

Prof.dr.sc. Neven Kuspilić

POSTUPCI ZAŠTITE OD VODA

Zagreb, 2009.

SADRŽAJ:

1. UVOD, VODOTOCI KAO ELEMENT VODNOGOSPODARSKOG SUSTAVA
2. POPLAVE I POPLAVNI RIZICI
3. RETENCIJE I ANALIZA RADA RETENCIJA
4. MORFODINAMIČKE ANALIZE KORITA VODOTOKA
5. PRISTUPI PROBLEMU LOKALNE NESTABILNOSTI KORITA
6. ODABIR OPTIMALNOG PROFILA KORITA

1. UVOD, VODOTOCI KAO ELEMENT VODNOSPODARSKOG SUSTAVA

Postupci zaštite od voda spadaju u područje vodnoga gospodarstva koje se bavi problemima vezanim uz štetno djelovanje voda. Prema Zakonu o vodama vodnogospodarska područja dijele na:

- Korištenje voda
- Zaštita voda od onečišćenja
- Uređenje vodotoka i drugih voda i **zaštita od štetnog djelovanja voda**

Navedena podjela nije samo administrativnog tipa, već je duboko ukorijenjena u hidrotehničku praksu. Prema njoj je područje interesa ovoga kursa smješteno u treće područje, pa ćemo se u nastavku osvrnuti na osnovne probleme vezane uz uređenje vodotoka i drugih voda i zaštitu od štetnog djelovanja voda.

Uređenjem vodotoka i drugih voda, prema Zakonu, smatra se: građenje, tehničko i gospodarsko održavanje regulacijskih i zaštitnih vodnih građevina i vodnih građevina za melioracijsku odvodnju, tehničko i gospodarsko održavanje vodotoka i vodnog dobra i drugi radovi kojima se omogućuje kontrolirani i neškodljivi protok voda i njihovo namjensko korištenje.

Zaštita od štetnog djelovanja voda pak obuhvaća djelovanje i mjere za obranu od poplava, obranu od leda na vodotocima, zaštitu od erozija i bujica i za otklanjanje posljedica od takvih djelovanja.

Sigurno je da obrana od poplava spada u temeljnu aktivnost zaštite od štetnog djelovanja voda. Poplavne vode ne samo da potapanjem područja nanose velike materijalne štete te ugrožavaju život i zdravlje ljudi, već svojim erozijskim djelovanjem mogu razmjere štete dodatno povećati.

Radi sprečavanja poplava i štetnog djelovanja poplavnih voda grade se i održavaju zaštitne vodne građevine, obavljaju zaštitni radovi i provode mjere obrane od poplava. Kada nastupi događaj koji može izazvati poplave provodi se obrana od poplava.

Obrana od poplava može biti redovna i izvanredna. Redovna, odnosno izvanredna obrana od poplava proglašava se kada vodostaj dosegne visinu određenu **planom obrane od poplava** uz očekivanje daljnjeg porasta vodostaja. Obrana od poplava na državnim vodama provodi se u skladu s Državnim planom obrane od poplava koji donosi Vlada Republike Hrvatske. Obrana od poplava na lokalnim vodama provodi se u skladu s planom obrane od poplava za slivno područje koji donose županijske skupštine na prijedlog "Hrvatskih voda".

Plan obrane od poplava sadrži osobito: mjere koje se moraju poduzeti prije ili u slučaju opasnosti od poplave, vodostaj pri kojem na pojedinim sektorima počinje redovna, odnosno izvanredna obrana, odredbe o opremi i materijalu koji se moraju pripremiti, pravne osobe koje provode obranu od poplave i imena stručnih organizatora obrane od poplave, dužnosti, odgovornosti i ovlaštenja za poduzimanje određenih radnji u vezi s obranom i način

obavješćivanja o pojavama i mjerama u tijeku obrane od poplave. Plan obrane od poplava sadrži i mjere za obranu od leda na vodotocima.

Obrana od leda dakle spada u kategoriju jednaku kao i obrana od poplava. Razlog je što led uvijek nepovoljno utječe na sve djelatnosti vezane uz vodotoke, od korištenja voda pa do zaštite od štetnog djelovanja voda.

Ako zbog stvaranja i nagomilavanja leda nastaju pregrade koje mogu prouzročiti poplavu ili ako bi zbog stvaranja i pokretanja leda moglo doći do oštećenja regulacijskih i zaštitnih vodnih građevina, mostova i drugih stalnih ili plovni objekata na vodotoku, moraju se poduzeti mjere utvrđene planom obrane od poplava.

Mjere za obranu od leda radi zaštite mostova, plovni i drugih objekata, koji su u vlasništvu pravnih i fizičkih osoba, poduzimaju te osobe.

Zaštita od erozija i bujica također ima veliki značaj u području zaštite od štetnog djelovanja voda. Područjem ugroženim od erozija, prema Zakonu, smatra se područje na kojem zbog djelovanja površinskih ili podzemnih voda dolazi do ispiranja, podrivanja ili odronjavanja zemljišta i drugih sličnih štetnih pojava uslijed čega može doći do ugrožavanja života i zdravlja ljudi i njihove imovine te poremećaja u vodnom režimu.

Bujičnim tokovima, prema Zakonu, smatraju se povremeni vodotoci, kao i stalni vodotoci u kojima zbog djelovanja kiša i topljenja snijega nastaju nagle promjene proticaja voda zbog kojih može doći do ugrožavanja života i zdravlja ljudi i imovine i poremećaja u vodnom režimu.

Radi sprečavanja i otklanjanja erozija i djelovanja bujica grade se i održavaju regulacijske i zaštitne vodne građevine, izvode zaštitni radovi i provode mjere zaštite.

Radovima za zaštitu od erozija i bujica smatraju se osobito: pošumljavanje, uzgoj i održavanje zaštitne vegetacije, trasiranje, krčenje raslinja, čišćenje korita i drugi slični radovi.

Mjerama za zaštitu od erozija i bujica smatraju se osobito: zabrana i ograničavanje sječe drveća i grmlja, zabrana i ograničavanje vađenja pijeska, šljunka i kamena, zabrana odlaganja otpadnih tvari, odgovarajući način korištenja poljoprivrednog i drugog zemljišta i druge odgovarajuće mjere.

2. POPLAVE I POPLAVNI RIZICI

Uzroci pojave poplava može biti višestruk. Tako ćemo se susretati sa prirodnim poplavama nastale uslijed pojave hidroloških prilika (obilne kiše i/ili topljenje snijega) takovih da vodotoci nisu u mogućnosti evakuirati pristiglu vodu. Dostatna evakuacija voda može biti spriječena uslijed premalog kapaciteta korita ili ponornih zona. Također poplave mogu nastati kao prirodne poplave nastale zbog nastajanja ledenih barijera. I konačno moguća je pojava takozvanih umjetnih poplava nastalih uslijed otkazivanja sustava za akumuliranje vode, otkazivanja sustava (ili njegovih dijelova) za obranu od poplava ili neadekvatnih tehničkih rješenja na odvodnji.

Obrana od poplava je važna aktivnost iz razloga što poplave mogu prouzročiti smrtne slučajeve, ugroziti zdravlje ljudi, raseljavanje stanovništva i štetu za okoliš, velike materijalne štete, ozbiljno ugroziti gospodarski razvoj i potkopati gospodarske aktivnosti zajednice.

Moramo biti svjesni činjenice da su poplave prirodni fenomen koji nije moguće spriječiti. Bez obzira kako siguran sustav za obranu od poplava imamo izgrađen, uvijek će postojati vjerojatnost njene pojave. Međutim moguće je (i poželjno) smanjiti **rizik** od štetnih posljedica povezanih s poplavama. Kako bi mjere za smanjivanje tih rizika bile djelotvorne, one trebaju, koliko god je to moguće, biti usklađene na čitavom riječnom slivu.

Neke ljudske aktivnosti (poput izgradnje sve većeg broja naselja i gospodarskih dobara na poplavnim područjima i smanjivanja prirodnog zadržavanja vode iskorištavanjem zemljišta) povećavaju poplavni rizik. Također, klimatske promjene pridonose povećavanju vjerojatnosti pojave i negativnih učinaka poplava.

U gornjem tekstu bio je spomenut pojam poplavni rizik. Nastavno ćemo se malo detaljnije upoznati sa tim pojmom koji je i tema dokumenta: **DIREKTIVA 2007/60/EZ EUROPSKOGA PARLAMENTA I VIJEĆA od 23. listopada 2007. o procjeni i upravljanju poplavnim rizicima**. Svrha ove direktive je uspostaviti okvir za procjenu i upravljanje poplavnim rizicima s ciljem smanjivanja štetnih posljedica poplava u Zajednici za zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost.

Direktiva definira poplavu kao privremena pokrivenost vodom zemljišta koje obično nije prekriveno vodom. To uključuje poplave koje uzrokuju rijeke, gorski potoci, bujični vodotoci, te poplave uzrokovane morem na priobalnim područjima, a može isključivati poplave iz kanalizacijskih sustava.

Nadalje, Direktiva poplavni rizik definira kao kombinaciju vjerojatnosti pojave poplavnog događaja i mogućih štetnih posljedica poplavnog događaja za zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost:

$$\text{rizik} = \text{vjerojatnost} \times \text{posljedice}$$

Odnosno, matematički definirano:

$$R(L) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x)p(x)dx$$

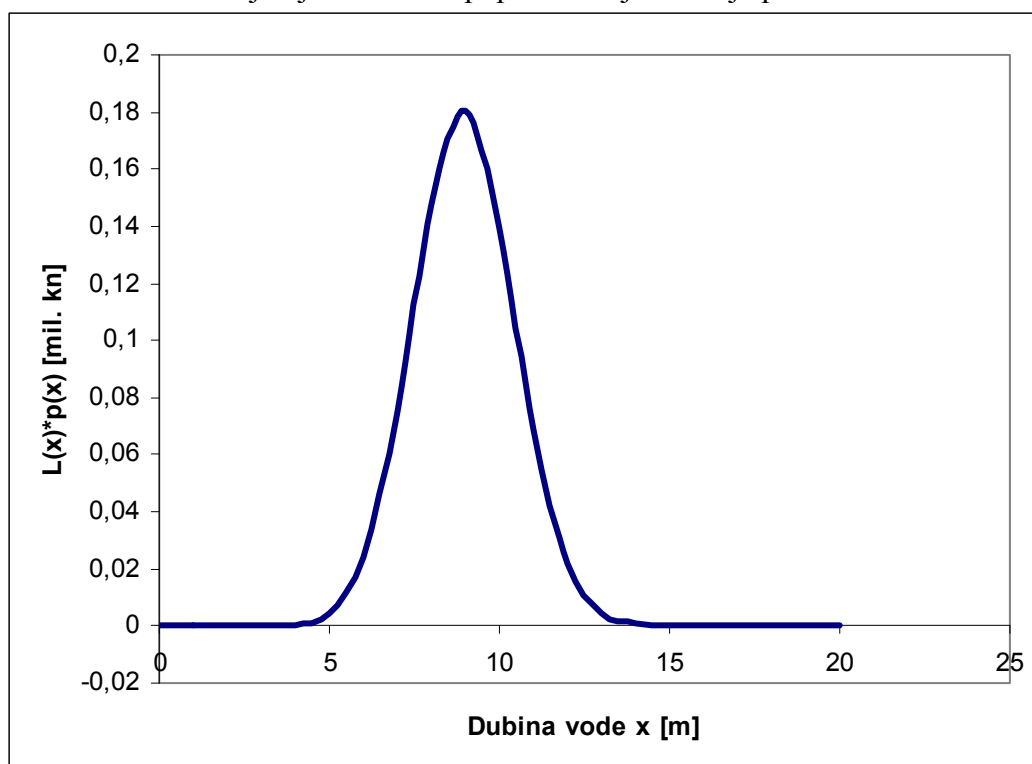
Gdje su:

$R(L)$ = poplavni rizik

$L(x)$ = šteta povezana s određenim poplavnim događajem x

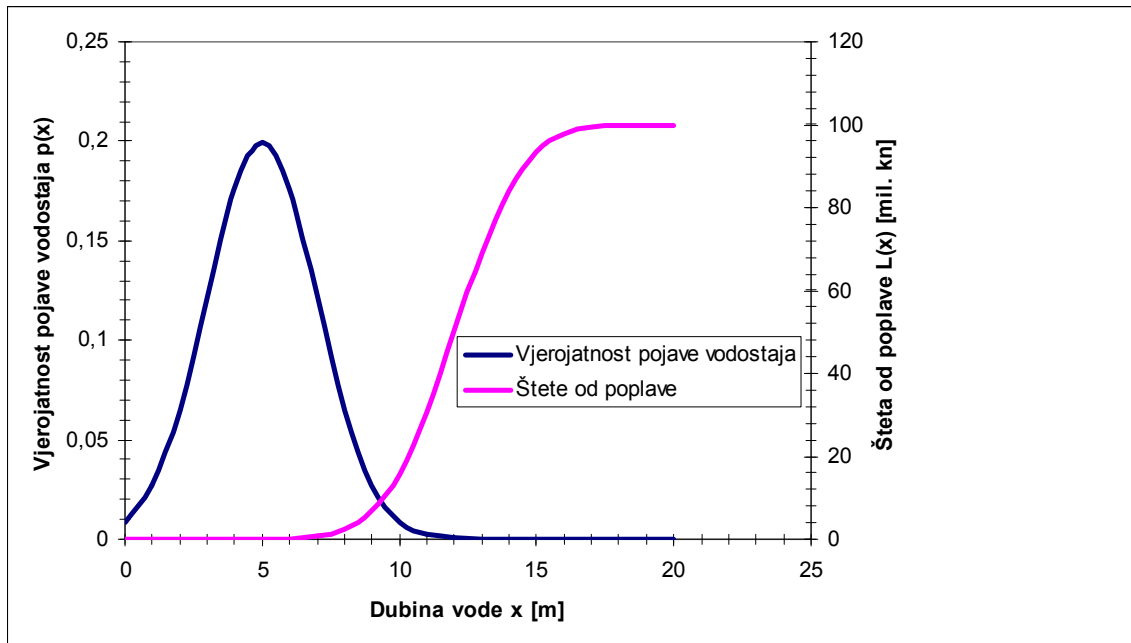
$p(x)$ = vjerojatnost pojave poplavnog događaja x ($0 \leq p \leq 1$)

To znači da je poplavni rizik ekonomska kategorija, odnosno da je jedinica mjere novčana (kune). Na slici 2.1 prikazana je hipotetska krivulja vjerojatnosti pojave nekog vodostaja na nekome vodomjernom profilu. Osim takove krivulje moguće je iskazati i procijenjenu štetu s obzirom na vodostaj koji bi izazvao poplavu. Obje krivulje prikazane su na slici 2.2.

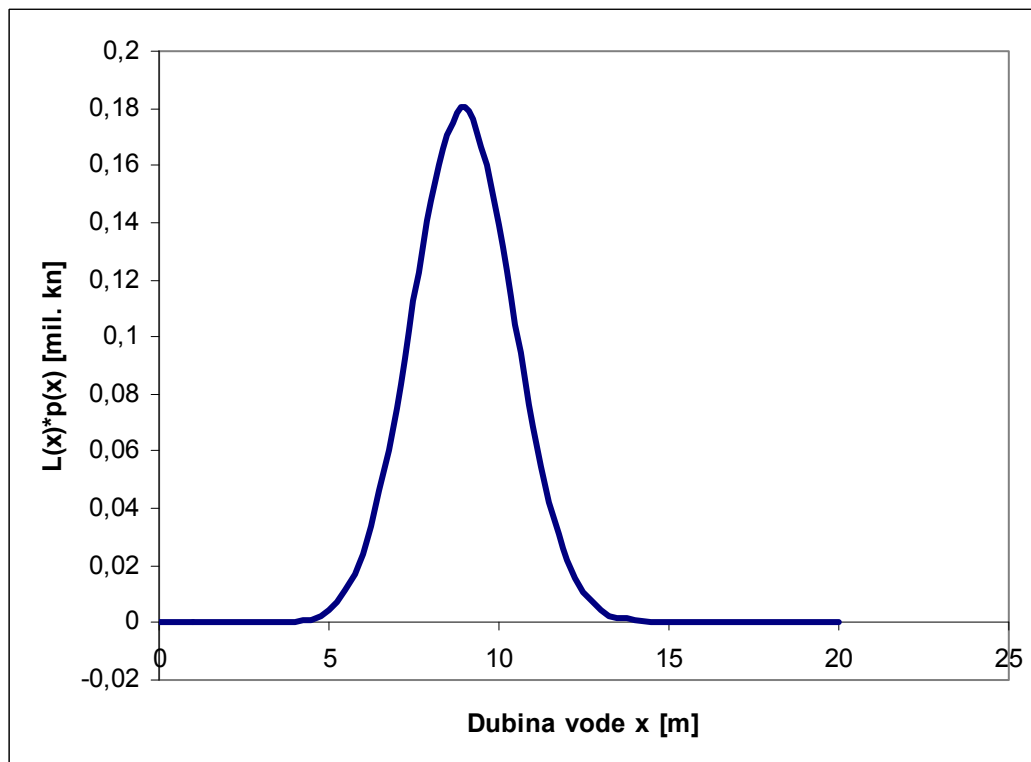


Slika 2.1 Vjerojatnost pojave vodostaja

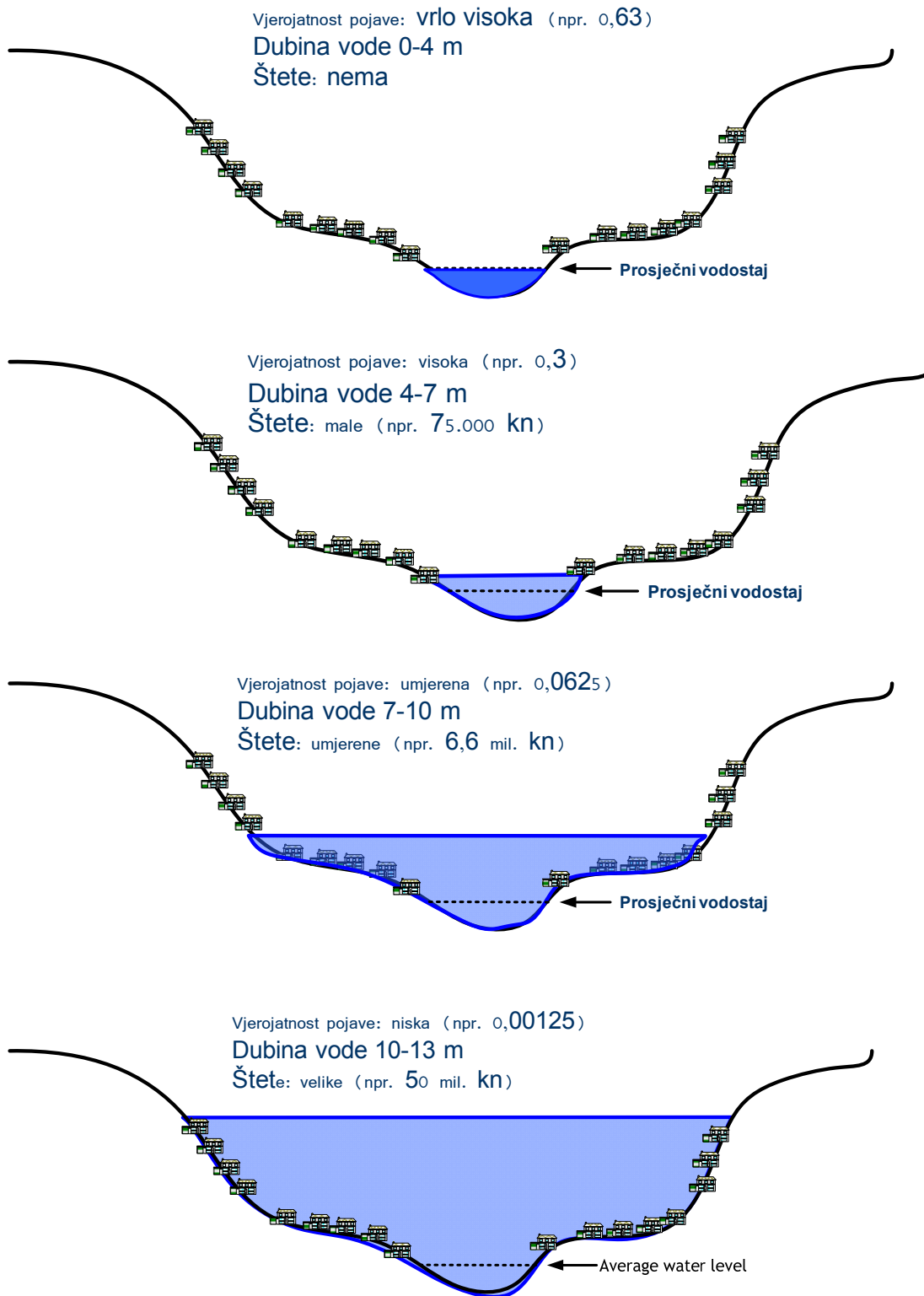
Ako se načini analiza tih krivulja moguće je prepoznati da kada poraste vodostaj iznad 4 m nastaje šteta od poplave. Porastom vodostaja raste i veličina štete od poplave, međutim kada vodostaj premaši 13 m, vjerojatnost pojave takovog događaja postaje vrlo mala, gotovo zanemariva. Otuda se može zaključiti da je područje vodostaja interesantno za analizu rizika između 4 i 13 m, bez obzira što je potencijalna šteta od poplava kod većih vodostaja vrlo velika. Ako napravimo krivulju umnoška vjerojatnosti pojave vodostaja i štete od poplave (slika 2.3) dobivamo distribuciju poplavnog rizika. Površina ispod te krivulje predstavlja ukupni poplavni rizik za neko područje. U ovom primjeru baratalo se sa kontinuiranim varijablama (vrijednostima) što sa aspekta praktične primjene može izazvati probleme. Stoga je u nastavku dan hipotetski primjer proračuna poplavnog rizika na razini diskretnih vrijednosti. Na slici 2.4 je dan zoran prikaz primjera proračuna za tri različita poplavna slučaja sa visokom, umjerenom i niskom vjerojatnosti pojave. Vidljivo je da je veličina šteta od poplava obrnuto proporcionalna s vjerojatnosti pojave te poplave.



Slika 2.2 Vjerojatnost pojave vodostaja i procjena štete od poplave ovisno o dubini vode



Slika 2.3 Poplavnog rizika



Slika 2.4 Primjer veze vjerojatnosti pojave vodostaja i pripadajuće štete od poplava

Rezultati proračuna ukupnog poplavnog rizika za dan primjer dani su tablično (tablica 2.I).

Poplavni događaj j	$p(x_i < x < x_{i+1})$	$L(x_{i+1})$	$L(x)p(x_i < x < x_{i+1})$
1	0,30	625.000 kn	187.500 kn
2	0,0625	6.600.000 kn	412.500 kn
3	0,00125	50.000.000 kn	62.500 kn
UKUPNI POPLAVNI RIZIK $R(L) = \sum_{j=1}^3 L(x_j)p(x_i < x_j < x_{i+1})$			662.500 kn

Tablica 2.I Ukupan poplavni rizik

KORACI U IZRADI PROCJENE I UPRAVLJANJA POPLAVNIM RIZICIMA (DIREKTIVA 2007/60/EZ)

Prema Direktivi, za izradu dokumenta o procjeni i upravljanju poplavnim rizicima potrebno je izraditi sljedeća četiri koraka:

- Preliminarna procjena poplavnih rizika
- Karte opasnosti od poplava
- Karte rizika od poplava
- Planovi upravljanja poplavnim rizicima

Nastavno ćemo reći ponešto o svakome koraku.

Preliminarna procjena poplavnih rizika

Na temelju raspoloživih ili lako dostupnih informacija, kao što su podaci i studije o dugoročnim promjenama stanja, osobito o učincima klimatskih promjena na javljanje poplava izrađuje se preliminarna procjena poplavnih rizika kako bi se napravila procjena mogućih rizika. Najmanje što procjena mora uključivati je sljedeće:

- karte vodnog područja u odgovarajućem mjerilu koje uključuju granice riječnih slivova, podslivova s prikazom topografije i korištenja zemljišta,
- opis poplava koje su se dogodile u prošlosti i koje su imale značajne štetne učinke na zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost i za koje je vjerojatnost sličnih budućih događaja i dalje relevantna, uključujući njihov prostorni obuhvat i puteve otjecanja poplavnih voda, te procjenu štetnih učinaka koje su prouzročile,
- opis značajnih poplava u prošlosti, kada se mogu predvidjeti značajne štetne posljedice sličnih budućih događaja,
- procjenu mogućih štetnih posljedica budućih poplava za zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost, uzimajući u obzir što je više moguće čimbenika kao što su topografija, položaj vodotoka i njihove općenite hidrološke i geomorfološke značajke, uključujući poplavna područja kao prirodna retencijska područja, djelotvornost izgrađene infrastrukture za zaštitu od poplava, položaj naseljenih područja, područja

gospodarske aktivnosti i dugoročni razvoj događaja, uključujući učinke klimatskih promjena na pojavu poplava.

Karte opasnosti od poplava

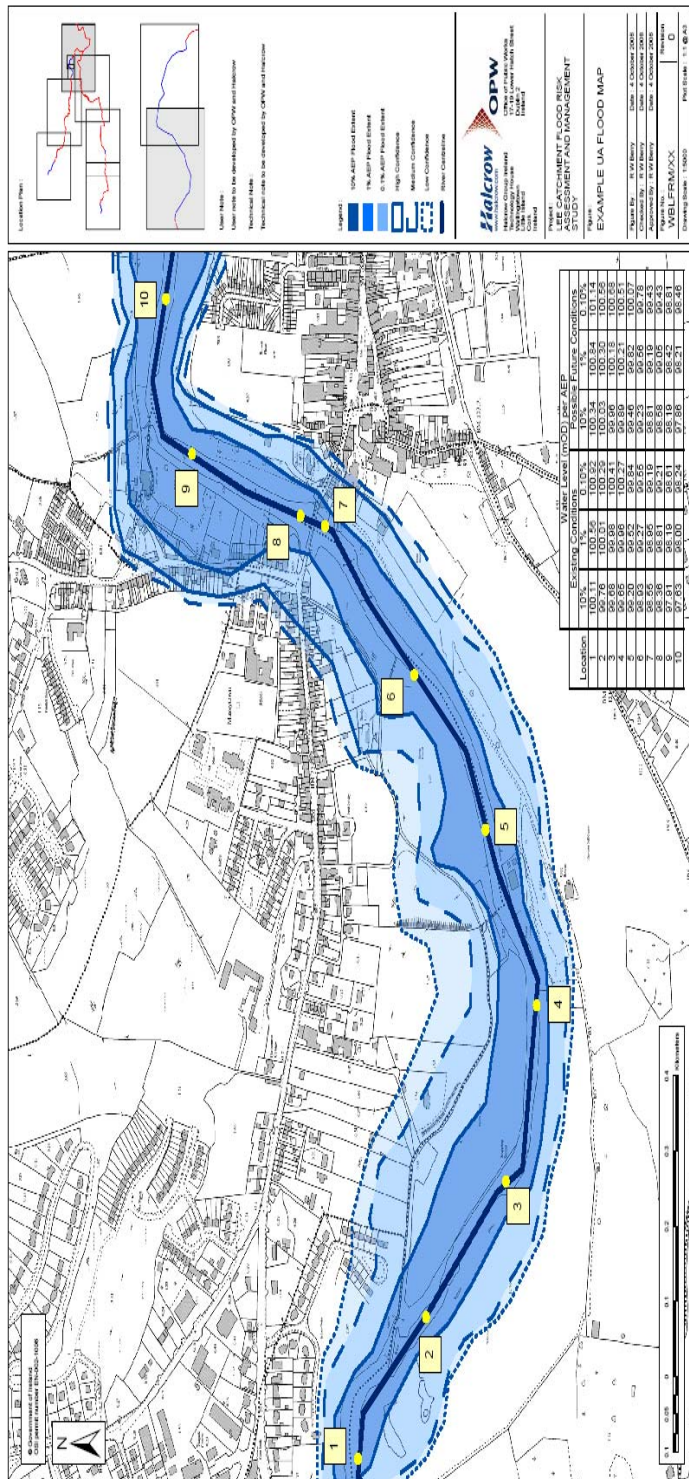
Karte opasnosti od poplava obuhvaćaju zemljopisna područja koja bi mogla biti poplavljena na temelju sljedećih scenarija:

- poplave male vjerojatnosti ili scenariji ekstremnih događaja,
- poplave srednje vjerojatnosti (povratno razdoblje ≥ 100 godina),
- poplave velike vjerojatnosti, (ako je potrebno).

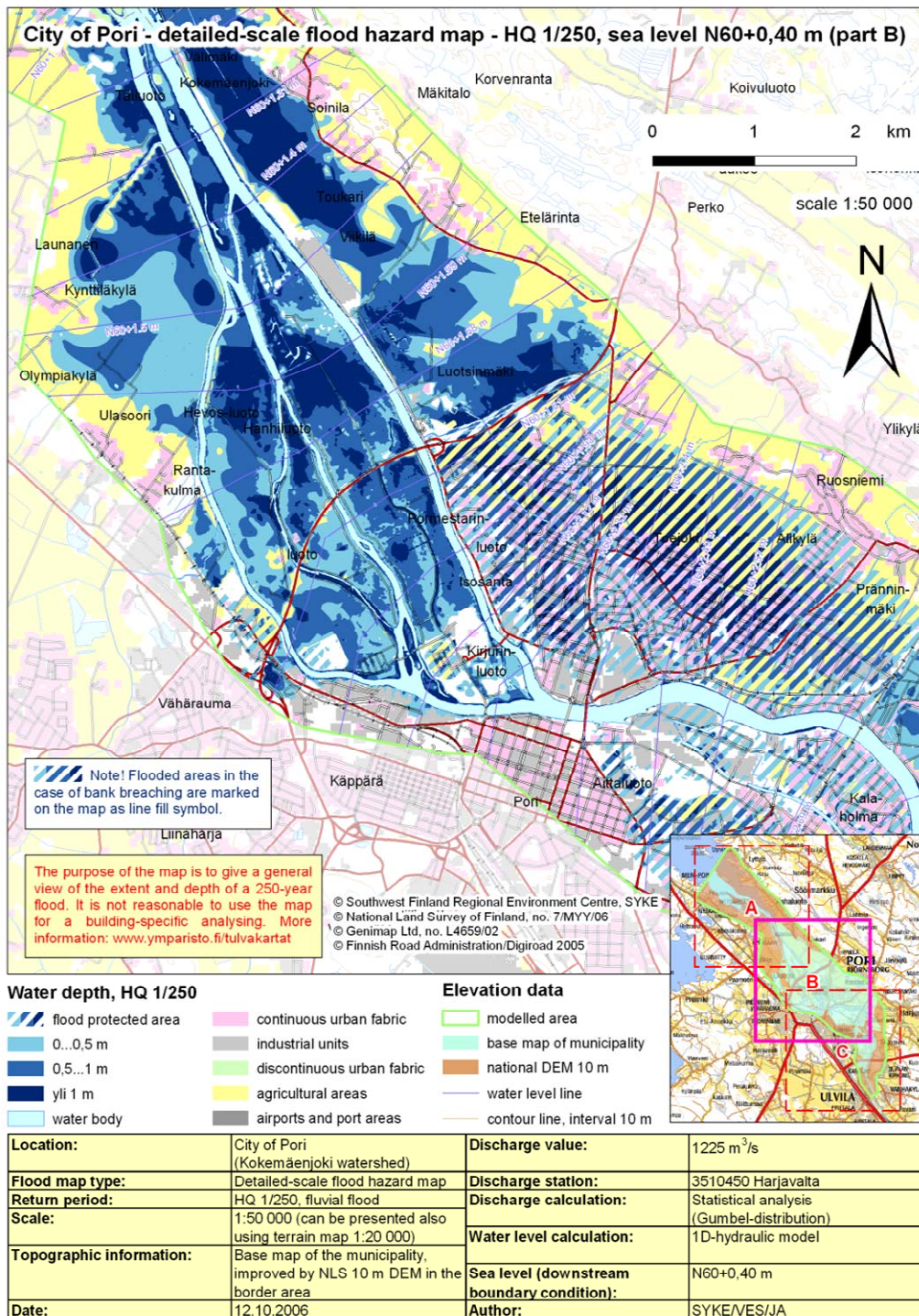
Za svaki scenarij trebaju biti navedeni sljedeći elementi:

- poplavna područja,
- dubina vode ili vodostaj, prema potrebi,
- prema potrebi, brzina toka ili protok vode.

Karte opasnosti od poplava rade se temeljem hidrološko – hidrauličkih analiza za područje koje je procijenjeno kao potencijalno poplavno - rizično područje. Uglavnom je potrebno izraditi situaciju s označenim područjem (površinom) koja bi bila poplavljena kod neke vjerojatnosti poplave (za odabrane scenarije). Ovisno o tome kakav je karakter tečenja vode (da li se radi o znatnijim brzinama tečenja koje bi mogle dodatno utjecati na veličinu štete i/ili o tečenju koje bi moglo na primjer uzrokovati onečišćenje nekog područja) poplavim područjima za odabrane scenarije potrebno je pridružiti i brzine tečenja vode. Na slici 2.5 dan je primjer karte poplavnog rizika, a na slici 2.6 dan je primjer karte poplavnog rizika s pridruženim brzinama tečenja.



Slika 2.5 Primjer karte opasnosti od poplava



Slika 2.6 Primjer karte opasnosti od poplava sa iskazanim dubinama vode

Karte rizika od poplava

Za izradu karte rizika od poplave potrebno je imati podlogu sa prikazom korištenja zemljišta. Iz tog prikaza, dalje je moguće procijeniti veličinu poplavne štete. Konačno potrebno je integrirati umnožak vjerojatnosti poplave i pripadajuće štete kako bi se dobila karta rizika. Ona u stvari prikazuje moguće štetne posljedice povezane s navedenim scenarijima iskazane u odnosu na:

- okvirni broj potencijalno ugroženog stanovništva,
- vrstu gospodarske aktivnosti na potencijalno pogođenom području,
- postrojenja koja bi mogla prouzročiti iznenadno onečišćenje u slučaju poplava, te potencijalno pogođena zaštićena područja utvrđena,
- ostale korisne informacije, poput navođenja područja na kojima se mogu javiti poplave sa značajnim pronosom nanosa i naplavina, te informacije o ostalim značajnim izvorima onečišćenja.

Iz gore navedenog može se zaključiti da je za određivanje rizika nužno odrediti veličinu štete koju bi izazvala poplava za pojedini scenarij. Postoji više metodologija za procjenu štete koje su upotrebljavaju u raznim zemljama, a koje se mogu koristiti. U nastavku ćemo prikazati jednu metodologiju koja vrijedi kod nas, a koristi se za procjenu šteta od elementarnih nepogoda. Ista bi se mogla koristiti i za potrebe izrade karte rizika od poplava.

Metodologija za procjenu štete od elementarnih nepogoda

Prema Metodologiji za procjenu štete od elementarnih nepogoda ("Narodne novine", broj 73/97), procjena šteta se radi za građevine, za opremu, za štetu na zemljištu te za ostale štete.

Šteta od elementarne nepogode procjenjuje se na građevini prema obrascu:

$$\check{S} = C \cdot A \cdot P \cdot E \text{ (u kunama)}$$

gdje su:

C - tržna cijena nove građevine po jedinici mjere (m³, m², m¹) objavljena od Državnog povjerenstva ili prosječna tržna cijena (samo troškovi građenja)

A - veličina građevine izražena u m³, m² ili m¹

P - oštećenje građevine kao cjeline izraženo kao decimalni broj (0 ≤ P ≤ 1,0)

E - koeficijent istrošenosti građevine.

Državno povjerenstvo objavljuje cijene početkom svake godine. Ako određene cijene nisu objavljene, na zahtjev županijskog povjerenstva Državno povjerenstvo će objaviti cijenu, ili dati uputu za proračun.

Veličina građevine određuje se za jedinicu mjere koja je primjerena utvrđenoj cijeni, na

primjer. za neto površinu, za dužni metar, za kubni metar i slično. Kod građevine tipa stambenih ili poslovnih zgrada prvo se izračuna bruto površina. Zatim se neto površina izračunava množenjem bruto površine koeficijentom K, gdje je K=0,65 za kamene, 0,70 za starije zidane, 0,80 za suvremene zidane i armiranobetonske zgrade i 0,85 za zgrade od čelika i drva. Pri utvrđivanju bruto površine građevine površine pomoćnih prostorija (garaža, podruma, stubišta, ostava, pušnica, ljetnih kuhinja i sl.) množe se faktorom 0,5.

Oštećenje "P" utvrđuje stručno povjerenstvo komisijskim pregledom oštećene građevine. Oštećenje se izražava brojevima od 0,0 do 1,0 u koracima po 0,10. Za uništenu građevinu oštećenje je P=1,00.

Vijek trajanja građevine određuje stručno povjerenstvo. Tipični vijek trajanja za stambene i poslovne zgrade je 100 godina, a za gospodarske zgrade fizički osoba 50 godina. Vijek trajanja ostalih vrsta građevina uzima se prema podacima koje objavljuje Državno povjerenstvo. Pri procjeni štete za građevine kulturne baštine uzima se koeficijent istrošenosti 1,0.

Starost građevine [godine]	Koeficijent istrošenosti građevine	
	Vjerojatno trajanje 50 g	Vjerojatno trajanje 100 g
0-10	0,90	0,96
11-20	0,78	0,90
21-30	0,62	0,84
31-40	0,42	0,78
41-50	0,20	0,70
51-60		0,62
61-70		0,52
71-80		0,42
81-90		0,32
91-100		0,20
Preko 100		0,20

Procjena štete na opremi radi se temeljem obrasca:

$$\check{S} = C \cdot E \cdot P \text{ (u kunama)}$$

gdje su:

C - nabavna maloprodajna cijena nove opreme

E - koeficijent istrošenosti opreme u vrijeme elementarne nepogode, Tablica 5.

P - oštećenje opreme u elementarnoj nepogodi izraženo kao decimalni broj ($0 < P < 1,0$)

Pri određivanju nabavne cijene dopušteno je uzeti cijenu najbližnje opreme približno jednakih tehničkih svojstava.

Vijek trajanja opreme i koeficijent istrošenosti (E) određuje stručno povjerenstvo.

Oštećenje "P" utvrđuje stručno povjerenstvo komisijskim pregledom oštećene opreme. Oštećenje se izražava brojevima od 0,0 do 1,0. Za uništenu opremu oštećenje je $P=1,00$.

KOEFIJIENTI ISTROŠENOSTI OPREME	
Nova ili do 1/3 vijeka trajanja	1,00
Od 1/3 do 2/3 vijeka trajanja	0,70
Od 2/3 do 1/1 vijeka trajanja	0,40
Veća od vijeka trajanja	0,30

Procjena štete na zemljištima radi se za tri kategorije zemljišta, za poljoprivredno zemljište, za šumsko zemljište i za građevinsko zemljište.

Ostale štete čine štete na dugogodišnjim nasadima, štete na šumama, štete u stočarstvu, štete na obrtnim sredstvima i štete na tekućoj poljoprivrednoj proizvodnji

Planovi upravljanja poplavnim rizicima

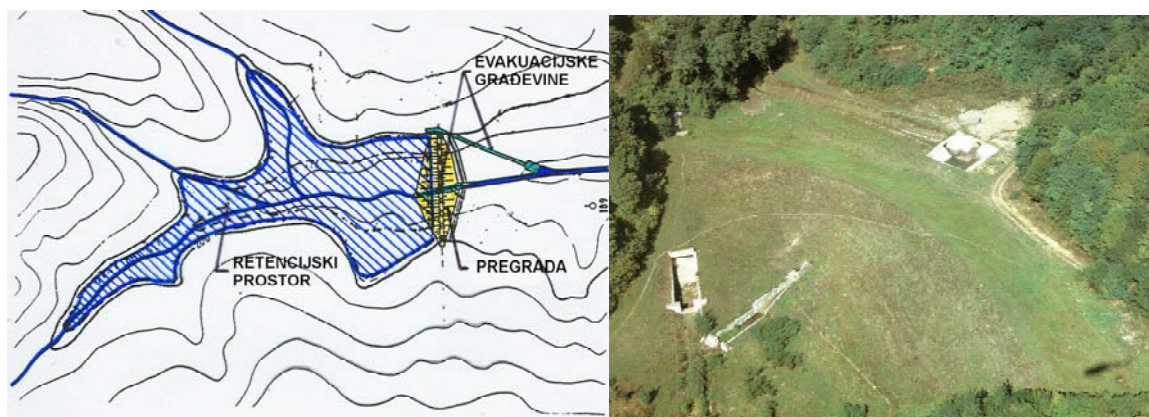
Konačni korak u izradi procjene i upravljanja poplavnim rizicima je izrada Planova upravljanja poplavnim rizicima. Uključuju mjere za ostvarivanje sljedećih osnovnih ciljeva:

- Moraju uzeti u obzir relevantne aspekte poput troškova i koristi, prostornog obuhvata poplava i putova otjecanja poplavnih voda i područja koja imaju mogućnost zadržati poplavne vode, poput prirodnih poplavnih područja, ciljeva zaštite okoliša, gospodarenja tlom i vodama, prostornog planiranja, korištenja zemljišta, očuvanja prirode, plovidbe i lučke infrastrukture.
- Moraju obuhvatiti sve aspekte upravljanja poplavnim rizicima, s fokusom na prevenciju, zaštitu, pripravnost, uključujući prognoze poplava i sustave ranog upozoravanja, te uzimajući u obzir značajke određenog riječnog sliva ili podsliva.
- Planovi upravljanja poplavnim rizicima mogu uključivati i promoviranje održivih praksi korištenja zemljišta, bolje zadržavanje vode, kao i kontrolirano plavljenje određenih područja u slučaju poplave

3. RETENCIJE I ANALIZE RADA RETENCIJA

Prema definiciji, retencije su uređeno područje u slivu vodotoka predviđeno za vremenski kraće zadržavanje vode u svrhu zaštite od poplava. Njima se regulira vodni režim vodotoka. Učinak retencije se očituje smanjivanjem maksimalnog protoka koji prolazi vodotokom na nizvodnom području i produljivanjem trajanja velikih voda (isti volumen vode se kroz vodotok propušta dulje vrijeme). Poznajemo dva tipa retencija, čelne i bočne retencije.

Retencije se mogu izvoditi na način da se ulaz vode ne kontrolira, a da se kontrolira samo izlaz vode iz retencijskog prostora. To se postiže pregrađivanjem vodotoka, a retencijom se upravlja tako da se uz pomoć zatvarača regulira najveći protok koji se ispušta nizvodno od pregrade (ispušta iz retencije). Ovakv tip tzv. čelnih retencija najčešće se izvodi u gornjim djelovima sliva. Prikaz jedne takove retencije dan je na slici 3.1.

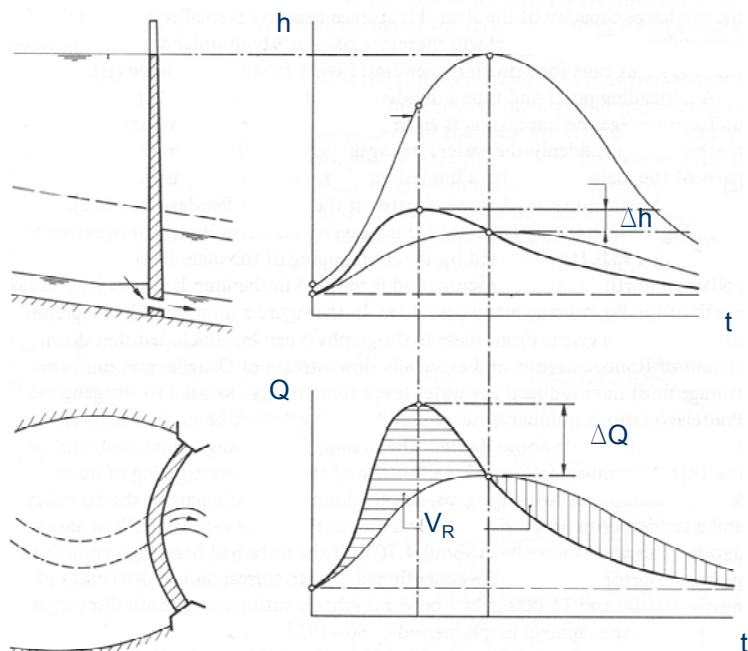


Slika 3.1 Shematski tlocrtni prikaz čelne retencije i fotografija pregrade

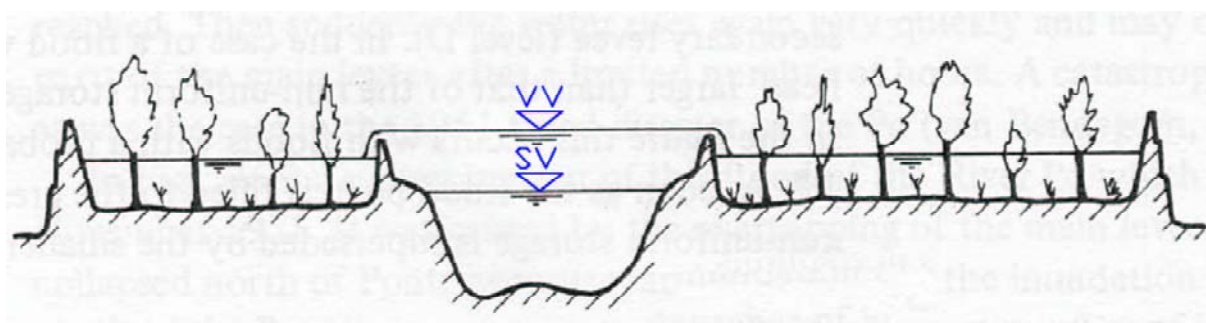
Učinak jedne ovakve retencije zorno je prikazan na hidrogramu vodnog vala na slici 3.2. Prirodni vodni val karakteriziran je svojim trajanjem, volumenom i maksimalnim protokom. Retencijom se isti vodni val transformira na način da se promjeni duljina trajanja i veličini maksimalnog protoka u smislu njegovog smanjivanja za veličinu ΔQ . Drugim riječima ovakvom retencijom nizvodno područje štiti se od velike vode na način da smanjujemo veličinu maksimalnog protoka. U retencijskom prostoru se privremeno zadrži volumen vode V_R koji se ispušta u korito vodotoka nizvodno kada je ono sposobno provesti tu vodu. Dakle kontrolirano ispuštamo vodu iz retencije pazeći da kapacitet korita nizvodno ne bude pramašen. Prilikom prolaska vodnog vala kroz retenciju možemo razlučiti dvije faze. Prva faza, koju nazivamo fazom punjenja, javlja se kada je dotok vode u retencijski prostor veći nego li je protok vode koji propuštamo u nizvodno područje. Trenutak kulminacije se javlja kada se izjednače dotok i odtok, nakon čega nastupa faza pražnjenja retencije.

Isto tako retencije se mogu izvoditi na način da se i pune i prazne kontrolirano. Tada se lociraju paralelno s vodotokom. Obično ih nazivamo bočnim retencijama. Primjerenije su donjim djelovima gornjeg toka i srednjim tokovima vodotoka (mjesto gdje su riječne doline relativno široke). Punjenje se takovih retencija obavlja ili preljevanjem preko bočnog preljeva na nasipu, rušenjem privremenih nasipa ili otvaranjem zapornica na ustavama u nasipu. Nakon što prođe opasnost od poplava, nizvodnog područja retencije, putem zapornica na ustavi voda se vraća u vodotok. Ustave ovog tipa retencija mogu biti upusno-ispusne, samo

upusne ili samo ispusne, ovisno o tome da li se kroz njih voda i upuša i ispušta iz retencija ili se samo upušta i samo ispušta iz retencija.



Slika 3.2 Shematski prikaz rada retencije



Slika 3.3 Shematski prikaz presjeka bočnih retencija i fotografija retencije u radu

Veličina retencije, odnosno retencijskog prostora ovisi o hidrološkim prilikama, veličini raspoloživog prostora i veličini maksimalnog protoka koji može prihvatiti vodotok nizvodno od retencije.



Slika 3.4 Bočni preljev i ustave na Savi

3.1 Hidraulički proračun retencije

Hidraulički proračun retencija je nestacionarni problem. Pojednostavljenije proračuna moguće je uz zanemarivanje utjecaja tečenja kroz retencijski prostor, pa se može napisati jednačba kontinuiteta:

$$Q_{sr}^{ul} - Q_{sr}^{iz} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad 3.1$$

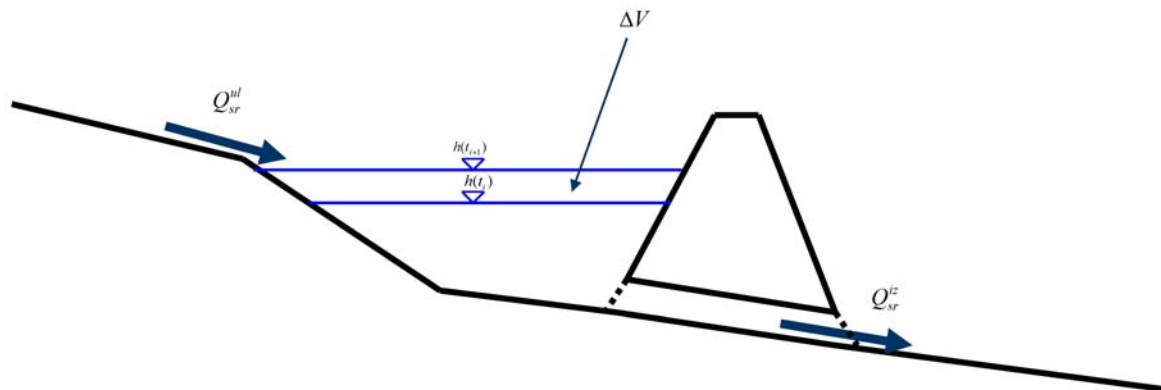
Gdje su:

Q_{sr}^{ul} -- Srednji protok dotjecanja u retenciju u vremenskom intervalu Δt

Q_{sr}^{iz} - Srednji protok otjecanja iz retencije u vremenskom intervalu Δt

ΔV - Promjena volumena vode u retenciji u vremenskom intervalu Δt

Δt - Vremenski diskretizacijski interval



Slika 3.5 Definijska skica rada retencije

Ukoliko uvedemo diskretizaciju po vremenu, jednadžba 3.1 može se napisati u obliku:

$$\frac{Q_i^{ul} + Q_{i+1}^{ul}}{2} - \frac{Q_i^{iz} + Q_{i+1}^{iz}}{2} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t} \quad 3.2$$

Gdje su:

Q_i^{ul} - protok vode koja utječe u retenciju u trenutku i

Q_{i+1}^{ul} - protok vode koja utječe u retenciju u trenutku $i+1$

Q_i^{iz} - protok vode koja istječe iz retencije u trenutku i

Q_{i+1}^{iz} - protok vode koja istječe iz retencije u trenutku $i+1$

V_i - volumen vode u retenciji u trenutku i

V_{i+1} - volumen vode u retenciji u trenutku $i+1$

i - indeks vremenskog intervala

Prebacivanjem na lijevu stranu nepoznate veličine, a na desnu stranu poznate veličine, jednadžba 3.2 prelazi u oblik:

$$\left(\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + Q_{i+1}^{iz} \right) = (Q_i^{ul} + Q_{i+1}^{ul}) + \left(\frac{2V_i}{\Delta t} - Q_i^{iz} \right) \quad 3.3$$

Nepoznate veličine vezane su zakonom istjecanja iz retencije, dok su poznate veličine definirane podacima iz ulaznog hidrograma i iz prethodnog koraka u proračunu. Ulazni hidrogram predstavlja zakonitost promjene protoka u vremenu vodnog vala koji ulazi u retencijski prostor. Na slici 3.5 prikazani su članovi jednadžbe kontinuiteta retencije i njihova atribucija.

NEPOZNATE VELIČINE POZNATE VELIČINE

$$\left(\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + Q_{i+1}^{iz} \right) = (Q_i^{ul} + Q_{i+1}^{ul}) + \left(\frac{2V_i}{\Delta t} - Q_i^{iz} \right)$$

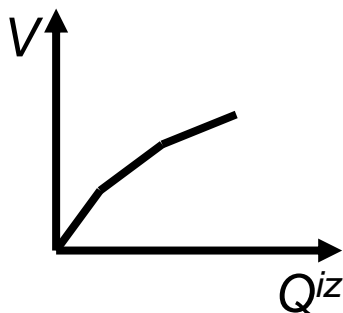
VELIČINE VEZANE ZAKONOM ISTJECANJA IZ RETENCIJE IZ ULAZNOG HIDROGRAMA IZ PRETHODNOG KORAKA PRORAČUNA

Slika 3.5 Članovi jednadžbe kontinuiteta retencije s atribucijom

Proračun rada retencije kao rezultat mora dati izgled izlaznog hidrograma, odnosno zakonitost promjene protoka u vremenu vodnog vala koji izlazi iz retencije u nizvodni vodotok. Da bi se uz pomoć jednadžbe 3.3 mogla obaviti ta zadaća, moramo imati niz definiranih zakonitosti, odnosno funkcijskih veza između volumena retencije, vodostaja u retenciji, površine retencije i protoka izlaza iz retencije. U nastavku će se opisati sve potrebne zakonitosti i kako do njih možemo doći.

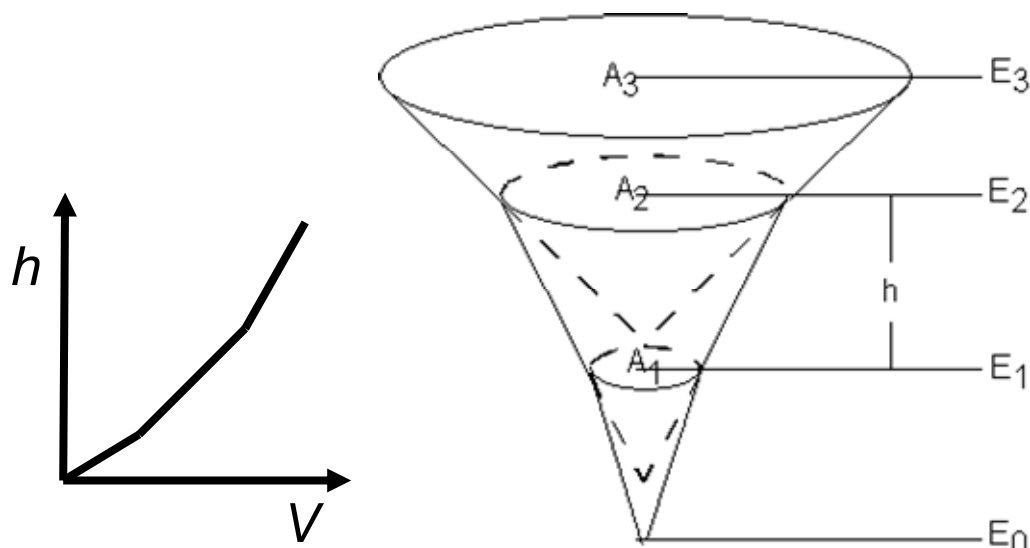
Veličine vezane zakonom istjecanja iz retencije

Potrebno je poznavati funkcijsku vezu između volumena retencije V i protoka istjecanja iz retencije Q^{iz}

Slika 3.6 Funkcijska veza između volumena retencije V i protoka istjecanja iz retencije Q^{iz}

Obje veličine (volumen retencije V i protoka istjecanja iz retencije Q^{iz}) zavisne su o dubini vode u retenciji pa će biti potrebno odrediti odnose volumena retencije V i dubine vode h , te odnosa dubine vode u retenciji h i protoka istjecanja vode iz retencije Q^{iz} .

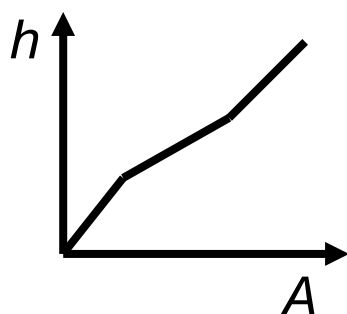
Odnos volumena retencije V i dubine vode h dobiva se iz geometrije područja koje je predviđeno za zadržavanje vode (geodetska izmjera terena).



$$\Delta V = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2})$$

Slika 3.7 Postupak određivanja funkcijske veze između volumena retencije V i dubine vode h

Isto tako za proračun prirasta volumena vode u retenciji za prirast dubine potrebno je poznavati njihovu funkcijsku vezu.



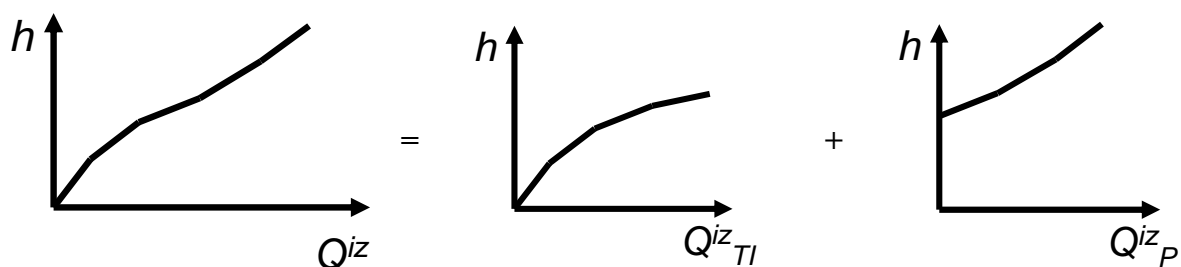
Slika 3.7 Funkcijska veze između površine retencije A i dubine vode h

Odnos površine retencije A i dubine vode h dobiva se također iz geometrije područja koje je predviđeno za zadržavanje vode (geodetska izmjera terena).

Odnosa dubine vode u retenciji h i protoka istjecanja vode iz retencije Q^{iz} sastoji se od barem dva dijela. Jedan se odnosi na istjecanje vode kroz temeljni ispust Q^{iz}_{TI} , a drugi se odnosi na istjecanje vode preko preljeva Q^{iz}_P .

$$Q^{iz} = Q^{iz}_{TI} + Q^{iz}_P$$

3.4



Slika 3.8 Funkcijska veza između dubine vode u retenciji h i protoka istjecanja vode iz retencije Q^{iz}

Zavisnost dubine vode i istjecanja vode kroz temeljni ispust Q^{iz}_{TI} , obično se određuje iz rješavanja problema istjecanja kroz cijev sa slobodnim vodnim licem do ispunjenja i pod tlakom, dok se odnos dubine vode i istjecanja preko preljeva Q^{iz}_P određuje iz jednadžbe preljeva.

S obzirom na režim istjecanja moguće su dvije vrste proračuna za dobivanje protočne krivulje:

- a) hidraulički proračun tečenja sa slobodnim vodnim licem
- b) hidraulički proračun tečenja pod tlakom

Proračun tečenja sa slobodnim vodnim licem, pretpostavljajući jednoliko tečenje, provodi se pomoću Mannigove formule s Mannigovim koeficijentom hrapavosti, n [$m^{-1/3}s$], koja za srednju brzinu, v [m/s] glasi:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad 3.5$$

gdje su:

R – hidraulički radijus [m],
 I – pad dna kanala

Protok se određuje iz jednadžbe kontinuiteta:

$$Q = v \cdot A \quad 3.6$$

gdje je A [m^2] protjecajna površina.

Protočna krivulja za ispust iz retencija kod tečenja pod tlakom određena je pomoću Bernoullijeve jednadžbe za stacionarno strujanje realne tekućine koja glasi:

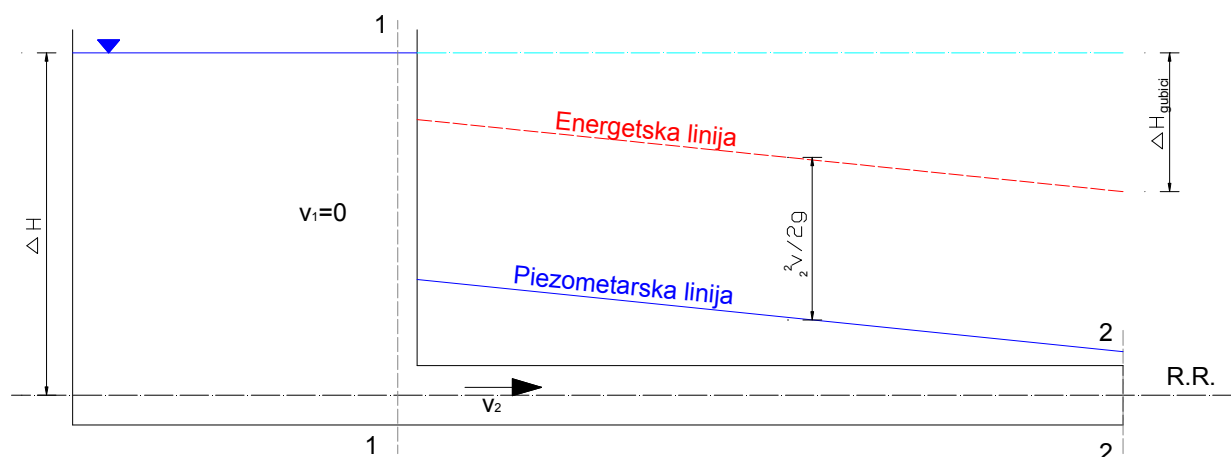
$$h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta H \quad 3.7$$

gdje su:

- h_1 (h_2) – geodetska visina za presjek 1 (presjek 2)
- $\frac{p_1}{\rho \cdot g}$ ($\frac{p_2}{\rho \cdot g}$) – tlačna visina za presjek 1 (presjek 2)
- $\frac{v_1^2}{2 \cdot g}$ ($\frac{v_2^2}{2 \cdot g}$) – brzinska visina za presjek 1 (odnosno presjek 2)
- ΔH - gubitaci mehaničke energije
- α – Coriolisov koeficijent

Na slici 3.9 može se vidjeti prikaz spremnika sa cjevovodom koji shematski prikazuje istjecanje iz retencije. Prema takvoj zadanoj shemi jednažba 3.7 prelazi u:

$$\Delta H = \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta H_{gubici} \quad 3.8$$



Slika 3.9 Grafički prikaz vodospremnika sa cjevovodom

Gubitak energije ΔH_{gubici} sastoji se od lokalnih i linijskih gubitaka (3.8).

$$\Delta H_{gubici} = \sum \Delta H_{lok} + \sum \Delta H_{lin} \quad 3.9$$

Gubici mehaničke energije uslijed lokalnih otpora izračunavaju se po izrazu

$$\Delta H_{lok} = \xi_{lok} \frac{v_{lok}^2}{2 \cdot g} \quad 3.10$$

gdje je ξ_{lok} koeficijent lokalnog gubitka.

Linjski gubici određeni se preko Darcy – Weisbach-ove jednažbe:

$$\Delta H_{lin} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad 3.11$$

gdje su:

λ – koeficijent trenja

L – duljina cjevovoda [m]

D – promjer cjevovoda [m]

v – srednja brzina strujanja [m/s]

g – ubrzanje sile teže [m²/s]

Pod pretpostavkom turbulentnog strujanja u hidraulički hrapavim cijevima koeficijent λ računa se pomoću Colebrook – White-ove formule:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{k}{D} + 1,14 \quad 3.12$$

gdje je k/D relativna hrapavost.

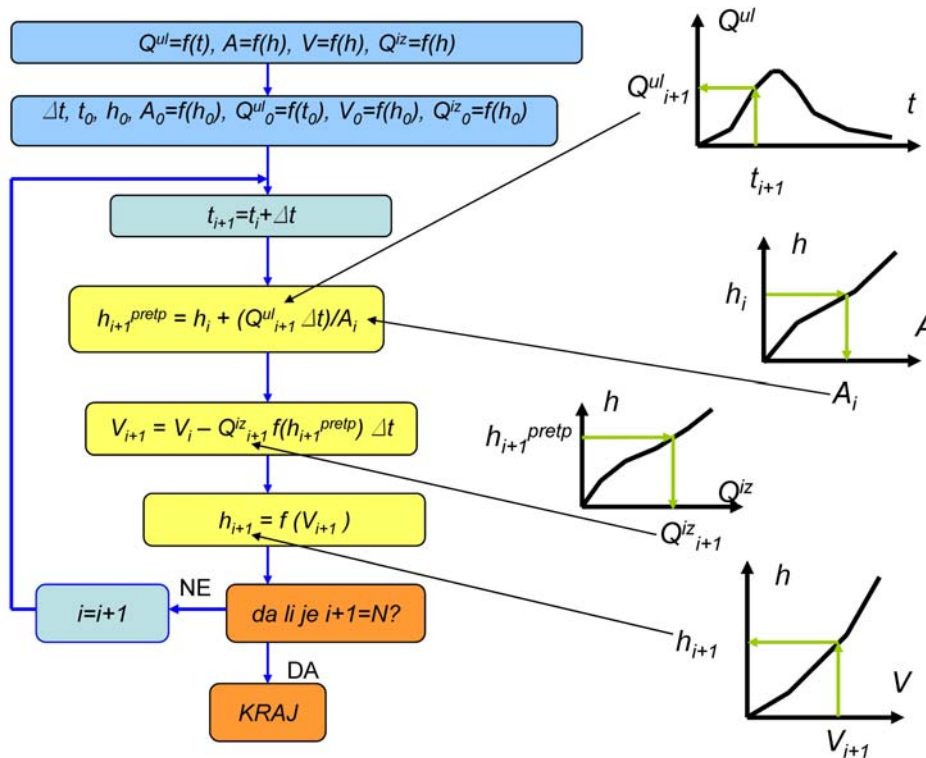
Postupak proračuna retencijskog efekta prikazan je na dijagramu toka na slici 3.10. Nakon što se odrede sve funkcijske zavisnosti proračun započinje s odabirom nultog vremenskog trenutka. Tada je prema ulaznom hidrogramu vrijeme neposredno prije početka pojave vodnoga vala. Protok koju ulazi u retenciju bazni je protok i jednak je onome koji izlazi iz retencije ($Q_i^{ul} = Q_i^{iz}$). Nakon toga pomičemo se za jedan vremenski inkrement Δt , odnosno $t_{i+1} = t_i + \Delta t$. Iz ulaznog hidrograma očitamo vrijednost protoka vode koja utječe u retenciju u tome trenutku (Q_{i+1}^{ul}). Pretpostavimo vodostaj u retenciji korištenjem funkcijske veze između površine retencije A_i i vodostaja prema izrazu

$$h_{i+1}^{pretp} = h_i + (Q_{i+1}^{ul} \Delta t) / A_i. \quad 3.13$$

Odredimo koliki je protok izlaza iz retencije Q_{i+1}^{iz} za tako dobiven vodostaj h_{i+1}^{pretp} iz funkcijske zavisnosti vodostaja i protoka izlaza iz retencije. Volumen vode u retenciji V_{i+1} odredimo iz jednažbe

$$V_{i+1} = V_i - Q_{i+1}^{iz} f(h_{i+1}^{pretp}) \Delta t. \quad 3.14$$

Konačno vodostaj u retenciji h_{i+1} očitamo iz funkcijske veze volumena vode u retenciji i vodostaja. Istu proceduru ponavljamo s time da se vremenski pomaknemo za jedan inkrement Δt .



Slika 3.10 Dijagram toka proračuna retencijskog učinka

3.2 Proračun retencijskog učinka kod složenih slivova

Proračuni retencijskog učinka kod složenih slivova vrlo je zahtjevna zadaća. Razlog je u tome što je uobičajeni kriterij za određivanje dimenzije retencije maksimalni protok izlaza iz retencije određenog povratnog perioda. Općenito je, kada govorimo o slivovima, odnosno vodotocima na njima, **unaprijed nemoguće odrediti koja će kiša fiksnog PP i intenziteta, a različitog trajanja, dati veći protok na pojedinim mjestima na vodotoku.**

Iz toga razloga je potrebno izraditi niz hidrološko – hidrauličkih proračuna za različite slučajeve kišnih događaja. Treba varirati kiše različitih trajanja i intenziteta kako bi se za svaki povratni period odredila kiša koja daje maksimalni protok na pojedinim točkama na vodotoku.

S druge strani krajnji nam je cilj odrediti opasnost od poplava. Metoda određivanja opasnosti od poplava sastoji se od više koraka. Prvenstveno treba odrediti kritična mjesta na slivu na kojima je primijećena smanjena propusnost korita. Ta mjesta nazivamo kritičnim točkama

(KT) ili kritičnim dionicama. Na tim mjestima (ili dionicama) potrebno je odrediti kapacitet korita.

Nadalje treba izraditi hidrološko-hidraulički model sliva, unutar kojeg su definirani svi njegovi elementi (karakteristike sliva, površine, hidrografska mreža sa svim elementima korita vodotoka, retencije na slivu i njihove hidrauličke značajke, hrapavosti svih elemenata, itd.).

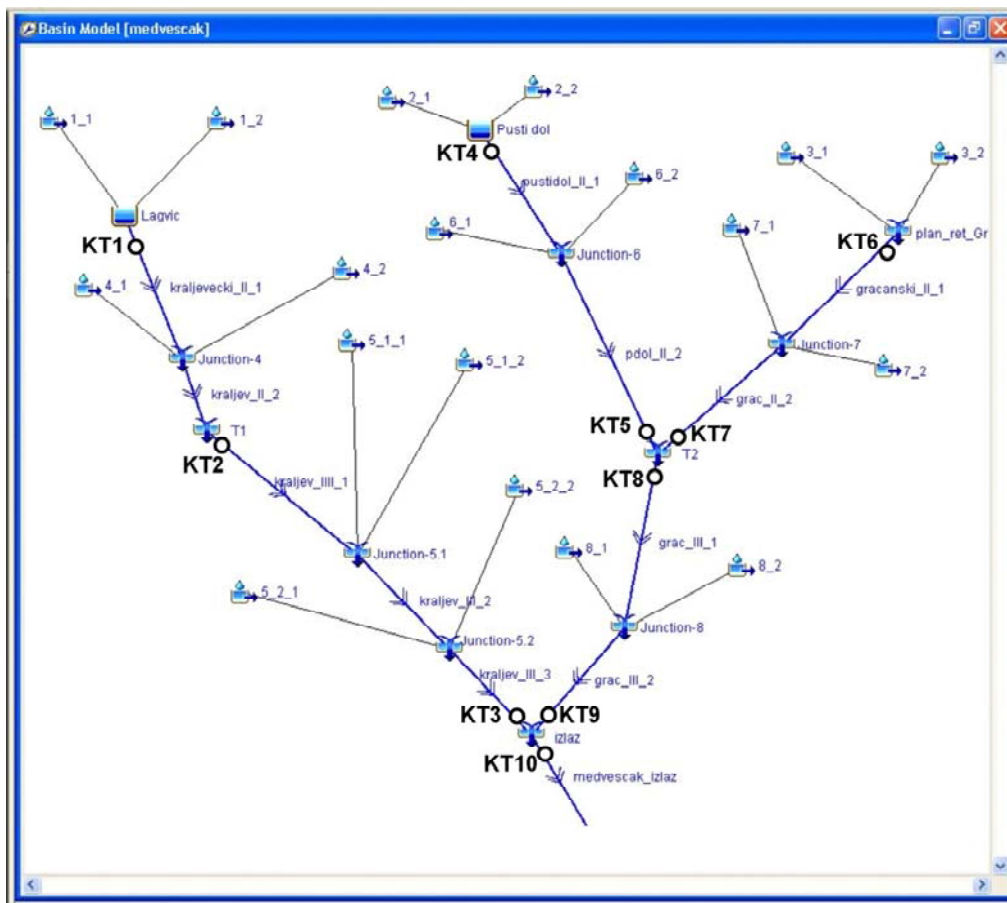
Dalje se provede proračuni vodnih valova na kritičnim točkama, za razne intenzitete i trajanja kiša. Pri tome se svakoj od navedenih kišnih situacija pridružuje povratni period određen odnosom intenzitet-trajanje-povratni period (ITP krivulje).

Iz dobivene veze povratnih perioda i pripadnih maksimalnih protoka, može se, na temelju poznatog kapaciteta korita na kritičnim točkama, odrediti stupanj premašenja kapaciteta korita na pojedinoj kritičnoj točki.

Navedenu metodu najbolje je prezentirati na primjeru koji se daje u nastavku

Primjer proračuna kod sliva potoka Medveščak

Prvenstveno je potrebno načiniti model cijeloga sliva sa svim geometrijskim i hidrauličkim parametrima. Na slici 3.11 dan je shematski prikaz sliva, na kojem su prikazani svi vodotoci, svi podslivovi i međuslivovi, sve retencije i mjesta identificirana kao kritične točke. Za svaki vodotok određeni su njegovi geometrijski parametri (poprečni profil, uzdužni pad, duljina) te hidraulički parametar hrapavosti. Podslivovi i međuslivovi definirani su sa svojim fizičkim karakteristikama (površina, oblik, pad, propusnost, hrapavost, ...). Retencije su određene svim funkcijskim vezama između volumena retencije, vodostaja u retenciji, površine retencije i protoka izlaza iz retencije.



Slika 3.11 Shema sliva potoka Medveščak

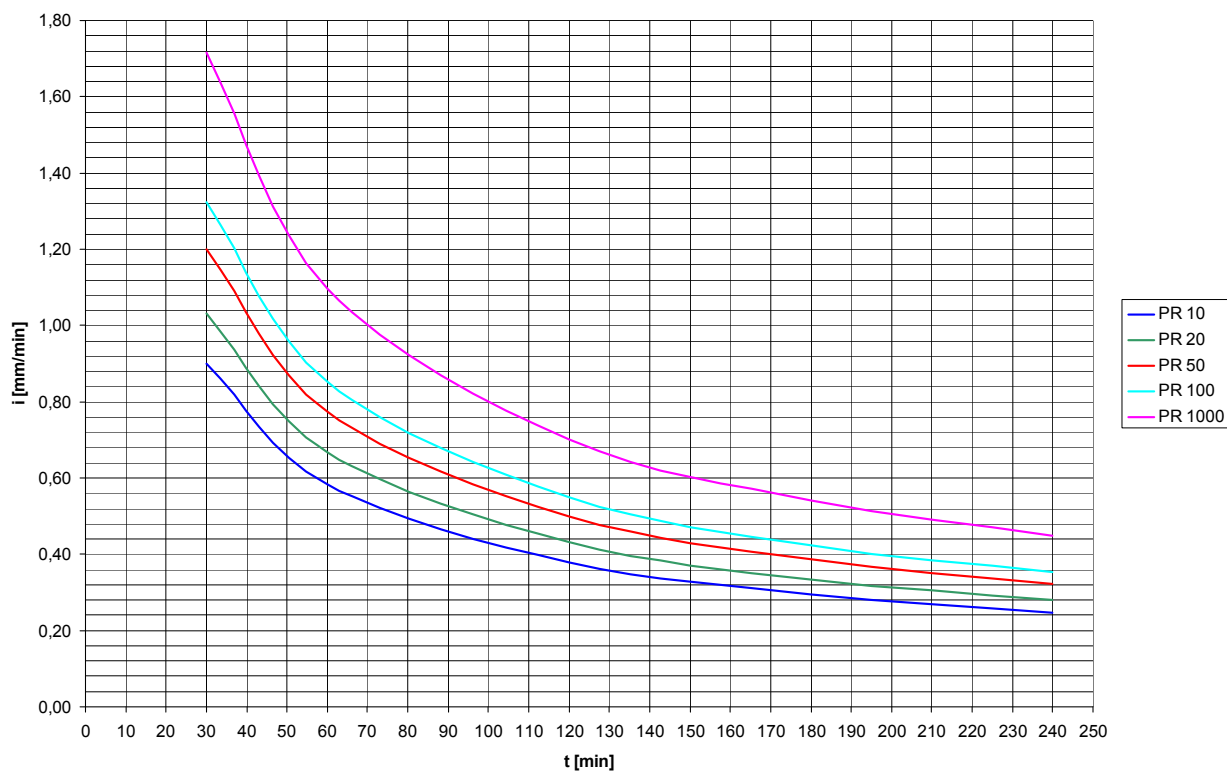
Kritične točke na slivu određene su kapacitetom korita (tablica 3.I)

KRITIČNA TOČKA	KAPACITET KORITA [m ³ /s]
KT1	10
KT2	12
KT3	20
KT4	11
KT5	4
KT6	14
KT7	8
KT8	8
KT9	28
KT10	60

Tablica 3.I Kapaciteti korita na mjestima kritičnih točaka

Sljedeća priprema podataka sastoji se u definiranju oborina za koje će se obavljati proračuni. Oborine su određene familijom ITP krivulja (slika 3.12).

ITP krivulje za 1B područje grada Zagreba



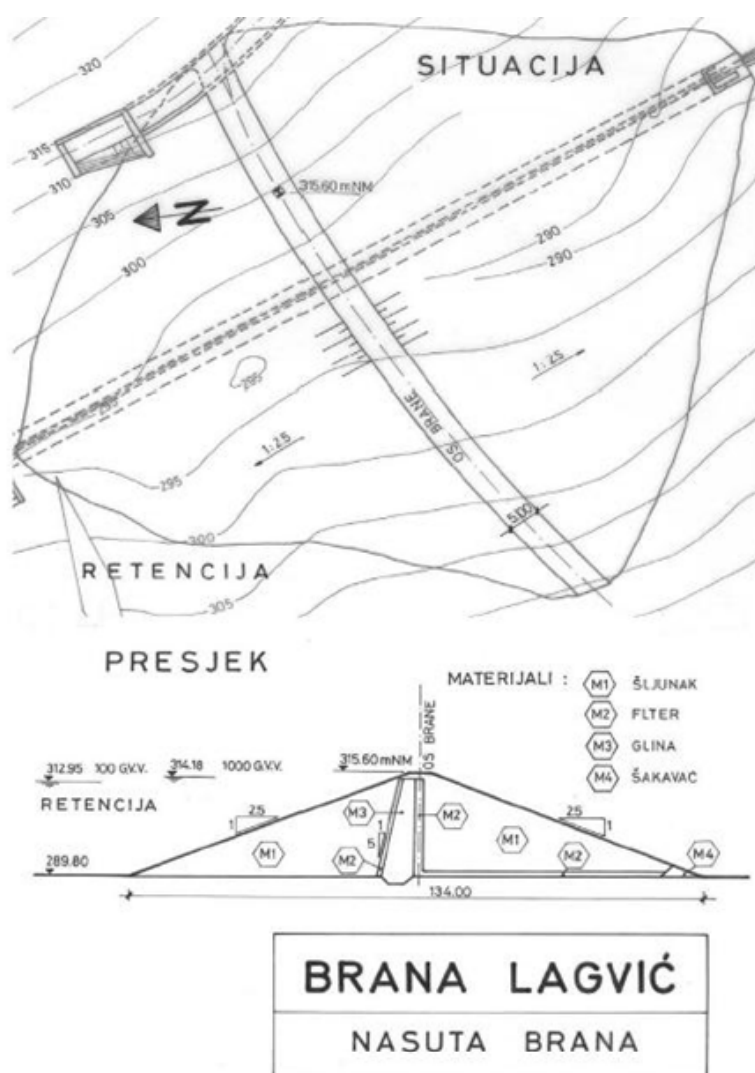
Slika 3.12 ITP krivulje za grad Zagreb, 1B područje

Iz definiranih familija ITP krivulja potrebno je odabrati set podataka za koje će se izrađivati hidrološko – hidraulički proračun. Pri tome treba uzeti u račun dovoljno veliki broj podataka kako bi se mogli dobiti relevantni podaci kao rezultat proračuna. Koji puta neće biti moguće otprve izabrati reprezentativni set podataka za sliv, već će se podaci morati nadopunjavati. Za konkretan primjer odabran je set podataka prikazan u tablici 3.II.

povratni period [godina]	trajanje oborina [min]								
	60	90	120	150	180	240	330	480	
10	60	90	120	150	180	240	330	480	
20	60	90	120	150	180	240	330	420	480
50	60	90	120	150	180	240	330	420	
100	60	90	120	150	180	240	330	420	
1000	30	60	90	120	150	180	240	330	

Tablica 3.II Odabrane situacije oborina iz ITP krivulja za proračune

Funkcijske veze između volumena retencije, vodostaja u retenciji, površine retencije i protoka izlaza iz retencije dobivene su temeljem geometrijskih i hidrauličkih karakteristika retencija. U nastavku je dan niz slika i fotografija na kojima su dane spomenute karakteristike (slike 3.13 do 3.17).



(Preuzeto iz: Geokon baza podataka, 2001.)

3.13 Situacija i presjek brane Lagvić

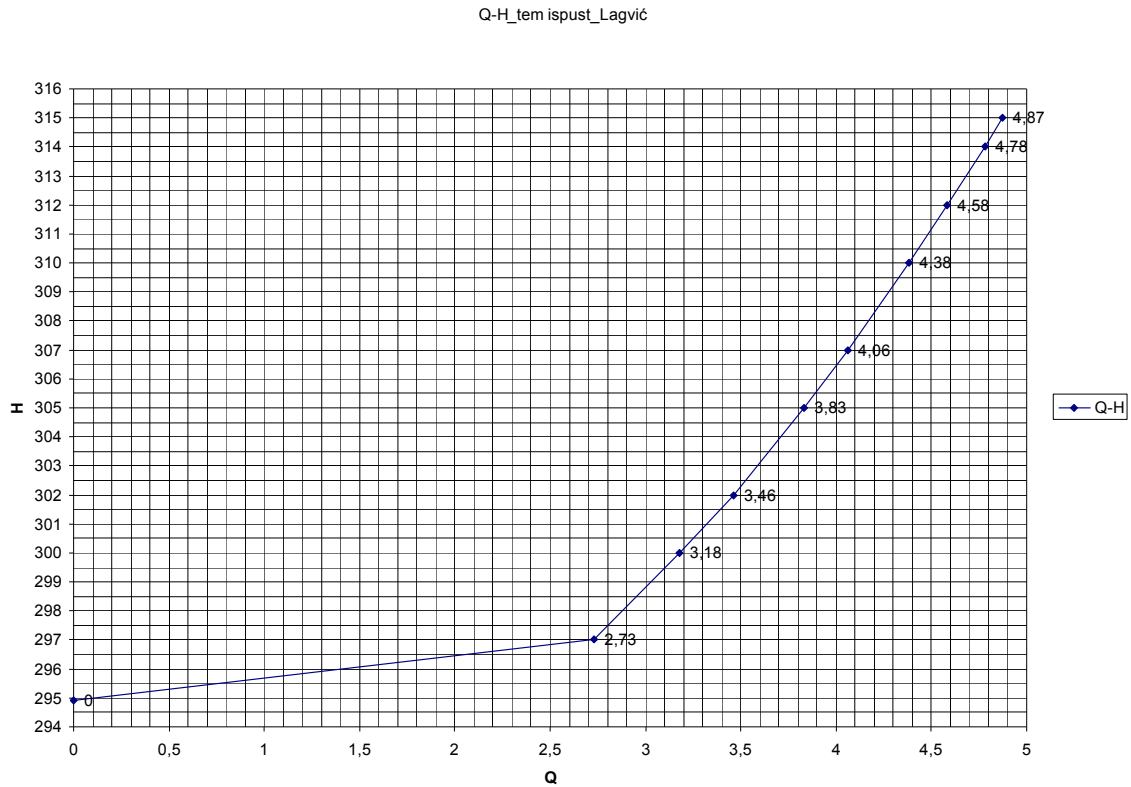
Slika



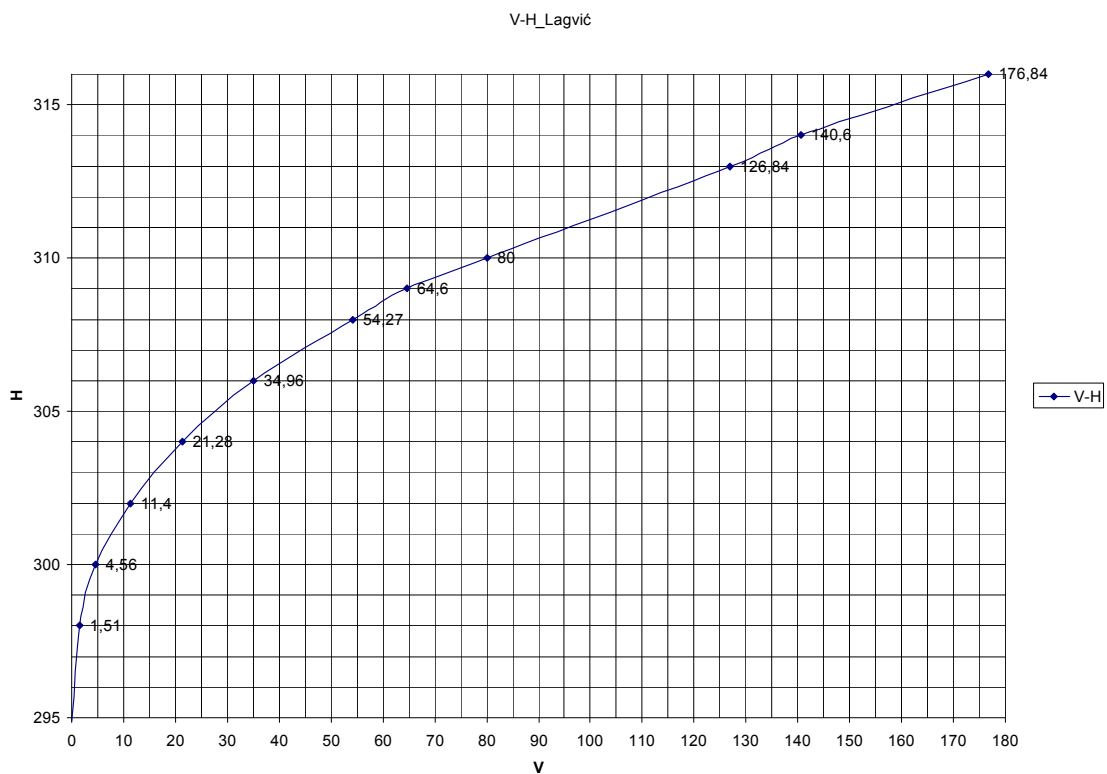
Slika 3.13 Ulaz u temeljni ispust i bočni preljev brane Lagvić



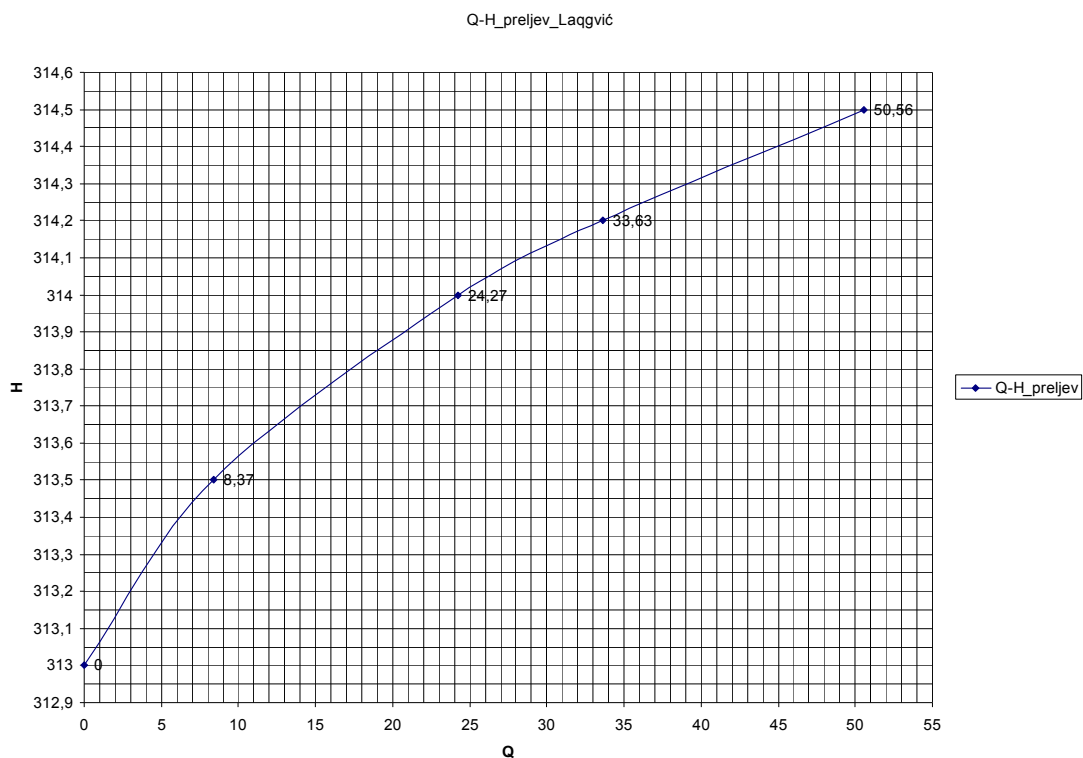
Slika 3.14 Nizvodna strana brane, brzotoci bočnog preljeva i temeljnog ispista brane Lagvić



Slika 3.15 Protočna krivulja temeljnog ispusta brane Lagvić



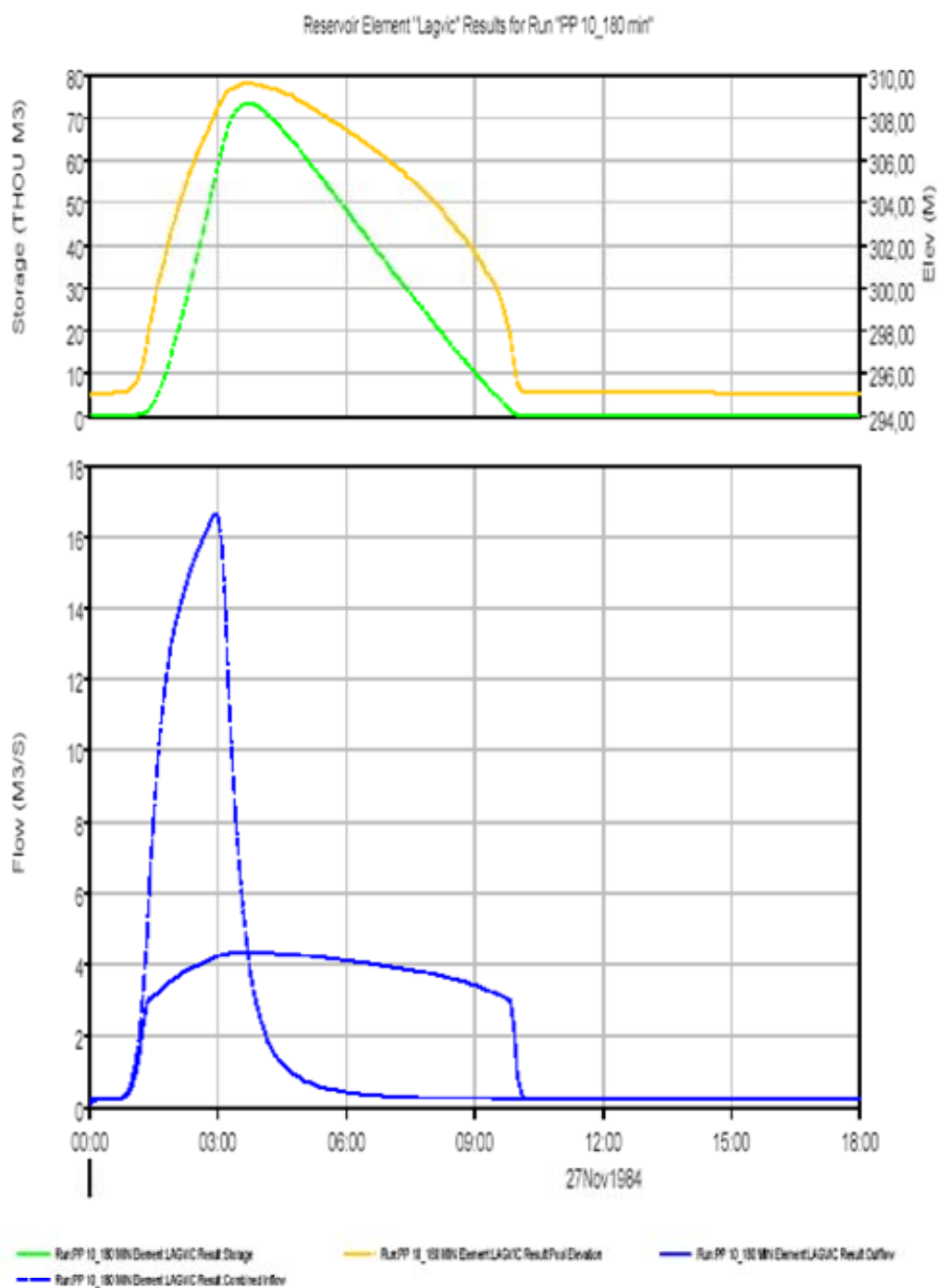
Slika 3.16 Krivulja volumena retencije brane Lagvić



Slika 3.17 Protočna krivulja bočnog preljeva brane Lagović

Rezultati proračuna

Nastavno će biti prikazani rezultati proračuna, odnosno samo dio najzanimljivijih prikaza koji ilustriraju cijeli postupak.

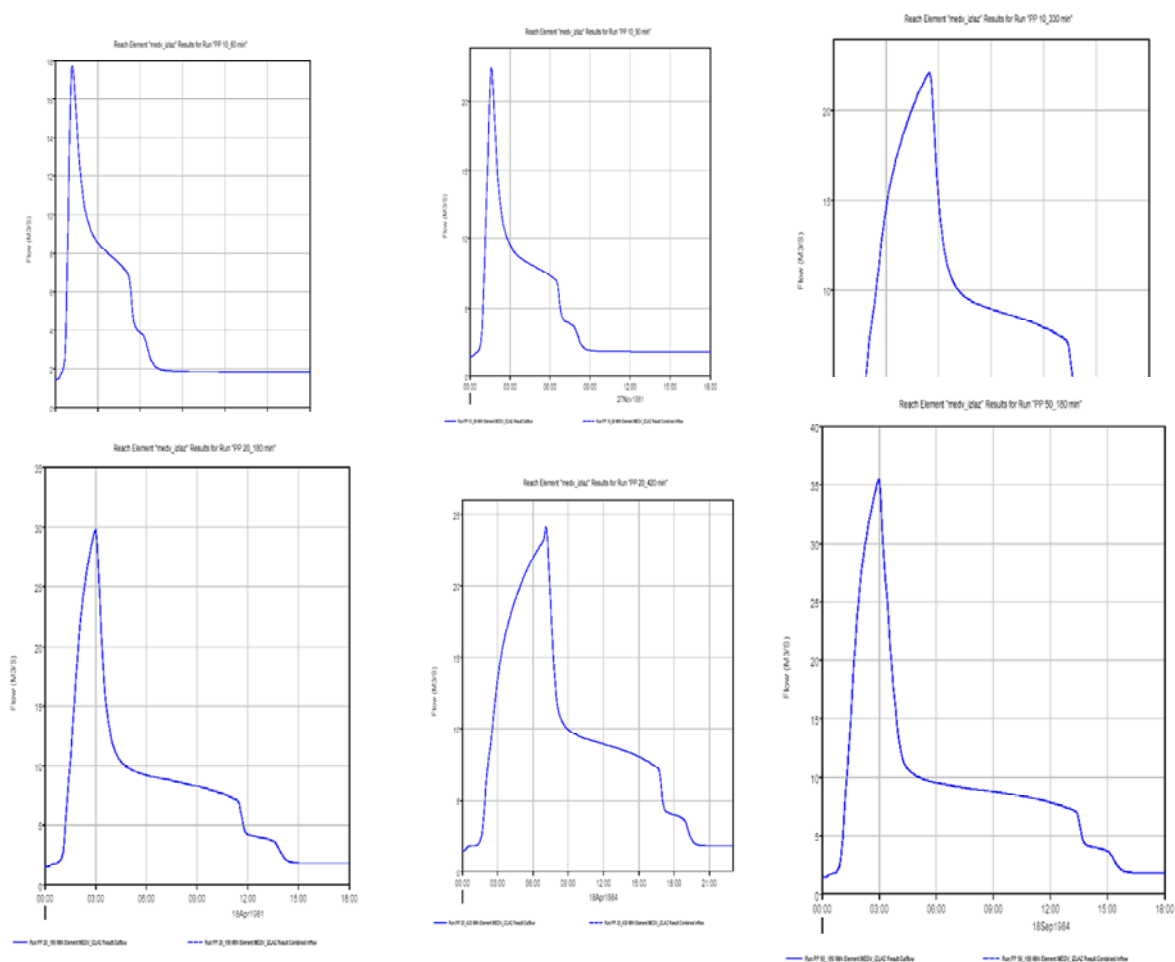


Slika 3.18 Prikaz izlaznih rezultata za retenciju Lagvić kod kiše PP 10 godina i trajanja 180 minuta

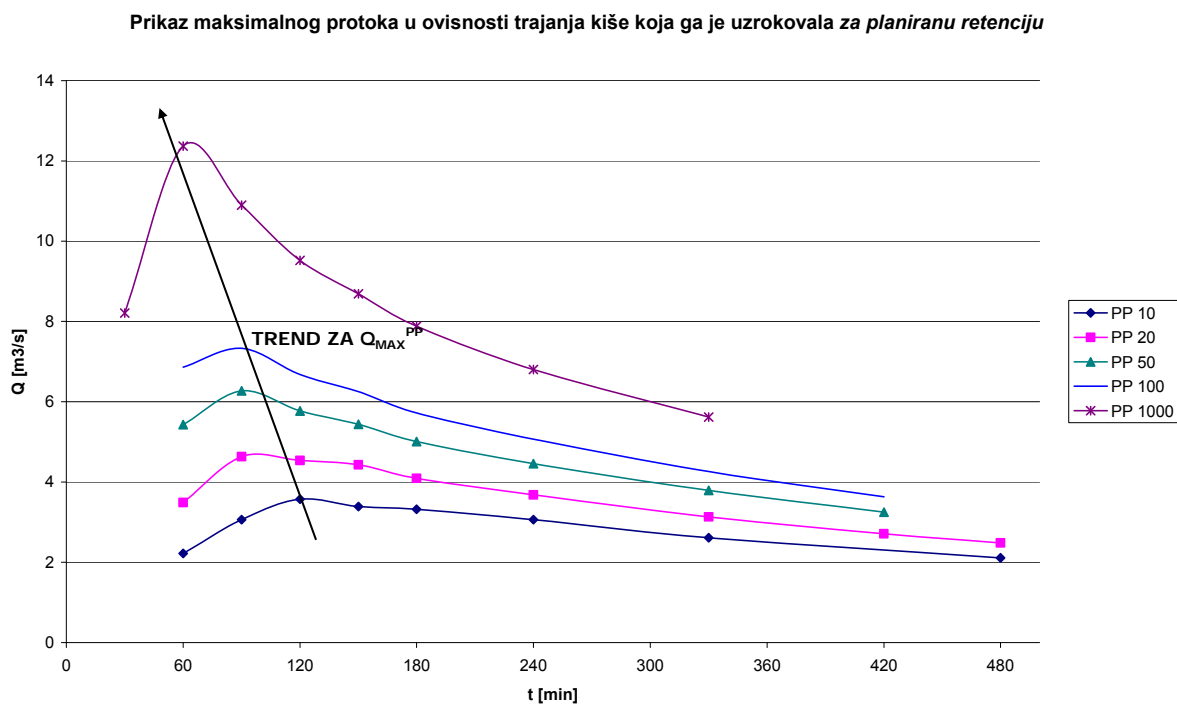
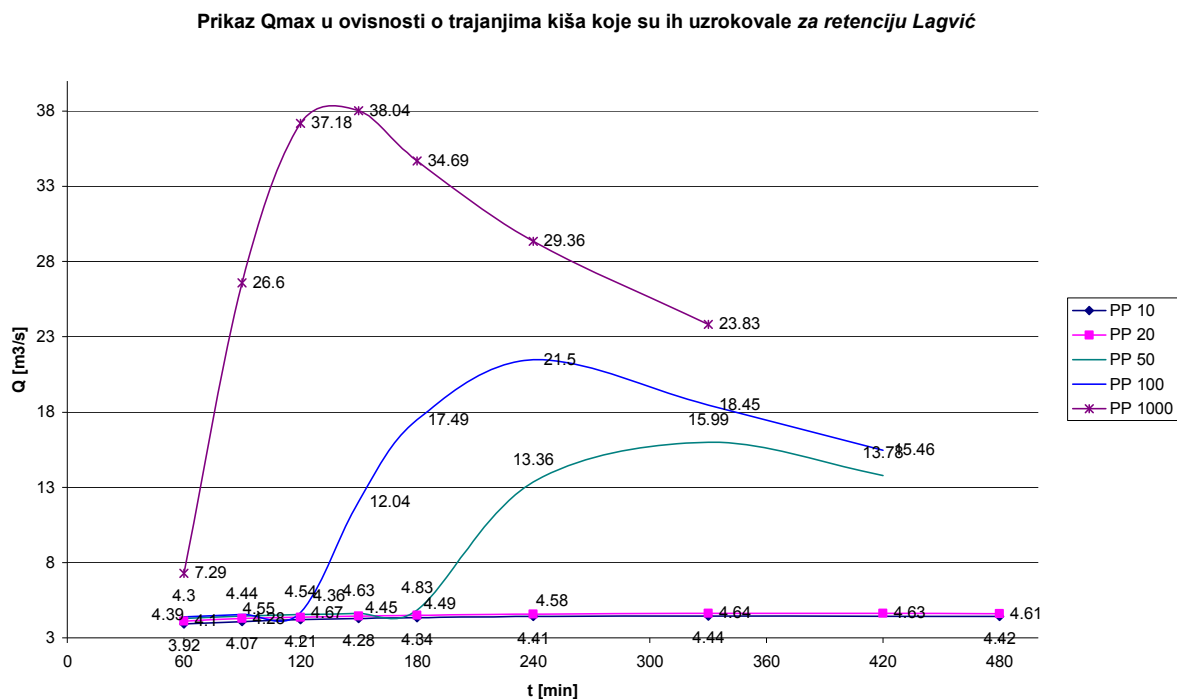
Redoslijed privedene analize sastoji se od sljedećih koraka:

- Za kritične točke se za različite kišne situacije izrade hidrogrami (svaki hidrogram odgovara jednoj kiši jednog trajanja i jednog povratnog perioda), primjer na slici 3.19.
- Izrade se krivulje najvećih maksimalnih vrijednosti protoka iz hidrograma za različite povratne periode i trajanja kiše (za svaku kritičnu točku), primjer na slikama 3.20. i 3.21.
- Iz krivulja najvećih maksimalnih vrijednosti protoka očitaju se najveće vrijednosti za pojedini povratni period i izrade zavisnosti PP-Q_{max} (za svaku KT), primjer na slici 3.22.
- Iz tih se krivulja za kapacitet korita očita pripadajući povratni period. Inverzna vrijednost povratnog perioda predstavlja vjerojatnost da će doći do izlivanja vode iz korita.

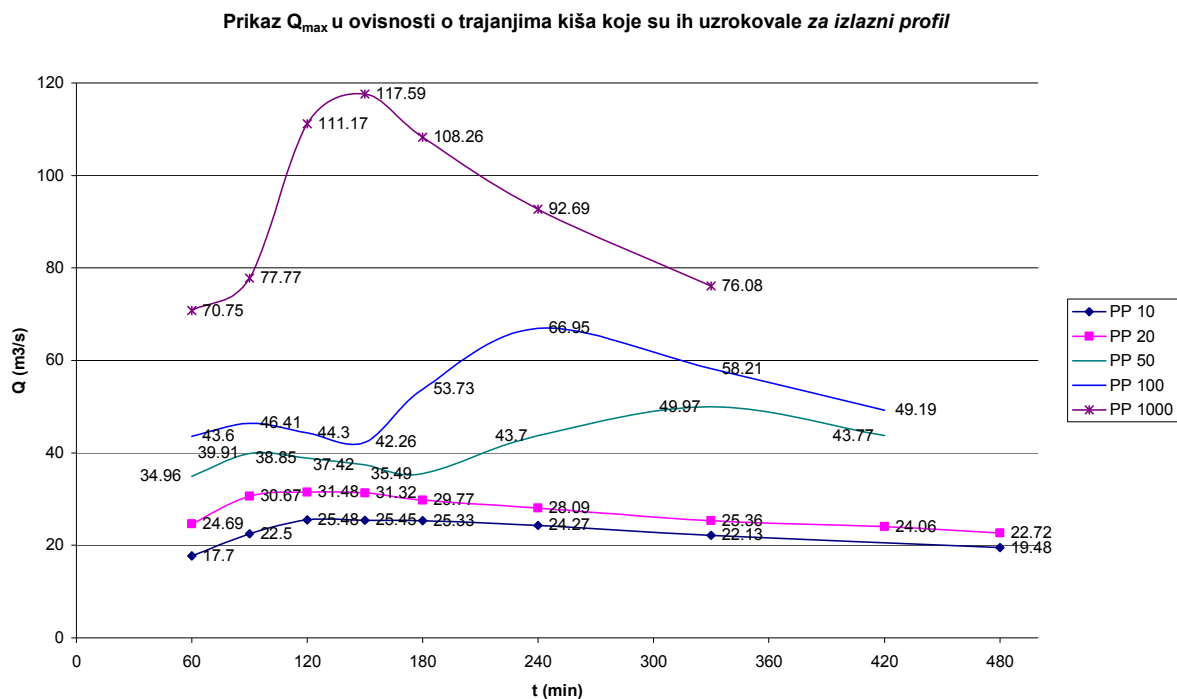
Hidrogrami za kritične točke za različite kišne situacije (svaki hidrogram odgovara jednoj kiši jednog trajanja i jednog povratnog perioda)



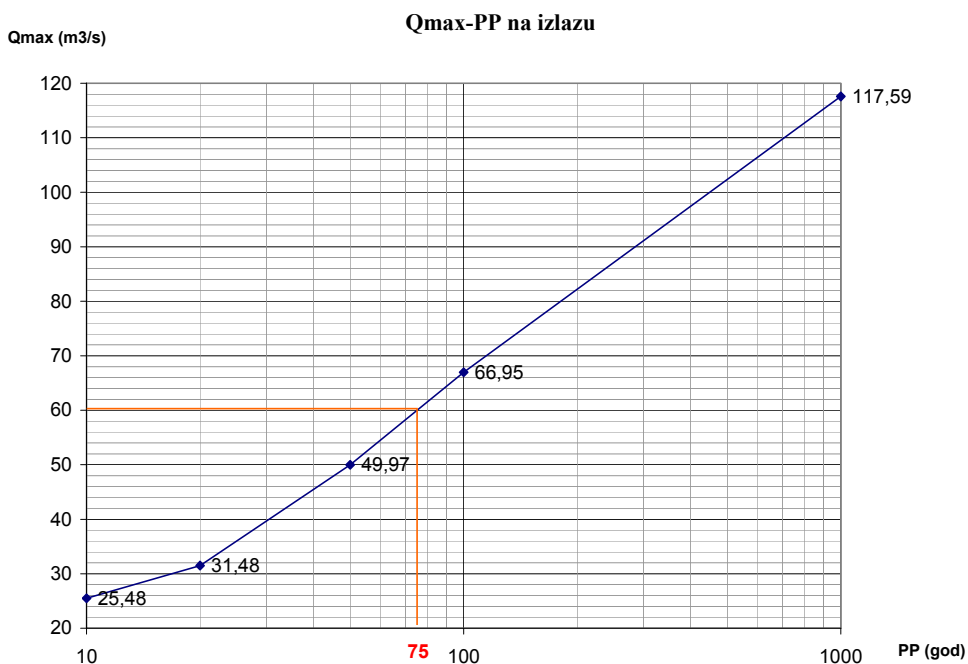
Slika 3.19 Neki od hidrograma za kritičnu točku KT10 kod kiša različitih trajanja i PP



Slika 3.20 Krivulje najvećih maksimalnih vrijednosti protoka iz hidrograma za različite povratne periode i trajanja kiše (za kritične točke KT1 i KT6)



Slika 3.21 Krivulje najvećih maksimalnih vrijednosti protoka iz hidrograma za različite povratne periode i trajanja kiše (za kritičnu točku KT10). Treba prokomentirati postojanje lokalnih ekstrema na krivuljama za PP 100 i PP 50 godina, što nam ukazuje na potrebu provođenja proračuna za dovoljan broj trajanja kiše, kako ne bi slučajno zbog neke uštede u vremenu „promašili“ pravi maksimum i zbog toga izveli krive zaključke.



Slika 3.22 Zavisnost najvećih maksimalnih vrijednosti protoka za pojedini povratni period : PP- Q_{max} (za KT10)

Konačno, nakon svih provedenih analiza potrebno je kapacitetu korita pridružiti pripadajući povratni period i odrediti vjerojatnosti da će doći do izlivanja vode iz korita. Na tablici 3.III prikazani su rezultati te analize za prikazani primjer.

KRITIČNA TOČKA	KAPACITET KORITA [m ³ /s]	PP [godina]	VJEROJATNOST
KT1	10	32	0,0313
KT2	12	25	0,0400
KT3	20	18	0,0556
KT4	11	26	0,0385
KT5	4	7,5	0,1333
KT6	14	>1000	>0,0010
KT7	8	24	0,0417
KT8	8	5	0,2000
KT9	28	63	0,0159
KT10	60	75	0,0133

Tablica 3.III Zaključni rezultati analize sliva potoka Medveščak za prikazani primjer.

Na kraju treba zaključiti da je za prikazani primjer bilo potrebno provesti veliki broj proračuna za:

- 5 povratnih perioda (10, 20, 50, 100 i 1000 godina)
- 8 trajanja kiše (iz raspona 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 330, 420 i 480 min)
- 10 kritičnih točaka na slivu

Što ukupno iznosi $5 \times 8 \times 10 = 400$ proračuna. Broj provedenih proračuna za bio potreban samo za jednu geometriju retencija. Proporcionalno broju varijantnih rješenjima povećava se i broj potrebnih analiza i on može dosegnuti stvarno veliki broj. No ta nas činjenica nikako ne smije obeshrabriti i pokolebati u procesu iznalaženja najboljeg tehničkog rješenja sa aspekta zaštite od poplava.