

## MODELIRANJE U HIDROTEHNICI

### 2018/19

MODELIRANJE U HIDROTEHNICI	Oznaka: 2.05–315
Nositelj	<u>izv. prof. dr. sc. MARIJAN BABIĆ, dipl.ing.građ.</u>
Asistenti	<u>doc. dr. sc.TAMARA BRLEKOVIĆ, mag.ing.aedif.</u>
Studijski program	Diplomski sveučilišni studij Građevinarstvo – smjer HIDROTEHNIKA
Status predmeta	Obvezni
Godina	2.
Način izvođenja nastave:	P + V + S = 15 + 40 + 5
ECTS	5,0

1

## Sadržaj predmeta

- Uvod u modeliranje
- Vrste modela u hidrotehnici
- Scenariji
- Pristup modeliranju
- Hidrološki modeli
- Hidraulički modeli
- Testiranje i verifikacija modela
- Modeliranje vodoopskrbnih sustava
- Modeliranje sustava za odvodnju
- Modeliranje otvorenih vodotoka
- Modeliranje podzemnih voda
- Modeliranje u zaštiti okoliša

2

## 0.UVOD

- Početak razvoja 60-ih godina
- Intenzivniji razvoj 80-ih godina
- **Danas**: alat bez kojeg se ne može
- Razvoj je tekao od jednodimenzionalnih prema trodimenzionalnim modelima
- Od stacionarnih prema nestacionarnim
- Ekspertni sustavi

3

## 3 PODRUČJA PRIMJENE U HIDROTEHNICI:

- Projektiranje
- Planiranje
- Upravljanje

4

### ZASNOVANO NA NAČELIMA:

Hidromehanike

Hidrologije

Ekonomije

Teorije sustava

5

### OPĆA NAČELA

- Razvoj i testiranje provode specijalizirane organizacije, a kvalificirani korisnici **primjenjuju i dopunjuju** te programe s povratnom informacijom i ukazivanjem na specifične probleme praktične primjene

6

### KLJUČNO:

- Razumijevanje osnovnih postavki i područja primjene
- Kvalitetna primjena
- Kritička analiza rezultata

7

### PRETPOSTAVKE I POJEDNOSTAVLJENJA

- Kod složenih problema ( regulacije vodotoka, građevine,upravljanje slivom – vodnim resursima)
- Matematički model uvijek predstavlja **reduciran** sustav
- Neki sustav se može opisivati različitim modelima i svaki ima svoj (dopustiv ) opseg uporabljivosti i pouzdanosti

8



## 1. Matematičko modeliranje u hidrologiji

- Općenito o modelima i modeliranju
- Klasifikacija modela
- Pregled principa hidrološkog modeliranja
- Primjeri značajnih hidroloških modela
- Primjeri primjena u praksi
  - Sliv rijeke Gila, Arizona/New Mexico (HSPF)
  - Sliv rijeke Anseba, Eritreja (SWAT)
  - Hidrološko pr ognoziranje na slivu rijeke Save (MIKE)

9

### Hidrološki modeli se koriste, između ostalog, za:

- Modeli za pojedinačne događaje - za klasične potrebe hidrotehničkog projektiranja (dimenzioniranja objekata za zaštitu od štetnog djelovanja voda)
- Proračune dugih nizova prirodnih protoka
  - Ulazni podaci za modele upravljanja slivovima
  - Za potrebe dimenzioniranja akumulacija
- Ispitivanja efekata promjena na slivu (npr. pokrov i korištenje zemljišta)
- Ispitivanje efekata klimatskih promjena
- Multidisciplinarni problemi upravljanja vodama i tlom, zaštite voda, zaštite okoliša, restoracije vodotoka
- Znanstveno-istraživački rad

10

## Pojmovi

- Model je pojednostavljena reprezentacija stvarnosti koja se koristi za objašnjenje i/ili predviđanje događaja
- Matematički model je model u kojem se koriste matematički koncepti i jezik
- Numerički model je implementacija matematičkog modela na računalu – daje numeričko rješenje problema
- Programski paket je skup numeričkih modela i drugih alata za postavljanje i rješavanje problema

11

## Komponentni modeli

- Čak i najjednostavnija hidrološka metoda izražena matematičkom jednačinom je matematički model
- Npr. racionalna metoda  $Q=CIA$  je matematički model za maksimalni protok za oborinu konstantnog intenziteta
- Slično, metoda jediničnog hidrograma je matematički model kojom se proračunava hidrogram protoka iz hijetograma efektivne oborine
- Spomenute metode su komponentni modeli za pojedinačne velikovodne događaje

12

## Integralni modeli

- Integralni model je skup komponentnih modela za razne komponentne procese koji su sastavni dijelovi integralnog procesa
- Npr. integralni model za izračun hidrograma protoka za velikovodni događaj (npr. HEC-HMS)  
= model za definiranje mjerodavne oborine  
izbor metoda, npr. a) oborina nekog povratnog perioda; b) povijesna; c) ...
- + model za izračun hijetograma otjecanja  
izbor metoda, npr. a) SCS; b) Green-Ampt; c) ...
- + model za transformaciju u hidrogram protoka  
izbor metoda, npr. a) racionalna; b) jedinični hidrogram; c) ...

13

## Modeliranje

- Modeliranje je proces koji uključuje
  - Definiranje pojednostavljene reprezentacije sustava (podjela na podslivove, dionice vodotoka, ...)
  - Odabir integralnog modela i komponentnih metoda
  - Definiranje ulaznih podataka (npr. mjerodavne oborine)
  - Definiranje parametara, preporučljivo uz kalibraciju i verifikaciju
  - Primjenu modela na problem od interesa i analizu rezultata

14

## Matematički modeli u hidrotehnici

### 1. hidrološki modeli slivova

- npr. HEC-HMS, HSPF, SWAT, MIKE-SHE

### 2. modeli upravljanja slivovima i objektima

- npr. HEC-RES, RiverWare

### 3. modeli za tečenje i kvalitetu površinskih voda

- npr. HEC-RAS, MIKE-11/MIKE 2/MIKE 3

### 4. modeli za tečenje i kvalitetu podzemnih voda

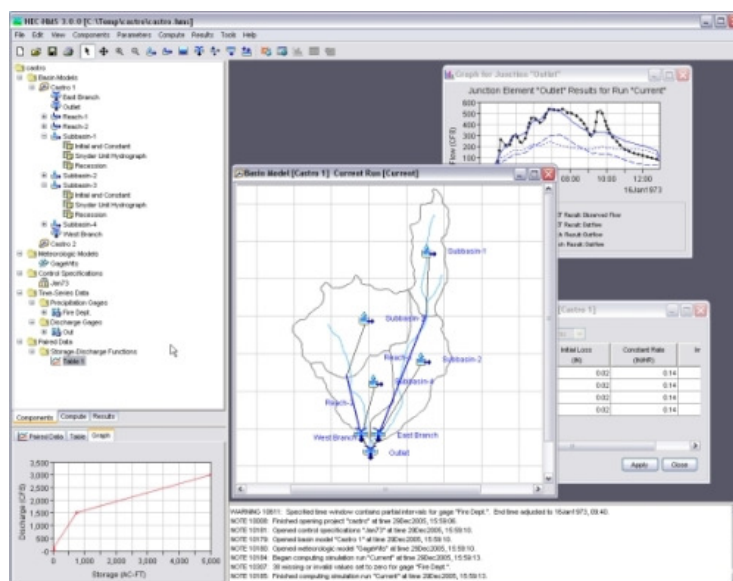
- npr. MODFLOW

### 5. modeli za mrežne sustave

- npr. EPANET, SWMM

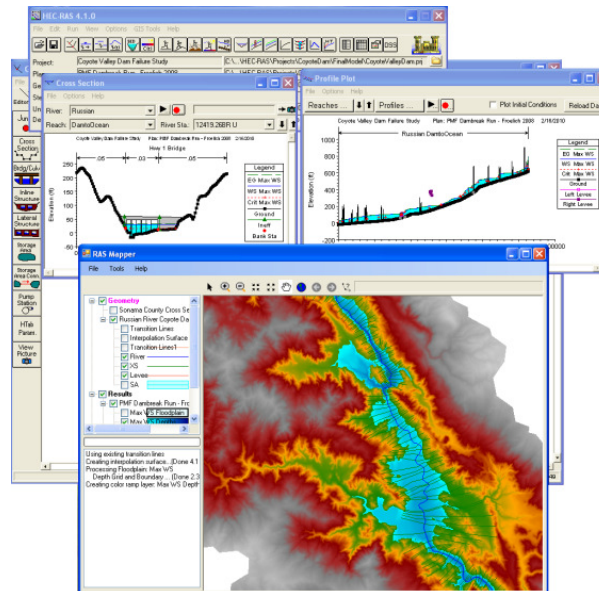
15

## HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)



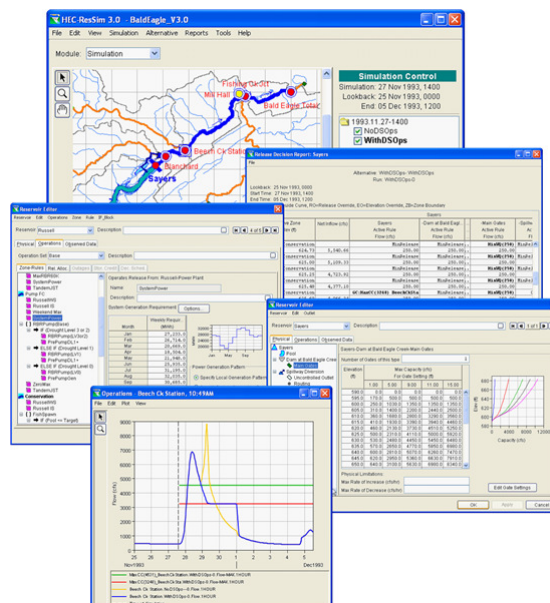
16

## HEC-RAS (River Analysis System)



17

## HEC-ResSim (Reservoir System Simulation)



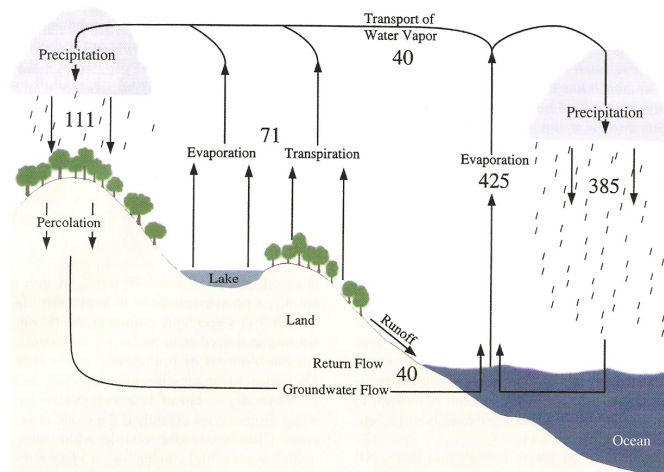
18

## Hidrološko modeliranje slivova

- Penman (1961) je definirao hidrologiju kao znanost koja pokušava odgovoriti na pitanje  
**ŠTO SE DOGAĐA SA KIŠOM**
- Hidrologija sliva je dio hidrologije koji se bavi sa integracijom hidroloških procesa na skali sliva da bi se odredila reakcija sliva
- U ovom predavanju naglasak je na modelima koji se bave sa integracijom hidroloških procesa, a ne na modelima individualnih procesa

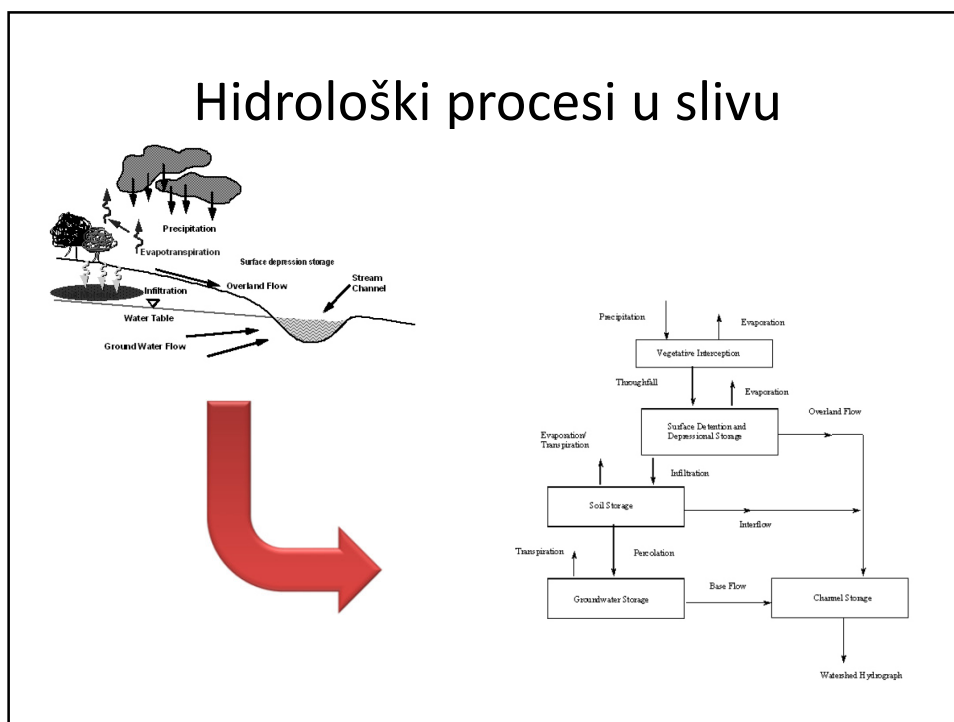
19

## Hidrološki ciklus

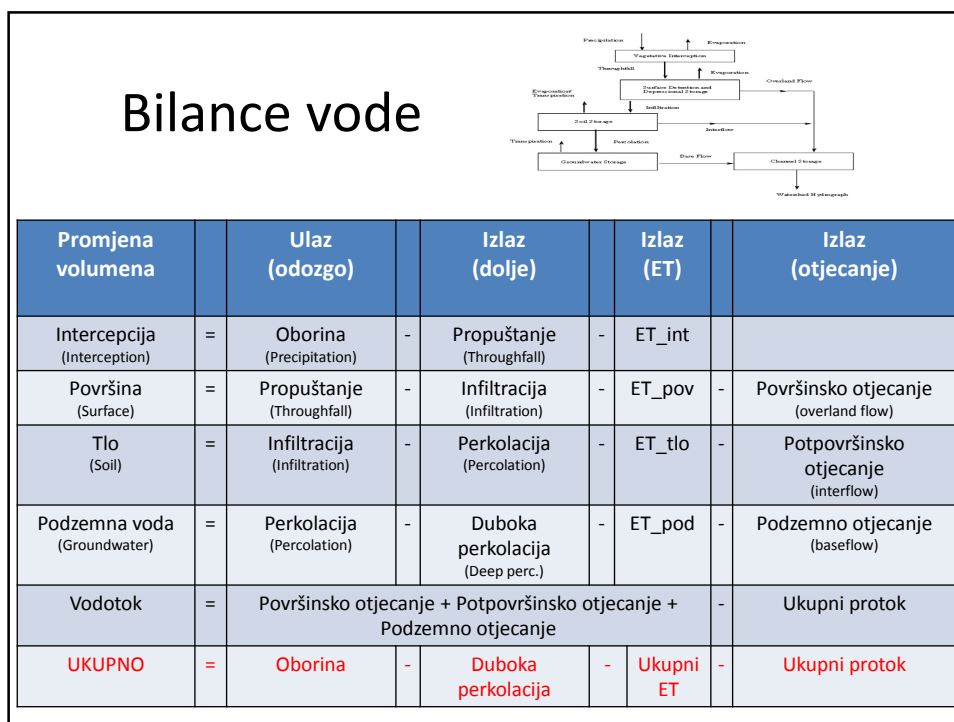


**FIGURE 4.3** The hydrologic cycle. Numbers are in units of thousands of cubic kilometers of water transferred per year. Note that in terms of the volume of water transferred, evaporation and precipitation are the dominant processes.

20



21



22

## Klasifikacija hidroloških modela

### 1. Po predvidivosti

- a) Deterministički
- b) Stohastički
- c) Kombinirani

### 2. Po pristupu

- a) Empirički
- b) Konceptualni (SIVA KUTIJA)
- c) Fizikalno utemeljeni (BIJELA KUTIJA)

### 3. Po prostornoj distribuciji

- a) Spojeni/homogeni ("Lumped") (ODE)
- b) Poludistribuirani
- c) Distribuirani (PDE)

23

## Klasifikacija hidroloških modela - nastavak

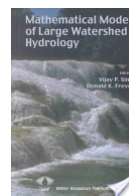
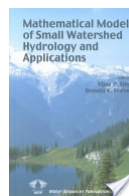
### 4. Po vremenskoj skali

- a) Pojedinačni događaj/epizoda ("event based")
- b) Kontinuirana simulacija

### 5. Po prostornoj skali

- a) Mali sliv (< 100 km<sup>2</sup>)
- b) Srednji sliv (100-1000km<sup>2</sup>)
- c) Veliki sliv (>1000 km<sup>2</sup>)

### 6. Ostale klasifikacije



24



## Neki hidrološki modeli

- Singh & Woolhiser, "Mathematical Modeling of Watershed Hydrology", J. Hydrologic Eng. (2002) nabrajaju čak **70** hidroloških modela. Prvih desetak (kronološki):

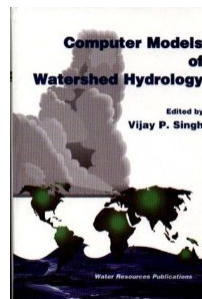
**Table 1.** Sample of Popular Hydrologic Models

Model name/acronym	Author(s) (year)	Remarks
Stanford watershed Model (SWM)/Hydrologic Simulation Package-Fortran IV (HSPF)	Crawford and Linsley (1966), Bicknell et al. (1993)	Continuous, dynamic event or steady-state simulator of hydrologic and hydraulic and water quality processes
Catchment Model (CM)	Dawdy and O'Donnell (1965)	Lumped, event-based runoff model
Tennessee Valley Authority (TVA) Model	Tenn. Valley Authority (1972)	Lumped, event-based runoff model
U.S. Department of Agriculture Hydrograph Laboratory (USDAHL) Model	Holtan and Lopez (1971), Holtan et al. (1974)	Event-based, process-oriented, lumped hydrograph model
U.S. Geological Survey (USGS) Model	Dawdy et al. (1970, 1978)	Process-oriented, continuous/event-based runoff model
Utah State University (USU) Model	Andrews et al. (1978)	Process-oriented, event/continuous streamflow model
Purdue Model	Huggins and Monke (1970)	Process-oriented, physically based, event runoff model
Antecedent Precipitation Index (API) Model	Sittner et al. (1969)	Lumped, river flow forecast model
Hydrologic Engineering Center—Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)	Feldman (1981), HEC (1981, 2000)	Physically-based, semidistributed, event-based, runoff model
Streamflow Synthesis and Reservoir regulation (SSARR) Model	Rockwood (1982), U.S. Army Corps of Engineers (1987), Speers (1995)	Lumped, continuous streamflow simulation model
National Weather service-River Forecast System (NWS-RFS)	Burnash et al. (1973a,b), Burnash (1975)	Lumped, continuous river forecast system

25

## Često se koriste:

- HEC-HMS (U.S. Corps of Engineers)
- NWS-RFS (U.S. National Weather Service)
- HSPF (U.S. Environmental Protection Agency)
- MMS (U.S. Geological Survey)
- SWAT (U.S. Department of Agriculture)
- UBC, WATFLOOD (Kanada)
- RORB, WBN (Australija)
- TOPMODEL, SHE (Europa)
- HBV (Skandinavija)
- TOPIKAPI (Italija)
- Tank model (Japan)
- Hrvatska?



26

## HSPF Model

(Hydrological Simulation Program Fortran)

- Potječe od Stanford Watershed Model (1966)
- Osnovni model sliva u programskim paketima EPA BASINS i U.S. Army Corps WMS
- Razvoj i održavanje - U.S. EPA i U.S. Geological Survey
- Dobra reputacija, brojne uspješne primjene

27

## HSPF

- Prirodni i modificirani slivovi i sustavi
- Hidrologija i kvaliteta površinske i podzemne vode
- Hidraulika i kvaliteta vode u vodotocima
- Vremenski nizovi podataka – pohrana, obrade, statističke analize
- Klasifikacija:
  - Po predvidivosti: Deterministički
  - Po pristupu: Fizikalno utemeljeni
  - Po prostornoj distribuciji: Poludistribuirani
  - Po vremenskoj skali: Kontinuirani

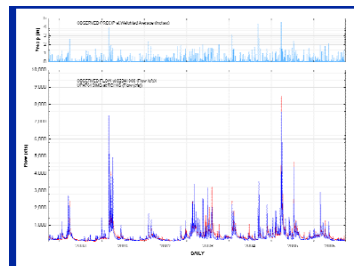
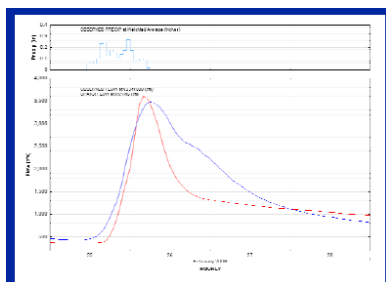
28

## Kontinuirana simulacija

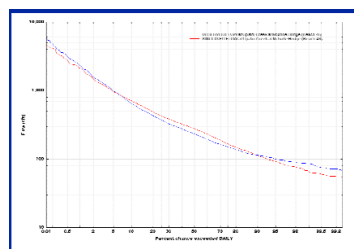
Dnevni protoci

- Rezultati:

Hidrogrami velikih voda



Krivulje trajanja

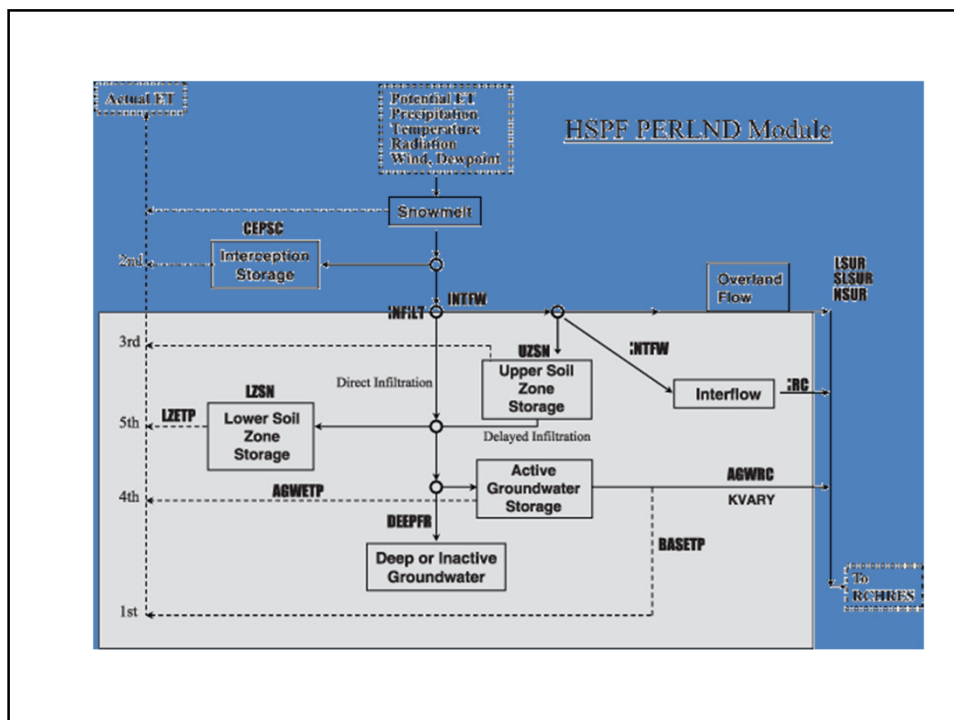


29

## HSPF – osnovni moduli

PERLND	IMPLND	RCHRES
Snijeg	Snijeg	Hidraulika
Voda	Voda	Kvaliteta
Sediment	Sediment	Temperatura
Kvaliteta	Kvaliteta	Sediment
Pesticidi		BOD/DO
Dušik		Dušik
Fosfor		Fosfor
		Ugljik
		Plankton

30



31

## Primjer primjene (HSPF)

### Hidrološko modeliranje prirodnih protoka u slivu rijeke Gila, New Mexico/Arizona

(površina sliva cca 117.000 km<sup>2</sup>)



32

## Studije prirodnih protoka - općenito

- U slivovima u kojima su značajne količine vode u povijesti bile zahvaćane za razne potrebe, mjereni protoci ne odražavaju prirodno stanje
- Rekonstrukcija prirodnih protoka je važan korak u modeliranju upravljanja slivovima/objektima (**OSNOVNI ULAZNI PODACI**)
- Ako je na raspolaganju dovoljno podataka o povijesnim zahvaćanjima, prirodni protok se može rekonstruirati kao  
 **$PRIRODNI\ PROTOK(t) = MJERENI\ PROTOK(t) + ZAHVAĆANJE(t)$**
- Ako nije, koriste se složenije hidrološke metode, a jedan od pristupa je hidrološko modeliranje

33

## Na zapadu SAD

- Prirodni protoci su osnova za rješavanje pravne problematike prava na vodu (koncesije)
- Federalna prava:
  - Priroda
  - Nacionalni parkovi
  - Indijanski rezervati
- Treba kvantificirati prirodne protoke i potrebe korisnika, uključujući prirodu

34

## Studija prirodnih protoka u slivu Gila

- Klijent: U.S. Department of Justice
- Razlog: federalna prava na vodu
  - priroda, indijanski rezervat GRIC
- Nedovoljno podataka o zahvaćanjima, metoda rekonstrukcije nije primjenjiva
- Dovoljno povijesnih meteoroloških podataka, hidrološko modeliranje je primjenjivo, ali mora biti vrlo kvalitetno (sudsko vještačenje)

35

## Primjena HSPF modela na sliv Gila

- Meteorološki podaci/procjene – nizovi P, T, Td, W, Rad, PET na 80 postaja, 1948-1997
- GIS podaci o hidrografiji, topografiji, pedologiji, pokrovu zemljišta i korištenju zemljišta



## Parametrizacija

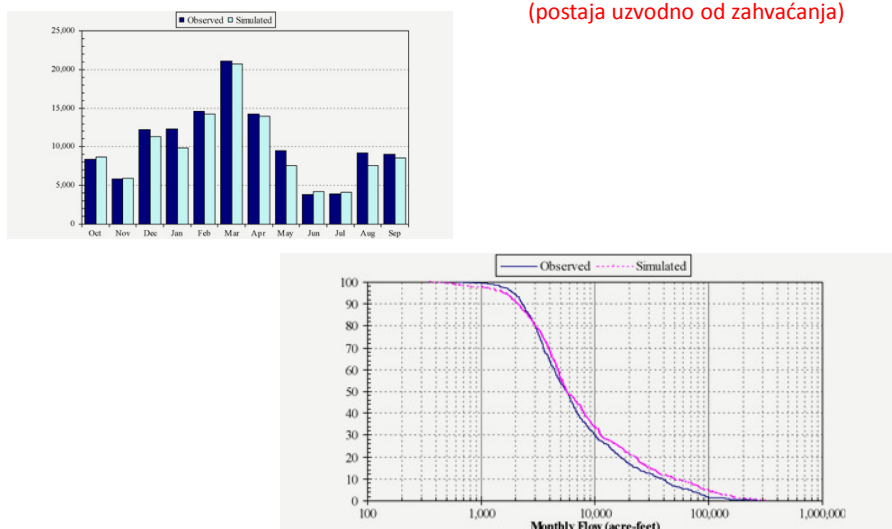
- Podjela sliva na podslivove, a podslivova na segmente ("PERLAND") - npr. šuma, tlo tip B
- Parametri za svaku vrstu segmenta kontroliraju odnos oborine-otjecanje
- Kalibracijom se određuju/potvrđuju parametri za razne vrste segmenata

37

## Kalibracija

USGS 09430500 Gila River nr Gila, NM (1949-1998)

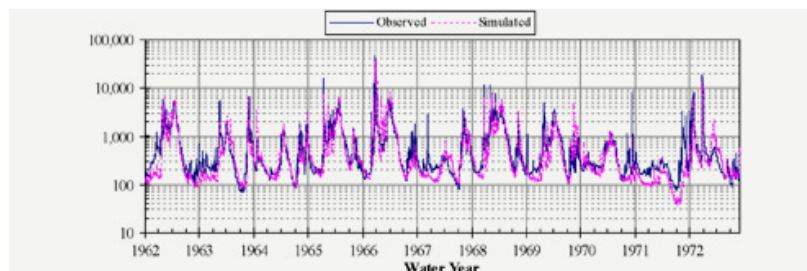
(postaja uzvodno od zahvaćanja)



38

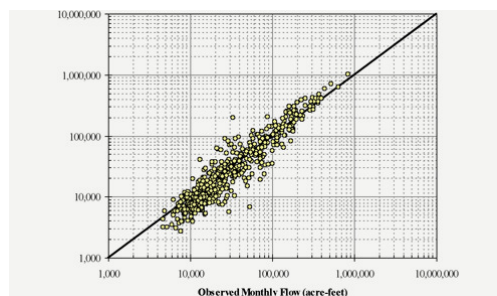
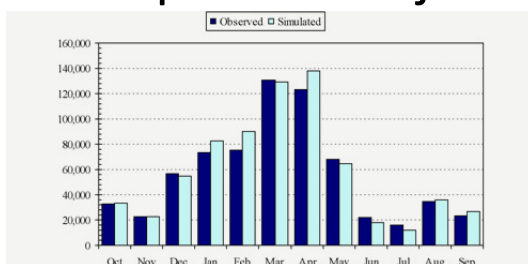
## Primjer hidrograma

- USGS 09498500 Salt River near Roosevelt, AZ  
(mala zahvaćanja uzvodno od postaje)



39

## Usporedba mjesečnih protoka



40



## Primjer primjene (SWAT)

### Projekt vodoopskrbe grada Kerena, Eritreja

#### (Matematičko modeliranje sliva rijeke Anseba)



41

## Lokacija

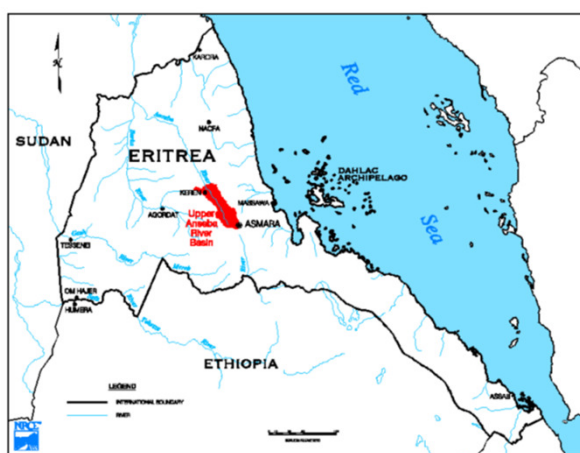


Figure 4.3.1 Location of Upper Anseba River Basin.

42

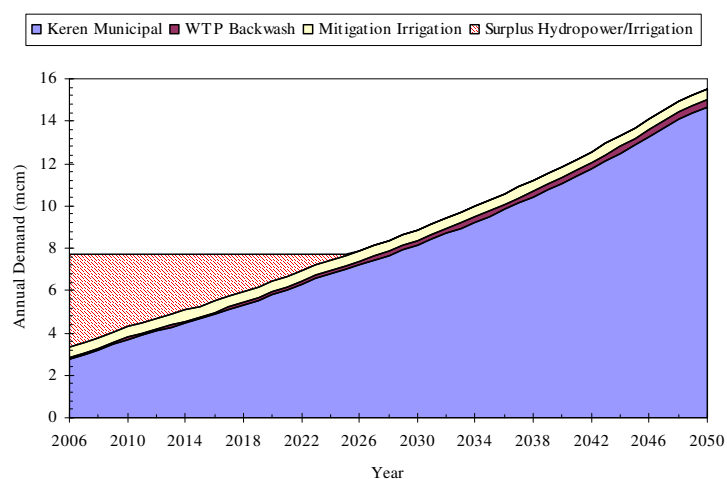
## Problem

- Nema javne vodoopskrbe, nema dovoljno vode



43

## Potrebe za vodom



44

## Mjerenja protoka

### Postaja Halib-Mentel na Rijeci Anseba (uzvodno od Kerena)

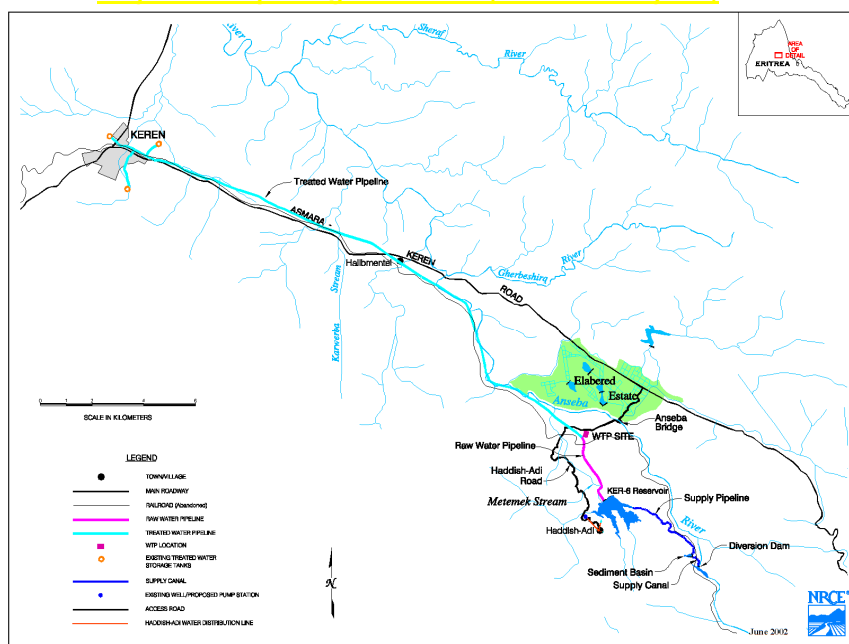
Monthly and annual flows in  $10^6 \text{ m}^3$ :

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1997							8.10	30.34	7.70	26.27	12.36	0.12	84.89
1998	0.00	0.00	0.00	0.31	2.66	1.10	7.74	49.36	7.21	0.93	0.00	0.00	69.31
1999	0.66	0.00	0.00	0.04	0.59	0.01	12.33	44.26	6.36	0.04	0.00	0.00	64.28
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26	24.53	15.34	0.90	0.90	0.00	0.00	42.94
Average	0.22	0.00	0.00	0.12	1.08	0.79	13.82	36.32	4.82	0.62	0.00	0.00	57.80

\* Record for July 1997 begins on the 15<sup>th</sup> of the month.

45

### Projekt vodoopsrbe grada Kerena (odabrana varijanta)



46

## Hidrološka problematika

- Za dimenzioniranje akumulacije, brane, evakuacijskih objekata, ustave, dovodnog kanala potrebni su **PROTOCI**
- Idealno, dugogodišnji nizovi dnevnih/satnih protoka na lokacijama od interesa - **NEMA**
- Nema ni dugoročnih mjerenja protoka u široj okolini
- Postoje dugoročni meteorološki podaci na nekim lokacijama u slivu i šire
- HIDROLOŠKO MODELIRANJE (proračun protoka iz meteoroloških podataka) je bilo jedini mogući pristup za dobivanje potrebnih nizova

47

## Hidrološko modeliranje

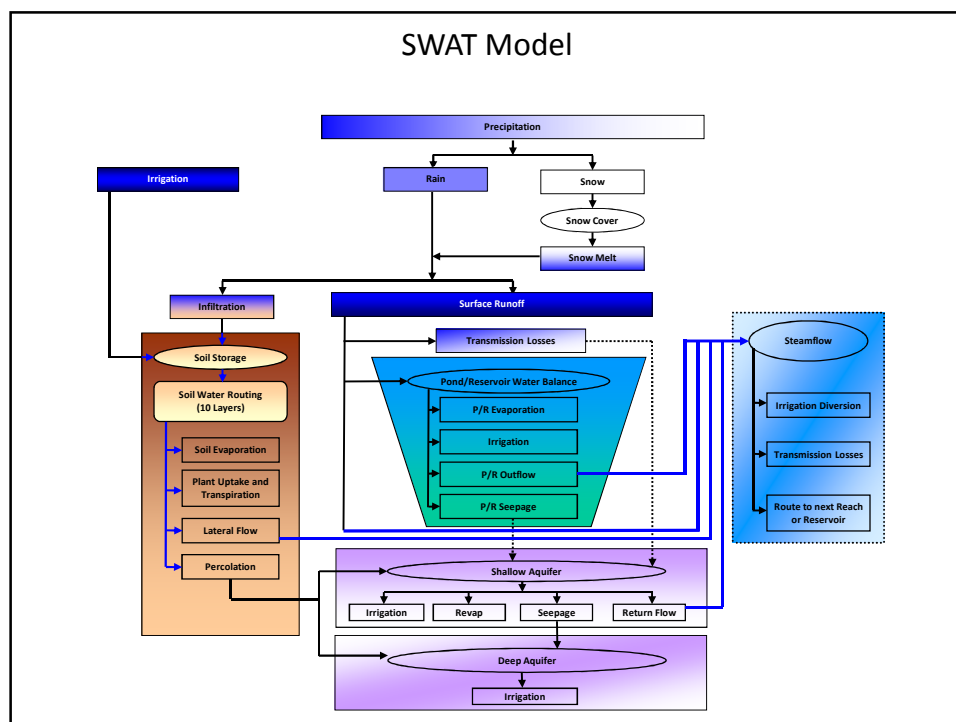
- Radi se s integralnim modelima koji simuliraju hidrološki ciklus
- Simulira se protok na temelju meteoroloških podataka (oborine, temperatura i dr.) te podataka o fizičkim karakteristikama sliva (topografija, tlo, pokrov i korištenje zemljišta i dr.)
- Modelski parametri trebaju po mogućnosti biti određeni/potvrđeni kalibracijom/verifikacijom
- U procesu modeliranja važno je imati u vidu namjenu i ciljeve modela
- U ovom slučaju najvažnije je bilo dobiti što dulji niz protoka da se može dimenzionirati akumulacija (zadovoljenje potreba s određenom vjerojatnosti osiguranja)

48

## Odabir hidrološkog modela

- Odabran je model Soil and Water Assessment Tool (SWAT), razvijen od strane U.S. Department of Agriculture
- Od meteoroloških podataka potrebne su samo oborine i temperatura, a model ima i opciju stohastičkog generiranja meteoroloških parametara
- Modelske parametre je lakše povezati sa tipom tla i pokrovom zemljišta nego npr. u HSPF-u
- U ovom modelu jedan od ključnih modelskih parametara je broj krivulje CN
- Zadaje se CN za prosječne uvjete a model ga prilagođava za aktualne uvjete vlažnosti tla u svakom vremenskom koraku
- SWAT je nasljednik modela Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB), koji je već uspješno korišten u Eritreji (akumulacija Toker, izgrađena)

49



50

## Strategija modeliranja

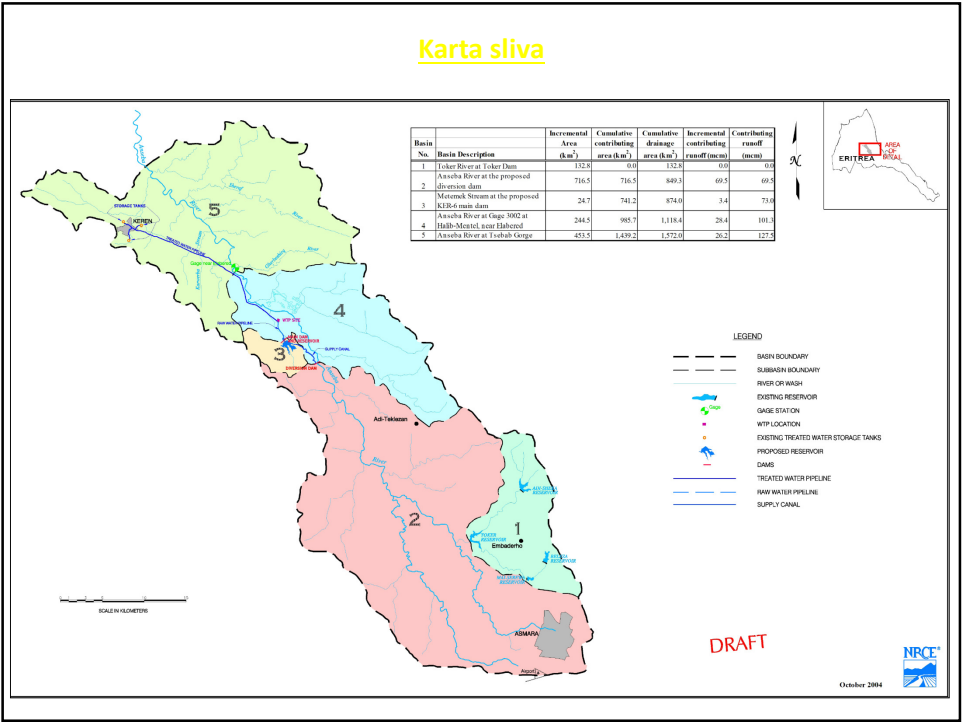
- Model kalibrirati usporedbom simuliranih i mjerenih protoka Ansebe kogd Halib-Mentela za 1997-2000.
- U kalibracijskom modelu koristiti povijesne meteorološke podatke sa 9 postaja u slivu
- Ali, nemamo dovoljno duge nizove povijesnih meteoroloških podataka da bi modelirali dugoročni period
- Dugoročni klimatološki podaci su stohastički generirani tako da zadržavaju statističke osobine dugoročnih nizova podataka koji su na raspolaganju (npr. Asmara, Keren)

51

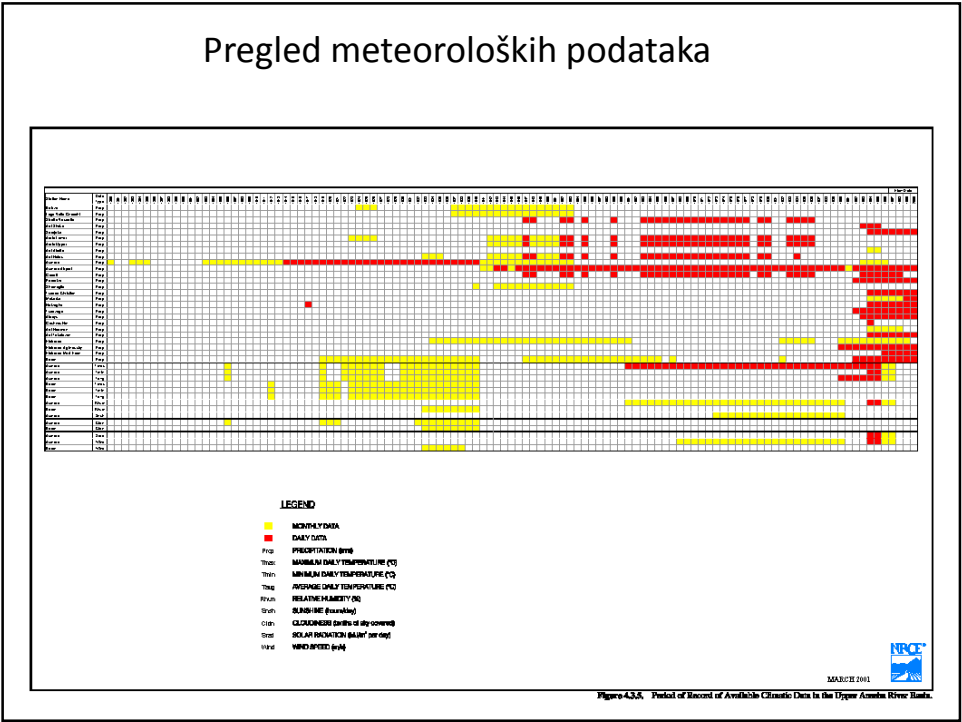
## Stohastički generirane oborine

- Za ovaj projekt modificirali smo stohastički genrator oborina WXGEN koji je ugrađen u SWAT model
- Korišten stohastički model CARMA(1,1) za generiranje vremenski i prostorno koreliranih godišnjih oborina za modelske podslivove i asimetrični Markovljev lanac za disagregaciju godišnjih oborina u dnevne.
- Generirano 5000 godina meteoroloških podataka za SWAT simulacije (proračune protoka) i daljnje simulacije korištenja akumulacije

52

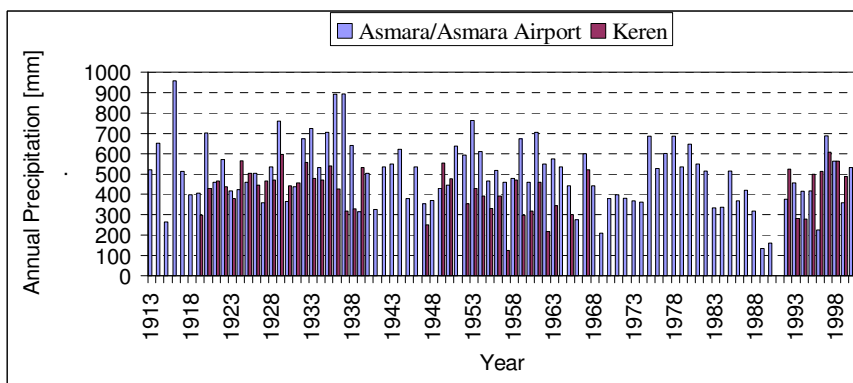


53



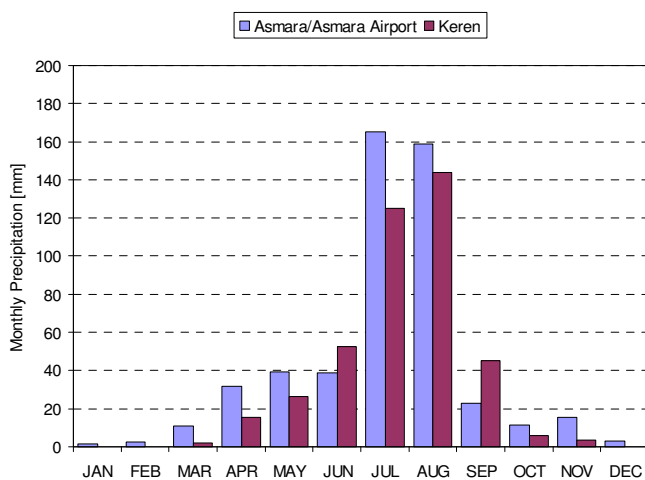
54

## Godišnje oborine



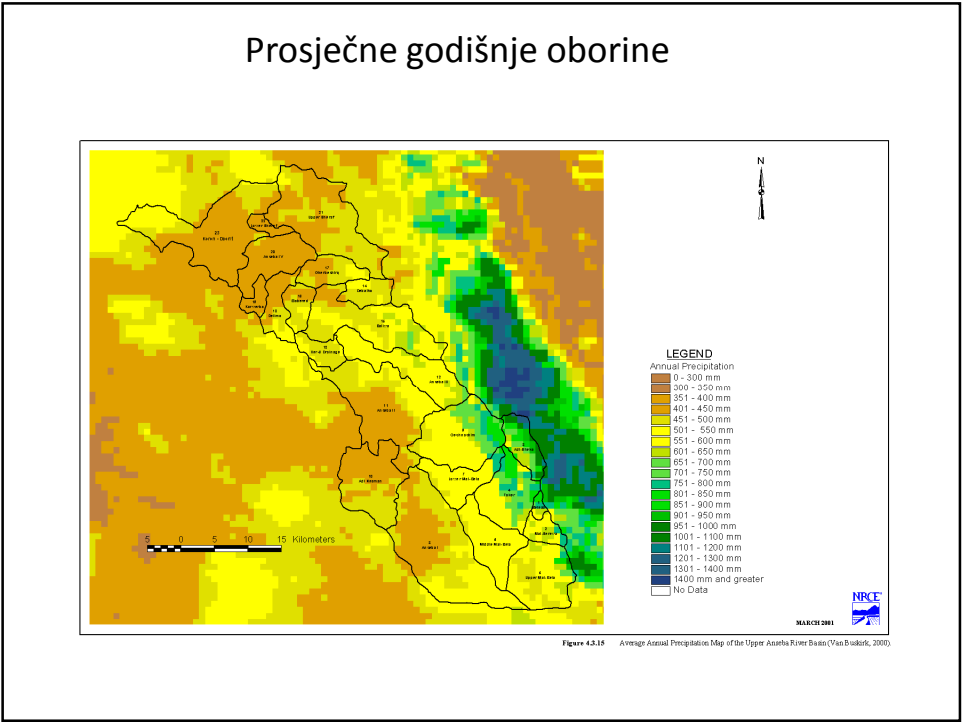
55

## Prosječne mjesečne oborine

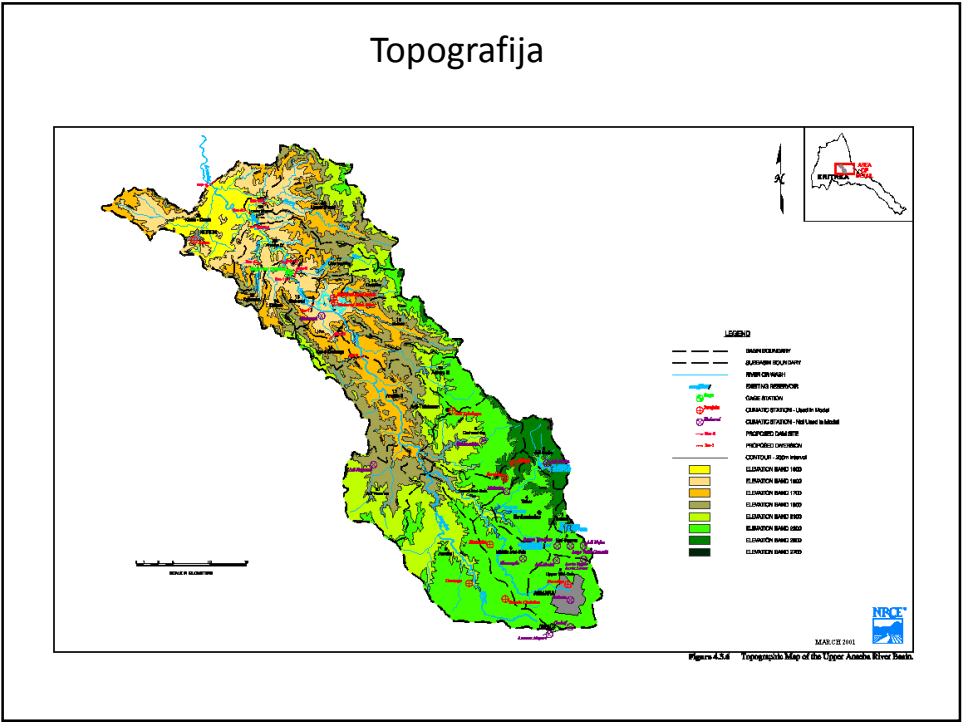


56

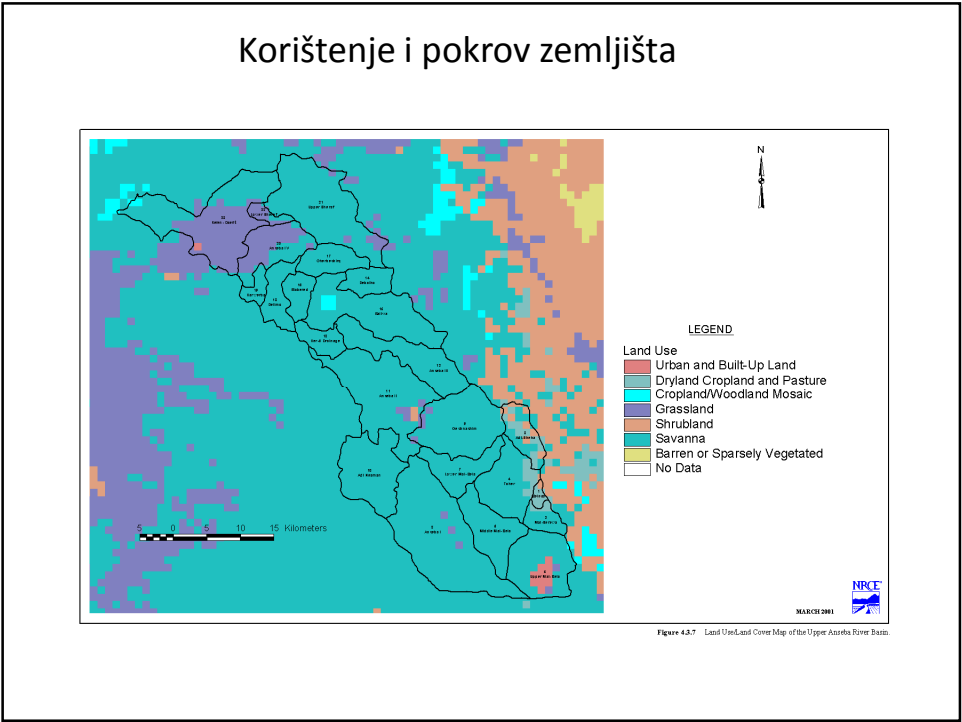




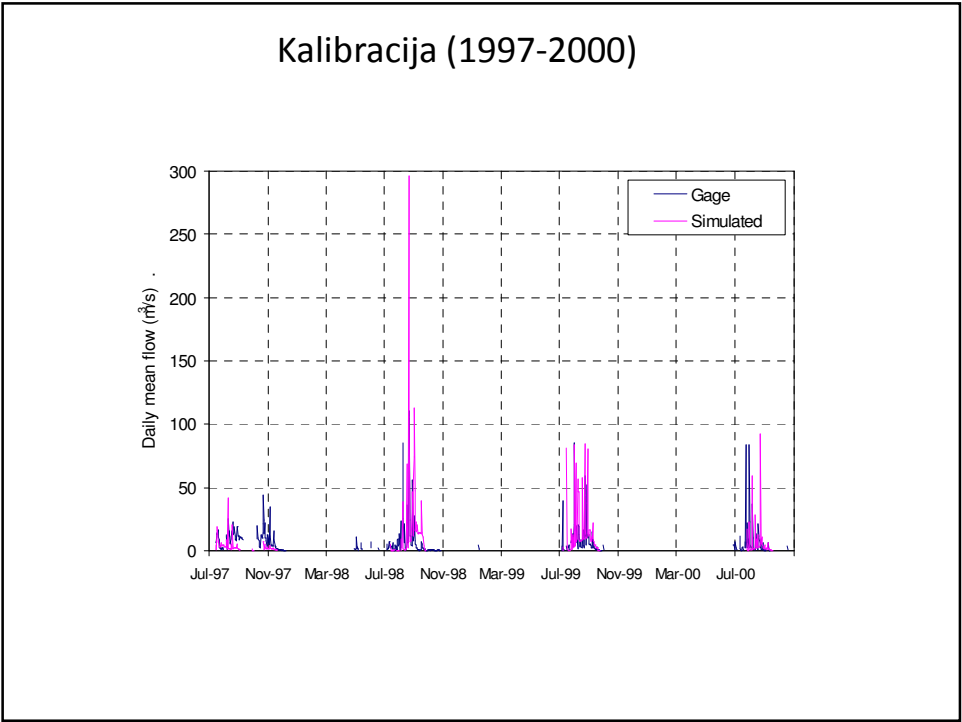
57



58

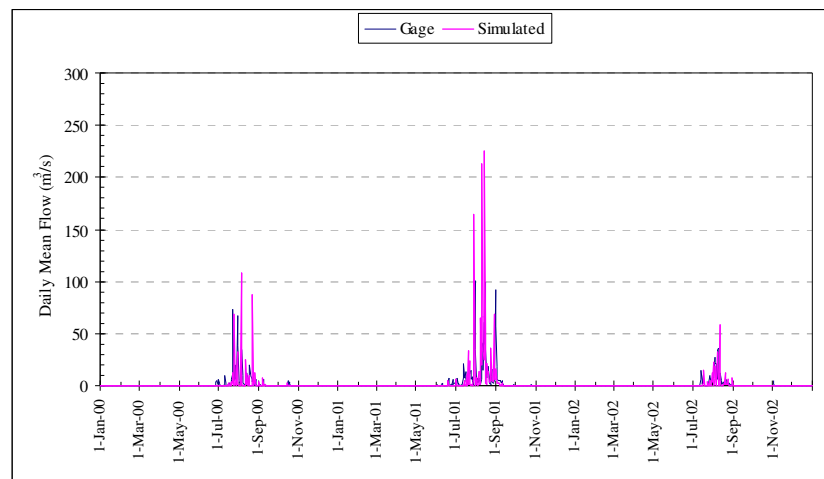


59



60

### Verifikacija (naknadno dobivene 2001-2002)



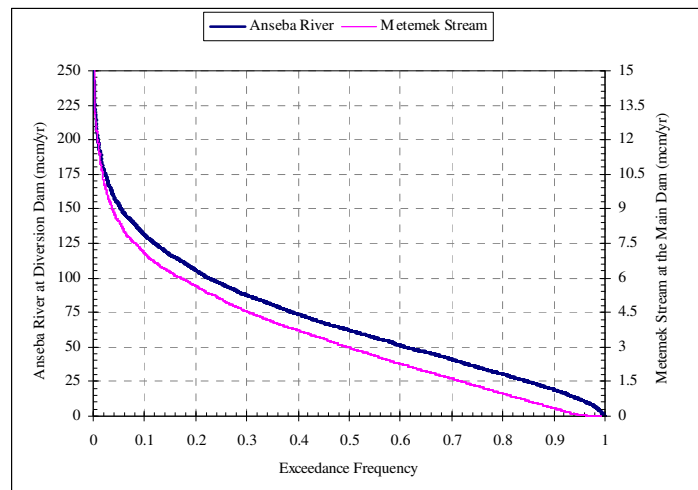
61

### Rezultati

- Razlika prosječnih simuliranih i izmjerenih protoka je manja od 1%.
- Period kalibracije/verifikacije je relativno suh (promatrajući podatke o dugoročnim oborinama). Simulirani protok u ovom periodu je 64 mcm per a dugoročni prosjek je 101 mcm
- Prosječni godišnji protoci na lokacijama od interesa su:
  - 69.5 mcm Anseba River na lokaciji ustave (sliv 716,5 km<sup>2</sup>)
  - 3.4 mcm Metemek Stream na lokaciji brane (sliv 24,7 km<sup>2</sup>)
- 86% of protoka je u periodu 7.-8. mjesec

62

## Distribucije godišnjih protoka



63

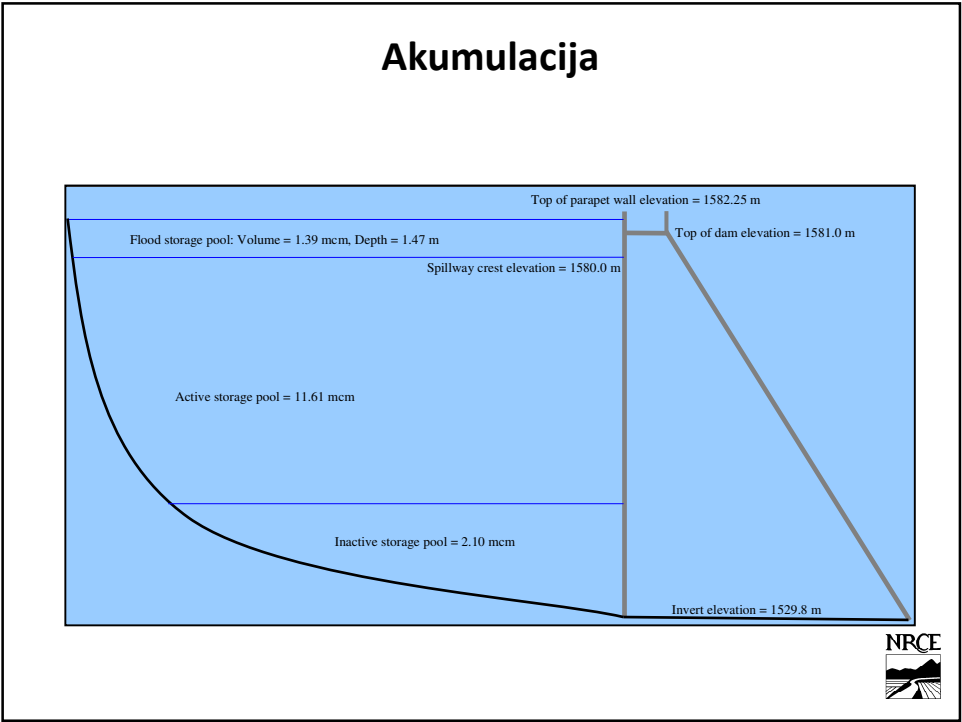
## Dimenzioniranje akumulacije

- MODEL AKUMULACIJE (Bilanca vode)  

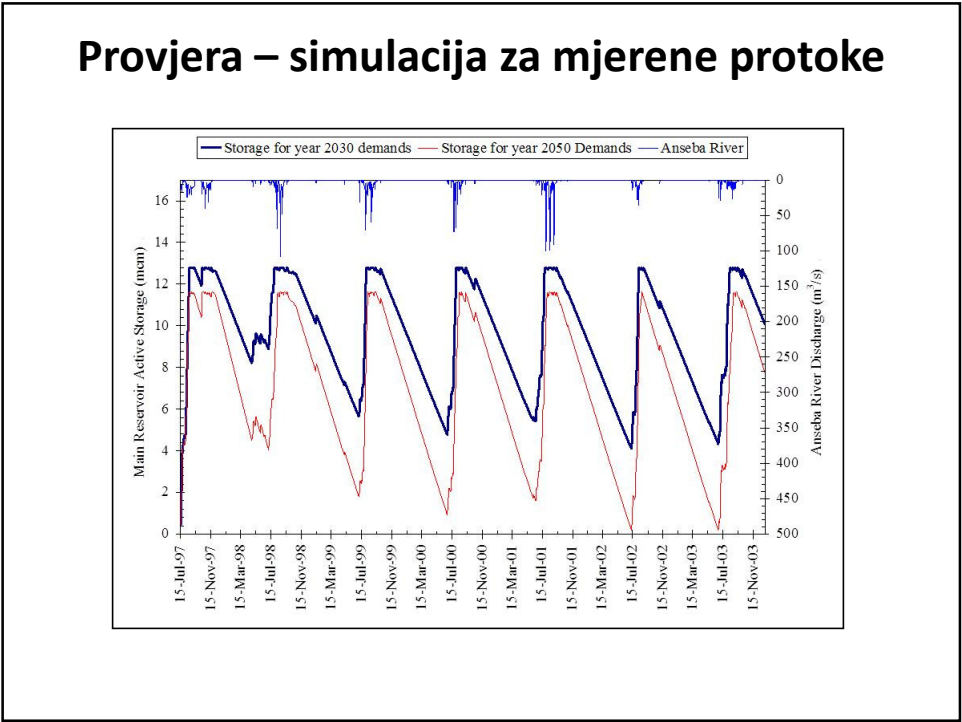
$$V(t+dt) = \text{Min}(\text{Max}(V(t) + \text{Metemek}(t) + \text{Dovod}(t) - \text{Potreba}(t) - \text{Isparavanje}(t) - \text{Procjeđivanje}(t), 0), \text{Vol})$$

$$\text{Dovod}(t) = \text{Min}(\text{Anseba}(t), \text{Cap})$$
- Simulirano 5000 godina, traži se vjerojatnost osiguranja potreba
- Aktivni korisni volumen je određen po kriteriju zadovoljenja minimalno 80% potreba u 2025. godini uz 99% vjerojatnost osiguranja (reliability)
- Dobiven je potrebni aktivni korisni volumen od 11,6 mcm
- Uzimajući u obzir i mrtvi prostor (za nanos), te volumen za prihvati velikih voda, iz topografije akumulacijskog prostora slijede relevantne kote i visina brane => 51 m

64

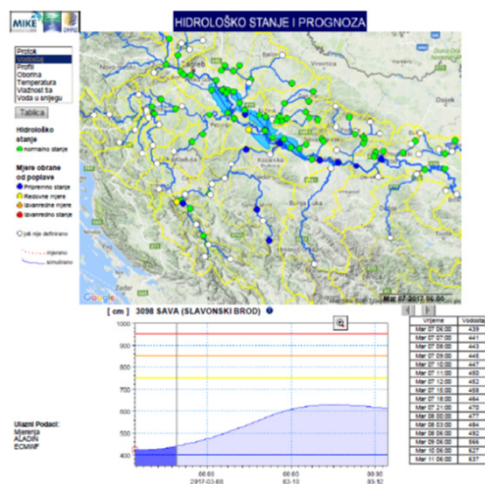


65



66

### Primjer 3. Model za hidrološko prognoziranje na slivu Save



67

## Uvod

- Evidentne pojave sve češćih i sve intenzivnijih poplavnih događaja, uključujući katastrofalnu poplavu u svibnju 2014. godine, ugrožavaju sigurnost i zdravlje stanovništva, gospodarstvo, te kulturnu i ekološku baštinu Republike Hrvatske
- Stoga je potrebno maksimalno intenzivirati provedbu ključnih građevinskih i negrađevinskih mjera upravljanja rizicima od poplava, uz osiguranje dodatnih financijskih sredstva iz međunarodnih izvora, uključujući fondove EU i međunarodne zajmove.
- Prognoziranje poplava i rano upozoravanje je ključna negrađevinska mjera upravljanja rizicima od poplava
- Dovršenjem zajedničkih projekata Hrvatskih voda i DHMZ-a uspješno je uspostavljen moderan sustav za hidrološko prognoziranje na slivu rijeke Save u Hrvatskoj
- Planira se daljnji razvoj sustava za prognoziranje poplava u Republici Hrvatskoj (unapređenje postojećeg sustava za Savu i razvoj novih sustava za druga područja)

68

## Ciljevi

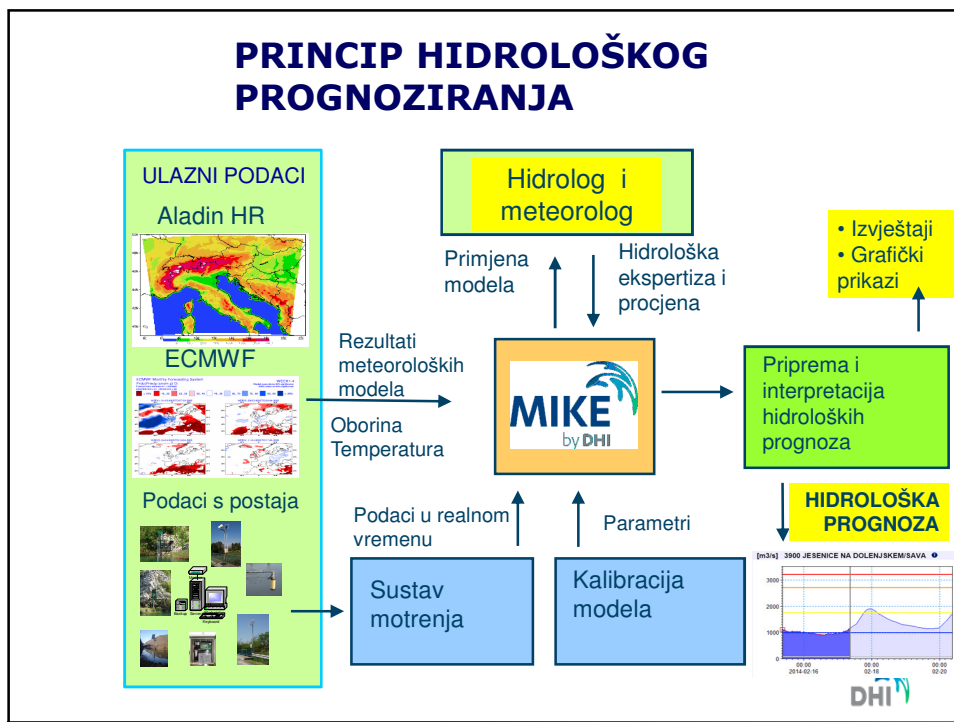
- uspostavljanje operativnog hidrološkog prognostičkog modela na slivu rijeke Save u Hrvatskoj
- smanjenje rizika od poplava ovom prioritetnom, poplavama često ugroženom području
- institucionalno jačanje kapaciteta za hidrološko prognoziranje u Hrvatskim vodama i DHMZ-u
- jačanje institucionalne suradnje i prekogranične suradnje
- unapređenje sustava za hidrološko prognoziranje je komplementarno ostalim mjerama obrane od poplava koje provode Hrvatske vode (preventivna, redovita i izvanredna obrana od poplava)
- hidrološko prognoziranje će omogućiti efikasniju provedbu tih mjera i doprinijeti smanjenju poplavnih rizika (šteta), a također osigurati podršku u donošenju odluka o načinu upravljanja hidrotehničkim objektima tijekom obrane od poplava
- time će se za potencijalna poplavna područja na slivu Save kroz RH osigurati dodatno vrijeme prije nadolaska poplavnih voda (48 – 72 sata) u cilju bolje organizacije obrane od poplave (zaštita ljudi, materijalnih dobara, kulturne i prirodne baštine...)

69

## Razvoj

- 2012:
  - prepoznavanje potrebe za unapređenjem prognoziranja poplava u Hrvatskoj
  - uspostavljanje sustava za prognoziranje poplava na slivu Save u Sloveniji
  - prepoznavanje mogućnosti za uspostavljanje analognog sustava u Republici Hrvatskoj
- 2013:
  - uspostavljanje suradnje Hrvatskih voda i DHMZ-a na razvoju prognostičkih sustava u Hrvatskoj, definiranje programa razvoja
  - nabava programskog paketa MIKE u obje institucije i provedba osnovne obuke
- 2014-2015:
  - sklapanje formalnih sporazuma i ugovora HV-DHMZ
  - javna nabava i ugovaranje „pilot projekta” „Implementacija pilot projekta i jačanje kapaciteta za prognoziranje poplava” (rujan 2014)
  - provedba pilot projekta, uz institucionalno jačanje i jačanje međunarodne suradnje
- 2015-2016:
  - javna nabava i ugovaranje projekta „Nastavak aktivnosti na uspostavljanju sustava za prognoziranje poplava na slivu rijeke Save u Hrvatskoj” (prosinac 2015)
  - provedba projekta, uz daljnje institucionalno jačanje i daljnje jačanje međunarodne suradnje, osobito s nadležnim institucijama iz BiH
- prosinac 2016:
  - dovršetak i predstavljanje projekta uspostavljanja sustava za prognoziranje poplava na slivu rijeke Save u Hrvatskoj
- 2017-nadalje:
  - testiranje, unapređivanje i operativno korištenje sustava

70



71

### RAZVOJ SUSTAVA ZA HIDROLOŠKO PROGNOZIRANJE NA SLIVU RIJEKE SAVE U HRVATSKOJ I JAČANJE KAPACITETA ZA PROGNOZIRANJE POPLAVA

#### Naručitelji:

Hrvatske vode (HV)  
Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)

#### Konzultanti:

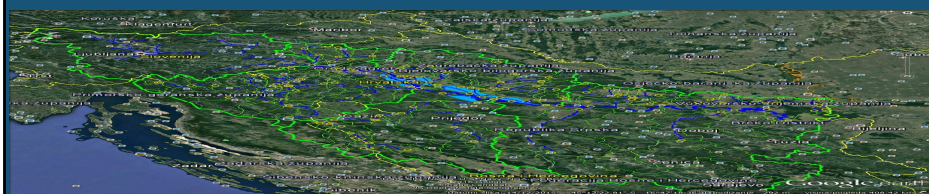
Proning DHI d.o.o. Zagreb  
DHI for Water and Environment, Danska

#### Projekt 1:

rujan 2014-rujan 2015, „Pilot” model „Sava i Kupa do Siska”, 6 radionica

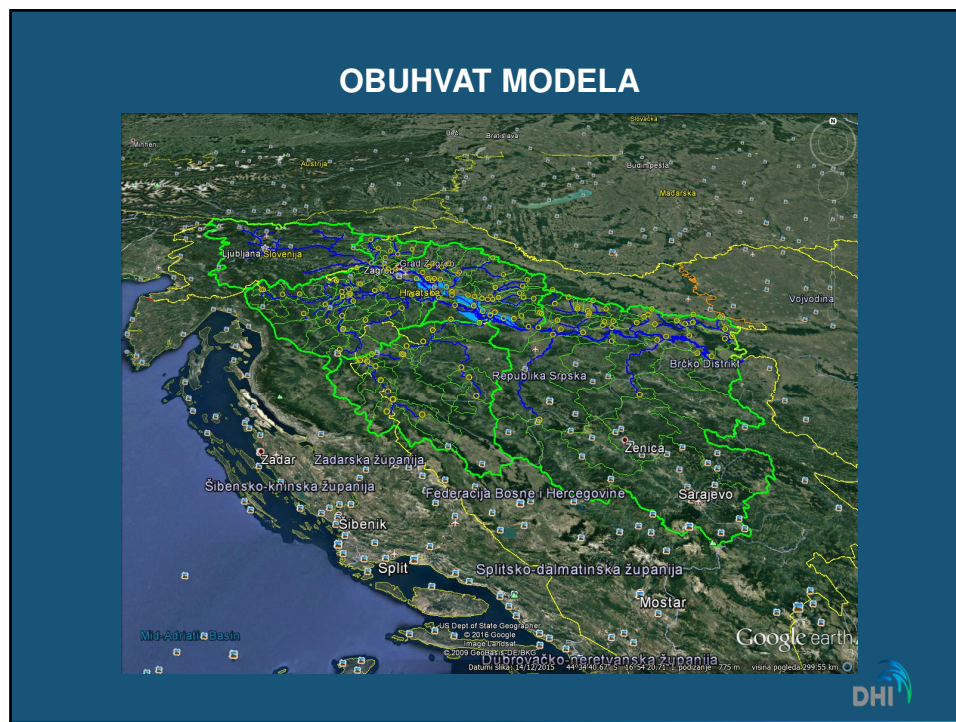
#### Projekt 2:

prosinac 2015-prosinac 201, „Super” model „Sava od Slovenije do Srbije”, 4 radionice



72





73

## OD PODATAKA DO MODELA I PROGNOZE U REALNOM VREMENU

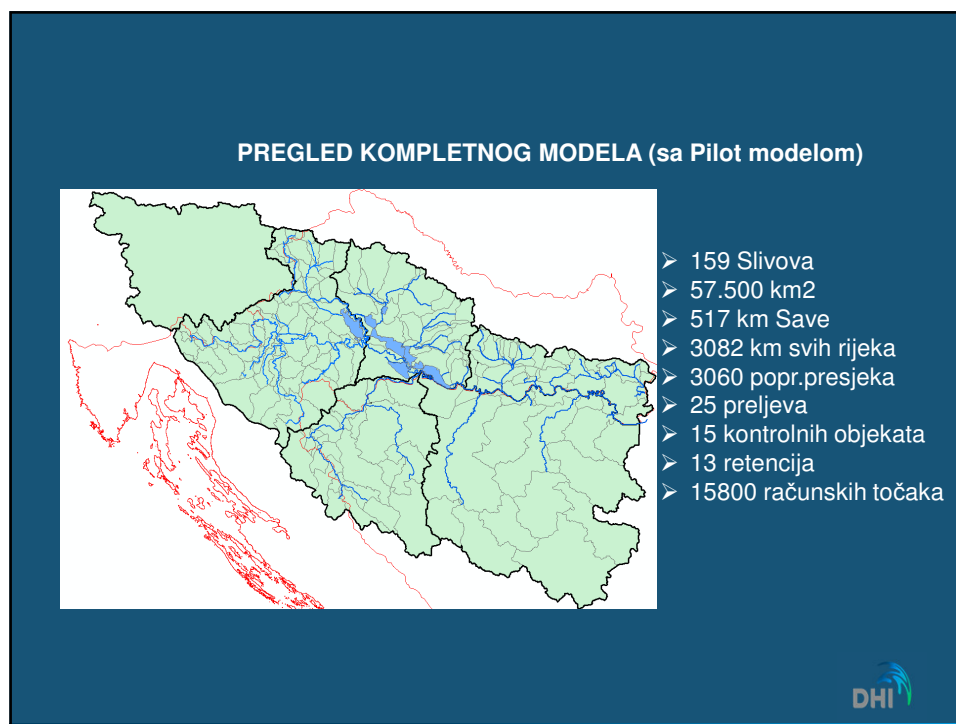
**PROCEDURE PROGNOZIRANJA POPLAVA** zahtjevaju realizaciju i koordinaciju niza kompleksnih aktivnosti:

- ✓ prikupljanje i obrada ulaznih podataka za model
- ✓ prikupljanje i analiza podataka dobivenih u realnom vremenu,
- ✓ prikupljanje, obrada i analiza meteo prognoza
- ✓ izrada hidrološkog modela
- ✓ izrada hidrauličkog modela
- programiranje automatskih procedura za povezivanje modela
- **meteo prognoza** -> **M11** -> **hidrološka prognoza (Q)** -> **hidraulička prognoza (h)**
- prezentacija rezultata i diseminacija informacija

**RIJEKA SAVA** kao prekogranična rijeka -> **REALIZIRANA** suradnja i koordinacija sa Slovenijom i BiH !



74



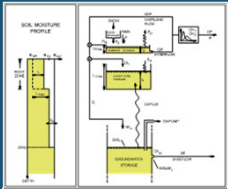
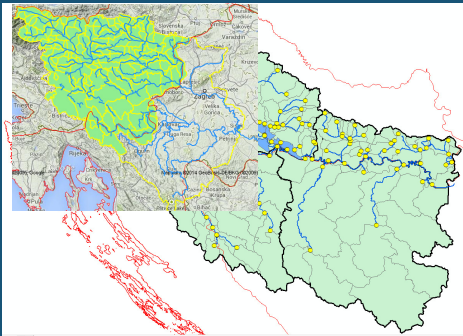
75



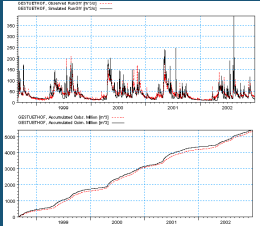
76

RAZVOJ I KALIBRACIJA HIDROLOŠKOG MODELA –” NAM”

Definiranje i kalibracija hidroloških modela za 159 pod-slivova kao ulaz za hidrodinamički model



Struktura hidrološkog modela



Pregled modela Save do granice Srbije: Hidrološki model

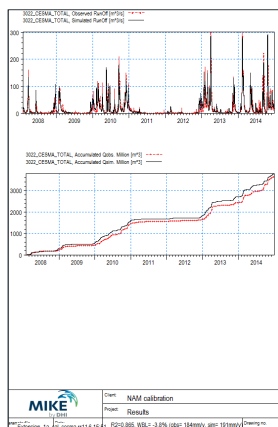


Pregled semidistribuiranog hidrološkog modela

Grupa	Slivovi	Površina (km2)	
Slovenia	Sava_Slovenia	10360	10360 Catchm.
Pilot Model	Sotla	561	12690 63
	Krapina	1232	
	Sava_to_Sisak	1522	
	Kupa_upper	2037	
	Dobra	838	
	Mreznica	1266	
	Korana	1573	
	Gilva	1126	
	Kupa_Downstream	2535	
Grupa 1A	Cesma	3254	7914 28
	Ilova	1796	
	Sava_Cesma-Ilova	2864	
Grupa 1B	Ura	6010	10364 22
	Sava	4354	
Grupa 2A	Orjava	1606	5215 31
	Bosut	2424	
	Sava_Orjava-Bosut	1185	
Grupa 2B	Vrbaš	5687	21304 15
	Ukrina	1501	
	Bosna	10820	
	Tinja	905	
	Sava_Bosnia	2390	
Total			67846 153



## Kalibracija hidrološkog modela



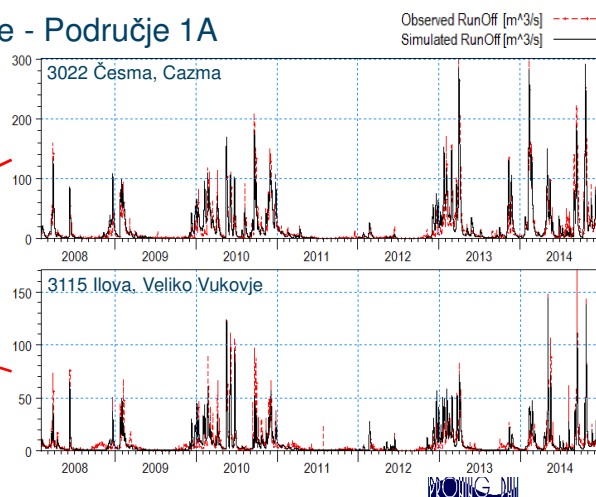
### Parametri kalibracije:

Sliv	R2	WBL (%)
Česma	0.87	3.9
Ilova	0.73	2.5
Una	0.85	0.5
Sana	0.70	-2.8
Orljava	0.77	0
Bosut	0.73	5
Vrbas	0.58	2.5
Bosna	0.70	-2
<b>Prosjeak</b>	<b>0.74</b>	<b>1.2</b>

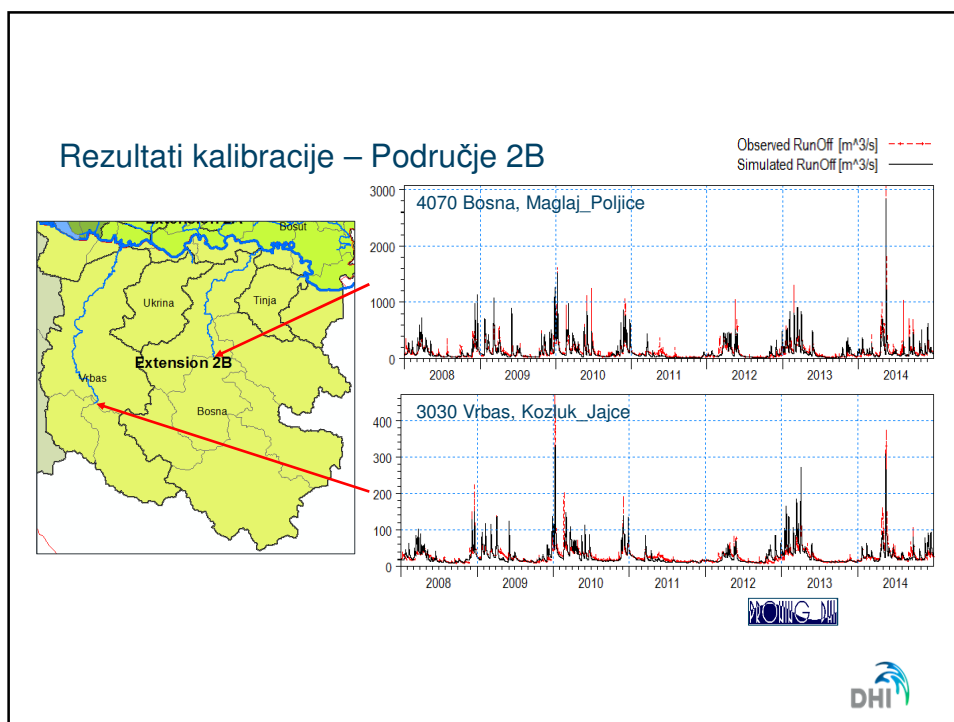


79

## Rezultati kalibracije - Područje 1A



80



81

## HYDRODINAMIČKI MODUL

Hidrodinamički modul je jezgra programa MIKE 11

- Saint Venantovw jednadžbe

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

- 6 točkasta Abbott-Ionescu shema konačnih razlika dinamički/difuzni/kinematski val

- Mreža u obliku petlje

DHI

82

## Pregled modela Save do granice Srbije: Hidrodinamički model



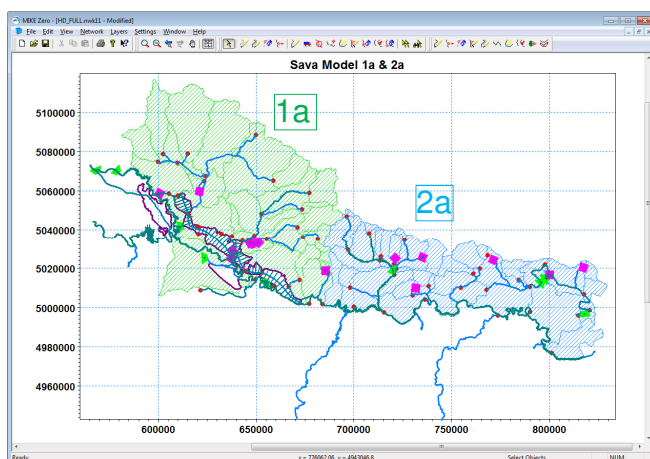
## Pregled HD modela

Karakteristike	Pilot Model	Super Model
Slivovi	63	159
Rijeke ukupno km	1145	3082
Sava	160	517
Pritoke	985	2565
Br. računskih točaka	4890	15800
Preljevi	10	25
Kontrolni objekti	1	15
Retencije	1	13
Poprečnih presjeka	700	1818



83

## Izrada i kalibracija HD model na području Hrvatske



**Model na području Hrvatske je razvijen u dvije faze:**

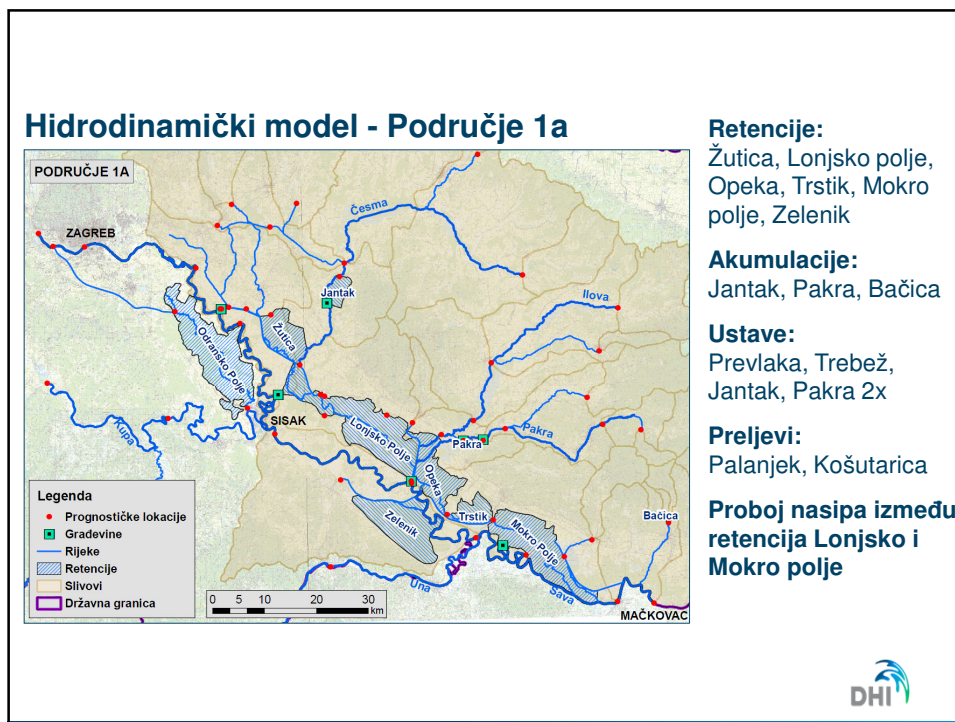
- 0 Sava i Kupa do Siska
- 1a Sisak –Mačkovac
- 2a Mačkovac – R.Srbija

kalibracijski model uključuje rijeke Savu, Kupu, Glinu, Odransko polje i Unu iz Pilot modela te pritoke iz BiH Vrbas, Ukrinu, Bosnu i Tinju.

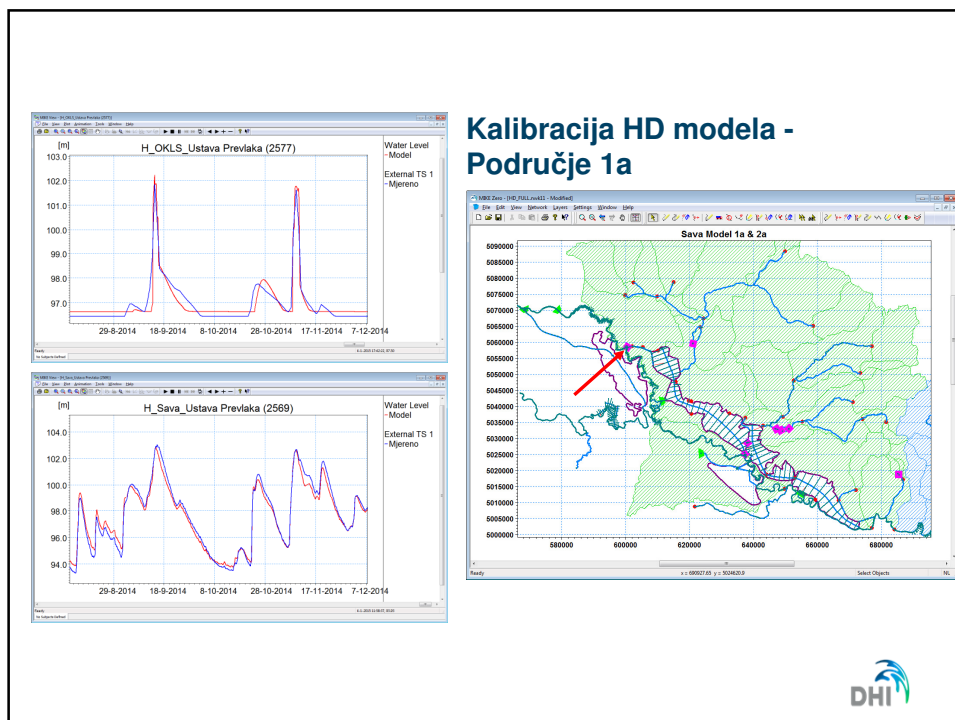


84

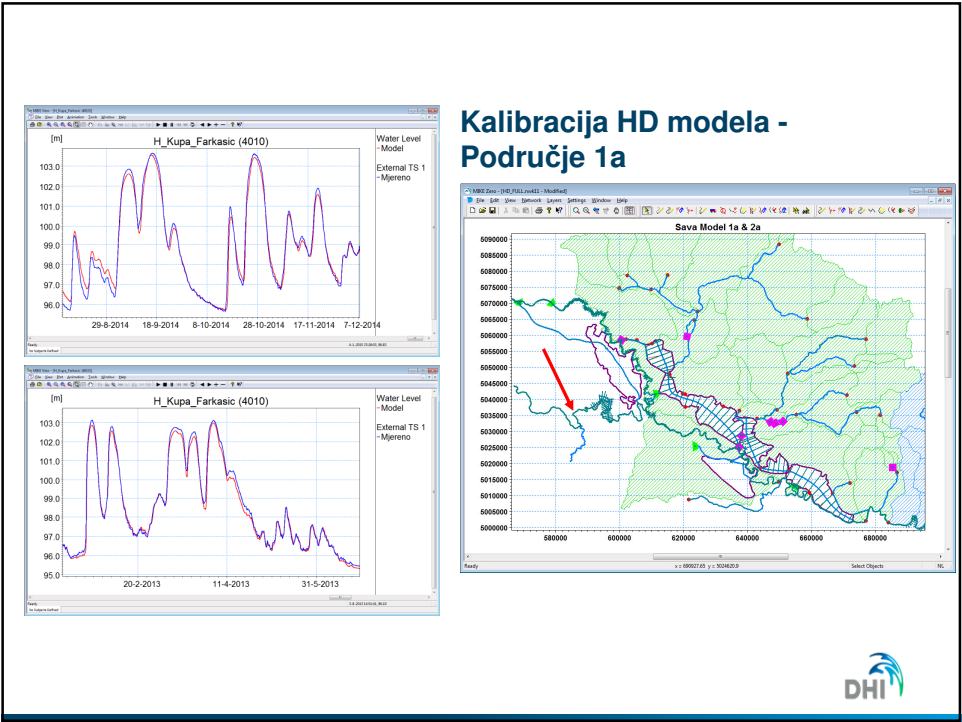




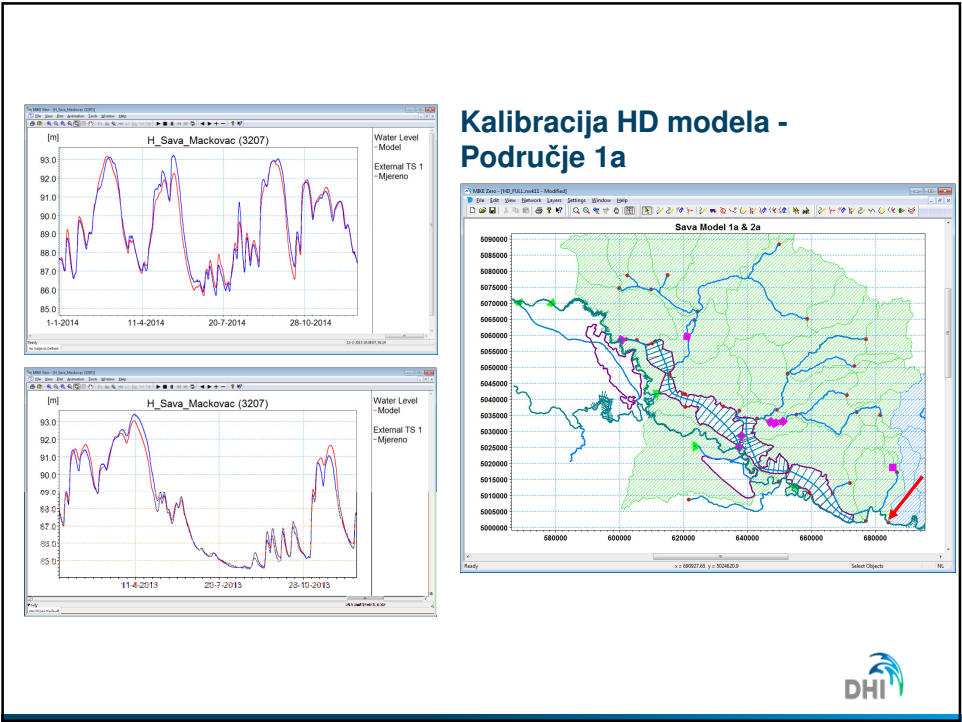
85



86



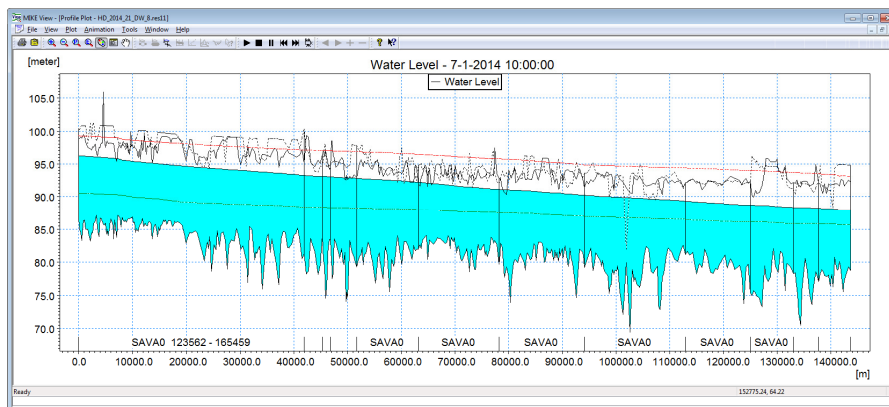
87



88

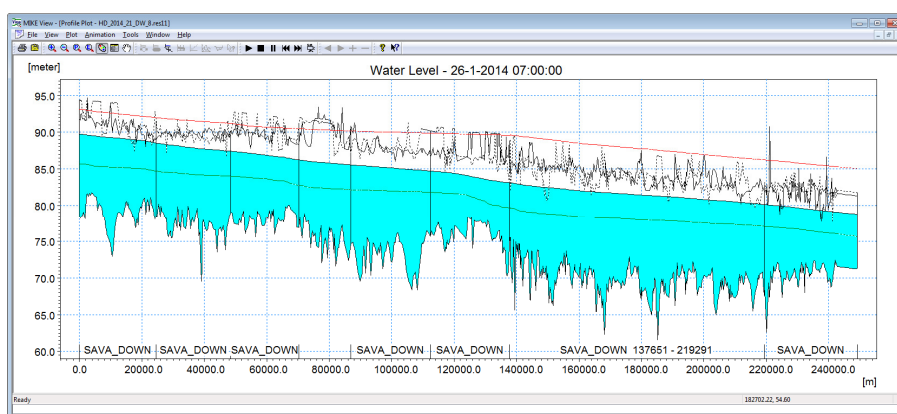


### Uzdužni profil: Rijeka Sava (Sisak - Mačkovac)



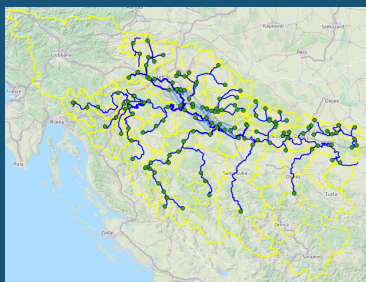
89

### Uzdužni profil: Rijeka Sava (Mačkovac – Republika Srbija)

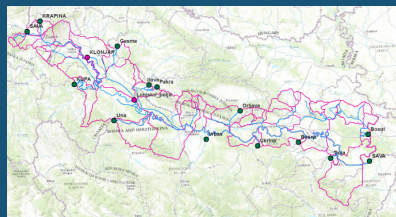


90

## Razvijeni sustavi za hidrološko prognoziranje



DETALJNI OPERATIVNI MODEL – SavaSM v.1.0



GLOBALNI POPLAVNI MODEL – SavaFM v.1.0



91

### Popis prognostičkih profila

Sjra, vodotok i naziv postaje	Sjra, vodotok i naziv postaje	Sjra, vodotok i naziv postaje	Sjra, vodotok i naziv postaje	Pilot	
469 SAVA (JERSENICE)	2503 Prikop Budja (Prehlep Rokovi)	3108 Surja (Surja)	3026 Una (HR Dubica)	Pilot	43
467 SAVA (PROJEKTOVANJE ZUPAJA)	2506 SJK „Jela“ polje (Bibodnica)	3115 Reva Velja Vukovje	3025 Una (HR Duga Svuga)	Una HR	6
2576 SAVA (PRELJEV JANKOMIR)	2508 Alunčica Pampa (Pampa)	3116 Reva Reva	3217 Una (HR Kraljevica)	Una FBiH	15
4131 SAVA (ZAGREB)	2513 LK „Adamićka“ Ogriva (Stari Petrovo Selo)	3133 Boud (Njemeti)	3419 Una (HR Srebrenica Buk)	FBiH ostale	6
306 SAVA (BUDICA)	2514 Alunčica Batica (Batica)	3140 Sivonica (Donga Sumetlica)	3414 Una (HR Dobroviti)	HR nove	74
469 SAVA (USTAVA PREVLJKA)	2515 DK Longa Struj (Vrhovnja 1)	3149 Iova (Moureljica)	3415 Una (HR Sluga Bansk)	Ukupno	144
3075 SAVA (DUBROVNIK LJEVO)	2520 Retencija Opila (Plešni)	3158 Kutina (Kutina)	2010 Una (BA Martin Brod)		
400 SAVA (CRNAC)	2521 Retencija Moko polje (Moko)	3171 Bjela (Badevlina)	2020 Una (BA Kulen Vakuf)		
3075 SAVA (DUBROVNIK LJEVO)	2523 Reva (Sarenica)	3177 Reva (Starinski Kotar)	2025 Una (BA Ripac)		
3075 SAVA (DUBROVNIK LJEVO)	2526 Spilj kanal 2525 (Prilipak Lug)	3179 Reva (Duga C. S.)	2025 Una (BA Ripac)		
3075 SAVA (DUBROVNIK LJEVO)	2527 Retencija Zulfica (CS Ploce)	3207 Sava (Machovica Ustava)	2025 Una (BA Bihac)		
3075 SAVA (DUBROVNIK LJEVO)	2530 Derivacijski kanal Cemo Longa (CS Longa)	3210 Oboginica (Grabarica)	2025 Una (BA Kraljevo)		
3075 SAVA (DUBROVNIK LJEVO)	2533 Cerna (Prehlep Jantak)	3211 Sava (Zuparje Stepanica)	2025 Una (BA Bosanska Krupa)		
3075 SAVA (DUBROVNIK LJEVO)	2536 Dvornik FNL „M. Patera“ (Lamirica)	3219 Sava (Jasenovac)	2025 Una (BA Bosanska Cika)		
416 KUPA (HRVATSKO)	2543 Retencija Longa Polje (Rajapnica)	3238 Sumetlica (Cernik)	2110 Una (BA Drvar)		
401 KUPA (DUBROVNIK)	2548 Retencija Longa Polje (CS Sasna Oreda)	3257 Sibotina (Cukarici Saperica)	2120 Una (BA Prilipak Marasir)		
402 KUPA (KAMNITI)	2550 Retencija Longa Polje (Bibodnica)	3268 Brpa (Zvečivo)	2215 Sava (BA Kijac)		
411 KUPA (DUBROVNIK)	2555 Cemo „Longa“ (Sasna Cemo)	3269 Toplica (Dobruva)	2320 Sava (BA Sarajevo Most)		
417 KUPA (DUBROVNIK)	2568 ZLK „Bd“ polje (Pakovo)	3299 Sava (Pakovo)	3017 Sava (BA Mostar)		
401 KUPA (DUBROVNIK)	2567 Bosat (Sprek)	3301 Brijunska (Velja Trgova)	1114 Krušnica (BA Krušnica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2570 Retencija Longa Polje (Ustava Trebež)	3342 ZLK „Bd“ polje (Toplice)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2571 Sava (Ustava Trebež)	3346 Bosat (Vrhovnja)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2573 Cerna (Cerna Ust)	3350 Breznica (Dragostin)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2577 DK Longa Struj (Ustava Prevljka)	3352 Bld (Vrhovnja)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2599 Kapuljka (Pala Ključev)	3354 Kulat (Plešni)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2600 Kapuljka (Plešni)	3364 Spava (Ljubar)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2601 Vrbica (Vrbica)	3367 Zlatina (Bogalovina)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2602 Duga (Bibodnica)	3369 Paka (Ljubič)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	2604 Longa (Mati London)	3370 Duga (Plešni)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	3015 Retencija Trst (Bibodnica)	3398 Duga (Vrhovnja)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	3018 Bld (Cerna)	3399 Alunčica Pampa (Al. Pampa)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	3020 Cerna (Cerna)	3401 Paka (Krušica)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	3062 Longa (Longa most)	3411 Velika (Velika)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	3084 Longa (Plešni)	3412 Oboginica (Kotina)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	3098 Sava (Starinski Brod)	3416 Sava (Surja)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	3101 Sava (Starinski Brod)	3420 Alunčica Grava (Alunčica Grava)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		
402 KUPA (DUBROVNIK)	3104 Sava (Sava Gradiska)	3421 Alunčica Josava (Alunčica Josava)	3020 Vrbica (BA Vrbica)		



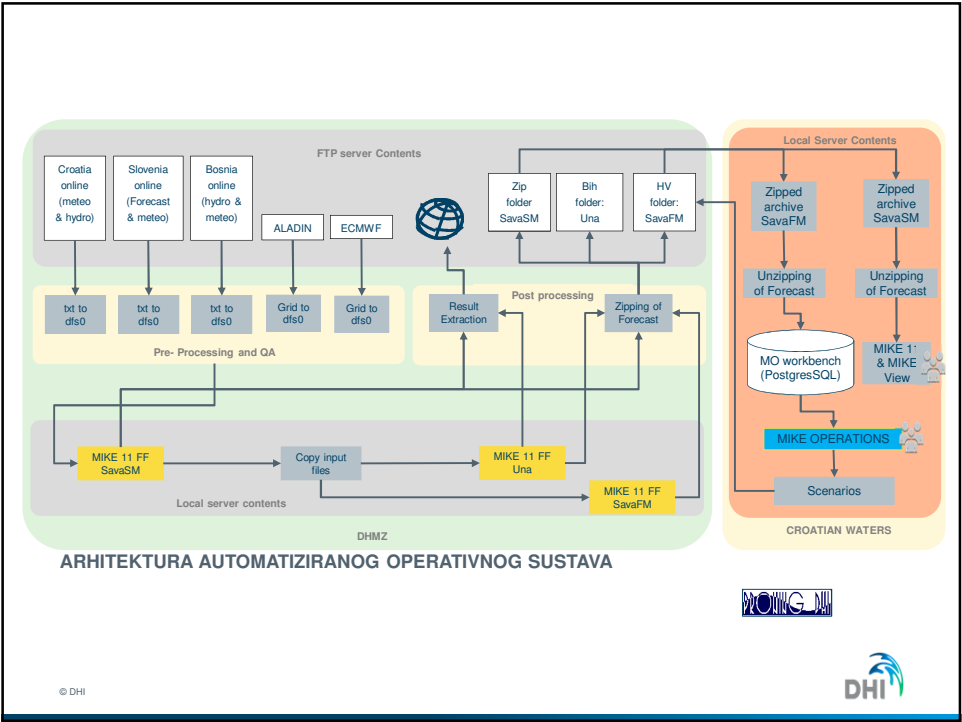
92

# Upravljanje scenarijima

POJEDNOSTAVLJENI DIJAGRAM TOKA ZA UPRAVLJANJE SCENARIJIMA:

DHMZ dostavlja prognozu → HV radi analize potencijalnih scenarija → DHMZ radi novu prognozu

93

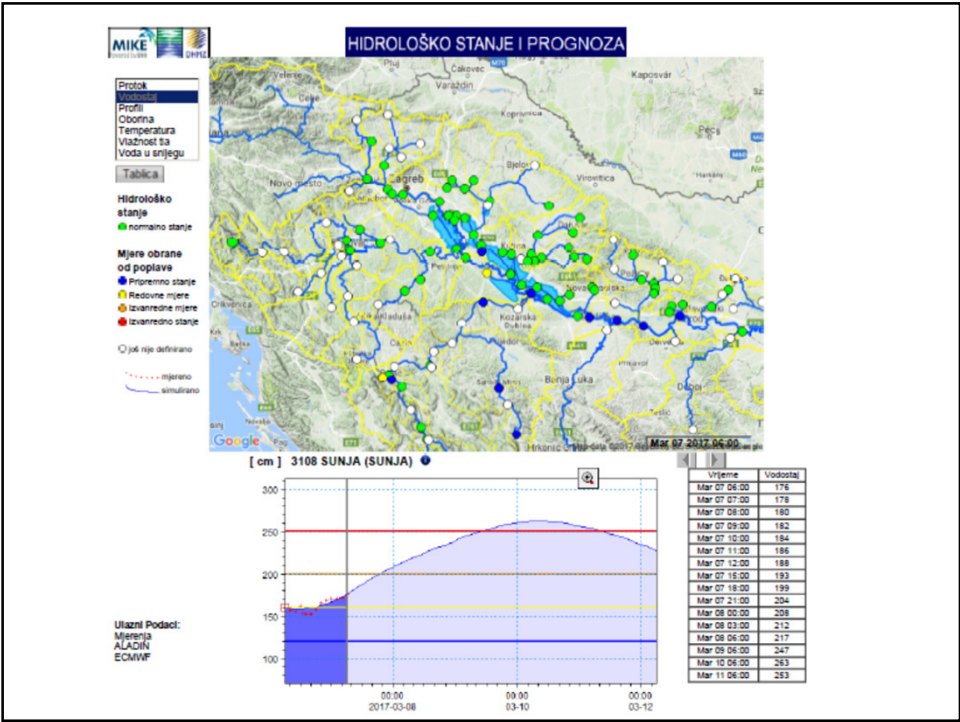


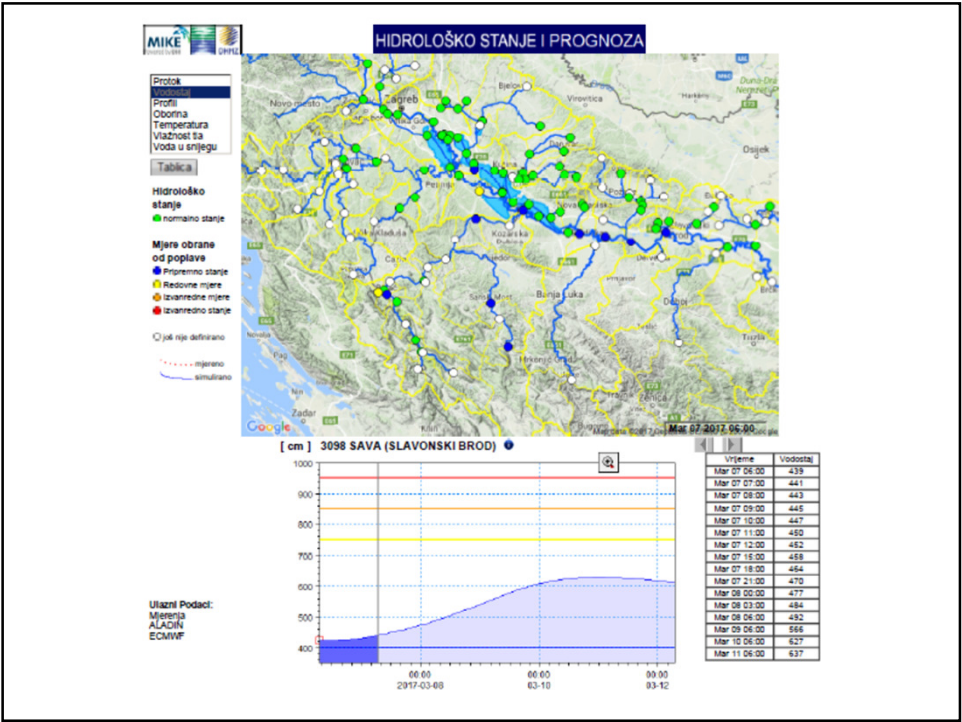
Rezultat 1:  
OPERATIVNI SUSTAV U FUNKCIJI

Internetski preglednik (interni pristup HV/DHMZ)

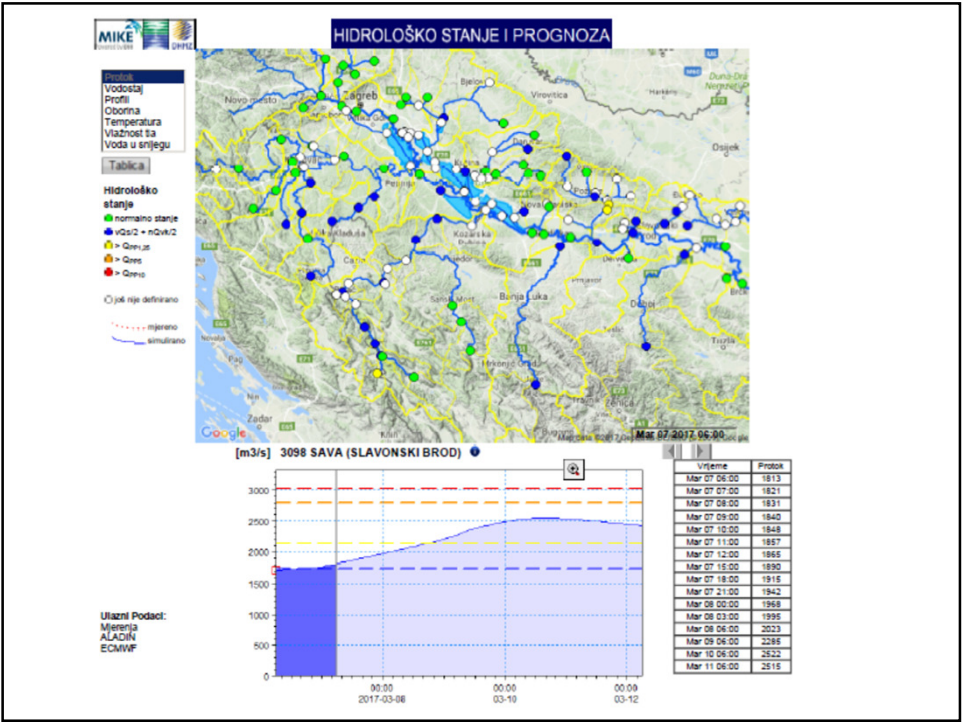


95



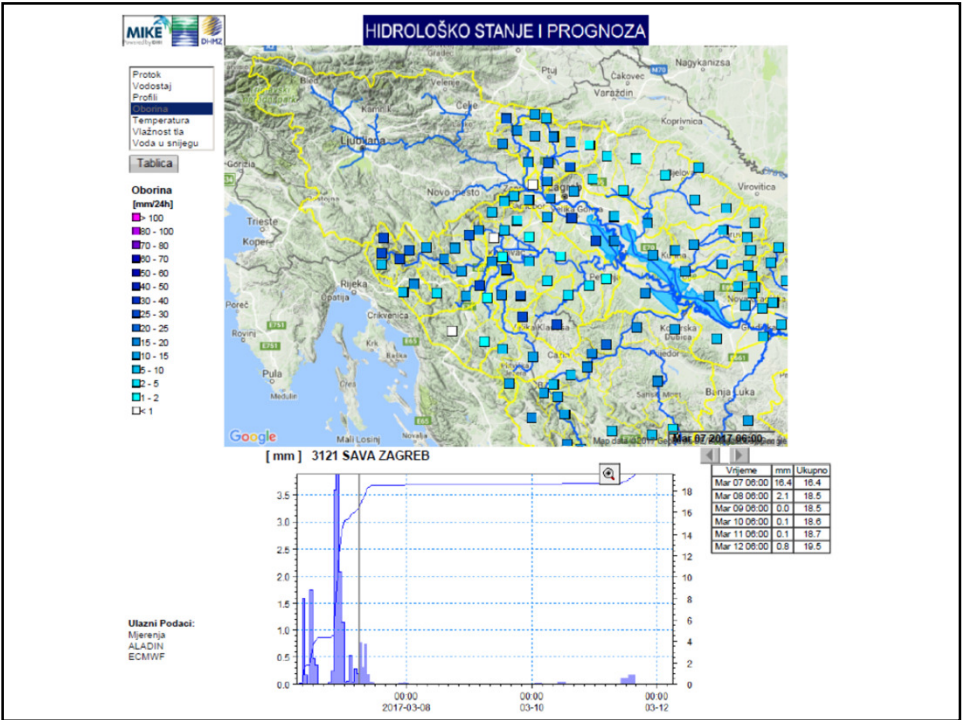


97

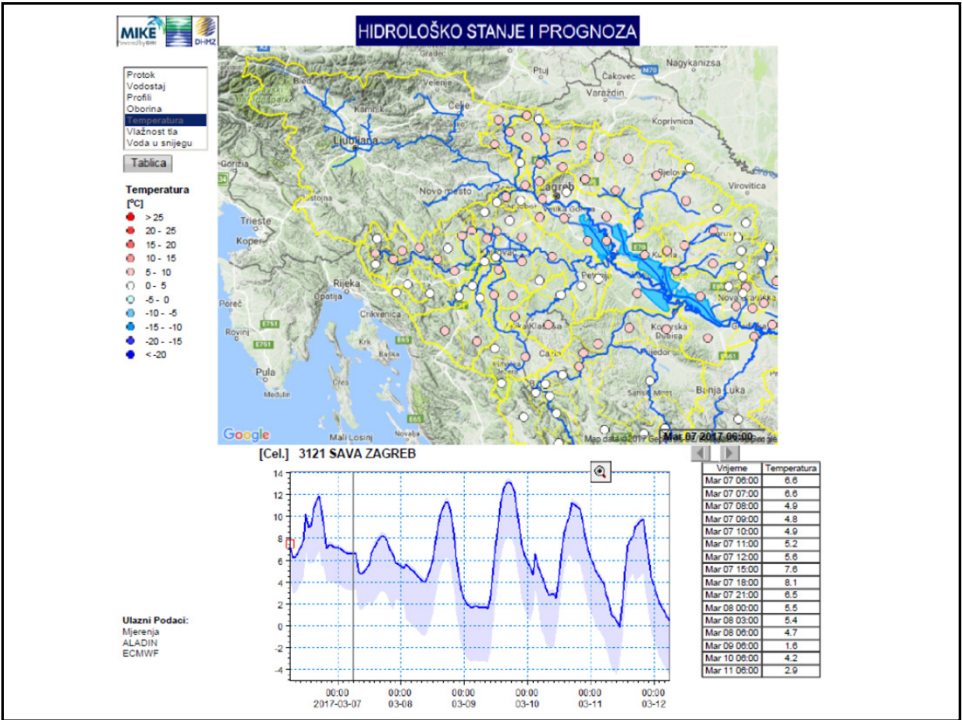


98

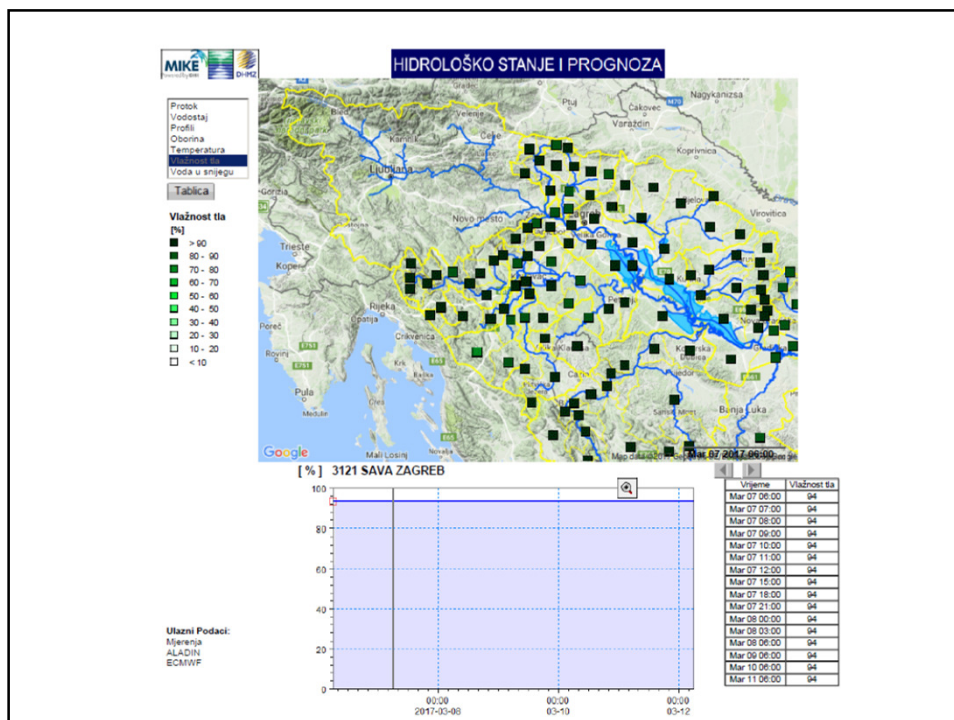




99



100



101

## Rezultat 2: Obučeno stručno osoblje u HV i DHMZ



- 6+4=10 jednotjednih radionica
- 10-15 sudionika
- cca 600 č-d primijenjene obuke



102

## Daljnji razvoj

- Testiranje i korištenje nacionalnog prognostičkog sustava za sliv rijeke Save
- Nastavak razvoja nacionalnog sustava na slivu rijeke Save i drugim slivovima u RH
- Suradnja na razvoju međunarodnog sustava za cijeli sliv Save
- Priprema i provedba sveobuhvatnog EU-sufinanciranog projekta unapređenja negrađevinskih mjera upravljanja rizicima od poplava, uključujući poboljšanje sustava za predviđanje poplava i sustava ranog upozorenja i uzbunjivanja

103

## ZAKLJUČNO – HIDROLOŠKI MODELI

- Komponentni hidrološki modeli – za pojedine hidrološke procese
- Integralni hidrološki modeli – skupovi komponentnih modela za integralne hidrološke procese u slivu (hidrološki ciklus)
- Hidrološki modeli slivova
  - Pojedinačni događaji (velike vode) –npr. HEC-HMS
  - Kontinuirana simulacija – npr. HSPF, SWAT
- Kalibracija i verifikacija!

104