628		

Slika 23: Podatki za pregrado Vogršček - popolna trenutna porušitev

$$S_b = 3.070,3 \text{ m}^2$$

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} = \frac{3.070}{35,4} = 86,7 \text{ m}$$

Določitev parametrov  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ , ki so potrebni za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  v nomogramih:

$$P = \frac{V}{h_0^3} = \frac{8.116.254 \text{ m}^3}{35,4^3 \text{ m}^3} = 183$$

$$b = \frac{B_b}{h_0} = \frac{86,7 \text{ m}}{35,4 \text{ m}} = 2,5$$

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} = \frac{870,1 \text{ m}}{35,4 \text{ m}} = 24,6$$

Določitev koeficientov  $q$  in  $\tau$ . Koeficienta sta določena v nomogramih *Priloga B.1* in *Priloga B.2*:

$$q \cong 1,70$$

$$\tau \cong 120$$

Izračun končnih količin  $Q_m$ ,  $Q$ ,  $T_1$  in  $x$ :

$$Q_m = q h_0^{5/2} g^{1/2} = 1,7 * 35,4^{5/2} * 9,81^{1/2} = 39.700 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = \frac{Q_m}{2} = \frac{39.700}{2} = 19.850 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}} = 120 * \sqrt{\frac{35,4}{9,81}} = 228 \text{ s}$$

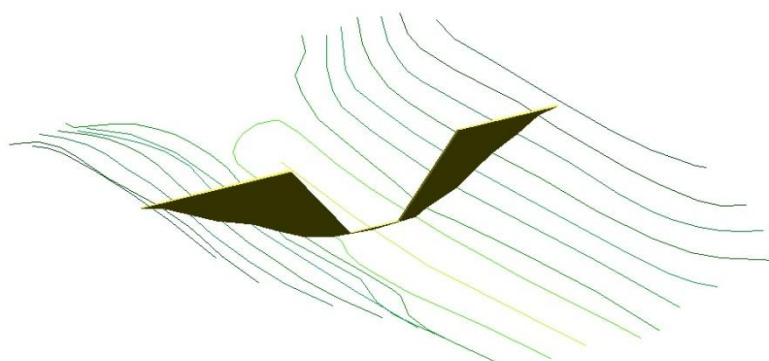
$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} = \frac{35,4}{0,00649} = 1.091,2 \text{ m}$$

### 6.1.2 Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vogršček za trenutno delno porušitev pregrade

Določitev parametra  $S_b$ :

```
----- SOLIDS -----  
Mass:                1327.4805  
Volume:             1327.4805  
Bounding box:       X: 137.1913  -- 207.1913  
                   Y: -29.5000  --  0.0000  
                   Z: -708.1634 -- -707.1634  
Centroid:           X: 172.1913  
                   Y: -12.0184  
                   Z: -707.6634
```

Slika 24: Podatki za pregrado Vogršček - delna trenutna porušitev



Slika 25: Prečni presek neporušenega dela pregrade Vogršček - delna trenutna porušitev

$$S_b = 1.327 \text{ m}^2$$

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} = \frac{1.327}{35,4} = 37,5 \text{ m}$$

Določitev parametrov  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ , ki so potrebni za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  v nomogramih:

$$P = \frac{V}{h_0^3} = \frac{8.116.254 \text{ m}^3}{35,4^3 \text{ m}^3} = 183$$

$$b = \frac{B_b}{h_0} = \frac{37,5 \text{ m}}{35,4 \text{ m}} = 1,1$$

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} = \frac{870,1 \text{ m}}{35,4 \text{ m}} = 24,6$$

Določitev koeficientov  $q$  in  $\tau$ . Koeficienta sta določena v nomogramih *Priloga B.3* in *Priloga B.4*:

$$q \cong 0,84$$

$$\tau \cong 204$$

Izračun končnih količin  $Q_m$ ,  $Q$ ,  $T_1$  in  $x$ :

$$Q_m = q h_0^{5/2} g^{1/2} = 0,84 * 35,4^{5/2} * 9,81^{1/2} = 19.616 \frac{m^3}{s}$$

$$Q = \frac{Q_m}{2} = \frac{19.616}{2} = 9.808 \frac{m^3}{s}$$

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}} = 204 * \sqrt{\frac{35,4}{9,81}} = 388 \text{ s}$$

$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} = \frac{35,4}{0,00649} = 1.091,2 \text{ m}$$

## 6.2 Pregrada Vanganel – izračun po poenostavljenih metodah

Pri pregradi Vanganel smo obravnavali tri primere delne trenutne porušitve.

Prvi primer je bil obravnaval porušitev pri najvišji možni koti akumulacije, to je 61,3 m. Pri tem je nastala trenutna delna porušitev pregrade in sicer odprtina v obliki trapeza širine 5 m na koti 56,3 m. Nagib brežin bo v razmerju 1:1.

Drugi primer je obravnaval trenutno porušitev in sicer z gladino vode na 57 m in delno trenutno porušitev pregrade do kote 53 m. Nastala je trapezna odprtina s širino 5 m na spodnji koti in nagibom brežin 1:1.

Tretji primer je obravnaval porušitev pri višini akumulacije 53 m. Pri tem je nastala trenutna delna porušitev in sicer odprtina v obliki trapeza širine 5 m na dnu pregrade, to je kota 46 m. Nagib brežin bo v razmerju 1:1.

### 6.2.1 Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vanganel za trenutno delno porušitev pregrade – primer 1

Višina dela pregrade, ki se poruši je:

$$h_0 = 5 \text{ m}$$

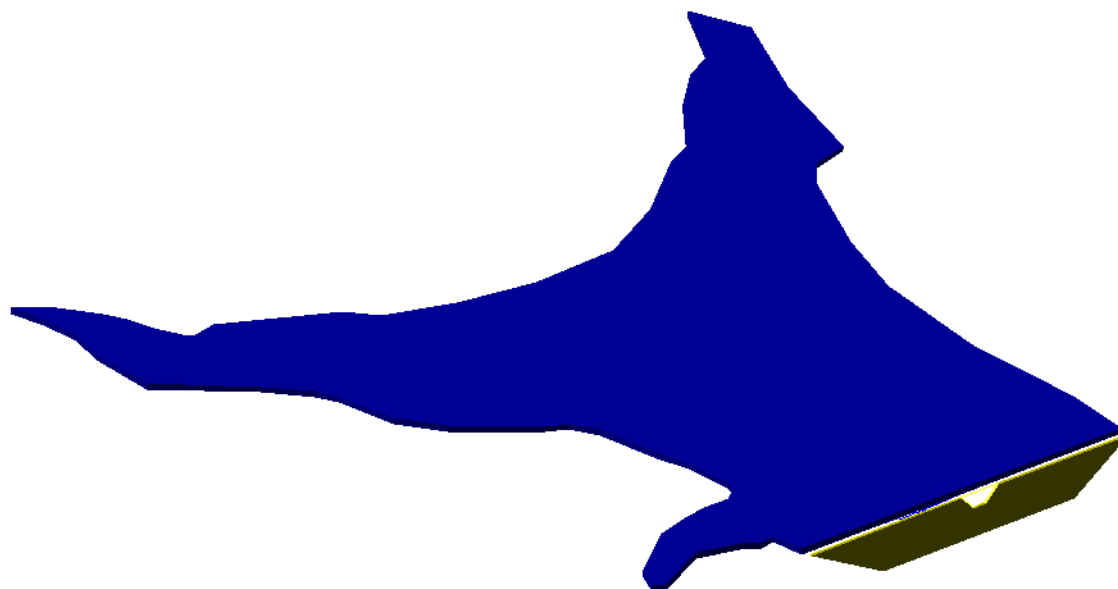


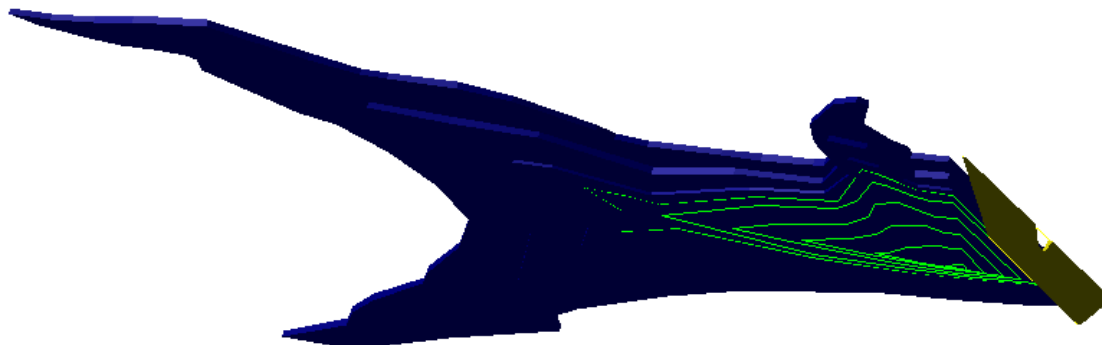
Volumen akumulacije je izračunan s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in je upoštevana le akumulacija, ki se bo prelila, to je voda nad koto 56,3 m in znaša:

$$V = 120.597 \text{ m}^3$$

```
----- SOLIDS -----  
Mass:                120569.9809  
Volume:              120569.9809  
Bounding box:       X: 404799.1418  -- 405108.1105  
                   Y: 41117.9667   -- 41409.8863  
                   Z: 56.3000    -- 61.3000  
Centroid:           X: 404970.1370  
                   Y: 41293.6727  
                   Z: 59.4107
```

Slika 26: Podatki za akumulacijo Vanganel - primer 1

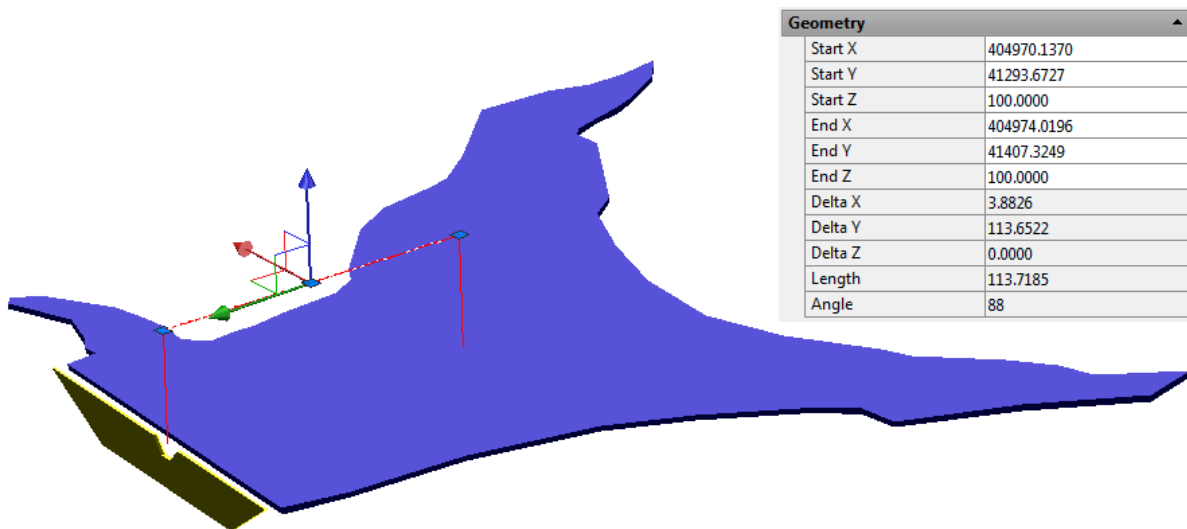




Slika 27: 3D model pregrade Vanganel - primer 1

Oddaljenost težišča akumulacije je izračunana s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in znaša:

$$l_g = 113,7 \text{ m}$$



Slika 28: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Vanganel - primer 1

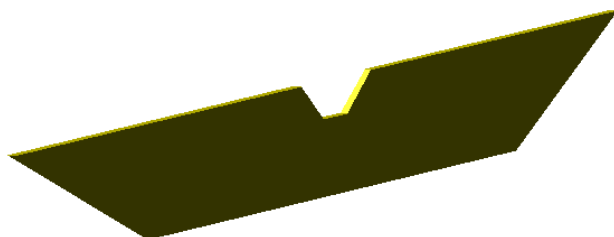


Slika 29: Določitev naklona dna za poplavno območje pod pregrado Vanganel.

Naklon dna območja, kjer bi se razlila voda iz akumulacije, je bil izračunan na podlagi kote terena in oddaljenih stacionaž dolvodno od pregrade.

$$i = \frac{(42,0 - 21,4)}{1.041} = 0,0198$$

Določitev parametra  $S_b$ :



Slika 30: Prečni presek neporušenega dela pregrade Vanganel – primer 1

```

----- SOLIDS -----
Mass:                50.0000
Volume:              50.0000
Bounding box:        X: 404966.5959 -- 404981.6213
                    Y: 41406.9912 -- 41409.4675
                    Z: 56.3000 -- 61.3000
Centroid:            X: 404974.1086
                    Y: 41408.2293
                    Z: 59.2167

```

Slika 31: Podatki za pregrado Vanganel - primer 1

$$S_b = 50,0 \text{ m}^2$$

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} = \frac{50,0}{5} = 10,0 \text{ m}$$

Določitev parametrov  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ , ki so potrebni za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  v nomogramih:

$$P = \frac{V}{h_0^3} = \frac{120.597 \text{ m}^3}{5^3 \text{ m}^3} = 965$$

$$b = \frac{B_b}{h_0} = \frac{10 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 2$$

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} = \frac{113,7 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 22,7$$

Določitev koeficientov  $q$  in  $\tau$ . Koeficienta sta določena v nomogramih *Priloga B.5* in *Priloga B.6*:

$$q \cong 1,88$$

$$\tau \cong 310$$

Izračun končnih količin  $Q_m$ ,  $Q$ ,  $T_1$  in  $x$ :

$$Q_m = q h_0^{5/2} g^{1/2} = 1,88 * 5^{5/2} * 9,81^{1/2} = 329 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = \frac{Q_m}{2} = \frac{329}{2} = 165 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}} = 310 * \sqrt{\frac{5}{9,81}} = 221 \text{ s}$$

$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} = \frac{5}{0,0198} = 50,5 \text{ m}$$

### 6.2.2 Račun pretoka $Q_{max}$ $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vanganel za trenutno delno porušitev pregrade – primer 2

Višina dela pregrade, ki se poruši, je 9,3 m, vendar bo zaradi izračuna upoštevana samo višina od najnižje kote porušitve do vodne gladine, ki vpliva na sam pretok vode preko pregrade in to je:

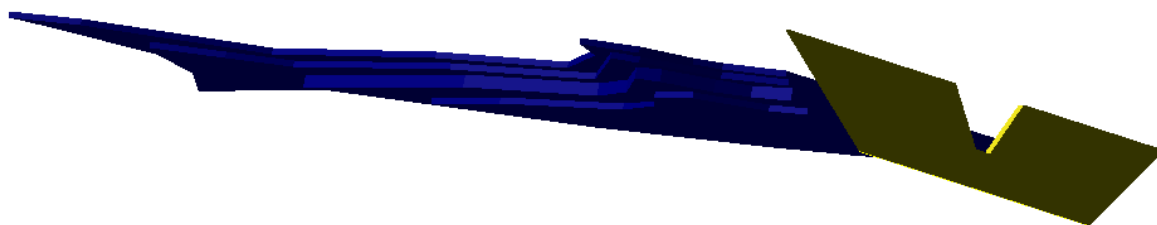
$$h_0 = 5 \text{ m}$$

Volumen akumulacije je izračunan s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in je upoštevana le količina vode v akumulaciji, ki se bo prelila, to je voda med kotami 52 m in 57 m in znaša:

$$V = 29.944 \text{ m}^3$$

```
----- SOLIDS -----  
Mass:                29944.3025  
Volume:              29944.3025  
Bounding box:        X: 404925.1834 -- 405044.2147  
                    Y: 41252.8573 -- 41401.3731  
                    Z: 52.0000 -- 57.0000  
Centroid:            X: 404975.8161  
                    Y: 41348.7019  
                    Z: 55.0416
```

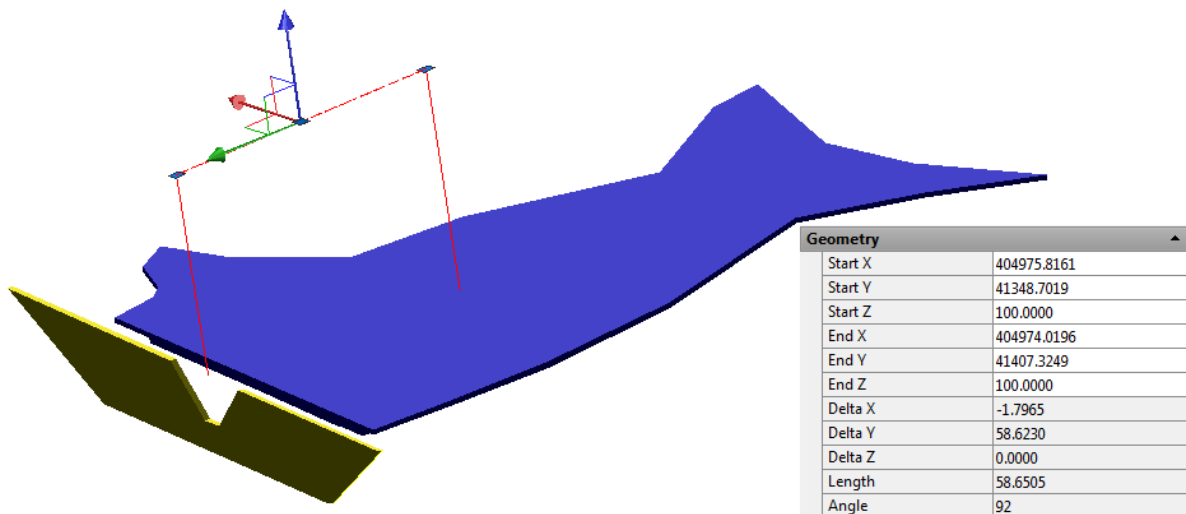
Slika 32: Podatki za akumulacijo Vanganel - primer 2



Slika 33: 3D model pregrade Vanganel - primer 2

Oddaljenost težišča akumulacije je izračunana s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in znaša:

$$l_g = 58,7 \text{ m}$$

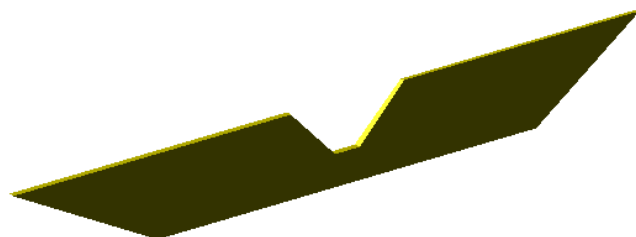


Slika 34: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Vanganel - primer 2

Naklon dna območja, kjer bi se razlila voda iz akumulacije, je bil izračunan na podlagi kote terena in oddaljenih stacionaž dolvodno od pregrade.

$$i = \frac{(42,0 - 21,4)}{1.041} = 0,0198$$

Določitev parametra  $S_b$ :



Slika 35: Prečni presek neporušenega dela pregrade Vanganel – primer 2

```

----- SOLIDS -----
Mass:                50.0000
Volume:              50.0000
Bounding box:        X: 404966.5113  --  404981.5278
                     Y: 41405.9758  --  41408.6741
                     Z: 52.0000    --  57.0000
Centroid:            X: 404974.0196
                     Y: 41407.3249
                     Z: 54.9167
    
```

Slika 36: Podatki za pregrado Vanganel - primer 2

$$S_b = 50,0 \text{ m}^2$$

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} = \frac{50,0}{5} = 10,0 \text{ m}$$

Določitev parametrov  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ , ki so potrebni za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  v nomogramih:

$$P = \frac{V}{h_0^3} = \frac{29.944 \text{ m}^3}{5^3 \text{ m}^3} = 240$$

$$b = \frac{B_b}{h_0} = \frac{10 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 2$$

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} = \frac{58,7 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 11,7$$

Določitev koeficientov  $q$  in  $\tau$ . Koeficienta sta določena v nomogramih *Priloga B.7* in *Priloga B.8*:

$$q \cong 1,41$$

$$\tau \cong 108$$

Izračun končnih količin  $Q_m$ ,  $Q$ ,  $T_1$  in  $x$ :

$$Q_m = q h_0^{5/2} g^{1/2} = 1,41 * 5^{5/2} * 9,81^{1/2} = 247 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = \frac{Q_m}{2} = \frac{247}{2} = 123 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}} = 108 * \sqrt{\frac{5}{9,81}} = 77,1 \text{ s}$$

$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} = \frac{5}{0,0198} = 50,5 \text{ m}$$

### 6.2.3 Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Vanganel za trenutno delno porušitev pregrade – primer 3

Višina dela pregrade, ki se poruši je 15,3 m, vendar bo zaradi izračuna upoštevana samo višina od najnižje kote do vodne gladine, ki vpliva na sam pretok vode preko pregrade in to je:

$$h_0 = 7 \text{ m}$$

Volumen akumulacije je izračunan s pomočjo 3D modela in računalniškega programa AutoCAD in je upoštevana le akumulacija, ki se bo prelila, to je voda od kote 46 m do kote 53 m in znaša:

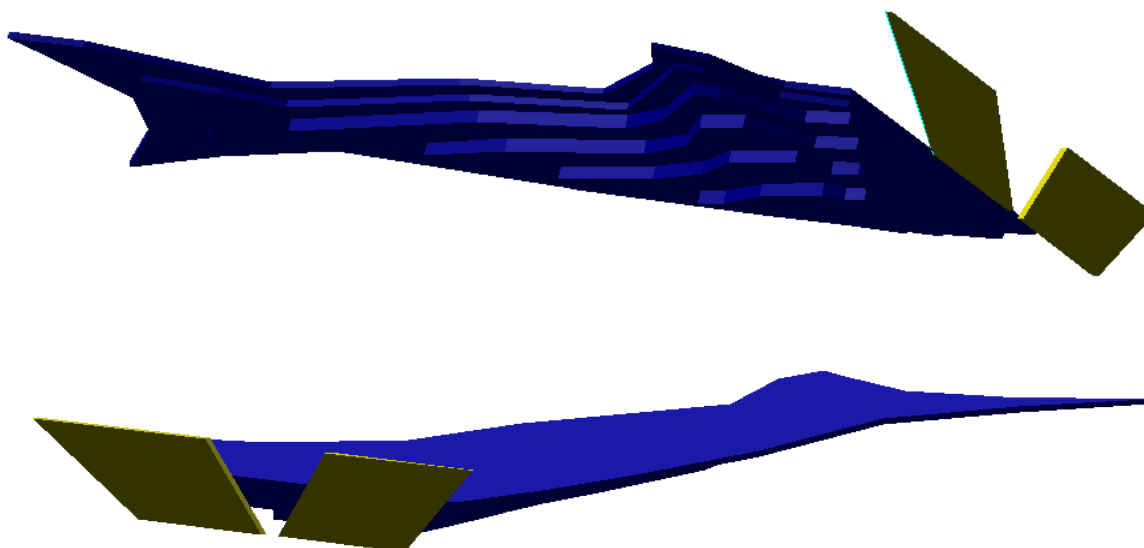
$$V = 36.361 \text{ m}^3$$

```

----- SOLIDS -----
Mass:                36360.5921
Volume:              36360.5921
Bounding box:        X: 404925.1834 -- 405044.2147
                    Y: 41252.8573  -- 41401.3731
                    Z: 43.0000   -- 53.0000
Centroid:            X: 404976.2708
                    Y: 41352.3724
                    Z: 50.2249

```

Slika 37: Podatki za akumulacijo Vanganel - primer 3

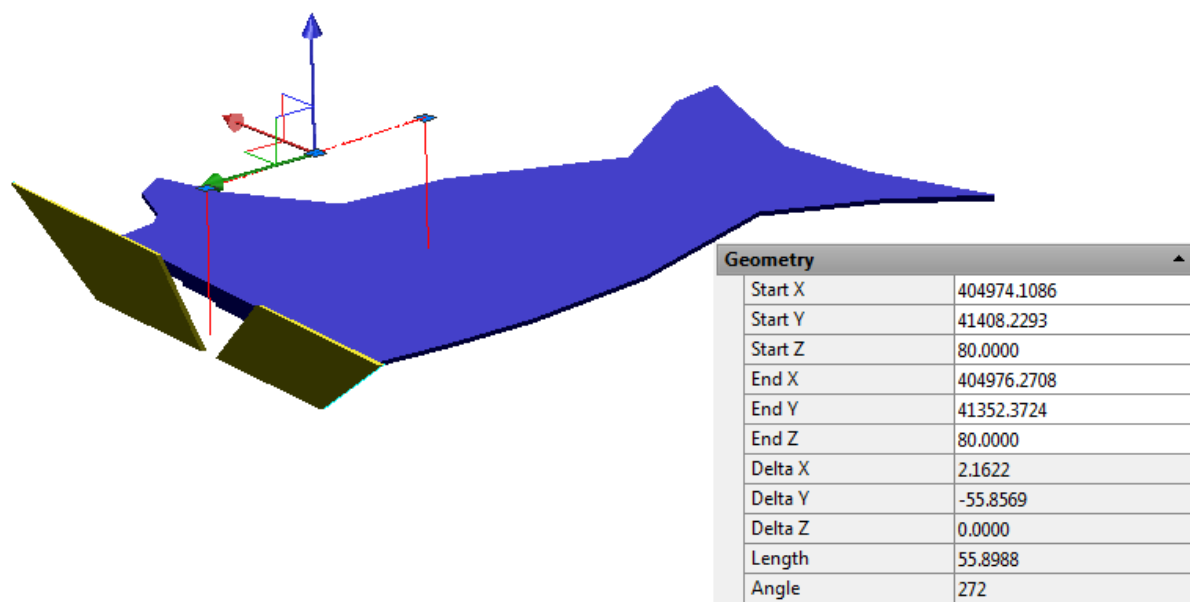


Slika 38: 3D model pregrade Vanganel - primer 3

Oddaljenost težišča akumulacije je izračunana s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in znaša:

$$l_g = 55,9 \text{ m}$$



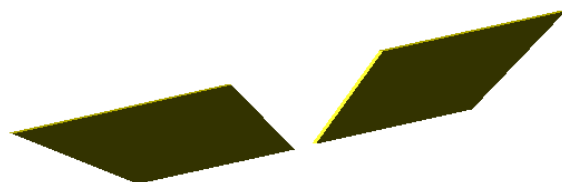


Slika 39: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Vanganel - primer 3

Naklon dna območja, kjer bi se razlila voda iz akumulacije je bil izračunan na podlagi kote terena in oddaljenih stacionaž dolvodno od pregrade.

$$i = \frac{(42,0 - 21,4)}{1.041} = 0,0198$$

Določitev parametra  $S_b$ :



Slika 40: Prečni presek neporušenega dela pregrade Vanganel – primer 3

```

----- SOLIDS -----
Mass:                84.0000
Volume:              84.0000
Bounding box:       X: 404964.6057 -- 404983.6116
                   Y: 41406.7937 -- 41409.6650
                   Z: 46.0000 -- 53.0000
Centroid:           X: 404974.1086
                   Y: 41408.2293
                   Z: 50.1806

```

Slika 41: Podatki za pregrado Vanganel - primer 3

$$S_b = 84,0 \text{ m}^2$$

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} = \frac{84,0}{7} = 12,0 \text{ m}$$

Določitev parametrov  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ , ki so potrebni za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  v nomogramih:

$$P = \frac{V}{h_0^3} = \frac{36.361 \text{ m}^3}{7^3 \text{ m}^3} = 106$$

$$b = \frac{B_b}{h_0} = \frac{12 \text{ m}}{7 \text{ m}} = 1,7$$

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} = \frac{55,9 \text{ m}}{7 \text{ m}} = 8$$

Določitev koeficientov  $q$  in  $\tau$ . Koeficienta sta določena v nomogramih *Priloga B.9* in *Priloga B.10*:

$$q \cong 0,88$$

$$\tau \cong 24$$

Izračun končnih količin  $Q_m$ ,  $Q$ ,  $T_l$  in  $x$ :

$$Q_m = q h_0^{5/2} g^{1/2} = 0,88 * 7^{5/2} * 9,81^{1/2} = 357 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = \frac{Q_m}{2} = \frac{357}{2} = 179 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}} = 24 * \sqrt{\frac{7}{9,81}} = 20,3 \text{ s}$$

$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} = \frac{7}{0,0198} = 70,7 \text{ m}$$

### 6.3 Pregrada Loče – izračun po poenostavljenih metodah

Pregrade Loče je zemeljska pregrada, ki zadržuje akumulacijo imenovano Šmartinsko jezero. Pri izračunu smo upoštevali delno trenutno porušitev, kjer bo nastala trapezna odprtina, ki bo na spodnji koti 254,8 m imela širino 3 m in nagib brežin bo v razmerju 1:1,5. Ločeno bomo obravnavali tri primere in sicer:

- Pri prvem primeru je gladina akumulacije na višini 265,4 m.
- Pri drugem primeru je gladina akumulacije na višini 263,0 m.
- Pri tretjem primeru je gladina akumulacije na višini 260,0 m.

#### 6.3.1 Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Loče za trenutno delno porušitev pregrade – primer 1

Višina dela pregrade, ki se poruši je:

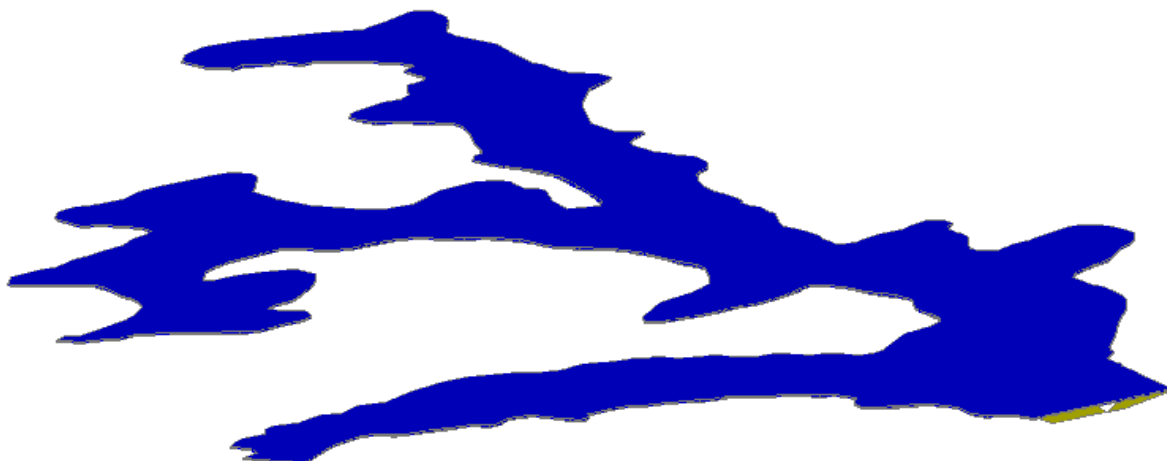
$$h_0 = 10,6 \text{ m}$$

Volumen akumulacije je izračunan s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in je upoštevana le akumulacija, ki se bo prelila, to je voda med kotami 254,8 m in 265,4 m ter znaša:

$$V = 4.680.689 \text{ m}^3$$

```
----- SOLIDS -----  
Mass:                4680689.332  
Volume:              4680689.332  
Bounding box:        X: 519878.425  --  522057.703  
                     Y: 125606.672  --  127207.259  
                     Z: 254.000    --  265.400  
Centroid:            X: 520882.842  
                     Y: 126352.169  
                     Z: 262.752
```

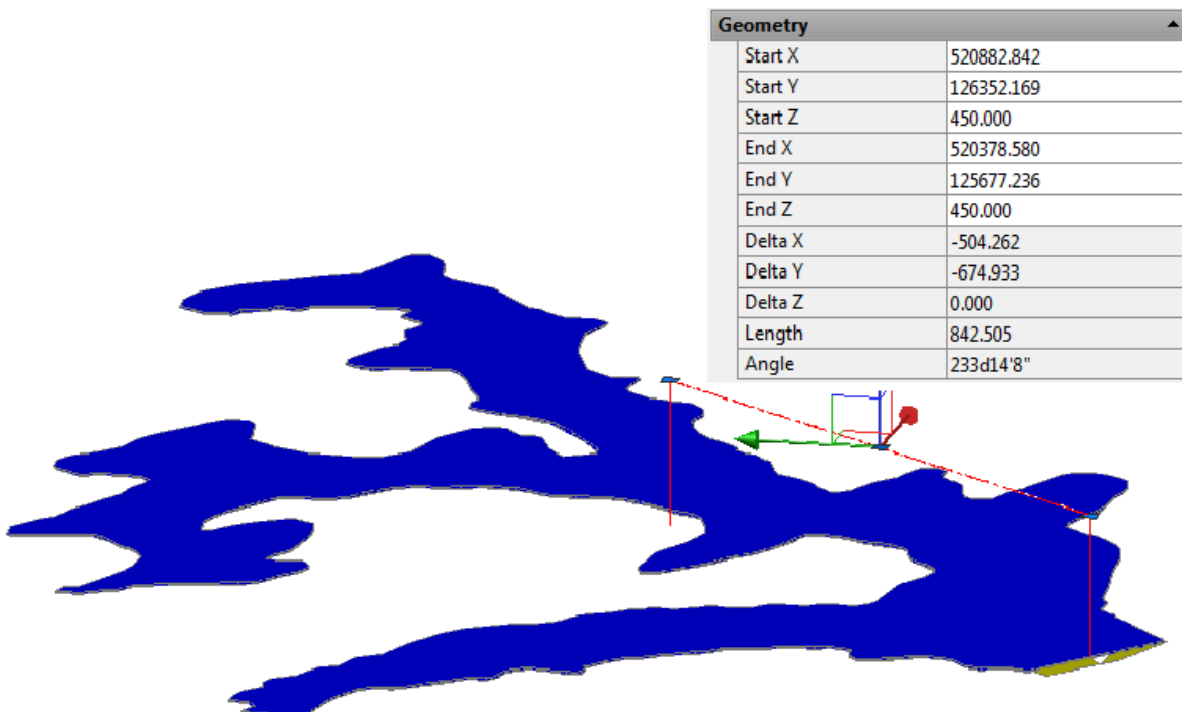
Slika 42: Podatki za akumulacijo Šmartinsko jezero - primer 1



Slika 43: 3D model pregrade Loče - primer 1

Oddaljenost težišča akumulacije je izračunana s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in znaša:

$$l_g = 842,5 \text{ m}$$

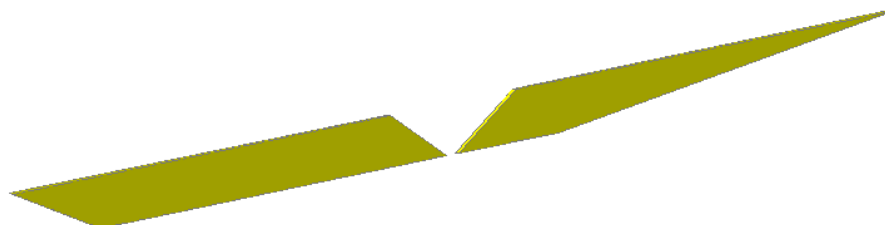


Slika 44: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Loče - primer 1

Naklon dna območja, kjer bi se razlila voda iz akumulacije je bil izračunan na podlagi kote terena in oddaljenih stacionaž dolvodno od pregrade (slika 17).

$$i = \frac{(253,5 - 245,5)}{1.391} = 0,0058$$

Določitev parametra  $S_b$ :



Slika 45: Prečni presek neporušenega dela pregrade Loče – primer 1

Select objects:

```
----- SOLIDS -----  
  
Mass:                200.340  
Volume:              200.340  
Bounding box:        X: 520376.783  -- 520404.722  
                     Y: 125656.460  -- 125678.802  
                     Z: 254.800    -- 265.400  
Centroid:            X: 520390.753  
                     Y: 125667.631  
                     Z: 261.586
```

Slika 46: Podatki za pregrado Loče - primer 1

$$S_b = 200,3 \text{ m}^2$$

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} = \frac{200,3}{10,6} = 18,9 \text{ m}$$

Določitev parametrov  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ , ki so potrebni za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  v nomogramih:

$$P = \frac{V}{h_0^3} = \frac{4.680.689 \text{ m}^3}{10,6^3 \text{ m}^3} = 3.930$$

$$b = \frac{B_b}{h_0} = \frac{18,9 \text{ m}}{10,6 \text{ m}} = 1,8$$

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} = \frac{842,5 \text{ m}}{10,6 \text{ m}} = 79,5$$

Določitev koeficientov  $q$  in  $\tau$ . Koeficienta sta določena v nomogramih *Priloga M.11* in *Priloga B.12*:

$$q \cong 1,16$$

$$\tau \cong 991$$

Izračun končnih količin  $Q_m$ ,  $Q$ ,  $T_1$  in  $x$ :

$$Q_m = qh_0^{5/2}g^{1/2} = 1,16 * 10,6^{5/2} * 9,81^{1/2} = 1.329 \frac{m^3}{s}$$

$$Q = \frac{Q_m}{2} = \frac{1.329}{2} = 664,5 \frac{m^3}{s}$$

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}} = 991 * \sqrt{\frac{10,6}{9,81}} = 1.030 \text{ s}$$

$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} = \frac{10,6}{0,0058} = 368,6 \text{ m}$$

### 6.3.2 Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Loče za trenutno delno porušitev pregrade – primer 2

Višina dela pregrade, ki se poruši je:

$$h_0 = 8,2 \text{ m}$$

Volumen akumulacije je izračunan s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in je upoštevana le akumulacija, ki se bo prelila, to je voda med kotami 254,8 m in 263,0 m ter znaša:

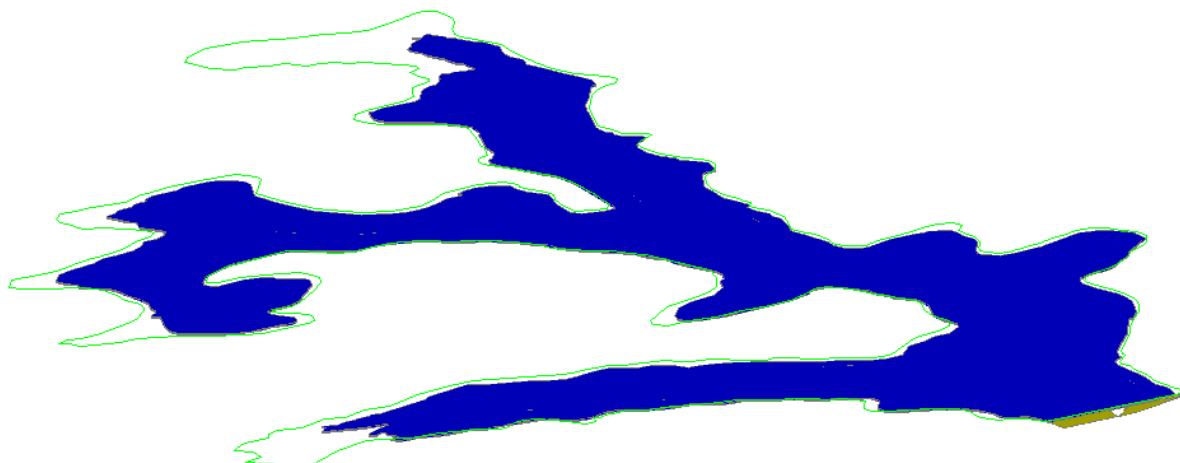
$$V = 2.251.717 \text{ m}^3$$

```

----- SOLIDS -----
Mass:                2251717.234
Volume:              2251717.234
Bounding box:        X: 520038.566  --  521955.736
                    Y: 125614.128  --  127131.145
                    Z: 254.000    --  263.000
Centroid:            X: 520842.296
                    Y: 126247.114
                    Z: 261.189

```

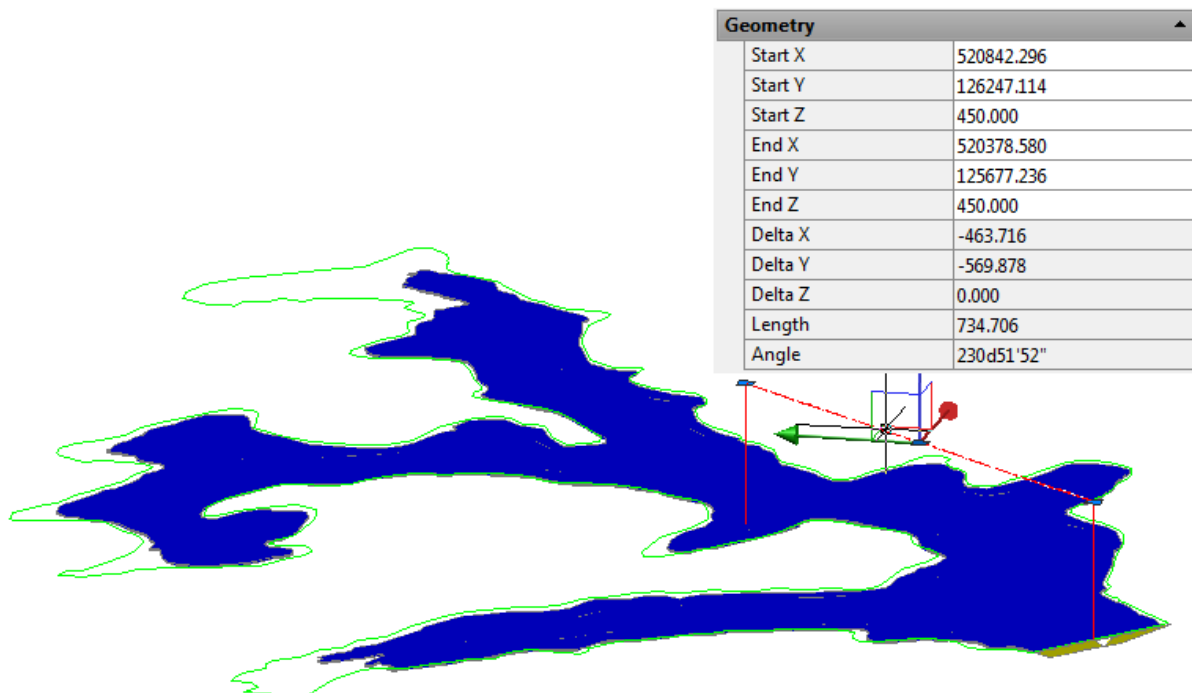
Slika 47: Podatki za akumulacijo Šmartinsko jezero - primer 2



Slika 48: 3D model pregrade Loče - primer 2

Oddaljenost težišča akumulacije je izračunana s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in znaša:

$$l_g = 734,7 \text{ m}$$

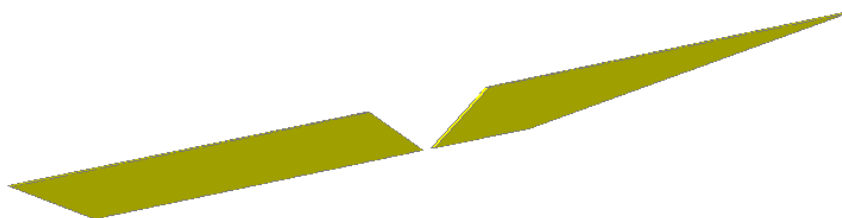


Slika 49: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Loče - primer 2

Naklon dna območja, kjer bi se razlila voda iz akumulacije je bil izračunan na podlagi kote terena in oddaljenih stacionaž dolvodno od pregrade (slika 17).

$$i = \frac{(253,5 - 245,5)}{1.391} = 0,0058$$

Določitev parametra  $S_b$ :



Slika 50: Prečni presek neporušenega dela pregrade Loče – primer 2

```

----- SOLIDS -----
Mass:                125.460
Volume:              125.460
Bounding box:        X: 520379.610  --  520401.896
                    Y: 125658.690  --  125676.572
                    Z: 254.800    --  263.000
Centroid:            X: 520390.753
                    Y: 125667.631
                    Z: 259.999

```

Slika 51: Podatki za pregrado Loče - primer 2

$$S_b = 125,5 \text{ m}^2$$

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} = \frac{125,5}{8,2} = 15,3 \text{ m}$$

Določitev parametrov  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ , ki so potrebni za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  v nomogramih:

$$P = \frac{V}{h_0^3} = \frac{2.251.717 \text{ m}^3}{8,2^3 \text{ m}^3} = 4.084$$

$$b = \frac{B_b}{h_0} = \frac{15,3 \text{ m}}{8,2 \text{ m}} = 1,9$$

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} = \frac{734,7 \text{ m}}{8,2 \text{ m}} = 89,6$$



Določitev koeficientov  $q$  in  $\tau$ . Koeficienta sta določena v nomogramih *Priloga B.13* in *Priloga B.14*:

$$q \cong 1,34$$

$$\tau \cong 1.049$$

Izračun končnih količin  $Q_m$ ,  $Q$ ,  $T_1$  in  $x$ :

$$Q_m = qh_0^{5/2}g^{1/2} = 1,34 * 8,2^{5/2} * 9,81^{1/2} = 808 \frac{m^3}{s}$$

$$Q = \frac{Q_m}{2} = \frac{808}{2} = 404 \frac{m^3}{s}$$

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}} = 1.049 * \sqrt{\frac{8,2}{9,81}} = 959 s$$

$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} = \frac{8,2}{0,0058} = 285,2 m$$

### 6.3.3 Račun pretoka $Q_{max}$ , $Q$ , časa $T_1$ in razdalje $x$ za pregrado Loče za trenutno delno porušitev pregrade – primer 3

Višina dela pregrade, ki se poruši je:

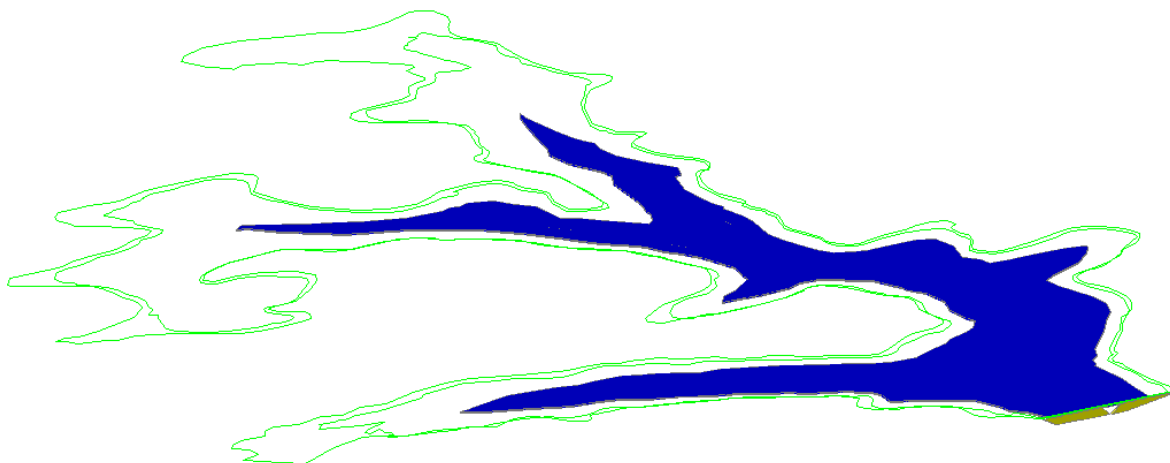
$$h_0 = 5,2 m$$

Volumen akumulacije je izračunan s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in je upoštevana le akumulacija, ki se bo prelila, to je voda med kotami 254,8 m in 260,0 m ter znaša:

$$V = 990.909 m^3$$

```
----- SOLIDS -----  
Mass:                990908.633  
Volume:              990908.633  
Bounding box:       X: 520181.900  --  521611.021  
                   Y: 125632.775  --  126952.791  
                   Z: 254.000    --  261.500  
Centroid:           X: 520765.201  
                   Y: 126063.997  
                   Z: 259.839
```

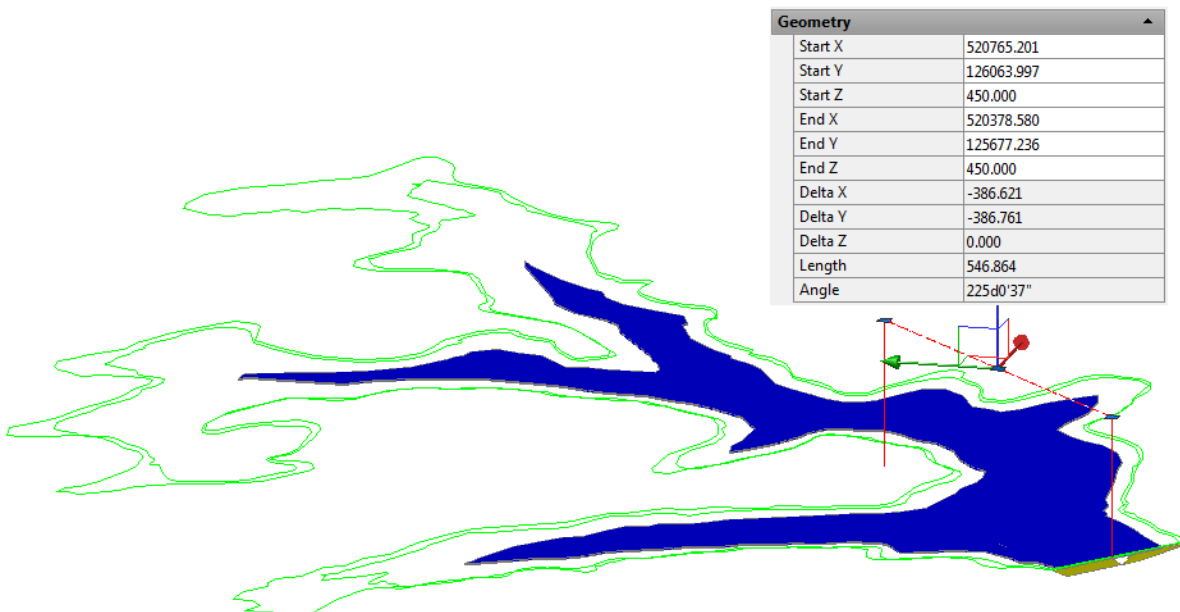
Slika 52: Podatki za akumulacijo Šmartinsko jezero - primer 3



Slika 53: 3D model pregrade Loče - primer 3

Oddaljenost težišča akumulacije je izračunana s pomočjo računalniškega programa AutoCAD in znaša:

$$l_g = 546,9 \text{ m}$$

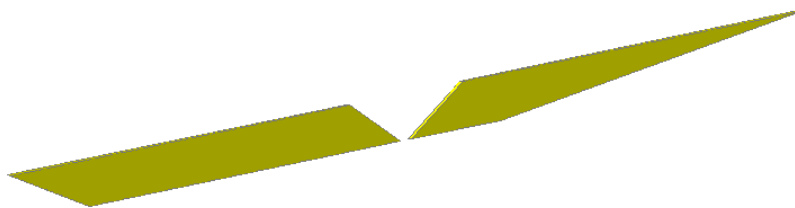


Slika 54: Določitev oddaljenosti težišča pregrade in težišča akumulacije Loče - primer 3

Naklon dna območja, kjer bi se razlila voda iz akumulacije je bil izračunan na podlagi kote terena in oddaljenih stacionaž dolvodno od pregrade (slika 17).

$$i = \frac{(253,5 - 245,5)}{1.391} = 0,0058$$

Določitev parametra  $S_b$ :



Slika 55: Prečni presek neporušenega dela pregrade Loče – primer 3

```
----- SOLIDS -----  
Mass:                56.160  
Volume:              56.160  
Bounding box:        X: 520383.142 -- 520398.363  
                     Y: 125661.478 -- 125673.785  
                     Z: 254.800 -- 260.000  
Centroid:            X: 520390.753  
                     Y: 125667.631  
                     Z: 258.026
```

Slika 56: Podatki za pregrado Loče - primer 3

$$S_b = 56,2 \text{ m}^2$$

$$B_b = \frac{S_b}{h_0} = \frac{56,2}{5,2} = 10,8 \text{ m}$$

Določitev parametrov  $P$ ,  $b$  in  $\lambda$ , ki so potrebni za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  v nomogramih:

$$P = \frac{V}{h_0^3} = \frac{990.909 \text{ m}^3}{5,2^3 \text{ m}^3} = 7.047$$

$$b = \frac{B_b}{h_0} = \frac{10,8 \text{ m}}{5,2 \text{ m}} = 2,1$$

$$\lambda = \frac{l_g}{h_0} = \frac{546,9 \text{ m}}{5,2 \text{ m}} = 105,2$$

Določitev koeficientov  $q$  in  $\tau$ . Koeficienta sta določena v nomogramih *Priloga B.15* in *Priloga B.16*:

$$q \cong 1,36$$

$$\tau \cong 1336$$

Izračun končnih količin  $Q_m$ ,  $Q$ ,  $T_l$  in  $x$ :

$$Q_m = qh_0^{5/2}g^{1/2} = 1,36 * 5,2^{5/2} * 9,81^{1/2} = 263 \frac{m^3}{s}$$

$$Q = \frac{Q_m}{2} = \frac{263}{2} = 131,5 \frac{m^3}{s}$$

$$T_1 = \tau \sqrt{\frac{h_0}{g}} = 1.336 * \sqrt{\frac{5,2}{9,81}} = 973 \text{ s}$$

$$x \cong 0,2 \frac{h_0}{i} = \frac{5,2}{0,0058} = 180,8 \text{ m}$$

## 7 ANALIZA REZULTATOV

V tem poglavju bomo analizirali rezultate, ki smo jih dobili pri računu porušitvenih valov po poenostavljenih metodah in jih bomo primerjali z rezultati, dobljenimi s popolnimi metodami. Zaradi različno podrobnih interpretacij rezultatov popolnih metod bomo primerjavo izvedli za vsako pregrado posebej.

Poročila, ki prikazujejo hidravlične izračune porušitvenih valov, vhodne podatke, metode izračunov in tudi končne rezultate, večinoma ne opisujejo dovolj podrobno. Namen preračunov in izdelave dokumentacije o porušitvenih valovih je bil namreč predvsem preveriti obseg posledic, ki bi nastale pri porušitvi pregrad, zato je tudi interpretacija rezultatov sledila temu cilju. Bistveni podatki takšnih analiz so predvsem trije in sicer maksimalne kote vodnih gladin oziroma višine vala, njegova hitrost oziroma pretok in pa čas prihoda čela vala do posamezne stacionaže. S temi podatki lahko predvidimo situacijo, ki bi nastala ob porušitvi in pripravimo ustrezne rešitve in načrte reševanja za omilitev ali celo preprečitev morebitnih nastalih posledic. Kljub nepopolnim podatkom popolnih in poenostavljenih metod bomo na podlagi znanih rezultatov in uporabo ustreznih interpolacij narediti primerjavo rezultatov obeh metod in oceniti uporabnost poenostavljene metode.

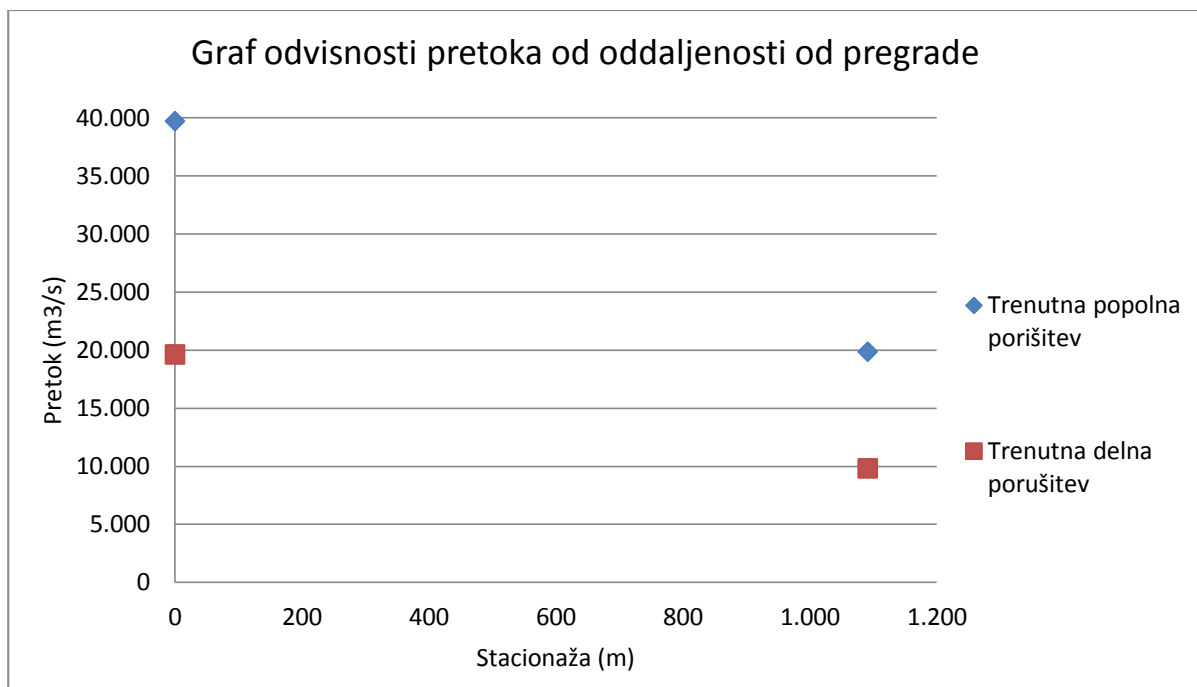
Poudariti je potrebno še, da so bili podatki glede samih akumulacij pri poenostavljeni metodi pridobljeni z drugačno metodo kot v primeru uporabe prečnih profilov pri popolnih metodah, vendar večjih odstopanj v volumnu ni bilo zaznanih.

### 7.1 Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vogršček

Za pregrado Vogršček sta bila narejena dva izračuna in sicer prvi za trenutno popolno porušitev in drugi za delno porušitev, ki sta bila narejena tudi z uporabo popolnih metod za račun porušitvenega vala.

Trenutna popolna porušitev zemeljske pregrade je v praksi zelo malo verjetna, saj je skoraj nemogoče v zelo kratkem časovnem intervalu premakniti ogromno gmoto zemljine, ki sestavlja pregrado. Izračun je bi narejen z namenom primerjave poenostavljene metode za ekstremni dogodek porušitve z dogodkom delne porušitve. Pri popolni porušitvi bi se v hipu porušila pregrada s prečnim presekom  $3.070,3 \text{ m}^2$ , medtem ko bi se pri delni porušil le del pregrade v obliki trapezna s presekom  $1.327,5 \text{ m}^2$ .

Izračun je pokazal, da pri popolni porušitvi nastanejo dvakrat večji pretoki, kot v primeru delne porušitve. Razdalja  $x$ , kjer se pretok, ki je izračunan na pregradi prepolovi, pa je v obeh primerih enaka, saj je višina porušenega dela pregrade v obeh primerih enaka. Vrednosti pretokov  $Q_m$  in  $Q$  ter razdalje  $x$  so razvidne iz grafikona (slika 57).



Slika 57: Graf odvisnosti pretoka od oddaljenosti od pregrade Vogršček

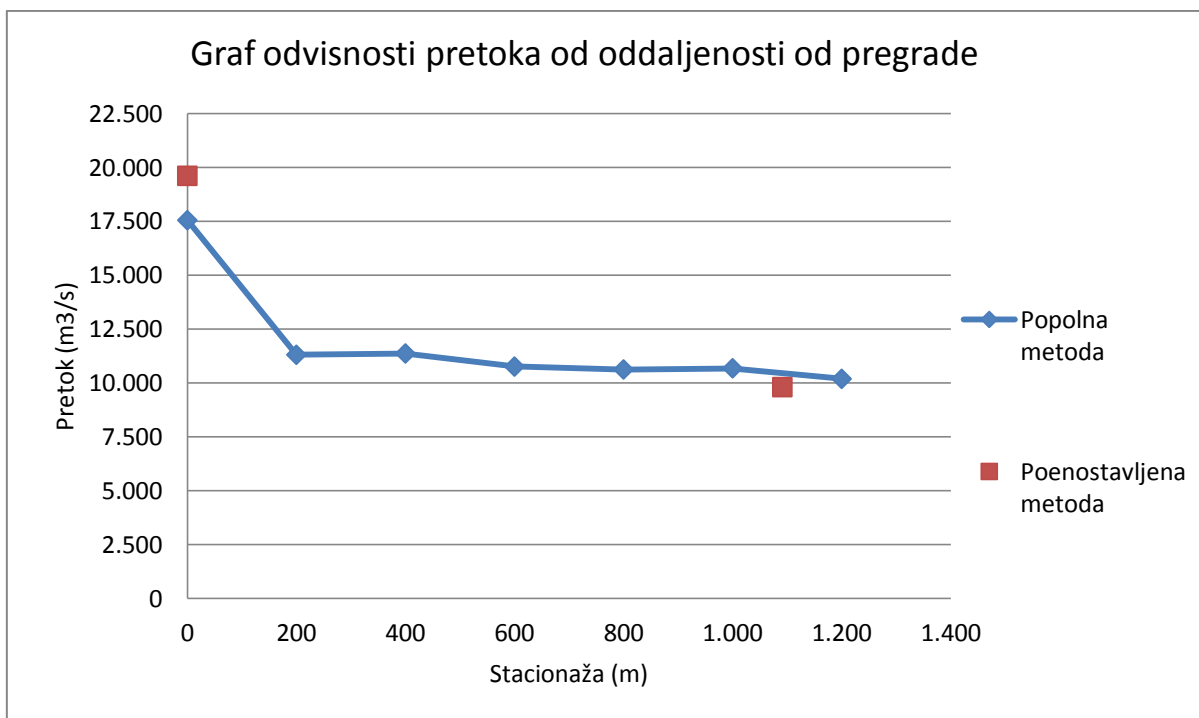
## 7.2 Primerjava rezultatov obeh metod za delno porušitev pregrade Vogršček

Rezultati popolne metode so razvidni iz preglednice in sicer po stacionažah za vrednosti največjih pretokov in časih, ko je bil ta pretok dosežen. Vrednost največjega pretoka tik ob pregradi je bila razvidna neposredno iz preglednice. Za vrednosti pretokov na razdalji  $x$ , ki jo obravnava poenostavljena metoda, pa so bile interpolirane med dvema stacionažama., kot je prikazano v preglednici 3:

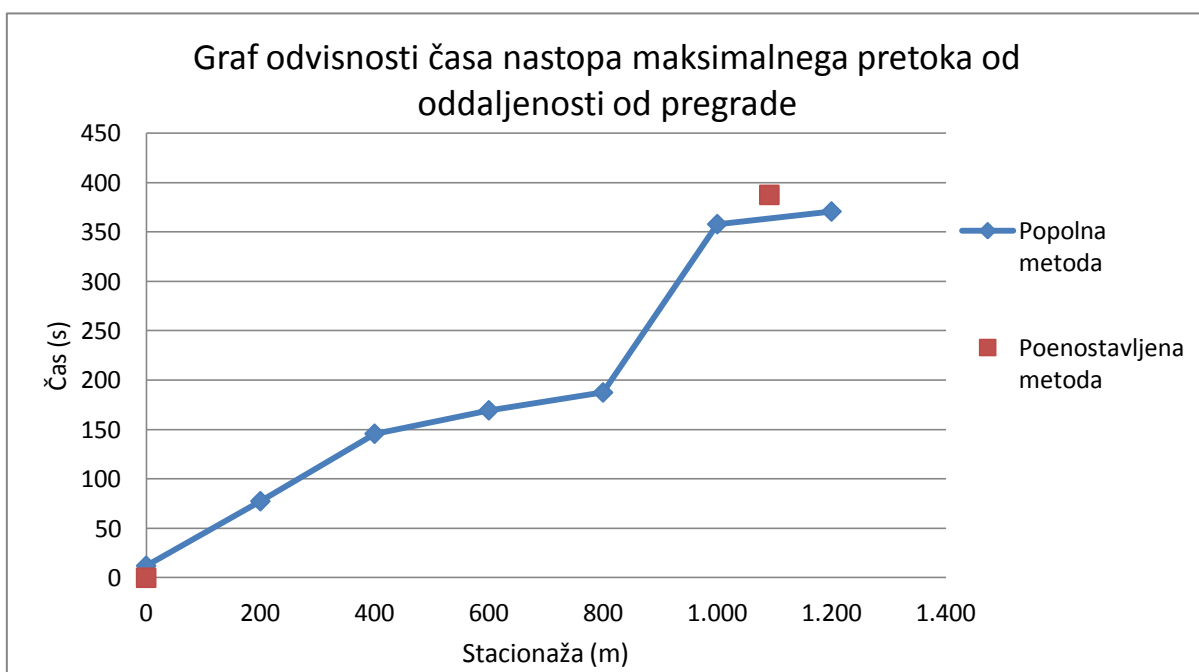
Preglednica 3: Interpolirane vrednosti rezultatov dobljenih s popolno metodo za pregrado Vogršček

$x$ (m)	$Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$T_{Q_{\max}}$ (s)
1000	10681,8	357,90
<b>1091</b>	<b>10458,7</b>	<b>363,72</b>
1200	10191,4	370,70

Rezultati obeh izračunov so prikazani v grafih, ki jih prikazujeta *slika 58* in *slika 59*. Rezultati so si vizualno zelo podobni, natančne vrednosti pa bodo izračunane v nadaljevanju.



Slika 58: Graf odvisnosti pretoka od oddaljenosti od pregrade za pregrado Vogršček



Slika 59: Graf odvisnosti časa od oddaljenosti od pregrade za pregrado Vogršček

Primerjava rezultatov pretokov in časov nastopa maksimalnega pretoka na mestu porušitve pregrade in razdalji  $x = 1091$  m je razvidna iz *preglednice 4*:

**Preglednica 4: Primerjava rezultatov za pregrado Vogršček**

	Popolna metoda	Poenostavljena metoda	Razlika
$Q_{\text{pregrada}}$	17555,5	19616,5	11,7%
$Q_x$	10458,7	9808,3	- 6,2%
$t_x$	363,7	387,5	6,5%

Razlika pretokov na pregradi je 11,7 %, medtem ko je razlika pri razdalji  $x$  le še 6,2 %. Čas, ko je bil dosežen največji pretok na razdalji  $x$  po popolni metodi pa se od rezultata poenostavljene metode razlikuje za 6,5%.

### 7.3 Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vanganel

Račun porušitvenih valov v primeru porušitve pregrade Vanganel je bil izveden na treh primerih. Rezultati popolne metode so bili v poročilu podani kot računalniški izpiski iz programa LAXPOR. Računalniški izpisi programa LAXPOR so narejeni po korakih časovnega intervala  $\Delta t$ , zato je bilo potrebno rezultate interpolirati, da jih lahko uporabimo za primerjavo obeh metod.

#### 7.3.1 Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vanganel za primer 1

Kot je bilo omenjeno v prejšnjem poglavju smo imeli poleg razpoložljive dokumentacije o izračunih na voljo še računalniške izpise programa LAXPOR. Del izpisa za prvi primer porušitve je prikazan v *prilogi A.1*.

Iz podatkov lahko razberemo največji pretok na stacionaži 300 m, ki predstavlja pregrado. Vrednost največjega pretoka je bila:

$$Q_{\max}(t = 25,64 \text{ s}; x = 0 \text{ m}) = 138,296 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Vrednost pretoka pri stacionaži  $x$  (ker je bila začetna stacionaža 300 m za pregrado, bodo predstavljene vrednosti za velikost 300 m, tako da bo začetna vednost na pregradi) je bila določena po ekstrapolacijski metodi. Ekstrapolirane vrednosti so prikazane v *preglednici 5*:



**Preglednica 5: Ekstrapolacija rezultatov, dobljenih s popolno metodo za pregrado Vanganel za primer 1**

x	$Q_{(t=29,94s)}$	$Q_{(t=34,19s)}$	$Q_{(t=221,31s)}$
(m)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)
50,0	170,0	173,8	368,4
<b>50,5</b>	<b>169,6</b>	<b>173,4</b>	<b>372,6</b>
100,0	130,0	142,5	790,1

Podatki popolne metode so bili za ta model porušitve pomanjkljivi, zato bomo poskusili pridobiti manjkajoče vrednosti s pomočjo ekstrapolacije. Iz *preglednice 5* je razvidno, da je ekstrapolacija pretoka na čas  $t = 221,31$  s prevelika, saj predstavlja kar 44-kratno ekstrapolacijsko območje. Zaradi navedenega vzroka v tem primeru rezultata ne bomo upoštevali. Ravno tako ne bomo določali časa, ki pri stacionarnosti  $x = 50,5$  m predstavlja največjo vrednost pretoka.

Primerjava rezultatov je pokazala naslednje vrednosti, ki so razvidne iz *preglednice 6*:

**Preglednica 6: Primerjava rezultatov za pregrado Vanganel za primer 1**

	Popolna metoda	Poenostavljena metoda	Razlika
$Q_{pregrada}$	138,3	329,2	138,0%
$Q_x$	-	164,6	-
$t_x$	-	221,3	-

### 7.3.2 Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vanganel za primer 2

Pri primeru 2, je bila pri analitični metodi ugotovljena najvišja vrednost pretoka na pregradi:

$$Q_{max}(t = 2,30 \text{ s}; x = 0 \text{ m}) = 164,294 \frac{m^3}{s}$$

Vrednost pretoka pri stacionarnosti  $x = 50,5$  m je bila določena po interpolacijski metodi, kar je razvidno iz *preglednice 7*:

**Preglednica 7: Interpolacija rezultatov dobljenih s popolno metode za pregrado Vanganel za primer 2**

x	$Q_{(t=75,84s)}$	$Q_{(t=77,91s)}$	$Q_{(t=77,10s)}$
(m)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)
50,0	147,4	147,5	147,4
<b>50,5</b>	<b>147,6</b>	<b>147,7</b>	<b>147,6</b>
100,0	167,3	166,7	167,0

Določitev časa, ki pri stacionarnaži  $x = 50,5$  m predstavlja največjo vrednost pretoka je prikazana v preglednici 8:

**Preglednica 8: Določitev časa, ko je na razdalji  $x$  največji pretok za pregrado Vanganel - primer 2**

$x \setminus t$	27,03	29,12	31,18	33,23	35,26	37,28	<b>39,29</b>	41,29
50,0	202,3	208,4	213,3	217,0	219,6	220,9	221,0	220,0
<b>50,5</b>	201,7	207,8	212,8	216,5	219,1	220,5	<b>220,6</b>	219,7
100,0	141,3	150,7	159,4	167,4	174,4	180,6	185,8	190,1

Rezultati primerjave obeh metod so predstavljene v preglednici 9:

**Preglednica 9: Primerjava rezultatov obeh metod za pregrado Vanganel za primer 2**

	Popolna metoda	Poenostavljena metoda	Razlika
$Q_{\text{pregrada}}$	164,3	246,9	50,3%
$Q_x$	220,6	123,4	- 44,0%
$t_x$	39,3	77,1	96,2%

### 7.3.3 Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Vanganel za primer 3

Pri primeru 3, je bila pri popolni metodi ugotovljena najvišja vrednost pretoka na pregradi:

$$Q_{\max}(t = 25, s; x = 0 \text{ m}) = 304,630 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Vrednost pretoka pri stacionaži  $x = 70,7$  m je bila določena po interpolacijski metodi, kar je razvidno iz preglednice 10:

**Preglednica 10: Interpolacija rezultatov, dobljenih pri popolni metodi za pregrado Vanganel za primer 3**

$x$	$Q_{(t=17,26s)}$	$Q_{(t=20,50s)}$	$Q_{(t=20,30s)}$
(m)	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	( $\text{m}^3/\text{s}$ )
50,0	323,0	339,5	338,5
70,7	266,5	290,4	<b>288,9</b>
100,0	186,5	220,9	218,8

Določitev časa, ki pri stacionarnaži  $x = 70,7$  m predstavlja največjo vrednost pretoka je prikazana v preglednici 11:

**Preglednica 11: Določitev časa, ko je na razdalji  $x$  največji pretok za pregrado Vanganel - primer 3**

$x \setminus t$	17,26	20,5	23,7	26,87	<b>30,06</b>	32,89	35,42	37,72
50,0	323,0	339,5	346,6	344,6	336,1	323,7	308,8	294,3
<b>70,7</b>	266,5	290,4	306,0	313,1	<b>313,6</b>	309,0	301,1	292,2
100,0	186,5	220,9	248,5	268,7	281,8	288,2	290,1	289,2

Rezultati primerjave obeh metod so predstavljene v *preglednici 12*:

**Preglednica 12: Primerjava rezultatov za pregrado Vanganel za primer 3**

	Popolna metoda	Poenostavljena metoda	Razlika
$Q_{\text{pregrada}}$	304,6	357,3	17,3%
$Q_x$	288,9	178,7	- 38,2%
$t_x$	30,1	70,7	135,4%

#### 7.4 Primerjava rezultatov pri porušitvenem modelu pregrade Loče

Za pregrado Loče so bili narejeni izračuni za tri modele delne trenutne porušitve. Poudarek rezultatov, dobljenih s popolno metodo, je bil predvsem na višinskih kotah gladine vala in na času potovanja čela vala. Kljub temu so nam na voljo tudi podatki o največjih pretokih za tri stacionaže, od katere je ena na sami pregradi. Te podatke bomo uporabili za primerjavo rezultatov med dvema metodama za izračun poplavnih valov. Ostalih podatkov za primerjavo ni na voljo, zato se bomo osredotočili samo na pretoke na pregradi, ki nastanejo pri porušitvenih modelih.

Zaradi podobnih primerov smo vse tri primere obravnavali hkrati. *Preglednica 13* prikazuje pretoke na pregradi, ki nastanejo pri porušitvenih modelih za posamezne primere:

**Preglednica 13: Vrednosti pretokov pri porušitvi pregrade Loče z metodo s polnimi enačbami**

Prečni profil	$x$	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Pregrada	0	1200	800	230

Rezultati primerjave obeh metod za primer 1 so predstavljeni v *preglednici 14*:

**Preglednica 14: Primerjava rezultatov za pregrado Loče za primer 1**

Primer 1	Popolna metoda	Poenostavljena metoda	Razlika
$Q_{\text{pregrada}}$	1200,0	1329,1	10,8%
$Q_x$	-	664,5	-
$t_x$	-	1030,1	-

Rezultati primerjave obeh metod za primer 2 so predstavljene v *preglednici 15*:

**Preglednica 15: Primerjava rezultatov za pregrado Loče za primer 2**

Primer 2	Popolna metoda	Poenostavljena metoda	Razlika
$Q_{\text{pregrada}}$	800,0	808,1	1,0%
$Q_x$	-	404,1	-
$t_x$	-	959,1	-

Rezultati primerjave obeh metod za primer 3 so predstavljene v *preglednici 16*:

**Preglednica 16: Primerjava rezultatov za pregrado Loče za primer 3**

Primer 3	Popolna metoda	Poenostavljena metoda	Razlika
$Q_{\text{pregrada}}$	230,0	262,7	14,2%
$Q_x$	-	131,3	-
$t_x$	-	972,7	-

## 8 ZAKLJUČKI

Cilj diplomske naloge je določitev uporabnosti poenostavljenih metod za preračun porušitvenih valov. Poenostavljene metode vsebujejo empirične enačbe in nomograme, s katerimi določamo brezdimenzijske koeficiente, na podlagi katerih izračunamo končne vrednosti. Ker gre za empirične enačbe, pomeni, da izvor poenostavljenih enačb ne temelji na osnovi naravnih fizikalnih zakonov, ampak so enačbe dobljene izkustveno na podlagi analiziranja večjega števila numeričnih izračunov porušitvenih valov, ki uporabljajo polne St. Venant-ove enačbe.

Izračun porušitvenih valov po poenostavljeni metodi je z uporabo nomogramov relativno hitro rešljiv problem in za reševanje ne potrebujemo veliko vhodnih podatkov.

Za primerjavo rezultatov pridobljenih po poenostavljeni metodi, smo uporabili rezultate, dobljene s polnimi St. Venant-ovimi enačbami. Modeli porušitev po poenostavljeni metodi so bili prilagojeni porušitvenim primerom, ki so bili izračunani s polnimi enačbami. Rezultati oziroma njihovo odstopanje je bilo podrobneje predstavljeno v prejšnjih poglavjih. Ugotovljena odstopanja so bila med primeri različna.

Rezultati odstopanj maksimalnih pretokov na pregradi  $Q_{pregrada}$  in za polovico zmanjšanih pretokov  $Q_x$ , do katerih pride na oddaljenosti  $x$  od pregrade ter časov, ko ta pretok  $Q_x$  nastopi, so še enkrat skupno prikazani v preglednici 17:

**Preglednica 17: Odstopanje rezultatov pri uporabi popolne in poenostavljene metode za računanje poplavnih valov**

Porušitveni model	$Q_{pregrada}$	$Q_x$	$t_x$
Vogršček: Primer 1	-	-	-
Vogršček: Primer 2	11,7%	- 6,2%	6,5%
Vanganel: Primer 1	138,0%	-	-
Vanganel: Primer 2	50,3%	- 44,0%	96,2%
Vanganel: Primer 3	17,3%	- 38,2%	135,4%
Loče: Primer 1	10,8%	-	-
Loče: Primer 2	1,0%	-	-
Loče: Primer 3	14,2%	-	-
<b>Povprečje</b>	<b>34,8%</b>	<b>- 29,5%</b>	<b>79,4%</b>

Iz preglednice 17 je razvidno, da so vrednosti pretokov, ki so bili izračunani na sami pregradi, po obeh metodah zelo podobni. Razen primera *Vanganel: Primer 1*, kjer je odstopanje 138% in morda *Vanganel: Primer 2*, kjer je odstopanje 50% so razlike rezultatov manjše od 20%. Povprečno odstopanje glede na vse primer je bilo 34%. Ob upoštevanju dejstev, da so rezultati, dobljeni s popolnimi metodami reda točnosti  $\pm 15 - 20\%$ , izjemoma tudi  $\pm 30\%$ , lahko sklepamo, da je rezultat poenostavljenih metod reda točnosti  $\pm 50\%$ .

Pri nadaljnji primerjavi ni bil primerjan parameter  $x$ , ampak maksimalen pretok  $Q_x$ , ki nastopi na oddaljenosti  $x$  dolvodno od pregrade in pa čas nastopa tega pretoka  $t_x$ . Rezultati pretoka  $Q_x$  kažejo odstopanje 29,5%. Odstotek je bil zaradi pomanjkanja rezultatov popolnih metod za primerjavo določljiv le na treh primerih izračuna, zato je zanesljivost tega rezultata manjša. Podobno razmišljanje velja za podatek časa  $t_x$ , kjer je bilo povprečno odstopanje 79,4%.

Poenostavljene metode poleg empiričnih enačb in brezdimenzijskih parametrov za reševanje vsebujejo tudi dva nomograma. Kot je bilo opisano v prejšnjih poglavjih, se ta dva nomograma uporabljata za določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$ . Nomograma sta narejena za določena območja, ki se definirajo z brezdimenzijskimi parametri  $P$ ,  $\lambda$  in  $b$ . Določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  znotraj tega območja poteka s pomočjo interpolacije, saj nomogram ni narejen za vsak dotičen primer. Poleg tega so krivulje, na podlagi katerih določamo parametre, nelinearne. Kljub karseda natančni digitalizaciji nomograma (nomogram je namreč dostopen iz strokovnega članka: Rajar R., 1973. Modelé mathématique et abaques sans dimensions pour la détermination de l'écoulement qui suit la rupture d'un barrage) in pomoči grafičnih računalniških programov ter zaradi zgoraj omenjenih problemov je določevanja parametra  $q$  in  $\tau$  podvrženo velikim odstopanjem reda  $\pm 20\%$ . Takšno odstopanje ima velik vpliv na končni rezultat. Še mnogo večji problem nastane, ko je vrednost parametrov  $\lambda$  in  $b$ , predvsem pa  $P$ , izven območja krivulj nomogramov. Takrat moramo uporabiti metodo ekstrapolacije, s tem pa se z vse večjim oddaljevanjem od osnovnih nomogramskih krivulj povečuje tudi stopnja napake, ki jo z ekstrapolacijo povzročimo.

Glede na skupne ugotovitve, da vir največjih netočnosti pri uporabi poenostavljenih metod predstavljajo nomogrami oziroma določevanje parametrov  $q$  in  $\tau$  preko njih, lahko rešitev iščemo v dveh smereh. Prva možnost je ponovna digitalna določitev nomograma z gostejšimi krivuljami  $\lambda$  in  $b$  ter razširitev krivulj za večji interval parametra  $P$ , druga pa vnaprejšnja omejitev uporabe poenostavljene metode na območje za znane parametre  $P$  in krivulje  $\lambda$  ter  $b$ .

Poudariti je potrebno še osnovne pogoje za uporabo poenostavljenih metod, ki v obravnavanih primerih niso bili vedno izpolnjeni. Kot primer lahko navedemo, da poenostavljena metoda zahteva,

da je osnovni tok pod pregrado zanemarljiv, medtem ko je pri pregradi Vanganel, ta znašal  $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , kar predstavlja več kot 10% pretoka ob porušitvi. Nadalje je bil pri porušitvi pregrade Loče pri popolni metodi Manning-ov koeficient ocenjen na  $n_G = 0,035$ , medtem ko poenostavljena metoda predvideva, da je  $n_G = 0,025$ . Razlika koeficientov je v tem primeru 40%.

Moje mnenje, ki ga lahko po opravljeni analizi podam glede uporabe poenostavljene metode z nomogrami je, da je uporaba poenostavljenih metod mogoča le v primerih, ki izpolnjujejo osnovne pogoje za uporabo metode in so brezdimenzijski parametri  $P$ ,  $\lambda$  in  $b$  znotraj območja nomogramov.

Rezultat maksimalnega pretoka  $Q_m$ , ki ga dobimo pri poenostavljeni metodi, je relativno zanesljiv, medtem ko sta podatka o razdalji  $x$  in času  $T_l$  precej nezanesljiva, saj ima vsako razlivno področje pod pregrado svoje značilne karakteristike, ki jih samo s povprečnim padcem terena ne moremo dovolj točno zajeti.

Uporaba poenostavljene metode z nomogrami za splošno rabo za preračun poplavnih valov vsled porušitev zaradi zgoraj opisanih problemov ni najbolj primerna. V praksi se velikokrat pojavljajo potrebe po hitri in grobi oceni maksimalnih pretokov ob porušitvi in takrat je uporaba poenostavljenih metod lahko dobrodošla in upravičena. S poenostavljeno metodo lahko namreč v zelo kratkem času brez zahtevnih računalniških orodij pridemo do približnega rezultata. To je še posebej koristno pri nastanku naravnih pregrad pri zemeljskih plazovih, ki zajezi strugo in nimamo časa za izvajanje preračuna porušitvenega vala z zahtevnimi diferencialnimi enačbami.

**VIRI**

Batič S., 2008. Sanacija pregrade Vogršček. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 53 str.

Čož N., 2013. Okvirna ocena posledic porušitve štirih slovenskih zemeljskih pregrad. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 64 str.

Globokar T., 2013. Sanacija pregrade Vogršček. Projektna naloga. Ljubljana MKGP: 28 str.

Meljo J., Kavčič I., 2012. Raba vode, DDU19 Ureditev primarne in sekundarnih rab vode v večnamenskih akumulacijah. Raziskovalna naloga. Ljubljana, MKGP: 48 str.

Pegan Žvokelj B., Bric V., Triglav Čekada M., 2014. Lasersko skeniranje Slovenije. Geodetski vestnik, letnik 58: str. 349 - 351

Rajar R., Zakrajšek M., 1983. Akumulacija Vogršček: Račun porušitvenega vala. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tekočin: 17 str.

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

Rajar R., 1979. Račun vala, ki bi nastal pri porušitvi pregrade Loče. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tekočin: 15 str.

Rajar R., Četina M., 1984. Račun vala, ki bi nastal pri porušitvi pregrade Vanganel. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tekočin: 13 str.

Rajar R., 1973. Modelé mathématique et abaqes sans dimensions pour la détermination de l'écoulement qui suit la rupture d' un barrage. XI Congress Int. Commission on Large Dams, Madrid, Q.40, R.34: str. 503-521.

Steinman F., 1999. Hidravlika, 1. ponatis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 295 str.



Triglav Čekada M., 2011. Možnosti uporabe zračnega laserskega skeniranja (LIDAR) za geomorfološke študije. Geografski vestnik 83-2: str. 81-93.

Ta stran je namenoma prazna.

