

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidat:

Martin Mravlje

Račun vala vsled morebitne porušitve jezovne zgradbe načrtovane hidroelektrarne krško na Savi

Diplomska naloga št.: 113

Mentor:
prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:
dr. Andrej Širca

Ljubljana, 29. 9. 2008

STRAN ZA POPRAVKE

IZJAVA O AVTORSTVU

**Podpisani Martin Mravlje izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
» Račun vala vsled morebitne porušitve jezovne zgradbe načrtovane hidroelektrarne
Krško na Savi »**

**Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe
elektronske separatoteke FGG.**

Ljubljana, _____2008

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 519.61/.64:627.133:627.82(043.2)
- Avtor:** Martin Mravlje
- Mentor:** prof. dr. Matjaž Četina
- Naslov:** Račun vala vsled morebitne porušitve jezovne zgradbe načrtovane hidroelektrarne Krško na Savi
- Obseg in oprema:**
- Ključne besede:** pregrade, porušitev pregrad, HE Krško, zakonodaja na področju porušitve pregrad, matematični modeli, HEC - RAS

Izvleček:

Pregrade so bile vedno življenjskega pomena za človeško civilizacijo. Gradimo jih predvsem zaradi zadrževanja poplav, proizvodnje električne energije, preskrbe s pitno in industrijsko vodo ter za potrebe namakanja. Ko se pregrada poruši, se sprosti velika količina vode in poplavni valovi lahko povzročijo veliko, včasih tudi katastrofalno škodo dolvodno.

V diplomski nalogi je obravnavana morebitna porušitev načrtovane hidroelektrarne Krško. HE Krško po ICOLD-u (Mednarodni komite za velike pregrade) spada v kategorijo velikih pregrad, zato je zanj obvezno izdelati izračune hidravličnih posledic njene morebitne porušitve. V veliko pomoč pri reševanju omenjene problematike so nam lahko matematični modeli. Za izračune je bil uporabljen program HEC-RAS, ki temelji na enodimenzijskem matematičnem modelu nestalnega toka o rekah s poplavnimi področji. V diplomski nalogi je predstavljena zakonodaja na področju porušitev pregrad, različni scenariji, vzroki in pogoji porušitve, ter prikaz rezultatov in ocena posledic za dolvodna področja.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:627.133:627.82(043.2)
Author: Martin Mravlje
Supervisor: Prof. Dr. Matjaž Četina
Title: Computation of dam - break wave due to possible failure of planned Krško hydropower plant
Notes:
Key words: dams, dam failures, Krško dam, dam legislation, mathematical models, HEC - RAS

Abstract:

Dams have been a vital part of human civilisation. They are built to manage floods, to harness water as hydropower, to supply water to drink or for industry, or to irrigate fields. When a dam fails or is deliberately demolished, large quantities of water are suddenly released, creating major flood waves capable of causing disastrous damage.

In the diploma work, the possible Krško dam - break failure is analysed. Due to ICOLD (International Commission on Large Dams) criteria, Krško dam is a large dam, so predicting hydraulic consequences of dam breach is demanded. Mathematical models for dam-break waves can be very helpful for this kind of problems. For computations the computer program HEC – RAS, which is based on one – dimensional mathematical model of unsteady flow in rivers with flood plains, was used. In the study the dam – break legislation, different causes and conditions of failures, dam – break waves simulations, results and consequence evaluation of the Krško dam break are presented.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju prof.dr. M. Četini in ge.M. Zakrajšek in Matjažu Knapiču.

Posebna zahvala gre mojim domačim, ki so mi omogočili kar se da prijetna študijska leta.

KAZALO VSEBINE

1. UVOD	1
2. SPLOŠNO O PORUŠITVAH PREGRAD	2
2.1 Uvod.....	2
2.2 Tipi pregrad.....	3
2.3 Opis pojava in primeri porušitev pregrad v preteklosti.....	4
2.4. Zakonodaja na področju določanja hidravličnih posledic porušitev velikih pregrad	6
2.4.1 Pregled predlaganega pravilnika v Sloveniji.....	7
2.4.2 Pregled ANSI/ANS-2.8-1992 (American National Standard for Determining Design Basis Flooding at Power Reactor Sites/ American Nuclear Society)	11
3. SCENARIJI MOŽNE PORUŠITVE PREGRADE NAČRTOVANE HE KRŠKO	13
3.1 Veriga HE na spodnji Savi	13
3.2 He Krško	14
3.3 Definiranje verjetnih pogojev oz. vzrokov za nastanek poškodb in rušenja ter njihovega obsega	18
3.4 Definiranje scenarijev porušitve v skladu z »Navodilom« in prakso	20
3.4.1 Pri $Q_{inst} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ in Z_{nom}	20
3.4.1.1 Porušitev oz. izpad segmenta na enem prelivnem polju (potres)	20
3.4.1.2 Odprtje segmentov na vseh petih prelivnih poljih (človeški faktor)	21
3.4.2 Pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ in Z_{nom}	21
3.4.2.1 Porušitev oz. izpad segmenta na enem prelivnem polju (potres)	21
3.4.2.2 Odprtje segmentov na vseh petih prelivnih poljih (človeški faktor)	21
4. MATEMATIČNI MODELI ZA SIMULACIJO PORUŠITVENIH VALOV	22
4.1 Pomen matematičnih modelov	22
4.2 Model HEC - RAS.....	22
4.3 Osnovne enačbe	23
4.4 Metoda reševanja	24
4.5 Začetni in robni pogoji	28
5. HIDRAVLIČNI IZRAČUNI VALOV VSLED PORUŠITVE PREGRADE HE KRŠKO	29
5.1 Podatki in opis računskih primerov	29

5.1.1 Osnovni podatki o objektih.....	29
5.1.3 Geodetski podatki.....	30
5.1.3 Hidravlični podatki	31
5.2 Umerjanje modela	32
5.3 Prikaz rezultatov porušitev pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$.....	34
5.4 Prikaz rezultatov porušitev pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$.....	40
6. OCENA POSLEDIC PORUŠITVE HE KRŠKO.....	47
6.1 Primerjava rezultatov, ugotovitve in ocena posledic porušitve HE Krško	47
6.2 Primerjava z visokimi vodami.....	60
7. ZAKLJUČEK	65
VIRI	67

SEZNAM SLIK

Slika 1: Odstotek pregrad po državah	2
Slika 2: Število nasutih in drugih tipov pregrad v ZDA	4
Slika 3: Lokacija za hidroelektrarno Krško.	16
Slika 4: HE Krško po končani izgradnji.	16
Slika 5: HE Krško po končani izgradnji.	17
Slika 6: Jez NEK	18
Slika 7: Umerjanje modela pri pretoku $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$	33
Slika 8: Potek maksimalnih gladin pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$	35
Slika 9: Nivogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) ene zapornice ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)...	36
Slika 10: Nivogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) petih zapornic ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)	37
Slika 11: Hidrogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) ene zapornice ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)	37
Slika 12: Hidrogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) petih zapornic ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)	38
Slika 13: Hidrogram v profilu jezua NEK pri porušitvi (dvigu) ene in petih zapornic pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$	39
Slika 14: Potek maksimalnih gladin pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	41
Slika 15: Nivogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) ene zapornice ($Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)	42
Slika 16: Nivogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) petih zapornic ($Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)	43
Slika 17: Hidrogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) ene zapornice ($Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)	44
Slika 18: Hidrogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) petih zapornic ($Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)	44
Slika 19: Hidrogram v profilu jezua NEK pri porušitvi (dvigu) ene in petih zapornic ($Q =$ $1200 \text{ m}^3/\text{s}$)	46
Slika 20: Potek maksimalnih gladin pri $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	48
Slika 21: Podolžni profil gladin 5 minut po porušitvi 5 zapornic pri začetnem pretoku $Q =$ $1200 \text{ m}^3/\text{s}$	49

Slika 22: Podolžni profil gladin 5 minut po porušitvi ene zapornice pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	50
Slika 23: Potek maksimalnih gladin pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$	51
Slika 24: Potek maksimalnih gladin pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	53
Slika 25: Prikaz poplavljenih območij pri porušitvi petih zapornic in $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	54
Slika 26: Maksimalna gladina v prečnem profilu 743732 (Vrbina) pri porušitvi petih zapornic, $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	55
Slika 27: Maksimalna gladina v prečnem profilu 740751 (Jevščina) pri porušitvi petih zapornic, $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	55
Slika 28: Nivogram v profilu HE Krško pri različnih scenarijih porušitev	56
Slika 29: Hidrogram v profilu HE Krško pri različnih scenarijih porušitev	57
Slika 30: Hidrogrami v profilu 750529 pri različnih primerih porušitev	58
Slika 31: Hidrogrami v profilu jezu NEK pri različnih primerih porušitev	59
Slika 32: Hidrogrami v profilu 738752 pri različnih primerih porušitev	59
Slika 33: Potek maksimalnih gladin visokih vod in porušitve petih zapornic pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	61
Slika 34: Potek maksimalnih gladin pri Q_{100}	62
Slika 35: Prikaz poplavljenih območij pri Q_{100}	63

SEZNAM PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vzroki nesreč pregrad v odstotkih.	5
Preglednica 2: Inštalirana moč in letna proizvodnja električne energije	14
Preglednica 3: Aproksimacije končnih razlik v kontinuitetni enačbi	25
Preglednica 4: Aproksimacije končnih razlik v dinamični enačbi.....	26
Preglednica 5: Koeficienti za kontinuitetno enačbo	27
Preglednica 6: Koeficienti za dinamično enačbo	27
Preglednica 7: Koeficienti hrapavosti glavne struge.....	32
Preglednica 8: Primerjava rezultatov porušitev pri $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ v profilu HE Krško	39
Preglednica 9: Primerjava rezultatov porušitev pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ v profilu HE Krško	45
Preglednica 10: Primerjava rezultatov porušitev v profilu HE Krško	57
Preglednica 11: Maksimalni pretoki pri različnih primerih porušitve HE Krško	60

PRILOGE

Priloga 1: Kote maksimalnih gladin pri porušitvi (dvigu zapornic) HE Krško pri začetnem pretoku $Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$

Priloga 2: Kote maksimalnih gladin pri porušitvi (dvigu zapornic) HE Krško pri začetnem pretoku $Q= 1200 \text{ m}^3/\text{s}$

Priloga 3: Kote maksimalnih gladin visokih voda različnih povratnih dob

Priloga 4: Kote maksimalnih gladin v podolžnem profilu

1. UVOD

Pregrade so bile vedno življenskega pomena za človeško civilizacijo. Njihov primarni cilj je zadrževanje vode. Danes ima skoraj polovica vseh svetovnih rek vsaj eno veliko pregrado. V 21. stoletju stoletju se 1/3 držav zanaša na hidroenergijo, ki znaša več kot polovico njihove preskrbe z elektriko. Velike pregrade omogočajo proizvodnjo 19 % elektrike na svetu. Polovica velikih pregrad je bila zgrajena za potrebe namakanja in 30-40 % od 271 milijonov hektarov za namakanje je odvisno od njih (WCD, 2000).

Pregrade spadajo med največje gradbene objekte, ki jih je zgradil človek. Voda, ki je zbrana v akumulacijskih jezerih, se v primeru porušitve pregrade razlije dolvodno po dolini in lahko povzroči ogromne človeške žrtve in materialno škodo. V zgodovini so se takšni primeri že zgodili, zato je potrebno varnosti pregrad posvetiti posebno pozornost.

Na odseku reke Save od Suhadola do državne meje s Hrvaško nastaja pet novih hidroelektrarn: HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice. Izgradnja verige petih novih hidroelektrarn na spodnji Savi je največji energetski projekt v Sloveniji. Pregrade na spodnji Savi glede na svojo višino, velikost akumulacij in kapaciteto prelivnih polj po kriterijih ICOLD-a (Mednarodni komite za velike pregrade) spadajo v kategorijo velikih pregrad, zato je zanje obvezno izdelati izračune hidravličnih posledic njihove porušitve.

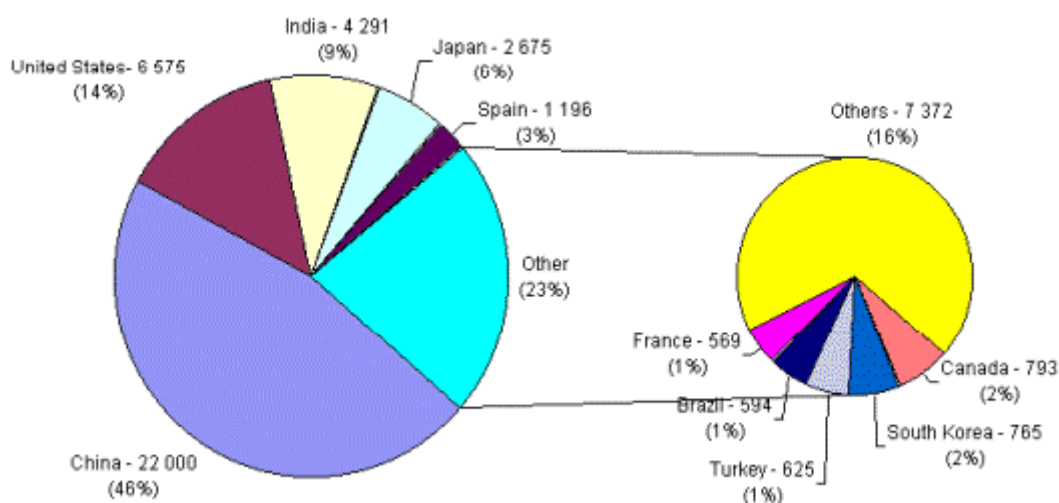
Z enodimenzijskim matematičnim modelom HEC – RAS so v nalogi izračunani parametri vala, ki bi nastal ob morebitni porušitvi jezovne zgradbe načrtovane hidroelektrarne Krško. Upoštevani so različni scenariji porušitev v skladu z obstoječo zakonodajo na področju določanja hidravličnih posledic porušitev pregrad. V računih je zajeto področje bazena HE Krško in dolvodno področje do načrtovanega jezua HE Brežice.

2. SPLOŠNO O PORUŠITVAH PREGRAD

2.1 Uvod

Korist pregrad za človeštvo je nesporna. Prvotna vloga le teh je bila zagotavljanje vode za namakanje, ki je bilo pomembno za vzgojo agrokultur v mnogih deželah. Kasneje so bile pregrade pomembne za potrebe transporta, industrijske procese in rast mest. V 18. stoletju so pregrade gradili za zadrževanje vode v kanalih, v 19. stoletju je bila večina zgrajenih za preskrbo mest z vodo in v 20. stoletju za proizvodnjo električne energije.

Prvih pet vodilnih držav pri gradnji pregrad (Kitajska, ZDA, Indija, Japonska, Španija) pokriva več kot tri četrtine vseh zgrajenih velikih pregrad. Hidroenergijo za proizvodnjo več kot 90 % skupne porabe električne energije uporablja 24 držav, kot sta npr. Brazilija in Norveška. Polovica vseh velikih pregrad je namenjena za potrebe namakanja in prispevajo 12 - 16% vse svetovne proizvodnje hrane. Najmanj v 75 državah so velike pregrade zgradili za preprečevanje poplav. V mnogih državah so gradnje pregrad njihovi največji investicijski projekti (WCD, 2000).



Slika 1: Odstotek pregrad po državah (WCD, 2000)

2.2 Tipi pregrad

Pregrade lahko delimo oz. klasificiramo na različne načine in sicer glede na velikost, material, iz katerega so zgrajene, obliko, namen, potencialno tveganje in druge delitve. Najpogosteje uporabljamo prve tri načine.

Po kriterijih ICOLD-a (Mednarodni komite za velike pregrade), ki jih upošteva tudi v Sloveniji še veljavna regulativa, so velike pregrade tiste, ki so :

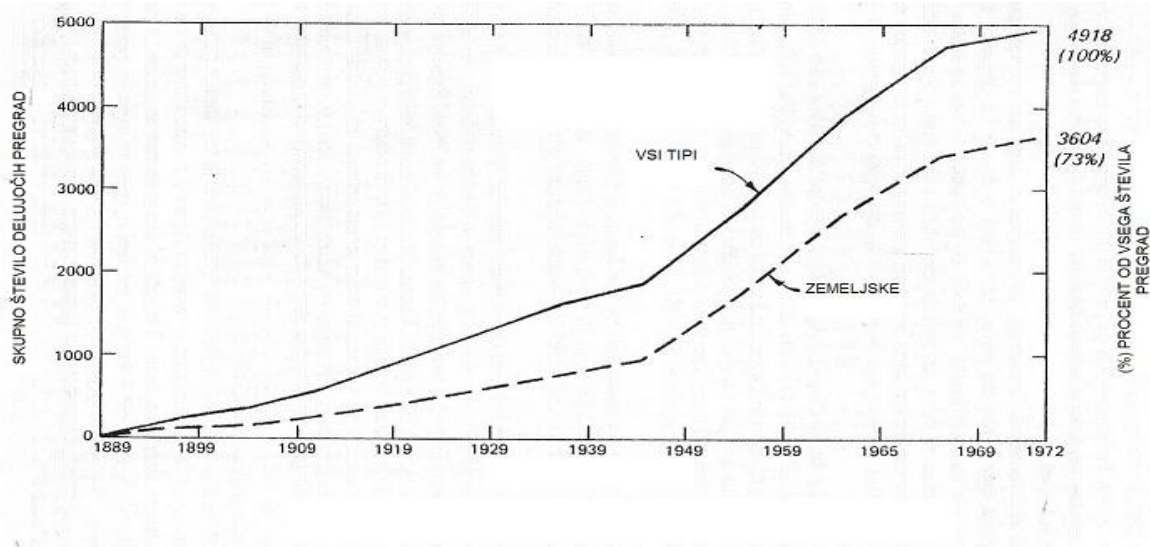
- višje od 15 m, merjeno od najnižje kote temelja do kote krone ali
- višje od 10 m in daljše od 500 m, merjeno v kroni,
- zajezujejo več kot 1.000.000 m³ prostornine vode,
- prevajajo preko svojih prelivov več kot 2000 m³/s vode,
- posebno težki pogoji fundiranja,
- neobičajna gradnja.

Pri obravnavanju možnih načinov porušitve pa v grobem ločimo tri tipe pregrad (Rajar in Zakrajšek, 1991):

- ločne pregrade
- težnostne (betonske)
- nasute pregrade (zemeljske ali skalometne)

Faktorji, ki vplivajo na primernost določenega tipa pregrade, so odvisni predvsem od topografije in geologije terena. Izbira pregrade vpliva na porazdelitev sil, obtežbe na temelje, nosilce in na puščanje oz. pronicanja skozi robove rezervoarja. Vsaka vrsta pregrade ima svoje značilnosti, katerih prednosti in slabosti in s tem povezano oceno primernosti pregrade moramo pazljivo ovrednotiti. Zemeljske pregrade lahko dobro prenesejo premike, vendar imajo relativno nizko odpornost na prelivanje. Deformacije polnila pri nosilcih in strukturi zaradi posedkov velikokrat povzročijo precejjanje. Betonske pregrade pa lahko prenesejo nekajurno prelivanje, vendar je njihova varnost odvisna od odpornosti temeljev. Ločne pregrade lahko prenašajo velike obremenitve, vendar so odvisne od nosilnosti bokov (Singh, 1996).

Do leta 1800 je bila večina pregrad nasutih. V 19. stoletju so na popularnosti zelo pridobile betonske pregrade, predvsem zaradi napredka v tehnologiji betona in statičnih analizah. Zaradi tega je bilo konec stoletja grajenih več betonskih kot nasutih velikih pregrad. Konec leta 1920 je bilo nasutih pregrad najmanj, le 33%. Večina, 80 % velikih pregrad, grajenih pred kratkim, pa je nasutega tipa (Sing, 1996).



Slika 2: Število nasutih in drugih tipov pregrad v ZDA (Singh, 1996)

2.3 Opis pojava in primeri porušitev pregrad v preteklosti

Ko se pregrada poruši, se sprosti velika količina vode in povzroči poplavo dolvodno. Poplavni valovi lahko povzročijo katastrofalno škodo in izgubo življenj. Te nesreče lahko vodijo v nacionalno katastrofo, vplivajo na ekonomijo države, socialo in celo vojne.

Od 12. stoletja naprej se je zgodilo približno 2000 nesreč, od tega 10 % v 20. stoletju. Povzročena škoda je ocenjena na milijone dolarjev, prišlo pa je tudi do 8000 smrtnih žrtev (Jansen, 1980).

Študije so pokazale, da sta glavna vzroka nesreč ekstremne poplave in geološki premiki tal. Najpogostejše so bile nesreče zemeljskih pregrad, ki jim sledijo gravitacijske, skalometne in ločne.

Preglednica 1: Vzroki nesreč pregrad v odstotkih (Lou, 1981).

Vzrok nesreče	Middlebrooks (1953)	Gruner (1967)	Takashe (1967)	Babb & Mermel (1968)	Biswas & Chatterjee (1971)	USCOLD (1975)
Preliv ali prelivanje	30	23	28	36	35	38
Precejanje ali notranja erozija	38	40	44	30	25	44
Zdrsi	15	2	10	15	-	9
Kombinacija vzrokov	17	35	18	19	40	9

Pregrade se lahko porušijo trenutno ali postopno. Tip porušitve oz. napake je odvisen od vzroka in tipa pregrade. Trenutna porušitev pomeni, da se celotna ali del pregrade poruši trenutno. Nenaden izpust vode povzroči poplavni val, ki se propagira dolvodno. Propagacija negativnega vala, ki nastane gorvodno v akumulaciji pa je v največji meri odvisna od topografije.

S prihodom pozitivnega vala v določen profil se gladina zviša. Negativni val v rezervoarju pa povzroči znižanje gladine. Porušitveni valovi imajo navadno navpično čelo. Navpično čelo, ki nastane le pri pozitivnih valovih, ima skoraj vertikalno vodno steno v obliki potujočega vodnega skoka, pri tem prihaja do velikih izgub energije. Za čelom je tok kljub velikim hitrostim v glavnem počasi spremenljiv (Rajar, 1980).

Ločne pregrade so se že porušile v celoti in praktično v trenutku (Malpasset). Pri težnostnih pregradah je možna delna, tudi trenutna porušitev, medtem ko je rušenje nasutih pregrad

vedno postopno, saj ogromna masa materiala v pregradi ne more kar izginiti, ampak jo lahko voda le erodira.

Nesreče so lahko naključne ali izzvane, naravne ali povzročene zaradi delovanja človeka. Nesreče so posledica naravnega poslabšanja stanja materiala v objektu, posebnih naravnih dogodkov kot so npr. ekstremne padavine in poplave, potresi, posedki, zdrsi, erozija, precejanje, prelivanje in drugi vzroki. Človeško povzročeni vzroki so npr. bombardiranje, sabotaze, uničenje za javno dobro, slabo grajenje, napačno dimenzioniranje, nepravilno upravljanje, izbira neprimerne lokacije ipd.

Po raziskavi 300 pregrad po svetu se je približno 35 % nesreč zgodilo zaradi neprimerne oz. premajhne prelive. To je tudi glavni vzrok pri nasutih pregradah. Naslednjih 25% nesreč se je zgodilo zaradi problemov temeljev, notranje erozije, pronicanja, puščanja, pornih tlakov, neustreznega preseka, premikov in posedkov. Ostalih 40 % pa vsebuje neprimerno projektiranje oz. grajenje, upravljanje, izbiro nekvalitetnih materialov, neprimerne lokacije ipd. (Biawas in Chatterjee, 1971).

2.4. Zakonodaja na področju določanja hidravličnih posledic porušitev velikih pregrad

Pregrada HE Krško, katere porušitev je obravnavana v diplomski nalogi, je del verige pregrad na spodnji Savi, ki glede na svojo višino, velikost akumulacij in kapaciteto prelivnih polj po kriterijih ICOLD-a spadajo v kategorijo velikih pregrad. Zato je zanje obvezno izdelati izračune hidravličnih posledic njihove porušitve.

Predlagani scenariji možnih havarij na objektih HE na spodnji Savi so osnovani na določilih uradno še ne potrjenega dokumenta »Navodilo za izdelavo ocen ogroženosti zaradi porušitve pregrad« (v nadaljevanju »Navodilo«) ter dosedanjšega načina obravnavanja te problematike v slovenski praksi. Zaradi prisotnosti Nuklearne elektrarne Krško (v nadaljevanju NEK) pa so omenjene tudi zahteve iz dokumenta ANSI/ANS-2.8-1992 (American National Standard for Determining Design Basis Flooding at Power Reactor Sites/ American Nuclear Society).

Dokument »Navodilo« je bil sestavljen v letih 1993-1996 z namenom, da nadomesti stari jugoslovanski zakon o načinu določanja posledic porušitve pregrad. Ta dokument je bil večkrat obravnavan na komisiji, ki so jo sestavljali predstavniki Ministrstva za obrambo – Uprava RS za zaščito in reševanje, Ministrstva za okolje in prostor, Ministrstva za gospodarske dejavnosti, Slovenskega društva za velike pregrade, Savskih elektrarn ter Fakultete za gradbeništvo in geodezijo (osnutek dokumenta je pripravil prof. dr. Rudi Rajar s FGG) in praktično pripeljan do zaključne faze. Dokument sicer še ni bil uradno potrjen in objavljen v Uradnem listu (bi pa to bilo potrebno narediti čimprej), vendar je trenutno v Sloveniji edina strokovna podlaga za oceno posledic porušitev pregrad. Pri sestavljanju je prof. Rajar preučil metodologijo izračunov porušitev v več državah : poleg 8 evropskih (Francija, Velika Britanija, Nemčija, Italija, Švica, Danska, Nizozemska in bivša Jugoslavija) še Kanada, ZDA in Kitajska.

2.4.1 Pregled predlaganega pravilnika v Sloveniji

1. Normativi

Pravilnik (Rajar, R., 1994) opredeljuje, naj se formira strokovna komisija, v kateri so strokovnjaki z dolgoletnimi izkušnjami na tem področju, ki lahko v ne dovolj definiranih primerih določi pogoje za izračune posledic porušitve. Še tako dober pravilnik ne more zajeti vseh primerov, ki lahko v praksi pridejo v poštev, zato je ustanovitev komisije smiselna. Tudi v nekaterih drugih državah imajo podobne komisije (npr. Velika Britanija). Vlada RS jo imenuje za dobo 5 let.

Komisija opravlja sledeče naloge:

1. Kategorizira pregrade glede na nevarnost za dolvodne kraje
2. Odloča o potrebnosti izdelave izračunov in dokumentacije
3. Odloča o vseh drugih vprašanjih, ki v pravilniku niso zajeti
4. Odloča, za katere pregrade je treba račune in dokumentacijo o posledicah možne porušitve izdelati ponovno po tem pravilniku
5. Opravi revizijo projektne dokumentacije kot podlage za gradbeno dovoljenje

6. Strokovna dela opravlja sekretar odbora, ki je imenovan s strani Uprave RS za zaščito in reševanje.

2. Obravnavane pregrade

Izračune in dokumentacija morajo biti izdelani za naslednje pregrade :

- pregrade, katerih gradbena višina presega 15 m
- pregrade, katerih gradbena višina presega 10 m, pri tem pa je dolžina krone pregrade večja od 500 m
- pregrade, katerih gradbena višina presega 10 m, pri tem pa je volumen akumulacije večji od 10^6 m^3
- pregrade, katerih gradbena višina presega 10 m, pri tem pa so evakuacijski organi na pregradi dimenzionirani na pretok večji kot $2000 \text{ m}^3/\text{s}$

Le Nemčija in bivša Jugoslavija določata pregrade, za katere je potrebno izdelati izračune, na osnovi definicije „velikih pregrad“. Večina držav zahteva izračune že za mnogo manjše pregrade, ki po kriterijih ICOLD-a ne spadajo med velike pregrade. Francija postavlja ta kriterij še višje, torej ne zahteva izračunov niti za vse „velike pregrade“. V ZDA in Kanadi je kriterij „nevarne pregrade“ po čemer bi bilo mogoče sklepati, da jih določa neka komisija. V osnutku pravilnika se predlaga, da se izračuni in dokumentacija izvrši v vsakem primeru za velike pregrade po ICOLD-u. Komisija pa mora oceniti, če je to potrebno za pregrade, ki so bodisi višje od 5 m (Švica), bodisi je volumen akumulacije večji od 25000 m^3 (Velika Britanija), ali pa so prelivni organi dimenzionirani na več kot $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Komisija zaradi lažje določitve metod določanja hidravličnih posledic porušitve in načina zaščite prebivalstva deli pregrade v 3 kategorije :

KATEGORIJA 1: Pregrade, katerih porušitev bi povzročila najtežje posledice, ogrožala naselja, industrijske objekte, prometne zveze in ogrozila človeška življenja.

KATEGORIJA II: Pregrade, katerih porušitev bi ogrožala nekatere objekte, ne bi pa neposredno ogrožala človeških življenj.

KATEGORIJA III: Pregrade, katerih porušitev ne bi ogrožala človeških življenj in ne bi povzročila večje materialne škode.

3. Način porušitve

Za posamezne kategorije pregrad se predvidevajo naslednji načini porušitve:

Za ločne pregrade se upošteva popolna in trenutna porušitev.

Za težnostne betonske pregrade se glede na velikost pregrade, topografijo terena in glede na kategorijo pregrade upošteva delna trenutna porušitev. Detajlni način porušitve določi komisija.

Za razčlenjene betonske pregrade se upošteva delna trenutna porušitev nekaterih delov. Detajlni način porušitve določi komisija.

Za nasute pregrade se upošteva postopna porušitev. Čas rušenja in tudi končen obseg odprtine določi komisija.

Za nasute pregrade se lahko način porušitve določi po metodi, ki poleg hidravličnega dogajanja simulira tudi potek erozije na pregradi.

Star Jugoslovanski pravilnik je upošteval popolno in trenutno porušitev za vse vrste pregrad. Poleg bivše Jugoslavije le Švica zahteva upoštevanje popolne in trenutne porušitve.

4. Pregrade v nizu

Kadar je več pregrad v nizu, se izračuna porušitev vsake pregrade, pri tem pa se naslednje dolvodne pregrade obravnava na sledeč način:

Če so dolvodne pregrade betonske, ločne, težnostne ali razčlenjene, se upošteva, da se pregrade ne rušijo. Val zaradi porušitve gorvodne pregrade se v okviru možnosti evakuira skozi evakuacijske organe dolvodnih pregrad, če pa so pretoki preveliki, se upošteva prelivanje konstrukcije dolvodne pregrade. Evakuacijski organi na naslednjih dolvodnih

pregradah se začnejo odpirati v najkrajšem, realno možnem času po poružitvi gorvodne pregrade, eventuelno že predno val doseže dolvodno pregrado.

Če so dolvodne pregrade nasute, lahko nastopata 2 primera:

- Maksimalni pretok zaradi porušitve gorvodne pregrade ne preseže maksimalnega pretoka, ki ga lahko prevajajo vsi evakuacijski organi na dolvodni pregradi. Upošteva se, da se vsi evakuacijski organi v najkrajšem možnem času odprejo in pretok odteče preko njih dolvodno.
- Če je maksimalni pretok zaradi porušitve gorvodne pregrade večji od maksimalnega pretoka evakuacijskih organov na dolvodni pregradi, se upošteva, da se dolvodna pregrada preliva in je treba simulirati njeno postopno rušenje. Pri računih je treba upoštevati, da se vala zaradi porušitve obeh pregrad seštevata.

Vse zgoraj navedene države upoštevajo porušitev pregrad v nizu, le Nemčija ne.

5. Metoda

V normalnih primerih, če gre za doline brez izrazitih razširitev in brez zelo kompleksne topografije, je možno uporabljati eno-dimenzijske matematične modele nestalnega toka s prosto gladino. Upoštevati je treba vse člene v dinamični enačbi.

V bolj kompleksnih primerih je treba uporabljati dvo-dimenzijski matematični model. V bližini pregrade je nujno upoštevati vse člene v dinamičnih enačbah, na večji oddaljenosti pa je možno upoštevati poenostavljene dinamične enačbe.

Pri nasutih pregradah je možno potek porušitve upoštevati bodisi na osnovi podatkov iz literature in izkušenj, bodisi je časovni razvoj odprtine na pregradi vgrajen v matematični model.

V ekstremnih primerih (zelo kompleksna topografija, izredno velik padec doline, veliki dolinski zavoji...) je treba za pregrade Kategorije I določiti hidravlične posledice porušitve s pomočjo fizičnega modela v primernem modelnem merilu.

Pri končnih rezultatih je priporočljivo upoštevati varnostni koeficient, s katerim se množi izračunane globine.

Star Jugoslovanski pravilnik je zahteval za I. Kategorijo pregrad uporabo fizičnega modela.

6. Topografija

Lastnik ali upravljalca pregrade mora za določitev hidravličnih posledic porušitve pregrade priskrbeti naslednje topografske podloge:

Situacije odseka doline od začetka akumulacije do zadnjega dolvodnega profila in sicer glede na velikost pregrade in akumulacije v merilu 1:5000 ali 1:10000, eventuelno za večje akumulacije 1:25000

V določenih primerih, posebno za objekte Kategorije I, za zelo kompleksno topografijo ali za majhne volumne akumulacije, lahko izdelovalec izračunov zahteva dodatne meritve na terenu. Prečni profili, ki so osnova za izračune ali izgradnjo fizičnega modela, naj bodo na medsebojnih razdaljah, ki so reda velikosti od 40 m do 300 m, odvisno od velikosti akumulacije.

V pravilniku je merilo samo predlagano, ne pa predpisano, vsekakor je največ odvisno od velikosti pregrade in akumulacije.

2.4.2 Pregled ANSI/ANS-2.8-1992 (American National Standard for Determining Design Basis Flooding at Power Reactor Sites/ American Nuclear Society)

V skladu s slovensko prakso in "Navodilom" se izračuni porušitev pregrade vršijo pri dveh osnovnih pretokih: obratovalnem in Q_{100} .

Pri ameriških standardih (dokument ANSI/ANS-2.8-1992, opisan v KMTe (2007)), se upošteva maksimalni verjetni pretok (PMF – probable maximum flood) na območju NE kot osnovnem pretoku, kadar se vrši presoja porušitve iz hidravličnih vzrokov. Pri tem sta možni dve varianti :

1. Če analize pokažejo, da NE ni ogrožena zaradi vala, ki nastane ob trenutni popolni porušitvi gorvodne pregrade, to zadostuje.
2. Če se z detajlnimi analizami dokaže varnost pregrade pri obremenitvi zaradi PMF, to zadostuje in račun porušitve oz. njenih posledic ni potreben. V nasprotnem primeru je treba predpostaviti verjeten način in obseg porušitve. Upošteva se tudi količina ruševin dolvodno, ki delno zapira rečni profil in ovira odtok.
3. Če imamo pregrade v nizu, je potrebno dolvodne pregrade od objekta, za katerega se pokaže, da ne prenese obremenitve s PMF, preveriti na dodatno povečan pretok zaradi povečanja PMF vsled porušitve gorvodne HE.

Pri upoštevanju možnih porušitev zaradi potresa, kombinirajo zraven kot osnovni pretok bodisi Q_{25} , bodisi manjšega od 0,5 PMF ali Q_{500} , odvisno na katero velikost potresa delajo preverbo. Postopek obravnave je podoben kot pri porušitvah zaradi nastopa katastrofalnih pretokov (opisan zgoraj), seveda s tem, da se pri analiziranju varnosti objektov poleg statičnih upoštevajo dinamične obremenitve zaradi potresa. Če teh analiz ni oz. če ne pokažejo zadostne varnosti, se glede na tip konstrukcije predpostavi možen obseg in način porušitve ter posledično tudi obravnava varnost dolvodnih pregrad na povečan pretok.

Pri računu pregrad v nizu nastopi še ena razlika med obema dokumentoma, ki je važna za v diplomu obravnavan primer.

ANSI/ANS-2.8-1992 pri dolvodni pregradi ne ločuje glede na tip pregrade, temveč določa, da je treba upoštevati, da se tudi ta ruši v primeru, če maksimalni pretok preseže kapaciteto njenih prelivnih organov, razen če se z analizami (varnost na: erozijo, zdrs, prevrnitev; podan prikaz monitoringa itd. – zahtevane analize so precizirane glede na tip dolvodne pregrade) ne dokaže, da se ob taki obremenitvi ne bi porušila. Poleg tega zahteva, da se glede nevarnosti porušitve analizira tudi vse preostale obstoječe gorvodne pregrade in podobne konstrukcije na istem vodotoku.

3. SCENARIJI MOŽNE PORUŠITVE PREGRADE NAČRTOVANE HE KRŠKO

3.1 Veriga HE na spodnji Savi

Na odseku reke Save od Vrhovega do državne meje s Hrvaško nastaja pet novih hidroelektrarn: HE Boštanj je že zgrajena, HE Blanca je v izgradnji, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice so v fazi načrtovanja. Izgradnja verige petih novih hidroelektrarn na spodnji Savi je največji energetski projekt v Sloveniji. Hidroelektrarne Boštanj, Blanca, Krško, Brežice in Mokrice bodo več kot podvojile proizvodnjo električne energije na Savi, proizvedle bodo 21 odstotkov elektrike iz slovenskih hidroelektrarn in predvidoma pokrivale šest odstotkov skupne porabe električne energije v državi. Projekt ima poleg tega velik pomen tudi za Posavje, saj se sočasno z gradnjo energetskih objektov gradi in ureja prometna infrastruktura, ureja se vodotok s pritoki Save in izboljšuje poplavna varnost okoliških prebivalcev (Posavski obzornik, 2006).

V Sloveniji letno izkoristimo le 43 odstotkov potenciala obnovljivih vodnih virov kot najčistejšega vira za pridobivanje električne energije. Dosedanja skupna moč slovenskih hidroelektrarn znaša 819 megavatov (MW), s spodnjesavskimi hidroelektrarnami pa bomo lahko proizvedli kar 720 gigavatnih ur električne energije s skupno močjo 187 megavatov, kar je 21 odstotkov celotne proizvodnje slovenskih hidroelektrarn in predvidoma šest odstotkov celotne slovenske porabe (Posavski obzornik, 2006).

Ker poraba električne energije v Sloveniji raste (glede na pretekla gibanja se ocenjuje, da dva odstotka letno), potrebujemo nove zmogljivosti za proizvodnjo elektrike. Z odlogom gradnje elektrarn bi Slovenija kmalu postala v veliki meri odvisna od uvoza električne energije, kar bi zmanjšalo njeno pogajalsko moč v tržnem prostoru. Zato velja izkoristiti energetski potencial reke Save, ki ima ustrezen pretok in padec. Boljša izkoriščenost obnovljivega in cenovno ugodnega vira energije je nacionalnega pomena, saj povečuje samostojnost, zanesljivost, varnost in konkurenčnost slovenskega elektroenergetskega sistema. Zaradi spodnjesavskih hidroelektrarn bomo manj odvisni od zunanjih virov, kar bo pripomoglo tudi k ugodnejšemu

gibanju cen električne energije. Več je bomo proizvedli sami, manj je bo potrebno kupovati v tujini (Posavski obzornik, 2006).

Preglednica 2: Inštalirana moč in letna proizvodnja električne energije

(Posavski obzornik, 2006).

HE	Letna proizvodnja (Gwh)	Inštalirana moč (MW)
Boštanj	115	32,5
Blanca	160	42,5
Krško	149	39,5
Brežice	161	41,5
Mokrice	135	30,5
Skupaj	721	156,5

3.2 He Krško

Pretočne HE izkoriščajo sproten dotok vode, pri čemer ne upoštevamo dnevne in tedenske akumulacije. Ker se pretok vode med letom v naših rekah močno spreminja, imajo te elektrarne več vodnih turbin. Njihova moč je prilagojena povprečnemu ali srednjemu pretoku, zato ob zmanjšanem pretoku obratujejo samo tiste turbine, za katere je zagotovljena količina vode (izkoristek). Ob povečanem pretoku pa odvečna voda teče mimo turbin, čez jez. Ob dvigu spodnje gladine vode pa pride do zmanjšanja padca in s tem tudi moči, zato vlada zmotno mnenje, da lahko ob izredno velikih pretokih HE delujejo s povečano močjo. Vedeti pa moramo, da zgornja gladina vode ne niha zelo, saj želimo imeti čim večji padec in čim manjšo erozijo bregov reke. Pri posameznih pretočnih elektrarnah lahko izkoristimo od 40 do 70 % razpoložljive energije. Izkoristek pa se lahko močno poveča z verigo elektrarn (www.lurogaska.si/docs/E-gradiva/EL-ENERG_SISTEMI-ELEKTRARNE.pdf, 2008).

Hidroelektrarna Krško bo predstavljala enega izmed členov v verigi hidroelektrarn na Savi, ki je zasnovana kot niz pretočnih elektrarn od Medvod do državne meje pri Mokricah. Koncept hidroelektrarn na spodnji Savi, to je na odseku pod sotočjem Savinje v Zidanem Mostu do državne meje z Republiko Hrvaško, je določen s Koncesijsko pogodbo za izkoriščanje energetskega potenciala spodnje Save. Izraba tega potenciala oziroma vodnega padca in

pretoka je predvidena v šestih stopnjah, in sicer: Vrhovo, Boštanj, Blanca, Krško, Brežice in Mokrice.

Akumulacijski bazen HE Krško bo zavzemal del savske struge nad jezovno zgradbo HE Krško, ki bo segal gorvodno do HE Blance. Ta okoli 9 km dolg odsek Save leži na razmeroma urbaniziranem področju med Krškim in Blanco. Pregradni objekt HE Krško bo stal približno 400 m gorvodno od mesta Krško in bo sestavljen iz strojnice in prelivnih polj.

HE Krško bo hidroelektrarna pretočno-akumulacijskega tipa z nameščenimi Kaplanovimi turbinami s skupno pretočno zmogljivostjo $500 \text{ m}^3/\text{s}$, s petimi pretočnimi polji s prelivno zmogljivostjo približno $3.500 \text{ m}^3/\text{s}$ ter s povprečno letno proizvodnjo 149 GWh električne energije (Posavski obzornik, 2006).

Osnovni podatki o HE Krško:

- instaliran pretok: $500 \text{ m}^3/\text{s}$
- višina padca: 9,90 m
- največja moč: 39,5 MW
- povprečna letna proizvodnja: 149 GWh
- koristna prostornina bazena: $1.380.000 \text{ m}^3$
- srednji letni pretok: $247 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 3: Lokacija za hidroelektrarno Krško (Posavski obzornik, 2006).



Slika 4: HE Krško po končani izgradnji (Posavski obzornik, 2006).



Slika 5: HE Krško po končani izgradnji (Posavski obzornik, 2006).

Ureditev odvzema hladilne vode za potrebe NE Krško zahteva določen dvig gladine Save s pomočjo jezovne zgradbe. Terciarni krog NE Krško je namenjen odvajanju toplote, ki je ni mogoče koristno izrabiti za proizvodnjo električne energije in je potreben za hlajenje kondenzatorja. Hladilne črpalke potiskajo savsko vodo v kondenzator ter vračajo v Savo. Pri pretoku skozi kondenzator se voda segreje, ker sprejme toploto izrabljene pare. Jez NEK sodi med najvišji razred zahtevnosti gradbenih objektov in stopnje obratovalnega tveganja zaradi prisotnosti nuklearne elektrarne. Desni breg pred jezovno zgradbo je izveden kot bočni preliv za evakuacijo visokih voda. Voda se preko desnega brega začne prelivati pri pretokih reke Save nekje okrog 1600 do 1800 m³/s. Ta voda si je v preteklosti že izoblikovala poti preko Krško – Brežiškega polja, po katerem se vrača nazaj v glavno strugo dolvodno od jezu NEK (Steinmann, 2007).



Slika 6: Jez NEK (www.icjt.org/tech/software/Opis%20NEK.pps, 2008)

3.3 Definiranje verjetnih pogojev oz. vzrokov za nastanek poškodb in rušenja ter njihovega obsega

Pogoji so opredeljeni v dokumentu KMTe (2007). Vzrokov za nastanek poškodb pregradnih objektov je veliko: od poškodb zaradi precejanja pod temelji ali na boku pregrad, zatajitve delovanja hidromehanske opreme, pojava ekstremno visokih vod (spremljano z veliko količino plavin, kar spet predstavlja nevarnost zlasti za hidromehansko opremo), potresov rušilne moči, pa tudi velikega in hitrega povečanja pretoka zaradi poškodb gorvodnih objektov itd. Vnaprej določiti možni obseg poškodb konstrukcije zaradi posameznega ali celo kombinacije vzrokov je težka in odgovorna naloga, saj ima pretiravanje v eno ali drugo smer lahko hude posledice (ekonomske, psihološke ali celo v obliki človeških žrtev).

V primeru betonskih pregrad takšnega tipa, kot so na spodnji Savi, kjer praktično celotno višino pregrade in s tem zajeze, predstavlja hidromehanska oprema, medtem ko je betonski preliv dvignjen nad dno struge le do 2 m, je seveda najbolj ranljiv del prav hidromehanska oprema. Pri tem je več možnosti, kaj se lahko zgodi:

- **Blokada segmentnih zapornic:** Do blokade zapornic na vseh prelivnih poljih bi morda lahko prišlo pri katastrofalnem potresu z močno vertikalno komponento ali v primeru

sabotaže, ki bi povzročila prekinitev hidravličnih inštalacij v mostni konstrukciji. V normalnih razmerah (brez potresa) sicer lahko pride do blokade segmenta na posameznem polju, ne pa na vseh poljih ali celo na več HE naenkrat. Blokada lahko nadalje povzroči bistven dvig gladine gorvodno od pregrade in morda prelivanje bočnih nasipov, kar lahko povzroči postopno rušenje le-teh. Zlasti je ta nevarnost verjetna pri nastopu večjih naravnih pretokov ali nastopu povečanih pretokov zaradi havarije ene od gorvodnih pregrad.

- **Izpad segmentnih zapornic:** Predpostavljamo sicer, da je stopnja varnosti, s katero je izveden gradbeni in hidromehanski del pregrade glede na izredno občutljivost okolja, v katerega so umeščene obravnavane HE, tako velika, da tak dogodek ni možen. Že pri določanju možnih scenarijev za analizo posledic porušitve Boštanja (leta 2003) se je na sestanku skupine predstavnikov IBE-ja (projektant), izdelovalca hidromehanske opreme HYTEP, HSE-ja ter izvajalcev analiz FGG oblikovalo mnenje, da je predpostavka o hkratnem izpadu segmentov na vseh prelivnih poljih nerealna. Stališče projektanta in strokovnjaka za hidromehansko opremo je bilo, da bi pri katastrofalnem potresu lahko nastale tolikšne poškodbe gradbenega segmenta, da bi prišlo do delnega zdrsa in zvitja ter s tem do blokade segmenta na katerem izmed polj. Najbolj občutljivo v tem primeru je srednje polje, saj sta polji levo in desno od osrednjega povezani med seboj.

Eden od možnih vzrokov za nastanek določenih poškodb na pregradi je tudi pojav izredno velikega naravnega pretoka. Praviloma se analize posledic porušitev vršijo pri obratovalnem (inštaliranem) pretoku in pri Q_{100} . Vendar je slednji za tip elektrarn, kakršne so na spodnji Savi, kjer so zapornice pri nastopu stoletnih vod že popolnoma odprte in je gladina blizu gladini v naravnem stanju, pravzaprav brezpredmeten. Voda se preliva preko betonskega praga, ki se verjetno tudi v primeru katastrofalnega potresa ne more porušiti oz. izginiti iz struge. Lahko bi prišlo do manjšega premika po strugi, kar pa ne zmanjša bistveno njegove prevodne sposobnosti. Bolj nevaren, vsaj za področje neposredno pod posamezno HE oz. v bazenu dolvodne HE, je nastanek poškodb zapornic pri pretokih, ko imamo gladino še na nominalni koti zajezbe, moramo pa vsled naraščajočega naravnega dotoka že pričeti z denivelacijo gladine (zaradi poplavne varnosti področja gorvodno od HE) – torej z večjim odpiranjem zapornic kot pa bi zadostovalo za vzdrževanje konstantne gladine.

Pregrade v nizu:

Glede na to, da v času nastajanja diplomske naloge še nismo razpolagali s podatki o porušitvi gorvodne HE Blanca, porušitve pregrad v nizu nismo upoštevali. Sicer pa tudi Navodilo za izdelavo ocen ogroženosti zaradi porušitve pregrad upošteva, da se dolvodne betonske pregrade v primeru nastanka vala zaradi porušitve gorvodne pregrade ne rušijo. Zahteve iz dokumenta ANSI/ANS-2.8-1992 pa so dodatni pogoji zaradi prisotnosti jedrskih objektov in so predvsem pomembne za interne varnostne pravilnike NEK. Ker teh zahtev Navodilo za izdelavo ocen ogroženosti ne predvideva, v okviru te diplomske naloge niso upoštevane.

3.4 Definiranje scenarijev porušitve v skladu z »Navodilom« in prakso

Scenariji so povzeti po dokumentu KMTe (2007) in predvidevajo izračun naslednjih primerov porušitve:

3.4.1 Pri $Q_{inst} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ in Z_{nom}

Inštalirani pretok v Savi Q_{inst} se uporabi zato, ker je to najvišji pretok, pri katerem preko hidromehanske opreme prelivov še ni pretoka oz. so prelivna polja v največji možni meri »zaprta«. Zaradi pogoja, da zadnja stopnja v verigi vedno deluje kot izravnalni bazen, je to primer takšnega rednega obratovanja (za razliko od visokovodnega obratovanja), pri katerem je ob zaprtih zapornicah vseh gorvodnih stopenj v dolvodni strugi največ vode. Nominalna kota akumulacije Z_{nom} se uporabi zato, ker je to najvišja dopustna kota akumulacije in je v tem primeru volumen akumulacije največji. To je pesimistična predpostavka, ker bo gladina v akumulaciji zaradi vršnega obratovanja verige stalno nihala in bo točka najvišje gladine (Z_{nom}) dosežena le za kratek čas ob zaključku polnjenja bazena.

3.4.1.1 Porušitev oz. izpad segmenta na enem prelivnem polju (potres)

Predpostavka o poškodbi enega (srednjega) segmenta na stopnjah s 5 prelivnimi polji je posledica tipa konstrukcije prelivnih polj, ki ima v bloku povezani po dve krajni polji, srednje polje pa je samostojen element. Ob izredno močnih potresnih pomikih, ki daleč presegajo posledice t.im. maksimalnega, sploh pa projektne potresa (ki ga mora objekt zdržati brez

kakršnih koli posledic), bi zato lahko prišlo najprej do blokade in kasneje do deformacije srednjega segmenta, njegova nadaljnja popolna porušitev oz. odplavitev pa je že ekstremno pesimističen scenarij.

3.4.1.2 Odprtje segmentov na vseh petih prelivnih poljih (človeški faktor)

Odprtje vseh segmentov v celoti in z največjo možno obratovalno hitrostjo predstavlja najbolj neugoden primer vpliva človeškega faktorja zaradi različnih vzrokov (človeška napaka oz. tudi npr. terorizem). Primerljiv primer rušenja hidromehanske opreme z miniranjem bi zahteval tako natančno in obsežno delo, da se z inženirskega vidika ne zdi realen. Še manj je realen primer namernega rušenja celotnih prelivnih polj (betonski del in oprema), kar bi zahtevalo velike količine razstreliva in natančno delo v daljšem obdobju.

3.4.2 Pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ in Z_{nom}

Pri pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ so zapornice že nekoliko dvignjene in obstaja največja možnost, da bi lahko zdrsnile nazaj in ostale zablokirane. Poleg tega je pri tem pretoku gladina še praktično na nominalni koti in bi se v primeru izpada zapornic iz vodil sprostilo več akumuliranega volumna iz bazena kot pri večjih naravnih dotokih, ko so gladine že bistveno nižje. Nominalna kota akumulacije Z_{nom} se uporabi zato, ker je to najvišja dopustna kota akumulacije in je v tem primeru volumen akumulacije največji. Pri nadaljnjem povečevanju poplavnega vala bi se v skladu z obratovalnim pravilnikom gladina v bazenu začela nižati in bi se postopoma prehajalo na visokovodno stanje.

3.4.2.1 Porušitev oz. izpad segmenta na enem prelivnem polju (potres)

Glej komentar pri 3.4.1.1

3.4.2.2 Odprtje segmentov na vseh petih prelivnih poljih (človeški faktor)

Glej komentar pri 3.4.1.2

4. MATEMATIČNI MODELI ZA SIMULACIJO PORUŠITVENIH VALOV

4.1 Pomen matematičnih modelov

V veliko pomoč pri reševanju problematike porušitev pregrad so nam lahko matematični modeli, ki so pri enodimenzionalnih problemih valov v ozkih dolinah pod pregradami že skoraj v celoti nadomestili dražje fizične modele. V zadnjem času pa še poseben razmah doživljajo dvodimenzionalni matematični modeli, kar lahko pripišemo izredno hitremu razvoju vedno zmogljivejših računalnikov. Njihovo uporabo predvideva tudi predlog novega „Pravilnika za izdelavo dokumentacije o hidravličnih posledicah porušitev pregrad“ v primerih velikih razširitev iz ožjih dolin v ravnine ali pri razlitju vala iz stranske doline v prečno glavno dolino.

Ločitev na enodimenzijske in dvodimenzijske modele se nanaša glede na način, kako zajamemo prostor, v katerem simuliramo pojav porušitvenega vala. Pri enodimenzijskih modelih aproksimiramo odsek z več celicami vzdolž ene smeri, pri dvodimenzijskih pa razdelimo področje na mrežo celic v ravnini, navadno v tlorisu. Poleg hidrostatične razporeditve tlakov se v isti celici predpostavlja, da so hitrosti konstantne po globini, torej računamo z globinsko povprečnimi vrednostmi (Četina, 1995). V okviru diplomske naloge smo uporabili enodimenzijski matematični model HEC - RAS.

4.2 Model HEC - RAS

HEC-RAS je računalniški program, ki nam omogoča izvesti hidravlični račun za enodimenzionalni stalni in nestalni tok, račun prodonosnosti in analizo temperature vode. Ameriška vojska, bolj natančno Center za hidrološko inženirstvo (Hydrologic Engineering Center –HEC) v Kaliforniji, je razvil program za analizo toka v vodah (River Analysis System- RAS) kot pomoč inženirjem pri analizi toka v strugah in določitvi poplavnih ravnin. Prva verzija programa je bila izdana leta 1995, tretja različica, s katero smo računali primere v diplomski nalogi, pa leta 2002. Zadnja verzija 4.0 je bila izdana leta 2008, vendar je bila Beta

verzija še v fazi testiranja, zato je vsebovala še določene napake in nestabilnosti, zato je nismo mogli uporabiti. Program je brezplačno dostopen na internetu.

Ta program spada med enodimenzijske modele, kar pomeni, da aproksimiramo odsek z več prečnimi profili vzdolž smeri toka. Program uporablja pri izračunu stalnega toka enodimenzijsko rešitev energijske enačbe, pri tem pa so izgube ocenjene na osnovi geometrijskih karakteristik in hrapavosti vodotoka preko Manningove enačbe ter koeficientov razširitve in zožitve. Pri nestalnem toku pa temelji na polnih St. Venantovih enačbah, kjer je za reševanje le teh uporabljena implicitna metoda končnih razlik. V primeru računa prodonosnosti program ponuja veliko različnih metod računa, ki pa so odvisne od različnih parametrov. Oceniti moramo, katera metoda je najboljša in jo pravilno uporabiti.

Da dobimo s programom HEC-RAS dobre in uporabne rezultate moramo nujno podati dobre podatke, predvsem čim bolj točne podatke o geometriji vodotoka.

4.3 Osnovne enačbe

HEC RAS uporablja osnovni St. Venantovi enačbi :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad \text{kontinuitetna enačba} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I_0 - I) \quad \text{dinamična enačba} \quad (2)$$

Pomen oznak v enačbah je naslednji:

- x je razdalja na abscisni osi
- t je čas,
- v je komponenta hitrosti v smeri x ,
- S in Q : prečni presek in pretok,
- h globina,
- g zemeljski pospešek (konstanta),
- I_0 naklon dna ($\text{tg}\alpha$) in
- I naklon energijske črte, ki ga računamo po Manningovi enačbi:

$$I = \frac{Q^2 n_g^2}{S^2 R^{4/3}}, \quad (3)$$

kjer sta R hidravlični radij in n_g Manningov koeficient hrapavosti.

4.4 Metoda reševanja

Splošna oblika aproksimacij posameznih odvodov za uporabljeno implicitno shemo končnih razlike so:

$$1. \frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{0,5(f_{j+1} + \Delta f_j)}{\Delta t} \quad (4)$$

$$2. \frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{(f_{j+1} + f_j) + \theta(f_{j+1} - \Delta f_j)}{\Delta x} \quad (5)$$

$$3. f \approx \bar{f} = 0,5\theta(f_j + \Delta f_{j+1}) \quad (6)$$

Enačbi (1) in (2) sta nelinearni parcialni diferencialni enačbi 1. reda, hiperboličnega tipa. Amain in Fang (1970), Fread (1974,1976) in drugi so rešili ti nelinearni enačbi z uporabo Newton-Raphsonove tehnike iteracijske numerične metode. Pri tej iteracijski shemi se lahko pojavijo problemi konvergence pri diskontinuiteti rečne geometrije. Da bi se izognili nelinearnim rešitvam, so Ligett in Cunge (1975) ter Chen (1973) razvili tehniko za linearizacijo enačb, ki jo uporablja tudi HEC-RAS in sicer:

1. če $f \cdot f \gg \Delta x$, potem $\Delta f \cdot \Delta f = 0$
2. če $g = g(Q,z)$, potem lahko Δg aproksimiramo z

$$\Delta g_j = \left(\frac{\partial g}{\partial Q} \right)_j \Delta Q_j + \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right)_j \Delta z_j$$

3. če je časovni korak Δt majhen, je $h_j^{n+1} \approx h_j^n$ in $\Delta h_j \approx 0$

Aproksimacije končnih razlik so podane v spodnjih tabelah.

Če se neznane vrednosti nahajajo na levi strani, je končna oblika linearnih enačb sledeča:

$$CQ1_j \Delta Q_j + CZ1_j \Delta z_j + CQ2_j \Delta Q_{j+1} + CZ2_j \Delta z_{j+1} = CB_j \quad (7)$$

$$MQ1_j \Delta Q_j + MZ1_j \Delta z_j + MQ2_j \Delta Q_{j+1} + MZ2_j \Delta z_{j+1} = MB_j \quad (8)$$

Preglednica 3: Aproksimacije končnih razlik v kontinuitetni enačbi

(HEC – RAS Hydraulic reference manual, 2002).

ΔQ	$(Q_{j+1} - Q_j) + \theta(\Delta Q_{j+1} - \Delta Q_j)$
$\frac{\partial A_c}{\partial t} \Delta x_c$	$0.5 \Delta x_{cj} \frac{\left(\frac{dA_c}{dz}\right)_j \Delta z_j + \left(\frac{dA_c}{dz}\right)_{j+1} \Delta z_{j+1}}{\Delta t}$
$\frac{\partial A_f}{\partial t} \Delta x_f$	$0.5 \Delta x_{fj} \frac{\left(\frac{dA_f}{dz}\right)_j \Delta z_j + \left(\frac{dA_f}{dz}\right)_{j+1} \Delta z_{j+1}}{\Delta t}$
$\frac{\partial S}{\partial t} \Delta x_f$	$0.5 \Delta x_{fj} \frac{\left(\frac{dS}{dz}\right)_j \Delta z_j + \left(\frac{dS}{dz}\right)_{j+1} \Delta z_{j+1}}{\Delta t}$

Preglednica 4: Aproximacije končnih razlik v dinamični enačbi

(HEC – RAS Hydraulic reference manual, 2002).

$\frac{\partial(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\partial t \Delta x_e}$	$\frac{0.5}{\Delta x_e \partial t} (\partial Q_{c_j} \Delta x_{c_j} + \partial Q_{f_j} \Delta x_{f_j} + \partial Q_{c_{j+1}} \Delta x_{c_{j+1}} + \partial Q_{f_{j+1}} \Delta x_{f_{j+1}})$
$\frac{\Delta \beta V Q}{\Delta x_{ej}}$	$\frac{1}{\Delta x_{ej}} [(\beta V Q)_{j+1} - (\beta V Q)_j] + \frac{\theta}{\Delta x_{ej}} [(\beta V Q)_{j+1} - (\beta V Q)_j]$
$g \bar{A} \frac{\Delta z}{\Delta x_e}$	$g \bar{A} \left[\frac{z_{j+1} - z_j}{\Delta x_{ej}} + \frac{\theta}{\Delta x_{ej}} (\Delta z_{j+1} - \Delta z_j) \right] + \theta g \Delta \bar{A} \frac{(z_{j+1} - z_j)}{\Delta x_{ej}}$
$g \bar{A} (\bar{S}_f + \bar{S}_h)$	$g \bar{A} (\bar{S}_f + \bar{S}_h) + 0.5 \theta g \bar{A} [(\Delta S_{f_{j+1}} + \Delta S_{f_j}) + (\Delta S_{h_{j+1}} + \Delta S_{h_j})] + 0.5 \theta g (\bar{S}_f + \bar{S}_h) (\Delta A_j + \Delta A_{j+1})$
\bar{A}	$0.5 (A_{j+1} + A_j)$
\bar{S}_f	$0.5 (S_{f_{j+1}} + S_{f_j})$
∂A_j	$\left(\frac{dA}{dZ} \right)_j \Delta z_j$
∂S_{f_j}	$\left(\frac{-2 S_f}{K} \frac{dK}{dz} \right)_j \Delta z_j + \left(\frac{2 S_f}{Q} \right)_j \Delta Q_j$
$\partial \bar{A}$	$0.5 (\Delta A_j + \Delta A_{j+1})$

Preglednica 5: Koeficienti za kontinuitetno enačbo

(HEC – RAS Hydraulic reference manual, 2002).

CQ1 _j	$\frac{-\theta}{\Delta x_{ej}}$
CZ1 _j	$\frac{0.5}{\Delta t \Delta x_{ej}} \left[\left(\frac{dA_c}{dz} \right)_j \Delta x_{cj} + \left(\frac{dA_f}{dz} + \frac{dS}{dz} \right)_j \Delta x_{fj} \right]$
CQ2 _j	$\frac{\theta}{\Delta x_{ej}}$
CZ2 _j	$\frac{0.5}{\Delta t \Delta x_{ej}} \left[\left(\frac{dA_c}{dz} \right)_{j+1} \Delta x_{cj} + \left(\frac{dA_f}{dz} + \frac{dS}{dz} \right)_{j+1} \Delta x_{fj} \right]$
CB _j	$-\frac{Q_{j+1} - Q_j}{\Delta x_{ej}} + \frac{Q_1}{\Delta x_{ej}}$

Preglednica 6: Koeficienti za dinamično enačbo

(HEC – RAS Hydraulic reference manual, 2002).

MQ1 _j	$0.5 \frac{\Delta x_{cj} \phi_j + \Delta x_{fj} (1 - \phi_j)}{\Delta x_{ej} \Delta t} - \frac{\beta_j V_j \theta}{\Delta x_{ej}} + \theta g \bar{A} \frac{(S_{fj} + S_{hj})}{Q_j}$
MZ1 _j	$\frac{-g \bar{A} \theta}{\Delta x_{ej}} + 0.5 g (z_{j+1} - z_j) \left(\frac{dA}{dz} \right)_j \left(\frac{\theta}{\Delta x_{ej}} \right) - g \theta \bar{A} \left[\left(\frac{dK}{dz} \right)_j \left(\frac{S_{fj}}{K_j} \right) + \left(\frac{dA}{dz} \right)_j \left(\frac{S_{hj}}{A_j} \right) \right] + 0.5 \theta g \left(\frac{dA}{dz} \right)_j (\bar{S}_f + \bar{S}_h)$
MQ2 _j	$0.5 \left[\Delta x_{cj} \phi_{j+1} + \Delta x_{fj} (1 - \phi_{j+1}) \right] \left(\frac{1}{\Delta x_{ej} \Delta t} \right) + \beta_{j+1} V_{j+1} \left(\frac{\theta}{\Delta x_{ej}} \right) + \frac{\theta g \bar{A}}{Q_{j+1}} (S_{fj+1} + S_{hj+1})$
MZ2 _j	$\frac{g \bar{A} \theta}{\Delta x_{ej}} + 0.5 g (z_{j+1} - z_j) \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{\theta}{\Delta x_{ej}} \right) - \theta g \bar{A} \left[\left(\frac{dK}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{S_{fj+1}}{K_{j+1}} \right) + \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{S_{hj+1}}{A_{j+1}} \right) \right] + 0.5 \theta g \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} (\bar{S}_f + \bar{S}_h)$
MB _j	$-\left[(\beta_{j+1} V_{j+1} Q_{j+1} - \beta_j V_j Q_j) \left(\frac{1}{\Delta x_{ej}} \right) + \left(\frac{g \bar{A}}{\Delta x_{ej}} \right) (z_{j+1} - z_j) + g \bar{A} (\bar{S}_f + \bar{S}_h) \right]$

Pomen oznak v aproksimacijah odvodov v enačbah je naslednji:

- x je razdalja,
- S in Q : prečno presek in pretok,
- t je čas,
- v je hitrost,
- A je površina,
- Z je globina,
- β je faktor porazdelitve hitrosti,
- θ je faktor porazdelitve toka,
- K je porazdelitev prevodnosti
- indeksa f in c : poplavna ravnica in struga,
- g je zemeljski pospešek.

4.5 Začetni in robni pogoji

Začetni pogoj: za pričetek simulacije nestalnega toka moramo podati pretok pri katerem program s pomočjo stalnega toka izračuna gladine v vsakem profilu.

Levi robni pogoj predstavlja dotok v akumulacijo oz. obravnavani odsek Q_0 . Pri računu nestalnega toka ga v HEC-RAS vstavimo v obliki hidrograma $Q(t)$.

Interna pogoja – pogoja sta podana v profilih HE Krško in jezu NEK. Program zahteva podatke o odpiranju zapornic in sicer:

- gladino vode, ko se začnejo zapornice odpirati in zapirati
- hitrost odpiranja in zapiranja
- maksimalno in minimalno odprtost zapornic,
- začetno odprtost zapornic.

Pri izračunu porušitve pregrade HE Krško moramo podati tudi podatke o nastali odprtini in sicer velikost in obliko ter čas in začetek porušitve.

Desni robni pogoj predstavlja normalni tok, zato moramo podati padec pod zadnjim profilom.

5. HIDRAVLIČNI IZRAČUNI VALOV VSLED PORUŠITVE PREGRADE HE KRŠKO

5.1 Podatki in opis računskih primerov

5.1.1 Osnovni podatki o objektih

V računih smo upoštevali naslednje geodetske in hidravlične podatke o pregradah in hidromehanski opremi:

HE Krško:

nominalna kota zajeze	164,00 m
obratovalni pretok	500 m ³ /s
število prelivnih polj	5
tip zapornic:	segmentne
višina segmentnih zapornic	7,8 m
višina klapne	3,0 m
kota prelivnega praga	153,30 m n.m.
širina prelivnega polja	15 m

Za podatke o načinu in hitrosti dviganja smo predpostavili, da se najprej odpira klapna s hitrostjo 1,2 m/min. Po potrebi se klapno lahko sprosti praktično trenutno. Spuščene klapne prevajajo do 500 m³/s pretoka pri nominalni koti zajeze. Pri večjem dotoku je potrebno dvigati segmente (upošteva se, da gre pri normalnem obratovanju še dodatnih 500 m³/s skozi turbine, kar pomeni, da morajo začeti z dvigom segmentov nekje pri dotoku nad 1000 m³/s). Maksimalna hitrost dviganja segmenta je 0,4 m/min. V diplomski nalogi sem predpostavil trenutno porušitev zaporničnih objektov.

Jez NEK:

nominalna kota zajeze	151,00 m
število prelivnih polj	6
tip zapornic:	segmentne
višina segmentnih zapornic	2,2 m
kota prelivnega praga	147,50 m n.m.
širina prelivnega polja	15 m

Za podatki o načinu in hitrosti dviganja smo privzeli, da pri normalnem obratovanju vzdržujejo koto na 150,1 m. To lahko delajo z dviganjem segmentov do pretoka $735 \text{ m}^3/\text{s}$, takrat so zapornice že povsem odprte in imamo prosti preliv, ki pa je seveda potopljen, saj je krona prelivnega praga dvignjena le 2 m nad dno struge. Običajno dvigajo segmente drugega za drugim po 5 cm, malo počakajo, da se ustali, pa spet enako. Tako traja celotno dviganje okoli dve uri. Toda pri takšnem izrednem dogodku, kot je porušitev gorvodne HE, smo privzeli maksimalno možno hitrost dviganja ter hkraten dvig vseh segmentov. Po njihovih podatkih lahko v sili dvignejo vse zapornice v 0,5 ure.

5.1.3 Geodetski podatki

Uporabljeni so bili aktualni profili iz zadnjih študij posameznih odsekov. Računske profile smo dobili z interpolacijo merjenih, tako da je medsebojna povprečna razdalja računskih profilov okoli 80 m. Topografijo celotnega obravnavanega odseka reke Save v dolžini 21,8 km (21795,32 m), od začetka bazena HE Krško (stacionaža 760547) do načrtovanega jezua HE Brežice (stacionaža 738752), smo opisali z 267 prečnimi profili.

5.1.3 Hidravlični podatki

1. Pri osnovnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$:

- 1.1 Porušitev zapornice srednjega prelivnega polja HE Krško do kote praga (153,3 m) pri normalni koti zajeze 164 m v 1 minuti
- 1.2 Istočasna porušitev vseh petih zapornic na prelivnih poljih HE Krško do kote praga (153,3 m) pri normalni koti zajeze 164 m v 1 minuti
- 1.3 Istočasna porušitev vseh petih zapornic na prelivnih poljih HE Krško s stebri vred do kote praga (153,3 m) pri normalni koti zajeze 164 m v 1 minuti
- 1.4 Celoten dvig zapornice srednjega prelivnega polja HE Krško (10,8 m) pri normalni koti zajeze 164 m v 1 minuti, ki služi kot primerjava s točko 1.1 (izračun brez modula porušitve)
- 1.5 Celoten dvig vseh petih zapornic na prelivnih poljih HE Krško (10,8 m) pri normalni koti zajeze 164 m v 1 minuti, ki služi kot primerjava s točko 1.2

2. Pri osnovnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$:

- 2.1 Porušitev zapornice srednjega prelivnega polja HE Krško do kote praga (153,3 m) pri normalni koti zajeze 164 m v 1 minuti
- 2.2 Istočasna porušitev vseh petih zapornic na prelivnih poljih HE Krško do kote praga (153,3 m) pri normalni koti zajeze 164 m n.m v 1 minuti
- 2.3 Istočasna porušitev vseh petih zapornic na prelivnih poljih HE Krško s stebri vred do kote praga (153,3 m) pri normalni koti zajeze 164 m n.m v 1 minuti
- 2.4 Celoten dvig zapornice srednjega prelivnega polja HE Krško (10,8 m) pri normalni koti zajeze 164 m v 1 minuti, ki služi kot primerjava s točko 2.1 (izračun brez modula porušitve)
- 2.5 Celoten dvig vseh petih zapornic na prelivnih poljih HE Krško (10,8 m) pri normalni koti zajeze 164 m v 1 minuti, ki služi kot primerjava s točko 2.2

Koeficient hrapavosti:

Za strugo smo v prvi aproksimaciji privzeli vrednosti koeficienta hrapavosti, ki so bile ugotovljene pri zadnjem umerjanju, ki jih je izvedel IBE z 1D računi, ko se je korito umerjalo s pomočjo merjenih gladin pri več različnih pretokih. Dokončne vrednosti so bile potem določene s postopkom umerjanja, ki je opisan v poglavju 5.2.

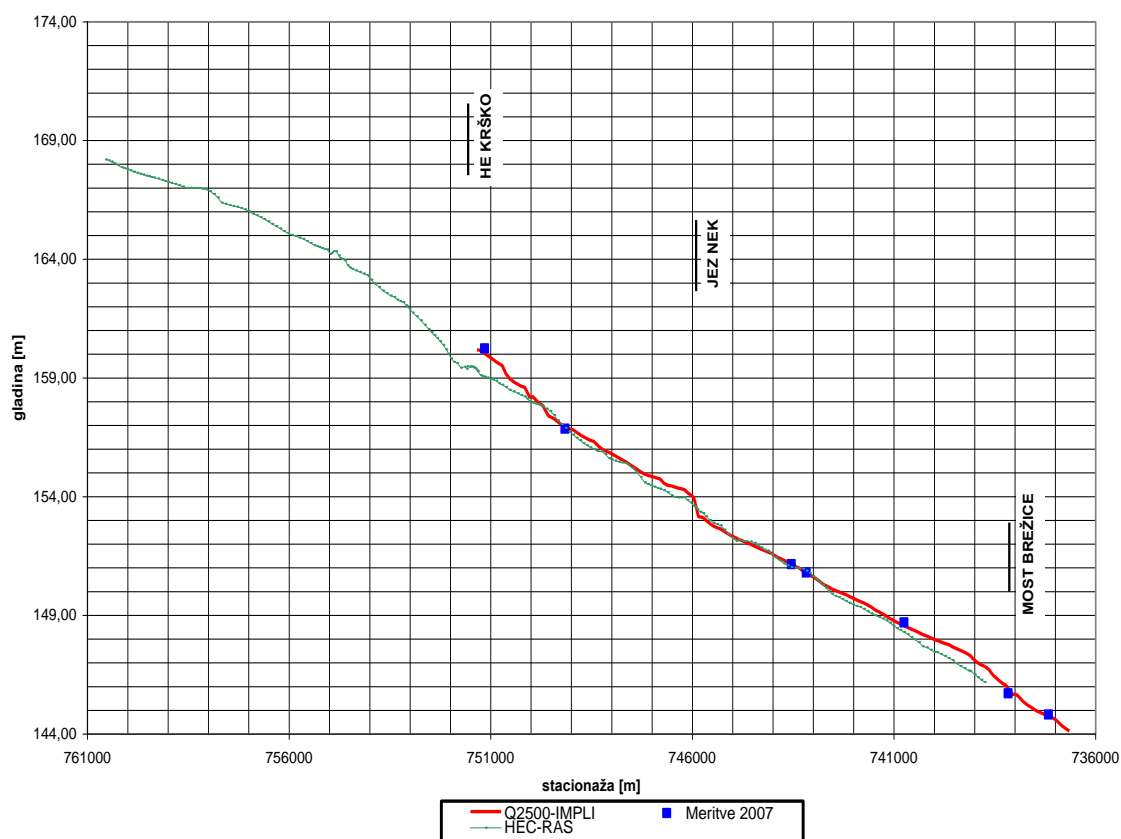
Preglednica 7: Koeficienti hrapavosti glavne struge

stacionaža	n_g ($\text{sm}^{-1/3}$)
760547-756994	0,031
756897-751982	0,036
751910-751513	0,04
751495-744289	0,032
744208-740842	0,034
740751	0,035
740660-739547	0,036
739458-739102	0,034
739052	0,033
738952-738752	0,032

5.2 Umerjanje modela

Poleg privzetih koeficientov hrapavosti iz prejšnjih študij smo matematični model umerili s pomočjo meritev, ki so bile opravljene leta 2007 na odseku Krško – Brežice pri pretoku $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$. S HEC – RAS-om smo izračunali stalni tok pri tem pretoku in rezultate primerjali z meritvami ter z računi toka s programom IMP2008, opravljenimi v okviru študije Zakrajšek in ostali (2008)

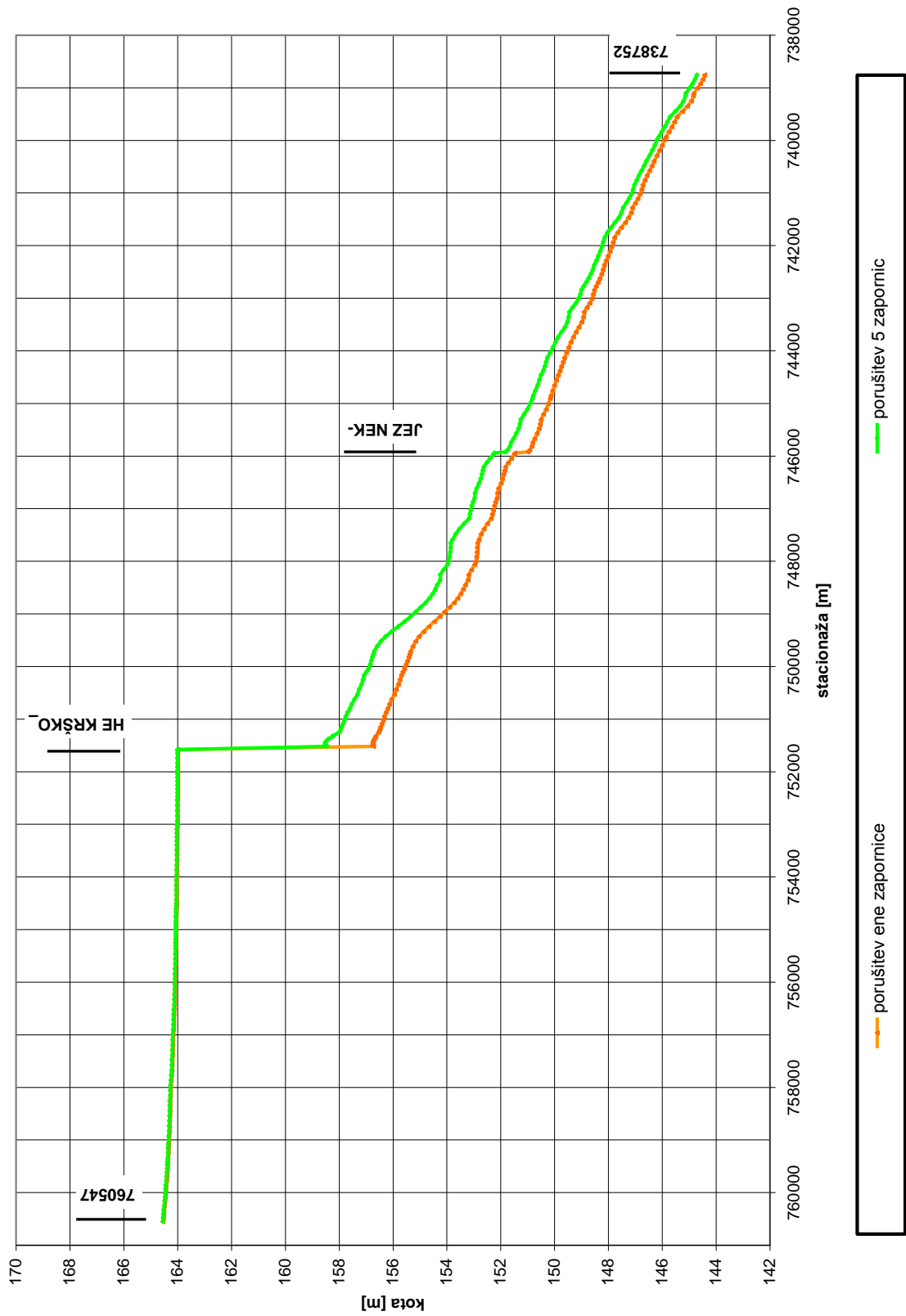
Primerjava izračunane gladine s programom HEC - RAS z meritvami l. 2007 kaže zadovoljivo ujemanje. Izrazito odstopanje imamo le na dveh mestih - odstopanje tik pod HE Krško ter na dolvodnem koncu modela HEC- RAS. Odstopanje gladin pod HE Krško je najbrž posledica poglobitve struge na tem območju, ki je v skladu s projektom izgradnje HE Krško že upoštevana, pri računih z modelom IMP2008 pa je bilo upoštevano sedanje stanje brez poglobitev, kakršno je bilo tudi ob meritvah v letu 2007. Na odstopanje na dolvodnem robu modela HEC – RAS pa vpliva nekoliko manj točen spodnji robni pogoj, kjer smo podali normalni tok. V modelu IMP2008, pa je bil podan točnejši robni pogoj na podlagi podaljšanega računa do VP Čadež. Kljub lokalnim odstopanjem menim, da je model za namen računa porušitvenih valov dovolj točno umerjen in ga lahko uporabimo za izračune privzetih scenarijev morebitne porušitve HE Krško.



Slika 7: Umerjanje modela pri pretoku $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$

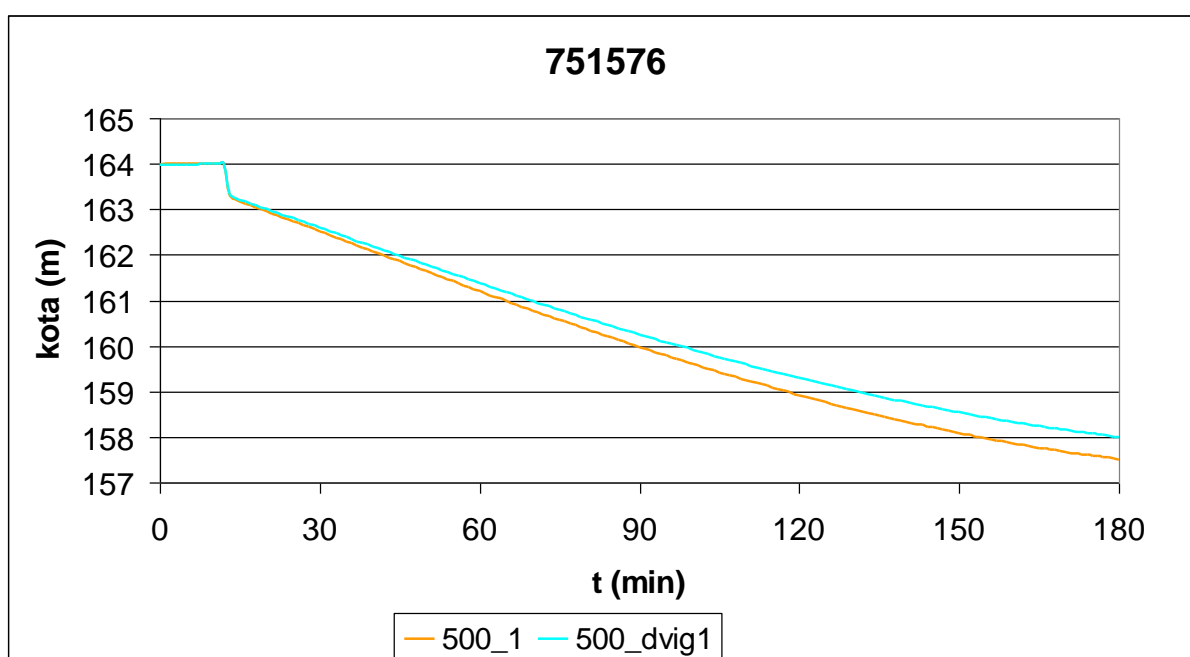
5.3 Prikaz rezultatov porušitev pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

Gorvodno od pregrade Krško pride do zajezbe ker vzdržujemo vodo na nominalni koti 164 m. Kot lahko razberemo iz grafa, je potek maksimalnih gladin pri porušitvi petih zapornic višji. Tik dolvodno od pregrade HE Krško je razlika v gladinah največja (1.8 m.), nato se postopoma zmanjšuje in v zadnjem profilu odseka (738752) znaša le še 0.3 m. Pri porušitvi petih zapornic se naenkrat sprosti mnogo več vode dolvodno in od tega tudi višje maksimalne gladine.

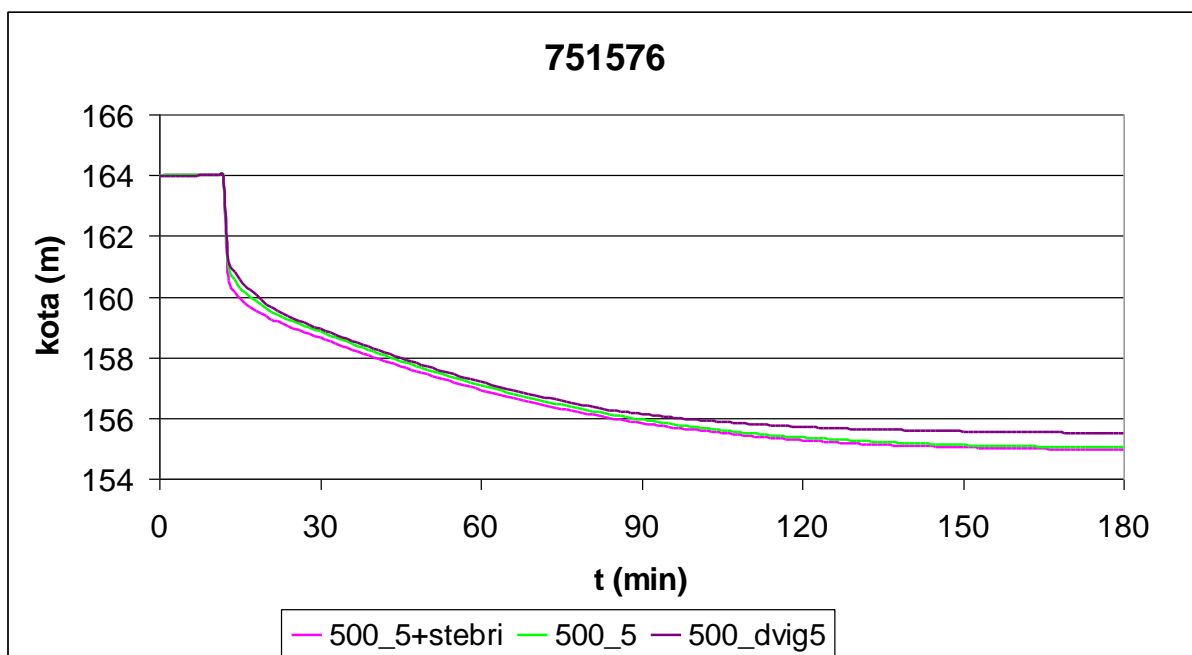


Slika 8: Potek maksimalnih gladin pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

Na spodnjih nivogramih na slikah 9 in 10 vidimo potek gladine v profilu HE Krško (751576) pri trenutni (v eni minuti) porušitvi ene oz. petih zapornic (točke 1.1, 1.2, 1.3) ter pri celotnem dvigu ene oz. petih zapornic v eni minuti (točki 1.4, 1.5). V vseh primerih znaša začetna odprtost segmentov 0,658 m, da pred porušitvijo oz. odpiranjem ujamemo nominalno višino zajezbe, ki znaša 164 m. Da se gladina vode pred porušitvijo umiri, smo predpostavili čas porušitve po preteku 13 minut.

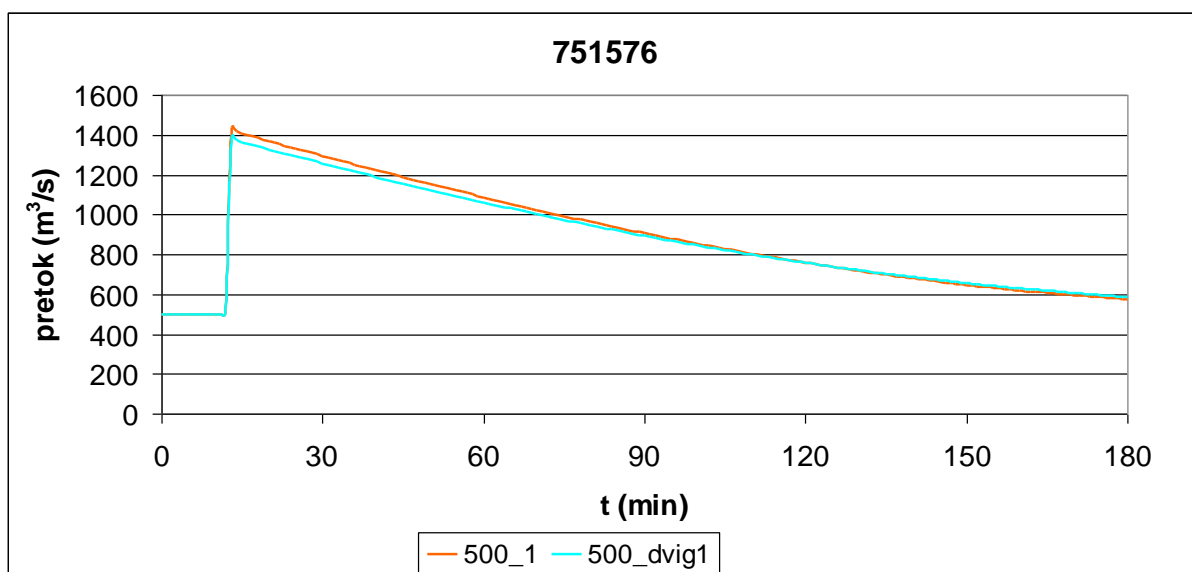


Slika 9: Nivogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) ene zapornice ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)

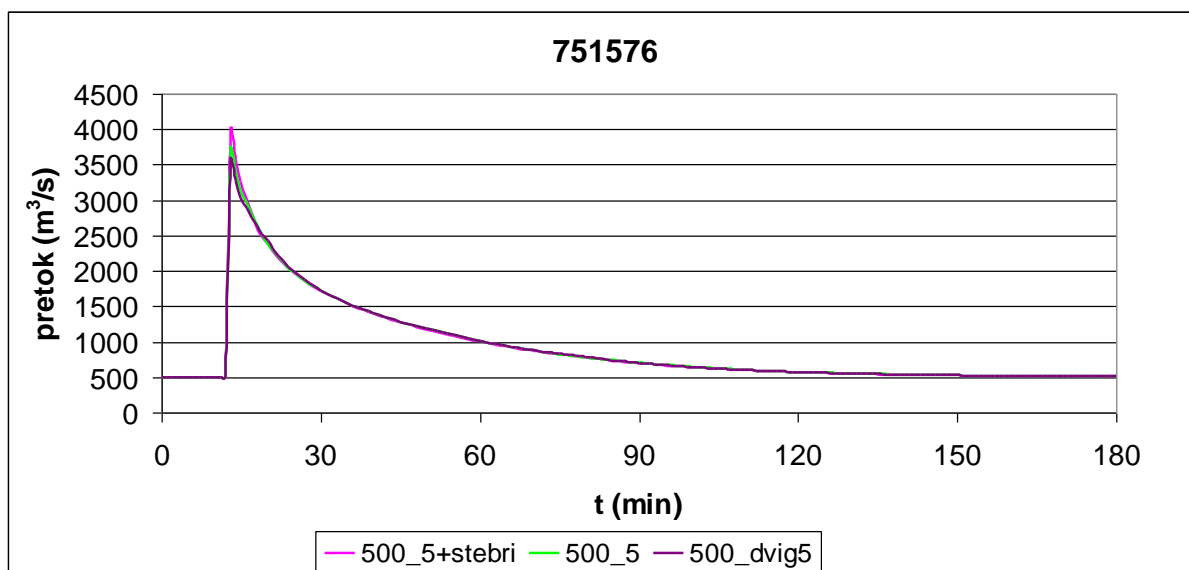


Slika 10: Nivogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) petih zapornic ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)

Na slikah 11 in 12 so prikazani še izračuni v profilu HE Krško (751576) pri trenutni (minutni) porušitvi ene oz. petih zapornic (točke 1.1, 1.2, 1.3) ter pri celotnem dvigu ene oz. petih zapornic v eni minuti (točki 1.4, 1.5). Kot je že omenjeno, znaša začetna odprtost segmentov 0,658 m.



Slika 11: Hidrogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) ene zapornice ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)



Slika 12: Hidrogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) petih zapornic ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$)

Kot vidimo iz zgornjih nivogramov, hidrogramov in spodnje preglednice 8 pride do manjše razlike med porušitvijo in dvigom zapornic, katerih rezultati bi se morali približno ujemati. Neujemanje se kaže pri celotnem poteku nivogramov in maksimalnem pretoku v hidrogramih.

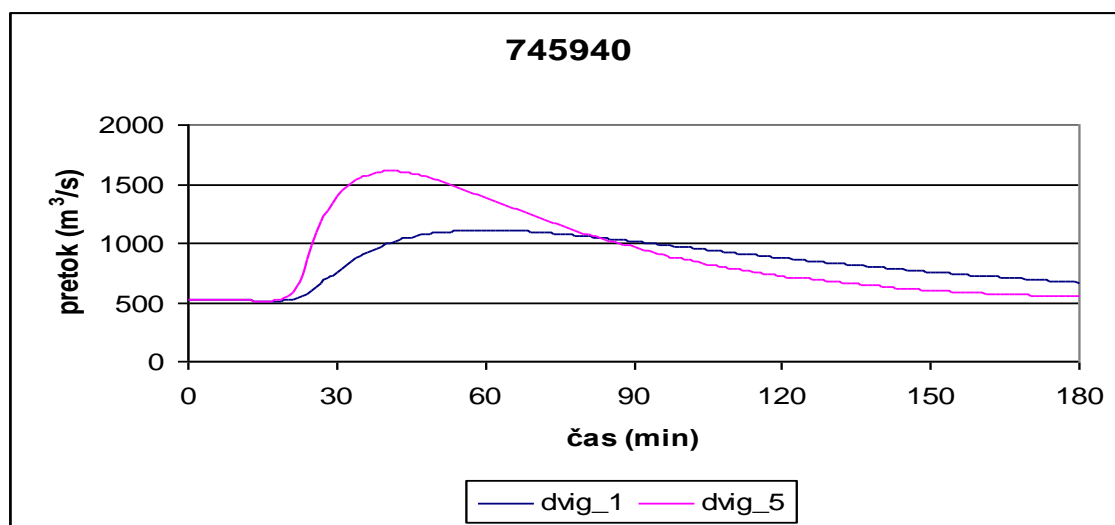
V priročnikih programa HEC – RAS ni nikjer omenjeno, po katerih enačbah porušitveni modul programa računa prelivanje na mestu porušitve pregrade, tako da točne razlage o neujemanju rezultatov ne moremo ugotoviti. Avtorji programa pa omenjajo, da je opcija modeliranja porušitve pregrad mišljena bolj za nasute pregrade, kjer je čas porušitve zaradi erozije daljši. V priročniku je jasno napisano, da je točnost rezultatov najbolj odvisna od samega trajanja porušitve in od velikosti nastale odprtine (HEC RAS – Hydraulic reference manual, 2002). S poskušanjem smo tudi sami ugotovili, da pride do dobrega ujemanja rezultatov, če za čas rušenja oz. dviga zapornic vzamemo najmanj 7 minut. Vendar si ta način v našem primeru ne moremo pomagati, saj moramo po predvidenih scenarijih predpostaviti trenutno porušitev. Če pri izračunih v porušitvenem modulu za velikost nastale odprtine ob porušitvi vzamemo tako, da od zahtevane višine nastale odprtine odštejemo začetno odprtost zapornic (torej je višina predvidene odprtine manjša), se rezultati v primerjavi z dvigom nekoliko bolj ujemajo. Tudi tu pa si s tem ne moremo pomagati, ker imamo po predvidenih scenarijih predpostavko porušitve do kote praga preliva. Ker predvidevamo, da račun

prelivanja na mestu porušene pregrade v porušitvenem modulu poteka manj natančno, smo večjo točnost rezultatov izračuna pripisali primerom z dvigom zapornic. (primeri 1.4, 1.5).

Preglednica 8: Primerjava rezultatov porušitev pri $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ v profilu HE Krško

primer	porušitev 1	dvig1	porušitev 5	dvig 5	porušitev 5 + stebri
max pretok (m^3/s)	1437,06	1391,63	3713,82	3557,18	3985,32
pretok po 3 urah (m^3/s)	572,96	584,79	507,28	507,36	507,14
max gladina (m)	164 (163,32)	164 (163,35)	164 (160,93)	164 (161,13)	164 (160,51)
gladina po 3 urah (m)	157,51	157,99	155,02	155,5	154,97

Maksimalni pretok pri trenutni porušitvi vseh petih zapornic je na mestu HE Krško za več kot $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ večji kot pri porušitvi ene. Po treh urah je v primeru porušitve ene zapornice pretok in s tem tudi gladina vode večja kot pri porušitvi vseh petih, saj je nastala odprtina manjša, kar pomeni tudi počasnejše odtekanje vode dolvodno.



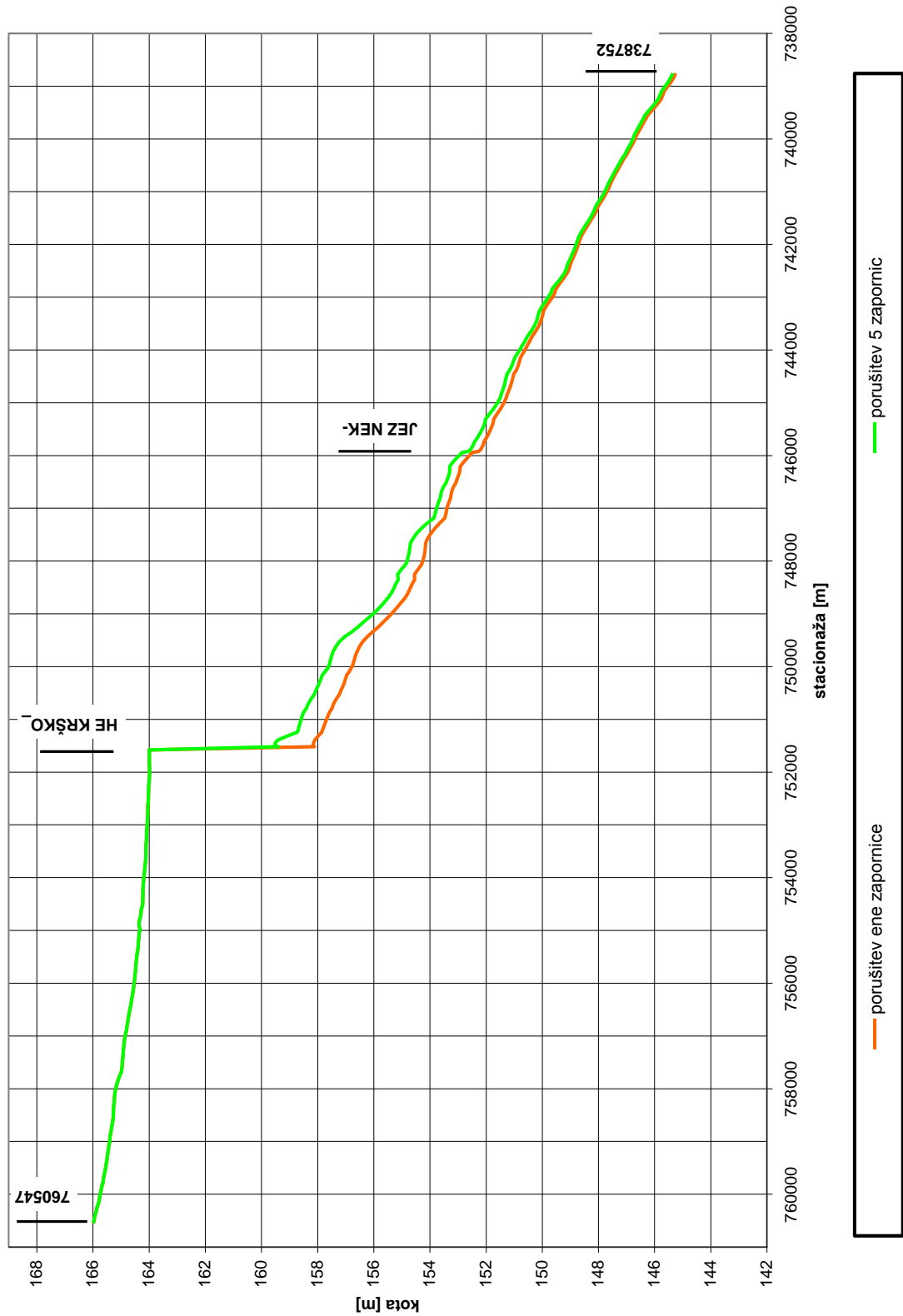
Slika 13: Hidrogram v profilu jezov NEK pri porušitvi (dvigu) ene in petih zapornic pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

Pretoki zaradi porušitve se dolvodno od pregrade hitro znižujejo. Jez NEK se nahaja 5,6 km dolvodno od HE Krško. Maksimalni pretok pri porušitvi ene zapornice v profilu jezu NEK znaša $1112 \text{ m}^3/\text{s}$ in je dosežen 47 minut po porušitvi HE Krško. V primeru porušitve petih zapornic pa maksimalni pretok znaša $1610 \text{ m}^3/\text{s}$ in nastopi 28 minutah po porušitvi. V zadnjem dolvodnem profilu odseka (738752) doseže pretok pri porušitvi petih zapornic le še vrednost $1200 \text{ m}^3/\text{s}$. Pretoki zaradi porušitve petih zapornic so višji in nastopijo v krajšem času od porušitve.

V primeru porušitve petih zapornic doseže hitrost vode tik dolvodno od pregrade vrednost $3,8 \text{ m/s}$. Dolvodno od pregrade se hitrost postopoma manjša in v povprečju znaša $2,8 \text{ m/s}$. V primeru porušitve ene zapornice je povprečna hitrost dolvodno od pregrade $2,4 \text{ m/s}$, maksimalna pa $3,2 \text{ m/s}$.

5.4 Prikaz rezultatov porušitev pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$

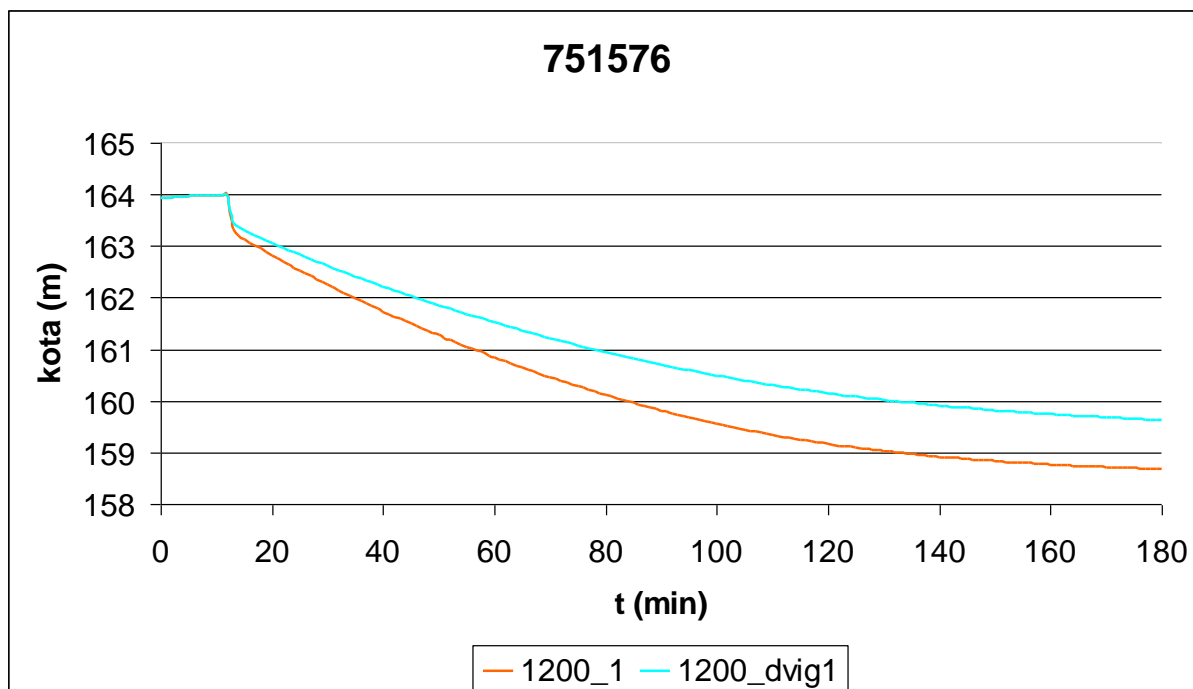
Na grafu na sliki 14 vidimo potek maksimalnih gladin pri trenutni porušitvi ene in petih zapornic pri pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ (točka 2.1 in 2.2). V graf zaradi minimalnih razlik niso vključeni ostali primeri (točke 2.3, 2.4 in 2.5 iz poglavja 5.1.3), katerih grafi so podani kasneje v prilogah. V prilogi 2 je podana tudi preglednica poteka maksimalnih gladin za vseh pet primerov pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$.



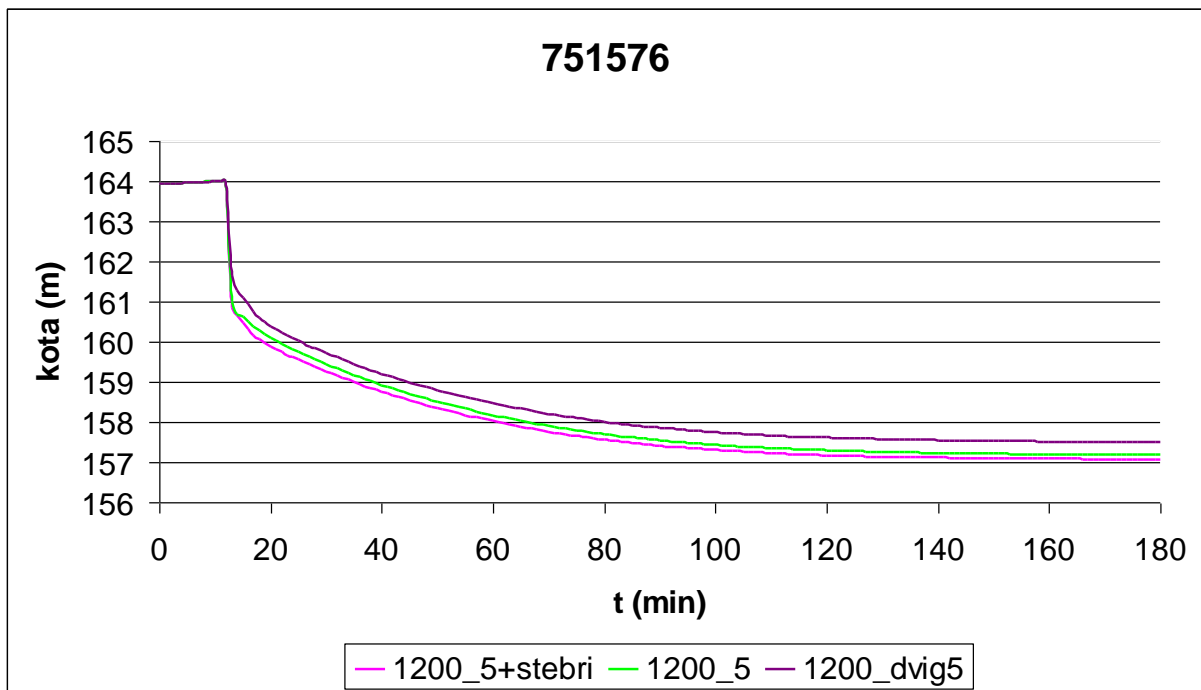
Slika 14: Potek maksimalnih gladin pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$

Potek maksimalnih gladin pri porušitvi petih zapornic je v skladu s pričakovanji višji kot pri porušitvi ene. Tik dolvodno od pregrade HE Krško je razlika v gladinah največja (1,19 m.), nato se postopoma zmanjšuje in v zadnjem profilu odseka (738752) znaša le še 0,13 m. Pri porušitvi petih zapornic se naenkrat sprosti mnogo več vode dolvodno, kar povzroči tudi višje maksimalne gladine.

Na nivogramih na slikah 15 in 16 vidimo potek gladine v profilu HE Krško (751576) pri trenutni (v eni minuti) porušitvi ene oz. petih zapornic (točke 2.1, 2.2, 2.3) ter pri celotnem dvigu ene oz. petih zapornic v eni minuti (točki 2.4, 2.5). V vseh primerih znaša začetna odprtost segmentov 1,582 m, da pred porušitvijo oz. odpiranjem ujamemo nominalno višino zajezebe, ki znaša 164 m. Da se gladina vode pred porušitvijo umiri, smo predpostavili čas porušitve po preteku 13 minut.

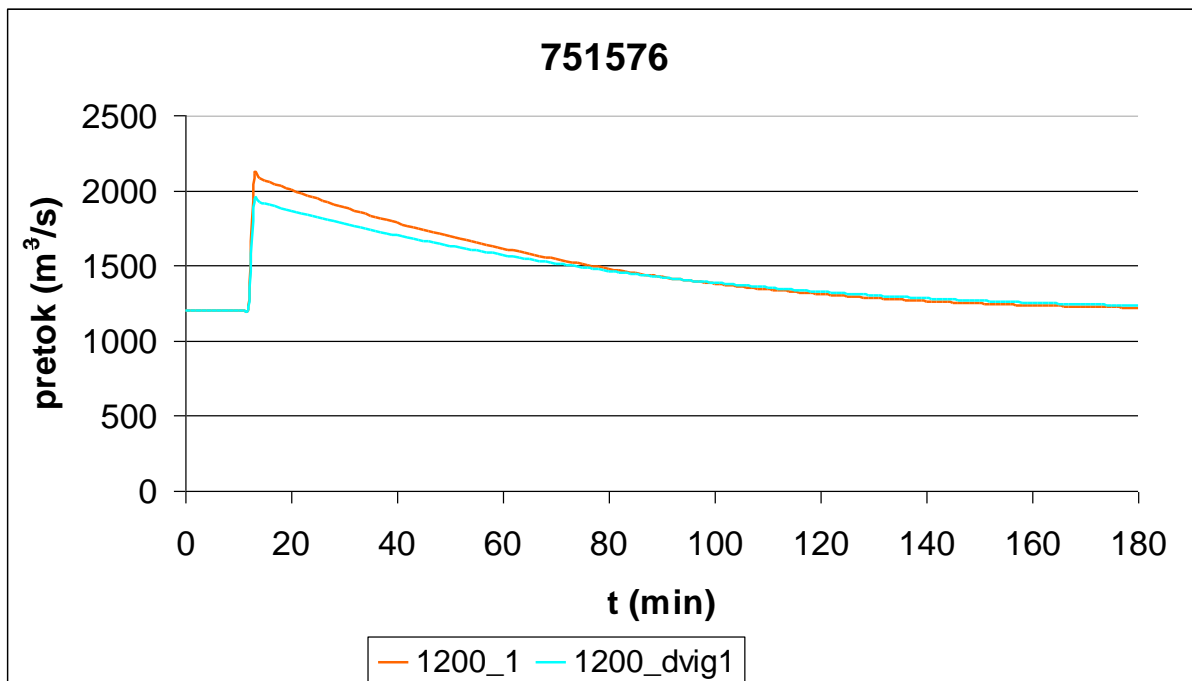


Slika 15: Nivogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) ene zapornice ($Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)

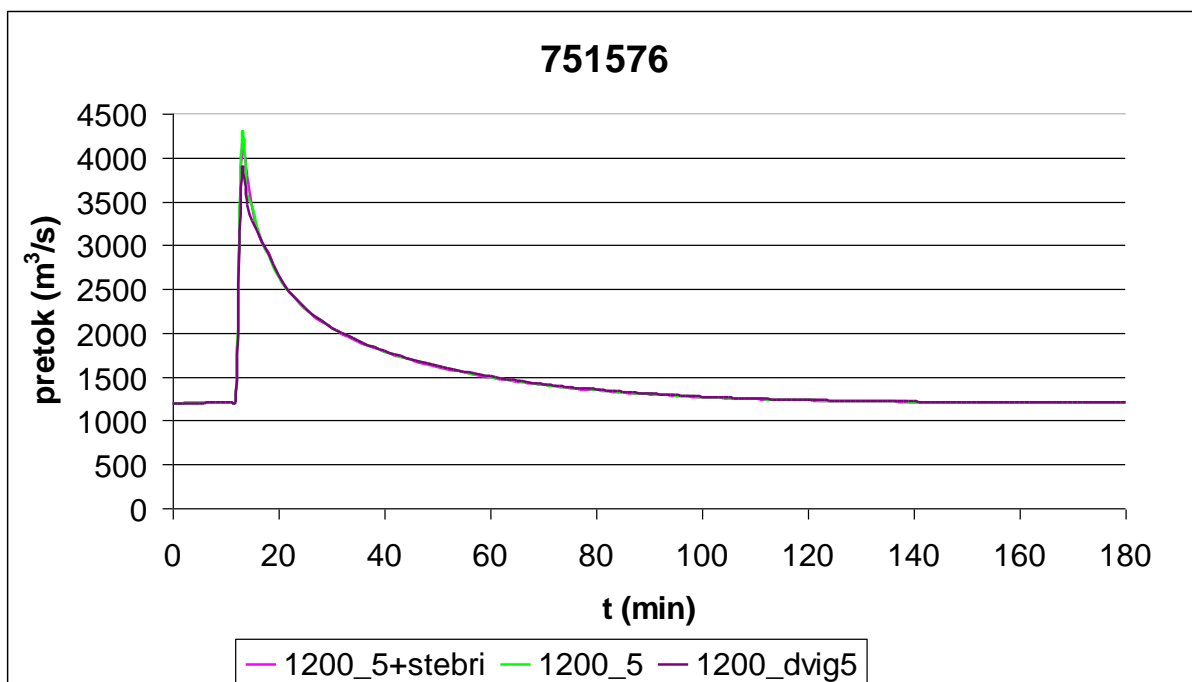


Slika 16: Nivogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) petih zapornic ($Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Na slikah 17 in 18 so prikazani še izračunani hidrogrami v profilu HE Krško (751576) pri trenutni (v eni minuti) porušitvi ene oz. petih zapornic (točke 2.1, 2.2, 2.3) ter pri celotnem dvigu ene oz. petih zapornic v eni minuti (točki 2.4, 2.5).



Slika 17: Hidrogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) ene zapornice ($Q = 1200 m^3/s$)



Slika 18: Hidrogram v profilu HE Krško pri porušitvi (dvigu) petih zapornic ($Q = 1200 m^3/s$)

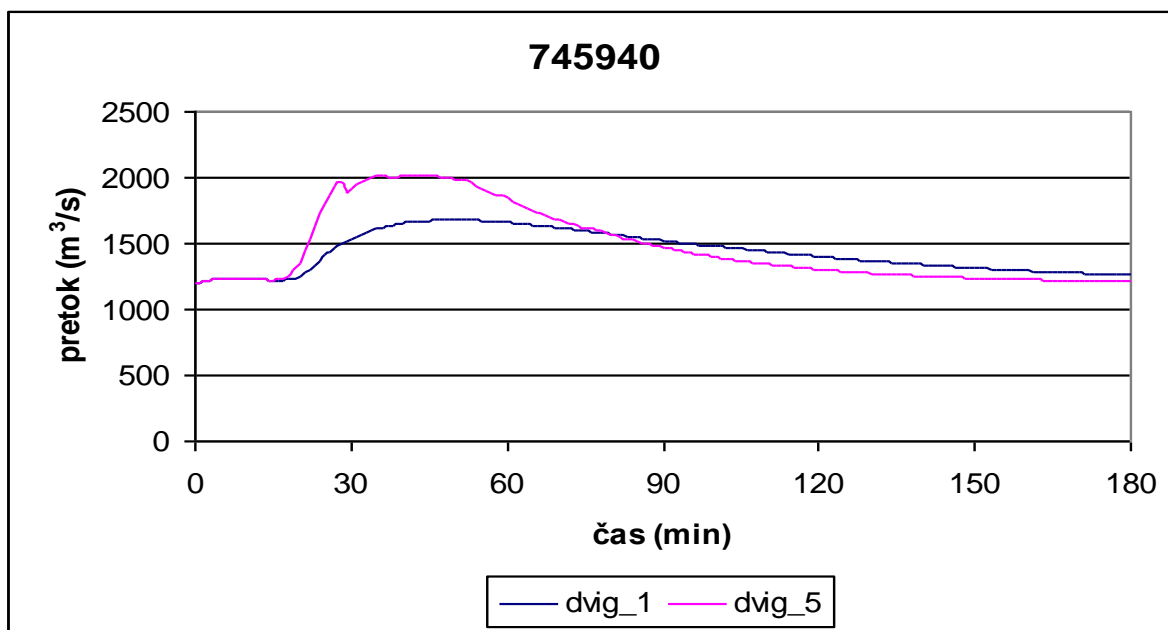
Kot vidimo iz zgornjih nivogramov, hidrogramov in spodnje preglednice 9 pride do manjše razlike med porušitvijo in dvigom zapornic, katerih rezultati bi se morali približno ujemati.

Neujemanje se kaže predvsem pri maksimalnem pretoku in poteku gladine v profilu HE Krško. Zaradi razlogov, omenjenih že pri izračunu za začetni pretok $500 \text{ m}^3/\text{s}$ smo večjo točnost rezultatov pripisali izračunom simulacije porušitve kot skoraj trenutnim dvigom zapornic (primeri 2.4 in 2.5).

Preglednica 9: Primerjava rezultatov porušitev pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ v profilu HE Krško

primer	porušitev		porušitev		Porušitev 5 + stebri
	1	dvig1	5	dvig 5	
max pretok (m^3/s)	2114,31	1948,92	4232,65	3850,35	4123,42
pretok po 3 urah (m^3/s)	1218,28	1231,87	1202,67	1202,95	1202,52
max gladina (m)	164 (158,11)	164 (157,90)	164 (159,18)	164 (159,08)	164 (159,40)
gladina po 3 urah (m)	158,64	159,63	157,18	157,50	157,07

Maksimalni pretok pri trenutni porušitvi vseh petih zapornic je na mestu HE Krško za več kot $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ večji kot pri porušitvi ene ($Q_{\max} = 3850,39 \text{ m}^3/\text{s}$ pri porušitvi petih; $Q_{\max} = 1948,92 \text{ m}^3/\text{s}$ pri porušitvi ene). Po treh urah je v primeru porušitve ene zapornice pretok in s tem tudi gladina vode večja kot pri porušitvi vseh petih, saj je nastala odprtina manjša, kar pomeni tudi počasnejše odtekanje vode dolvodno. Razlika v višinah znaša okoli 2 m. V obeh primerih porušitev se pretoka po 3 urah zmanjšata skoraj na osnovni pretok pred porušitvijo ($1200 \text{ m}^3/\text{s}$).



Slika 19: Hidrogram v profilu jezovne zgradbe NEK pri porušitvi (dvigu) ene in petih zapornic
($Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Pretoki zaradi porušitve se dolvodno od pregrade hitro znižujejo. Pri jezovni zgradbi NEK, ki je 5,6 km dolvodno, doseže pretok pri porušitvi ene zapornice maksimalno vrednost $1680 \text{ m}^3/\text{s}$. Ta pretok nastopi po 37 minutah od porušitve HE Krško. V primeru porušitve petih zapornic maksimalni pretok pri jezovni zgradbi NEK znaša $2024 \text{ m}^3/\text{s}$ in nastopi 23 minut po porušitvi. Pretoki zaradi porušitve petih zapornic so višji in nastopijo v krajšem času od porušitve.

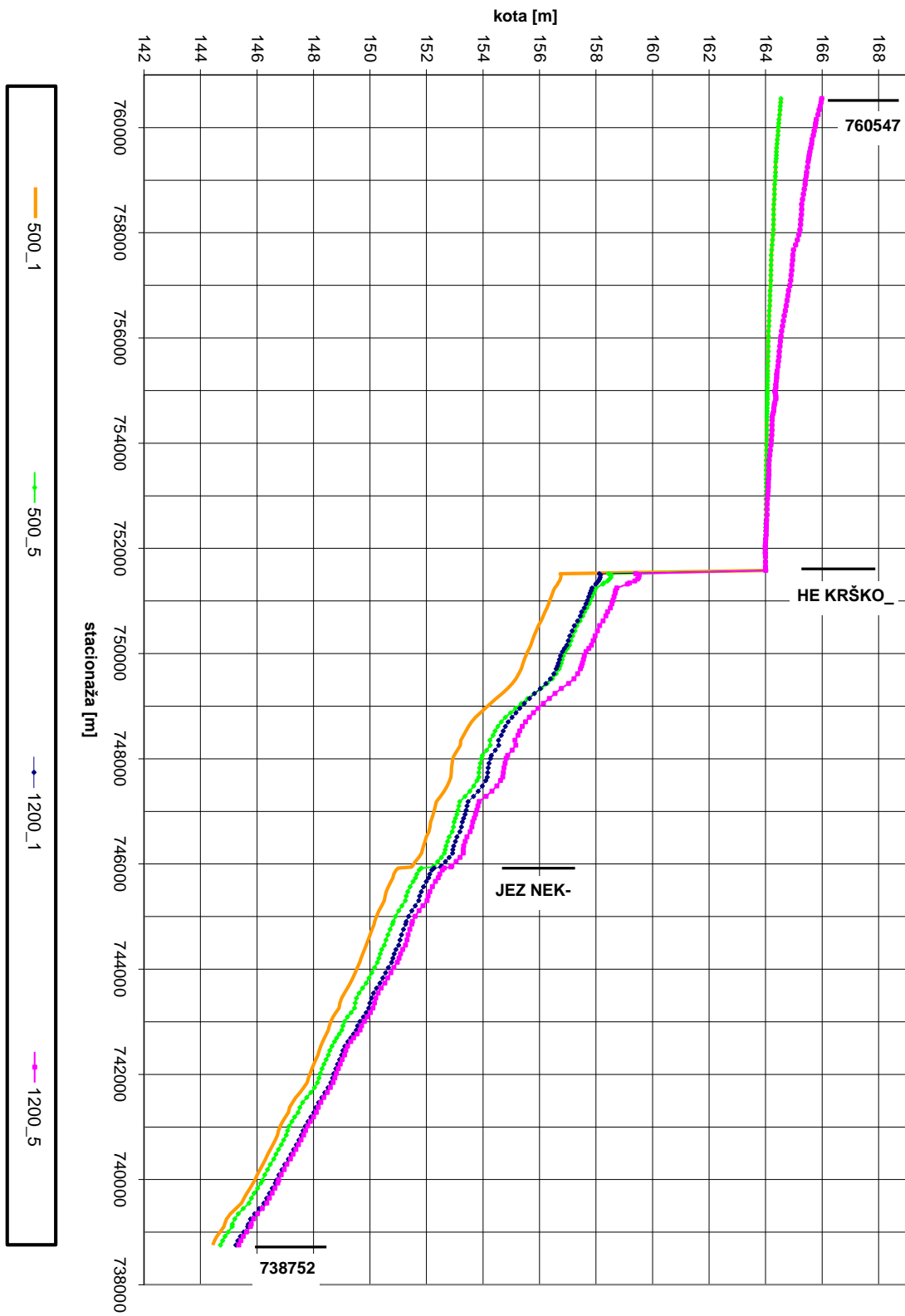
V primeru porušitve petih zapornic doseže hitrost vode tik dolvodno od pregrade vrednost $3,9 \text{ m/s}$. Dolvodno od pregrade se hitrost postopoma manjša in v povprečju znaša 3 m/s . V primeru porušitve ene zapornice je povprečna hitrost dolvodno od pregrade $2,7 \text{ m/s}$, maksimalna pa $3,5 \text{ m/s}$.

6. OCENA POSLEDIC PORUŠITVE HE KRŠKO

Rezultati vseh izračunanih primerov porušitvenih valov so poleg v poglavjih 5.3 in 5.4 skupaj prikazani tudi na prilogah 1 in 2. Na prilogi 1 so maksimalne gladine podane številoma v zbirni tabeli, na podlogi 2 pa grafično v podolžnem profilu v nekoliko večjem merilu. Na osnovi obeh prilog je možno tudi oceniti morebitne posledice porušitve HE Krško, ki so opisane v nadaljevanju.

6.1 Primerjava rezultatov, ugotovitve in ocena posledic porušitve HE Krško

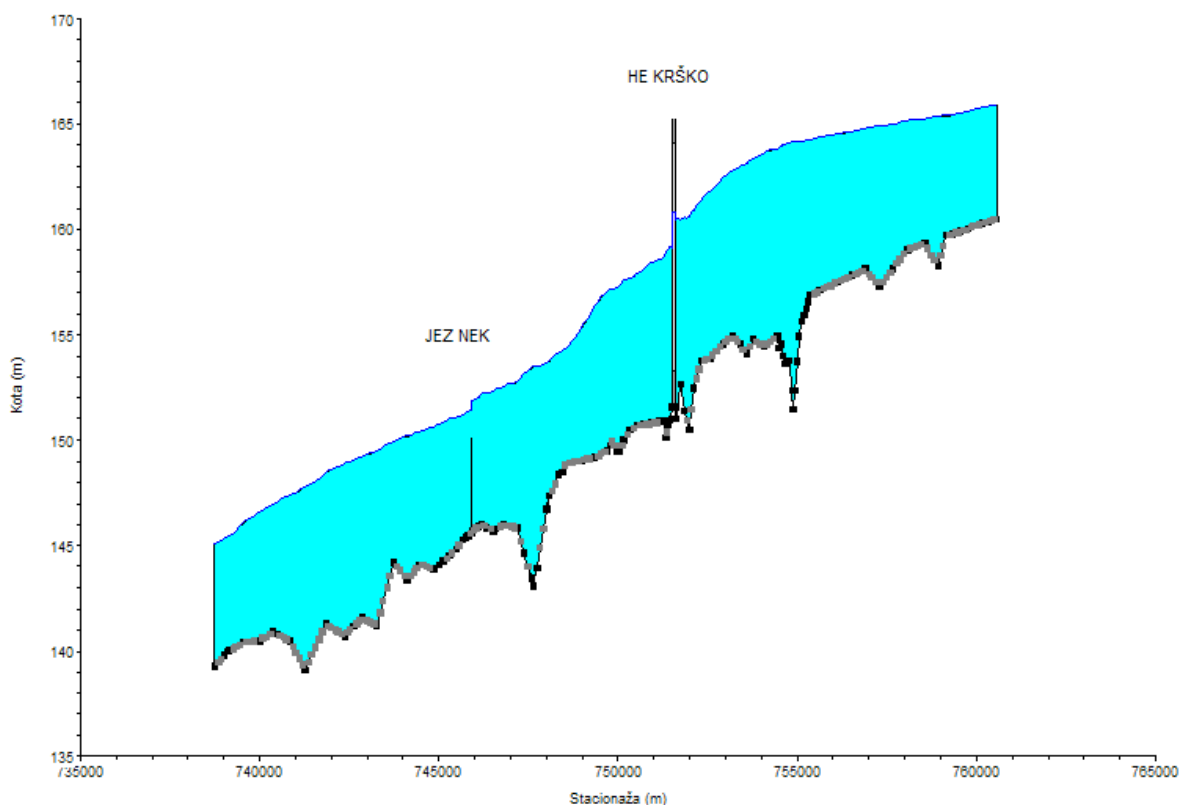
Zaradi prej omenjenih manjših razlik pri uporabi porušitvenega modula v programu HEC - RAS v primerjavi s trenutnim dvigom zapornic, ki daje točnejše rezultate so za oceno posledic prikazani samo rezultati izračunov z dvigom zapornic. Primeri izračunov v bistvu predstavljajo trenutno porušitev, saj smo upoštevali kratek čas dviga zapornic v eni minuti. Zato tudi vse primere dviga zapornic v tem poglavju imenujemo porušitev.



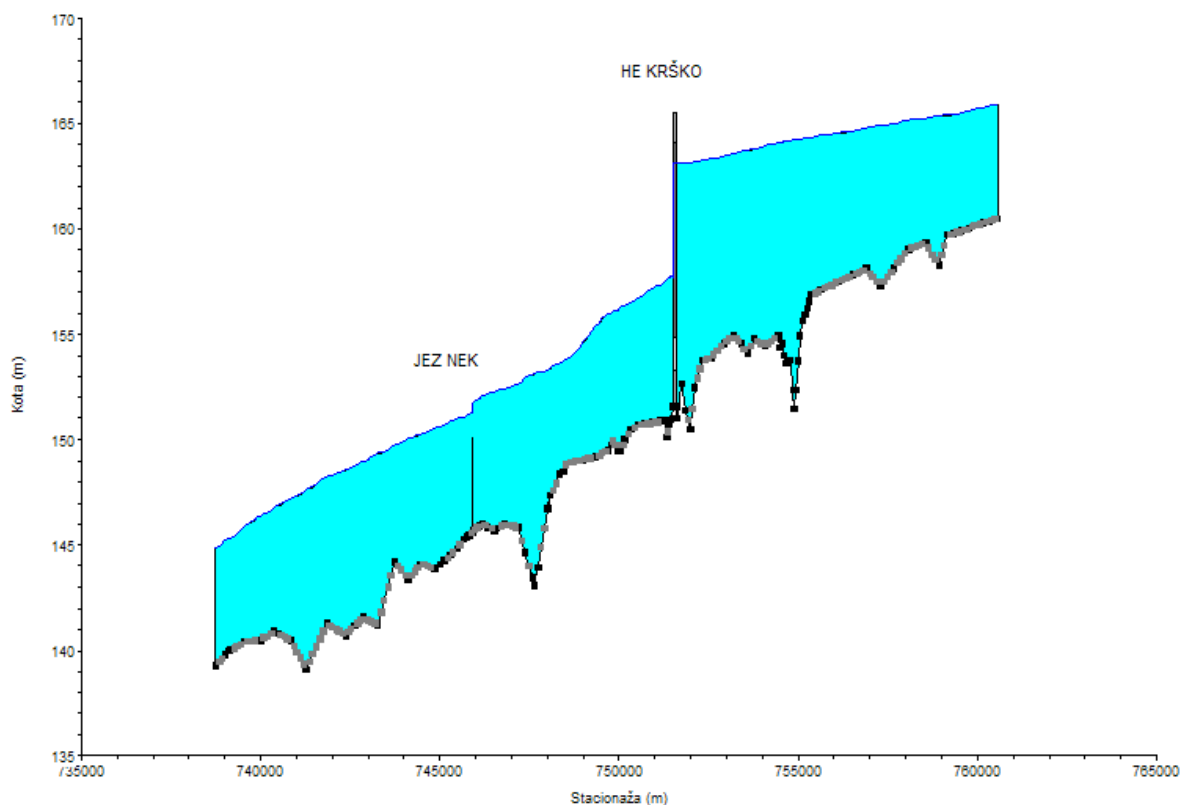
Slika 20: Potek maksimalnih gladin pri $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$

Gladine vode gorvodno od HE Krško (od začetnega profila (760547) do profila HE Krško (751576)) so višje pri začetnem pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, tako da je tudi območje zajeze v akumulaciji večje. Zaradi tega je tudi začetna odprtost zapornic pri tem pretoku večja, da zagotovimo nominalno višino zajeze pred porušitvijo (164 m). Pri pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ so vse zapornice odprte za 1,582 m nad pragom, pri pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ pa 0,658 m. V začetnem profilu (760547) se gladini razlikujeta za približno 1,5 m, v pregradnem profilu (751576) pa se izenačita na 164 m.

V času porušitve ima nastali porušitveni val v primeru porušitve petih zapornic tako pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ kot tudi pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ skoraj navpično čelo. Čelo je manj izrazito v primeru porušitve ene zapornice, kar je razvidno tudi iz spodnjih slik 21 in 22, ki prikazujeta podolžna profila gladin 5 minute po porušitvi.

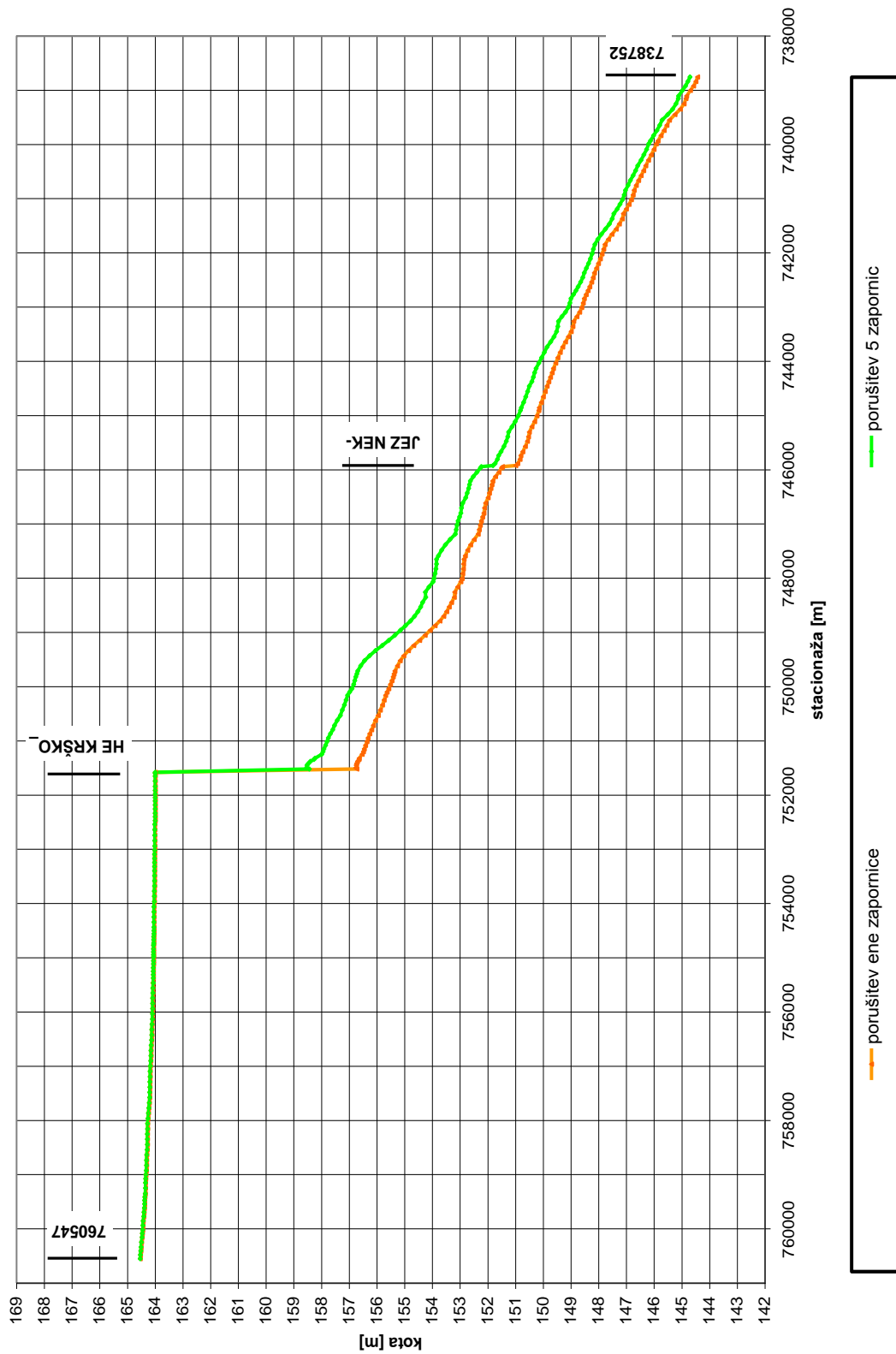


Slika 21: Podolžni profil gladin 5 minut po porušitvi 5 zapornic pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 22: Podolžni profil gladin 5 minut po porušitvi ene zapornice pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$

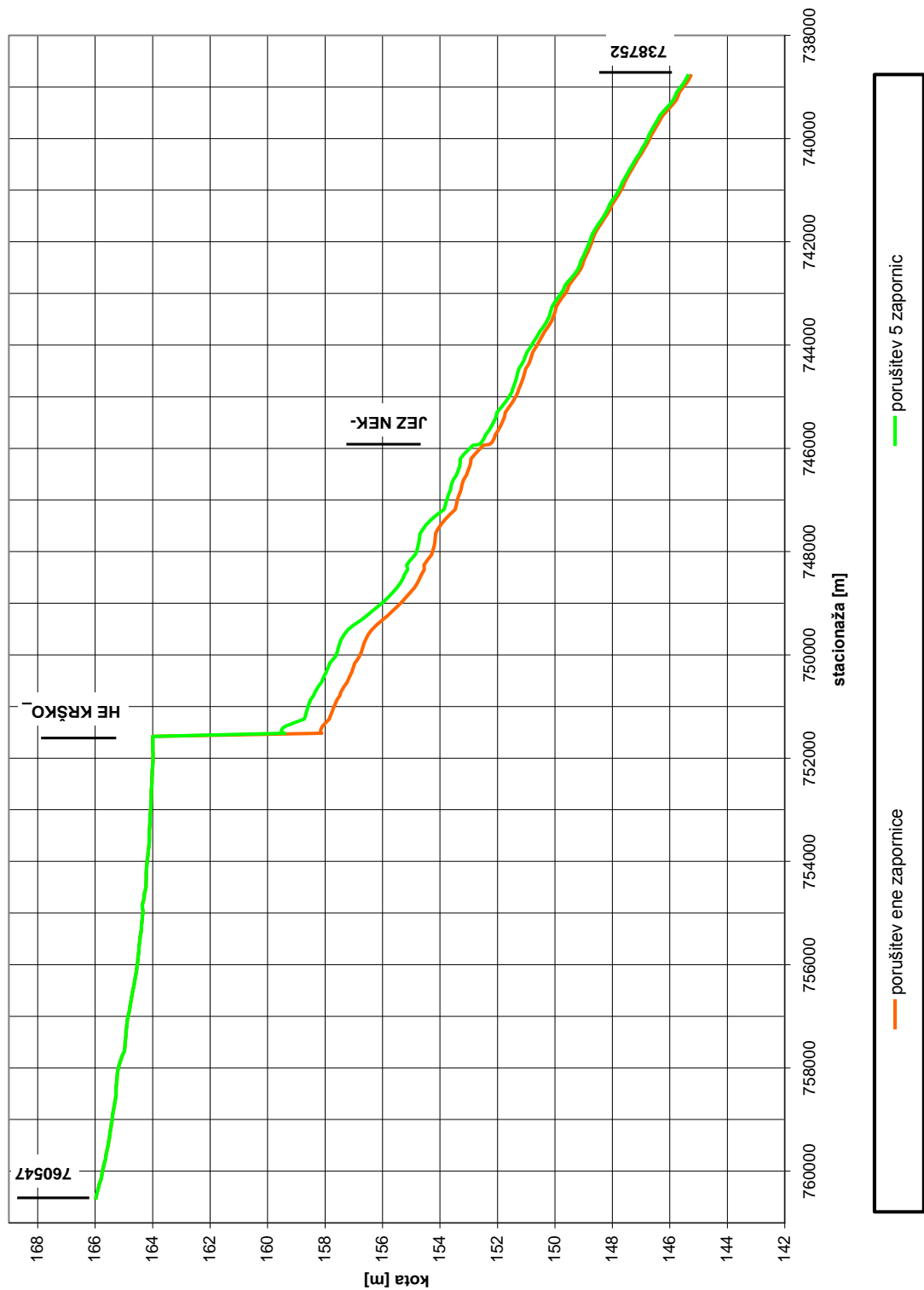
S prihodom pozitivnega vala v profil tik dolvodno od HE Krško se gladina takoj zviša. Negativni val v rezervoarju pa povzroči znižanje gladine. Najvišje gladine se pojavijo v primeru porušitve petih zapornic pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$. V primeru porušitve petih zapornic pri $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ in porušitve ene zapornice pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ je potek maksimalnih gladin do jezua NEK skoraj identičen, naprej pa so slednje višje in se začnejo približevati gladinam pri porušitvi petih zapornic pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$. Najnižje gladine povzročata primer porušitve ene zapornice pri pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Te gladine so v povprečju 1,5 m nižje kot v primeru najbolj neugodnega scenarija (porušitev 5 zapornic pri $1200 \text{ m}^3/\text{s}$).



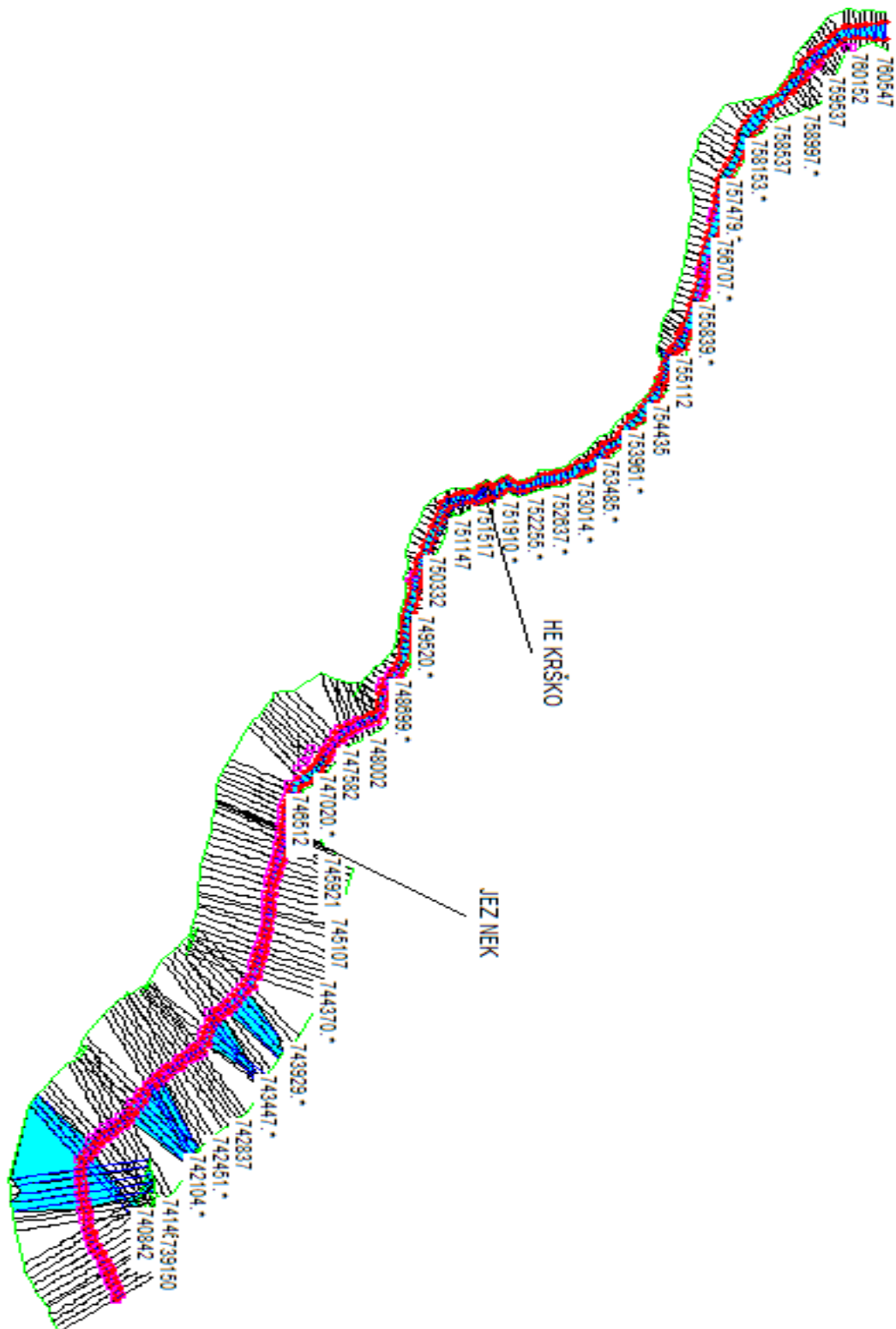
Slika

23: Potek maksimalnih gladin pri začetnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

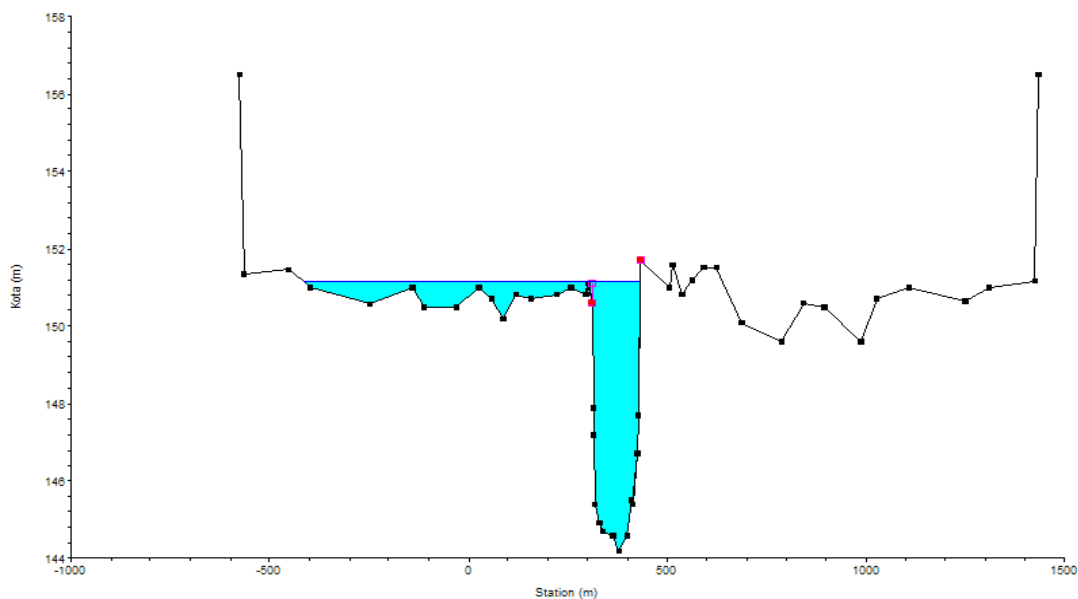
V primeru porušitve ene in petih zapornic pri pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ne pride do večjega razlivanja vode iz glavne struge. Voda poplavlja gorvodno od HE Krško zaradi nastale zajeze, vendar področje ni ogroženo. Nastali val pri porušitvi petih zapornic začne poplavljati levo območje približno 400 m dolvodno od pregrade in poplavlja dober kilometer dolvodno do profila 750096. To območje ni ogroženo, saj tu ni nobenih pomembnejših objektov. Pri porušitvi ene zapornice voda ne poplavlja. Območje NE Krško v nobenem primeru porušitev ni ogroženo, saj je elektrarna postavljena na dvignjenem platoju.



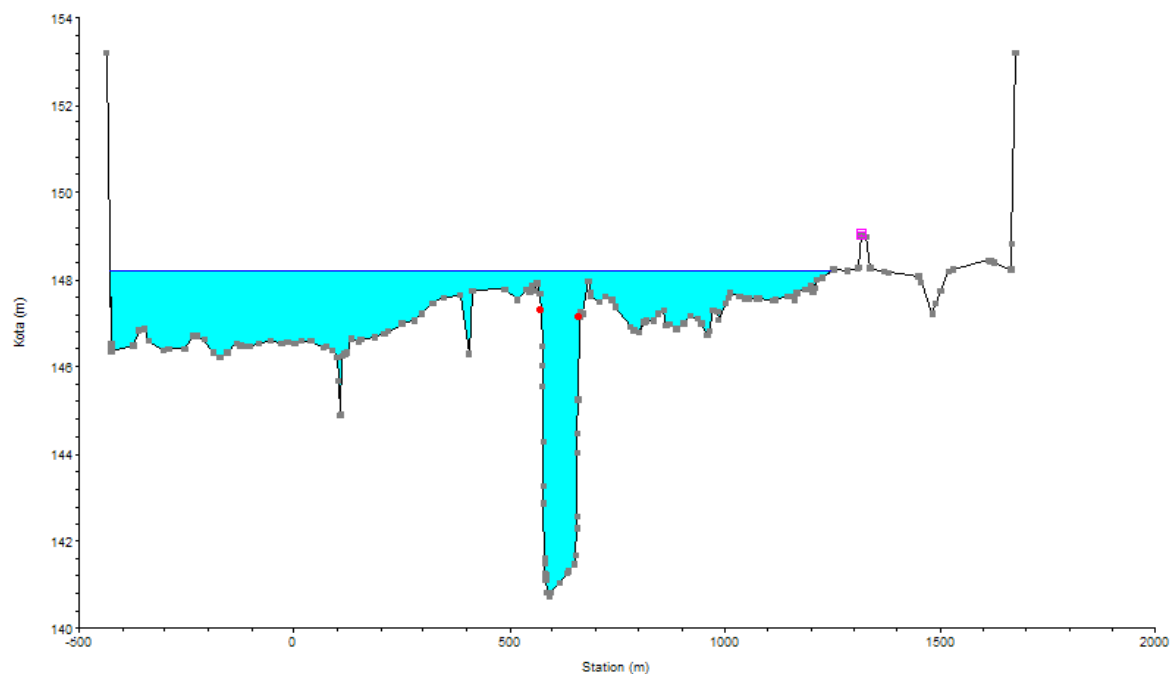
Slika 24: Potek maksimalnih gladin pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 25: Prikaz poplavljenih območij pri porušitvi petih zapornic in $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$



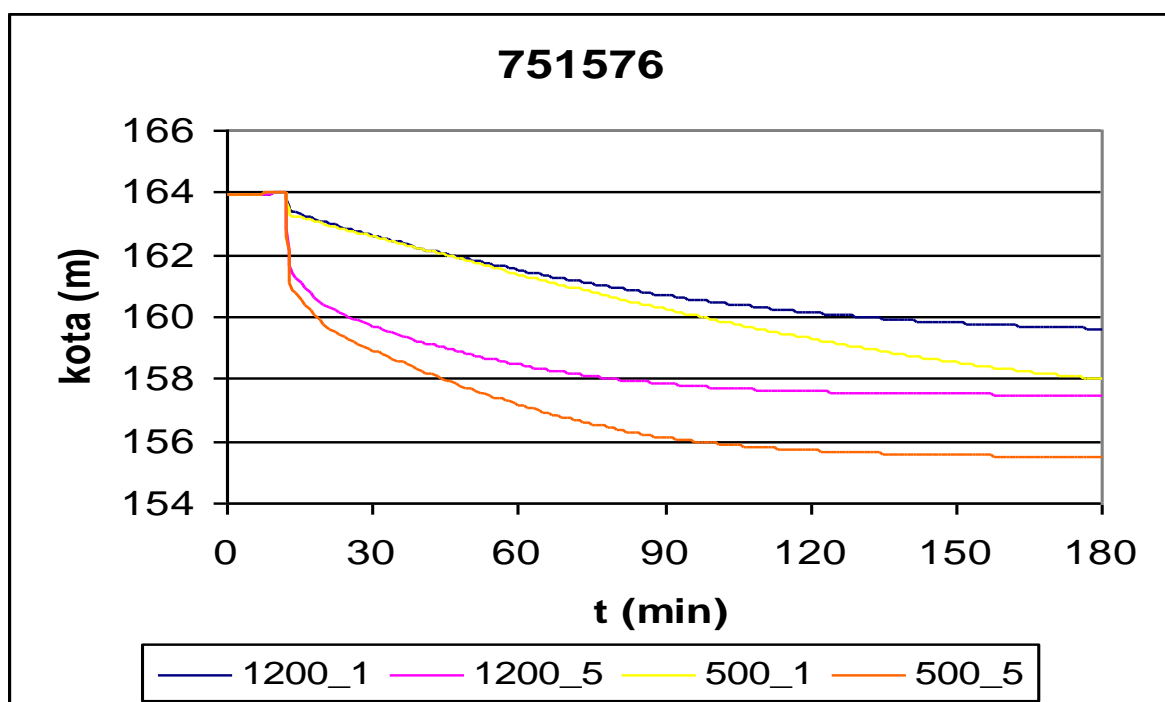
Slika 26: Maksimalna gladina v prečnem profilu 743732 (Vrbina) pri porušitvi petih zapornic,
 $Q= 1200 \text{ m}^3/\text{s}$



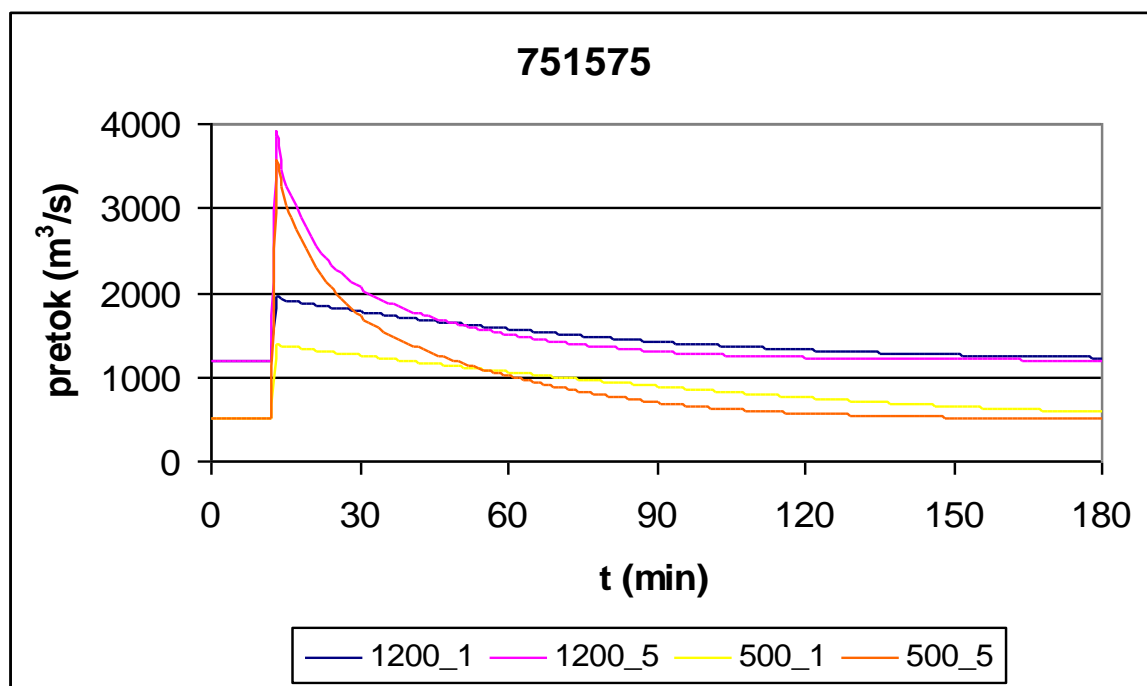
Slika 27 :Maksimalna gladina v prečnem profilu 740751 (Jevščina) pri porušitvi petih
zapornic, $Q= 1200 \text{ m}^3/\text{s}$

Podobno velja pri porušitvah pri začetnem pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$. Voda poplavlja območje gorvodno od pregrade Krško zaradi nastale zajezebe, vendar območje ni ogroženo. Tudi v tem primeru območje NE Krško v nobenem primeru porušitev ni ogroženo.

Najbolj neugoden je scenarij porušitve petih zapornic. Val pri porušitvi petih zapornic začne poplavljeni levo območje približno 400 m dolvodno od pregrade in poplavlja dober kilometer dolvodno do profila 750096. Območje sicer ni ogroženo, saj tu ni pomembnejših objektov. Voda močno poplavlja v zadnjem delu odseka. Voda začne poplavljeni na območju Vrbine (743732) in doseže koto 151,17 m. Sprva poplavlja le levo območje, kasneje pri Jevščini (740751) pa tudi desno in sicer do kote 148,5 m. Poplavno območje sega približno 1000 m levo in 500 m desno od osnovne struge Save. Na območju ni pomembnejših objektov, z izjemo cest, tako da ni ogroženo. Tudi pri tem najbolj neugodnem scenariju porušitve območje NE Krško v nobenem primeru ni ogroženo.



Slika 28: Nivogram v profilu HE Krško pri različnih scenarijih porušitev

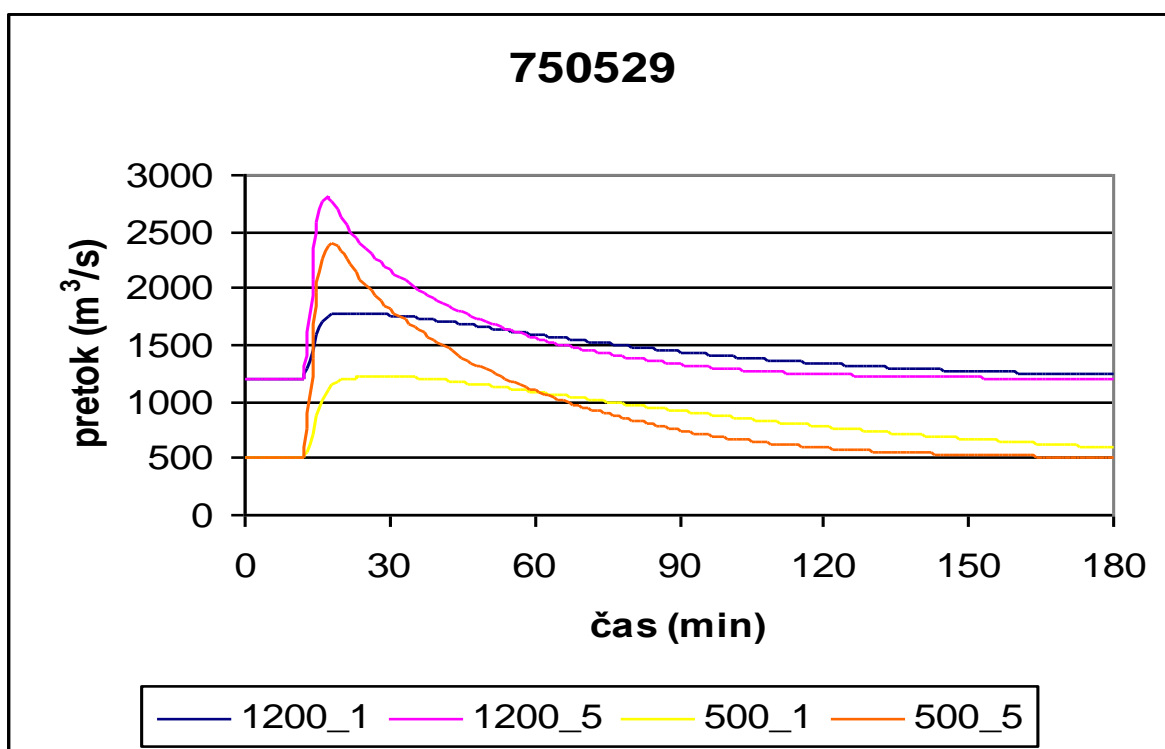


Slika 29: Hidrogram v profilu HE Krško pri različnih scenarijih porušitev

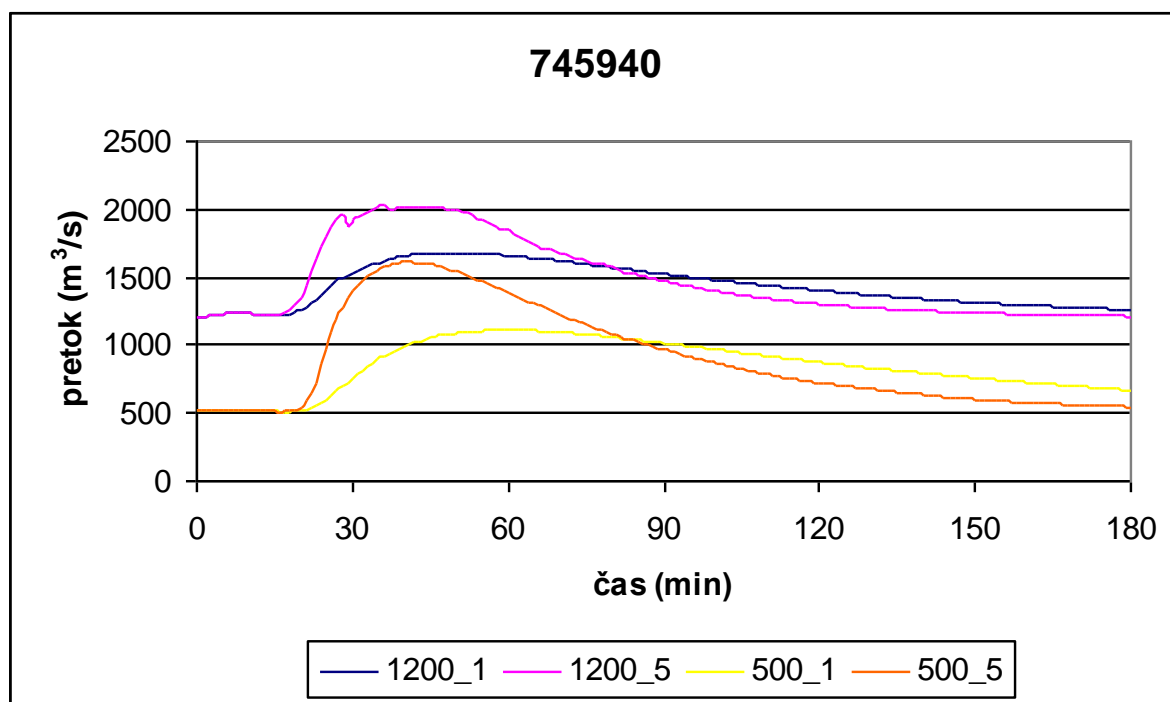
Preglednica 10: Primerjava rezultatov porušitev v profilu HE Krško

primer	500_1	500_5	1200_1	1200_5
max pretok (m ³ /s)	1391,63	3557,18	1948,92	3850,35
pretok po 3 urah (m ³ /s)	584,79	507,36	1231,87	1202,95
max gladina (m)	164 (163,35)	164 (161,13)	164 (163,45)	164 (161,66)
gladina po 3 urah (m)	157,99	155,50	159,63	157,50

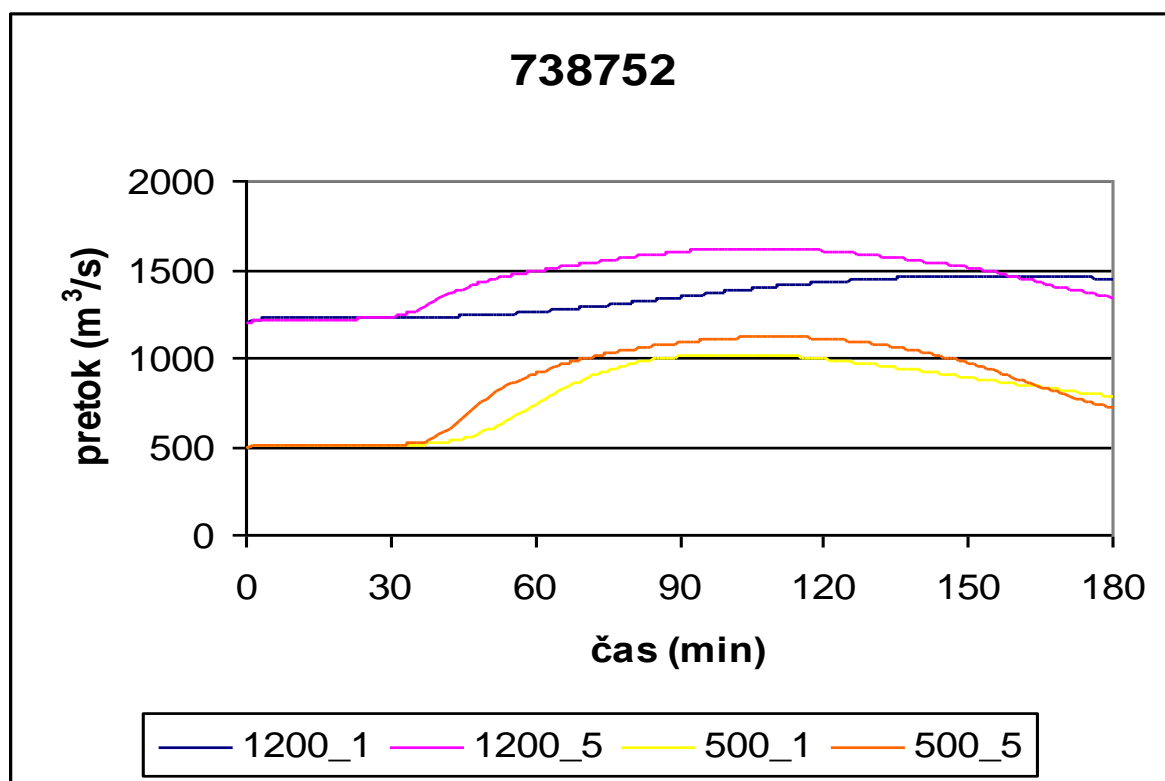
Največji pretoki so doseženi pri porušitvi vseh petih zapornic. Pri tej porušitvi je nastala odprtina mnogo širša (5 x 15m) kot pri porušitvi ene same (15 m). Zaradi tega se naenkrat sprosti mnogo več vode dolvodno, ki tudi hitreje odteče. Po treh urah so gladine vode v pregradnem profilu najvišje pri porušitvi ene zapornice pri $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$, najnižje pa pri porušitvi vseh petih pri $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 30: Hidrogrami v profilu 750529 pri različnih primerih porušitev



Slika 31: Hidrogrami v profilu jezov NEK pri različnih primerih porušitev



Slika 32: Hidrogrami v profilu 738752 pri različnih primerih porušitev

Preglednica 11: Maksimalni pretoki pri različnih primerih porušitve HE Krško

profil	Q500_1(m ³ /s)	Q500_5(m ³ /s)	Q1200_1(m ³ /s)	Q1200_5(m ³ /s)
751576	1391,63	3557,18	1948,92	3850,35
750529	1220,1	2394,19	1780,73	2804,43
745940	1111,12	1610,59	1680,35	2054,65
738752	1022,11	1119,82	1464,54	1621,5

Pretoki zaradi porušitve se dolvodno od pregrade hitro znižujejo. Največji pretoki se pojavijo v primeru porušitve petih zapornic. Hitrosti vala pri porušitvi petih zapornic so višje in tudi val potuje hitreje kot v primeru porušitve ene zapornice. Največje pretoke in hitrosti (povprečno 3 m/s) povzročata primer porušitve petih zapornic pri začetnem pretoku $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$.

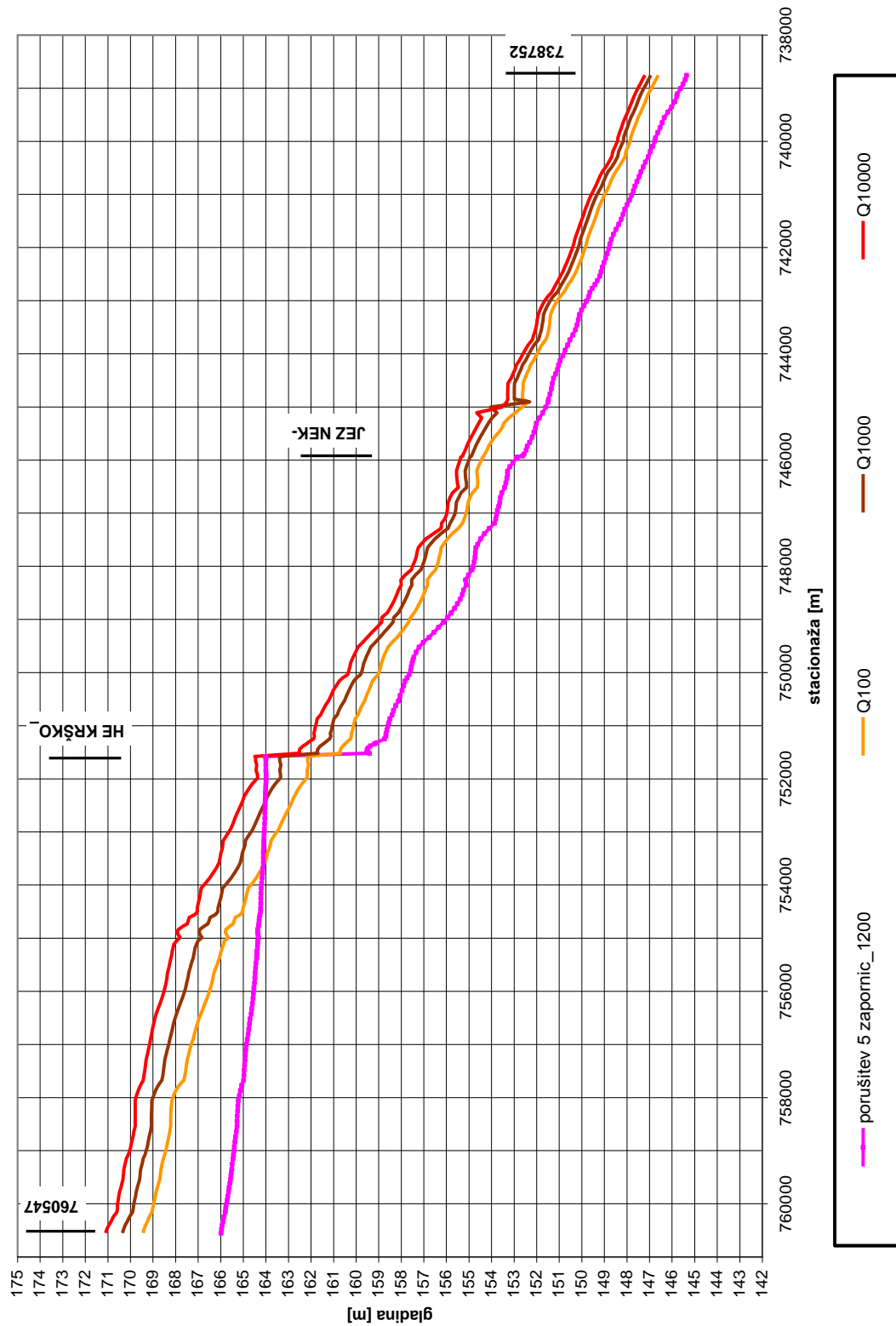
6.2 Primerjava z visokimi vodami

Maksimalne gladine pri porušitvenih valovih smo primerjali z gladinami visokih voda vsled naravnih poplavnih valov na reki Savi. Karakteristični pretoki določene povratne dobe v profilu HE Krško so bili povzeti po „Hidrološki študiji Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice" (IZV, 2002) in znašajo:

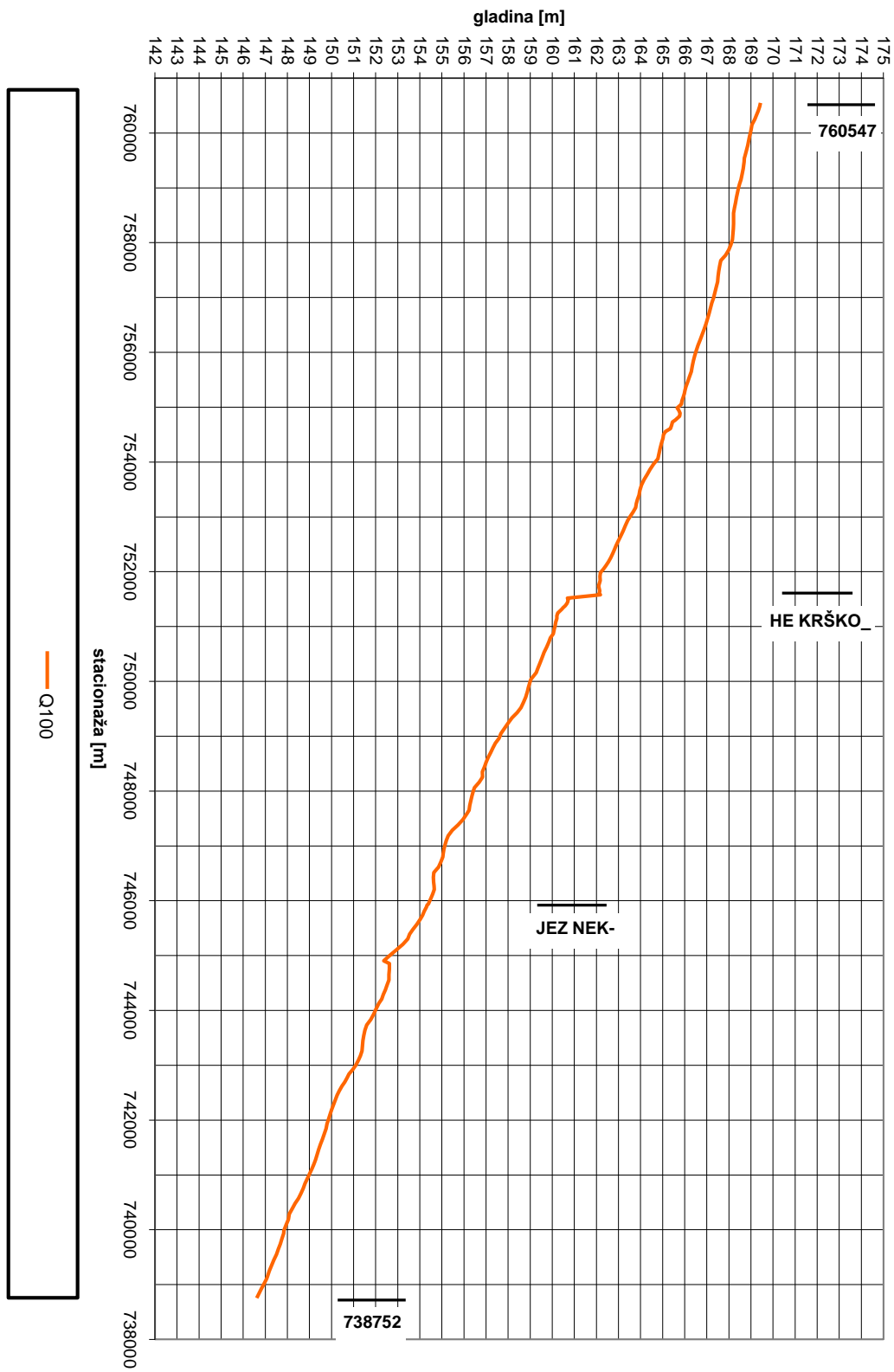
- $Q_{100} = 3290 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{1000} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{10000} = 4700 \text{ m}^3/\text{s}$

Gladine pri teh pretokih smo izračunali s simulacijo stalnega toka. Zapornice na pregradi HE Krško in jezcu NEK so v teh primerih že povsem odprte.

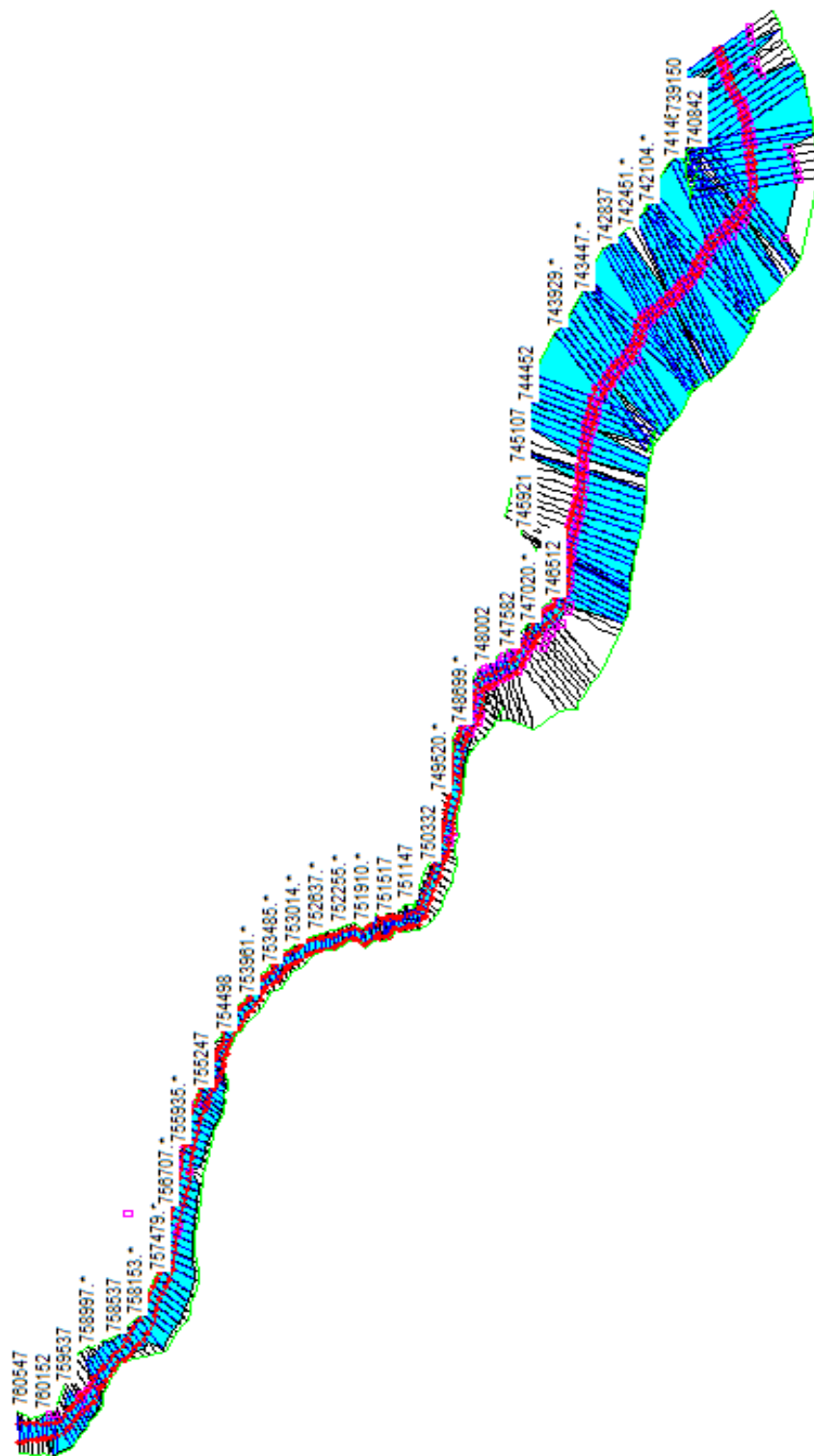
Rezultate smo primerjal samo z porušitvijo petih zapornic pri začetnem pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, ker je to najbolj neugoden primer porušitve.



Slika 33: Potek maksimalnih gladin visokih vod in porušitve petih zapornic pri začetnem pretoku $Q=1200 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 34: Potek maksimalnih gladin pri Q₁₀₀



Slika 35: Prikaz poplavljenih območij pri Q_{100}

Že visoke vode s stoletno povratno dobo povzročajo mnogo višje gladine vode kot najbolj neugodna porušitev (1200_5). Gladine pri izračunu porušitve so gorvodno od pregrade Krško sicer v nekaj profilih višje, vendar je to posledica energetske zajeze pri normalni koti 164 m. Dolvodno od pregrade Krško so gladine pri Q_{100} v povprečju 1,4 m višje kot pri porušitvi. 100- letna voda poplavlja skoraj na celotnem odseku. Tudi v primeru Q_{100} NE Krško ni ogrožena, saj voda ne doseže višine nasipov.

Pretok pri porušitvi petih zapornic (1200_5) sicer doseže vrednost $3850 \text{ m}^3/\text{s}$, kar znaša več kot je Q_{100} , vendar se pretoki dolvodno od pregrade Krško hitro znižujejo. Ta pretok se že minuto po porušitvi v profilu 751340 (236 m dolvodno od HE Krško) zmanjša na vrednost Q_{100} , v zadnjem profilu odseka (738752) pa znaša le še $1622 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kote gladin visokih vod pri Q_{100} in Q_{10000} segajo še višje. Glede na to, da so gladine pri začetnem pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ in porušitvi vseh petih zapornic dolvodno od HE Krško nižje kot gladine pri Q_{100} , primerjave porušitvenih valov z gladinami pri Q_{1000} in Q_{10000} nismo posebej obravnavali.

7. ZAKLJUČEK

Pregrade so pomemben dejavnik v razvoju človeške civilizacije. Kljub nespornim koristim pa lahko pregrade ob morebitni porušitvi povzročijo veliko katastrofo. V diplomski nalogi so obravnavani hidravlični računi in ocena možnih posledic v primeru porušitve pregrade HE Krško.

Hidroelektrarna Krško bo predstavljala enega izmed členov v verigi hidroelektrarn na Savi, ki je zasnovana kot niz pretočnih elektrarn od Medvod do državne meje z Republiko Hrvaško. HE Krško bo hidroelektrarna pretočno-akumulacijskega tipa z nameščenimi Kaplanovimi turbinami s skupno pretočno zmogljivostjo $500 \text{ m}^3/\text{s}$, s petimi pretočnimi polji s prelivno zmogljivostjo približno $3.500 \text{ m}^3/\text{s}$ ter s povprečno letno proizvodnjo 149 GWh električne energije.

V primeru betonskih pregrad takšnega tipa predstavlja hidromehanska oprema najbolj ranljiv del. Porušitve smo simulirali pri začetnem obratovalnem pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, kjer so prelivna polja v največji meri še zaprta in pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, kjer so zapornice že nekoliko dvignjene in obstaja največja možnost, da bi lahko zdrsnile nazaj in ostale zablokirane. Koto akumulacije $Z_{\text{nom}} = 164 \text{ m}$ smo uporabili zato, ker je to najvišja dopustna kota akumulacije in je v tem primeru volumen akumulacije največji. Pri obeh pretokih smo predpostavili porušitev enega (srednjega) segmenta in kot najbolj neugoden primer še porušitev vseh petih naenkrat. Porušitve smo simulirali z računalniškim programom HEC – RAS, ki temelji na enodimenzijskem matematičnem modelu nestalnega toka v odprtih koritih s poplavnimi področji.

Ugotovili smo, da je program bolj primeren za izračune nasutih pregrad, kjer je čas rušenja daljši. Izračun s posebnim modulom porušitve, kjer podajamo obliko in čas nastale odprtine, pri trenutni porušitvi ne daje najbolj točnih rezultatov. Ker je bila tudi pri naših primerih porušitev praktično trenutna, smo večjo natančnost rezultatov dosegli z izračunom dviga zapornic v eni minuti, kar lahko smatramo kot praktično ekvivalenten primer trenutnemu rušenju.

Porušitev zapornic na HE Krško ne bi ogrozila naselij dolvodno. Gladine vode so na celotnem obravnavanem odseku dolvodno od HE Krško tudi v najbolj neugodnem obravnavanem primeru (zlom vseh petih zapornic na HE Krško pri pretoku $1200 \text{ m}^3/\text{s}$) nižje od gladine vode pri stoletnem pretoku $Q_{100}=3290 \text{ m}^3/\text{s}$. Čeprav je primerjava koristna, se moramo zavedati, da poplavni valovi zaradi naravnih visokih vod predstavljajo poseben problem in se razlikujejo od valov zaradi možne porušitve pregrad. Naravne visoke vode nastopajo postopno, možno jih je vsaj do neke mere napovedati vnaprej. Porušitveni valovi zaradi porušitve HE Krško trajajo zelo kratko obdobje in se njihova konica zaradi manjših volumnov dolvodno hitro zmanjšuje. Pretok v najbolj neugodnem obravnavanem primeru sicer doseže vrednost $3850 \text{ m}^3/\text{s}$, kar znaša več kot Q_{100} , vendar se dolvodno hitro znižuje in v zadnjem profilu odseka (13 km dolvodno od pregrade HE Krško) znaša le še $1622 \text{ m}^3/\text{s}$. Zaradi povečanih hitrosti toka pri potovanju porušitvenega vala bi mestoma lahko prišlo do povečane erozije struge. Katerikoli od analiziranih dogodkov porušitev HE Krško ne bi ogrozil varnosti objektov NE Krško, saj je varnostna višina zgrajenega nasipa dovolj velika in višina platoja, na katerem je zgrajena elektrarna, dovolj visoko nad terenom.

VIRI

Amein, M. in Fang, C. S. 1970. *Implicit Flood Routing in Natural Channels*. Journal of the Hydraulic Division, ASCE Vol. 96, NO. HY12, Proc. Paper 7773: str. 2481- 2500.

Biswas, A.K. in Chatterjee. 1971. *Dam Disasters and assessment*. Eng. J. (Canada) 54(3): 3-8.

Chen, Y.H. 1973. *Mathematical Modeling of Water and Sediment Routing in Natural Channels*. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, CO.

Četina, M. 1995. *Hidravlični izračuni valov vsled porušitev pregrad*. V: A. Krupenko in B. Zadnik (ur.) 2. Posvetovanje SLOCOLD, Zbornik prispevkov, Ljubljana.

Fread, D.L. 1974. *Numerical Properties of the Implicit Four Point Finite Difference Equations of Unsteady Flow*. NO Tehnical Memorandum NWS Hydro-18, U.S. Department of Commerce, NOAA, NWS, Silver Spring, MD, 123str.

Fread, D.L. 1976. *Theoretical Development of an Implicit Dynamic Routing Model*. Hydrologic Research Laboratory, Office of Hydrology, U.S. Department of Commerce, NOAA, NWS, SilverSpring, MD., presented at Dynamic Routing Seminar, Lower Mississippi river Forecast Center, Slidell, LA., 13-17 Dec 1976.

KMTe. *Osnutek scenarijev spodnja Sava rev. 4 z utemeljitvami IBE. 2007*. Ljubljana, UL FGG – KMTe

IZV 2002. *Hidrološke študije Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice in HE Mokrice*. Ljubljana, Inštitut za vode, naročnik IBE d.d, št.50/BA-02

Jansen, R.B. 1980. *Dams and Public Safety*. A Water Resources Technical Publication, Denver, CO (Water and Power Resources Service, U.S. Department of the Interior).

Liggett, J.A. in Cunge, J.A. 1975. *Numerical Methods of Solution of the unsteady Flow Equations*. Edited by K. Mahmood and V. Yevjevich, Unsteady Flow in Open channels, Vol. 1, Chapter 4, Ft. Collins, CO, Water Resources Publication.

Lou, W.C. 1981. *Mathematical Modeling of Earth Dam Breaches*. Colorado State University, Fort Collins, CO, Unpublished Ph.D. Dissertation.

Posavski obzornik 2006. *Hidroelektrarna Krško, za naslednjih 100 let...in še dlje!*

Rajar, R. 1980. *Hidravlika nestalnega toka*. Ljubljana, UL FGG

Rajar, R. 1994. *Poročilo o delu in tolmačenje posameznih točk Pravilnika za izdelavo dokumentacije o hidravličnih posledicah porušitev pregrad*. Ljubljana, UL FGG – KMTe.

Rajar, R. in Zakrajšek, M. 1993. *Modeliranje poplavnega vala pri prelivanju plazu na Lučnici*. Ujma, št.7, str. 77-80.

Singh, V.P. 1996. *Dam breach modeling technology*. Baton Rouge, ZDA, Kluwer Academic Publishers.

Steinman, F. 2007. *Recenzija elaboratov pretočnosti pri visokih vodah Save v povezavi s HE Krško*. Verzija za razpravo pred oddajo končnega poročila. Ljubljana, UL FGG – KMTe.

WCD 2000. *Dams and development*. Earthscan Publications Ltd.
<http://www.dams.org>. (5. 3. 2008)

Nuklearna elektrarna Krško

www.icjt.org/tech/software/Opis%20NEK.pps, (5. 8. 2008).

Elektrarne.

www.lu-rogaska.si/docs/E-gradiva/EL-ENERG_SISTEMI-ELEKTRARNE.pdf (8. 7. 2008)

Zakrajšek, M. in ostali 2008. *Medsebojni vplivi infrastrukturnih energetskih ureditev na spodnji Savi v času izrednih hidroloških dogodkov – Model Save – Porušitveni valovi*. Ljubljana, UL FGG – KMTe, naročnik Ministrstvo za gospodarstvo.

Mravlje, M. 2008. Račun vala vsled morebitne porušitve jezovne zgradbe načrtovane hidroelektrarne Krško na Savi.
Dipl.nal. – UNI. Ljubljana, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

PRILOGE

Priloga 1: Kote maksimalnih gladin pri porušitvi (dvigu zapornic) HE Krško pri začetnem pretoku $Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$

Stacionaža	KOTA MAKSIMALNIH GLADIN (m)				
	500_1	500_5	500_stebri	500_dvig1	500_dvig5
760547	164.54	164.54	164.54	164.54	164.54
760475	164.53	164.53	164.53	164.53	164.53
760403	164.52	164.52	164.52	164.52	164.52
760332	164.51	164.51	164.51	164.5	164.5
760242	164.49	164.49	164.49	164.49	164.49
760152	164.47	164.47	164.47	164.47	164.47
760083	164.46	164.46	164.46	164.46	164.46
760015	164.45	164.45	164.45	164.45	164.45
759932	164.44	164.44	164.44	164.44	164.44
759849	164.43	164.43	164.43	164.42	164.42
759767	164.41	164.41	164.41	164.41	164.41
759690	164.4	164.4	164.4	164.4	164.4
759613	164.39	164.39	164.39	164.39	164.39
759537	164.38	164.38	164.38	164.38	164.38
759473	164.38	164.38	164.38	164.38	164.38
759410	164.37	164.37	164.37	164.37	164.37
759347	164.36	164.36	164.36	164.36	164.36
759247	164.35	164.35	164.35	164.35	164.35
759147	164.35	164.35	164.35	164.34	164.34
759072	164.34	164.34	164.34	164.34	164.34
758997	164.33	164.33	164.33	164.33	164.33
758922	164.32	164.32	164.32	164.32	164.32
758825	164.31	164.31	164.31	164.31	164.31
758729	164.31	164.31	164.31	164.3	164.3
758633	164.3	164.3	164.3	164.29	164.29
758537	164.29	164.29	164.29	164.29	164.29
758441	164.28	164.28	164.28	164.28	164.28
758345	164.28	164.28	164.28	164.28	164.28
758249	164.28	164.28	164.28	164.27	164.27
758153	164.27	164.27	164.27	164.27	164.27
758057	164.27	164.27	164.27	164.26	164.26
757960	164.26	164.26	164.26	164.25	164.25
757864	164.24	164.24	164.24	164.24	164.24
757768	164.23	164.23	164.23	164.23	164.23
757672	164.21	164.21	164.21	164.2	164.2
757575	164.2	164.2	164.2	164.2	164.2
757479	164.2	164.2	164.2	164.19	164.19
757383	164.19	164.19	164.19	164.19	164.19
757287	164.19	164.19	164.19	164.19	164.19
757189	164.18	164.18	164.18	164.18	164.18
757092	164.18	164.18	164.18	164.18	164.18
756994	164.17	164.17	164.17	164.17	164.17

756897	164.16	164.16	164.16	164.16	164.16
756802	164.15	164.15	164.15	164.15	164.15
756707	164.15	164.15	164.15	164.14	164.14
756612	164.14	164.14	164.14	164.14	164.14
756517	164.13	164.13	164.13	164.13	164.13
756419	164.12	164.12	164.12	164.12	164.12
756322	164.12	164.12	164.12	164.11	164.11
756224	164.11	164.11	164.11	164.11	164.11
756127	164.1	164.1	164.1	164.1	164.1
756031	164.1	164.1	164.1	164.1	164.1
755935	164.09	164.09	164.09	164.09	164.09
755839	164.09	164.09	164.09	164.09	164.09
755743	164.09	164.09	164.09	164.08	164.08
755647	164.08	164.08	164.08	164.08	164.08
755555	164.08	164.08	164.08	164.08	164.08
755463	164.08	164.07	164.07	164.07	164.07
755372	164.07	164.07	164.07	164.07	164.07
755310	164.07	164.07	164.07	164.07	164.07
755247	164.07	164.07	164.07	164.07	164.07
755180	164.07	164.07	164.07	164.06	164.06
755112	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06
755053	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06
754982	164.06	164.06	164.06	164.05	164.05
754943	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06
754890	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06
754836	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06
754767	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06
754728	164.05	164.05	164.05	164.05	164.05
754668	164.05	164.05	164.05	164.05	164.05
754609	164.05	164.05	164.05	164.05	164.05
754553	164.04	164.04	164.04	164.04	164.04
754498	164.04	164.04	164.04	164.04	164.04
754435	164.04	164.04	164.04	164.04	164.04
754340	164.04	164.04	164.04	164.04	164.04
754246	164.04	164.04	164.04	164.04	164.04
754151	164.04	164.04	164.04	164.04	164.04
754057	164.04	164.04	164.04	164.03	164.03
753961	164.03	164.03	164.03	164.03	164.03
753865	164.03	164.03	164.03	164.03	164.03
753770	164.03	164.03	164.03	164.02	164.02
753674	164.02	164.02	164.02	164.02	164.02
753579	164.02	164.02	164.02	164.02	164.02
753485	164.02	164.02	164.02	164.02	164.02
753392	164.02	164.02	164.02	164.02	164.02
753317	164.02	164.02	164.02	164.02	164.02
753243	164.02	164.02	164.02	164.02	164.02
753169	164.02	164.02	164.02	164.02	164.02
753091	164.02	164.02	164.02	164.01	164.01
753014	164.01	164.01	164.01	164.01	164.01

752937	164.01	164.01	164.01	164.01	164.01
752837	164.01	164.01	164.01	164.01	164.01
752737	164.01	164.01	164.01	164.01	164.01
752637	164.01	164.01	164.01	164	164
752537	164.01	164.01	164.01	164	164
752468	164	164	164	164	164
752399	164	164	164	164	164
752330	164	164	164	164	164
752255	164	164	164	164	164
752180	164	164	164	164	164
752105	164	164	164	164	164
752043	164	164	164	164	164
751982	164	164	164	163.99	163.99
751910	164	164	164	164	164
751838	164	164	164	164	164
751739	164	164	164	164	164
751646	164	164	164	164	164
751596	164	164	164	164	164
751577	164	164	164	164	164
751517	156.72	158.39	158.44	156.64	156.64
751495	156.76	158.48	158.54	156.67	156.67
751447	156.75	158.45	158.52	156.66	156.66
751411	156.73	158.41	158.47	156.64	156.64
751375	156.7	158.35	158.4	156.61	156.61
751340	156.65	158.24	158.27	156.57	156.57
751320	156.64	158.2	158.23	156.55	156.55
751246	156.53	157.98	157.99	156.44	156.44
751196	156.49	157.93	157.94	156.41	156.41
751147	156.46	157.9	157.91	156.37	156.37
751079	156.41	157.84	157.85	156.33	156.33
751011	156.36	157.79	157.8	156.28	156.28
750944	156.32	157.73	157.75	156.24	156.24
750866	156.26	157.67	157.68	156.17	156.17
750789	156.19	157.58	157.59	156.11	156.11
750712	156.13	157.52	157.53	156.05	156.05
750620	156.05	157.42	157.43	155.97	155.97
750529	155.95	157.31	157.32	155.87	155.87
750430	155.88	157.23	157.25	155.8	155.8
750332	155.8	157.16	157.17	155.72	155.72
750244	155.74	157.1	157.11	155.66	155.66
750157	155.69	157.05	157.06	155.61	155.61
750096	155.63	156.97	156.98	155.55	155.55
750035	155.57	156.88	156.9	155.49	155.49
749955	155.51	156.82	156.84	155.43	155.43
749885	155.46	156.78	156.8	155.38	155.38
749815	155.41	156.74	156.76	155.34	155.34
749761	155.38	156.71	156.72	155.31	155.31
749707	155.35	156.67	156.69	155.28	155.28
749613	155.26	156.57	156.59	155.19	155.19

749520	155.16	156.44	156.45	155.08	155.08
749427	155.03	156.26	156.27	154.96	154.96
749334	154.86	156.03	156.05	154.79	154.79
749239	154.67	155.79	155.81	154.6	154.6
749145	154.46	155.56	155.57	154.4	154.4
749051	154.26	155.34	155.35	154.19	154.19
748957	154.08	155.13	155.15	154.01	154.01
748871	153.9	154.96	154.97	153.83	153.83
748785	153.73	154.78	154.79	153.66	153.66
748699	153.59	154.63	154.64	153.52	153.52
748613	153.48	154.5	154.52	153.4	153.4
748527	153.39	154.41	154.42	153.31	153.31
748442	153.31	154.34	154.35	153.24	153.24
748350	153.21	154.22	154.24	153.14	153.14
748254	153.19	154.24	154.25	153.12	153.12
748158	153.09	154.11	154.12	153.02	153.02
748062	152.97	153.96	153.97	152.89	152.89
748002	152.93	153.93	153.94	152.86	152.86
747913	152.9	153.89	153.9	152.83	152.83
747825	152.88	153.86	153.87	152.81	152.81
747737	152.87	153.84	153.85	152.79	152.79
747647	152.86	153.84	153.85	152.79	152.79
747582	152.81	153.77	153.78	152.74	152.74
747482	152.73	153.66	153.67	152.65	152.65
747382	152.62	153.52	153.53	152.55	152.55
747282	152.49	153.35	153.36	152.42	152.42
747182	152.35	153.16	153.17	152.29	152.29
747101	152.31	153.13	153.14	152.25	152.25
747020	152.27	153.1	153.11	152.21	152.21
746940	152.23	153.06	153.07	152.17	152.17
746868	152.19	153.01	153.02	152.12	152.12
746797	152.14	152.96	152.97	152.07	152.07
746703	152.12	152.94	152.95	152.06	152.06
746610	152.08	152.89	152.9	152.02	152.02
746512	151.99	152.79	152.8	151.93	151.93
746426	151.94	152.74	152.74	151.88	151.88
746340	151.89	152.69	152.69	151.83	151.83
746271	151.85	152.65	152.66	151.79	151.79
746202	151.82	152.63	152.63	151.75	151.75
746122	151.72	152.51	152.52	151.65	151.65
746042	151.6	152.38	152.39	151.54	151.54
745962	151.5	152.25	152.26	151.43	151.43
745941	151.47	152.22	152.23	151.41	151.41
745921	150.99	151.8	151.81	150.92	150.92
745882	150.92	151.73	151.74	150.85	150.85
745802	150.84	151.64	151.65	150.77	150.77
745732	150.81	151.6	151.61	150.74	150.74
745662	150.74	151.52	151.52	150.67	150.67
745567	150.65	151.41	151.42	150.58	150.58

745472	150.57	151.33	151.33	150.51	150.51
745387	150.53	151.27	151.28	150.46	150.46
745302	150.5	151.24	151.25	150.43	150.43
745204	150.41	151.12	151.13	150.34	150.34
745107	150.31	151	151.01	150.25	150.25
745002	150.23	150.89	150.9	150.16	150.16
744902	150.16	150.81	150.82	150.1	150.1
744852	150.14	150.78	150.79	150.08	150.08
744752	150.07	150.71	150.71	150.01	150.01
744652	150	150.63	150.63	149.94	149.94
744552	149.93	150.56	150.56	149.87	149.87
744452	149.86	150.49	150.5	149.8	149.8
744370	149.8	150.41	150.41	149.74	149.74
744289	149.74	150.35	150.36	149.68	149.68
744208	149.68	150.3	150.31	149.62	149.62
744127	149.63	150.25	150.26	149.57	149.57
744028	149.55	150.15	150.16	149.49	149.49
743929	149.47	150.06	150.06	149.41	149.41
743830	149.39	149.96	149.96	149.33	149.33
743732	149.3	149.86	149.86	149.25	149.25
743637	149.2	149.73	149.73	149.14	149.14
743542	149.09	149.61	149.61	149.03	149.03
743447	148.99	149.52	149.52	148.94	148.94
743352	148.93	149.47	149.47	148.87	148.87
743257	148.9	149.44	149.45	148.84	148.84
743173	148.79	149.33	149.33	148.73	148.73
743089	148.69	149.2	149.2	148.63	148.63
743005	148.61	149.1	149.1	148.56	148.56
742921	148.56	149.04	149.04	148.51	148.51
742837	148.52	148.99	149	148.47	148.47
742764	148.45	148.91	148.91	148.4	148.4
742692	148.38	148.82	148.82	148.33	148.33
742620	148.32	148.73	148.74	148.27	148.27
742535	148.25	148.64	148.65	148.2	148.2
742451	148.2	148.57	148.57	148.15	148.15
742367	148.15	148.52	148.52	148.1	148.1
742279	148.08	148.44	148.44	148.03	148.03
742192	148.01	148.37	148.37	147.96	147.96
742104	147.94	148.3	148.3	147.9	147.9
742017	147.88	148.24	148.24	147.83	147.83
741929	147.82	148.18	148.19	147.77	147.77
741842	147.77	148.14	148.14	147.72	147.72
741747	147.65	148.03	148.03	147.61	147.61
741652	147.52	147.9	147.9	147.47	147.47
741557	147.37	147.75	147.76	147.32	147.32
741462	147.25	147.61	147.61	147.19	147.19
741367	147.15	147.51	147.51	147.1	147.1
741272	147.11	147.45	147.45	147.06	147.06
741186	147	147.33	147.33	146.95	146.95

741100	146.9	147.23	147.23	146.86	146.86
741014	146.82	147.14	147.14	146.78	146.78
740928	146.76	147.08	147.08	146.72	146.72
740842	146.72	147.03	147.03	146.68	146.68
740751	146.64	146.94	146.94	146.6	146.6
740661	146.56	146.85	146.86	146.51	146.51
740570	146.47	146.76	146.76	146.43	146.43
740480	146.38	146.67	146.67	146.34	146.34
740387	146.3	146.59	146.59	146.26	146.26
740287	146.2	146.47	146.47	146.16	146.16
740187	146.1	146.37	146.37	146.06	146.06
740087	146	146.27	146.27	145.96	145.96
739987	145.92	146.19	146.19	145.88	145.88
739930	145.86	146.13	146.13	145.82	145.82
739834	145.75	146.02	146.02	145.71	145.71
739738	145.64	145.9	145.9	145.6	145.6
739642	145.54	145.8	145.8	145.5	145.5
739547	145.45	145.71	145.71	145.41	145.41
739447	145.25	145.51	145.51	145.21	145.21
739348	145.06	145.33	145.33	145.03	145.03
739249	144.92	145.2	145.21	144.88	144.88
739150	144.85	145.13	145.13	144.81	144.81
739102	144.83	145.12	145.12	144.79	144.79
739000	144.69	144.98	144.98	144.65	144.65
738917	144.58	144.87	144.87	144.54	144.54
738834	144.49	144.78	144.78	144.45	144.45
738752	144.43	144.71	144.71	144.39	144.39

Priloga 2: Kote maksimalnih gladin pri porušitvi (dvigu zapornic) HE Krško pri začetnem pretoku $Q= 1200 \text{ m}^3/\text{s}$

Stacionaža	KOTA MAKSIMALNIH GLADIN (m)				
	1200_1	1200_5	1200_stebri	1200_dvig1	1200_dvig5
760547	165.98	165.98	165.98	165.98	165.98
760475	165.96	165.96	165.96	165.96	165.96
760403	165.93	165.93	165.93	165.93	165.93
760332	165.89	165.89	165.89	165.89	165.89
760242	165.85	165.85	165.85	165.85	165.85
760152	165.79	165.79	165.79	165.79	165.79
760083	165.77	165.77	165.77	165.77	165.77
760015	165.75	165.75	165.75	165.75	165.74
759932	165.71	165.71	165.71	165.71	165.71
759849	165.68	165.68	165.68	165.68	165.68
759767	165.64	165.64	165.64	165.64	165.64
759690	165.62	165.62	165.62	165.62	165.62
759613	165.59	165.59	165.59	165.59	165.59
759537	165.56	165.56	165.56	165.56	165.56
759473	165.54	165.54	165.54	165.54	165.54
759410	165.52	165.52	165.52	165.52	165.52
759347	165.5	165.5	165.5	165.5	165.5
759247	165.48	165.48	165.48	165.48	165.47
759147	165.45	165.45	165.45	165.45	165.45
759072	165.43	165.43	165.43	165.43	165.42
758997	165.4	165.4	165.4	165.4	165.4
758922	165.39	165.39	165.39	165.39	165.39
758825	165.36	165.36	165.36	165.36	165.36
758729	165.33	165.33	165.33	165.33	165.33
758633	165.3	165.3	165.3	165.3	165.3
758537	165.27	165.27	165.27	165.27	165.27
758441	165.27	165.27	165.27	165.27	165.27
758345	165.26	165.26	165.26	165.26	165.26
758249	165.24	165.24	165.24	165.24	165.24
758153	165.23	165.23	165.23	165.23	165.23
758057	165.21	165.21	165.21	165.21	165.21
757960	165.17	165.17	165.17	165.17	165.17
757864	165.12	165.12	165.12	165.12	165.12
757768	165.06	165.06	165.06	165.06	165.06
757672	164.98	164.98	164.98	164.98	164.98
757575	164.96	164.96	164.96	164.96	164.96
757479	164.95	164.95	164.95	164.95	164.95
757383	164.93	164.93	164.93	164.93	164.93
757287	164.92	164.92	164.92	164.92	164.92
757189	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9
757092	164.88	164.88	164.88	164.88	164.87
756994	164.85	164.85	164.85	164.85	164.85

756897	164.81	164.81	164.81	164.81	164.81
756802	164.78	164.78	164.78	164.78	164.78
756707	164.75	164.75	164.75	164.75	164.75
756612	164.72	164.72	164.72	164.72	164.72
756517	164.69	164.69	164.69	164.69	164.68
756419	164.65	164.65	164.65	164.65	164.65
756322	164.62	164.62	164.62	164.62	164.62
756224	164.59	164.59	164.59	164.59	164.59
756127	164.56	164.56	164.56	164.56	164.56
756031	164.54	164.54	164.54	164.54	164.53
755935	164.52	164.52	164.52	164.52	164.51
755839	164.5	164.5	164.5	164.5	164.5
755743	164.48	164.48	164.48	164.48	164.48
755647	164.47	164.47	164.47	164.47	164.46
755555	164.45	164.45	164.45	164.45	164.44
755463	164.43	164.43	164.43	164.43	164.42
755372	164.4	164.4	164.4	164.4	164.4
755310	164.39	164.39	164.39	164.39	164.39
755247	164.39	164.39	164.39	164.39	164.38
755180	164.37	164.37	164.37	164.37	164.37
755112	164.36	164.36	164.36	164.36	164.36
755053	164.36	164.36	164.36	164.36	164.36
754982	164.32	164.32	164.32	164.32	164.32
754943	164.34	164.34	164.34	164.34	164.33
754890	164.36	164.36	164.36	164.36	164.36
754836	164.36	164.36	164.36	164.36	164.35
754767	164.32	164.32	164.32	164.32	164.32
754728	164.3	164.3	164.3	164.3	164.3
754668	164.29	164.29	164.29	164.29	164.29
754609	164.28	164.28	164.28	164.28	164.28
754553	164.25	164.25	164.25	164.25	164.25
754498	164.23	164.23	164.23	164.23	164.23
754435	164.23	164.23	164.23	164.23	164.23
754340	164.22	164.22	164.22	164.22	164.22
754246	164.22	164.22	164.22	164.22	164.21
754151	164.21	164.21	164.21	164.21	164.21
754057	164.2	164.2	164.2	164.2	164.2
753961	164.18	164.18	164.18	164.18	164.18
753865	164.16	164.16	164.16	164.16	164.15
753770	164.14	164.14	164.14	164.14	164.14
753674	164.12	164.12	164.12	164.12	164.12
753579	164.11	164.11	164.11	164.11	164.11
753485	164.11	164.11	164.11	164.11	164.1
753392	164.11	164.11	164.11	164.11	164.1
753317	164.1	164.1	164.1	164.1	164.1
753243	164.09	164.09	164.09	164.09	164.09
753169	164.09	164.09	164.09	164.09	164.09
753091	164.08	164.08	164.08	164.08	164.08
753014	164.07	164.07	164.07	164.07	164.07

752937	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06
752837	164.05	164.05	164.05	164.05	164.05
752737	164.04	164.04	164.04	164.04	164.04
752637	164.04	164.04	164.04	164.04	164.03
752537	164.03	164.03	164.03	164.03	164.03
752468	164.02	164.02	164.02	164.02	164.02
752399	164.02	164.02	164.02	164.02	164.01
752330	164.01	164.01	164.01	164.01	164.01
752255	164.01	164.01	164.01	164.01	164
752180	164	164	164	164	164
752105	163.99	163.99	163.99	163.99	163.99
752043	163.98	163.98	163.98	163.98	163.98
751982	163.98	163.98	163.98	163.98	163.97
751910	163.98	163.98	163.98	163.98	163.98
751838	163.99	163.99	163.99	163.99	163.98
751739	163.99	163.99	163.99	163.99	163.98
751646	163.99	163.99	163.99	163.99	163.99
751596	163.99	163.99	163.99	163.99	163.99
751577	164	164	164	164	164
751517	158.11	159.18	159.4	157.9	159.09
751495	158.16	159.3	159.52	157.95	159.18
751447	158.14	159.29	159.51	157.93	159.15
751411	158.12	159.24	159.46	157.91	159.11
751375	158.08	159.15	159.36	157.87	159.04
751340	158.01	159	159.18	157.81	158.92
751320	157.99	158.94	159.1	157.79	158.88
751246	157.85	158.7	158.73	157.66	158.67
751196	157.82	158.66	158.68	157.62	158.62
751147	157.78	158.65	158.67	157.59	158.61
751079	157.74	158.6	158.63	157.54	158.56
751011	157.69	158.56	158.59	157.49	158.53
750944	157.64	158.52	158.55	157.44	158.48
750866	157.58	158.47	158.5	157.38	158.43
750789	157.49	158.37	158.4	157.3	158.33
750712	157.44	158.31	158.34	157.24	158.27
750620	157.34	158.21	158.24	157.14	158.17
750529	157.23	158.09	158.12	157.04	158.05
750430	157.15	158.01	158.04	156.96	157.97
750332	157.07	157.93	157.96	156.88	157.89
750244	157.01	157.86	157.89	156.82	157.83
750157	156.96	157.8	157.83	156.77	157.76
750096	156.88	157.71	157.74	156.7	157.67
750035	156.81	157.61	157.64	156.62	157.57
749955	156.74	157.55	157.58	156.56	157.51
749885	156.7	157.51	157.55	156.52	157.48
749815	156.66	157.48	157.51	156.48	157.45
749761	156.63	157.45	157.48	156.44	157.41
749707	156.59	157.41	157.44	156.41	157.37
749613	156.5	157.31	157.34	156.32	157.27

749520	156.38	157.17	157.21	156.2	157.14
749427	156.22	156.99	157.02	156.04	156.95
749334	156.02	156.73	156.76	155.86	156.7
749239	155.82	156.51	156.54	155.66	156.48
749145	155.64	156.31	156.34	155.47	156.28
749051	155.46	156.11	156.13	155.3	156.08
748957	155.3	155.92	155.94	155.14	155.89
748871	155.16	155.76	155.78	154.99	155.73
748785	155.02	155.61	155.63	154.85	155.59
748699	154.89	155.48	155.5	154.73	155.45
748613	154.79	155.36	155.38	154.62	155.33
748527	154.71	155.27	155.29	154.54	155.25
748442	154.64	155.21	155.23	154.48	155.18
748350	154.54	155.1	155.12	154.38	155.07
748254	154.55	155.13	155.15	154.39	155.11
748158	154.43	155	155.02	154.28	154.97
748062	154.29	154.84	154.86	154.14	154.81
748002	154.26	154.8	154.81	154.1	154.77
747913	154.21	154.75	154.77	154.06	154.72
747825	154.18	154.71	154.73	154.03	154.69
747737	154.16	154.69	154.71	154.01	154.66
747647	154.15	154.67	154.69	154	154.65
747582	154.09	154.6	154.61	153.94	154.57
747482	153.97	154.46	154.48	153.83	154.43
747382	153.83	154.29	154.31	153.7	154.27
747282	153.66	154.09	154.1	153.54	154.07
747182	153.47	153.85	153.86	153.35	153.83
747101	153.43	153.8	153.81	153.32	153.78
747020	153.4	153.76	153.77	153.28	153.74
746940	153.36	153.72	153.73	153.24	153.7
746868	153.31	153.67	153.68	153.2	153.65
746797	153.26	153.62	153.63	153.15	153.6
746703	153.23	153.59	153.6	153.12	153.57
746610	153.18	153.52	153.54	153.08	153.51
746512	153.07	153.41	153.42	152.97	153.39
746426	153.02	153.35	153.36	152.92	153.33
746340	152.96	153.3	153.31	152.87	153.28
746271	152.93	153.28	153.29	152.84	153.25
746202	152.92	153.27	153.29	152.82	153.25
746122	152.8	153.16	153.18	152.71	153.14
746042	152.67	153.03	153.04	152.58	153
745962	152.53	152.88	152.89	152.45	152.85
745941	152.5	152.84	152.86	152.42	152.81
745921	152.26	152.61	152.62	152.13	152.6
745882	152.19	152.54	152.55	152.06	152.52
745802	152.11	152.44	152.46	151.98	152.43
745732	152.07	152.4	152.41	151.95	152.39
745662	151.99	152.3	152.31	151.86	152.29
745567	151.89	152.19	152.2	151.77	152.18

745472	151.81	152.1	152.11	151.69	152.09
745387	151.75	152.04	152.05	151.64	152.03
745302	151.72	152	152.01	151.61	151.99
745204	151.6	151.86	151.87	151.49	151.85
745107	151.48	151.72	151.73	151.38	151.71
745002	151.36	151.58	151.59	151.27	151.57
744902	151.28	151.49	151.49	151.18	151.48
744852	151.26	151.47	151.47	151.16	151.46
744752	151.18	151.4	151.4	151.08	151.39
744652	151.11	151.33	151.34	151.01	151.32
744552	151.06	151.3	151.3	150.96	151.29
744452	151.01	151.24	151.25	150.91	151.23
744370	150.91	151.14	151.15	150.82	151.13
744289	150.85	151.06	151.07	150.76	151.05
744208	150.81	151.01	151.02	150.72	151
744127	150.76	150.96	150.96	150.67	150.95
744028	150.65	150.84	150.84	150.57	150.83
743929	150.55	150.72	150.73	150.47	150.72
743830	150.45	150.62	150.62	150.37	150.61
743732	150.35	150.51	150.52	150.27	150.51
743637	150.23	150.38	150.39	150.15	150.37
743542	150.12	150.27	150.28	150.04	150.26
743447	150.05	150.2	150.2	149.97	150.19
743352	149.99	150.14	150.15	149.92	150.13
743257	149.95	150.1	150.1	149.88	150.09
743173	149.86	150.01	150.01	149.79	150
743089	149.76	149.9	149.9	149.68	149.89
743005	149.64	149.79	149.79	149.57	149.78
742921	149.56	149.68	149.69	149.49	149.68
742837	149.51	149.63	149.64	149.45	149.62
742764	149.41	149.52	149.53	149.35	149.52
742692	149.31	149.41	149.41	149.25	149.4
742620	149.21	149.31	149.31	149.16	149.3
742535	149.11	149.2	149.2	149.06	149.2
742451	149.04	149.13	149.14	148.99	149.13
742367	148.99	149.09	149.09	148.94	149.08
742279	148.92	149.01	149.01	148.87	149
742192	148.85	148.94	148.94	148.8	148.94
742104	148.79	148.87	148.87	148.74	148.87
742017	148.72	148.8	148.8	148.67	148.8
741929	148.67	148.75	148.75	148.62	148.74
741842	148.61	148.69	148.69	148.56	148.68
741747	148.51	148.59	148.59	148.47	148.58
741652	148.4	148.48	148.48	148.36	148.47
741557	148.29	148.36	148.36	148.24	148.36
741462	148.18	148.25	148.25	148.13	148.25
741367	148.08	148.16	148.16	148.03	148.15
741272	148.01	148.08	148.09	147.96	148.08
741186	147.9	147.98	147.99	147.86	147.98

741100	147.8	147.88	147.88	147.75	147.87
741014	147.71	147.78	147.79	147.66	147.78
740928	147.63	147.7	147.71	147.59	147.7
740842	147.57	147.64	147.64	147.52	147.63
740751	147.48	147.55	147.55	147.44	147.55
740661	147.39	147.46	147.46	147.35	147.46
740570	147.29	147.36	147.37	147.25	147.36
740480	147.2	147.27	147.27	147.16	147.26
740387	147.11	147.18	147.18	147.07	147.17
740287	146.98	147.05	147.05	146.94	147.05
740187	146.88	146.95	146.96	146.84	146.95
740087	146.77	146.85	146.85	146.73	146.85
739987	146.68	146.76	146.76	146.64	146.76
739930	146.64	146.73	146.73	146.6	146.72
739834	146.54	146.63	146.63	146.5	146.62
739738	146.44	146.53	146.53	146.4	146.52
739642	146.34	146.43	146.43	146.29	146.42
739547	146.24	146.34	146.34	146.2	146.33
739447	146.07	146.18	146.18	146.03	146.17
739348	145.91	146.01	146.01	145.86	146
739249	145.77	145.87	145.87	145.73	145.86
739150	145.69	145.79	145.79	145.65	145.78
739102	145.67	145.76	145.76	145.62	145.76
739000	145.53	145.62	145.62	145.49	145.62
738917	145.41	145.51	145.51	145.37	145.5
738834	145.32	145.41	145.42	145.28	145.41
738752	145.25	145.35	145.35	145.21	145.34

Priloga 3: Kote maksimalnih gladin visokih voda različnih povratnih dob

stacionaža profilov	Q ₁₀₀	Q ₁₀₀₀	Q ₁₀₀₀₀
	3290 m ³ /s	4040 m ³ /s	4700 m ³ /s
maksimalna kota gladine (m)			
760547	169.43	170.35	171.1
760475	169.39	170.3	171.04
760403	169.33	170.23	170.96
760332	169.25	170.14	170.86
760242	169.16	170.04	170.75
760152	169.04	169.9	170.6
760083	169.01	169.87	170.57
760015	168.98	169.85	170.58
759932	168.93	169.81	170.54
759849	168.89	169.77	170.51
759767	168.85	169.74	170.47
759690	168.8	169.69	170.42
759613	168.75	169.64	170.37
759537	168.7	169.59	170.33
759473	168.68	169.57	170.32
759410	168.66	169.56	170.3
759347	168.64	169.54	170.29
759247	168.59	169.48	170.23
759147	168.54	169.43	170.18
759072	168.48	169.35	170.09
758997	168.43	169.3	170.03
758922	168.39	169.25	169.98
758825	168.34	169.21	169.93
758729	168.3	169.16	169.88
758633	168.25	169.11	169.84
758537	168.21	169.07	169.79
758441	168.21	169.07	169.79
758345	168.21	169.07	169.79
758249	168.2	169.06	169.79
758153	168.18	169.05	169.79
758057	168.16	169.05	169.79
757960	168.08	168.97	169.73
757864	167.98	168.88	169.65
757768	167.84	168.76	169.55
757672	167.63	168.6	169.43
757575	167.58	168.56	169.39
757479	167.54	168.53	169.36
757383	167.51	168.5	169.33
757287	167.48	168.47	169.3
757189	167.42	168.42	169.25
757092	167.36	168.36	169.2

756994	167.3	168.3	169.14
756897	167.22	168.25	169.11
756802	167.16	168.19	169.06
756707	167.1	168.14	169.02
756612	167.03	168.09	168.97
756517	166.96	168.03	168.92
756419	166.87	167.95	168.85
756322	166.78	167.87	168.77
756224	166.69	167.78	168.68
756127	166.6	167.7	168.6
756031	166.52	167.62	168.53
755935	166.45	167.55	168.47
755839	166.39	167.5	168.42
755743	166.34	167.45	168.38
755647	166.29	167.41	168.35
755555	166.21	167.35	168.3
755463	166.13	167.29	168.25
755372	166.05	167.22	168.2
755310	166.01	167.19	168.17
755247	165.98	167.16	168.15
755180	165.93	167.13	168.11
755112	165.87	167.07	168.07
755053	165.85	167.01	167.96
754982	165.65	166.82	167.79
754943	165.73	166.9	167.87
754890	165.79	166.95	167.92
754836	165.77	166.93	167.88
754767	165.57	166.7	167.63
754728	165.44	166.56	167.48
754668	165.4	166.51	167.43
754609	165.35	166.47	167.39
754553	165.13	166.23	167.14
754498	165.03	166.12	167.03
754435	165.01	166.12	167.04
754340	164.94	166.06	166.99
754246	164.88	166	166.94
754151	164.83	165.95	166.9
754057	164.78	165.91	166.86
753961	164.59	165.72	166.67
753865	164.42	165.53	166.48
753770	164.29	165.38	166.33
753674	164.15	165.24	166.18
753579	164.04	165.13	166.07
753485	163.97	165.07	166.02
753392	163.93	165.04	165.99
753317	163.85	164.97	165.93
753243	163.8	164.92	165.9
753169	163.77	164.91	165.89
753091	163.66	164.79	165.77

753014	163.54	164.67	165.66
752937	163.42	164.56	165.55
752837	163.31	164.46	165.45
752737	163.2	164.36	165.36
752637	163.08	164.25	165.26
752537	162.96	164.14	165.15
752468	162.88	164.06	165.07
752399	162.81	163.99	165.01
752330	162.74	163.93	164.96
752255	162.64	163.83	164.85
752180	162.54	163.72	164.74
752105	162.42	163.6	164.62
752043	162.31	163.48	164.5
751982	162.18	163.34	164.36
751910	162.16	163.35	164.38
751838	162.17	163.38	164.43
751739	162.1	163.33	164.4
751646	162.15	163.39	164.46
751596	162.12	163.37	164.44
751577	162.18	163.42	164.49
751517	160.68	161.68	162.48
751495	160.72	161.72	162.52
751447	160.69	161.7	162.5
751411	160.65	161.65	162.43
751375	160.58	161.57	162.34
751340	160.48	161.44	162.19
751320	160.44	161.39	162.14
751246	160.24	161.16	161.88
751196	160.2	161.12	161.84
751147	160.2	161.14	161.87
751079	160.15	161.09	161.83
751011	160.12	161.06	161.8
750944	160.08	161.02	161.76
750866	160.04	160.98	161.72
750789	159.91	160.83	161.56
750712	159.84	160.76	161.48
750620	159.74	160.65	161.36
750529	159.62	160.51	161.22
750430	159.53	160.42	161.11
750332	159.44	160.32	161.01
750244	159.35	160.21	160.87
750157	159.27	160.1	160.74
750096	159.15	159.97	160.59
750035	159.02	159.79	160.36
749955	158.96	159.73	160.32
749885	158.91	159.69	160.27
749815	158.87	159.65	160.24
749761	158.83	159.6	160.19
749707	158.79	159.55	160.13

749613	158.69	159.45	160.02
749520	158.58	159.35	159.92
749427	158.4	159.14	159.7
749334	158.17	158.94	159.5
749239	158	158.75	159.29
749145	157.83	158.55	159.07
749051	157.67	158.36	158.86
748957	157.58	158.32	158.85
748871	157.42	158.12	158.61
748785	157.3	158.01	158.49
748699	157.2	157.9	158.38
748613	157.09	157.8	158.28
748527	157	157.71	158.19
748442	156.93	157.64	158.12
748350	156.83	157.52	158
748254	156.84	157.54	158.02
748158	156.68	157.36	157.82
748062	156.47	157.12	157.54
748002	156.42	157.07	157.5
747913	156.36	156.99	157.41
747825	156.31	156.93	157.34
747737	156.26	156.88	157.3
747647	156.23	156.83	157.24
747582	156.13	156.71	157.12
747482	155.95	156.5	156.9
747382	155.73	156.24	156.56
747282	155.46	155.92	156.23
747182	155.28	155.83	156.21
747101	155.2	155.72	156.06
747020	155.14	155.62	155.99
746940	155.09	155.59	155.96
746868	155.06	155.57	155.94
746797	155.04	155.56	155.92
746703	154.95	155.45	155.84
746610	154.84	155.34	155.72
746512	154.63	155.1	155.46
746426	154.61	155.11	155.51
746340	154.62	155.15	155.53
746271	154.64	155.16	155.55
746202	154.65	155.17	155.55
746122	154.58	155.11	155.49
746042	154.5	155.04	155.43
745962	154.41	154.97	155.37
745941	154.39	154.95	155.35
745921	154.33	154.88	155.27
745882	154.29	154.85	155.24
745802	154.19	154.77	155.16
745732	154.12	154.7	155.09
745662	154.02	154.62	155.02

745567	153.86	154.5	154.9
745472	153.67	154.37	154.78
745387	153.53	154.25	154.67
745302	153.45	154.13	154.56
745204	153.23	153.97	154.43
745107	152.95	153.75	154.65
745002	152.64	154.04	153.54
744902	152.36	152.31	153.32
744852	152.62	152.99	153.28
744752	152.62	152.99	153.29
744652	152.6	152.99	153.28
744552	152.6	152.98	153.27
744452	152.51	152.86	153.13
744370	152.43	152.78	153.04
744289	152.34	152.69	152.95
744208	152.27	152.62	152.89
744127	152.14	152.49	152.76
744028	152.02	152.37	152.64
743929	151.9	152.25	152.51
743830	151.77	152.11	152.37
743732	151.59	151.92	152.19
743637	151.51	151.85	152.12
743542	151.46	151.79	152.05
743447	151.42	151.75	152
743352	151.4	151.71	151.97
743257	151.38	151.69	151.93
743173	151.3	151.61	151.85
743089	151.21	151.52	151.76
743005	151.1	151.4	151.65
742921	150.96	151.27	151.51
742837	150.79	151.09	151.33
742764	150.69	150.99	151.24
742692	150.59	150.89	151.14
742620	150.47	150.79	151.05
742535	150.35	150.68	150.94
742451	150.25	150.58	150.84
742367	150.17	150.49	150.75
742279	150.08	150.41	150.66
742192	150	150.32	150.58
742104	149.93	150.25	150.5
742017	149.86	150.17	150.42
741929	149.79	150.1	150.35
741842	149.75	150.06	150.31
741747	149.67	149.98	150.23
741652	149.59	149.9	150.15
741557	149.5	149.82	150.07
741462	149.41	149.74	149.99
741367	149.34	149.66	149.91
741272	149.27	149.59	149.84

741186	149.19	149.51	149.76
741100	149.1	149.43	149.68
741014	149	149.34	149.59
740928	148.89	149.23	149.49
740842	148.79	149.11	149.38
740751	148.71	149.03	149.29
740661	148.61	148.94	149.2
740570	148.5	148.83	149.09
740480	148.35	148.67	148.93
740387	148.22	148.54	148.8
740287	148.08	148.41	148.67
740187	148.04	148.36	148.62
740087	147.94	148.26	148.51
739987	147.84	148.15	148.41
739930	147.83	148.15	148.4
739834	147.75	148.07	148.32
739738	147.67	147.98	148.24
739642	147.58	147.9	148.16
739547	147.5	147.82	148.07
739447	147.38	147.7	147.96
739348	147.28	147.6	147.87
739249	147.18	147.51	147.77
739150	147.09	147.42	147.68
739102	147.05	147.37	147.63
739000	146.92	147.25	147.51
738917	146.81	147.14	147.4
738834	146.71	147.04	147.31
738752	146.61	146.94	147.2

Priloga 4: Kote maksimalnih gladin v podolžnem profilu

