

Numerička simulacija hidrauličkih posledica havarija na Pepelištu “Kostolac”



Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet
www.grf.bg.ac.rs

Dr Miodrag Jovanović
Dr Radomir Kapor
Dr Dejan Komatina
Mr Dejana Đorđević
Nenad Stefanović

Sadržaj

- I. Projekat (ciljevi, karakteristike)
- II. Matematički model (koncept, razvoj, ...)
- III. Rezultati numeričkih simulacija (3 lokacije)
- IV. Zaključci

|

PROJEKAT

“Elaborat hidrauličkih posledica
u slučaju havarije pepelišta TE Kostolac”

Osnovni podaci o Projektu:

Ugovorne strane (broj ugovora):

- J.P. Elektroprivreda Srbije, TE “Kostolac” (3200 od 2.08.2002.)
- Građevinski fakultet Beograd, Institut za hidrotehniku (43130/2 od 1.08.2002.)

Ciljevi projekta:

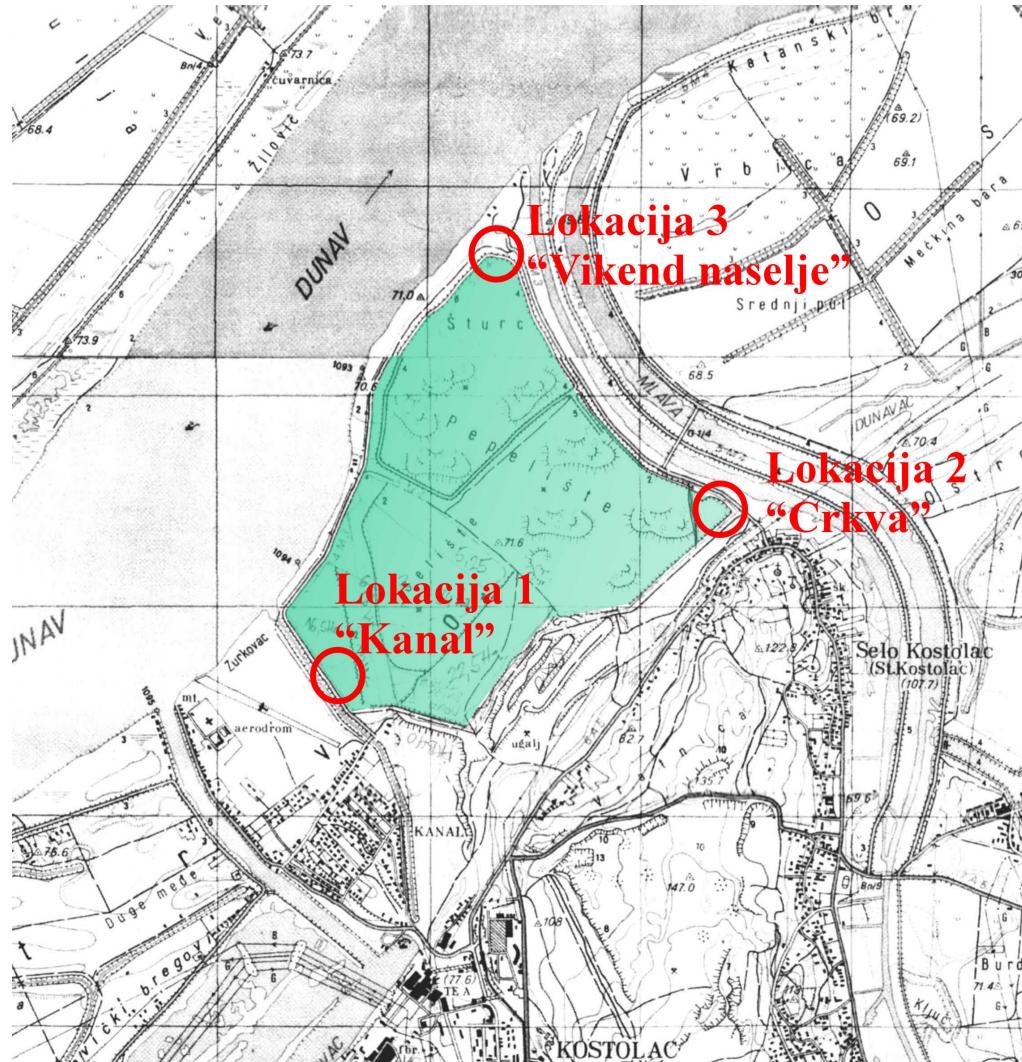
Određivanje hidrauličkih posledica eventualne havarije nasipa na Pepelištu “Kostolac”:

- plavne površine
- maksimalne kote nivoa
- maksimalni protoci
- brzina prostiranja talasa

Rezultati iz ovog projekta su osnova za izradu

“Projekta sistema osmatranja i obaveštavanja (SOO) na potencijalno ugroženom području”

Računske varijante



Osnovna karakteristika Projekta: **istraživački, a ne rutinski posao !**

Razlozi:

- u svetu ne postoji *opšte prihvaćen pristup* proračunu prostiranja talasa od fluidizovanog (raskvašenog) pepela;
- nepoznata svojstava fluida – *mešavine vode i pepela*;
- specifični topografski uslovi iziskuju primenu modela *ravanskog* - prostorno dvodimenzionog (2D) tečenja.

II

MATEMATIČKI MODEL

Problemi matematičkog modeliranja havarije na pepelištu

1. Definisanje načina rušenja nasipa
2. Procena zapreme poplavnog talasa
3. Procena koncentracije pepela mešavini
4. Izbor reološkog modela fluidizovanog pepela
5. Numerička simulacija ravanskog tečenja
u složenim geometrijskim uslovima
6. Kalibracija i provera računskog modela

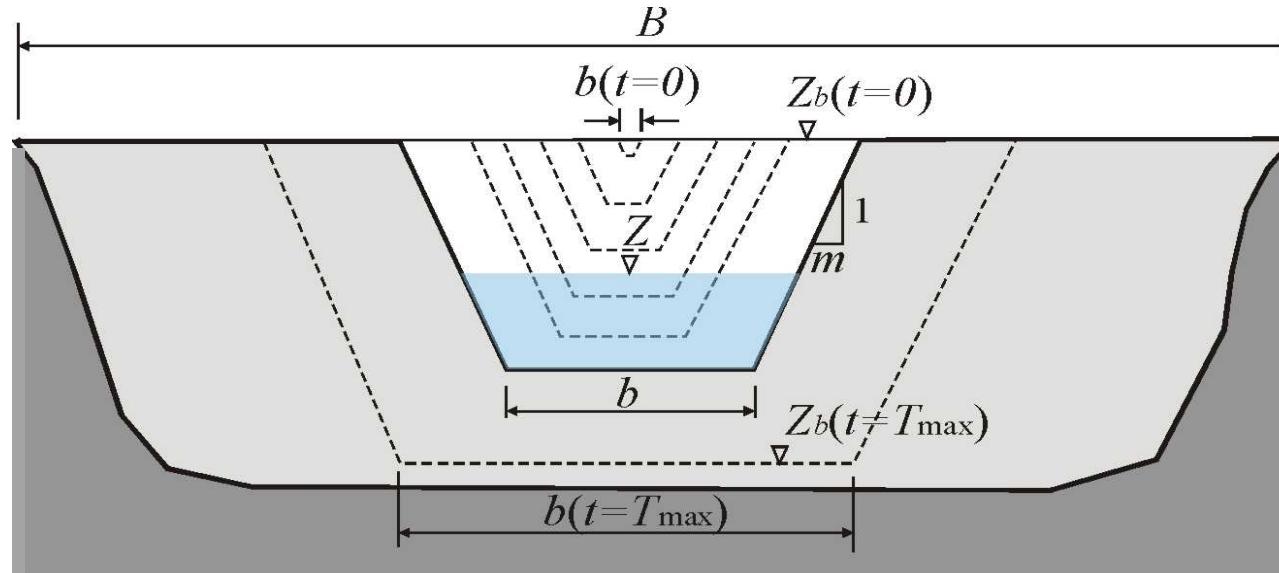
Konceptualni pristup: Lanac matematičkih modela

- 
1. Model rušenja nasipa
 - dinamika rušenja
 - zapremina otekle mešavine vode i materijala
 - izlazni talas iz deponije
 2. Model *linijskog neustaljenog tečenja* mešavine
 - karakteristike fluida (reološki model)
 - način prostiranja talasa u kanalu ili reci
 3. Model *ravanskog neustaljenog tečenja* mešavine
 - karakteristike fluida (reološki model)
 - način prostiranja talasa u ravnici,
gde nema jasno određenog pravca tečenja

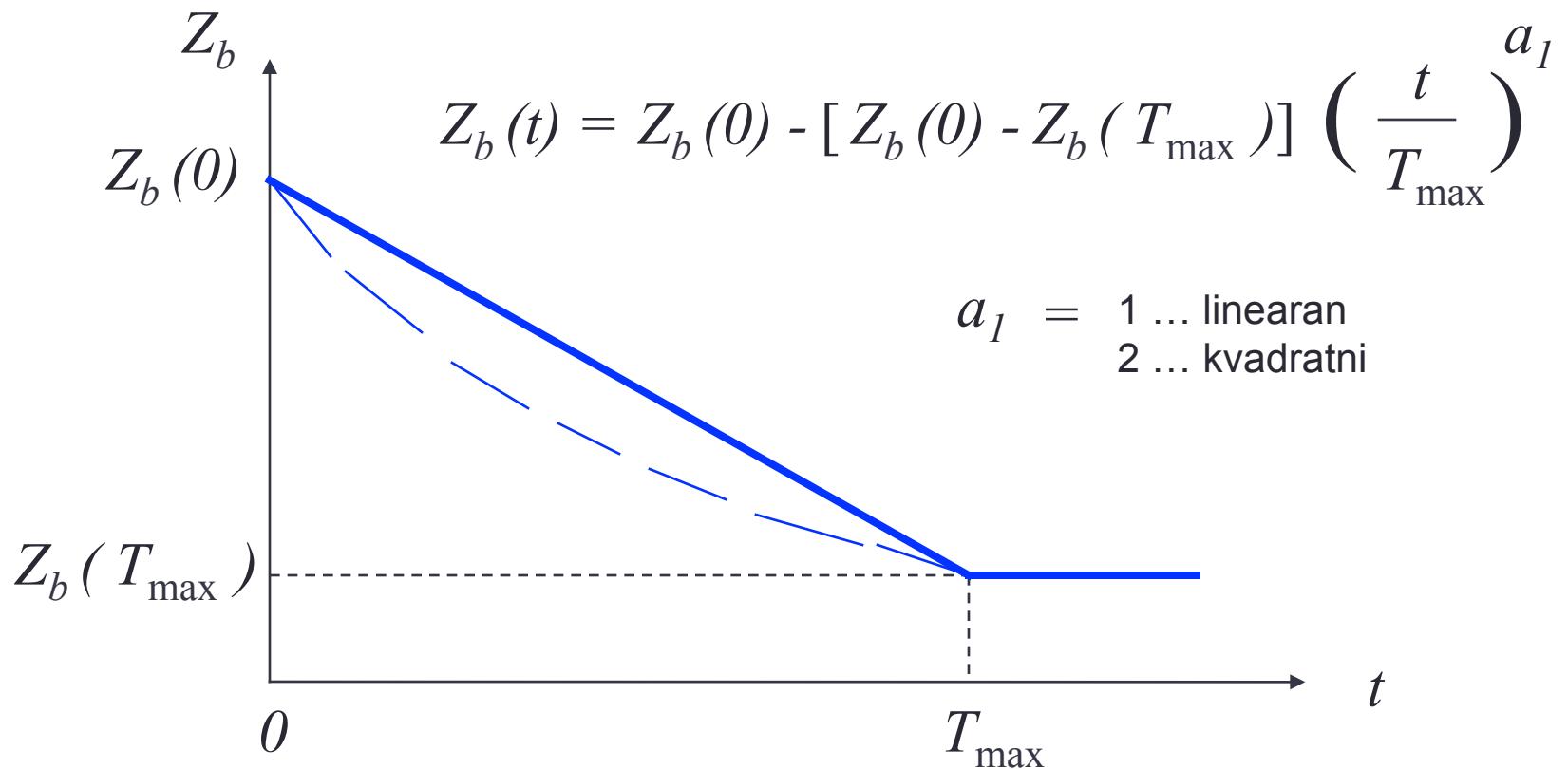
Model rušenja nasipa

S obzirom na dimenzije i konstruktivne karakteristike nasipa, rušenje je *postepeno i delimično*, uz formiranje *breše*. Pretpostavlja se *oblik breše i trajanje njene razrade*.

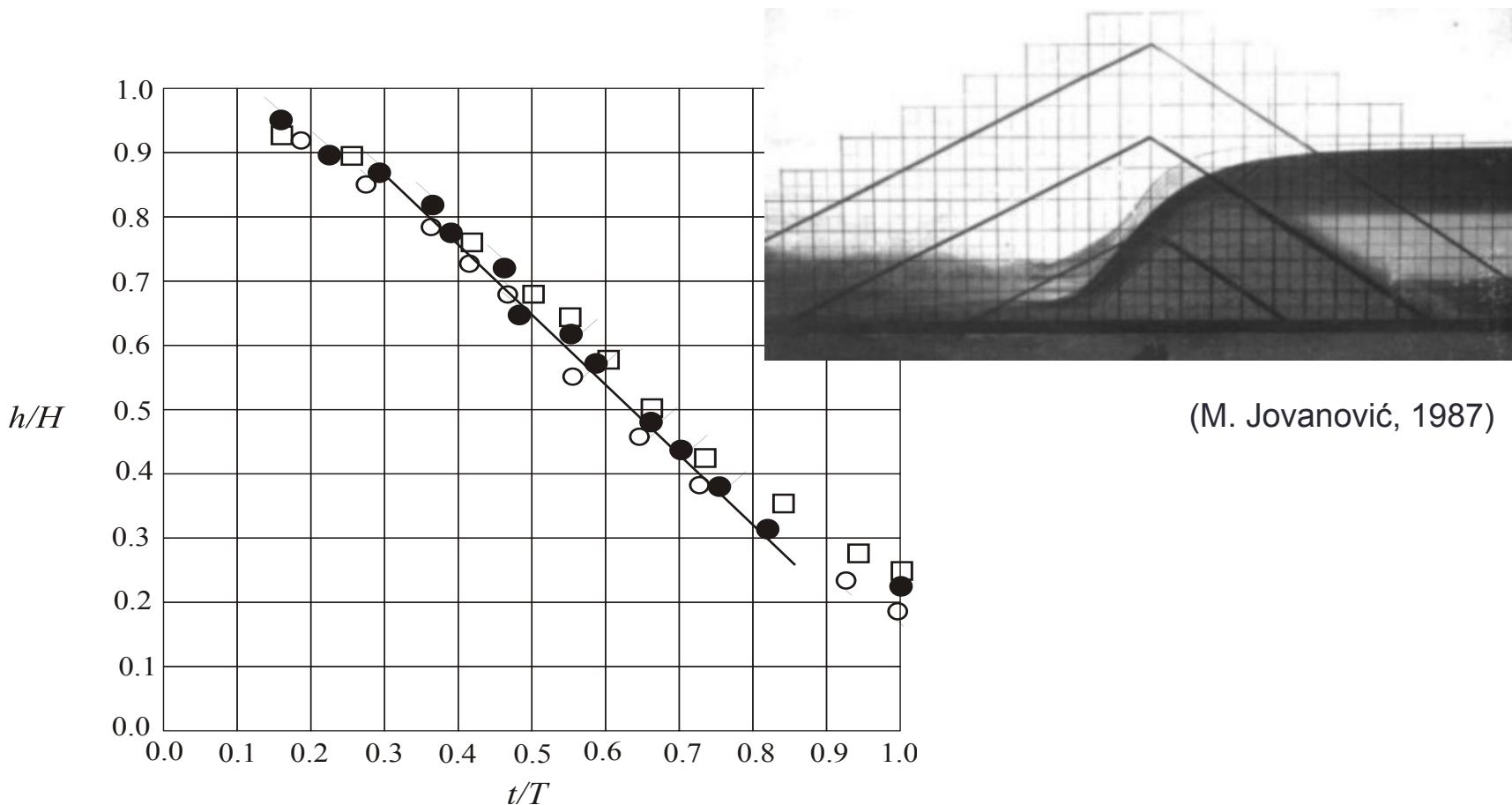
Šematizacija breše



Zakon razrade breše po visini

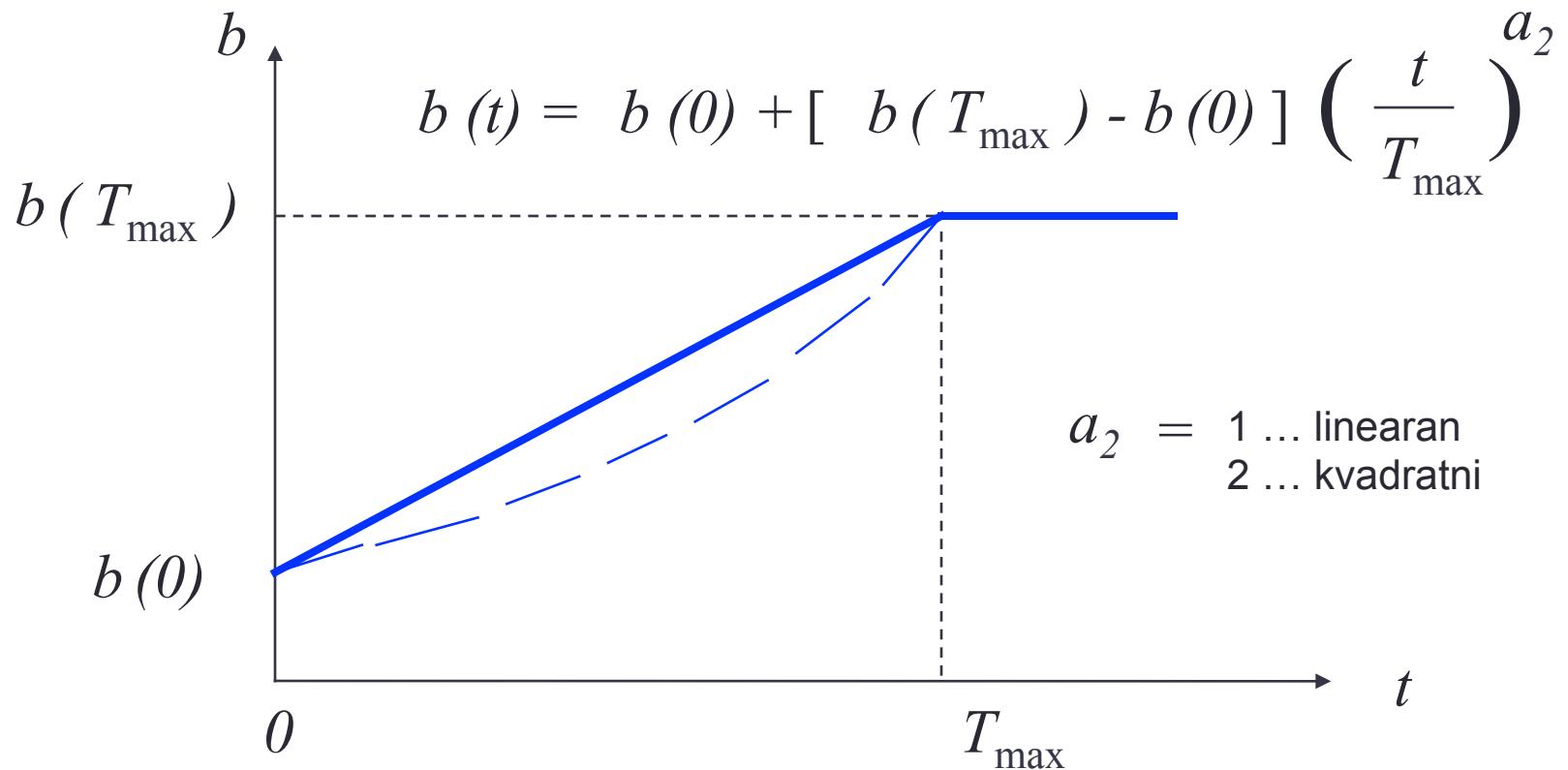


Modelska ispitivanja erozije nasutog objekta



(M. Jovanović, 1987)

Zakon razrade breše po širini



Protok kroz brešu

Prelivanje preko širokog praga:

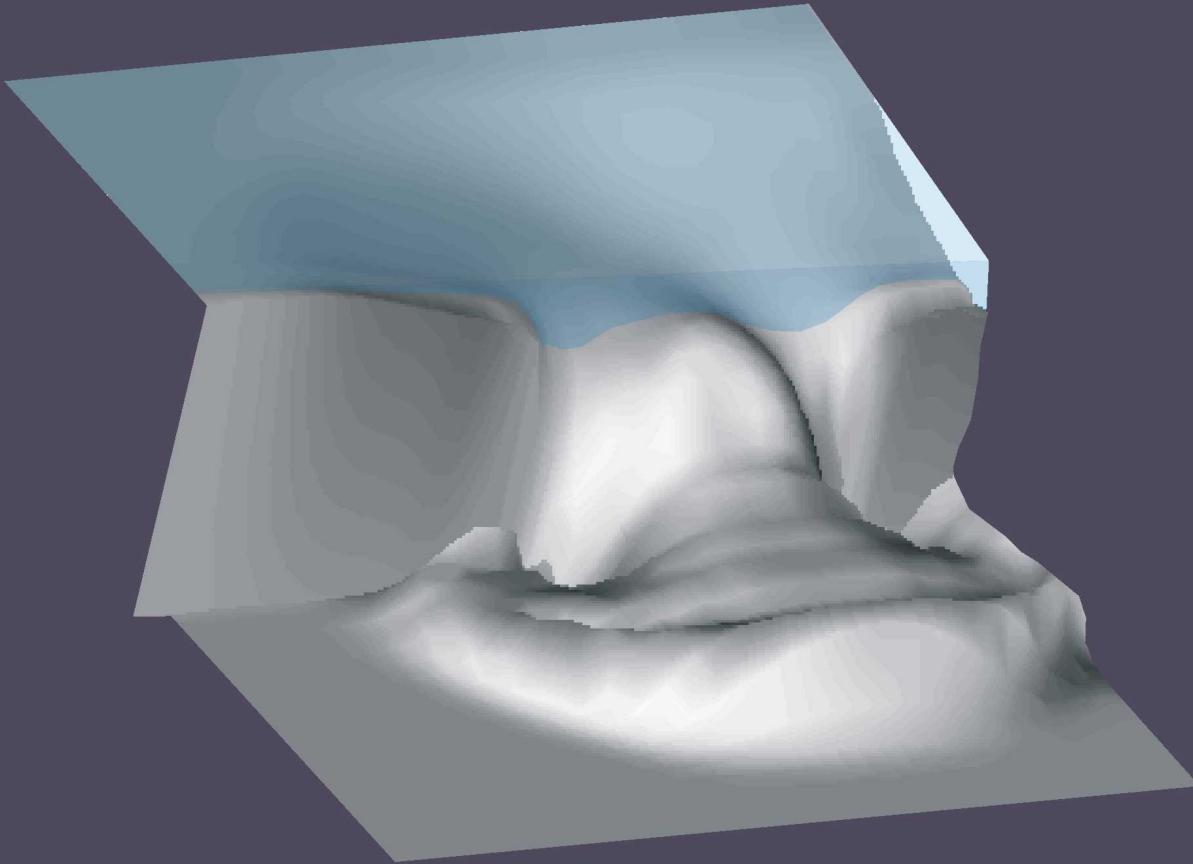
$$Q_b(t) = \{ C_1 b(t) [Z(t) - Z_b(t)]^{3/2} + C_2 m [Z(t) - Z_b(t)]^{5/2} \} C_v C_s$$



$$C_1 = (2/3) \cdot (2/3 g)^{1/2} \quad C_2 = (16/25) \cdot (2/5 g)^{1/2}$$

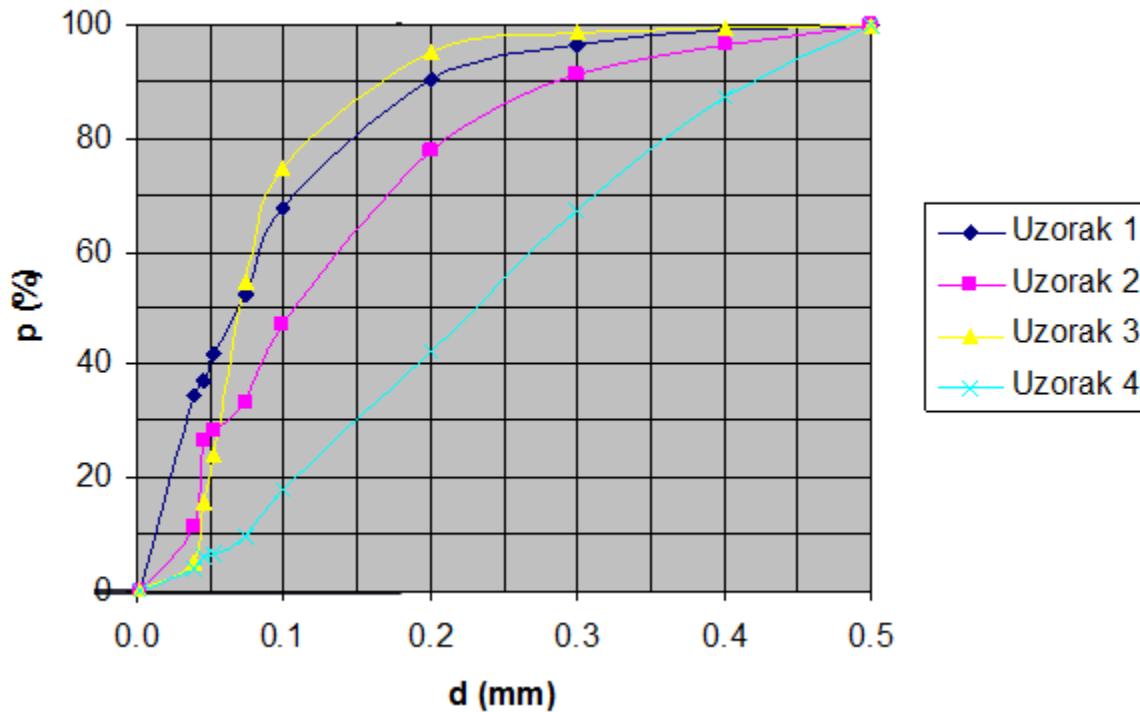
C_s , C_v - korekcionni koeficijenti (potopljenost, brzinska visina)

Numerička simulacija formiranja breše u nasipu



Fizička svojstva pepela

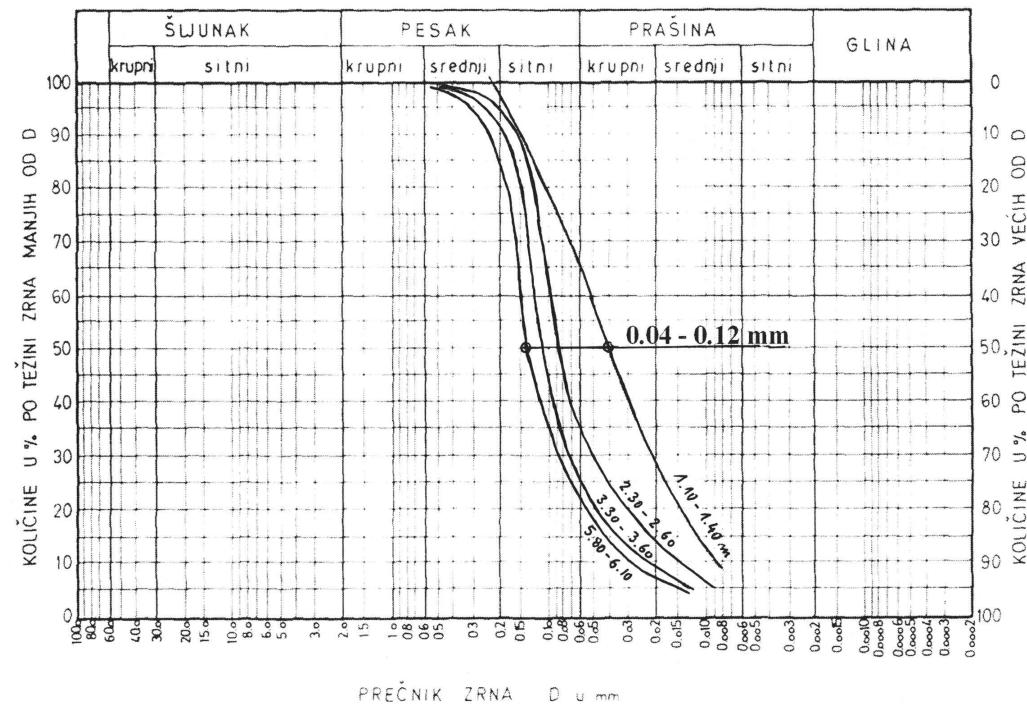
Granulometrijski sastav (Komatina, GF, 1994)



Granulometrijski sastav (RI, 2002.)

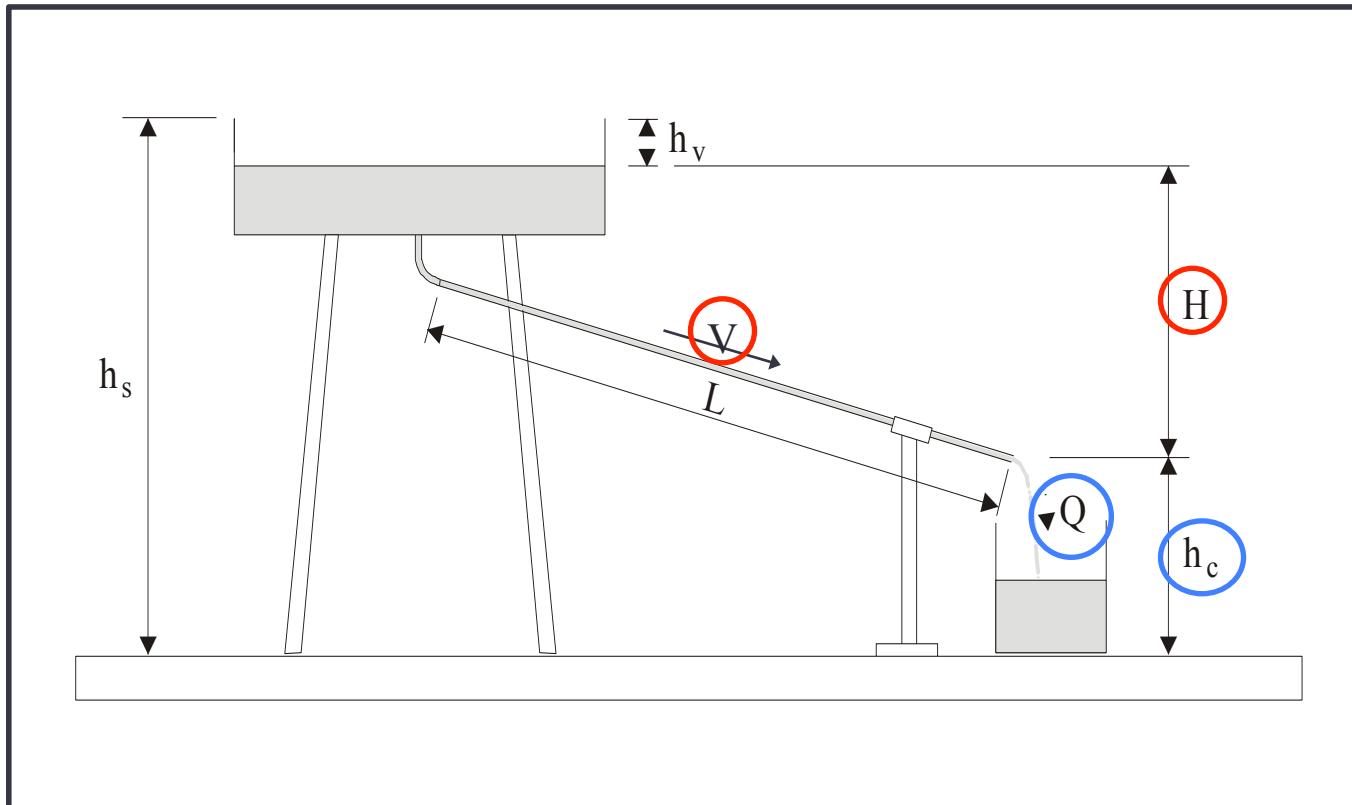


Kaseta "A" - bušotina A11

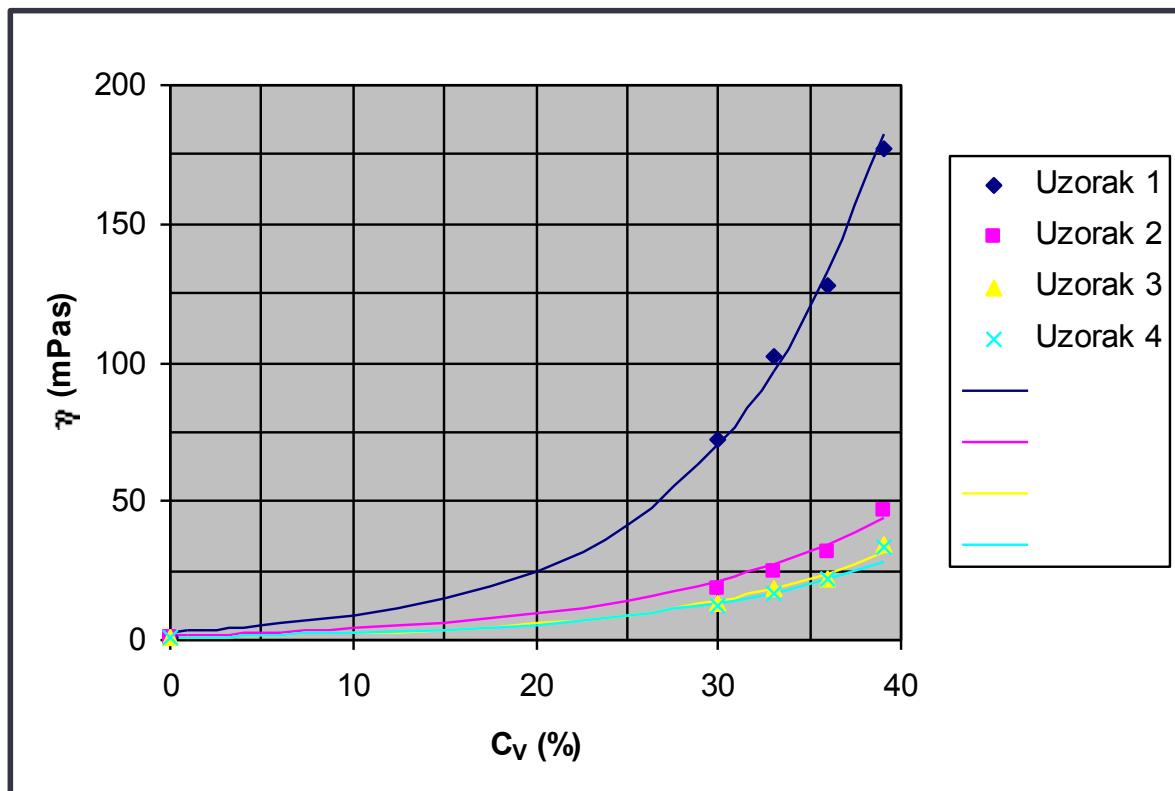


Određivanje viskoznosti mešavina

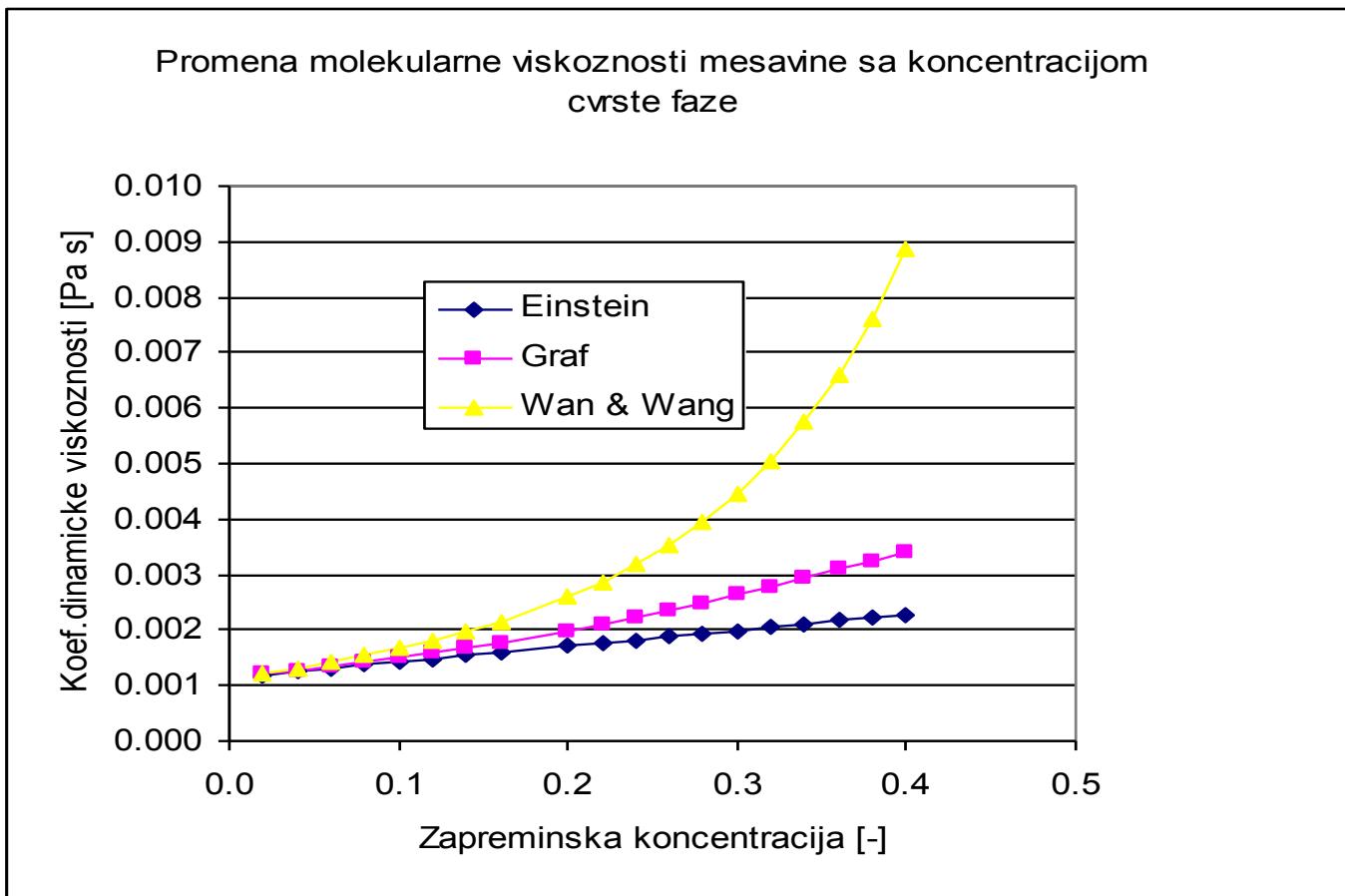
Cevasti viskozimetar (Hidraulička laboratorija GF, Komatina i dr. 1994.)



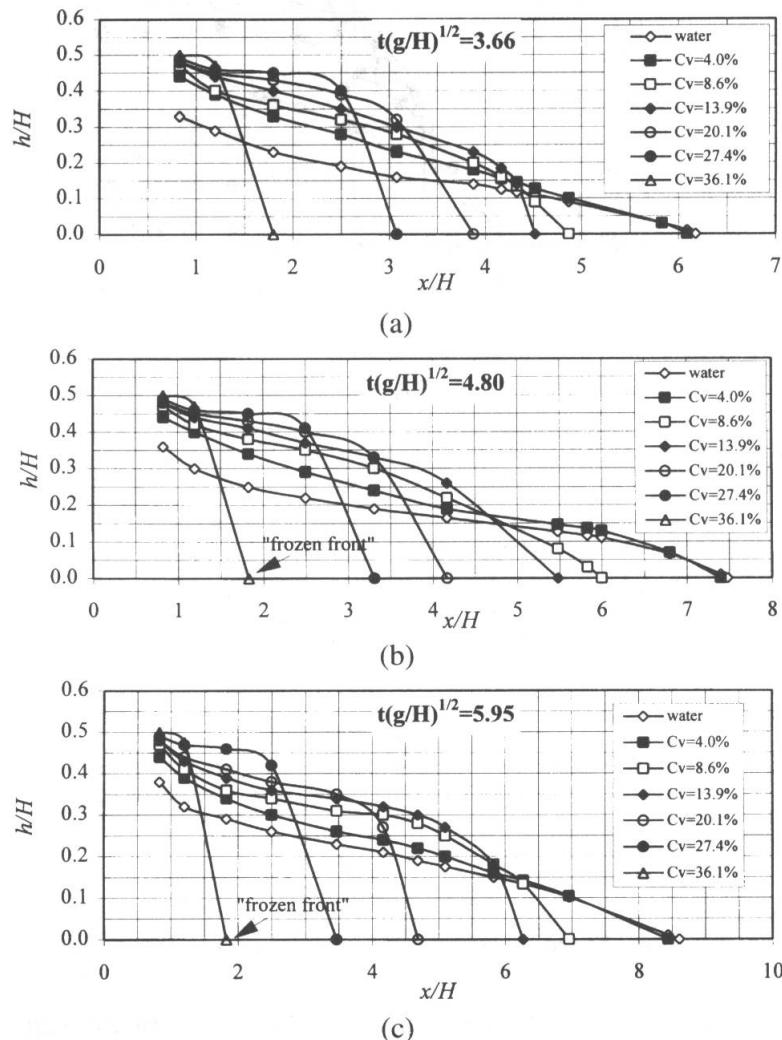
Eksperimentalne zavisnosti viskoznosti mešavine od koncentracije čvrste faze



Zavisnost viskoznosti mešavine od koncentracije čvrste faze (podaci iz literature)



Eksperimentalna istraživanja talasa gustih mešavaina



Uticaj koncentracije
na visinu poplavnog talasa
i brzinu njegovog prostiranja
(Komatina, 1997)

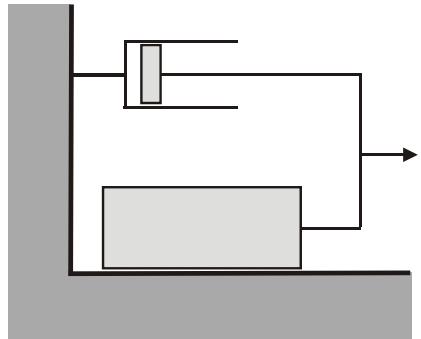
Modeli linijskog i ravanskog tečenja gustih mešavina

Teorijski pristup:

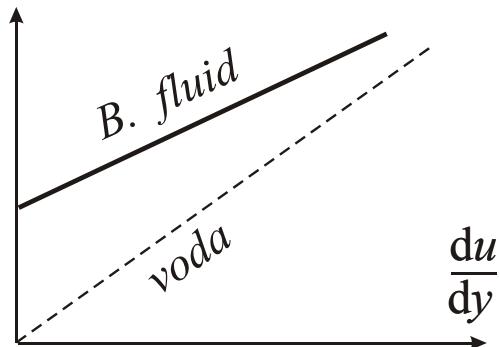
uvodenje reološkog modela guste mešavine, znači da je konstitutivna veza između napona i deformacije drugaćija nego kod čiste vode !

Reološki model Bingham-ovog fluida

fizička predstava



veza napon - deformacija



matematička formulacija

$$= \quad + \quad \frac{du}{dy} \quad \dots \quad >$$

$$\frac{du}{dy} = 0 \quad \dots \quad <$$

Definicija nagiba linije energije u računskom modelu

Linijsko (1D) strujanje:

$$I_e = \frac{3 \eta V}{\rho_m g R^2} + \frac{3}{2} \frac{\tau_o}{\rho_m g R}$$

Ravansko (2D) strujanje:

$$\begin{aligned} I_{ex} &= \frac{3 \eta \tilde{u}}{\rho_m g h^2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\tau_o}{\rho_m g h} \cdot \frac{\tilde{u}}{\sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}} \\ I_{ey} &= \frac{3 \eta \tilde{v}}{\rho_m g h^2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\tau_o}{\rho_m g h} \cdot \frac{\tilde{v}}{\sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}} \end{aligned}$$

Modeli linijskog i ravanskog tečenja

Inženjerski pristup:

podešavanje vrednosti standardnih parametara modela

- Manning-ovog koeficijenta otpora (1D)
 - koeficijenta vrtložne viskoznosti (2D)
(vrtložna viskoznost "zamenjuje" molekularnu viskoznost)

Ima smisla samo ako postoji mogućnost provere rezultata !

III

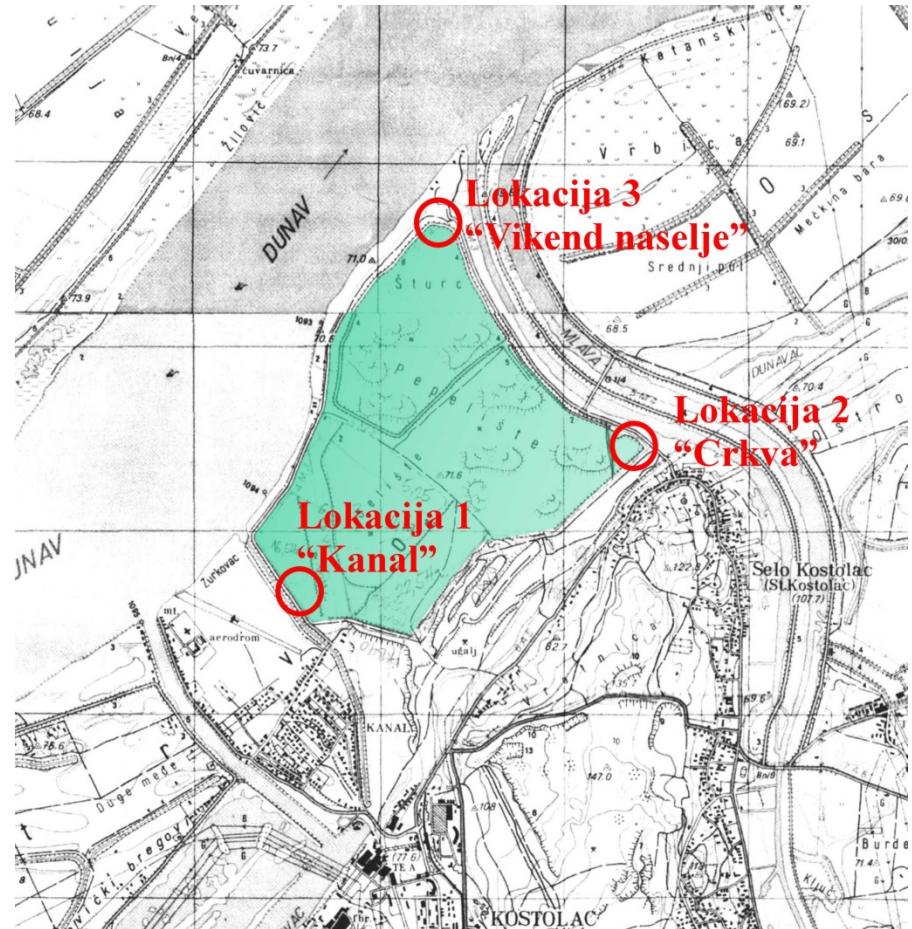
REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA

Lokacija 1 – “Kanal”

Rekonstrukcija događaja od 13.06.2002.

kalibracija modela i proračuna
za sadašnje stanje:

kota krune nasipa: 76,2 mm
visina nasipa: 4,9 m



Breša u trupu nasipa (jun, 2002.)



Prolom nasipa 13. juna 2002. god.

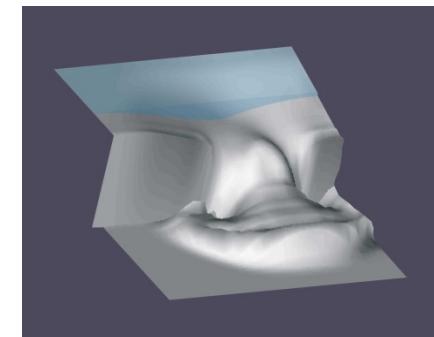
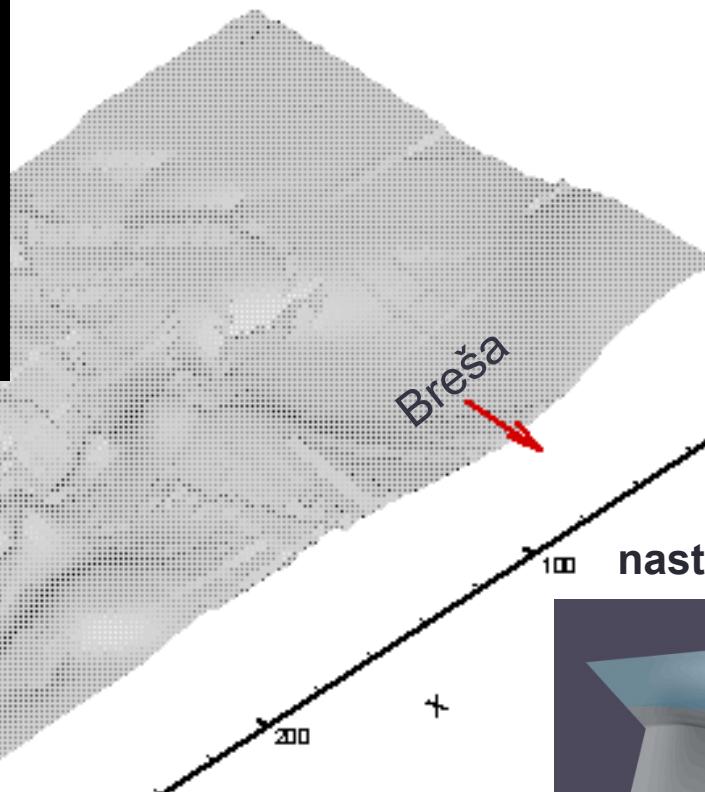
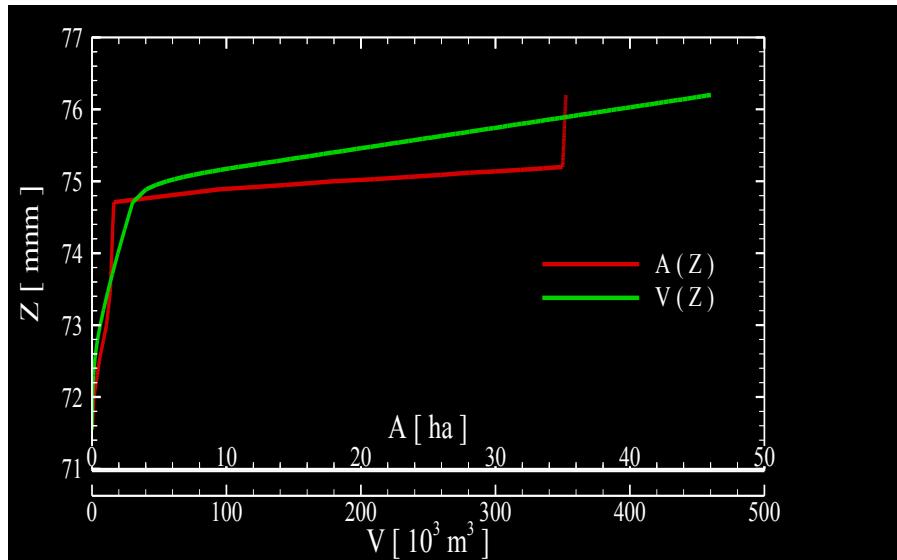
Izliv u kanal tople vode



Deponija u zoni breše

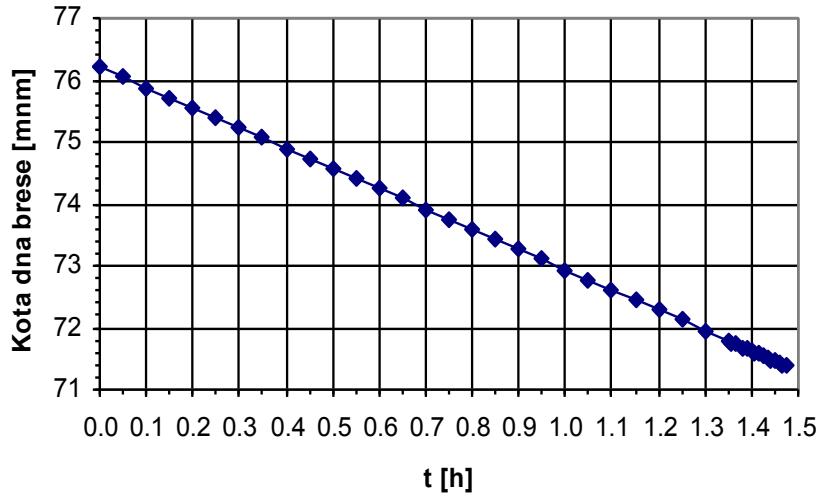


Krive površine i zapremine vode u deponiji

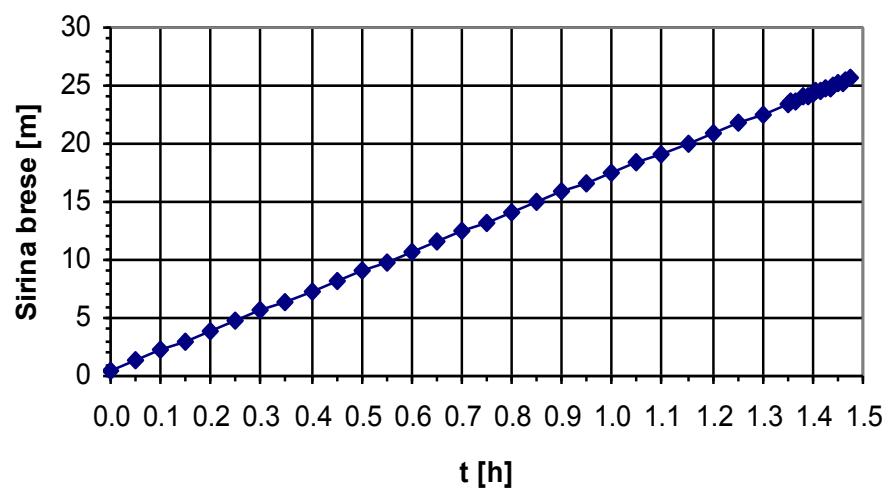


Dinamika formiranja breše u računskom modelu

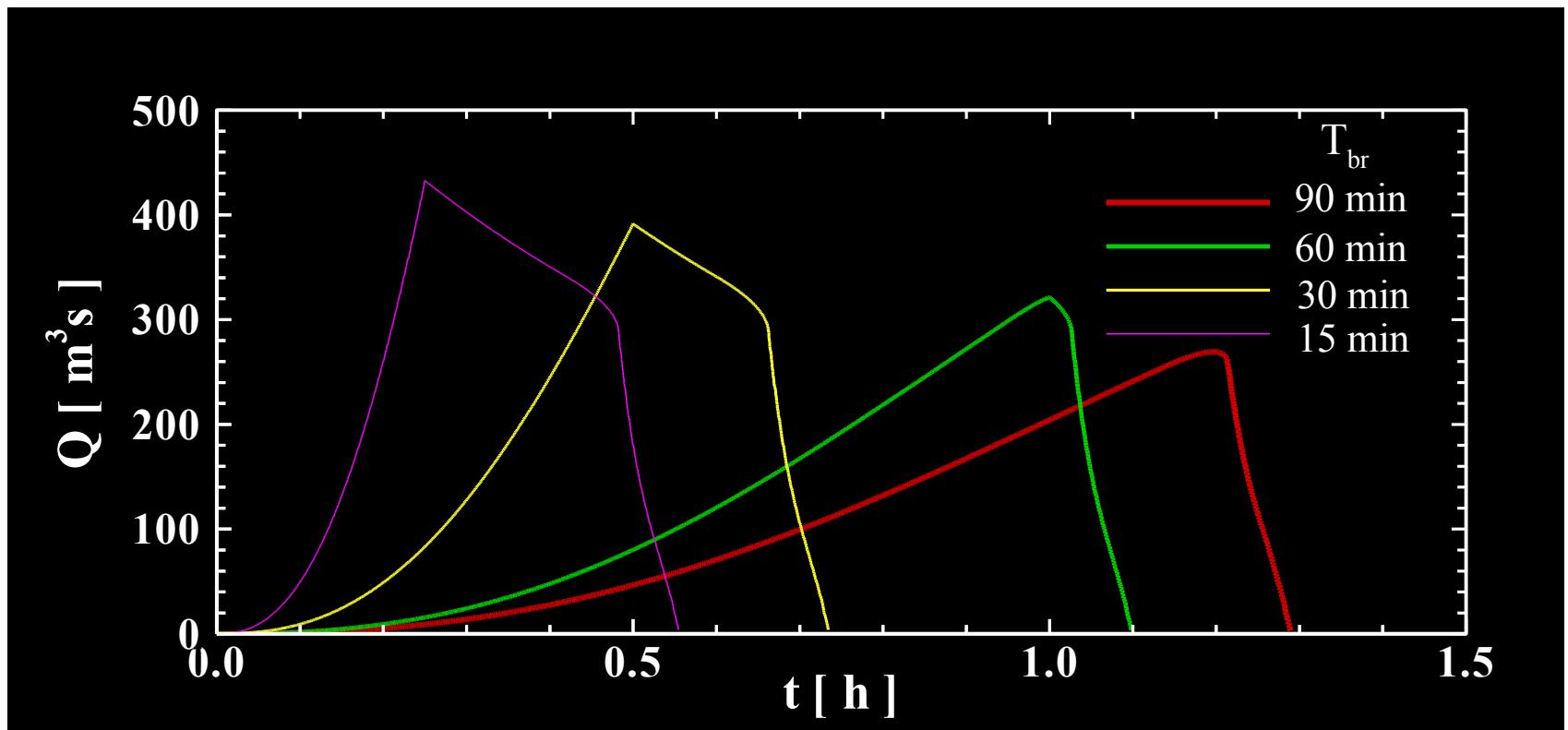
Dogadjaj 13.06.2002.



Dogadjaj 13.06.2002.



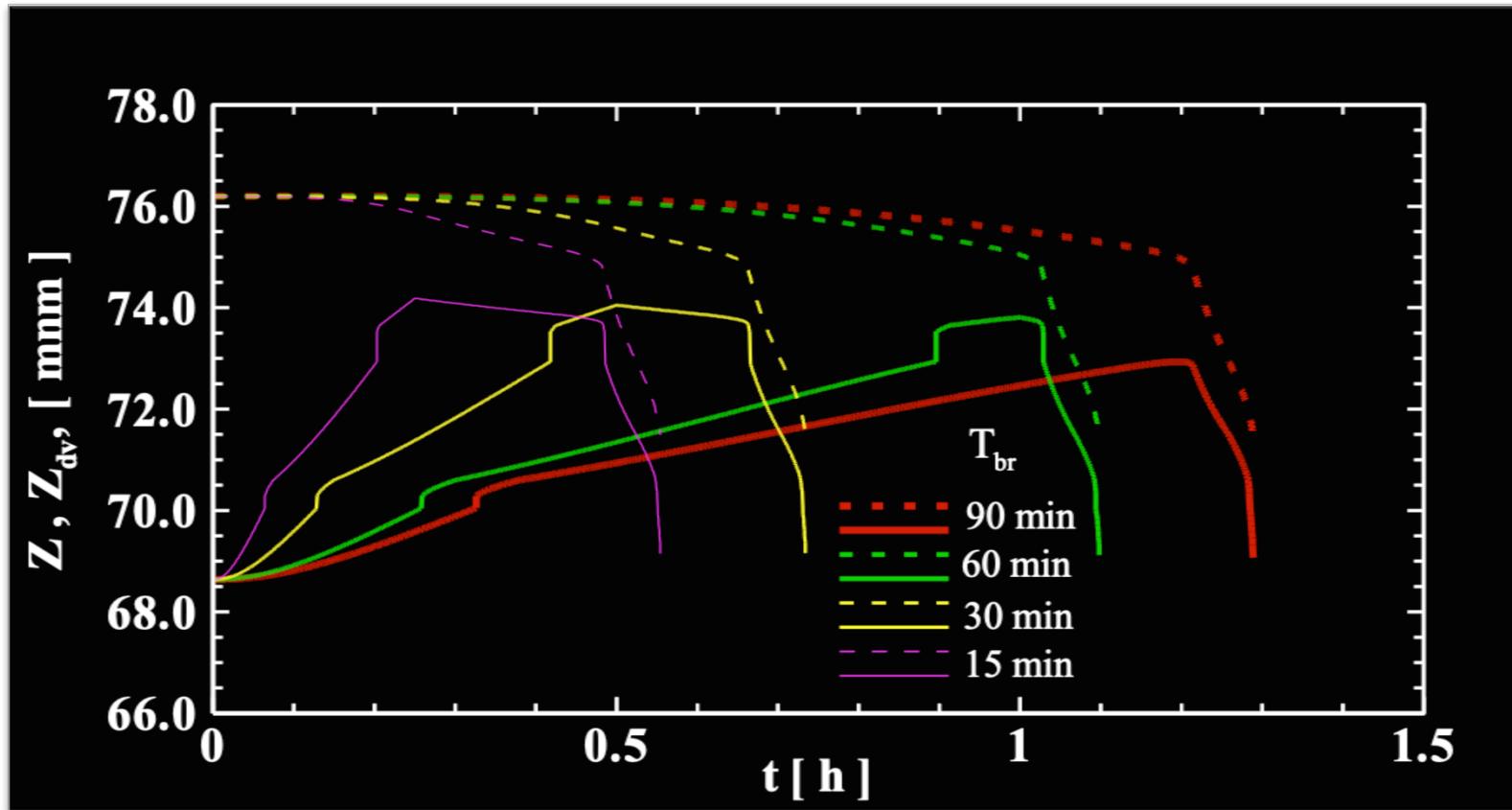
Hidrogrami oticaja kroz brešu u zavisnosti od trajanja proloma nasipa



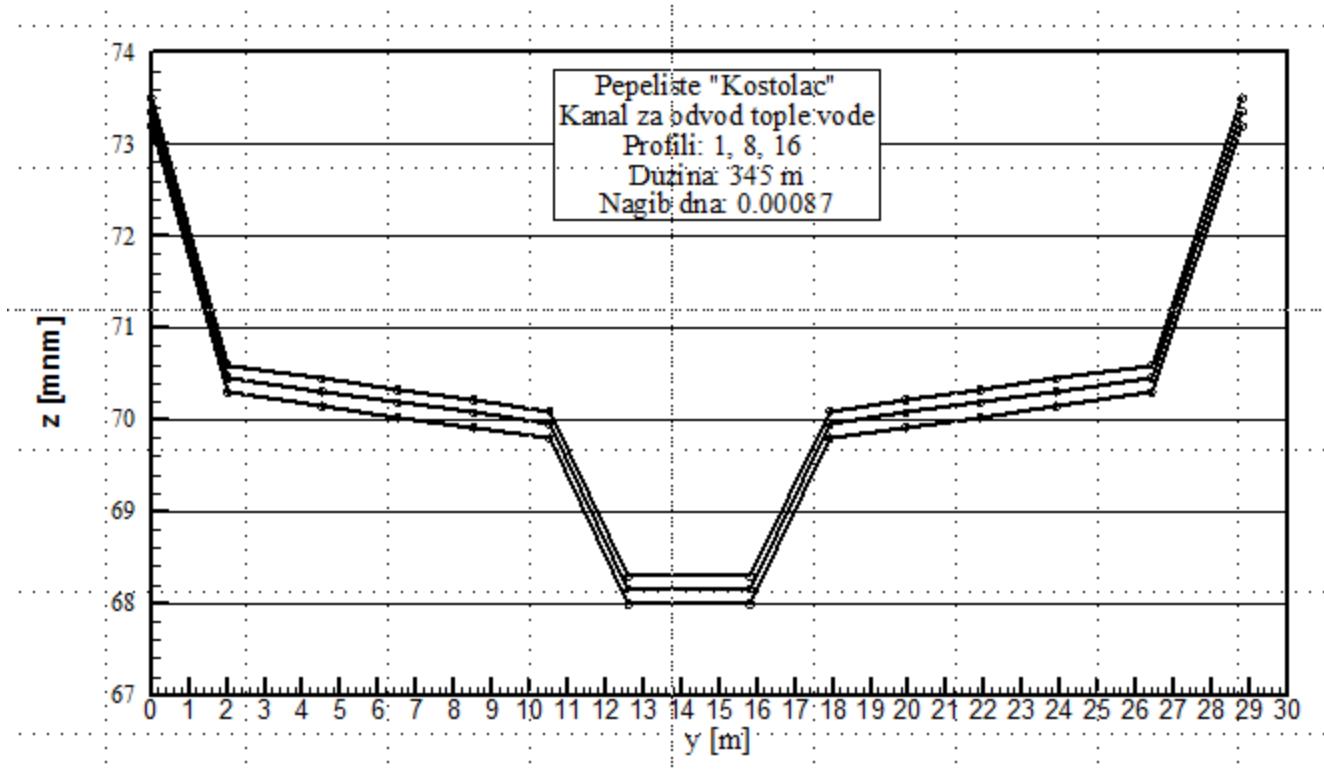
Trag najveće dubine u kanalu 13.06.2002.



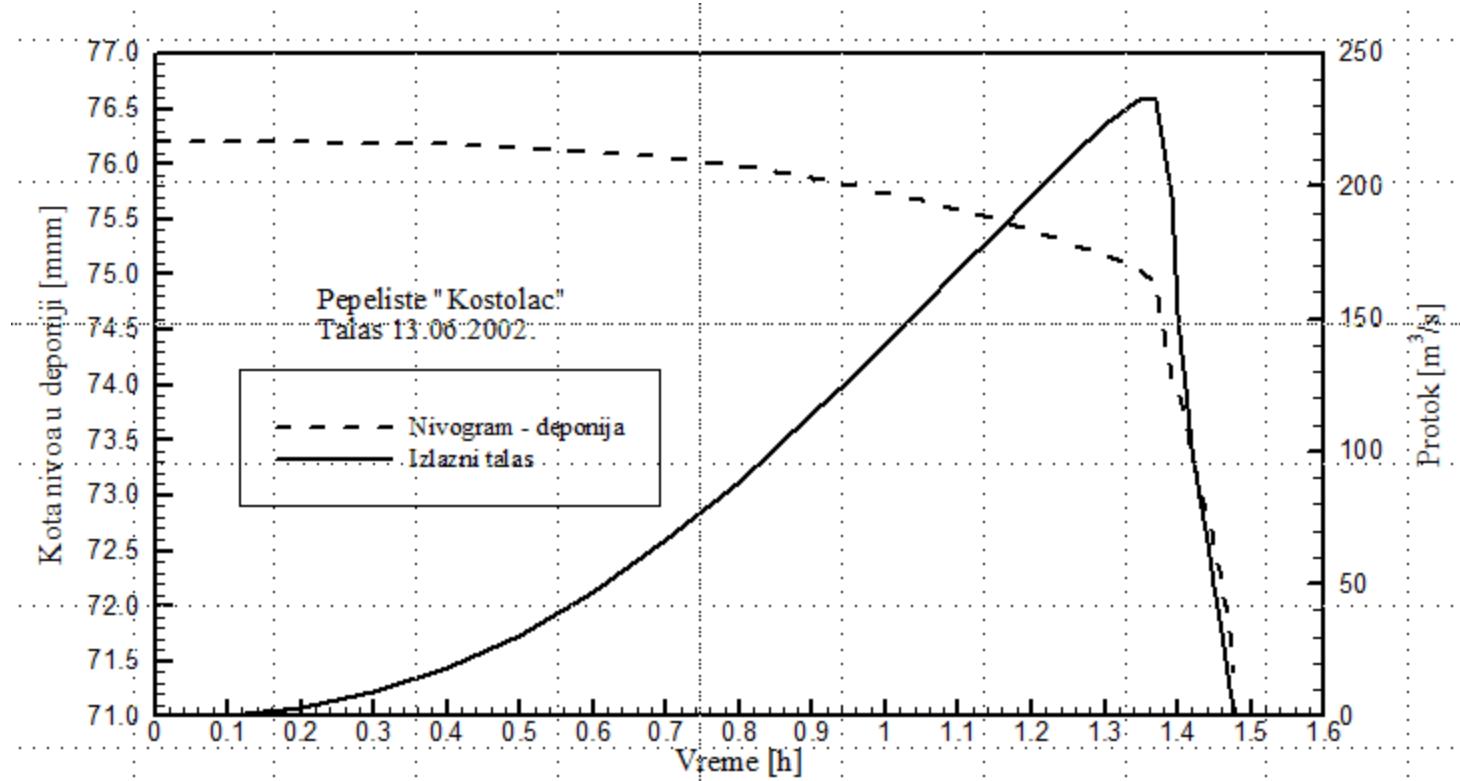
Preliminarna ocena trajanja razrade breše
na osnovu normalne dubine u kanalu



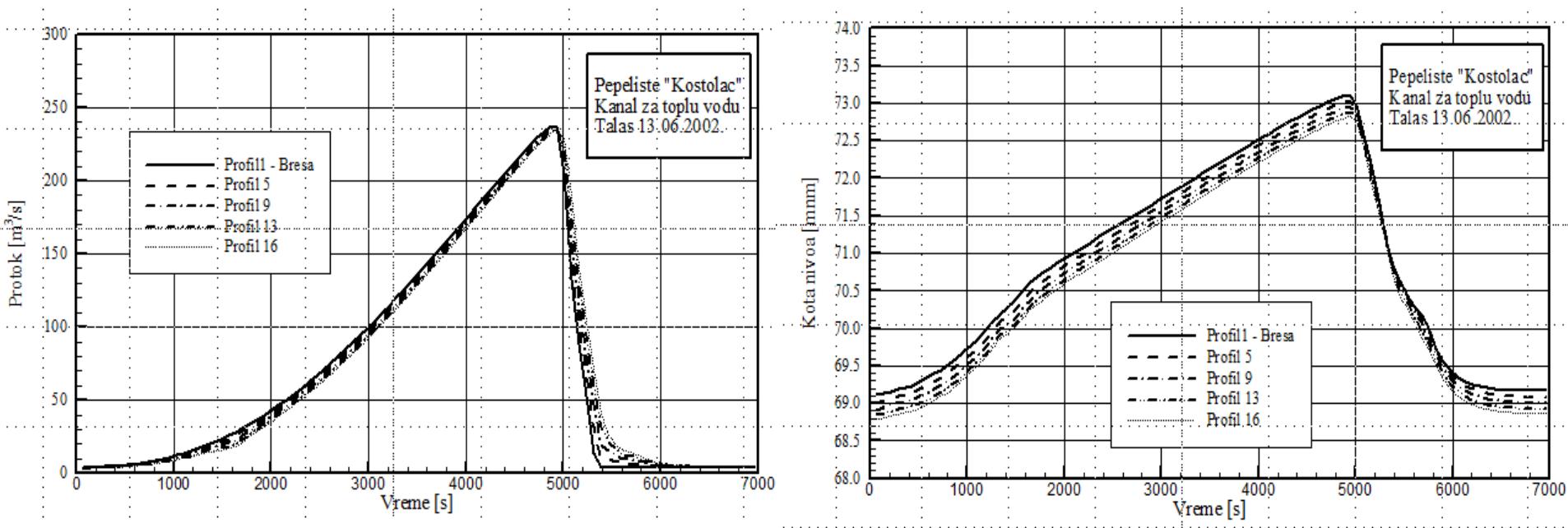
Geometrijske karakteristike kanala za odvod tople vode



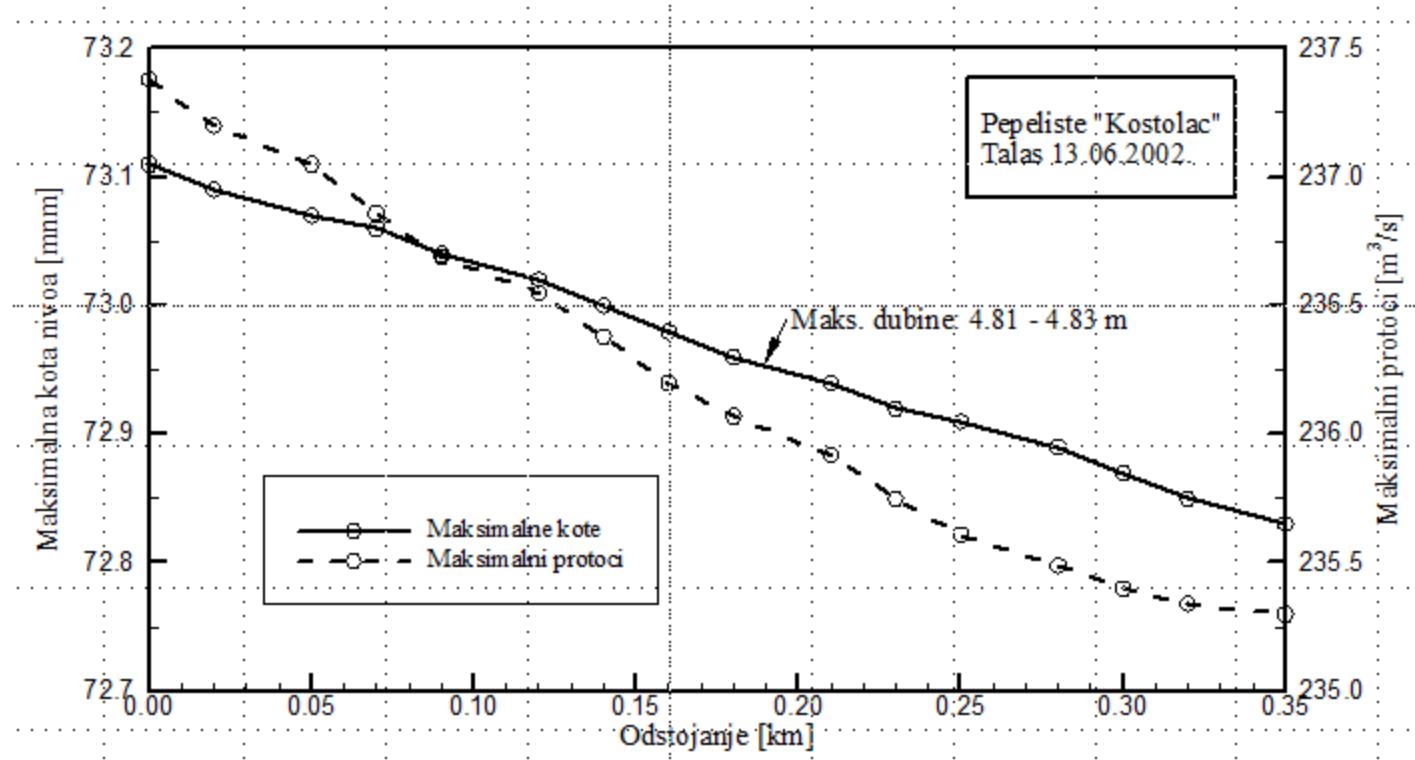
Računski hidrogram u profilu breše i nivogram pražnjenja deponije



Rezultati proračuna pomoću linijskog (1D) modela: hidrogrami i nivogrami u kanalu za odvod tople vode



Rezultati proračuna pomoću linijskog (1D) modela: maks. kote i maks. protoci u kanalu za odvod tople vode



Zaključci

Prolom nasipa:

- Na osnovu tragova poplave iz juna 2002. godine ustanovljeno je da je trajanje rušenja nasipa iznosilo oko 1,5 h.
- Maksimalni protok u profilu breše javlja se 1,36 h (81 min) nakon početka rušenja i iznosi oko $230 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Ovom protoku odgovara dubina od 2,16 m i brzina od oko 4,5 m/s.
- Procenjena zapremina otekle mešavine iznosi $460\,000 \text{ m}^3$.
- Početna zapreminska koncentracija čvrste faze je oko 6 %.

Zaključci

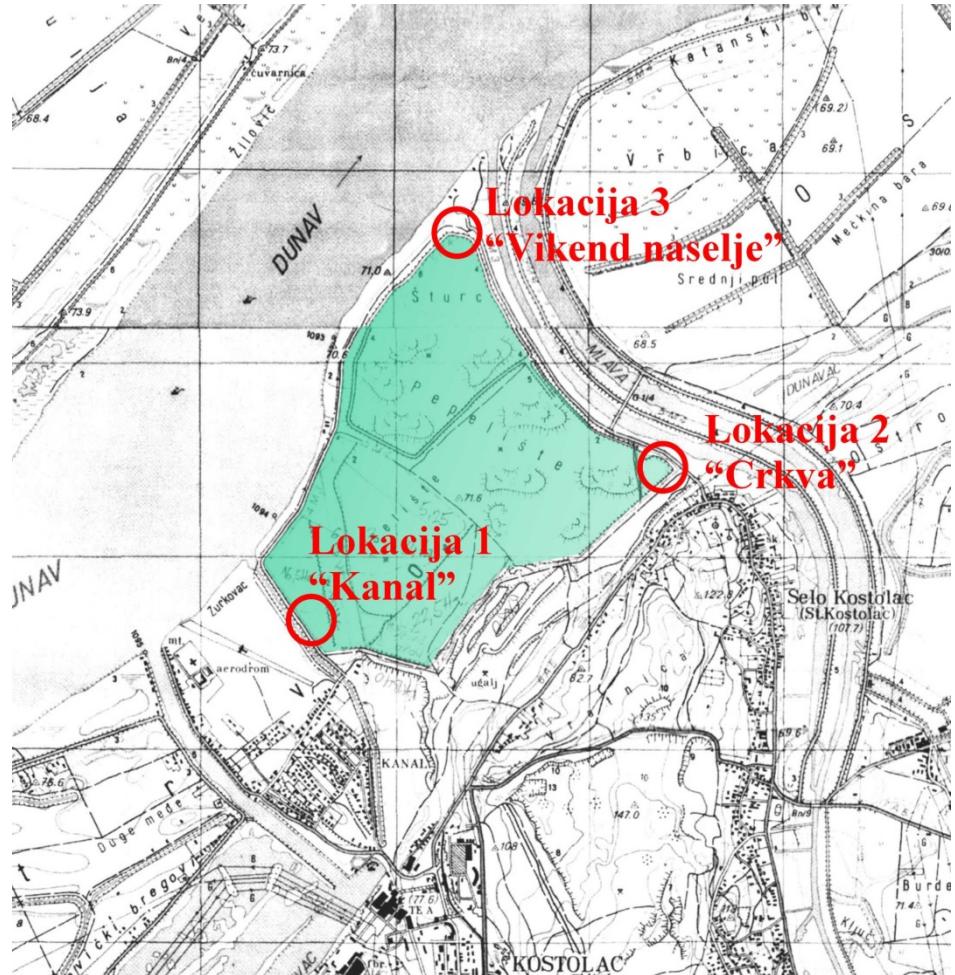
Poplavni talas:

- u celosti je “prihvaćen” kanalom za topлу vodu i njime odveden u Dunav.
- u kanalu nema mogućnosti za ublaženje talasa, tako da je usputno smanjenje protoka i kota zanemarljivo (čista translacija).
- najveće dubine u kanalu iznose: 4,81- 4,83 m (kote 73,1 – 78,5 mnm).
- „njapovoljnije“ posledice sa stanovišta zaštite ugroženog područja.

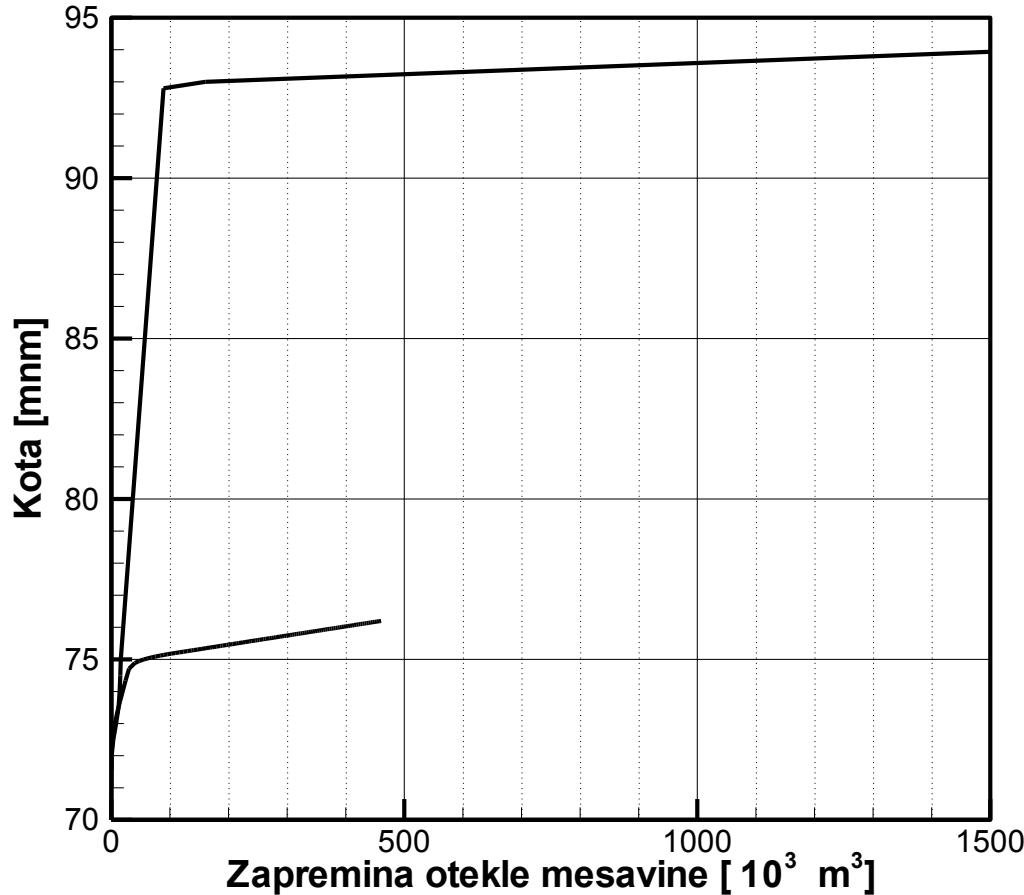
Lokacija 1 – “Kanal”

Prognoza hidrauličkih posledica eventualne havarije nasipa u konačnoj fazi eksploatacije pepelišta:

kota krune nasipa: 94,0 mm
visina nasipa: 22,7 m

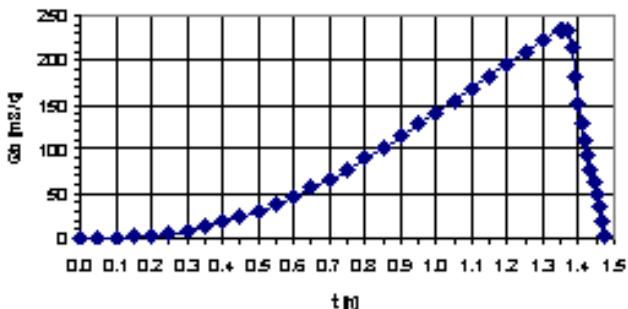


Ekstrapolacija krive zapremine otekle mešavine

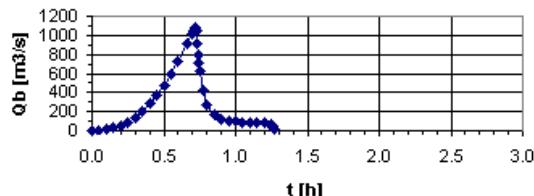


Analiza brzine razvoja breše

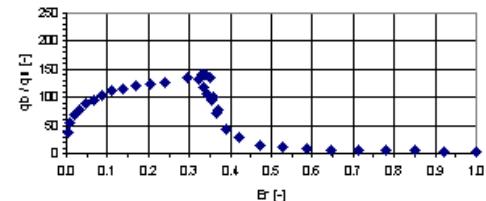
Dogadjaj 13.06.2003.



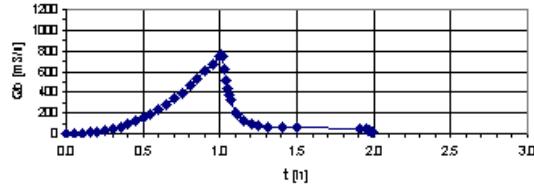
Izlazni hidrogram - buduce stanje
(kota krune 94 mm, vreme razrade 1.25 h)



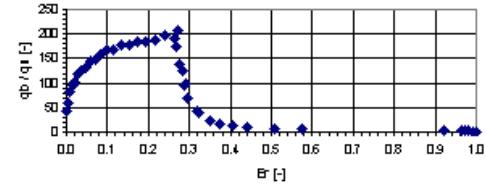
Erozija nasipa K1 - buduce stanje
(kota krune 94 mm, vreme 1.25 h)



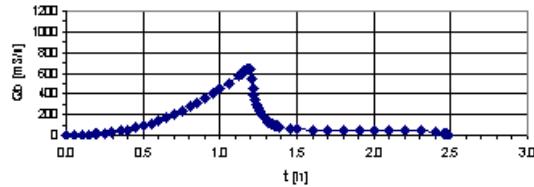
Izlazni hidrogram : buduce stanje
(kota 94 mm - vreme razrade 2h)



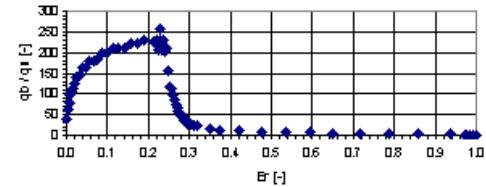
Erozija nasipa - buduce stanje
(kota krune 94 mm, vreme 2 h)



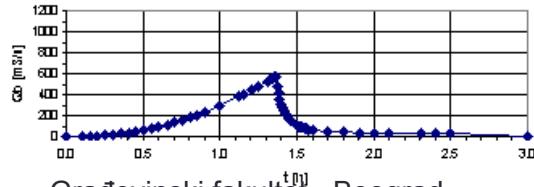
Izlazni hidrogram - buduce stanje
(kota krune 94 mm, vreme razrade 2.5 h)



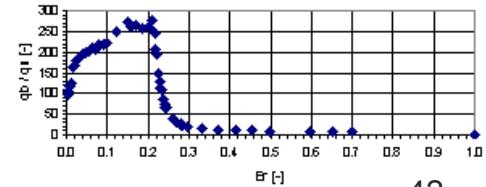
Erozija nasipa - buduce stanje
(kota krune 94 mm, trajanje 2.5 h)



Izlazni hidrogram - buduce stanje
(kota krune 94 mm, vreme razrade 3 h)



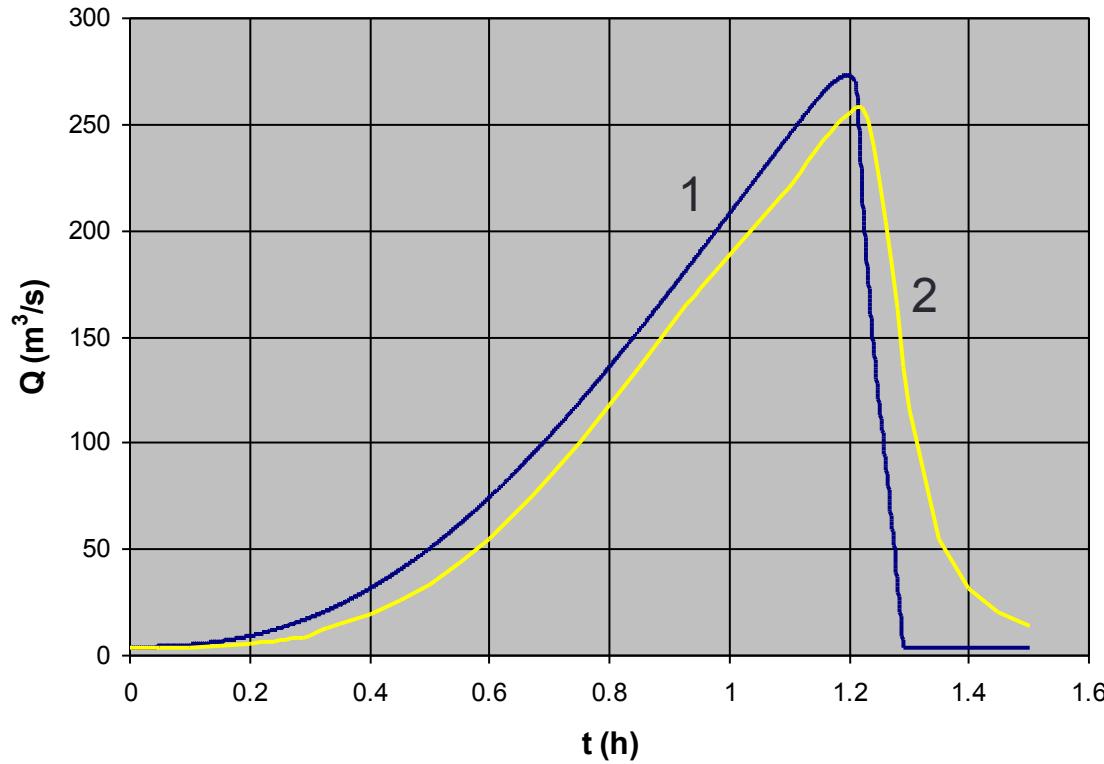
Erozija nasipa - buduce stanje
(kota krune 94 mm, vreme 3 h)



Konačna faza eksplotacije pepelišta

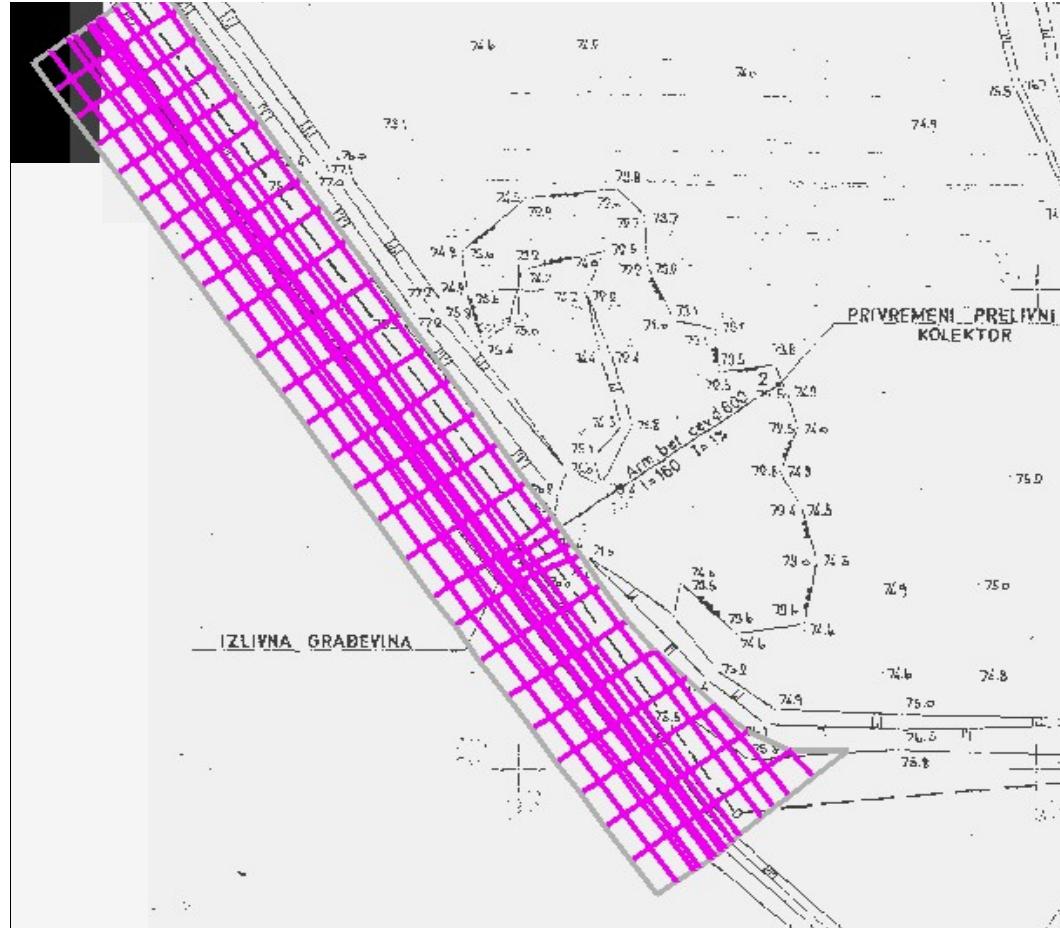
Rezultati dobijeni primenom linijskog (1D) modela:

1- hidrogram na mestu probaja
2- hidrogram na izlazu kanala za toplu vodu

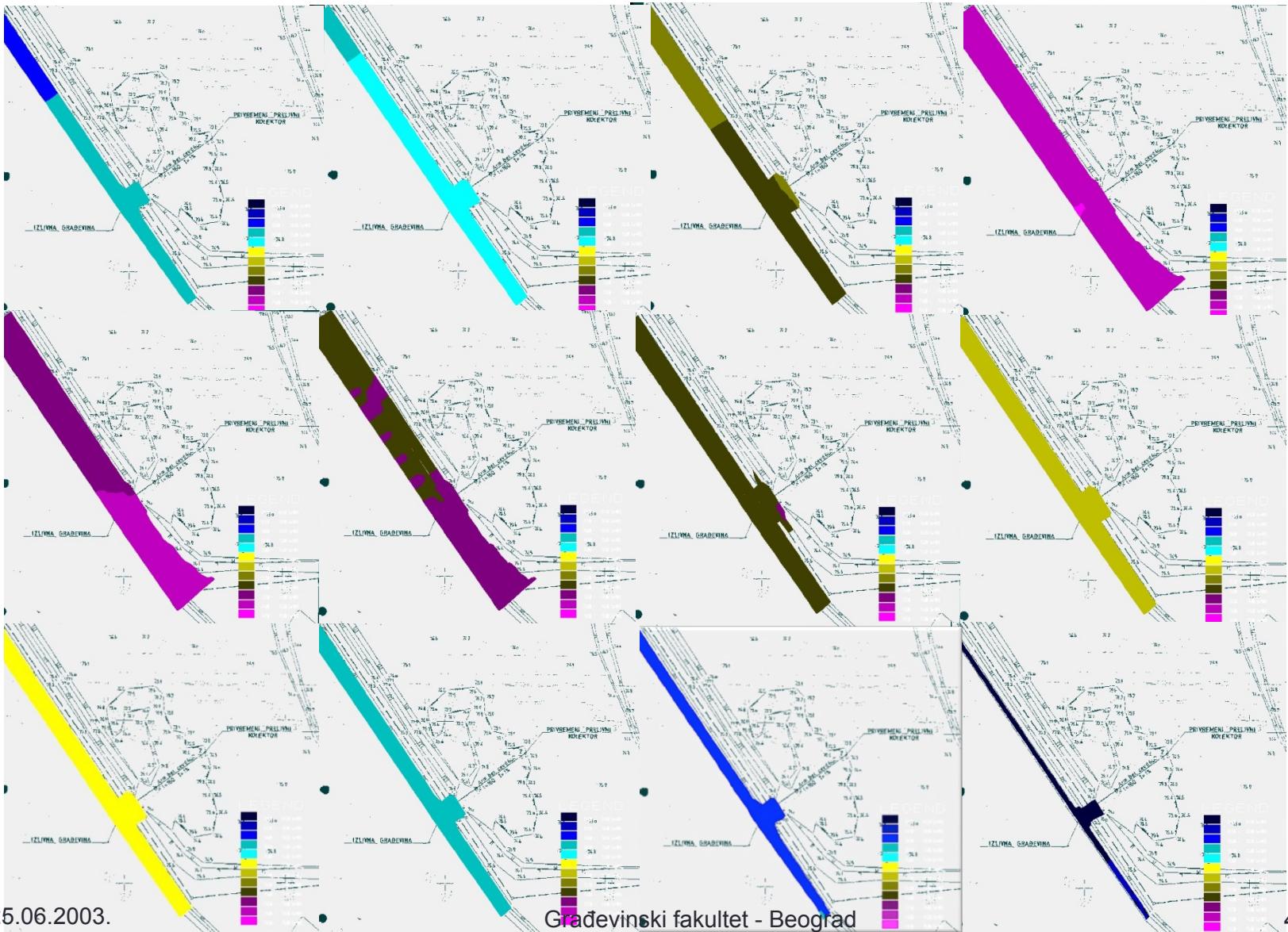


Konačna faza eksploracije pepelišta

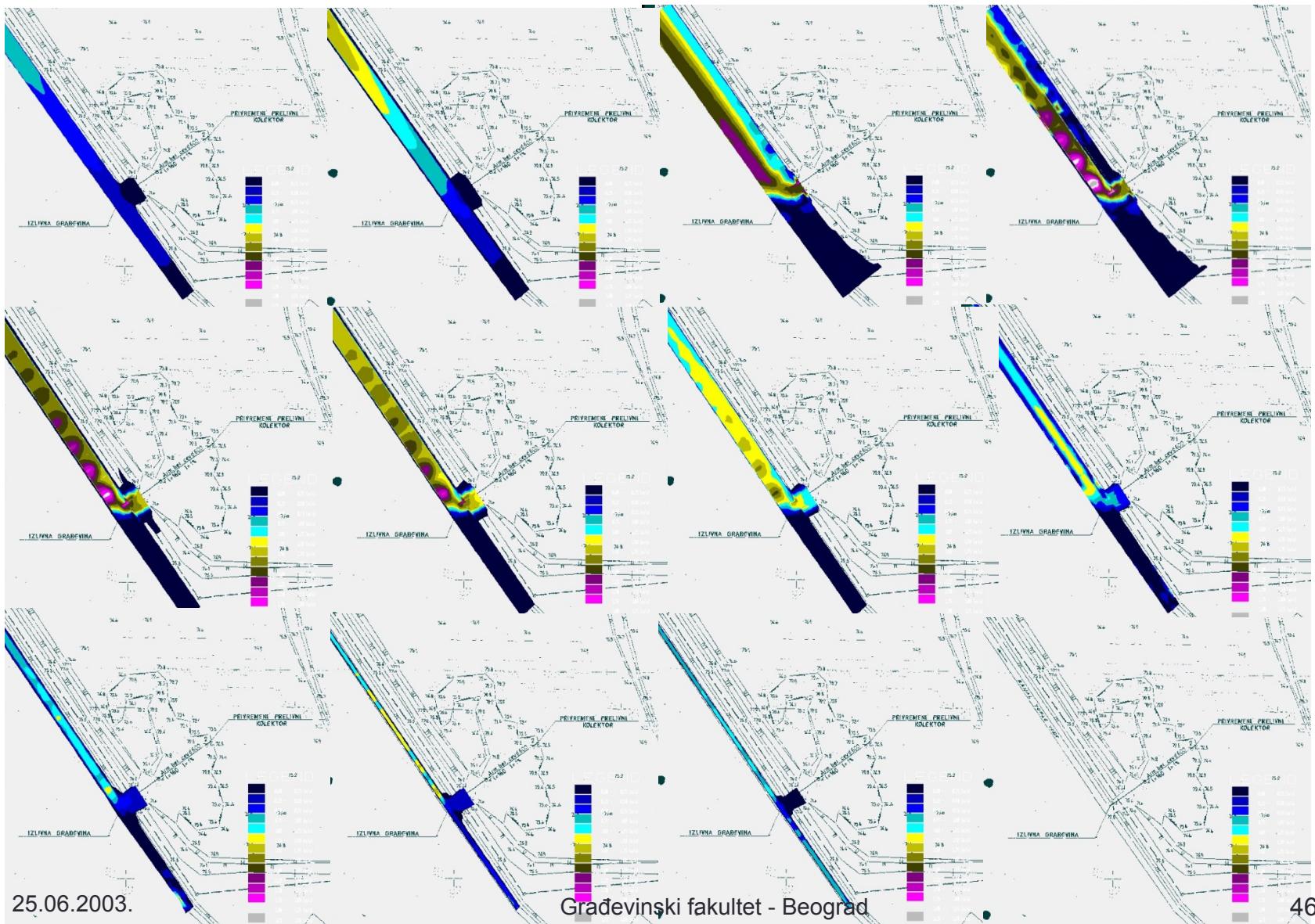
Računska mreža 2D modela za proračun tečenja u kanalu tople vode



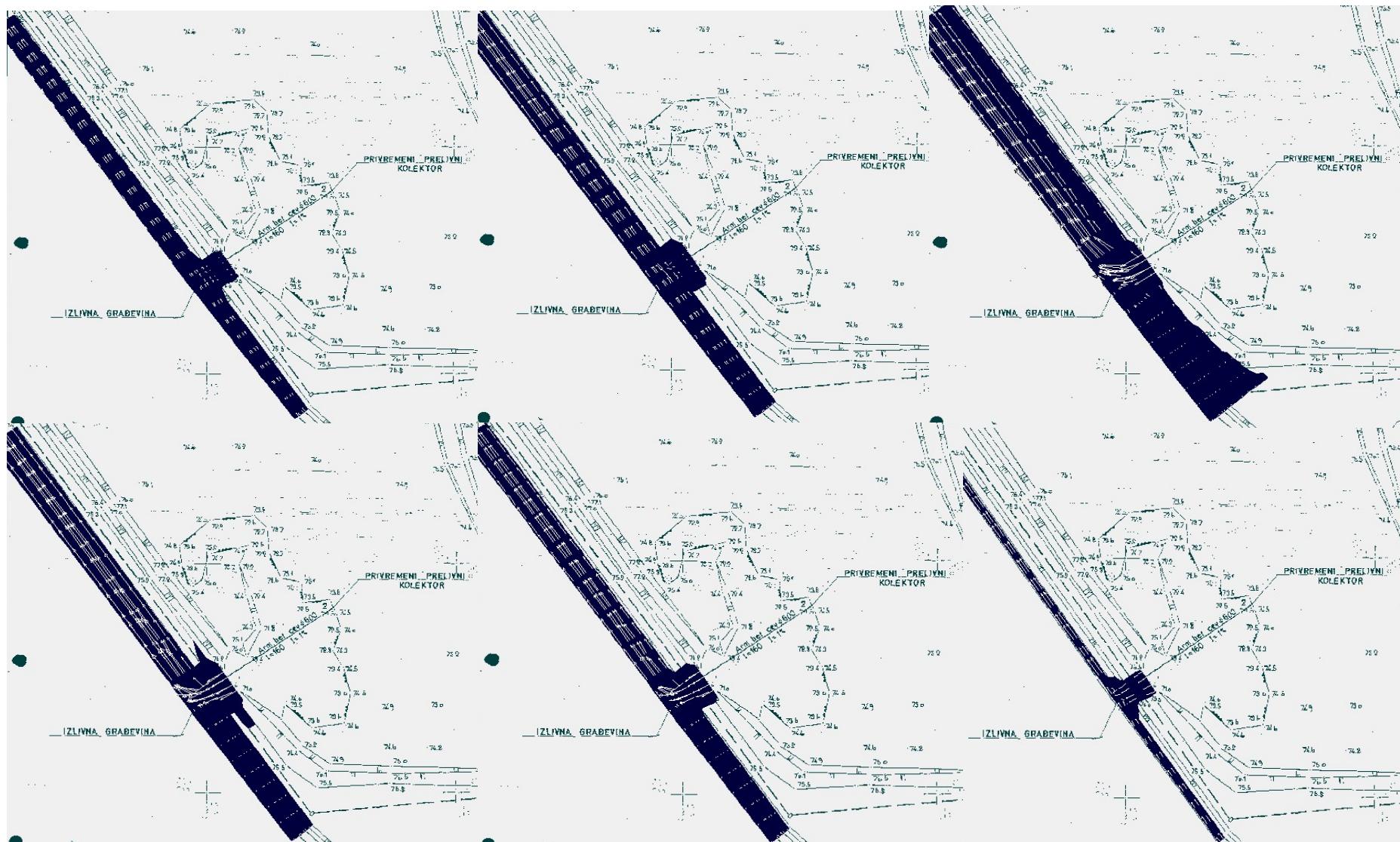
Dinamika nivoa pri oticaju talasa kroz kanal tople vode



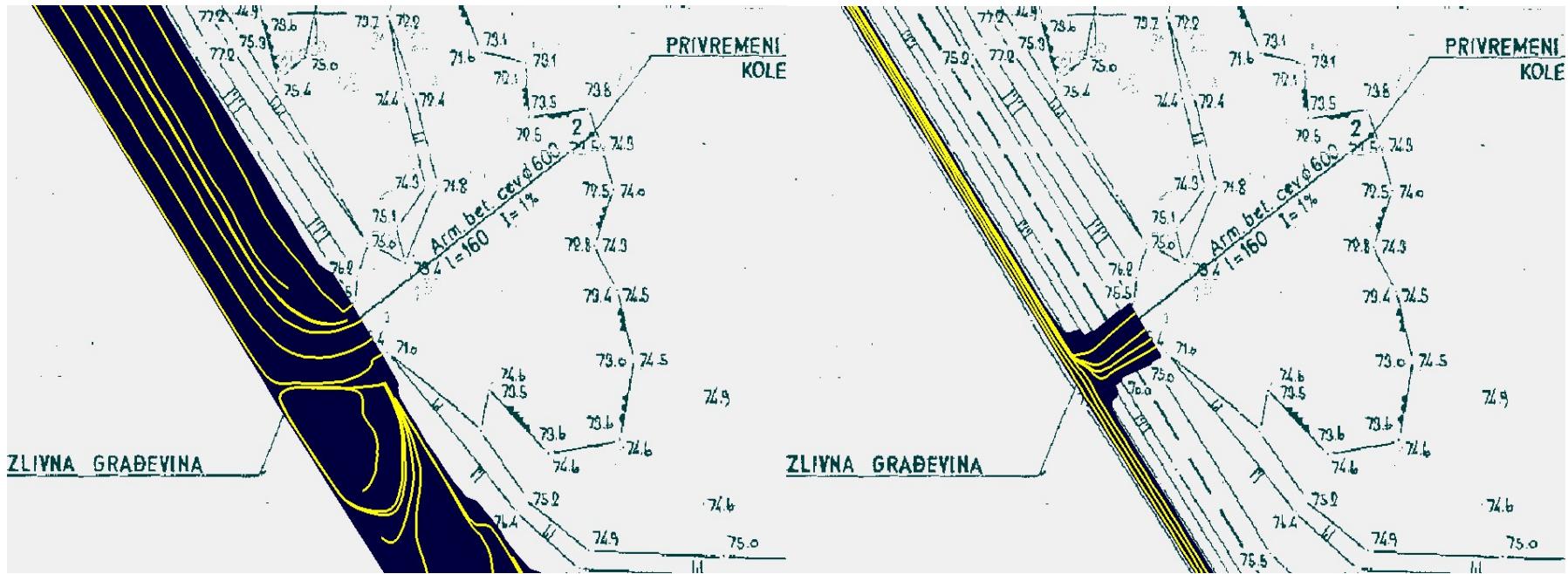
Promena brzine pri oticaju talasa kroz kanal tople vode



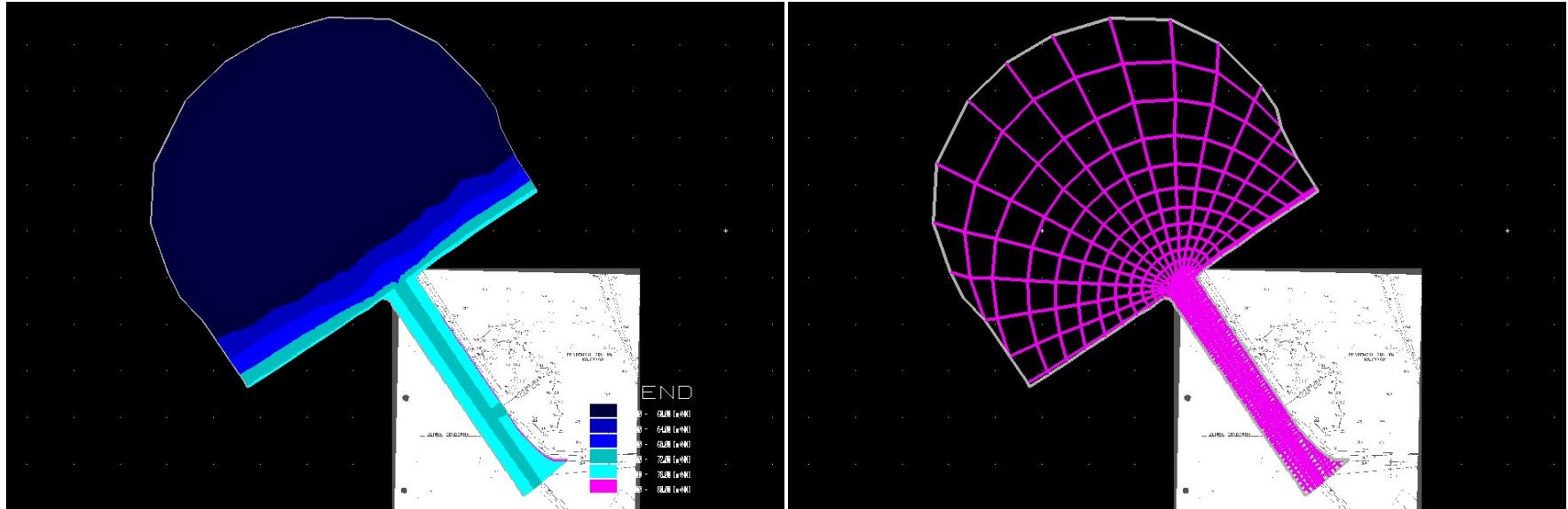
Evolucija polja brzine pri oticaju talasa kroz kanal tople vode



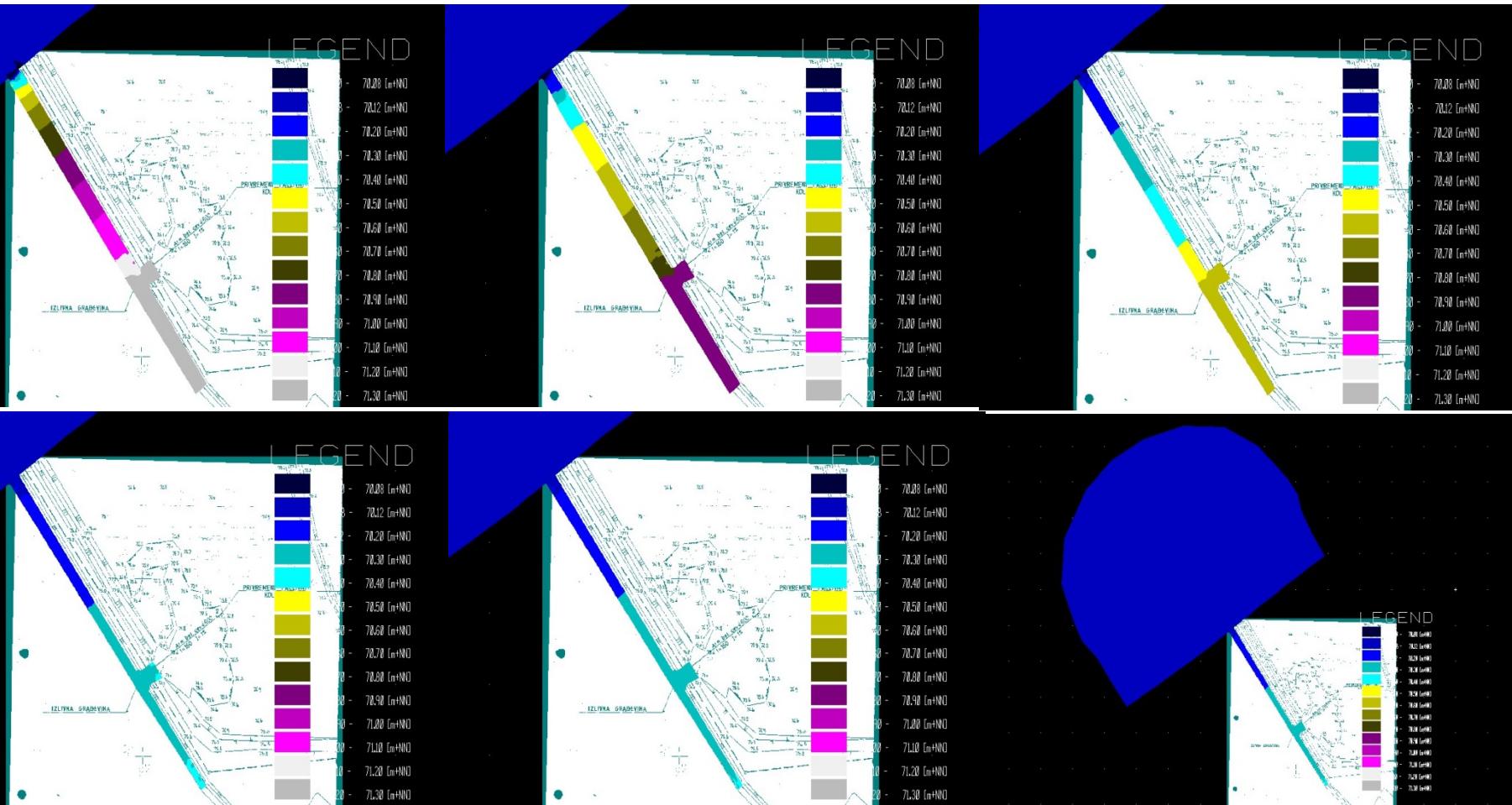
Evolucija strujnica pri oticaju talasa kroz kanal tople vode



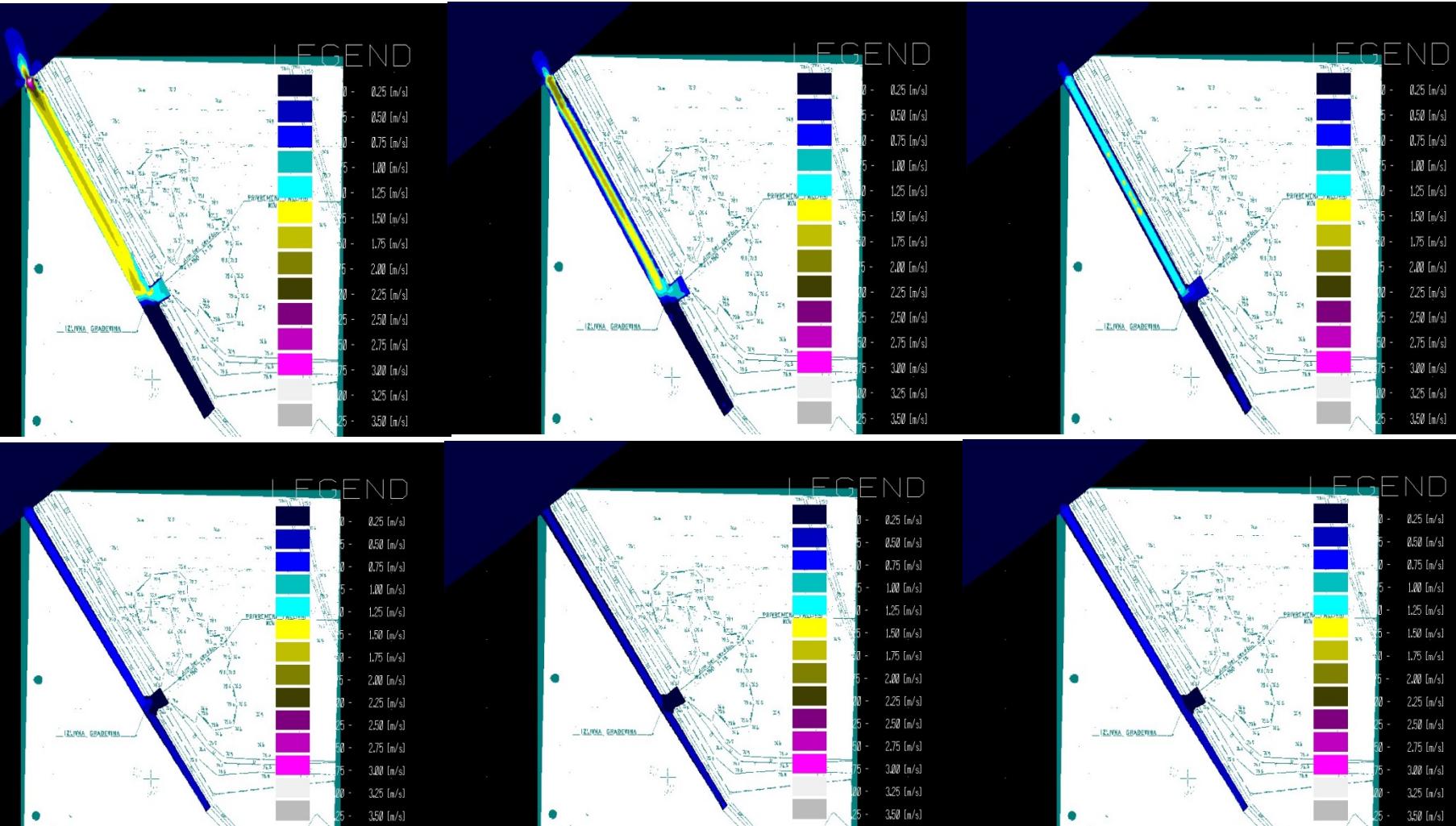
Analiza tečenja na spoju kanala sa Dunavom Batimetrija i računska mreža 2D modela



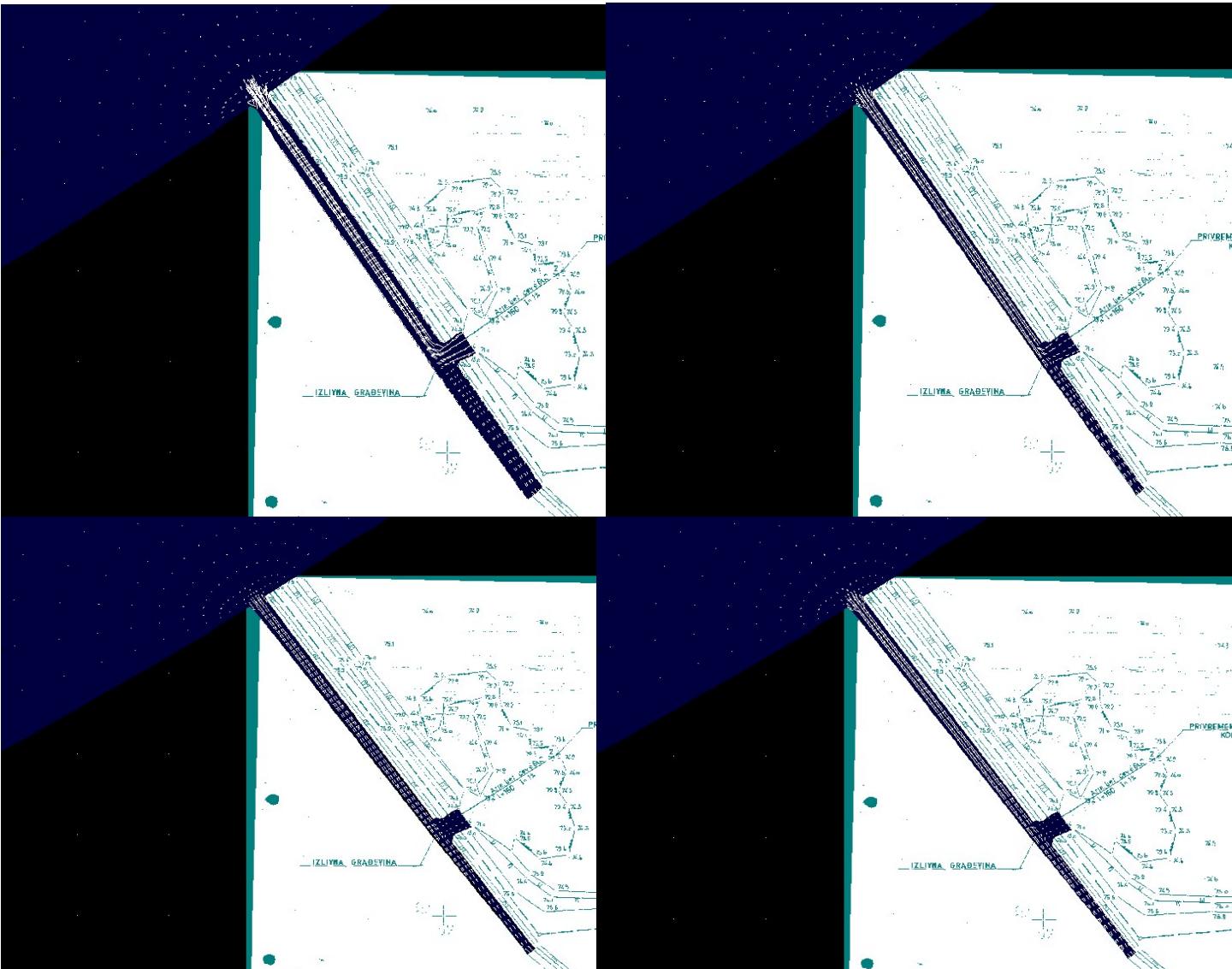
Evolucija nivoa tokom probaja nasipa



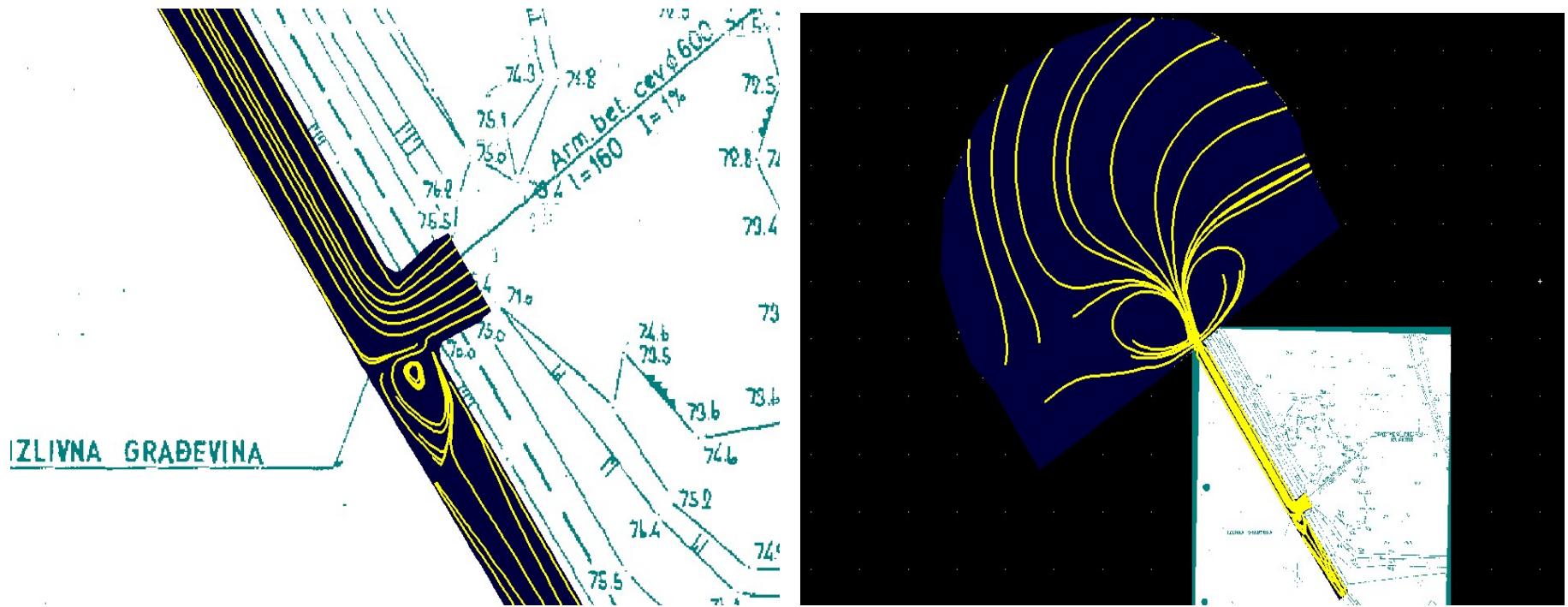
Evolucija intenziteta brzine tokom proboja nasipa



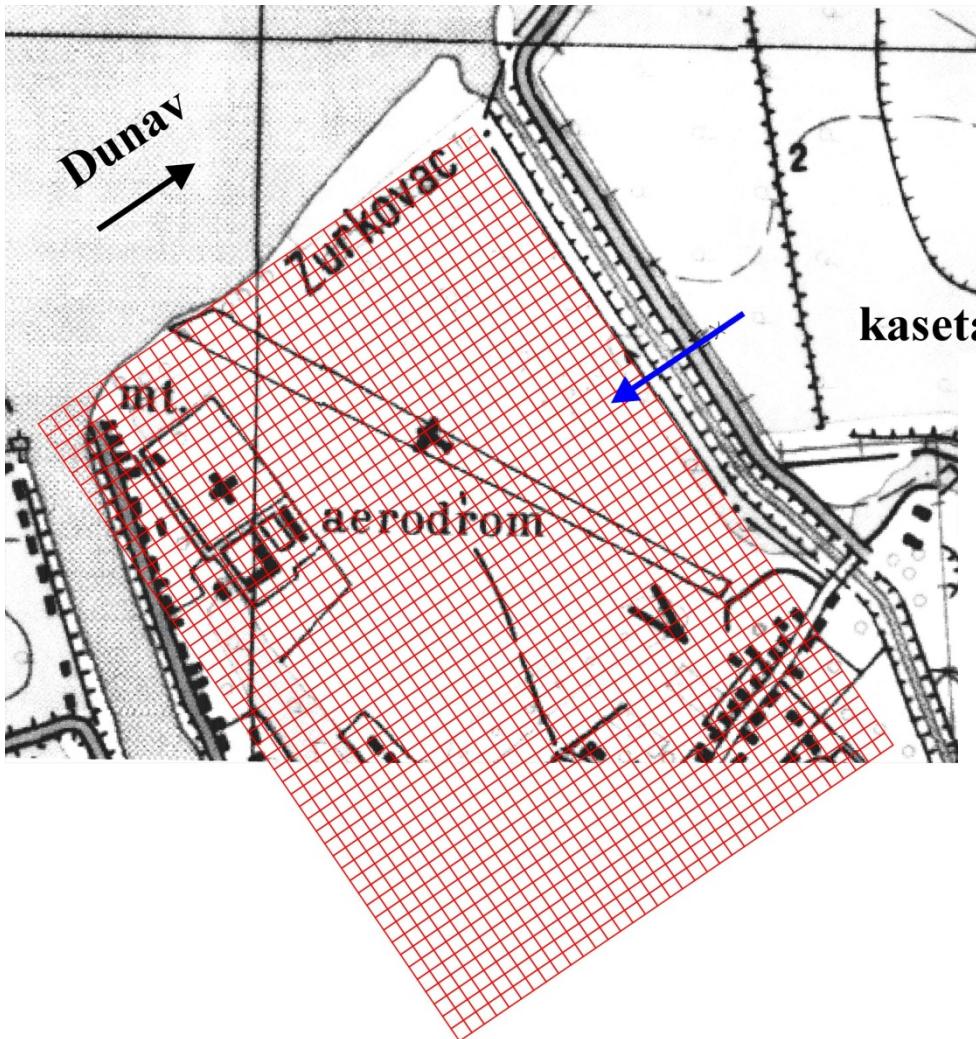
Evolucija polja brzine tokom probroja nasipa



Strujnice na mestu probaja nasipa i na ušću kanala tople vode u Dunav

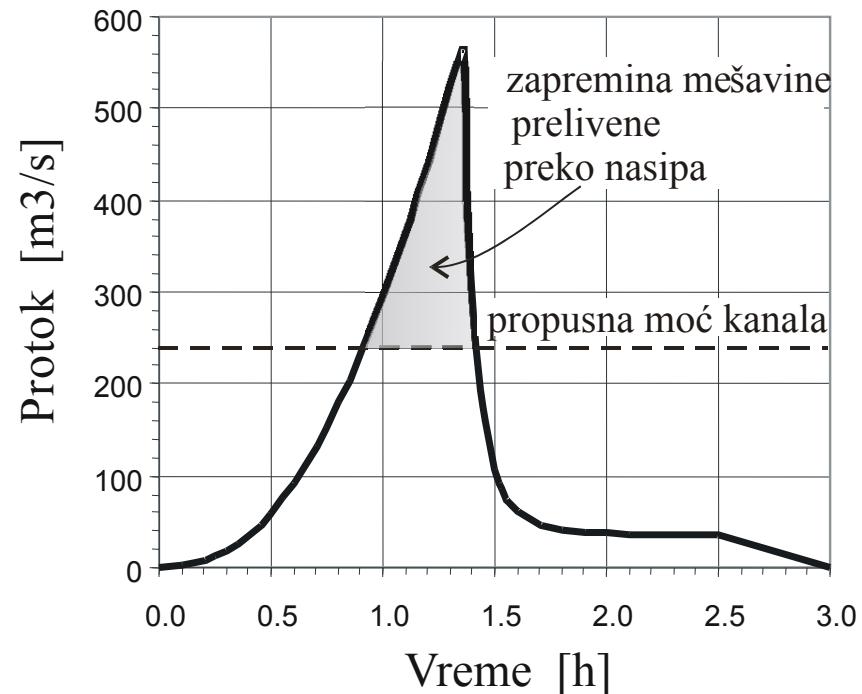


Izlivanje vode iz kanala tople vode

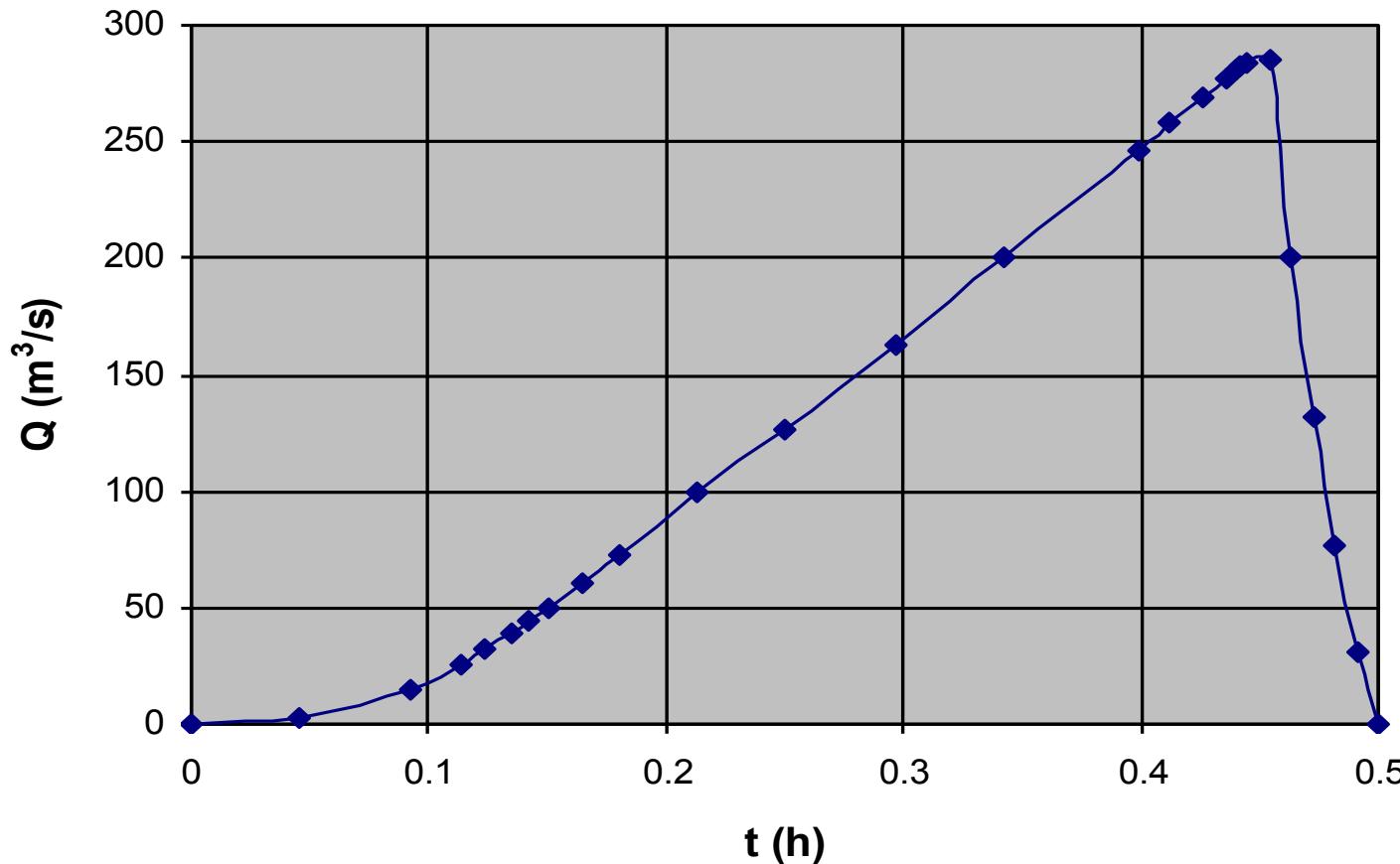


Granični uslov za numeričku simulaciju hidrauličkih posledica rušenja nasipa u konačnoj fazi ekploracije kasete "A"

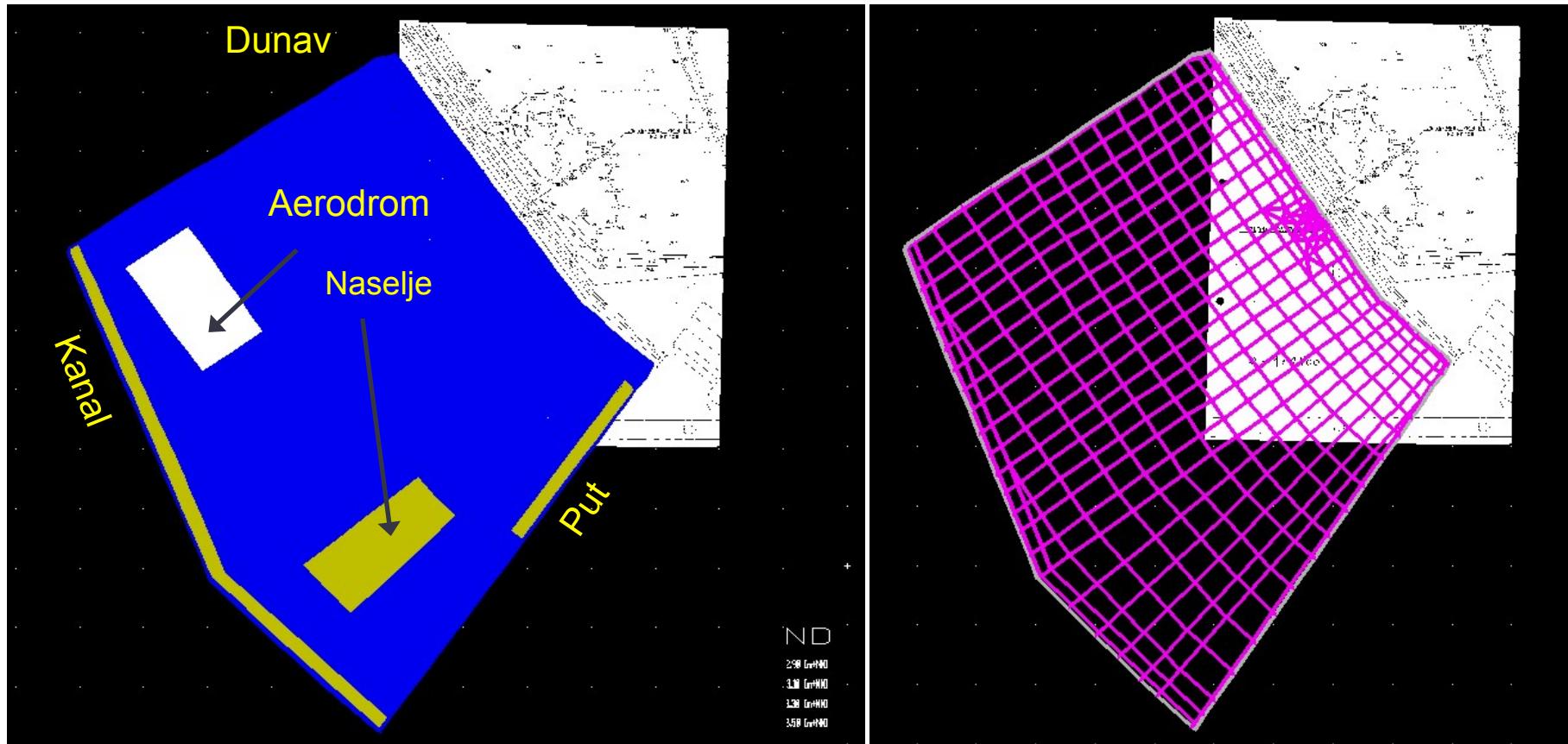
kasete "A"



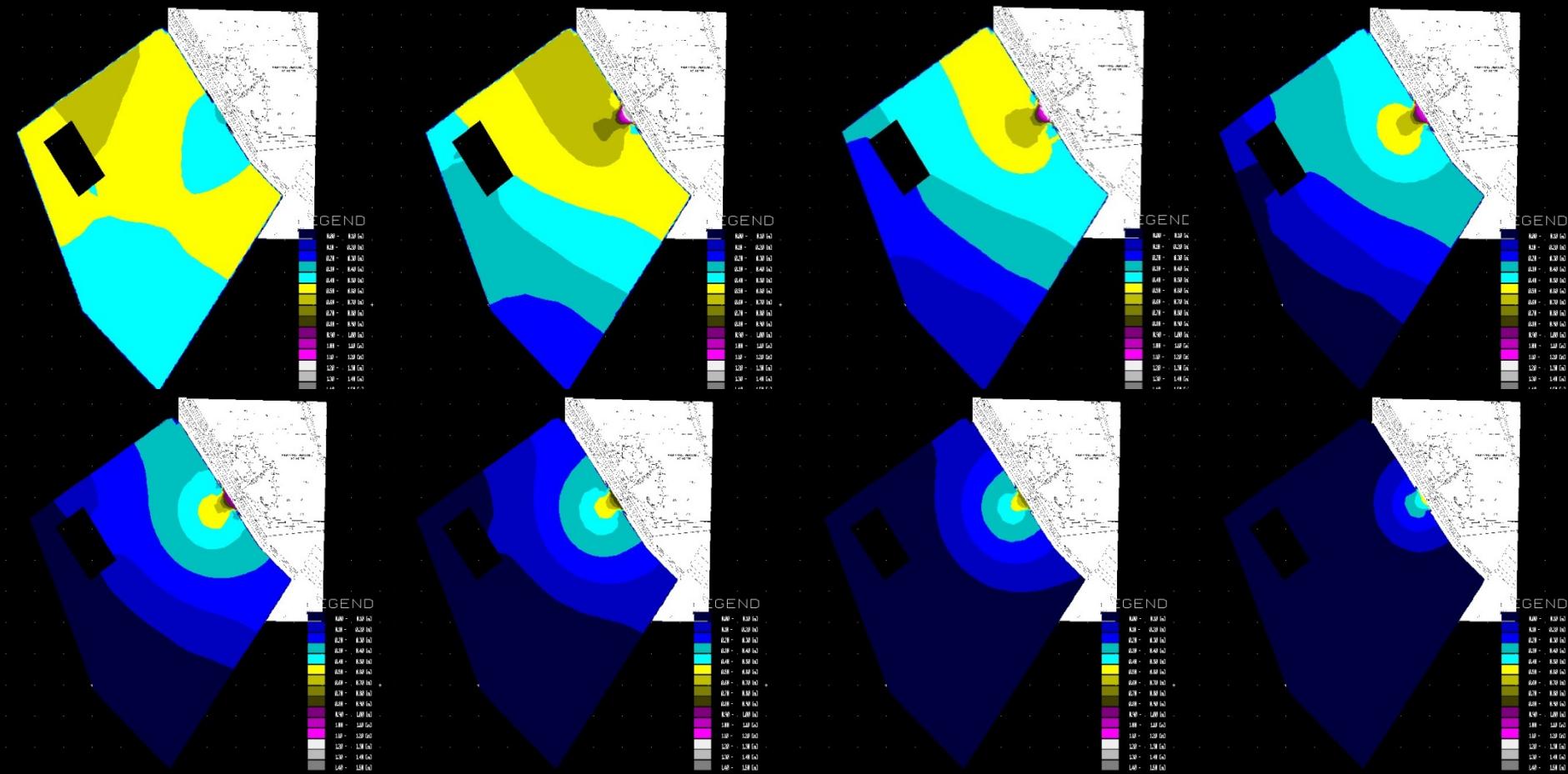
Konačna faza eksploatacije pepelišta
Talas nastao izlivanjem vode iz kanala tople vode



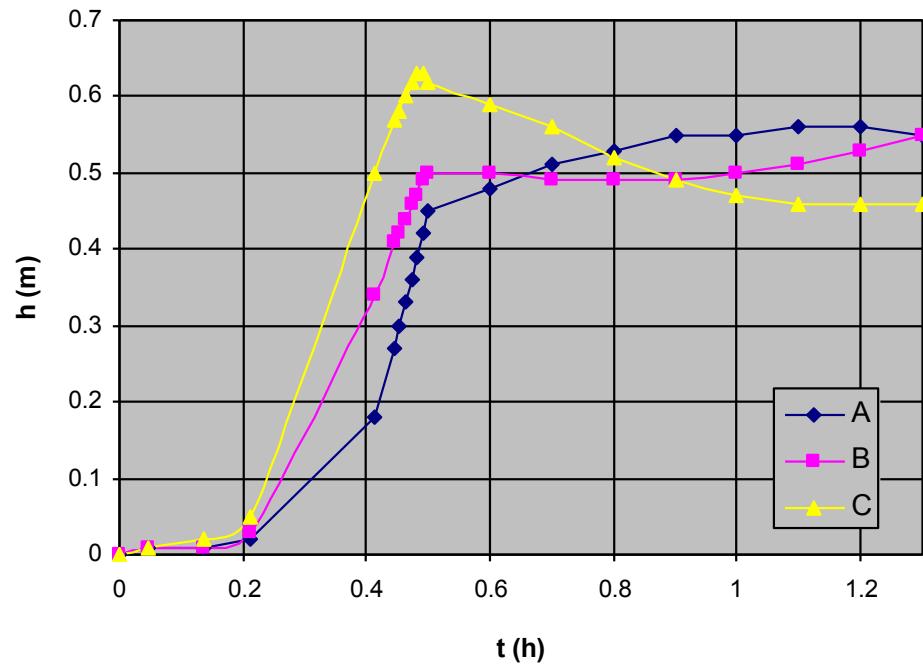
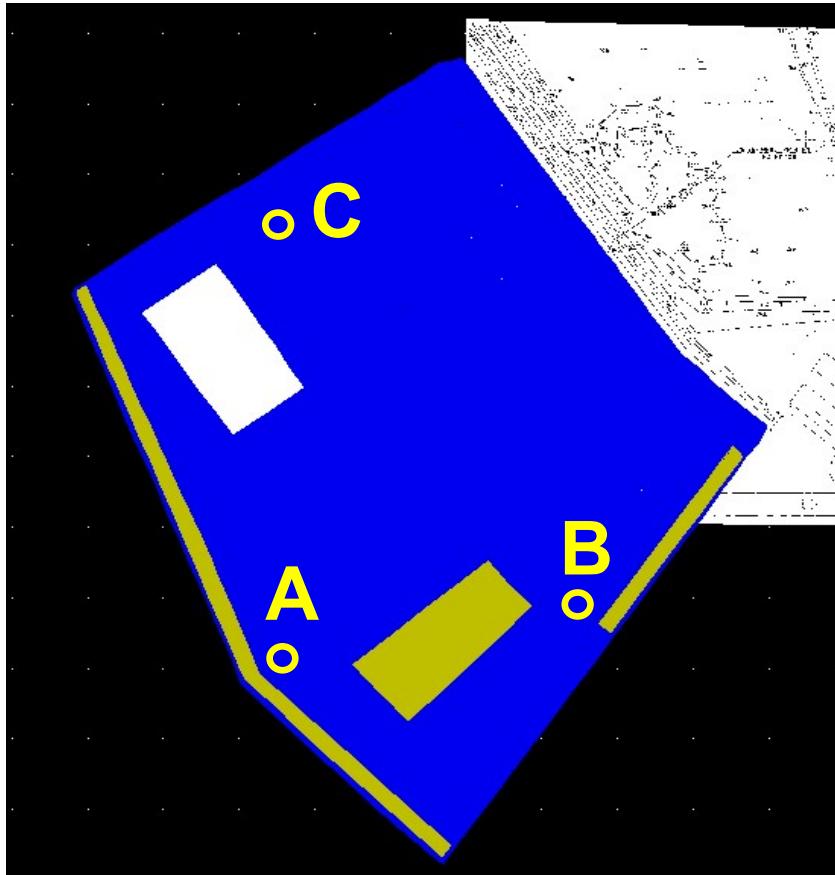
Računski domen i mreža konačnih elemenata



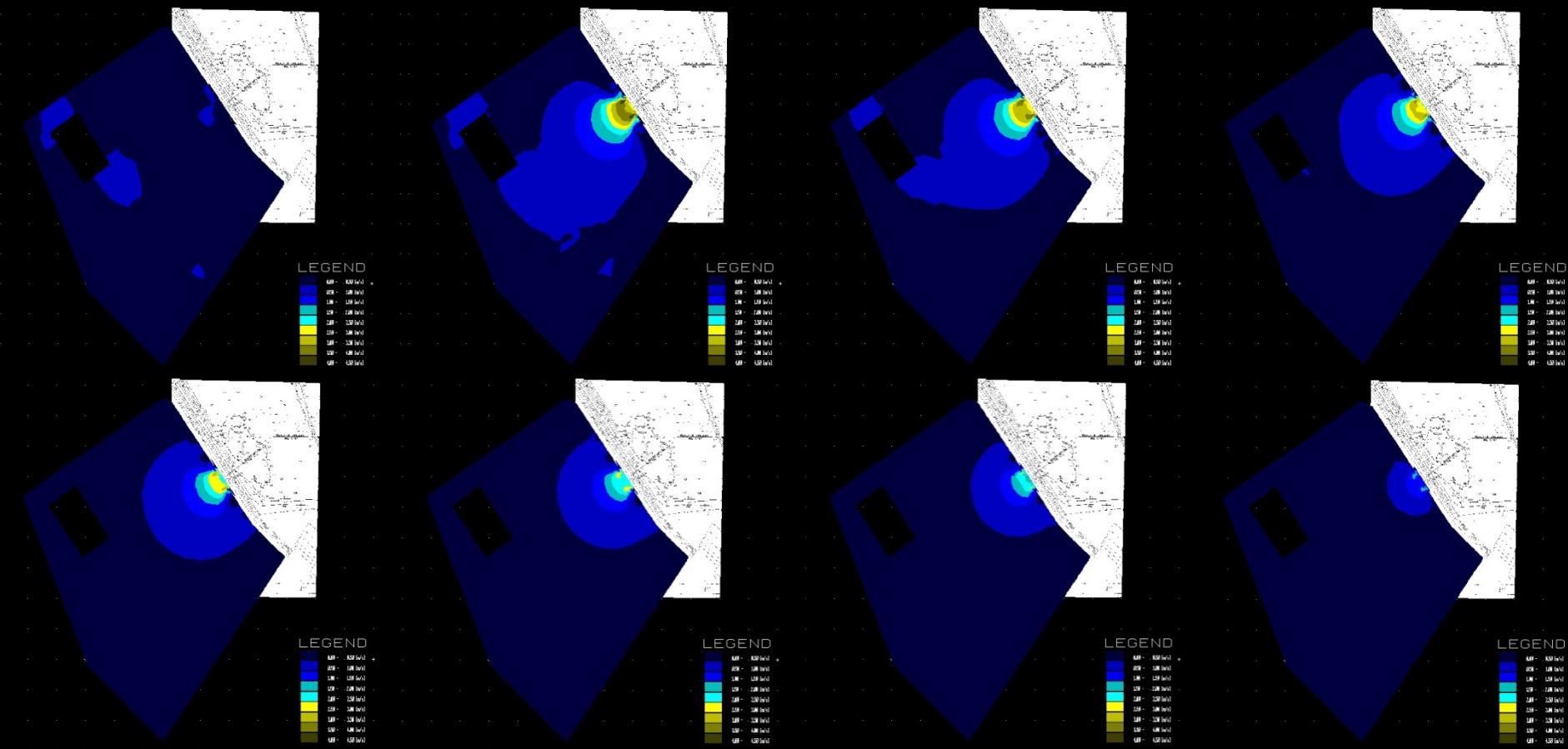
Prostiranje talasa nastalog izlivanjem iz kanala tople vode



Promena dubine u 3 tačke računske oblasti



Evolucija intenziteta brzine tokom probaja nasipa



Zaključci

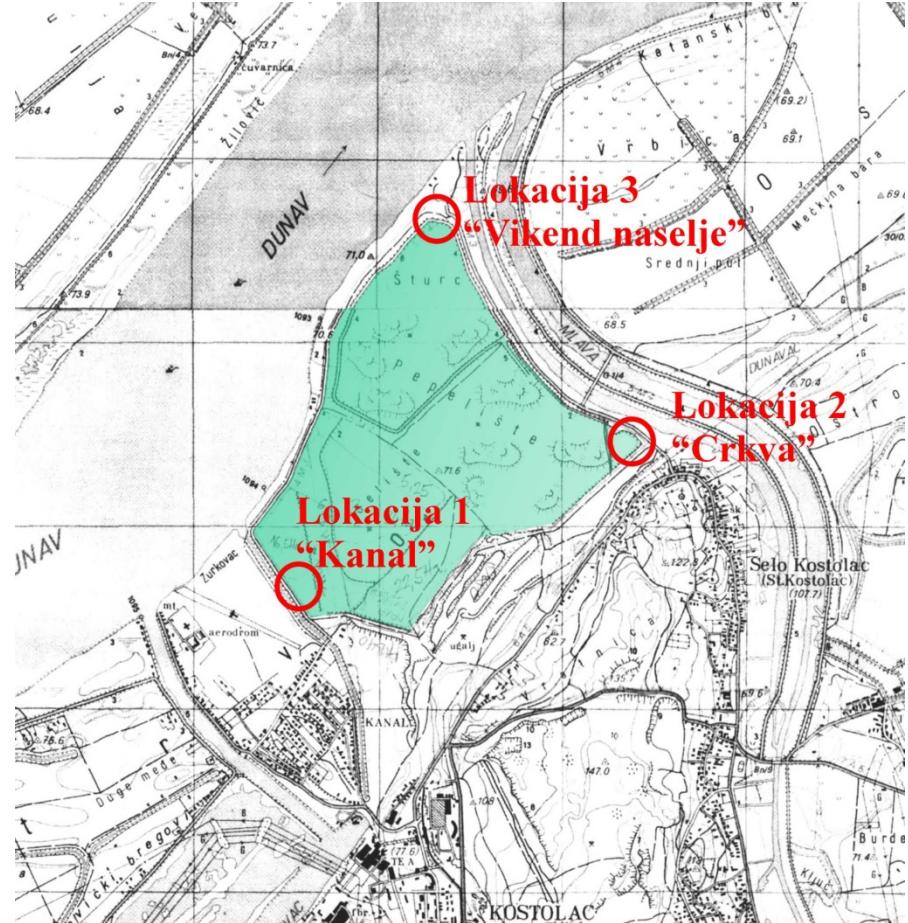
- Deo talasa, koji odgovara propusnoj moći kanala, biće odveden kanalom u Dunav, a deo će preliti nasip i razliti se u zoni aerodroma.
- Prelivena zapremina mešavine iznosi oko $215\ 000\ m^3$
- U poplavljenoj oblasti može se очekivati brzina tečenja do 1 m/s i maksimalna dubina plavljenja od oko 60 cm.
- Plavljenjem bi bili ugroženi stambeni objekti uz put, duž kanala rashladne vode, kao i objekti aerodroma.

Lokacija 2 – “Crkva”

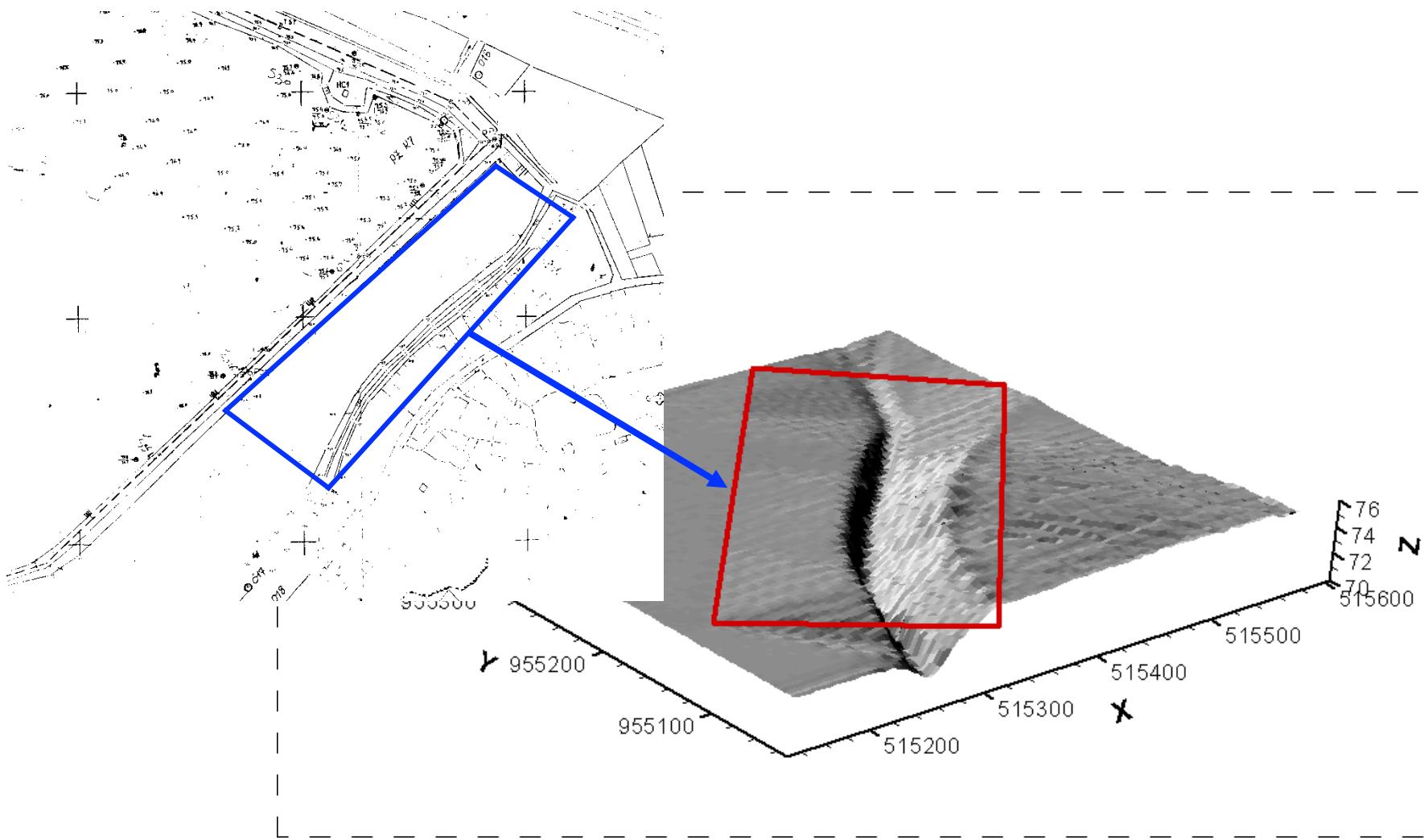
Rekonstrukcija događaja od 11.02.1999.

kalibracija modela i proračun
za sadašnje stanje:

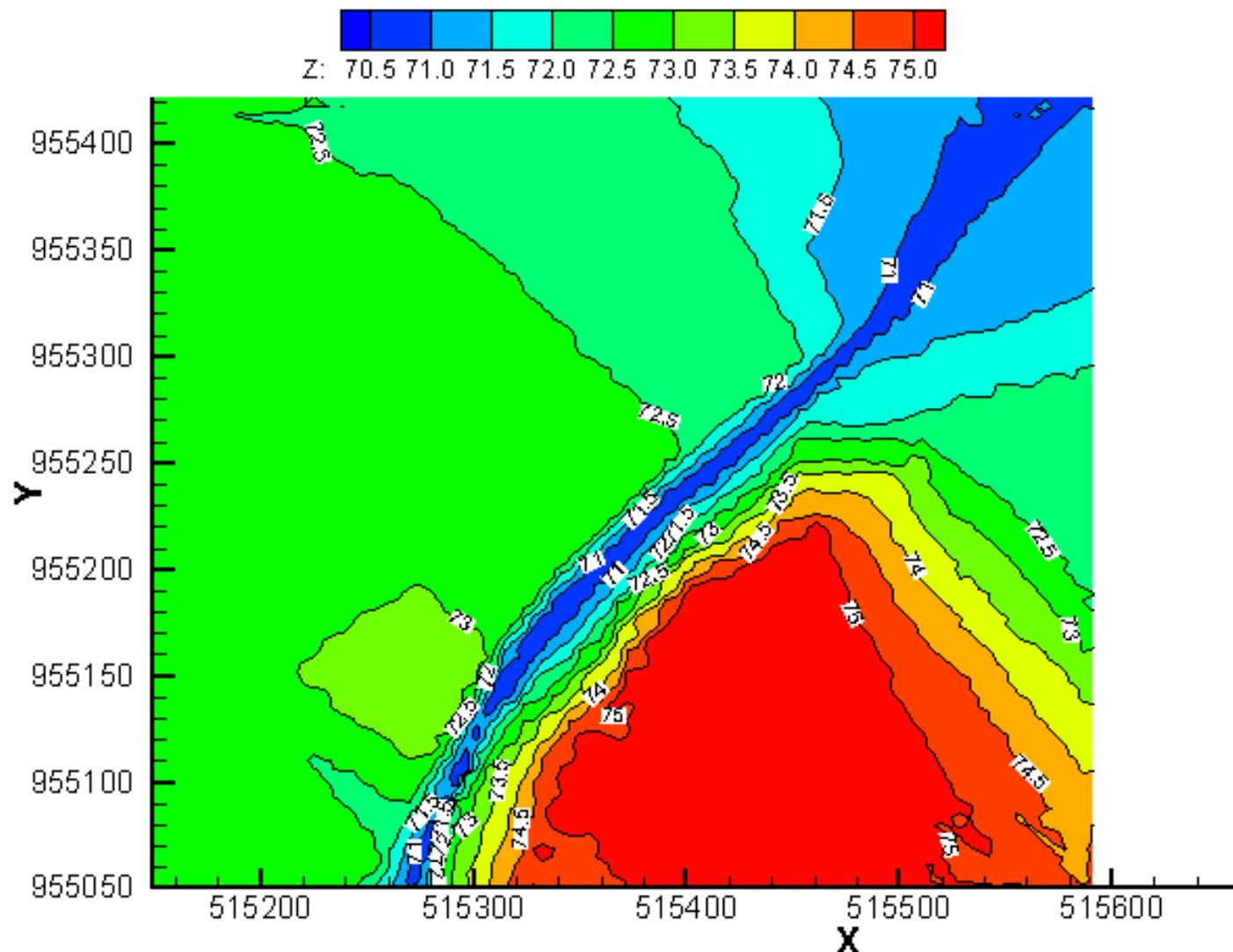
kota krune nasipa: 78,0 mm
visina nasipa: 6,7 m



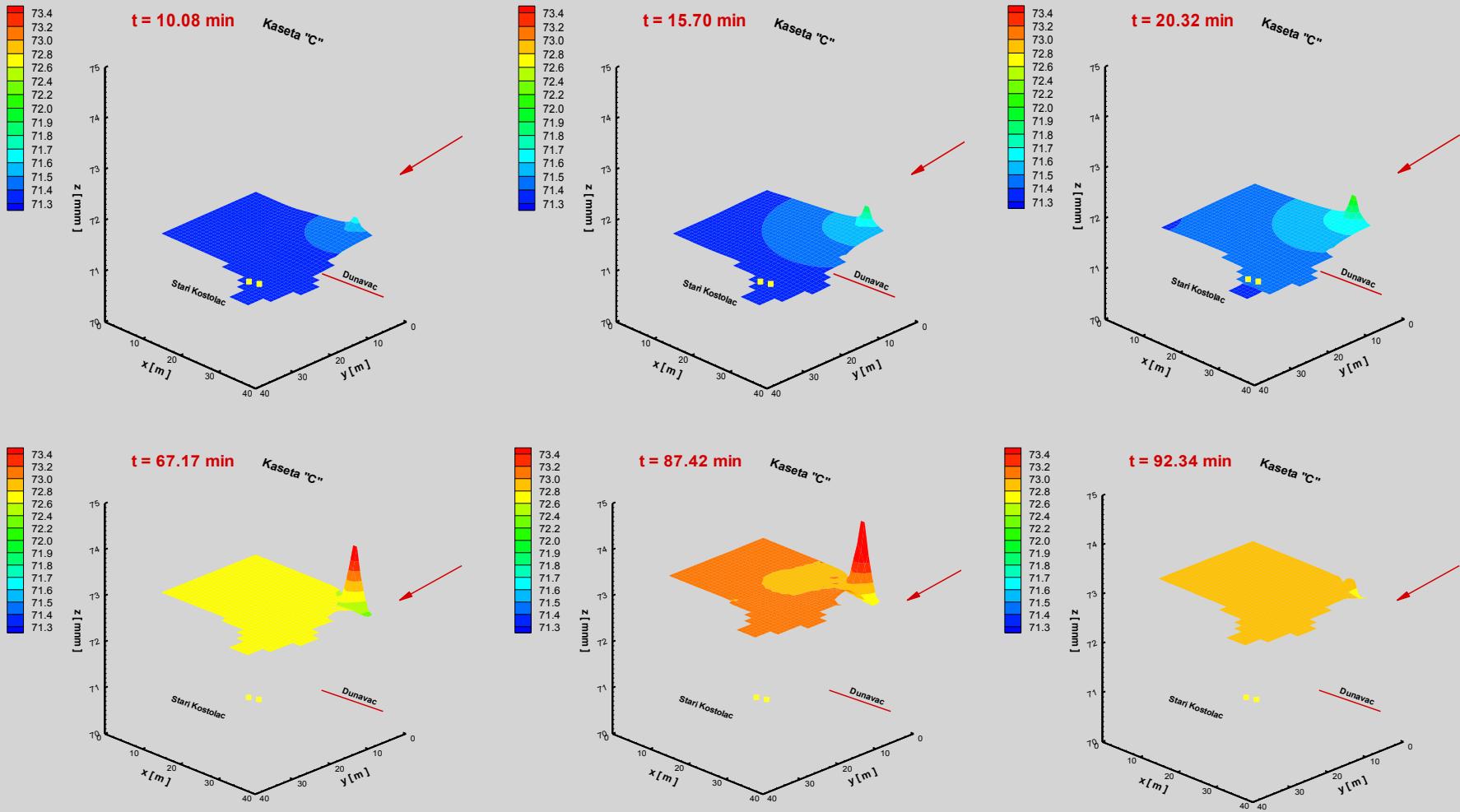
Topografske karakteristike računske oblasti



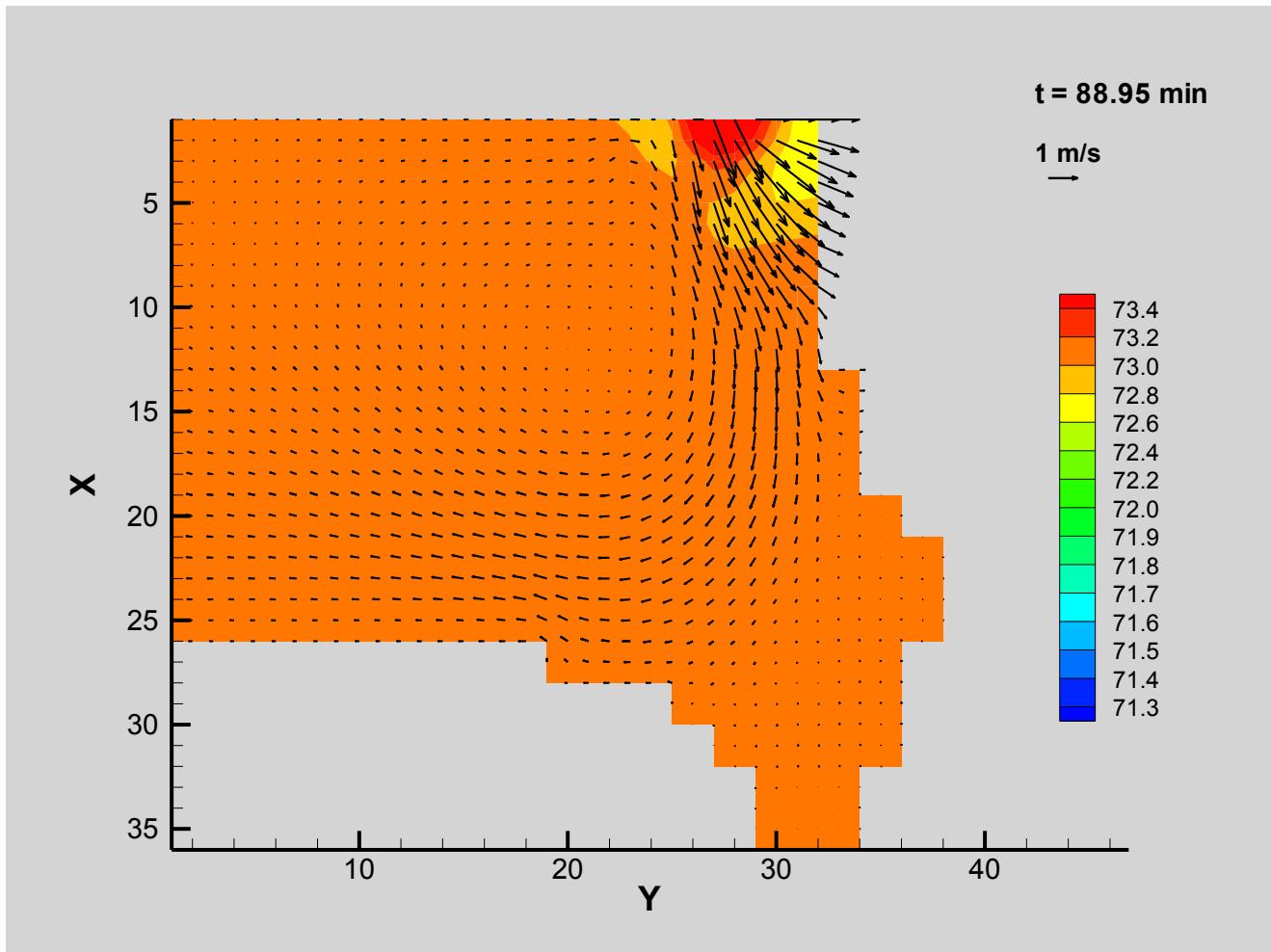
Izohipse računske oblasti



Rezultati proračuna – evolucija talasa



Rezultati proračuna - vektorsko polje brzine



Zaključci

Prolom nasipa:

- Na osnovu tragova poplave iz februara 1999. godine ustanovljeno je da je trajanje rušenja nasipa iznosilo oko 2 h.
- Maksimalni protok u profilu breše javlja se 1,5 h nakon početka rušenja i iznosi oko $120 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Ovom protoku odgovara dubina od oko 3 m i brzina od oko 5 m/s.
- Procenjena zapremina otekle mešavine iznosi $235\,000 \text{ m}^3$
- Početna zapreminska koncentracija čvrste faze je oko 10 %.

Zaključci

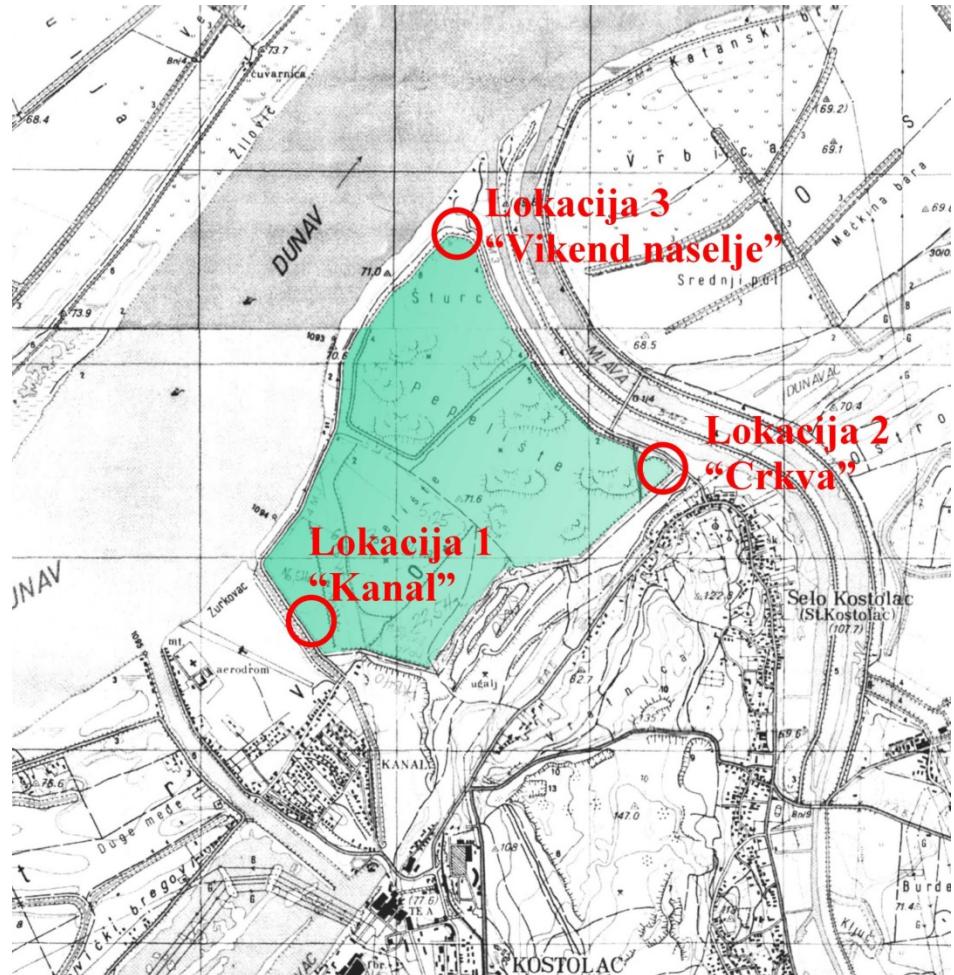
Poplavni talas:

- zahvata ugroženu zonu za oko 15 min, a najveća dubina se javlja 1,5 h nakon početka rušenja nasipa;
- dostiže maksimalnu dubinu od oko 1,8 m (kota 73,1 mm) izmedju Dunavca i puta;
- plavi teren izmedju Dunavca i puta i nekoliko kuća u blizini raskrsnice (plavna površina prikazana na posebnoj karti)

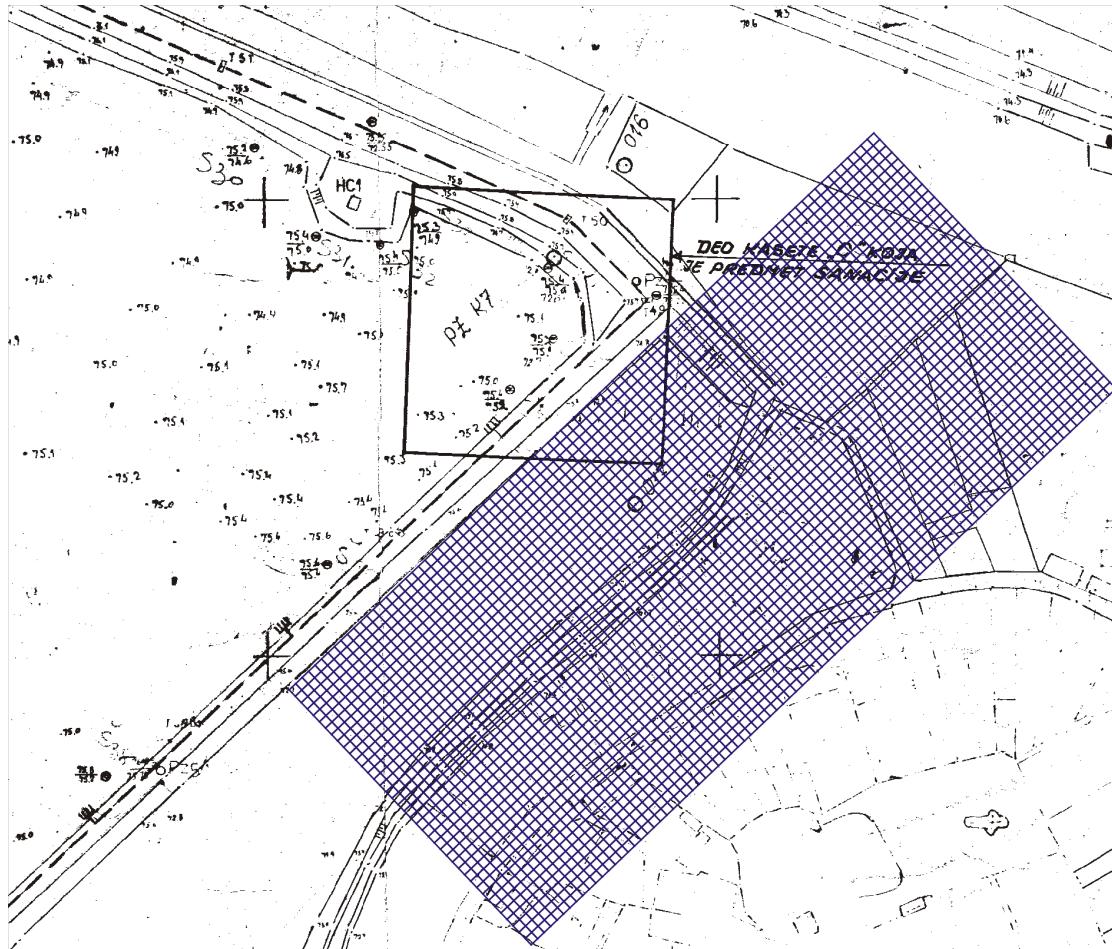
Lokacija 2 - "Crkva"

Prognoza za konačnu fazu eksploracije pepelišta

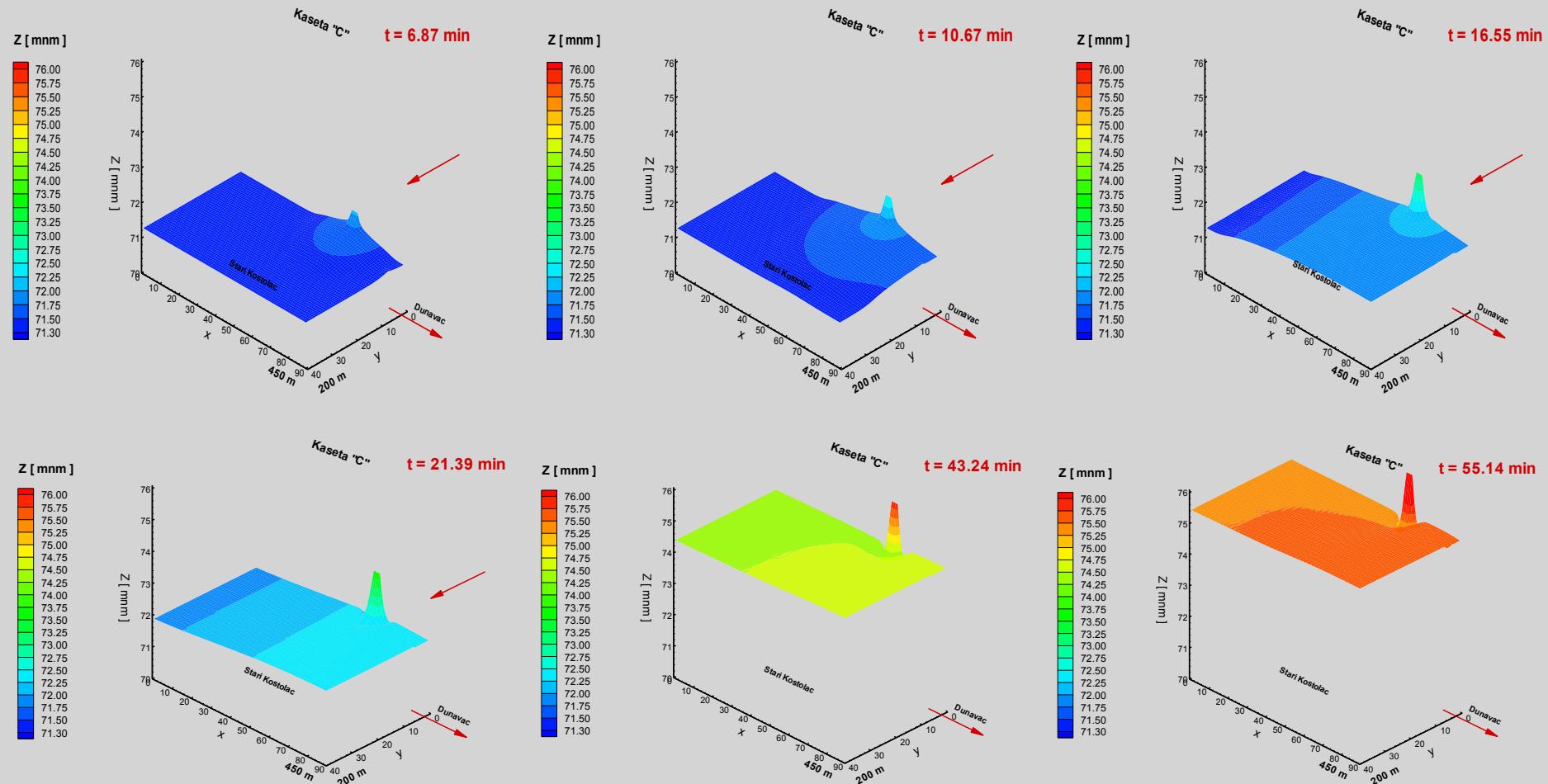
kota krune nasipa: 94,0 mm
visina nasipa: 22,7 m



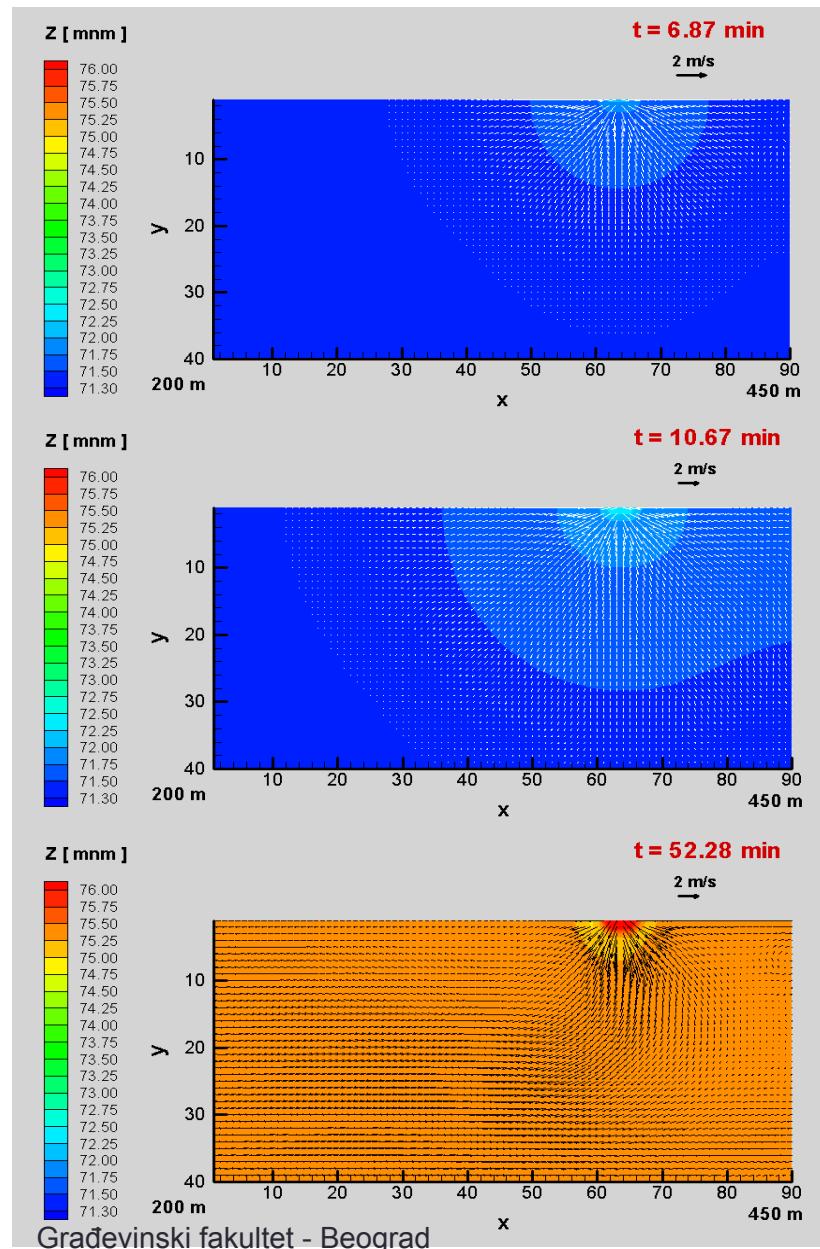
Računska mreža



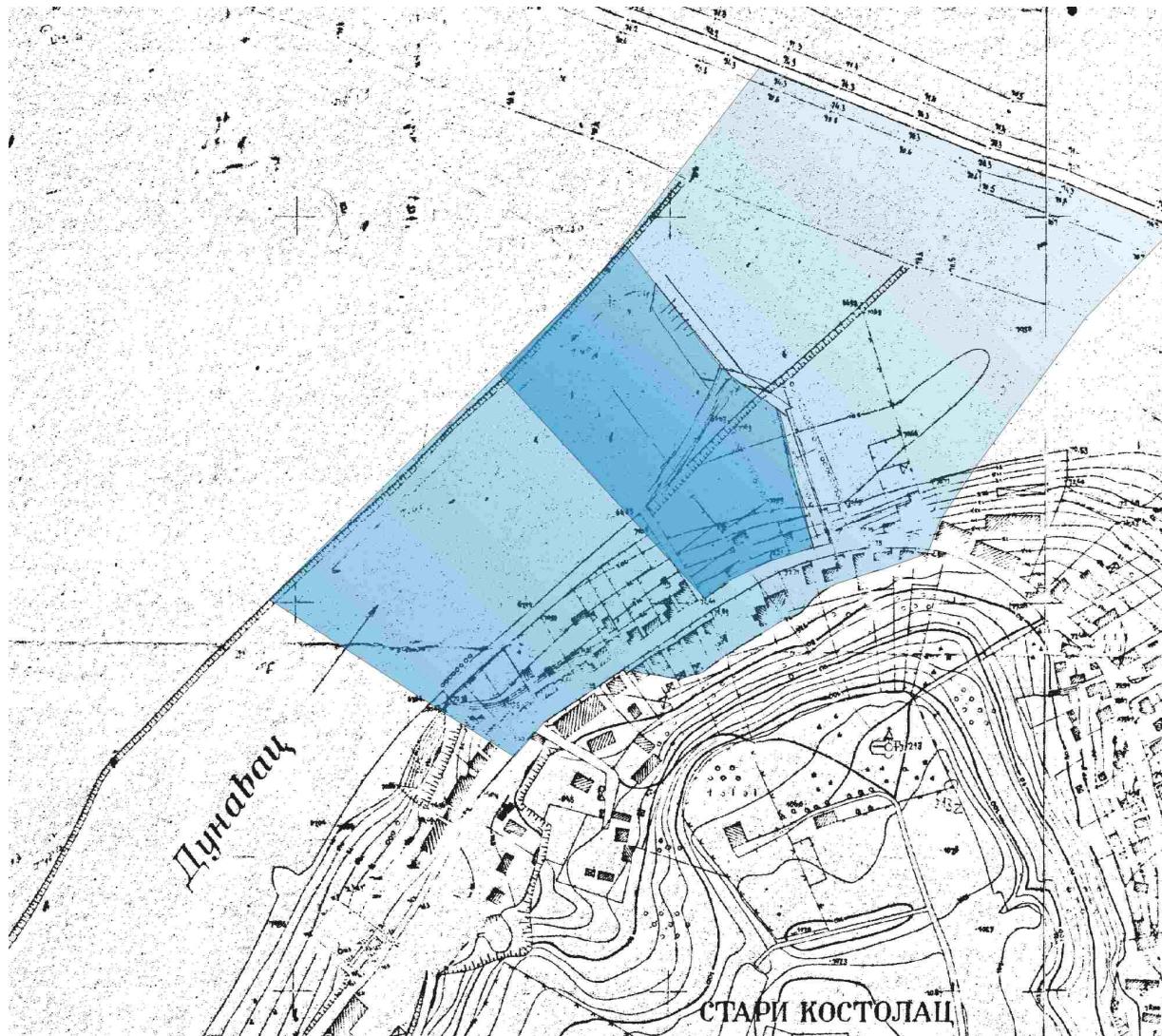
Rezultati proračuna – evolucija talasa



Rezultati proračuna: prostiranje talasa i vektorsko polje brzine



Plavna oblast



Zaključci

Prolom nasipa:

- Pri trajanju razvoja breše od 3 h, maksimalni protok u profilu breše javlja se 1,15 h nakon početka rušenja i iznosi oko $400 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Ovom protoku odgovara dubina od oko 6,5 m i brzina od oko 6 m/s.
- Procena je da bi zapremina otekle mešavine iznosila oko $630\,000 \text{ m}^3$.
- Početna zapreminska koncentracija čvrste faze iznosi oko 8.5%.

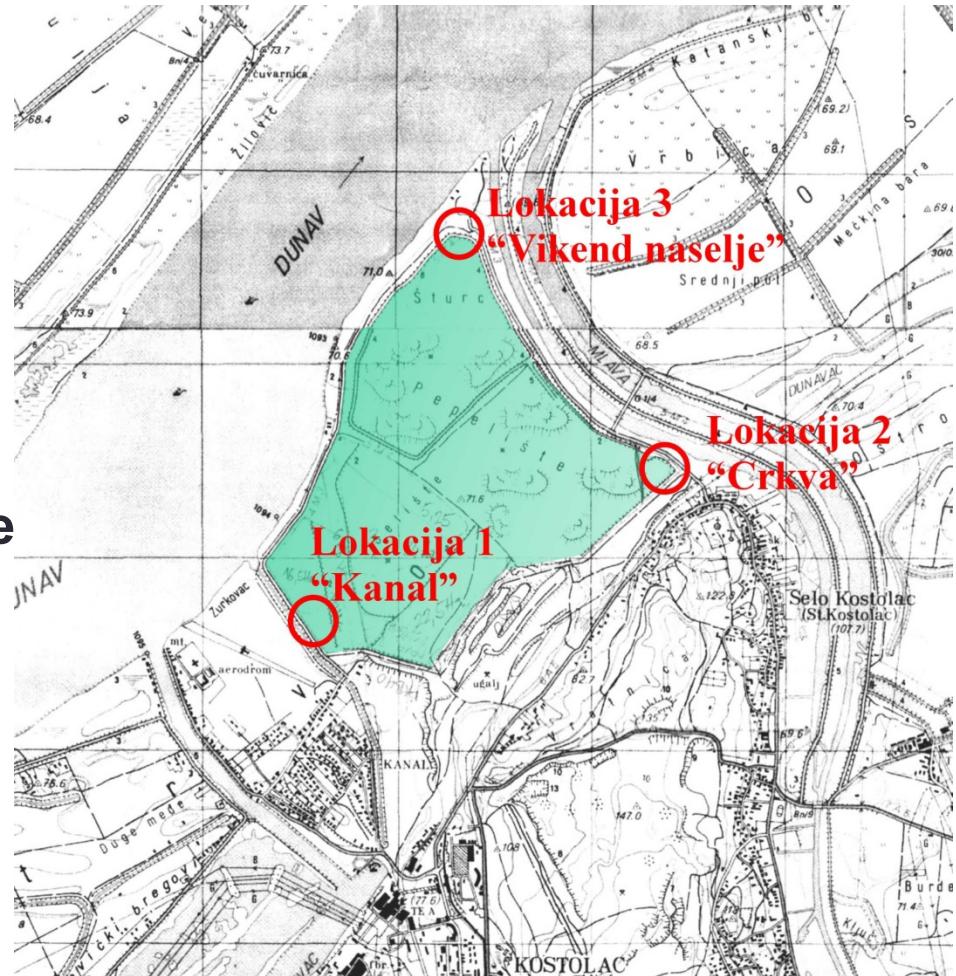
Zaključci

Poplavni talas:

- zahvata ugroženu zonu za oko 10 min, a najveća dubina se javlja 1 h nakon početka rušenja nasipa;
- dostiže maksimalnu dubinu od oko 5 m (kota 76 mm) u podnožju brda naspram breše;
- plavi put na dužini od oko 250 m, kao i sve kuće sa obe strane puta;
- ostavlja malu mogućnost za uzbunjivanje stanovništva, a ne daje mogućnost blagovremene evakuacije materijalnih dobara.

Lokacija 3 – “Vikend naselje”

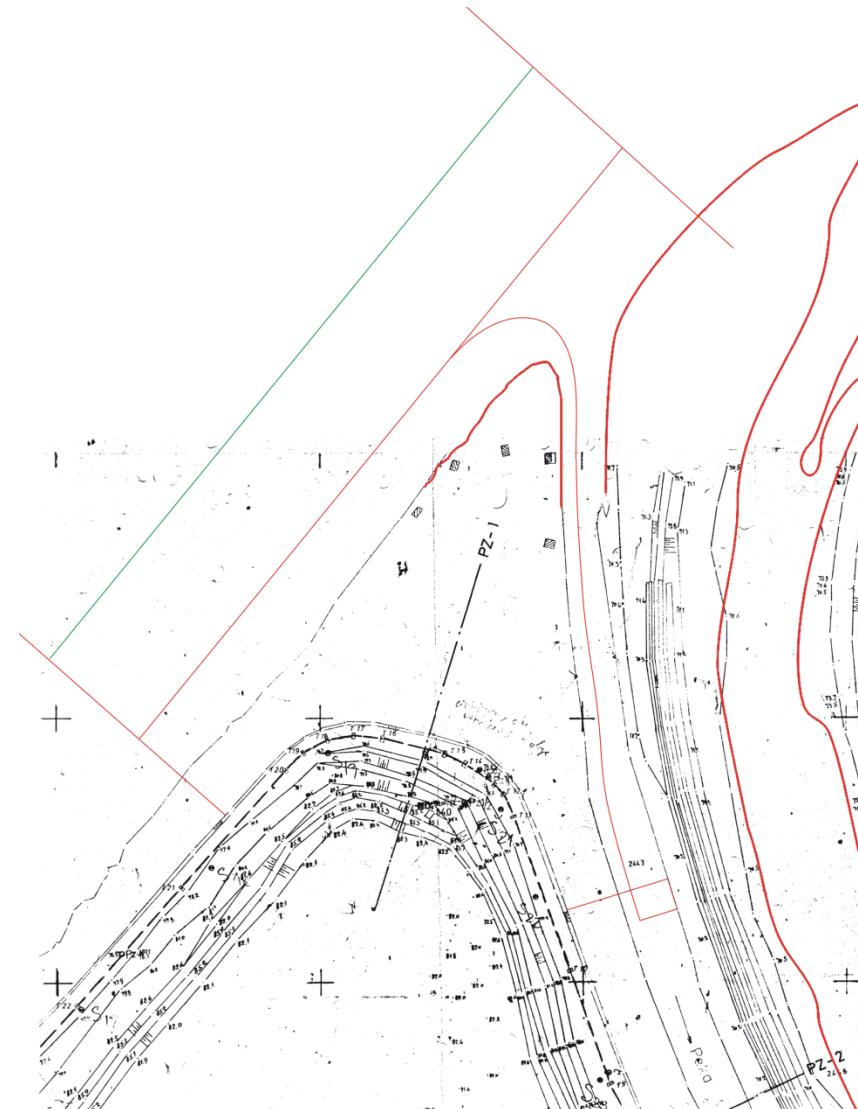
Prognoza hidrauličkih posledica
rušenja nasipa za sadašnje stanje
pepelišta



Topografske karakteristike računske oblasti i hrapavost



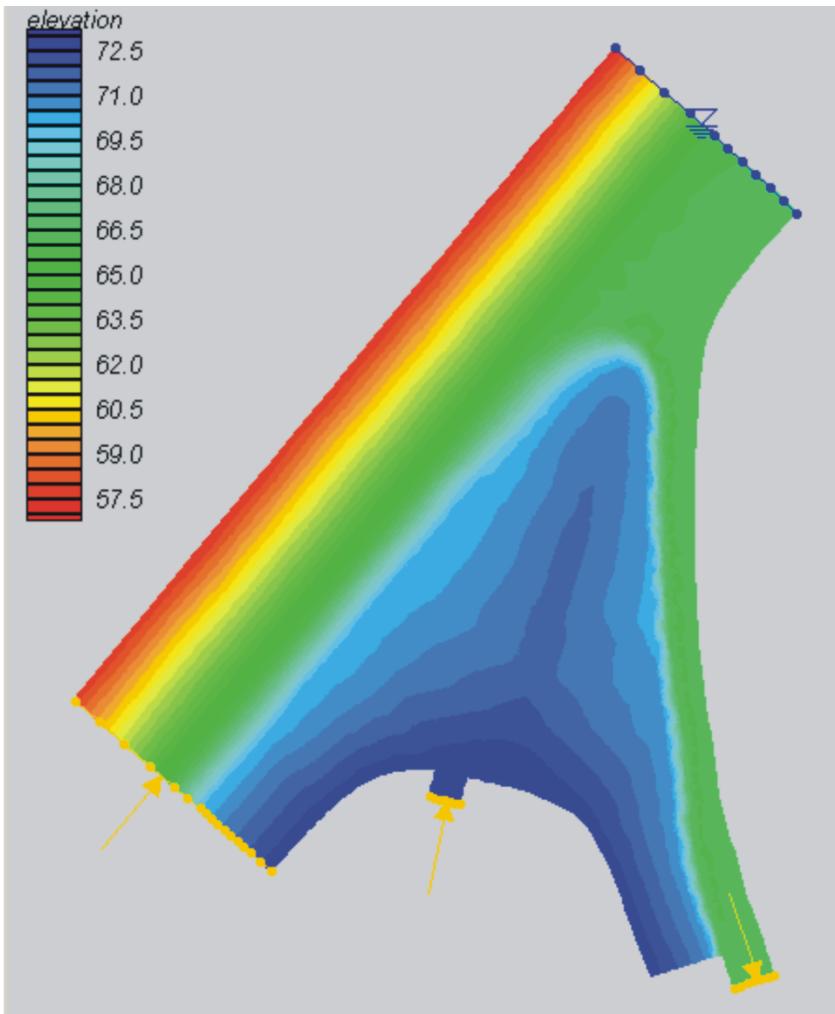
25.06.2003.



Građevinski fakultet - Beograd

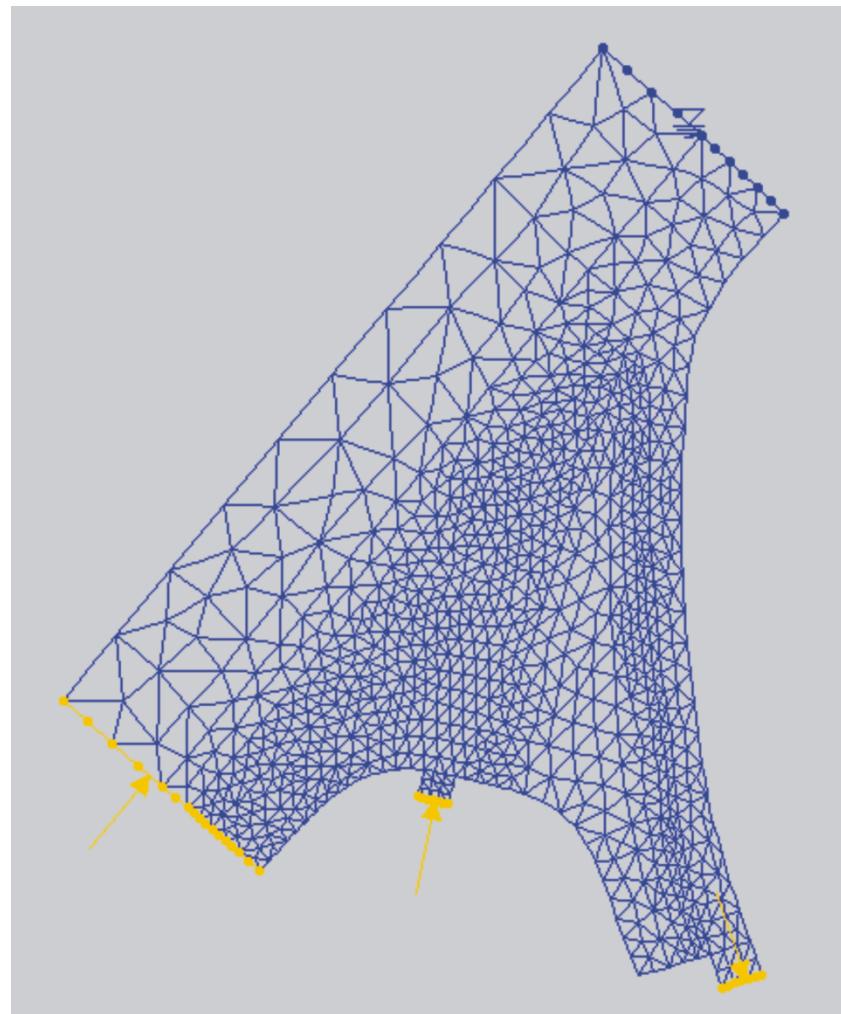
76

Topografija, računska mreža i granični uslovi



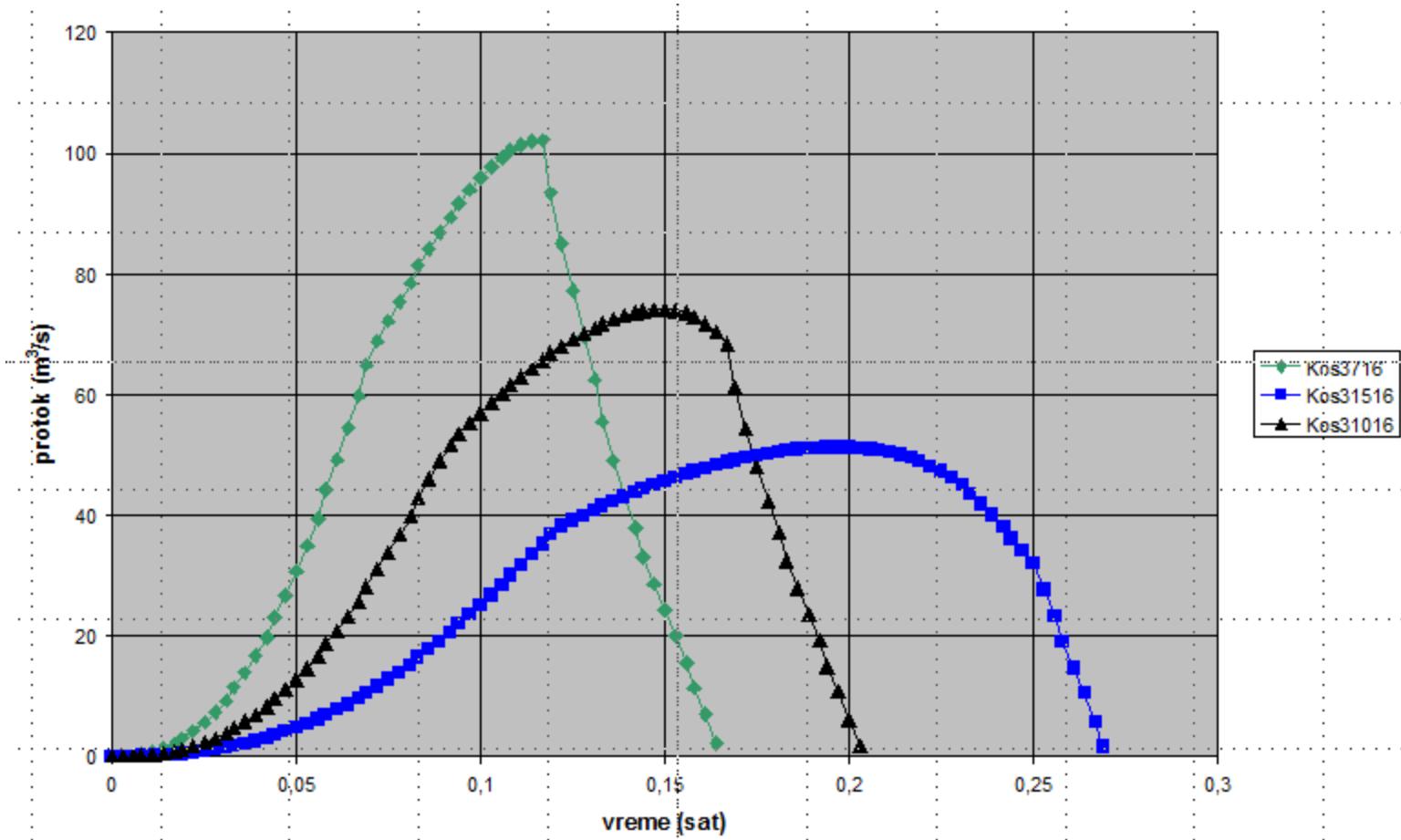
25.06.2003.

Građevinski fakultet - Beograd

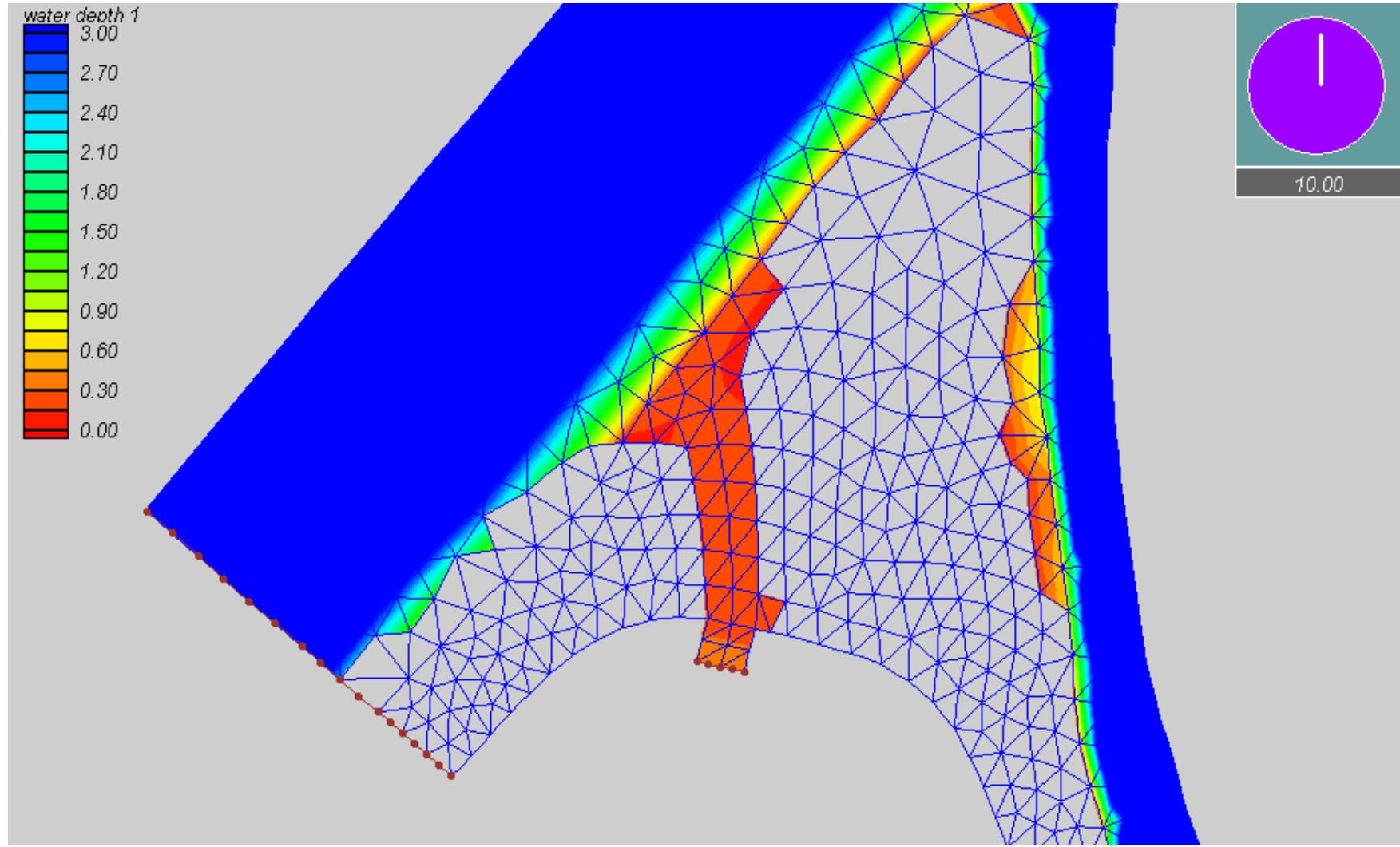


77

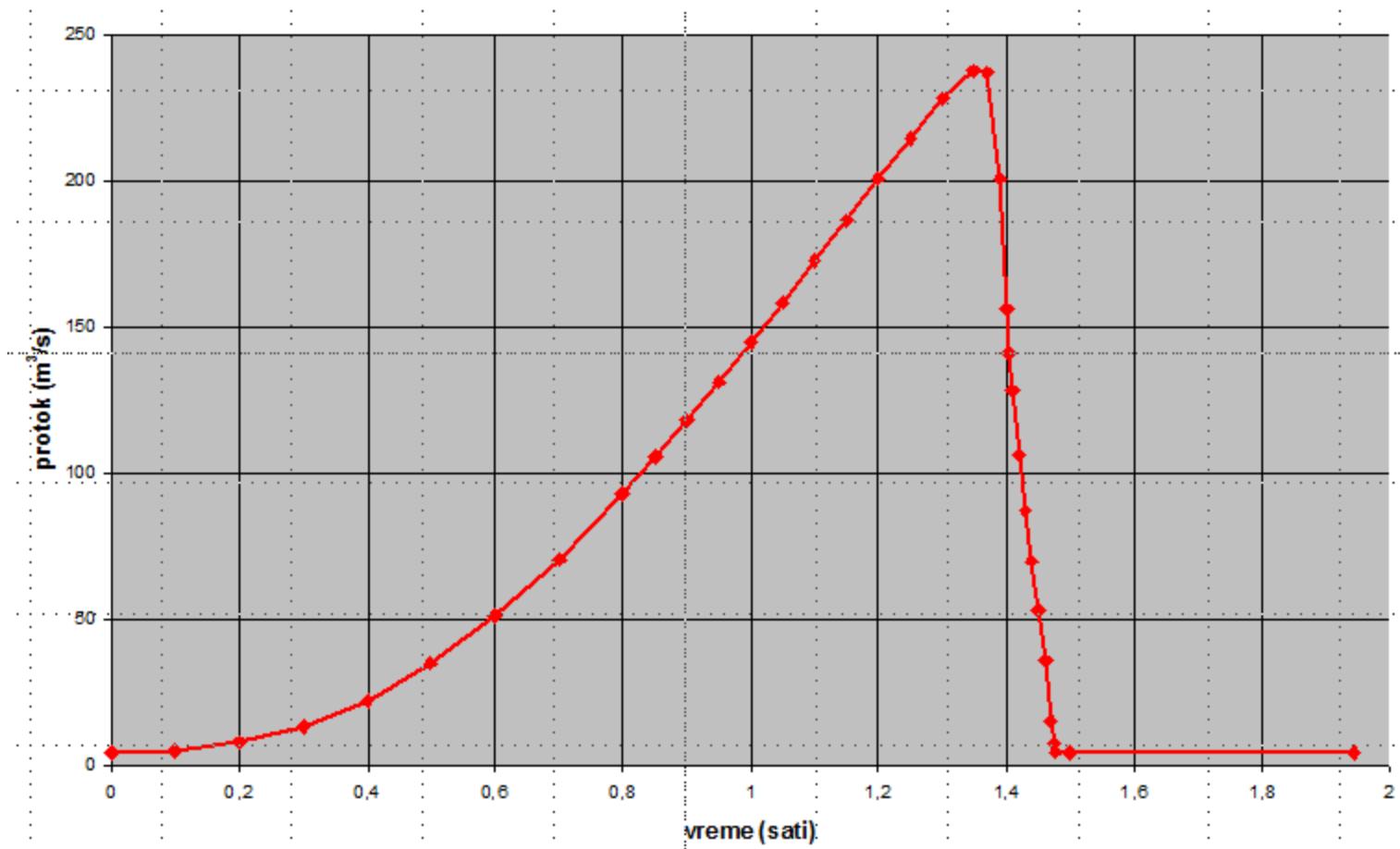
Hidrogrami u profilu breše



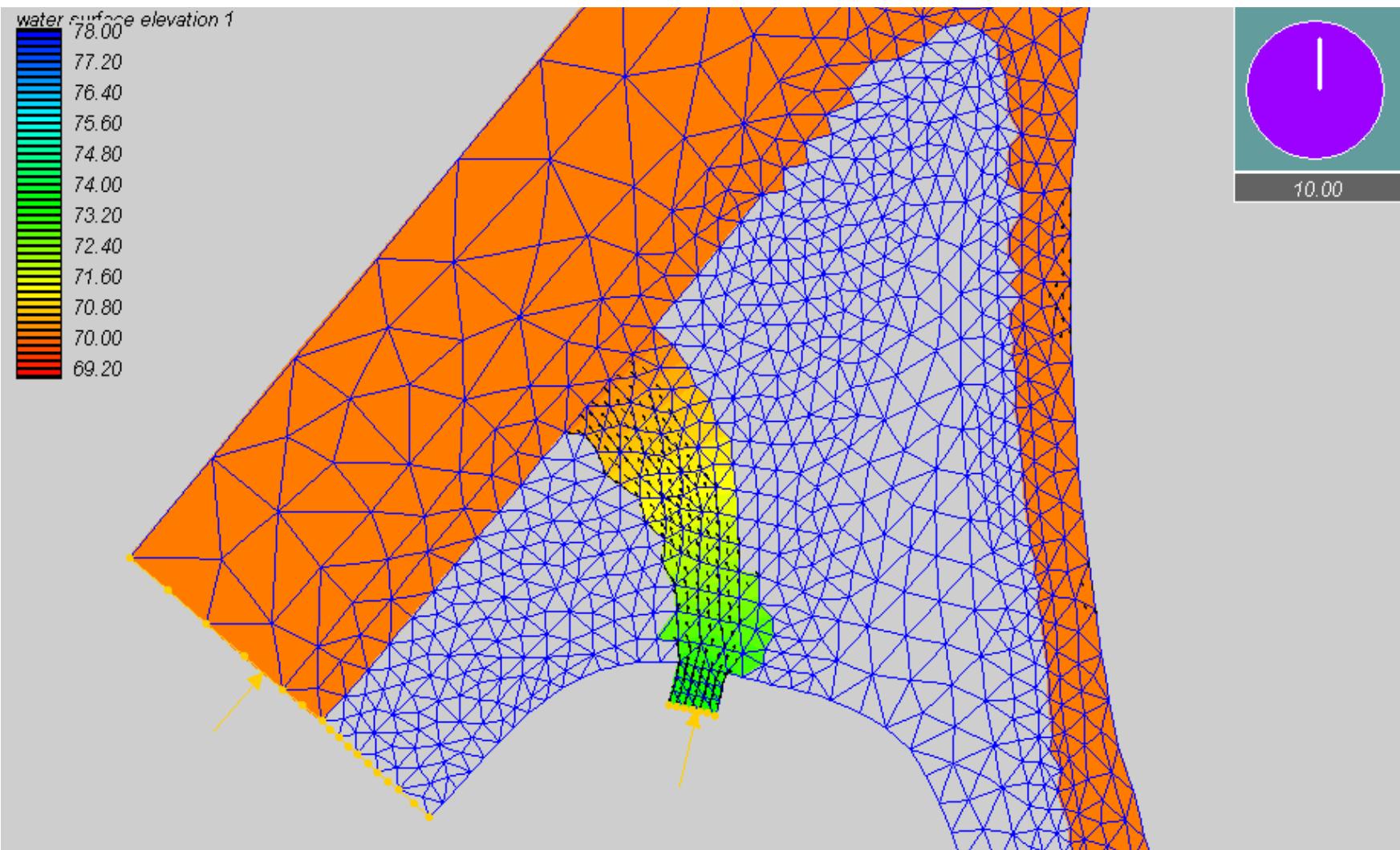
Dubina vode za $Q_{\max} = 102 \text{ m}^3/\text{s}$: $t = 10 \text{ s}$



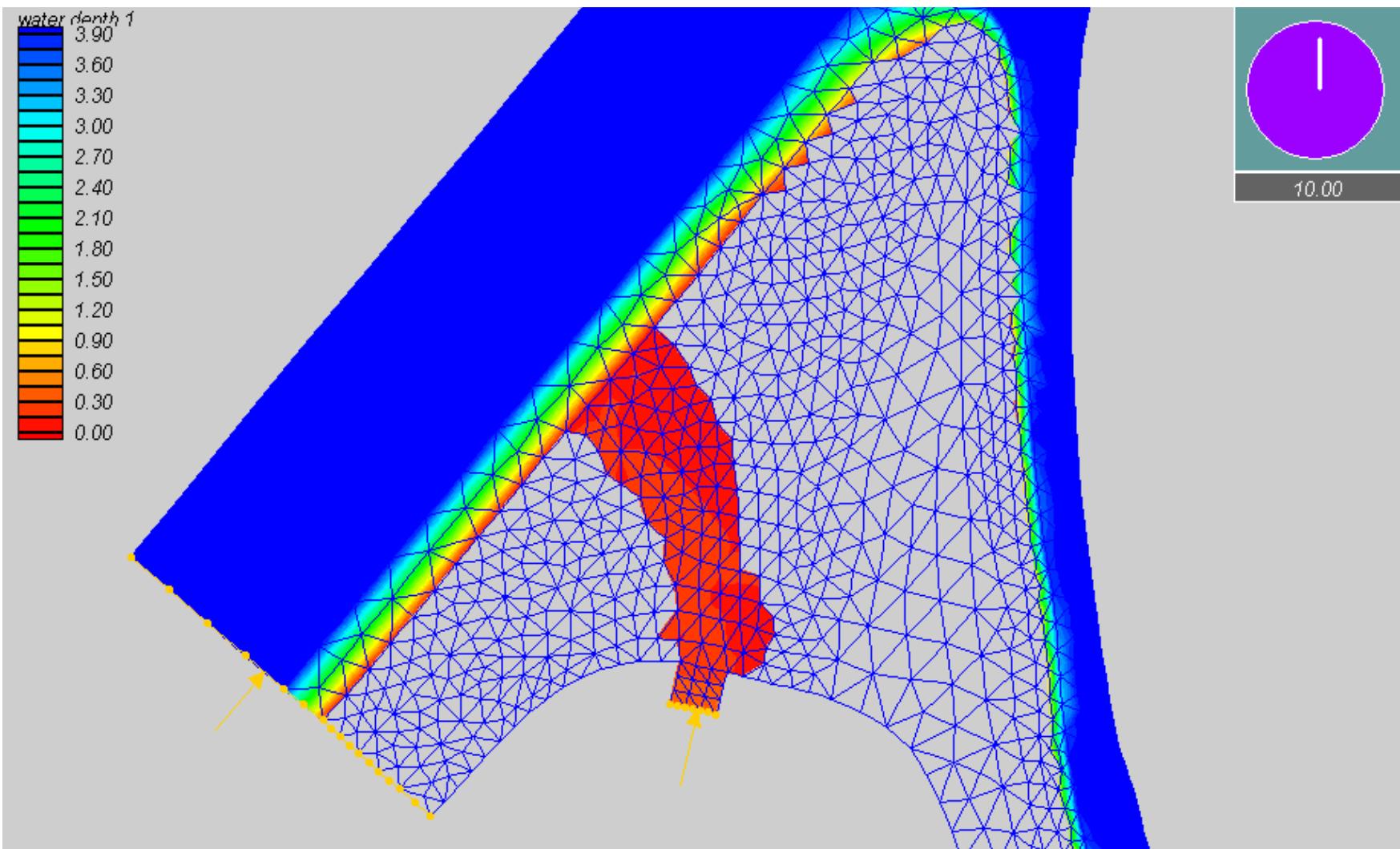
Hidrogram u profilu breše pri maksimalnoj zapremini vode u kaseti



Kota nivoa vode za $Q_{\max} = 237 \text{ m}^3/\text{s}$: $t = 10 \text{ s}$



Dubina vode za $Q_{\max} = 237 \text{ m}^3/\text{s}$: $t = 10 \text{ s}$



Zaključci

- Rušenje nasipa pepelišta je kratkotrajan proces trajanja 1 - 3 sata.
- Poplavni talas ugrožava naselje do 150 m “nizvodno” od nasipa.
- Visina talasa od 1,5 m javlja se već posle 50 minuta.
- Maksimalna visina talasa od 3,6 m javlja se posle 80 minuta.
- Ograničene su mogućnosti za uzbunjivanje stanovništva.
- Kanal za rashladnu vodu biće delimično zasut odnetim materijalom.
- Zaštitini zid bi mogao samo da pogorša posledice rušenja nasipa na pepelištu.

Preporuke

- Smanjenjem površine kasete smanjuju se posledice rušenja.
Ne preporučuje se spajanje kaseta.
- Blagovremeno uzbunjivanje stanovništva i zaštita materijalnih dobara nisu mogući. Neophodno je razviti poseban sistem uzbunjivanja, prilagođen postojećim uslovima.
- Kanali koji služe termoelektranama mogu biti ugroženi rušenjem nasipa pepelišta. Treba predvideti i obezbediti tehničke mere za rekonstrukciju kanala i njihovo vraćanje u funkciju.

Hvala na pažnji !



Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet
www.grf.bg.ac.rs

Dr Miodrag Jovanović
Dr Radomir Kapor
Dr Dejan Komatina
Mr Dejana Đorđević
Nenad Stefanović