

# Interpretacija mjerenja na području Opuzen-ušće i Vidrice iz 2014. godine

---

**Deković, Jure**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:791703>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-24**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Jure Deković**

**Split, 2015.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Jure Deković**

**Interpretacija mjerenja na području Opuzen-ušće i  
Vidrice iz 2014. godine**

**Diplomski rad**

**Split, 2015.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT: **Jure Deković**  
BROJ INDEKSA: **448**  
KATEDRA: **Katedra za privrednu hidrotehniku**  
PREDMET: **Obalno inženjerstvo**

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

**Tema: Interpretacija mjerenja na području Opuzen-ušće i Vidrice iz 2014. godine**

Opis zadatka: Kandidat treba obraditi mjerenja izvršena na lokaciji Opuzen – ušće i Vidrice tijekom 2014. godine. Regresijskom analizom treba utvrditi eventualnu povezanost među varijablama: razine podzemnih voda u pijezometrima P1-P4, razine podzemnih voda u pijezometrima D1-D4, hod morske razi sa mareografa, vodostaj u rijeci Neretvi na profilu Opuzen, oborina sa mjernih stanica Opuzen, Metković i Ploče i crpljenje CS Modrič. Po utvrđivanju funkcionalnih veza nužno je odrediti parametre vodonosnika pod tlakom (konduktivitet i difuzivnost) direktnim metodama iz mjerenja i modelskim pristupom iz literature. Utvrđivanjem dinamičkih svojstava podzemnih voda u području obuhvata potrebno je interpretirati mjerenja slanosti u pijezometrima.

U Splitu, 09. ožujka, 2015.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof. dr. sc. Mijo Vranješ

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:

Prof.dr.sc. Ivica Boko

# **Interpretacija mjerenja na području Opuzen-ušće i Vidrice iz 2014. godine**

## ***Sažetak:***

U ovom diplomskom radu obrađena su mjerenja izvršena na području Opuzen-ušće i Vidrice te je dana odgovarajuća interpretacija rezultata. Regresijskom analizom je odrađena identifikacija procesa i uspostava funkcionalnih veza među varijablama te je dana odgovarajuća interpretacija rezultata. Izvršena je procjena parametara vodonosnika pod tlakom pomoću direktnih metoda korištenjem matematičkih izraza i numeričkog modela te je dana usporedba istih. Na temelju dobivenih rezultata i utvrđenih dinamičkih svojstava podzemnih voda izvršena je interpretacija izmjerenih vrijednosti slanosti u pijezometrima.

## ***Ključne riječi:***

Interpretacija rezultata, regresijska analiza, parametri vodonosnika, metode, zaslanjivanje

# **Interpretation of the measurements in the field of Opuzen-ušće and Vidrice from 2014**

## ***Abstract:***

This diploma project analyses measurements taken in the field of Opuzen-ušće and Vidrice and gives compatible interpretation of the results. Process identification and the establishment of functional relations among variables and gave the appropriate interpretation of the results was performed by using regression analysis. Estimation of the parameters of the aquifer under pressure was made by means of direct methods by using mathematic expressions and numerical model and comparison of the same. Based on the results and determined the dynamic characteristics of the groundwater, interpretation of the measured values of salinity in the piezometers was performed.

## ***Keywords:***

Interpretation of the results, regression analysis, the aquifer parameters, methods, salinization

# Sadržaj

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Općenito o području Donje Neretve.....	1
1.2. Područje obuhvata .....	2
1.2.1. Današnji problemi .....	3
1.2.2. Ciljevi rada .....	5
<b>2. NASTANAK I RAZVOJ DOLINE DONJE NERETVE .....</b>	<b>6</b>
2.1. Dolina Neretve kroz geološku prošlost .....	6
2.2. Početak melioracije i izgrađeni sustavi .....	7
<b>3. DOSTUPNI PODACI I IZVRŠENA MJERENJA .....</b>	<b>12</b>
3.1. Podaci o području obuhvata i izvršenim istražnim radovima .....	12
3.2. Podaci o piježometrima .....	23
3.3. Podaci o mareografu i limnigrafu.....	27
3.4. Podaci o količinama oborina .....	28
3.5. Podaci o salinitetu u piježometrima, Neretvi i Maloj Neretvi .....	28
3.6. Podaci o režimu rada odvodnje .....	29
3.7. Podaci o protoku kroz Neretvu.....	30
<b>4. IDENTIFIKACIJA PROCESA I USPOSTAVA FUNKCIONALNIH VEZA U SUSTAVU .....</b>	<b>31</b>
4.1. Regresijska analiza i pripadna korelacija .....	31
4.2. Regresijska analiza varijabli vodonosnika pod tlakom.....	34
4.2.1. Analiza odnosa mora i piježometara .....	34
4.2.2. Analiza odnosa vodostaja i piježometara .....	37

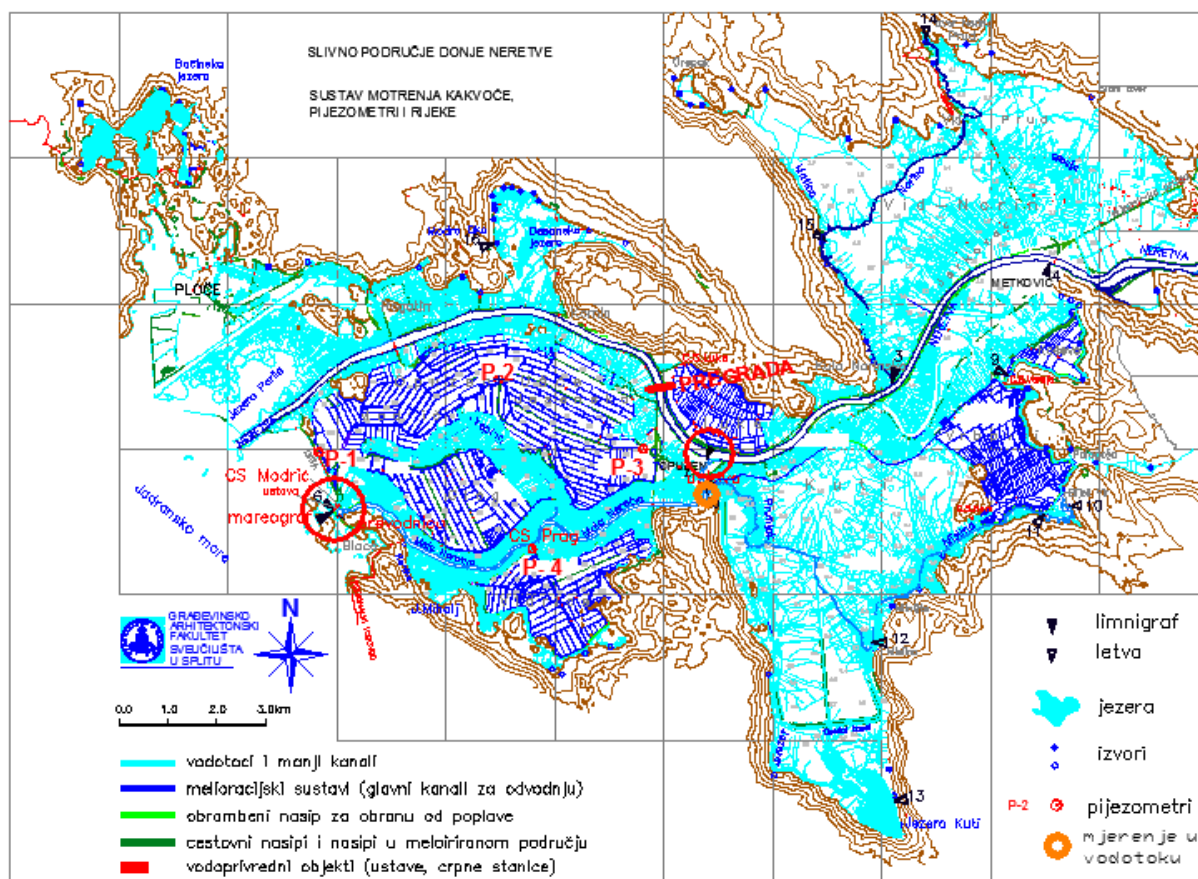
4.2.3.	Analiza odnosa oborine i pijezometara .....	38
4.3.	Regresijska analiza gornjeg vodonosnika .....	40
4.3.1.	Analiza odnosa mora i pijezometara .....	40
4.3.2.	Analiza odnosa vodostaja i pijezometara .....	42
4.3.3.	Analiza odnosa oborine i pijezometara .....	44
4.3.4.	Analiza odnosa oborine i vremena crpljenja .....	45
4.3.5.	Prikaz i analiza svih ostalih relevantnih parametara plitkog vodonosnika .....	47
4.4.	Analiza odnosa mora i vodostaja .....	49
4.5.	Analiza odnosa dubokih i plitkih pijezometara .....	52
<b>5.</b>	<b>DEFINIRANJE PARAMETARA VODONOSNIKA POD TLAKOM.</b>	<b>57</b>
5.1.	Parametri iz istraživanja i ispitivanja .....	59
5.2.	Procjena parametara vodonosnika pod tlakom pomoću tzv. direktnih metoda	59
5.3.	Procjena parametara donjeg vodonosnika pomoću matematičkog modela ....	68
5.4.	Usporedba rezultata i njihova interpretacija.....	77
<b>6.</b>	<b>MJERENJA SLANOSTI U PIJEZOMETRIMA I NERETVI .....</b>	<b>79</b>
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>92</b>
<b>8.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>94</b>
<b>9.</b>	<b>PRILOZI .....</b>	<b>96</b>

## 1. UVOD

### 1.1. Općenito o području Donje Neretve

Pod pojmom *Donja Neretva*, podrazumijeva se područje (dolina) koje obuhvaća sliv donjeg toka rijeke Neretve između ušća rijeke Neretve u Jadransko more i Počitelja u Bosni i Hercegovini (dalje u tekstu BiH). Naime, prema morfološkim i geografskim parametrima može se reći da rijeka Neretva u Počitelju prelazi iz planinske u nizinsku rijeku.

Cijelo područje Donje Neretve je zapravo delta rijeke Neretve, koja je nastala u nekadašnjem morskom zaljevu, kroz geološku prošlost, donošenjem materijala (aluvija) sa cijelog sliva rijeke Neretve. Površina hrvatskog dijela Donje Neretve, od granice s BiH do ušća iznosi približno 11 000 ha [7, 14].



Slika 1.1. Slivno područje Donje Neretve



Kao i kod većine svjetskih delti, područje Donje Neretve je iznimno plodno područje za uzgoj agrarnih kultura te kao takvo predstavlja jedno od najproduktivnijih agrarnih područja, ali, nažalost, još uvijek i najperspektivnijih jer mnoge obradive površine nisu obrađene, a niti kvalitetno navodnjavane.

Za vodni režim otjecanja sa sliva, karakterističan je obilat dotok vode u zimskom (kišnom) razdoblju, dok je u ljetnom (sušnom) razdoblju taj dotok značajno manji. S druge strane, po rubu područja (na obali) je more sa svojom dinamikom i djelovanjem prema delti rijeke.

Dakle, s jedne strane dotok sa sliva pale oborine i s druge strane djelovanje mora, čine dinamičnu ravnotežu u okviru koje se događa prodor soli (zaslanjivanje) cijelog područja Donje Neretve.

## **1.2. Područje obuhvata**

Ovaj rad neće se baviti cijelim područjem Donje Neretve, već samo jednim njenim dijelom. Područje koje rad obuhvaća sastoji se od područja: Opuzen-ušće i Vidrice (vidi sliku 1.2). Konfiguracija terena je takva da je cijela dolina gotovo horizontalna (izuzev nekadašnjeg jezera Modrič koji predstavlja depresiju, približno -1 [m n.m.]) s blagim padom prema ušću. U sadašnjem stanju, sva nekadašnja jezera su meliorirana. Detaljniji prikaz područja obuhvata, dan je na slici 1.2. .



Slika 1.2. Područje obuhvata

Iz slike se vidi da je područje obuhvata sa sjeverne strane okruženo rijekom Neretvom, s južne i istočne strane krškim masivom, dok se sa zapadne strane nalazi more. Iz same pozicije promatranog područja prilično je jasno, da bi se dala kvalitetna interpretacija funkcioniranja sustava mora se voditi računa o velikom broju parametara, kako onih na terena tako i u podzemlju.

### 1.2.1. Današnji problemi

Današnji problemi na području obuhvata mogu se podijeliti u četiri skupine:

- Problem zaslanjivanja vode i tla
- Problem vezan za urbanizaciju poplavnih područja rijeke Neretve
- Problem smanjenog prinosa nanosa s područja sliva
- Problem izdašnosti izvora

Ovaj rad baviti će se isključivo procesima koji dovode do problema zaslanjivanja vode i tla, kao glavnog problema svih poljoprivrednih proizvođača na tom području. Posljednjih godina, poljoprivredna proizvodnja na području Donje Neretve je jako ugrožena, zbog sve učestalijeg zaslanjivanja sloja bitnog s agronomskog aspekta. Osim što dolazi do značajnog smanjenja prinosa, dolazi i do toga da se velike količine proizvoda zbog slanosti ne mogu konzumirati, odnosno prodati. Šteta je tim veća, kada se zna da jednom kada se tlo zaslani potrebni su značajni naponi, kao i vrijeme, da se ono vrati u prijašnje, nezaslanjeno, stanje.

Pretpostavka je da sol u područje dolazi iz dva smjera, intruzijom kroz korito rijeke Neretve te iz dubokih podzemnih slojeva. I dok je prodor mora u korito rijeke prilično dobro istražen i potkrepljen modelom [13], intruzija te soli u područje još uvijek je nedovoljno istražena, kao i zaslanjivanje iz dubokih slojeva. Zaključeno je da slani klin u Neretvi seže sve do Metkovića pri protocima slatke vode do približno  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ , do Opuzena za protoke približno  $280 \text{ m}^3/\text{s}$ , a do Rogotina kod protoka od približno  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ . Procjenjuje se da kod protoka većih od  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  ne dolazi do intruzije morske vode u korito rijeke [13].

Najveće probleme dolini Neretve je donijela intenzivna izgradnja hidroenergetskih postrojenja u gornjim dijelovima toka (BiH) tako da mnogi izvori svježe vode u ljetnim periodima presuše. Ipak, zahvaljujući utjecaju akumulacije Jablanica, koja ima višegodišnje izravnanje, ekstremne vrijednosti protoka su uravnotežene. U ljetnom periodu, kada su potrebe za vodom najizraženije zbog navodnjavanja, vrijednosti protoka su minimalno  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , što predstavlja minimalni protok koji se u svakom trenutku mora propuštati kroz HE Mostar. Treba naglasiti da su vrijednosti protoka prije izgradnje postrojenja često u ljetnim periodima znale biti i ispod  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ , tako da se stanje u tim mjesecima, što se tiče vode u Neretvi, poboljšalo [14].

Problem zaslanjivanja je posebno izražen u ljetnim mjesecima kad je protok kroz Neretvu najmanji, samim time utjecaj mora najveći, a tada su i potrebe za svježom vodom za navodnjavanje najveće.

### **1.2.2. Ciljevi rada**

Da bi se problemi zasljanjivanja vode i tla u području obuhvata riješili te izvršila dobra analiza procesa koji se događaju u sustavu, potrebno je prije svega izvršiti dobru identifikaciju procesa koji se događaju u sustavu. Kako bi se procesi identificirali, regresijskom analizom će se na temelju dostupnih podataka i izvršenih mjerenja u periodu 2009. - 2014. godine uspostaviti funkcionalne veze. Dakle, cilj ovog rada je uspostava tih funkcionalnih veza, na temelju kojih će se identificirati i interpretirati procesi u sustavu te uz pomoć pojedinih metoda i modela procijeniti parametri vodonosnika, a koji bi se kalibrirali s rezultatima dobivenim iz istražnih bušotina.

Pod pojmom parametri, prvenstveno se misli na određivanje koeficijenta propusnosti (K).

## 2. NASTANAK I RAZVOJ DOLINE DONJE NERETVE

### 2.1. Dolina Neretve kroz geološku prošlost

Sami nastanak doline Donje Neretve vezan je uz tektoniku. Masiv koji ograđuje dolinu između Metkovića i ušća, kao i njenu osnovu, izgrađuju karbonatne naslage jure, krede, paleocena i eocena, dok samu dolinu izgrađuju kvartarne naslage [7].

Kronološki gledano, najstarije naslage na terenu su dolomiti i vapnenci jure te možemo reći da je to vrijeme početak stvaranja doline. Krajem jure dolazi do orogenetskih pokreta, izdizanja terena i okršavanja po površini i u dubini.

Početak krede, spušta se kopno, odnosno dolazi do transgresije te taloženja pretežno vapnenačkih naslaga. Krajem gornje krede, nakon izdizanja šireg područja Dinarida, stvoreni su uvjeti za pojačan razvoj procesa okršavanja. Uslijed velike razlomljenosti, omogućen je razvoj podzemnih vodnih veza, dok se na površini formiraju krške depresije. Završetkom krede, odnosno početkom pleistocena dolazi do nove transgresije u kojem se talože plitkovodni vapnenci. Kroz eocen dolazi do sedimentacije flišnih naslaga, da bi njegovim završetkom došlo do snažnih tektonskih pokreta, koji ponovno izdižu teren, boraju ga i lome, što površinskim vodama omogućuje jače korozijsko i erozijsko djelovanje, a podzemnim stvaranje novih puteva i veza, te širenje postojećih.

Jaki tektonski pokreti se nastavljaju kroz oligocen, kada se definitivno izdižu velika područja Dinarida, što dovodi do velikih promjena u strukturama. Na koncu, otkrivene karbonatne naslage zahvaćene su novim procesima okršavanja koji traju do danas. U neogenu dolazi do laganih tonjenja i izdizanja kopna uslijed kojih i danas dolazi do ponovnih horizontalnih i vertikalnih kretanja po starijim rasjedima. Za razvoj i oblikovanja danas vidljivih osnovnih struktura i same doline Neretve možemo reći da je došlo kroz neogen. Uslijed pokreta koji su se dogodili početkom kvartara, došlo je do izdizanja koja su formirala današnje visine planina.

Današnja dolina Neretve formirana je krajem pleistocena (Ledeno doba), kada se posljednjim ciklusom promjene razine mora ono podignulo za otprilike 100 m. Također, u pleistocenu je počelo i spuštanje tog područja, a koje traje i danas.

Kako je već spomenuto, sama dolina je izgrađena od kvartarnih sedimenata, taloženjem erodiranog materijala sa cijelog slivnog područja rijeke Neretve u nekadašnjem morskom

zaljevu. Izdizanjem morske razine erodirani materijal se slojevito taložio u prostoru nekadašnjeg zaljeva u kojem je danas dolina. Među sedimentima od kojih je izgrađena dolina, najzastupljeniji su šljunci, pijesci s različitim udjelom gline i gline s različitim udjelom praha, pijeska i organske materije koji se izmjenjuju u horizontalnom i vertikalnom smjeru, ali neravnomjerno.

Detaljniji opis i prikaz kvartarnih naslaga od kojih je dolina izgrađena, dan je poglavlju 3.1., gdje se analizira uže područje doline, od interesa za ovaj rad.

## **2.2. Početak melioracije i izgrađeni sustavi**

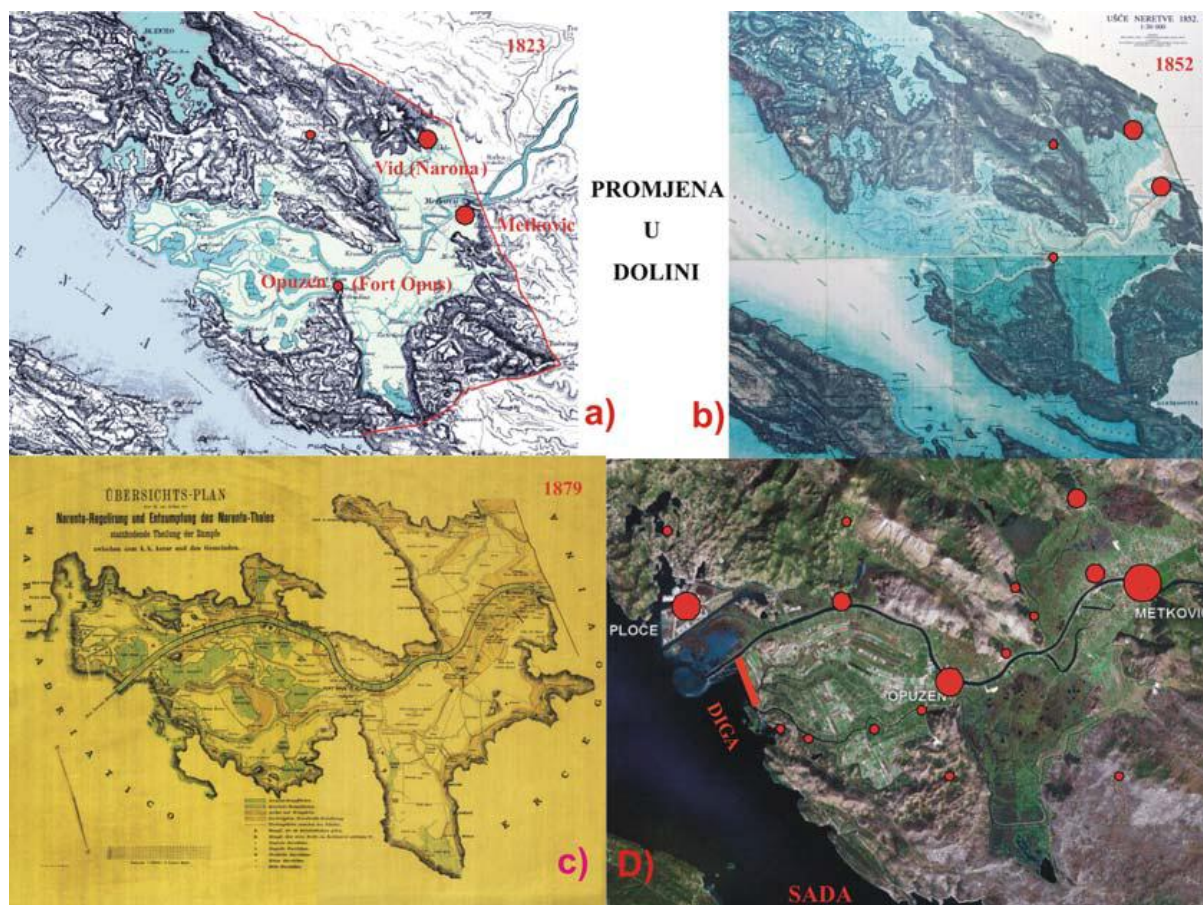
Za vrijeme Mletačke republike, nakon pada Turaka, uvidjevši kakav potencijal dolina ima, počinje se s planovima uređenja toka rijeke Neretve u području ušća [14].

Međutim, do prvih radova dolazi tek pod austrijskom vlašću. Godine 1841. austrijska vlada šalje inženjera Dominika Mattheisa iz Verone da prouči problem Donje Neretve. Tada je napravljena prva visinska izmjera uz Neretvu od Metkovića do ušća te predložena melioracija kolmiranjem<sup>1</sup> pomoću voda iz Neretve. Mattheis je procijenio da bi za kolmaciju bilo potrebno 70 godina.

Značajniji hidrotehnički radovi na regulaciji rijeke urađeni su između 1881. i 1889. godine. Izgrađeni su nasipi, a na pojedinim mjestima je korigirano korito kako bi se omogućila plovnost puta od ušća do Metkovića (slika 2.1.). Međutim, kako pokušaj da se tlo privede u obradivo stanje uglavnom kolmacijom nije dao rezultata, zemljište je ostalo nemeliorirano.

---

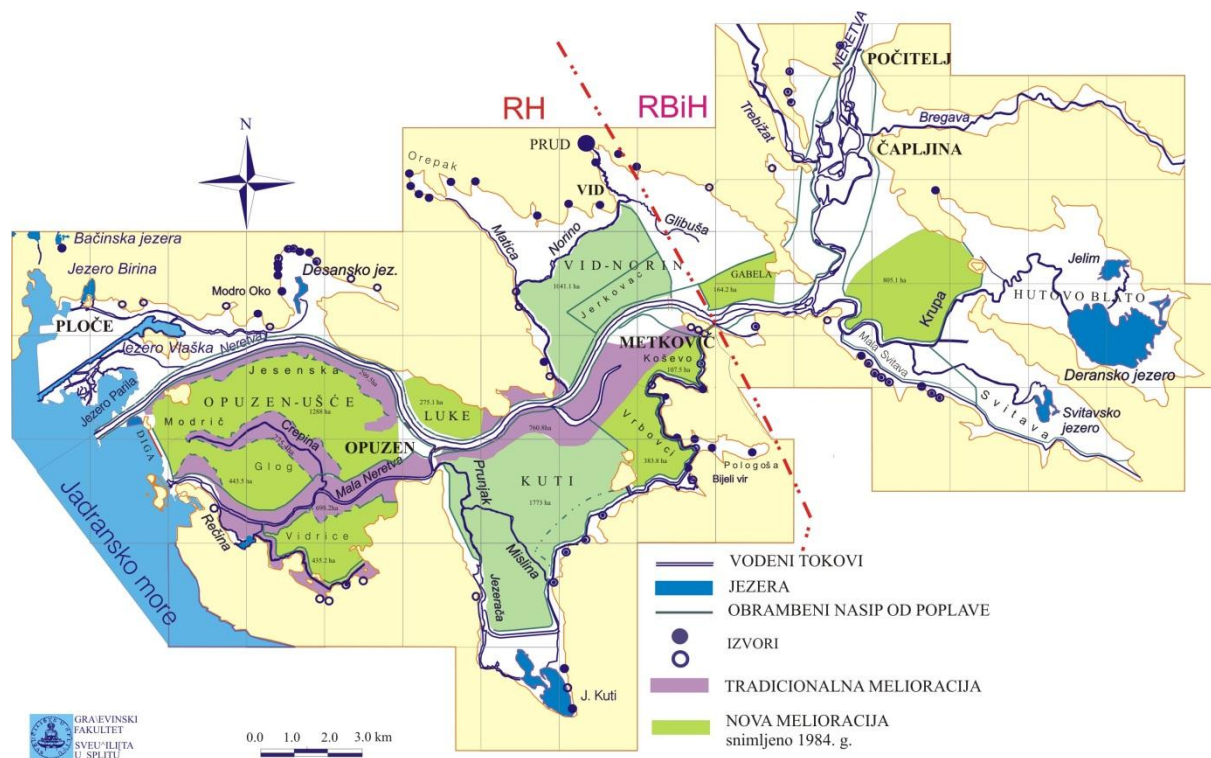
<sup>1</sup> Kolmacija - Proces nanošenja plodnoga mulja rijeke na močvarno područje, da bi se ono privedo u obradivo stanje.



Slika 2.1. Razvoj Donje Neretve tijekom prošlosti do danas

Početak 20. stoljeća ponovno se pokreće pitanje melioracije Donje Neretve. Izrađen je značajan broj projekata, da bi na kraju bio usvojen "Projekt regulacije toka rijeke Neretve", kojeg su izradili stručnjaci FAO-a<sup>2</sup> 1963. godine i koji je do danas djelomično ostvaren. Melioracije su bile temeljene na isušivanju močvara, zatvaranju rukavaca i navodnjavanju umjetnim ili prirodnim kišenjem. Područje čitave delte podijeljeno je na šest melioracijskih zona na kojima je trebalo biti provedeno melioriranje zemljišta kao i njegovo privođenje kulturama. U navedenom periodu, kada su obavljeni radovi, obuhvaćene su samo tri zone: Luke, Koševo-Vrbovci i Opuzen ušće [14, 2].

<sup>2</sup> FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) - Organizacija za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih naroda.

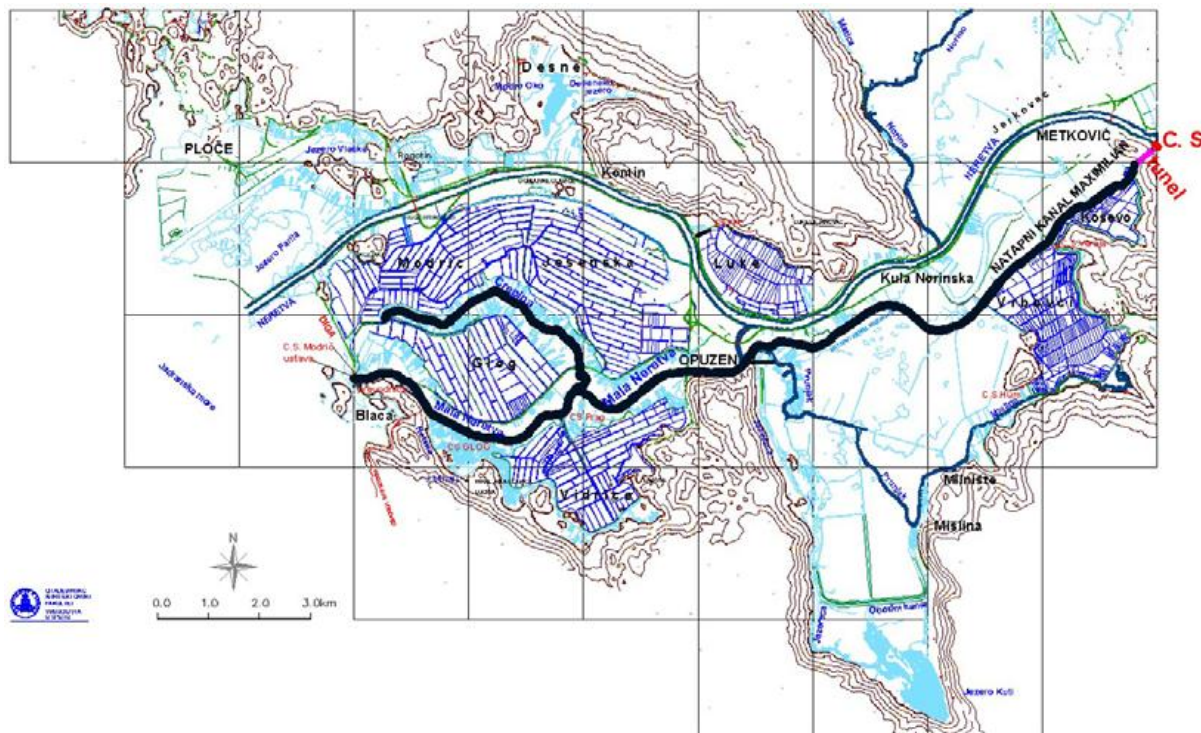


Slika 2.2. Područje Donje Neretve podjeljeno na melioracijske zone

Trenutno stanje sustava, kakvog su zamislili FAO stručnjaci je započeto, međutim nikada nije dovršeno. Voda se zahvaća uzvodno od Metkovića, preko crpne stanice koja je smještena na pontonima. Ova lokacija je odabrana jer tu voda nije zaslanjena. Zahvaća se protok od  $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , koji se tlači kroz tunel Predolac u natapni kanal Maksimilijan. Iz natapnog kanala voda se ulijeva u Prunjak, preko kojeg dolazi u Malu Neretvu (vidi sliku 2.3.). Ideja je bila da će se na taj način u Maloj Neretvi i kanalu Crepina, osigurati dovoljne količine nezaslanjene vode za navodnjavanje. Nezaslanjena voda bi se zatim dovodila do obradivih površina putem crpnih stanica. Iz tog razloga su u Opuzenu i na ušću Male Neretve izgrađene ustave s brodskom prevodnicom, čije su zadaće da spriječe dotok soli u Malu Neretvu. Mana ovog rješenja navodnjavanja je u tome, što od  $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$  koji se zahvaćaju, do Male Neretve stigne neznatni dio, a koji se prolaskom kroz kanal i zaslani. Većina kanala je izgrađena u tresetnom tlu te je njegovo održavanje iznimno teško i skupo. Naime, dolazi do njegova slijezanja i deformiranja. Također, treba naglasiti da se ovim rješenjem troši značajna količina energije na crpljenje.



Iz svega gore navedenog, može se zaključiti da se radi o neracionalnom i neekonomičnom rješenju, kojeg bi trebalo u što kraćem vremenskom periodu zamijeniti [14].



**Slika 2.3.** Sadašnje stanje navodnjavanja

Odvodnja unutarnjih voda je riješena crpljenjem. Na cijelom području postoje dvije značajne crpne stanice, Modrič i Prag. Preko CS Modrič se odvodnjava čitavo područje Opuzen-ušće, dok se preko CS Prag odvodnjava područje Vidrice.

Što se tiče sustava obrane od poplava treba napomenuti da on slabo ili gotovo ne štiti značajne površine od poplavnih voda (grad Metković, Opuzen, područje Vidrice i skoro cijeli privatni kompleks poljoprivrednih površina).

Dolina se sastoji od nekoliko cjelina (vidi sliku 2.2.) [14, 2]:

- *Vid-Norin* bruto površine oko 1970 ha, s mogućnošću privođenja poljoprivrednoj proizvodnji 1300 ha. Prema važećim dokumentima prostornog uređenja melioracija nije predviđena.

- *Koševo-Vrbovci* sa dijelom gradskih i prigradskih površina Metkovića jedan je od prvih izgrađenih sustava melioracije. Ukupna površina iznosi oko 1290 ha. Izgrađen je sustav obrane od poplava i odvodnje za površinu 616 ha bruto, odnosno 405 ha neto. Ostale površine indirektno su u sustavu odvodnje.
- *Kuti* bruto površine oko 2600 ha od kojih se u društvenom posjedu planiralo meliorirati oko 1800 ha, čime bi se dobilo oko 1250 ha neto površine. Predviđena je značajna površina za ptičji i riblji rezervat. Radovi na objektima obrane od poplava gotovi su oko 80% (od 13 km lateralnog kanala i nasipa potpuno je gotovo 10 km, a pripremni radovi izvršeni su na preostalom dijelu). Završena je i prva etapa izgradnje glavnih kanala za odvodnju.
- *Luke* bruto površine oko 300 ha, od čega je u državnom vlasništvu je 270 ha. U sustavu obrane od poplava i odvodnje je 210 ha neto. Nalazi se u dosta zapuštenom stanju.
- *Opuzen-Ušće* sa svojih bruto oko 3100 ha, od čega u državnom vlasništvu oko 2100 ha, sa neto 1720 ha, izgrađen je tijekom šezdesetih i sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Kompleksno je područje s više vodnih režima, načina odvodnje i navodnjavanja.
- *Vidrice* bruto površine oko 500 ha, od čega 384 ha u državnom vlasništvu privedeno je kulturi krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća.
- *Parila, Rogotin i Desne* površine 1700 ha, područje istočno od luke Ploče za koje još nije određena namjena prostora te je još u mnogim dijelovima netaknuta priroda.

Kako je već ranije naglašeno, ovaj rad će se baviti isključivo gornjima područjima: Opuzen-ušće i Vidrice.

### 3. DOSTUPNI PODACI I IZVRŠENA MJERENJA

Tijekom posljednjih šezdesetak godina (od 1960. godine pa do danas), na području doline su izvršena razna mjerenja koja su pokušala definirati karakteristike sustava kao i procese u njemu. Osim tih istraživanja, u novije vrijeme, u razdoblju od 1996. – 2004. godine, su vršena mjerenja zaslanjenosti vode i tla s ciljem kako bi se "pohvatili" procesi koji se u sustavu događaju, odnosno kako bi se odredio način na koji se događa prodor mora u područje. Također, od 2009. godine uspostavljen je monitoring (svojevrsan nastavak istraživanja iz 2004. godine) na području Donje Neretve, čime se došlo do dodatnih podataka iz mjerenja vrijednih za ovaj rad.

Godine 2012. za potrebe izrade elaborata za izradu glavnog projekta sustava za novodnjavanje-podsustav Opuzen (faza A i J) za dio građevine: B. Mobilna pregrada na rijeci Neretvi izvršeni su geotehnički istražni radovi od strane IGH d.d.<sup>3</sup> pri čemu su izbušene dvije bušotine (CSO-B-1 i CSO-B-2) dubine 15 i 5 m na mjestu buduće CS Opuzen te četiri bušotine (POP-B-1, POP-B-2, POP-B-3 i POP-B-4), dubine 40, 30, 25 i 25 m redoslijedom, na mjestu buduće pregrade (vidi prilog 1), a koje će biti posebno analizirane u točki 3.1..

Naime, 2008. godine za potrebe idejnog projekta izbušena je jedna istražna bušotina (S-062-08-03) dubine 9 m na mjestu buduće CS Opuzen te dvije bušotine (S-062-08-01 i S-062-08-02) dubine 30 m na mjestu buduće pregrade na Neretvi, ali se one neće detaljnije opisivati zbog njihove neraspoloživosti za ovaj rad.

#### 3.1. Podaci o području obuhvata i izvršenim istražnim radovima

Iz istražnih radova koji su rađeni 60-ih godina prošlog stoljeća, za područje od Opuzena do ušća, gledajući od površine prema dubini, određen je ovakav slijed, sastav i hidrološke značajke kvartarnih naslaga [7]:

Na dubini do tri metra registrirane su prašinate i organske gline (treset) te ilovača. Koeficijent propusnosti za ovaj sloj je prilično zanemariv i iznosi:  $K = 2,62 \cdot 10^{-8} - 2,14 \cdot 10^{-10}$  m/s.

---

<sup>3</sup> IGH.d.d.- Institut građevinarstva Hrvatske.

Ispod prvog sloja, nalazi se sloj pjeskovitog materijala. Sastav mu varira od srednjeznastog i krupnoznastog do zaglinjenog i prašinastog. Na većem dijelu debljina tog sloja iznosi 5-10 m, osim u uskom pojasu oko Male Neretve, gdje je registrirana u maksimalnoj debljini od 20 m. Podzemne vode su registrirane na dubinama između 0,5 m i 5 m, što ovisi o debljini gornjeg sloja na pripadnoj lokaciji.

Analiziranjem koeficijenta propusnosti predložene su srednje vrijednosti za promatrano područje i one iznose [7]:

- istočni i sjeverni dio:  $K=2$  m/dan
- južni dio:  $K=4,5$  m/dan
- zapadni dio:  $K=3$  m/dan
- područje blizu Opuzena:  $K=25$  m/dan
- područje ušća:  $K=20$  m/dan

Iz pokusnog crpljenja koje je provedeno 1962. godine, za područje Opuzen-Modrič, dobiven je prosječni koeficijent propusnosti  $K=2.34 \cdot 10^{-4}$  m/s [17], a za područje Vidrica  $K=1.84 \cdot 10^{-4}$  m/s [5, 6].

Ovaj sloj će se u narednom dijelu ovog rada zvati plitki vodonosni sloj. Plitki vodonosni sloj ima najveće značenje u melioracijskom smislu.

Ispod pjeskovitog plitkog vodonosnika nalazi se, na dubini između 8 i 10 m, sloj muljevite gline (ilovače). Unutar ovog sloja mogu se pronaći proslojci prašinastog pijeska i pješćanih leća. Ovaj sloj je zasićen vodom, a debljina mu se povećava u smjeru mora, tako da kod ušća postiže debljinu od približno 40 m [7].

Koeficijent propusnosti za pojedine materijale u ovom sloju iznosi:

- za pjeskovite gline:  $K=0.0004$  m/dan
- prašinaste gline:  $K=0.01 - 0.006$  m/dan

Ispod sloja gline, slijedi sloj šljunka s različitim udjelom pijeska i na nekim mjestima gline (drugi vodonosni sloj). Procjenjuje se da je debljina ovog sloja kod Opuzena između 24 i 26 m, u srednjem toku Crepine 16-17 m, a u sjevernom i južnom dijelu doline 12-14 m. Sloj u potpunosti isklinjava kod ušća Neretve. Donja granica ovog sloja nalazi se na dubini između 40 i 50 m. Ovaj sloj je zasićen vodom koja se nalazi pod tlakom u arteškom stanju.

Procijenjeni koeficijent propusnosti za ovaj sloj, šljunak sa pijeskom, iznosi:  $K=30$  m/dan.

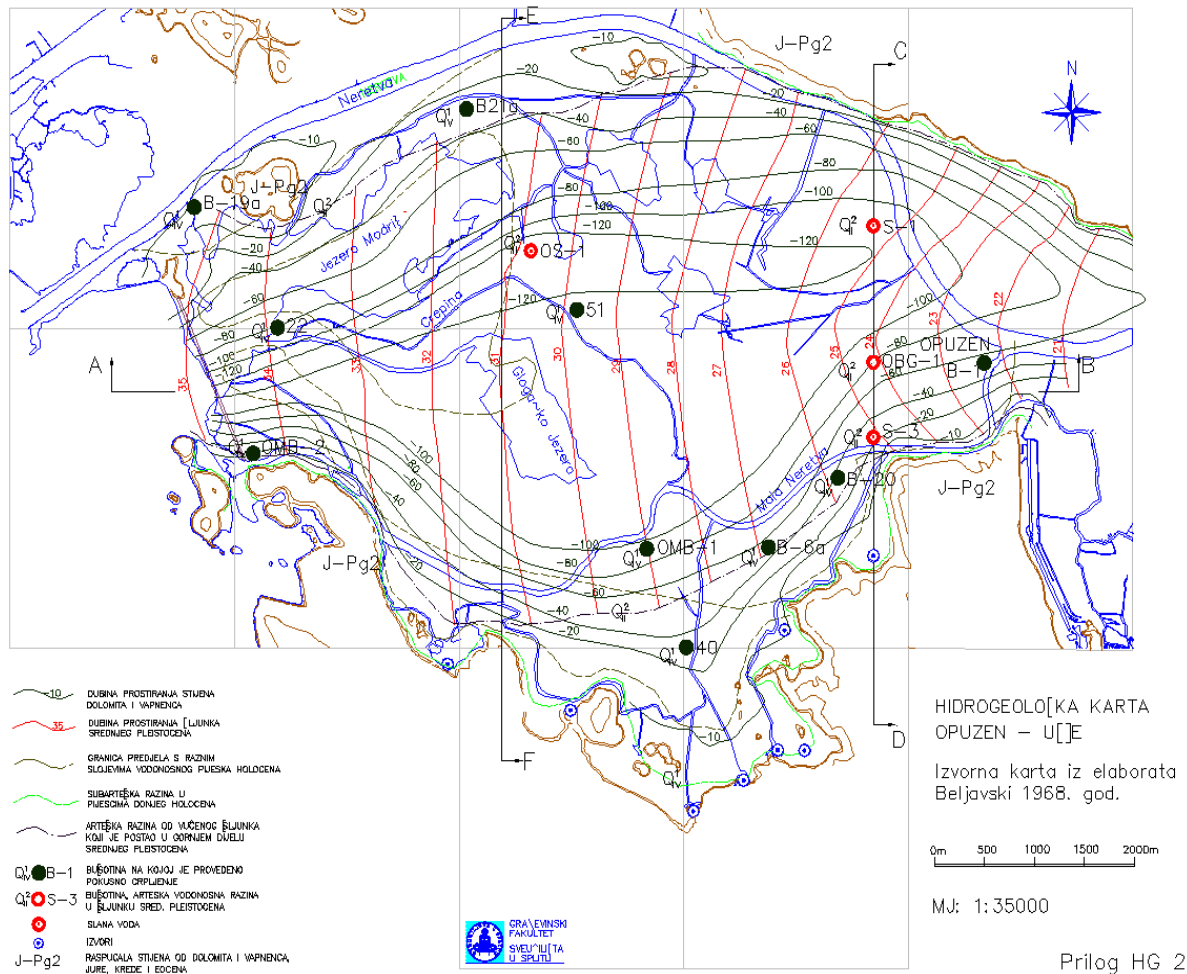
Slijedi sloj gline, debljine 3-4 m.

Ispod gline je određen sloj nakupine vapnenačkog materijala debljine 3-6 m. Ovaj sloj se pruža iz smjera Opuzena prema moru, ali ne ide do mora, već se gubi kod nekadašnjeg jezera Modrič.

Posljednji sloj (treći vodonosni sloj) prije zasićenog okršenog sloja dolomita i vapnenaca je sloj šljunka, čija je debljina 15-60 m i koja se povećava u smjeru ušća. Ovaj sloj se, kao i drugi vodonosni sloj, nalazi pod tlakom u arteškom stanju.

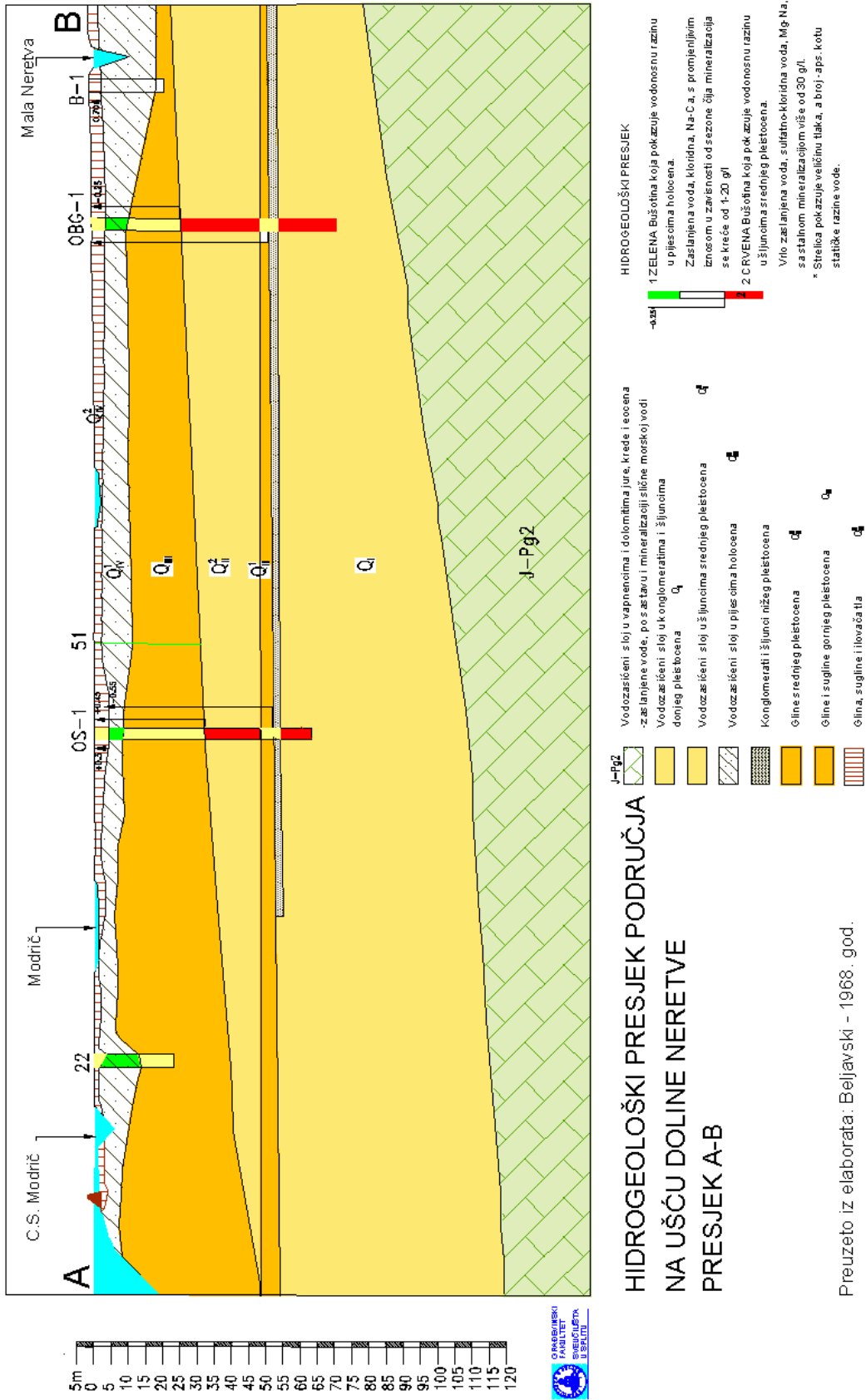
Radi jednostavnosti opisa te definiranja veza i parametara, drugi i treći vodonosni sloj iz gornjeg opisa će se promatrati kao jedan i u daljnjem tekstu će se zvati vodonosnik pod tlakom, odnosno tanki slojevi gline i nakupina vapnenca će se zanemariti (vidi sliku 3.5). Treba napomenuti da su donji slojevi područja (vodonosnik pod tlakom), odnosno njihov sastav i debljina, interpretirani iz malog broja bušotina i da se ti rezultati moraju uzeti s izvjesnom rezervom.

Detaljni prikaz područja sa svim relevantnim slojevima koji su prethodno opisani, dan je na slikama 3.1 – 3.5.



Prilog HG 2











Slika 3.1. Hidrogeološka karta područja obuhvata

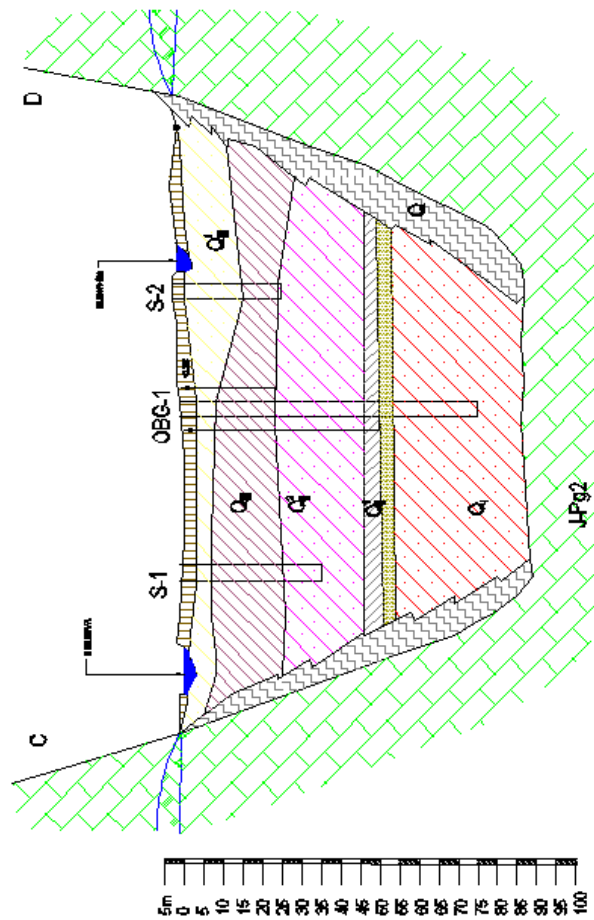


Slika 3.2. Hidrogeološki presjek područja, presjek A-B

### HIDROGEOLOŠKI PRESJEK PODRUČJA NA UŠĆU DOLINE NERETVE NA POTEZU C-D

Preuzeto iz elaborata: Beljajvski - 1988. god.

- JPg2  Vodozasitni sloj u vapnencima i dolomitima jure, krede i eocena -zaslaniene vode, po sastavu i mineralizaciji slične morskoj vodi
-  Vodozasitni sloj u konglomeratima i sjuncima donjeg pleistocena Q<sub>1</sub>
-  Vodozasitni sloj u sjuncima srednjeg pleistocena Q<sub>2</sub>
-  Vodozasitni sloj u pljescima holocena Q<sub>3</sub>
-  Konglomerati i sjunci nizeg pleistocena
-  Gline srednjeg pleistocena Q<sub>2</sub>
-  Gline i sugline gornjeg pleistocena Q<sub>1</sub>
-  Gline, sugline i ilovaca tla
-  kvartarna nerastvorene naslage-samci kamena, tucanik, gline Q
-  Vodozasitni sloj u vapnencima i dolomitima jure, krede i eocena -priješne vode sa mineralizacijom do 1g/l



#### HIDROGEOLOŠKI PRESJEK

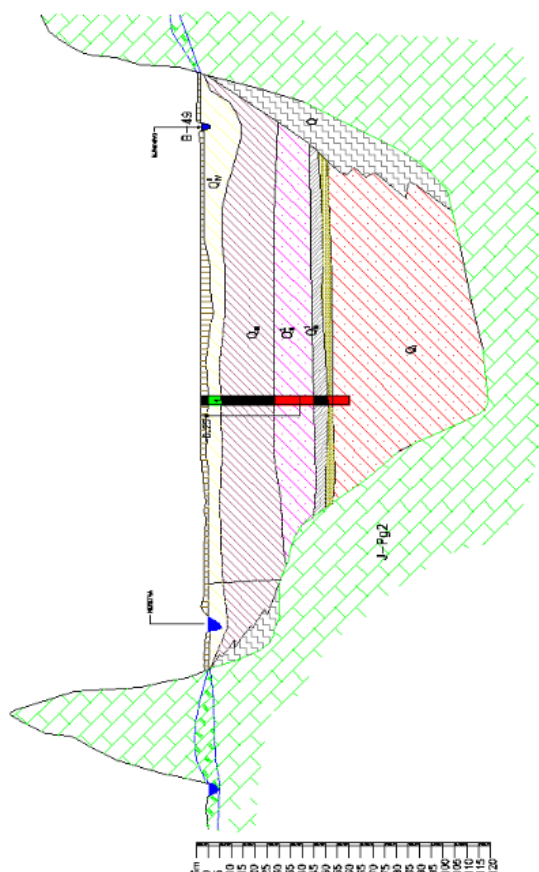
- 1 ZELENA Buncina koja pokazuje vodonosnu razinu u pijescima glocena.
- Zaslanijena voda, kloridna, Na-Ca, s promjenjivim iznosom u zavisnosti od sezone čija mineralizacija se kreće od 1-20 g/l
- 2 CRVENA Buncina koja pokazuje vodonosnu razinu u sjuncima srednjeg pleistocena.

Vrlo zaslanijena voda, sulfatno-kloridna voda, Mg-Na, sa stalnom mineralizacijom više od 30 g/l.  
\* Stijelica pokazuje veličinu pritiska, a broj -aps. kotu statičkog nivoa vode.

Slika 3.3. Hidrogeološki presjek područja, presjek C-D



**HIDROGEOLOŠKI PRESJEK PODRUČJA  
NA UŠĆU DOLINE NERETVE NA POTEZU E-F**  
Preuzeto iz elaborata: Beļjovski – 1968. god.



**HIDROGEOLOŠKI PRESJEK**

1 **ZELENA** Buzofina koja pokazuje vodonosnu razinu u pljescima holocena.

Zasićena voda, kloridna, Na-Ca, s promjenjivim iznosom u zavisnosti od sezone čija mineralizacija se kreće od 1–20 g/l

2 **CRVENA** Buzofina koja pokazuje vodonosnu razinu u slijuncima srednjeg pleistocena.

Vrlo zasićena voda, sulfatno-kloridna voda, Mg-Na, sa stalnom mineralizacijom vis od 30 g/l.  
\* Sijajica pokazuje veličinu pritiska, a broj -opa, kotu statičkog nivoa vode.

Vodozasićeni sloj u vapnencima i dolomitima jure, krede i eocena –zasićene vode, po sastavu i mineralizaciji slične morskoj vodi

Vodozasićeni sloj u konglomeratima i slijuncima

Vodozasićeni sloj u slijuncima

Vodozasićeni sloj u pljescima holocena

Konglomerati i slijunci nizeg pleistocena

Gline srednjeg pleistocena

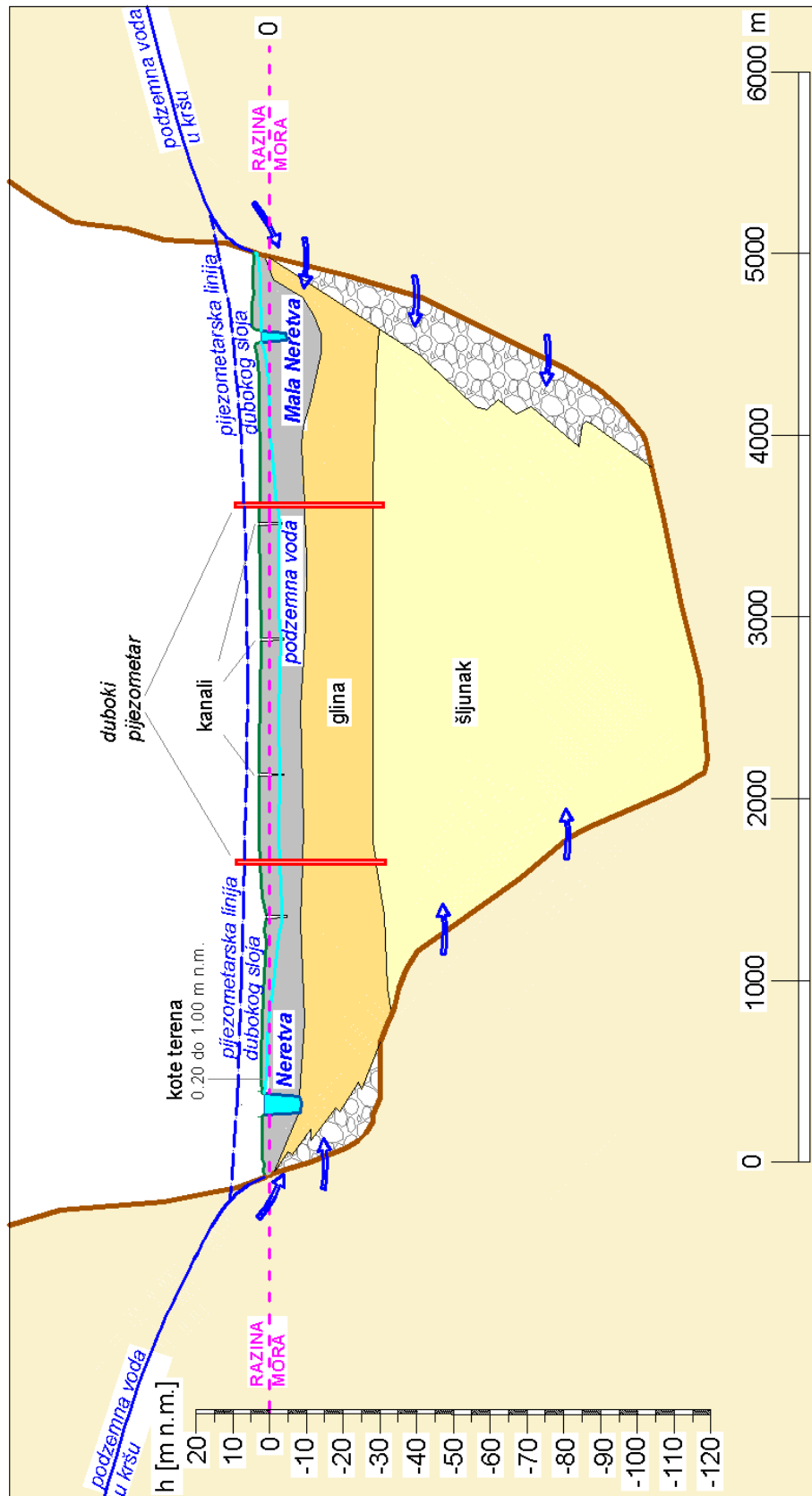
Gline i sugline gornjeg pleistocena

Glina, sugline i ilovaca tla

kvartarne nerastvorene naslage –sami kamena, tučanic, glina

Vodozasićeni sloj u vapnencima i dolomitima jure, krede i eocena –priješne vode sa mineralizacijom do 1g/l

**Slika 3.4.** Hidrogeološki presjek područja, presjek E-F



Slika 3.5. Idealizirano stanje vodonosnih slojeva

Iz istraţnih bušotina koje su rađene 2012. godine (vidi točku 3.) [15], određen je litološki sastav tla te su procijenjeni razni parametri svakog sloja, od kojih je za ovaj rad posebno vaţan koeficijent propusnosti. Zbog preglednosti, sastav tla je podijeljen na 3 mikrolokacije:

- istraţne radove provedene na lijevoj obali Neretve
- istraţne radove provedene u Neretvi i
- istraţne radove provedene na desnoj obali Neretve

Na temelju pojedinih istraţnih bušotina te ostalih ispitivanja utvrđen je slijedeći sastav tla te pripadni parametri [15]:

## LIJEVA OBALA

Sastav tla te njegove karakteristike su određene na temelju istraţne bušotine POP-B-1 i CPTU<sup>4</sup> ispitivanja:

- Površinski, gornji sloj (humus) - do maksimalne dubine od 0,40 m.
- [1] Pijesak, prašinast i zaglinjen, SM, sivo smeđe boje, slabe konzistencije, jednoličan. Debljina ovog sloja je 4.15 m a dubina do 5.70 m, presiječen sa slojem [2].
- [2] Prah, zaglinjen, ML, niske plastičnosti, sivo žute boje, ţitke konzistencije. Debljina ovog sloja je 1.15 m, a dubina do 4.15 m.
- [3] Prah, zaglinjen, niske plastičnosti, mjestimice s udjelom pijeska, ML/SM, sive boje, srednje gnječivog konzistentnog stanja. Debljina sloja je 6 m, a dubina do 11.70 m.
- [4] Glina prašinasta do glinoviti prah, niske plastičnosti, CL/ML, sive boje. Debljina ovog sloja je 17 m, a dubina do 27.70 m.
- [5] Šljunak, mjestimično s primjesama glinovite komponente, jako zbijen i dobro graduiran. Maksimalna veličina zrna do 6 cm. Dubine do dna istraţne bušotine od 40.00 m.

## DESNA STRANA

---

<sup>4</sup> CPTU- Statički penetracijski pokus s mjerenjem pornog tlaka.

Sastav tla te njegove karakteristike određene su na temelju istražne bušotine POP-B-2 te CPTU ispitivanja:

- Površinski, gornji sloj (humus) - do maksimalne dubine 0,20 m.
- [1]' Prah, pjeskovit, ML, mjestimično zaglinjen, niske plasičnosti, sivosmeđe boje te žitke konzistencije, dubine do 5.00 m.
- [2]' Prah, pjeskovit, mjestimično zaglinjeno, SM/MH, sive boje te žitke konzistencije. Debljina ovog sloja je 5.00 m, a dubina do 11.00 m.
- [3]' Prah, pjeskovit, ML, niske plasičnosti s učešćem gline, žitkog konzistentnog stanja. Debljina ovog sloja je 7.70 m, a dubine do 18.70 m.
- [4]' Glina prahovita do prah glinovit, CL/ML, sive boje, niske plastičnosti. Na dubinama od 23.00-25.00 m i 25.80-26.80 m pojavljuju se pjeskoviti slojevi, SM/SC. Debljine 8.10 m, a dubine do 26.80 m.
- [5]' Šljunak, s učešćem pijeska, jako zbijen i dobro graduiran, dubine do dna istražne bušotine od 30 m.

#### NERETVA

Sastav tla te njegove karakteristike određene su na temelju istražnih bušotina POP-B-3 i POP-B-4:

- [1]" Glina prašinasta do prah glinoviti, CL/ML, niske plastičnosti, sive boje, žitke konzistencije, s primjesama pijeska osobito na dnu intervala. Dubina ovog sloja je do 14.00 m.
- [2]" Prah, pjeskovit, zaglinjen, SM. Debljina ovog sloja je do 2.40 m, a dubina do 16.20 m.
- [3]" Šljunak, s učešćem pijeska, jako zbijen i dobro graduiran. Veličina zrna je do 2 cm, a s povećanjem dubine mjestimično i do 5 cm, dubine do dna istražne bušotine od 25.00 m.

Iz gornjeg sastava tla (iz istražnih bušotina 2012. godine), istražnih bušotina iz 2008. godine te ostalih geotehničkih istražnih radova, stručne literature te iskustvene procjene stručnjaka iz IGH, dati su preporučeni parametri tla za pojedine slojeve [15]. Vidi tablice 3.1., 3.2. i 3.3. .

Za ovaj rad bitan parametar je koeficijent propusnosti, čija nepouzdanost i varijabilnost i je jednim dijelom tema ovog rada.

Sloj	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\varphi$ (°)	Ms (Mpa)	K (m/s)
[1]	18	5-12	20-25	1-3	$10^{-6}$ - $10^{-7}$
[2]	18	2-10	19-25	1-2	$10^{-7}$
[3]	18	2-10	20-25	1,5-5	$10^{-7}$
[4]	18	4-20	15-30	2-15	$10^{-7}$ - $10^{-8}$
[5]	20-21	0-1	30-37	20-50	$10^{-2}$ - $10^{-3}$

Tablica 3.1. Odabrani parametri slojeva tla – LIJEVA STRANA

Sloj	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\varphi$ (°)	Ms (Mpa)	K (m/s)
[1]'	18	5-17	20-30	0,5-2	$10^{-8}$
[2]'	18	2-10	25-35	1-5	$10^{-7}$ - $10^{-8}$
[3]'=[3]	18	2-10	20-25	1,5-5	$10^{-7}$
[4]'=[4]	18	4-20	15-30	2-15	$10^{-7}$ - $10^{-8}$
[5]'=[5]	20-21	0-1	30-37	20-50	$10^{-2}$ - $10^{-3}$

Tablica 3.2. Odabrani parametri slojeva tla – DESNA STRANA

Sloj	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\varphi$ (°)	Ms (Mpa)	K (m/s)
[1]''=[4]''=[4]	18	4-20	15-30	2-15	$10^{-7}$ - $10^{-8}$
[2]''	18	2-10	20-35	2-10	$10^{-7}$
[3]''=[5]''=[5]	20-21	0-1	30-37	20-50	$10^{-2}$ - $10^{-3}$

Tablica 3.3. Odabrani parametri slojeva tla – NERETVA

Pri čemu su:

$\gamma$  – jedinična težina tla [kN/m<sup>3</sup>]

c – kohezija [kPa]

$\varphi$  – kut unutrašnjeg trenja [°]

Ms – modul stišljivosti [MPa]

k – hidraulička propusnost [m/s]

U prilogu 1, prikazani su sondažni profili za sve četiri bušotine, izvedene 2012. godine na mjestu buduće pregrade, iz kojih se došlo do gore opisanih slojeva tla te njihovih okvirnih parametara. Također, prikazani su i sondažni profili bušotina na mjestu buduće CS Opuzen, a iz kojih se može vidjeti da se sloj gline registrira na svega 1 m, dok se vodonosnik pod tlakom uopće ne registrira.

### **3.2. Podaci o pijezometrima**

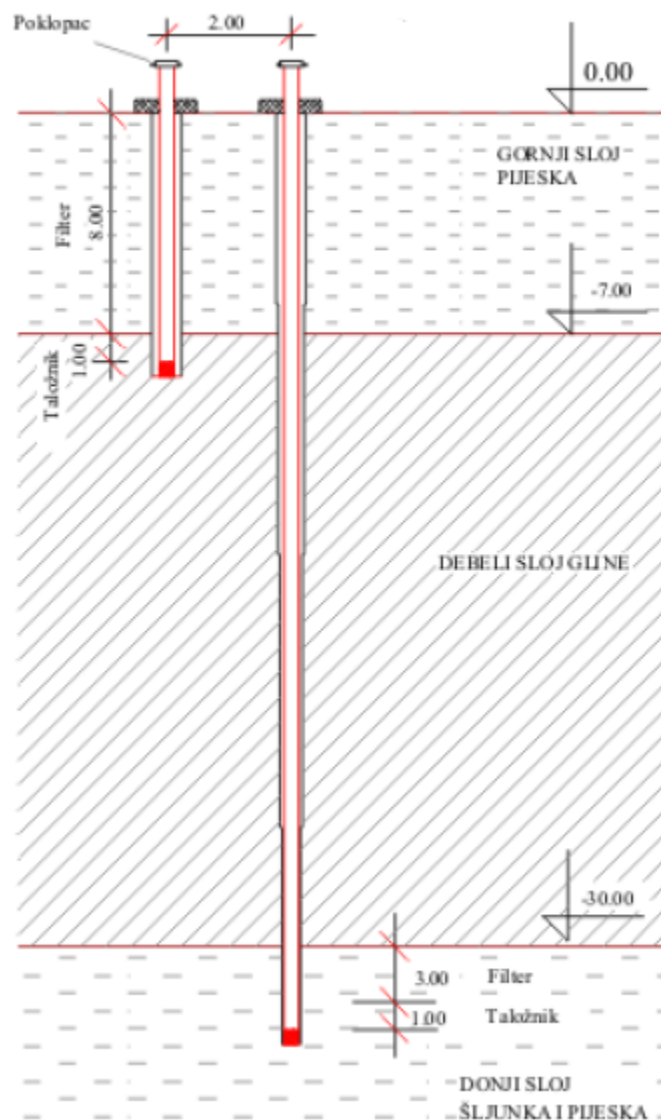
Tokom istraživanja koja se odvijaju od 1995. godine, na četiri lokacije unutar područja obuhvata instalirani su pijezometri P1-P4 (vidi sliku 1.1.). Na svakoj od pojedinih lokacija ugrađena su po dva pijezometra, plitki i duboki. Oznaka P1 označava pijezometre na stanici Ušće, P2 na stanici Meteorološka, P3 na stanici Dvorište, a P4 na stanici Vidrice.

U daljnjem tekstu plitki pijezometri će se obilježavati s velikim slovom P (P1-P4), a duboki s velikim slovom D (D1-D4).

Plitki pijezometri su izbušeni kroz plitki vodonosni sloj do sloja gline i preko njih se prati pijezometarsko stanje u plitkom (pješčanom) vodonosnom sloju.

Duboki pijezometri su izbušeni do vodonosnog sloja pod tlakom. Cijev prolazi kroz debeli sloj gline i ulazi približno 2 m u vodonosnik pod tlakom. Ovim pijezometrima prati se pijezometarsko stanje u vodonosnom sloju pod tlakom (šljunčanom).

Sve cijevi dubokih pijezometara su na dijelu ispod gline perforirane da bi se dobilo stanje vode u vodonosniku pod tlakom. Perforacija cijevi plitkih pijezometara prisutna je kroz cijeli plitki vodonosni sloj. Sve cijevi su na mjestima perforacije zaštićene od eventualnih nečistoća.

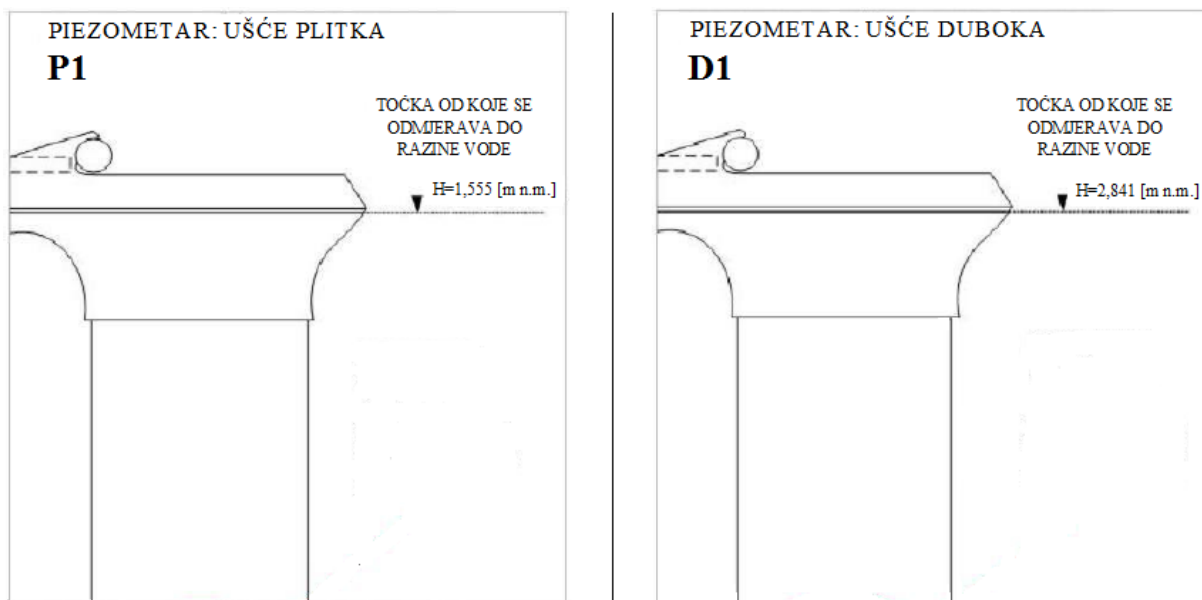


**Slika 3.6.** Prikaz plitkog i dubokog pijeziometra [14]

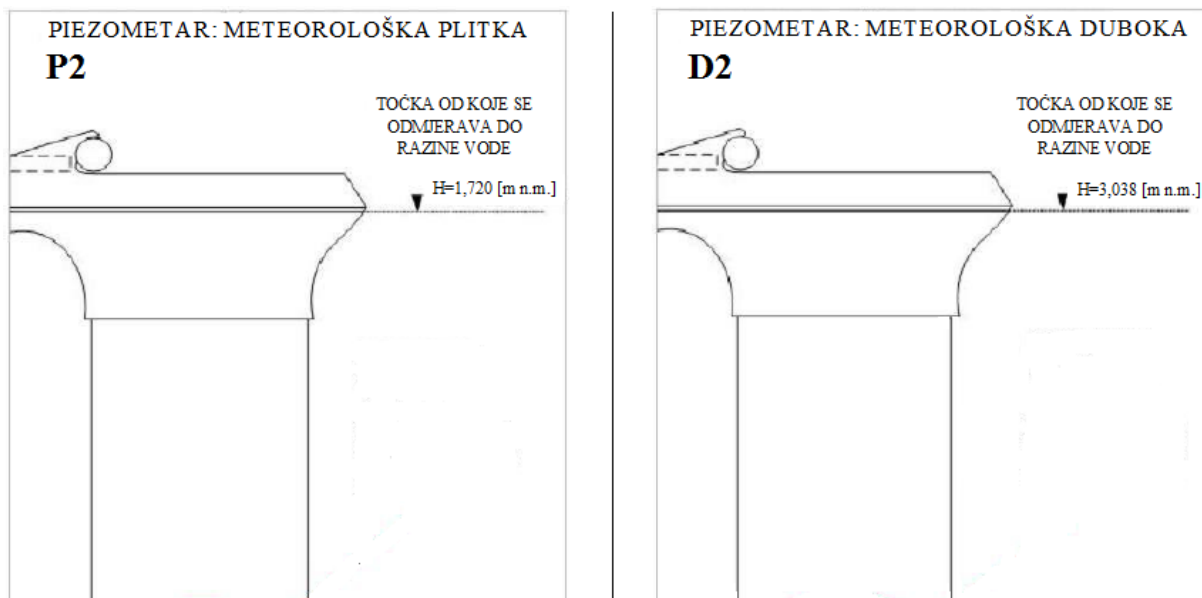
Za izradu ovog rada poznati su podaci pijeziometarskog stanja u svim plitkim i dubokim pijeziometrima za period 2009. - 2014. godine. Mjerenja za sve (duboke i plitke) pijeziometre su izvedena na satnoj skali. Treba napomenuti da se od kraja 2014. godine podaci s pijeziometra P2 više ne uzimaju zbog tehničkih poteškoća.

Osim podataka na satnoj, od 18.09. do 21.09.2009. godine izvedena su i mjerenja s inkrementom od pet minuta, a koja će posebno doći do izražaja kroz poglavlje 5. ovog rada. Nažalost ova mjerenja nisu obuhvatila pijeziometre P3 i D3.

Sva mjerenja u pijezometrima izvode se odmjera vanjem od kape pijezometra. Treba napomenuti da se 2011. godine izvršilo nadvišenje dubokih pijezometara zbog njihova izlivanja te da od 1.09.2011. godine vrijede nove kote kapa za te pijezometre (vidi slike 3.7.-3.10.).

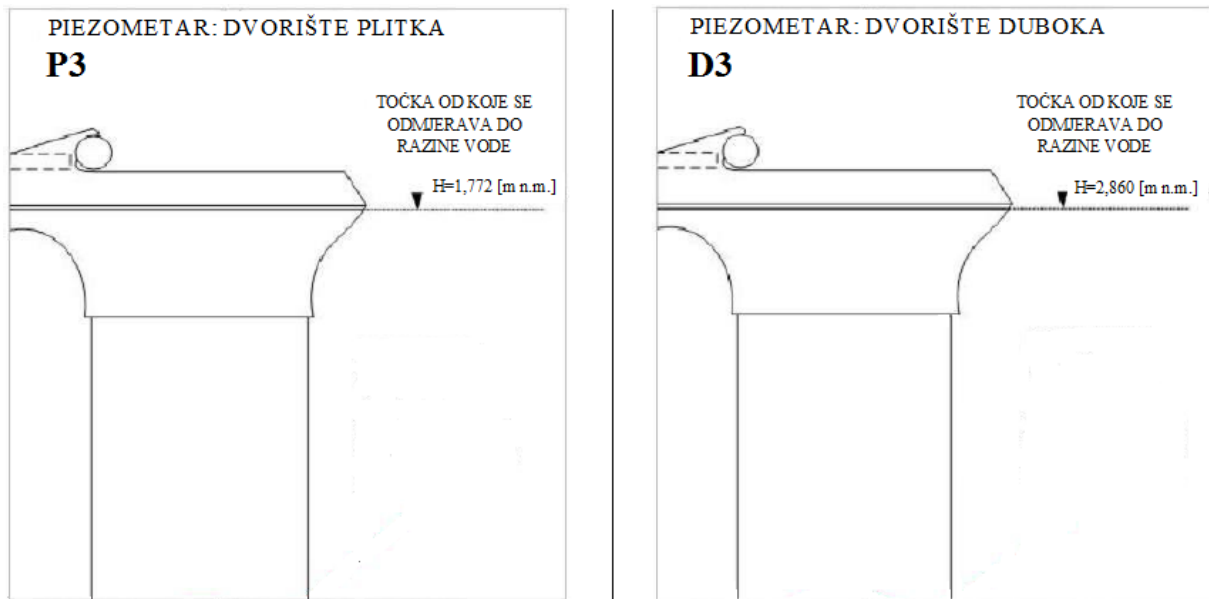


Slika 3.7. Kote kapa pijezometara na stanici Ušće

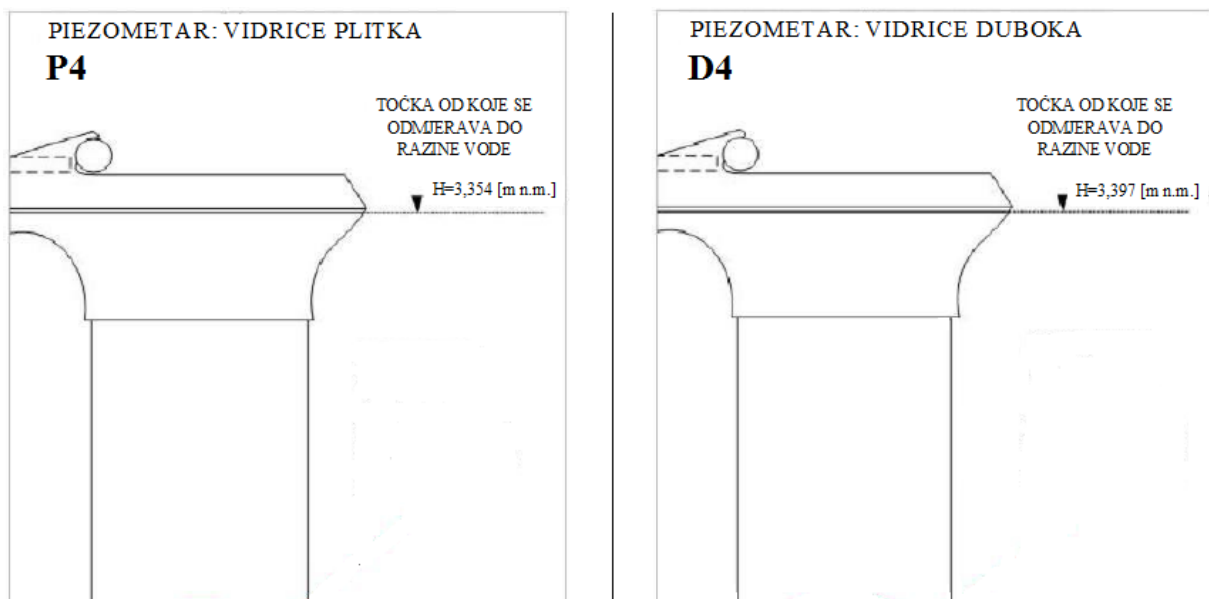


Slika 3.8. Kote kapa pijezometara na stanici Meteorološka





Slika 3.9. Kote kapa pijeometara na stanici Dvorište



Slika 3.10. Kote kapa pijeometara na stanici Vidrice

Stare kote kapa preko kojih su se vršila mjerenja do 1.09.2011. godine su: 1.871 [m n.m.] za D1, 1.828 [m n.m.] za D2, 1.893 [m n.m.] za D3 i 3.405 [m n.m.] za D4.

Iz slike 3.5 može se jasno vidjeti da je stanje u dubokim pijezometrima uvijek više od stanja u plitkim pijezometrima, čime se uspostavlja gradijent toka iz vodonosnika pod tlakom u plitki vodonosnik što dovodi do kontinuiranog toka vode iz vodonosnika pod tlakom u plitki vodonosnik te u konačnici i njegovog zaslanjivanja. Također može se primijetiti da je horizontalni gradijent u vodonosniku pod tlakom u smjeru Opuzen-Ušće, dok je horizontalni gradijent u plitkom vodonosniku puno teže odrediti zbog točkastog kontinuiranog crpljenja vode iz sustava.

### 3.3. Podaci o mareografu i limnigrafu

Da bi se kontinuirano pratilo i analiziralo globalno stanje u sustavu, osim dubokih i plitkih pijezometara u sustav su ugrađeni i uređaji za kontinuirano mjerenje razine mora i vodostaja u Neretvi.

Mareograf<sup>5</sup> je instaliran na ušću Male Neretve (vidi sliku 1.1.) kako bi se analiziralo na koji način more djeluje na sustav (kako na plitki, a kako na vodonosnik pod tlakom).

Limnigraf<sup>6</sup> je instaliran na Neretvi kod Opuzena (vidi sliku 1.1.) kako bi se analiziralo na koji način Neretva djeluje na sustav (prvenstveno na plitki vodonosnik).

Podaci s mareografa i limnigrafa su prikupljeni u periodu 2009. - 2014. godine, a mjerenja su izvršena na satnoj skali. Ovi podaci su tim više važni jer opisuju rubna stanja sustava i govore kako more, odnosno Neretva djeluje na sustav tj. pojedini vodonosnik. Kao i kod pijezometara, ovdje su također izvršena mjerenja s inkrementom od pet minuta u istom vremenskom periodu.

Detaljniji prikaz stanja i pojedinih funkcionalnih veza mareografa i limnigrafa s ostalim važnim čimbenicima u sustavu ili onima koji djeluju na sustav dan je u slijedećem poglavlju.

Treba naglasiti da su visinske kote izmjere, kako na mareografu i limnigrafu, tako i na pijezometrima, dosta upitne. Ovo je veliki nedostatak koji bi se u što kraćem vremenskom periodu trebao otkloniti. Kako je cijela dolina Neretve poprilično horizontalna (mali nagib u smjeru ušća), ovaj problem dolazi do još većeg izražaja. Također, treba naglasiti kako bi za ovaj rad bilo dovoljno odrediti i relativne kote između pijezometara, mora i Neretve čime bi

---

<sup>5</sup> Mareograf- Instrument koji kontinuirano bilježi promjene morskih mijena.

<sup>6</sup> Limnigraf- Instrument koji kontinuirano bilježi promjene vodostaja na rijekama i jezerima.

se sa sigurnošću moglo doći do zaključaka vezanih za međusobne odnose pojedinih parametara u sustavu.

Sve kote u ovom radu su referencirane na staru geodetsku nulu NN Trsta<sup>7</sup> te se sva odmjeravanja vrše od nje.

### **3.4. Podaci o količinama oborina**

Za potrebe ovog rada, od DHMZ-a<sup>8</sup> su prikupljeni podaci o palim oborinama u periodu od 2002. – 2014. godine na tri lokacije u širem području Donje Neretve. Prikupljeni su podaci pale oborine na kišomjernim stanicama u Pločama, Opuzenu i Metkoviću. Analizom pale oborine i stanja u pijezometrima (vidi poglavlje 4.) zaključeno je da najmjerodavniji utjecaj na stanje u području obuhvata ima oborina mjerena na stanici Opuzen tako da će se u daljnjem tekstu pod pojmom pale oborine podrazumijevati oborina s kišomjerne stanice u Opuzenu.

Vrijednosti pale oborine iskazane su u danima, a mjerene su na način da se svaki dan u isto vrijeme mjeri oborina koja je pala za prethodni dan (24 sata).

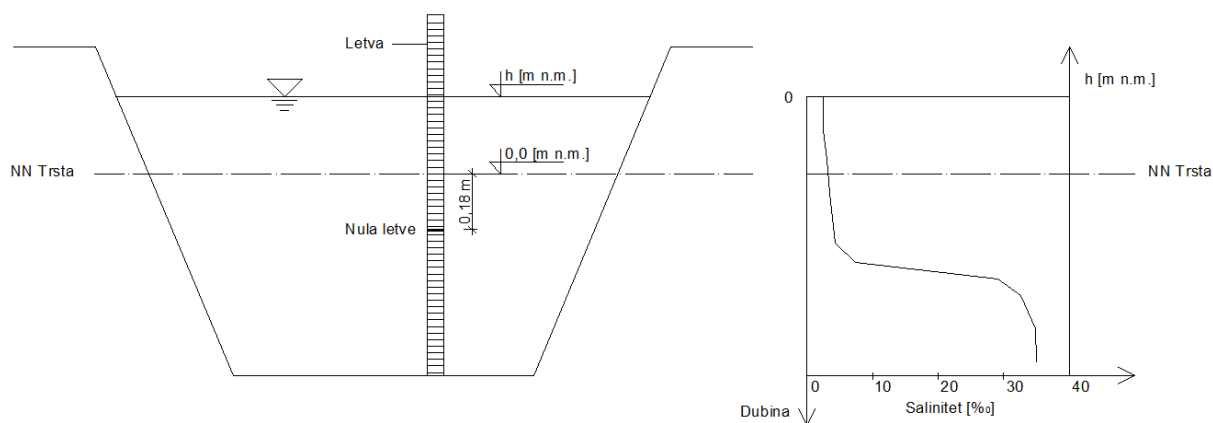
### **3.5. Podaci o salinitetu u pijezometrima, Neretvi i Maloj Neretvi**

Ovi podaci su kao i podaci o pijezometrima (pijezometarska stanja) te mareografu i limnigrafu prikupljeni u periodu od 2009. - 2014. godine. Za razliku od njih salinitet nije mjereno kontinuirano, već je u pravilu mjereno 5-6 puta u drugom dijelu godine (svibanj-studen) [18, 19, 20, 21, 22]. Razlika u mjerenjima je i ta što se podaci o salinitetu u pijezometrima, Neretvi i Maloj Neretvi nisu referencirali na NN Trsta, već su mjereni po dubini od vodnog lica u pijezometru, Neretvi ili Maloj Neretvi. Shematski prikaz odnosa dubine u koritu mjerene od vodnog lica Neretve te visinskog datuma NN Trsta prikazan je na slici 3.11.

---

<sup>7</sup> NN Trsta- Nominalna nula Trsta, stara geodetska nula od koje se vršila visinska izmjera.

<sup>8</sup> DHMZ- Državni hidrometeorološki zavod.



**Slika 3.11.** Skica visinskog odnosa dubine i NN Trsta

Uzorkovanje vode za određivanje saliniteta u Maloj Neretvi je vršeno s mosta na magistrali, dok je uzorkovanje vode iz Neretve vršeno u Opuzenu. Mjerenja su vršena sondom (SEBA Hydrometrie KLL-Q-2), dok su pojedini uzorci laboratorijski ispitivani na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a koji se ovdje neće promatrati.

### 3.6. Podaci o režimu rada odvodnje

Kako se cijela Donja Neretva nalazi na jako maloj nadmorskoj visini, a pojedini dijelovi su čak i ispod razine mora (primjerice područje jezera Modrič), zbog velike mogućnosti poplavlivanja i/ili zaslanjivanja tla, a time i uništavanja uroda, dolina se odvodnjava pomoću crpnih postrojenja. Odvodnjava se isključivo plitki vodonosni sloj važan s agronomskog aspekta. Na području obuhvata postoje dvije značajne crpne stanice, CS Modrič, preko koje se odvodnjava cijelo područje Opuzen-ušće, i CS Prag, preko koje se vrši odvodnjavanje vode s područja Vidrica. Prikaz položaja crpnih stanica prikazan je na slici 1.1..

Dostupni su podaci režima rada CS Modrič za 2014. godinu te režim rada CS Prag u periodu od 2009. - 2014. godine. U ovom radu obuhvćena je samo 2014. godina s obzirom da je ona jedina dostupna za obje crpne stanice.

CS Prag sastoji od tri crpke, dok se CS Modrič sastoji od šest crpki od kojih je svaka stvarnog protoka približno  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Režim rada je takav da se nastoji da crpke rade isključivo u noćnom periodu (izuzetak je period velikih oborina kada je potrebno i dnevno crpljenje) u režimu jeftine struje, zbog smanjenja troškova.

Iz knjiga rada CS Modrič i CS Prag izvučen je broj radnih sati crpki po danima te pijezometarsko stanje u kanalu prije i poslije crpljenja. Vrijeme prije crpljenja je generalno uzeto kao 22 h dok je stanje poslije crpljenja uzeto kao 8 h slijedećeg dana [9, 10].

Treba napomenuti kako je CS Modrič poprilično velika te kako imamo jako velike protoke kroz nju. Uzimajući radne sate pojedinih crpki, koji su dani u satima, vrlo je izvjesno da će doći do značajnijih grešaka u količinama. Primjerice, ako je napravljena greška od samo jedne minute na jednoj crpki (npr. crpka je radila 5 h i 59 minuta a napisano je 6 h) doći će do količinske pogreške od  $180 \text{ m}^3$ . Uz to, ovdje nije ukalkulirana ni greška točnog određivanja protoka pri radnoj točki, niti crpljenje pri paljenju, odnosno gašenju crpke. Gore navedeno vrijedi i za CS Prag, ali u nešto manjim količinama.

Također, treba reći da su podaci pijezometarskog stanja u kanalu za CS Modrič dosta manjkavi u drugom dijelu godine te bi ih u bilo kakvim analizama valjalo izbjeći, a što je u ovom radu i napravljeno.

### **3.7. Podaci o protoku kroz Neretvu**

Protok kroz Neretvu se ne mjeri na području RH, već se on mjeri na području susjedne BiH. Mjerna postaja na kojoj se mjeri protok kroz Neretvu se nalazi u Žitomisliću. Ova postaja je dosta duboko u BiH tako da ona ne zahvaća nizvodne pritoke (Bregava, Krupa i Trebižat). Za razliku od Bregave i Krupe za koje nisu poznati podaci o protoku, protok kroz Trebižat je poznat. Mjerna postaja za mjerenje protoku u Trebižatu nalazi se u Humcu.

Kako je u ovom radu bitan protok koji prolazi kroz Metković i niže, protoci kroz Neretvu i Trebižat će se zbrojiti, te će se taj protok gledati kao mjerodavan. Nažalost, protoci Bregave i Krupe su nepoznati te ih se ne može pridodati.

Za ovaj rad poznati su podaci o protocima u periodu od 2009. - 2013. godine, dok su podaci za 2014. godinu nažalost trenutno nedostupni. Mjerenja od 2009. - 2012. godine su dostupna na polusatnoj skali, dok su za 2013. godinu dostupna na satnoj skali.

## 4. IDENTIFIKACIJA PROCESA I USPOSTAVA FUNKCIONALNIH VEZA U SUSTAVU

Da bi se kvalitativno identificirali procesi u sustavu te iz njih izvukli bitni parametri, kako plitkog tako i vodonosnika pod tlakom, bitno je da se svi važni čimbenici koji više ili manje, direktno ili indirektno djeluju na sustav, promatraju zajedno kao neraskidiva cjelina. U ovom poglavlju će se na statističkoj osnovi odrediti funkcionalne veze između pojedinih parametara u sustavu i/ili parametara koji djeluju na sustav te će se na temelju istih pokušati objasniti procesi koji se događaju u sustavu. Prikazana analiza je izvršena za 2014. godinu i u potpunosti koincidira s analizom iz perioda 2009. - 2013. godine, a koja je napravljena u sklopu monitoringa od strane FGAG-a<sup>9</sup>.

### 4.1. Regresijska analiza i pripadna korelacija

Regresija je statistički odnos između pojava, odnosno slučajnih varijabli<sup>10</sup>, a bavi se određivanjem analitičkog izraza povezanosti pojava [3, 11, 12].

Korelacija je međusobna povezanost pojava, odnosno slučajnih varijabli. Bavi se kvantificiranjem povezanosti među pojavama.

Da bi se uspostavile funkcionalne veze između pojedinih parametara sustava, u ovom je radu upotrebljen model jednostavne linearne regresije<sup>11</sup>.

Prvi korak u izradi modela jednostavne linearne regresije je izrada dijagrama raspršenja. Dijagram raspršenja je grafički prikaz točaka, odnosno uređenih parova  $(x_i, y_i)$ , u koordinatnom sustavu, gdje su:

$x_i$ - vrijednosti jedne slučajne varijable (npr. slučajne varijable X),  $i=1,2,\dots,n$ ,

$y_i$ - vrijednosti druge slučajne varijable (npr. slučajne varijable Y),  $i=1,2,\dots,n$ ,

gdje n predstavlja broj mjerenih podataka.

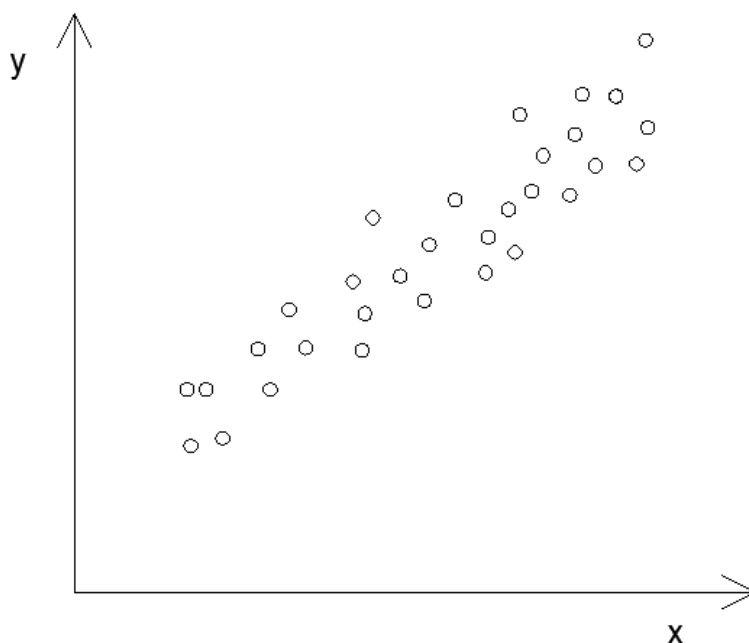
---

<sup>9</sup> FGAG- Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu.

<sup>10</sup> Slučajna varijabla- funkcija koja svakom ishodu pridružuje neki realni broj.

<sup>11</sup> Jednostavna linearna regresija- predstavlja odnos između dvije slučajne varijable, kod kojeg promjeni jedne varijable odgovara približno linearna promjena druge.

Prema obliku dijagrama raspršenja, odnosno poziciji uređenih parova može se zaključiti jesu li varijable korelirane i na koji način. Primjer dijagrama raspršenja s linearnom korelacijom prikazan je na slici 4.1.



**Slika 4.1.** Dijagram raspršenja s linearnom korelacijom

Ovaj model procijenjen je pravcem regresije koji ima slijedeću jednadžbu:

$$y = ax + b, \quad (1)$$

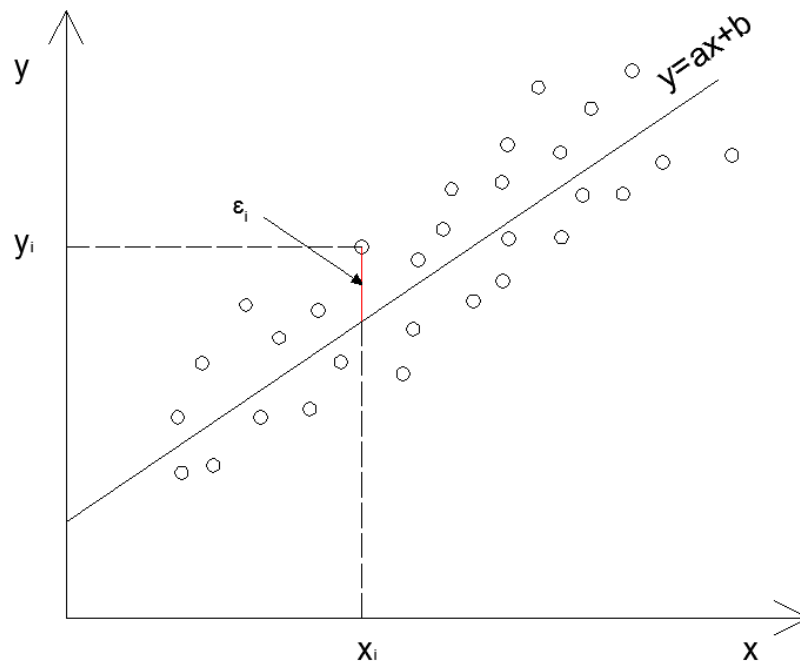
gdje su:

a- nagib regresijskog pravca

b- odsječak na ordinati, odnosno očekivana vrijednost varijable Y kada je vrijednost varijable X=0

Parametri regresijskog pravca a i b, koji će najbolje opisati točke (uređene parove  $(x_i, y_i)$ ) iz dijagrama raspršenja, određuju se metodom najmanjih kvadrata (MNK).

MNK metoda se temelji na određivanju pravca regresije (jednadžba 1) na način da se iz mnoštva pravaca kojima bi mogli opisati međusobnu ovisnost varijabli, odabere onaj kod kojeg je zbroj kvadrata vertikalnih odstupanja točaka u dijagramu raspršenja od tog pravca minimalan.



**Slika 4.2.** Vertikalna odstupanja uređenih parova od pravca regresije

Uvjet minimiziranja pogreške opisan je formulom:

$$\sum_{i=1}^n |\epsilon_i|^2 = \text{Min} \quad (2)$$

Na osnovu uvjeta (2) dobiju se parametri modela a i b:

$$a = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2}, \quad (3)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x}, \quad (4)$$

gdje je:

$$\sigma_{xy} = \sum_{i=1}^n \overline{xy} - \bar{x}^2 \quad (5)$$

kovarianca između varijabli X i Y, a

$$\sigma_x^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2 \quad (6)$$

varijanca varijable X.



Povezanost pojava kvantificirana se koeficijentom linearne korelacije  $r$  (tzv. Personov koeficijent korelacije), koji mjeri jakost i smjer linearne povezanosti:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (7)$$

gdje su  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$  standardne devijacije varijabli X i Y, respektivno.

Koeficijent korelacije  $r$ , kreće se u intervalu od -1 do 1, a okvirni stupanj jakosti korelacije je slijedeći [12]:

$ r =0$	nema korelacije
$ r =0-0.5$	slaba korelacija
$ r =0.5-0.8$	srednje jaka korelacija
$ r =0.8-1$	jaka korelacija
$ r =1$	potpuna korelacija (funkcionalna veza)

Ako je predznak korelacije pozitivan, tada povećanje jedne varijable povlači za sobom povećanje druge varijable (proporcionalna veza), dok je u slučaju negativnog predznaka, ta veza obrnuto proporcionalna.

## 4.2. Regresijska analiza varijabli vodonosnika pod tlakom

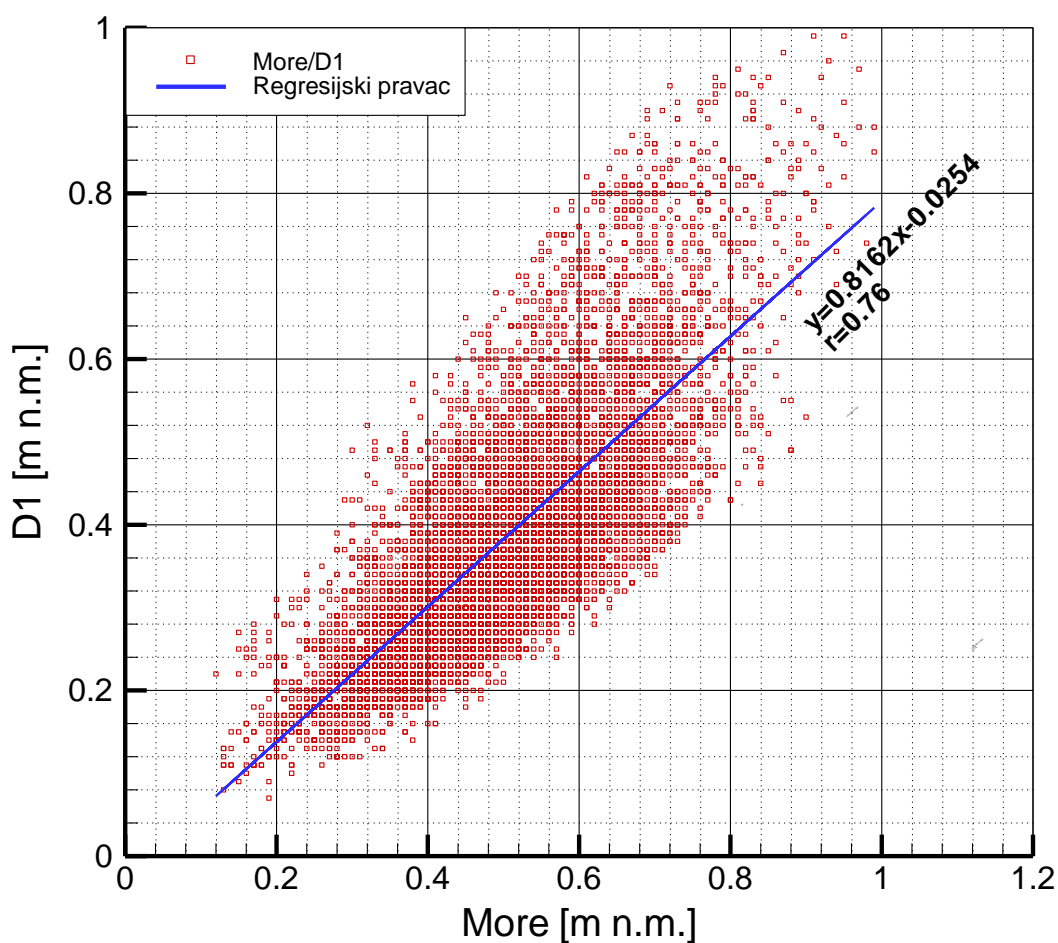
### 4.2.1. Analiza odnosa mora i pijezometara

Regresijskom analizom dobiveno je stanje funkcionalne povezanosti mora i dubokih pijezometara u vidu koeficijenta korelacije. Rezultati analize prikazani su u tablici 4.1..

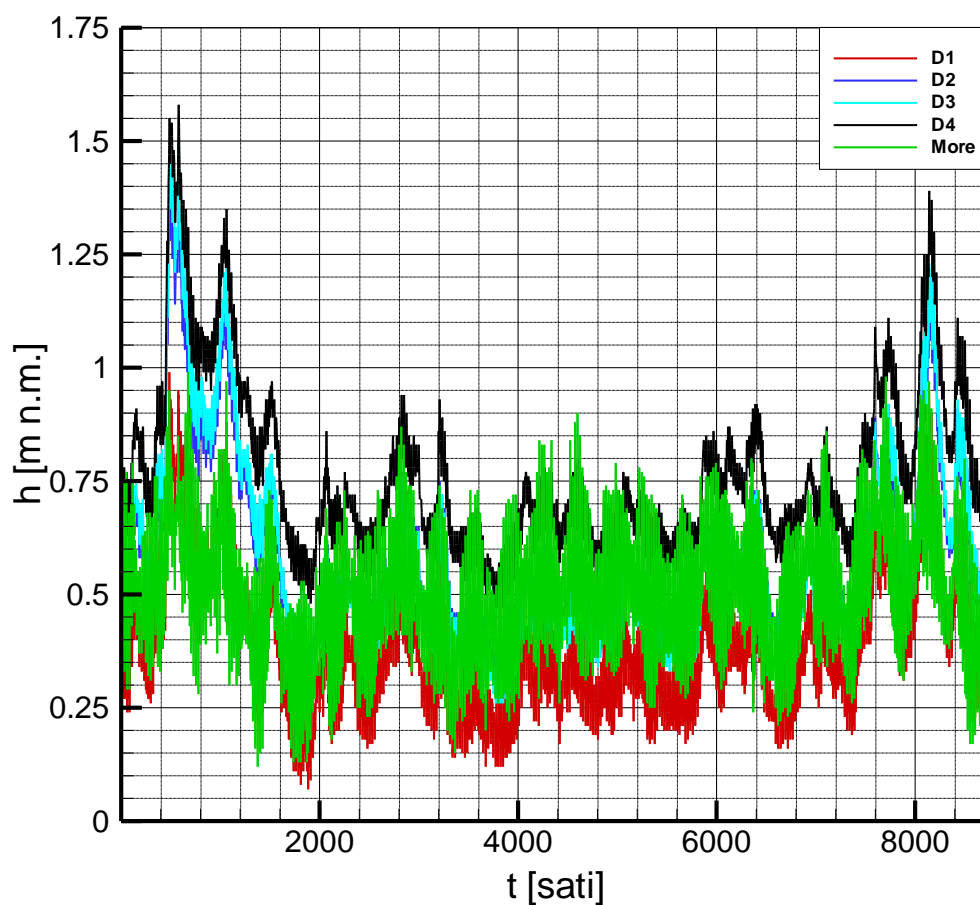
Varijable	Koef. korelacije r
More/D1	$r=0,76$
More/D2	$r=0,51$
More/D3	$r=0,48$
More/D4	$r=0,47$

**Tablica 4.1.** Prikaz koeficijenta korelacije odnosa mora / duboki pijezometri

Iz rezultata je vidljivo kako između piježometarskih stanja u D1 i razine mora postoji značajna korelacija, što je i logično s obzirom da se on nalazi najbliže obalnoj crti (približno 100 m od obale). Iz slike 4.4. je vidljivo da stanja u piježometrima odgovaraju na svaku promjenu mora. Najveća razlika nastaje u vrijeme kišnih razdoblja (početak i završetak godine), kada se razina vode u piježometrima znatno poveća, primarno zbog utjecaja rijeke Neretve, a čime se korelacija ruši.



Slika 4.3. Grafički prikaz povezanosti varijabli more i piježometra D1



**Slika 4.4.** Prikaz pijezometrijskih stanja mora i dubokih pijezometara

Da bi se što više zanemario utjecaj oborine te time dobio realniji korelacijski odnos, napravljena je također i analiza samo za sušno (ljetno) razdoblje (od 1.6.2014.-31.8.2014. godine). Rezultati su prikazani u tablici 4.2., a primjećuje se povećanje koeficijenta korelacije u svim pijezometrima, izuzev pijezometra D4, gdje je blago opao.

Varijable	Koef. korelacije r
More/D1	r=0,87
More/D2	r=0,59
More/D3	r=0,56
More/D4	r=0,43

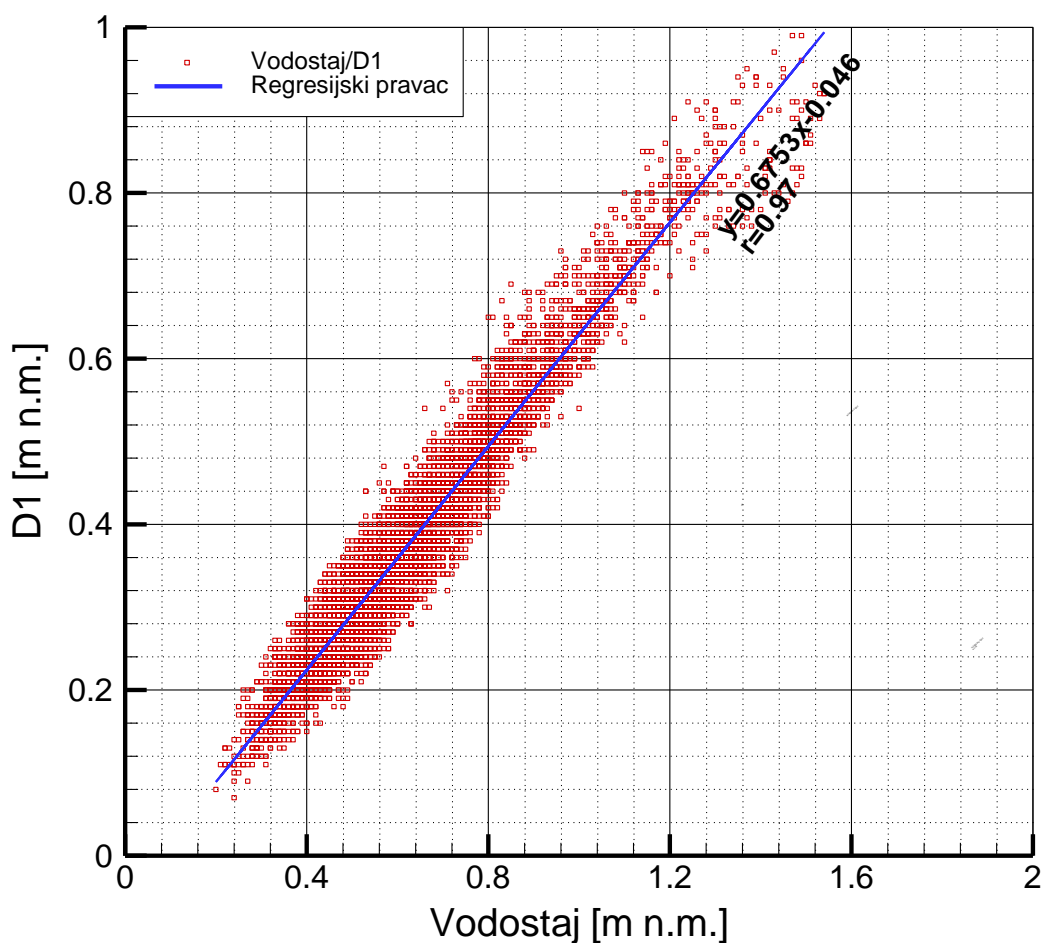
**Tablica 4.2.** Prikaz koeficijenta korelacije odnosa mora/duboki pijezometri u periodu od 1.6.2014.-31.8.2014. godine

#### 4.2.2. Analiza odnosa vodostaja i pijezometara

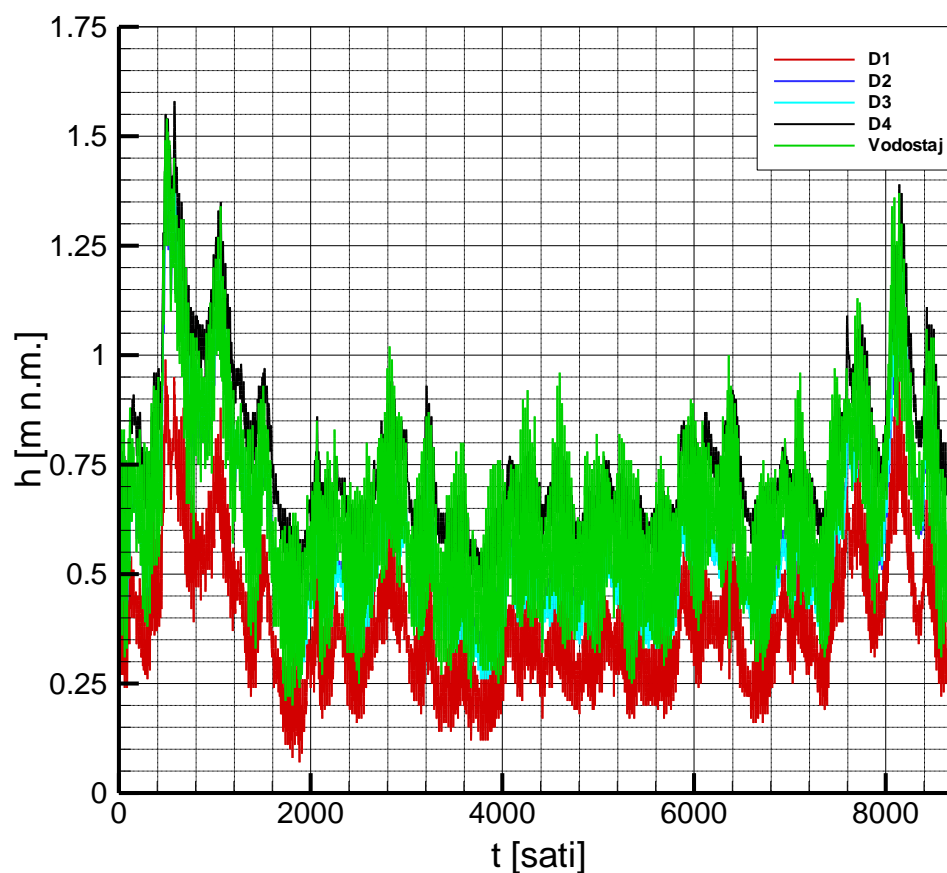
Za razliku od analize more/pijezometri, kod analize vodostaj/pijezometri, na korelacijski koeficijent oborina nema značajniji utjecaj (vidi točku 4.2.3.) te je samim time korelacija značajnija. Podizanjem stanja vode u pijezometrima uslijed oborine, podiže se i stanje u Neretvi (vidi sliku 4.6.). Iz tablice 4.3. očigledna je značajna korelacija.

Varijable	Koef. korelacije r
Vodostaj/D1	r=0,97
Vodostaj/D2	r=0,89
Vodostaj/D3	r=0,87
Vodostaj/D4	r=0,86

**Tablica 4.3.** Prikaz koeficijenta korelacije odnosa vodostaj / duboki pijezometri



**Slika 4.5.** Grafički prikaz povezanosti varijabli vodostaj i pijezometra D1



**Slika 4.6.** Prikaz pijezometrijskih stanja vodostaja i dubokih pijezometara

Iz gornje slike, vidi se kako pijezometrijska stanja dubokih pijezometara koincidiraju s vodostajem, osobito pijezometri D2 i D3 koji se nalaze najbliži lokaciji mjerenja vodostaja.

Može se zaključiti kako među njima postoji direktna veza, što ide u koaliciju s rezultatima istražnih bušotina na mjestu buduće CS Opuzen. Naime, u tim istražnim bušotinama, registriran je glineni sloj od svega 1 m debljine (vidi prilog 1) [15]. Postojanje tih kanala opravdalo bi gotovo iste pijezometrijske razine jer bi se na taj način, na tim mjestima, tlak ujednačio i zatim širio kroz podzemlje.

#### 4.2.3. Analiza odnosa oborine i pijezometara

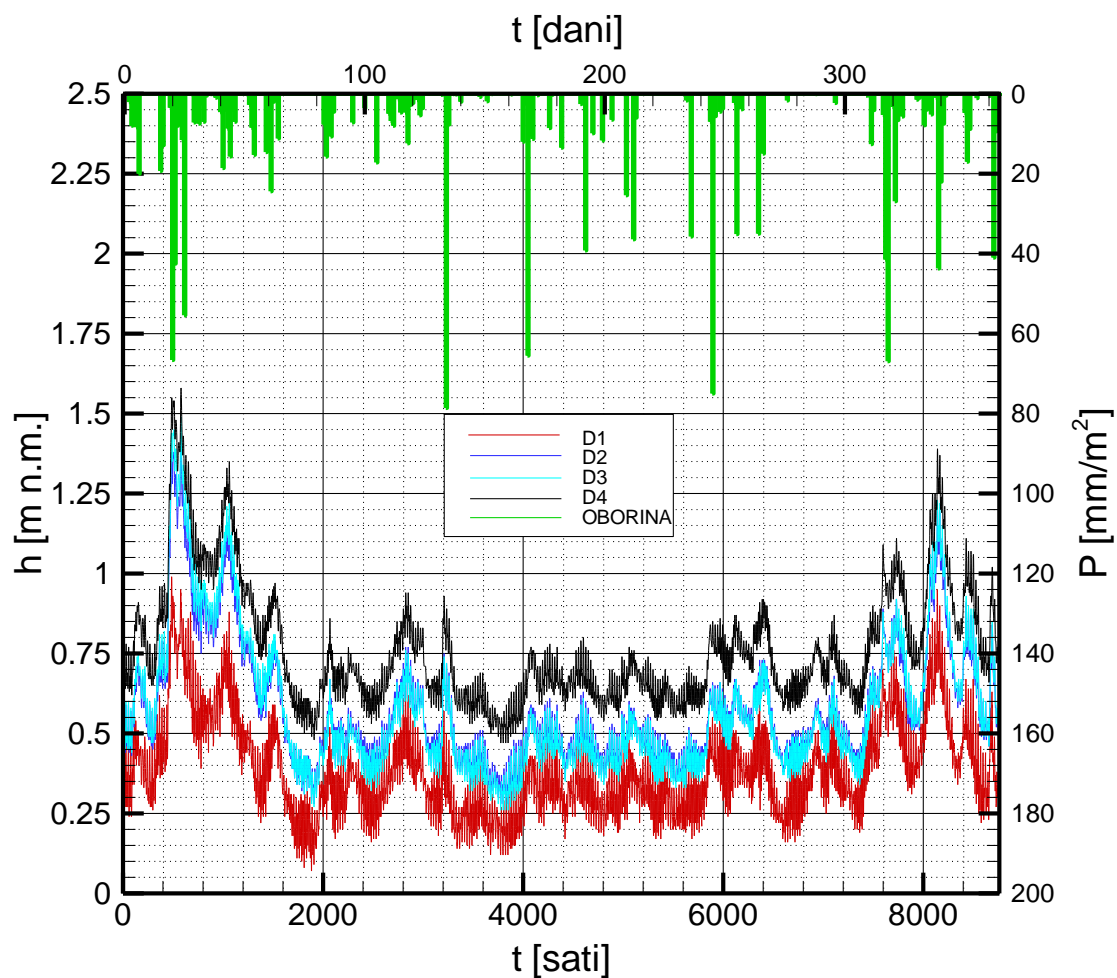
Analiza je vršena sa dnevnim podacima samo u onim danima u kojima je postojala oborina, dok su se dani u kojima nije bilo oborine zanemarili. Podaci o stanju vode u pijezometrima prebačeni su sa satne na dnevnu skalu na način da su se satni podaci podijelili s 24 sata te dobile osrednjene dnevne vrijednosti stanja u pijezometrima. Analizom je dobiveno da nema direktne veze između oborine i pijezometara (tablica 4.4.). Međutim, na slici 4.7. je

vidljivo da se u periodima jačih i dugotrajnijih oborina, stanja u piježometrima podižu, što ukazuje da oborina posrednim putem itekako djeluje na duboke piježometre.

Varijable	Koef. korelacije r
Oborina/D1	r=0,22
Oborina/D2	r=0,20
Oborina/D3	r=0,19
Oborina/D4	r=0,20

**Tablica 4.4.** Prikaz koeficijenta korelacije odnosa oborina / duboki piježometri

Očigledno je da voda za vrijeme velikih kiša dotječe u donji vodonosnik, vrlo vjerojatno s brda kroz okršeni masiv gdje kvartarne naslage nisu registrirane (vidi slike 3.5., 3.6. i 3.7.) i/ili na način koji je opisan u prethodnoj točki, dok za vrijeme manjih kiša to očito nije slučaj ili je slabije izražen, vjerojatno zbog zaostajanja vode u gornjim nezasićenim slojevima.



**Slika 4.7.** Prikaz piježometarskih stanja dubokih piježometara i oborine

Jako slični rezultati regresijske analize bi se dobili i za analizu vodostaj / oborina, s obzirom da vodostaj koincidira sa stanjima dubokih pijezometara.

### 4.3. Regresijska analiza gornjeg vodonosnika

#### 4.3.1. Analiza odnosa mora i pijezometara

Kao i kod analize u dubokim pijezometrima, regresijskom analizom dobiveno je stanje matematičke povezanosti mora i plitkih pijezometara u vidu koeficijenta korelacije. Rezultati su prikazani u tablici 4.5..

Varijable	Koef. korelacije r
More/P1	r=0,54
More/P2	r=0,26
More/P3	r=0,28
More/P4	r=0,31

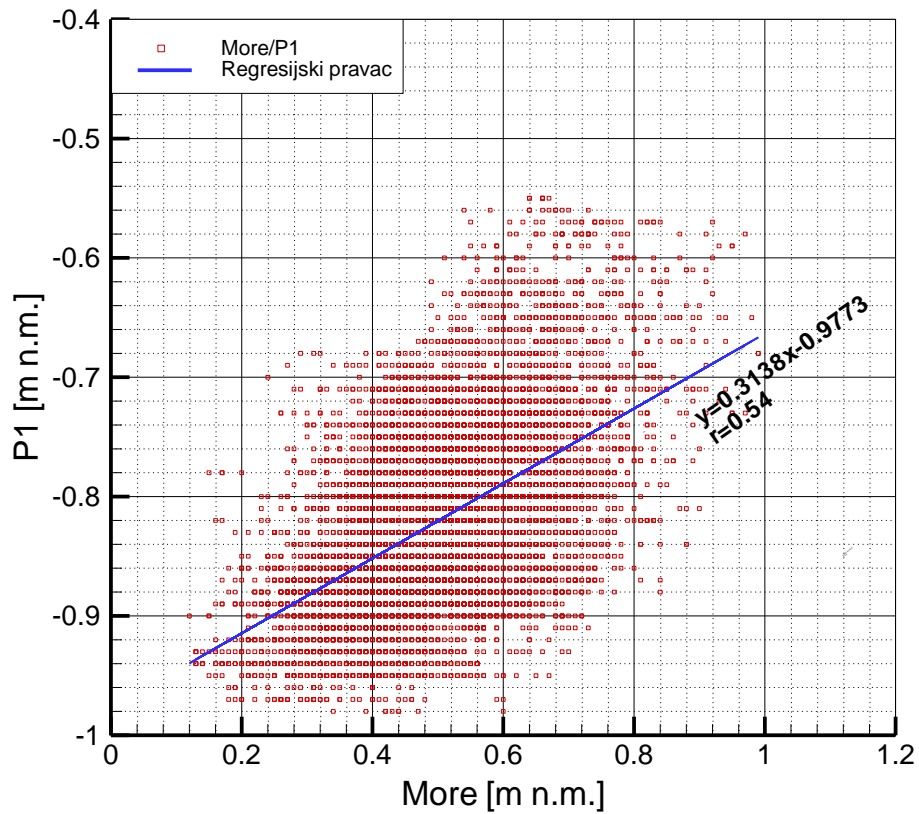
**Tablica 4.5.** Prikaz koeficijenta korelacije odnosa more / plitki pijezometri

Također, kao i kod dubokih pijezometara, na slici 4.9. vidi se kako najveći koeficijent korelacije ima pijezometar P1. Naime, iako je pijezometar P1 jako blizu kanalu, vidljivo je da crpljenje na njega ima najmanji utjecaj. Dok ostali pijezometri izrazito odgovaraju (trenutni skokovi u pijezometarskim stanjima na slici 4.9.) na režim crpljenja, u pijezometru P1 su ti skokovi puno manje naglašeni te se može zaključiti kako je on pod dominantnim utjecajem mora. Iz ovih rezultata može se zaključiti kako more intruzijom preko Dige<sup>12</sup> ulazi u područje obuhvata.

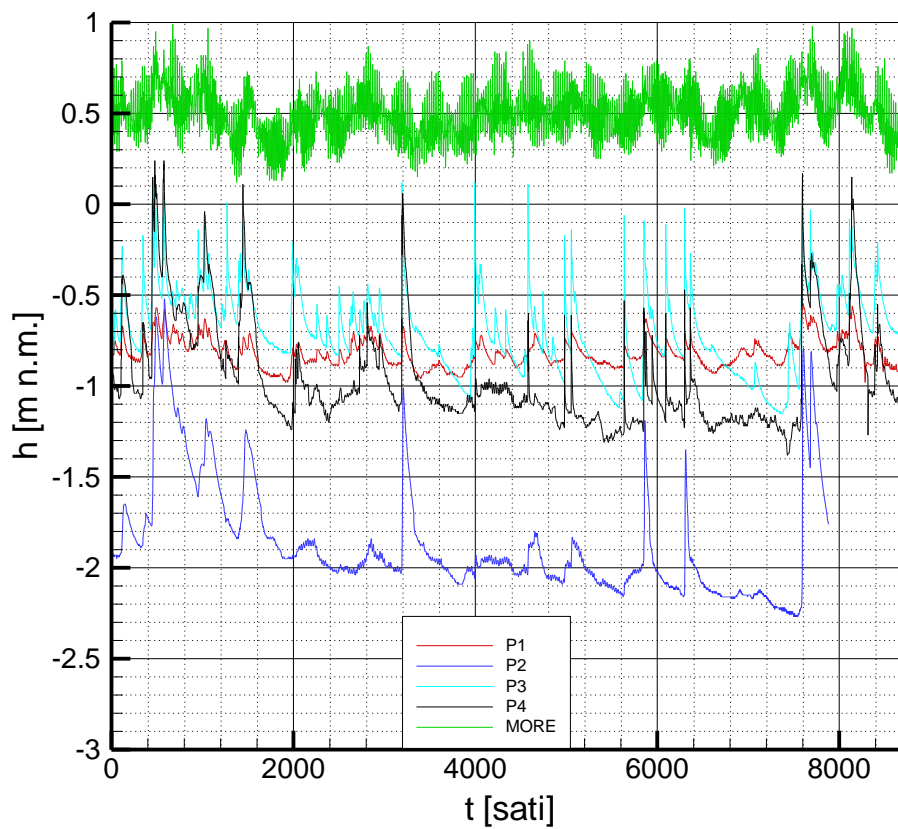
Nažalost, biti će jako teško kvantificirati povezanost ovog vodonosnika jer je utjecaj crpljenja jako izražen (izuzev uskog priobalnog dijela), odnosno dominantan u sustavu, a vrlo teško ga je precizno odrediti, kako je naglašeno u točki 3.6. .

---

<sup>12</sup> Diga - nasip između Neretve i Male Neretve izgrađen radi obrane područja od mora.



Slika 4.8. Grafički prikaz povezanosti varijabli more i pijezometra P1



Slika 4.9. Prikaz pijezometarskih stanja mora i plitkih pijezometara

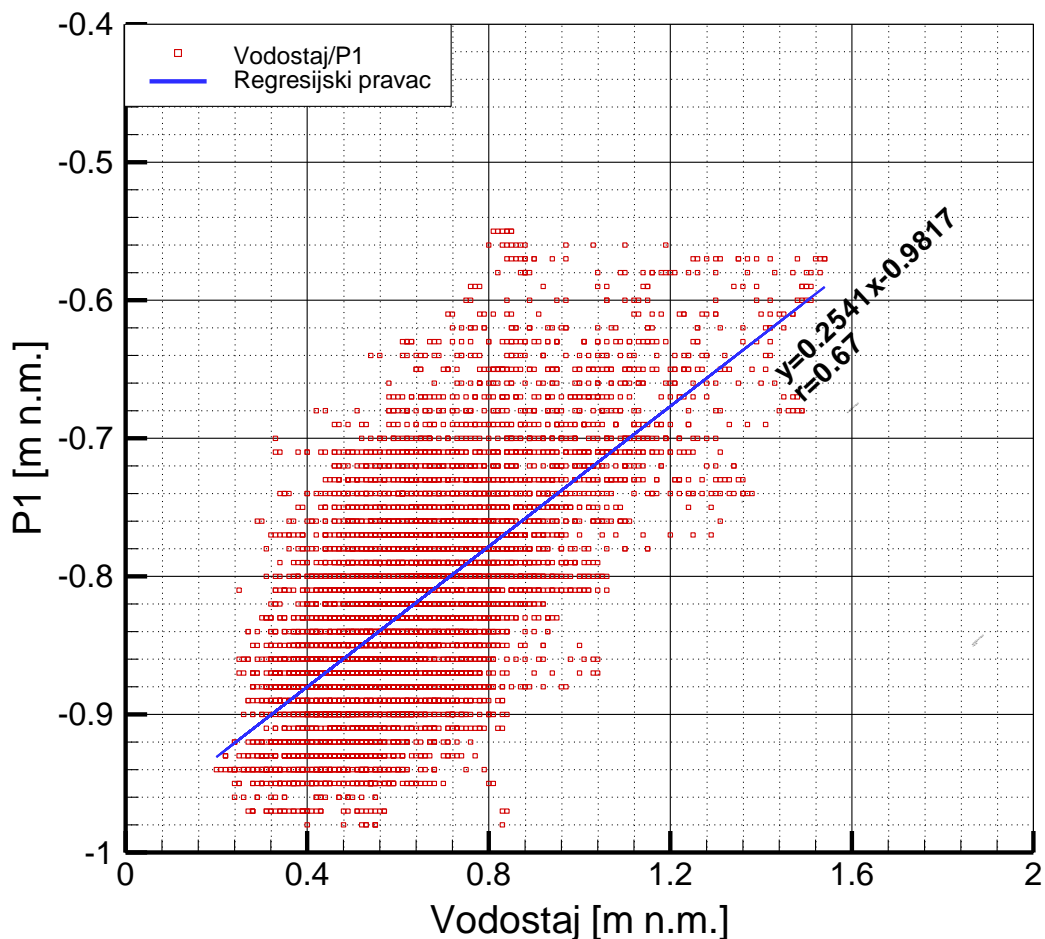


### 4.3.2. Analiza odnosa vodostaja i pijezometara

U usporedbi s analizom vodostaj/duboki pijezometri, ovdje je vidljivo (talica 4.6.) značajno opadanje koeficijenta korelacije. Razlog tome je naravno, crpljenje.

Varijable	Koef. korelacije r
Vodostaj/P1	r=0,67
Vodostaj/P2	r=0,64
Vodostaj/P3	r=0,53
Vodostaj/P4	r=0,66

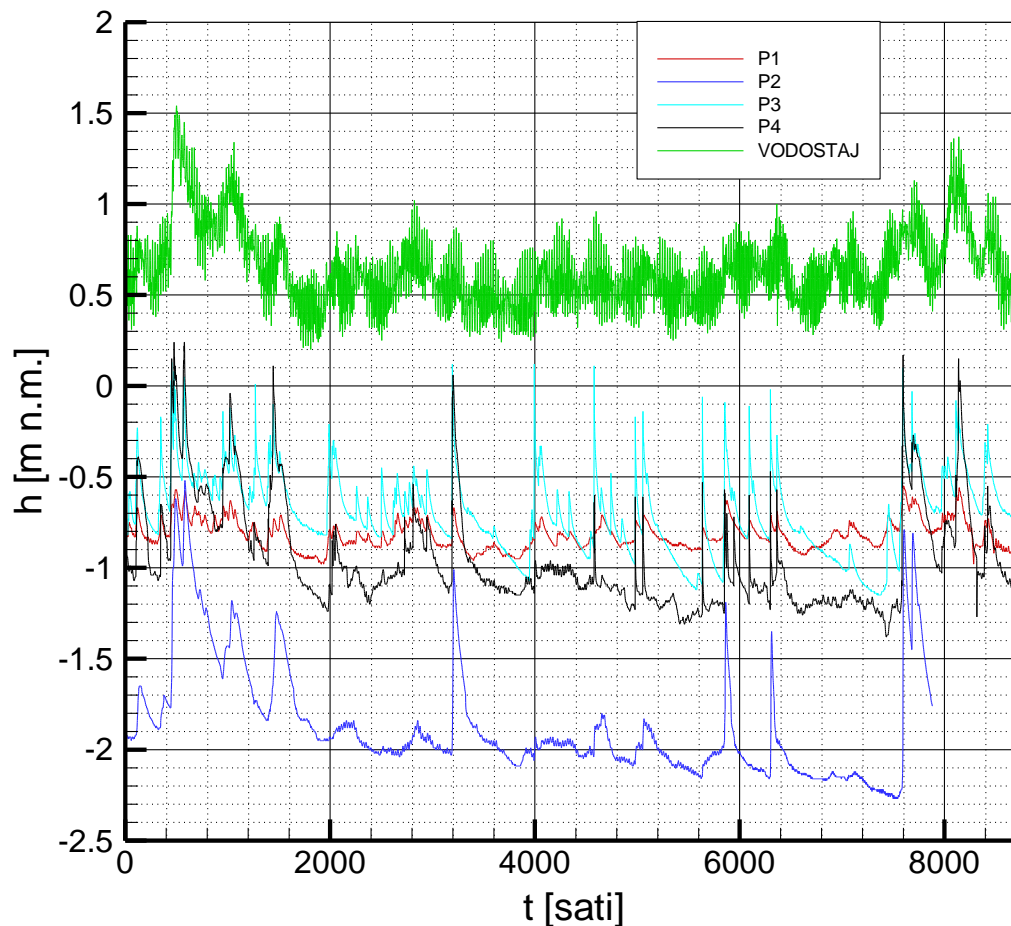
Tablica 4.6. Prikaz koeficijenta korelacije odnosa vodostaj/plitki pijezometri



Slika 4.10. Grafički prikaz povezanosti varijabli vodostaja i pijezometra P1

Na slici 4.11. vide se "peak"-ovi u piježometarskim stanjima, što ukazuje na pojačan rad crpne stanice koja, za vrijeme velikih kiša, naglo ruši stanja u piježometrima. Primjetan je hidrogram opadanja, ali bez klasičnog recesijskog dijela, što je posljedica dužeg rada crpki. Vidljivo je (prije svega u kišnim periodima) da bi, kada ne bi bilo crpljenja, piježometarska stanja jako koincidirala vodostaju u Neretvi.

Može se zaključiti kako se Neretva, koja je pod utjecajem mora, propagira iz korita u područje.



Slika 4.11. Prikaz piježometarskih stanja vodostaja i plitkih piježometara

### 4.3.3. Analiza odnosa oborine i pijezometara

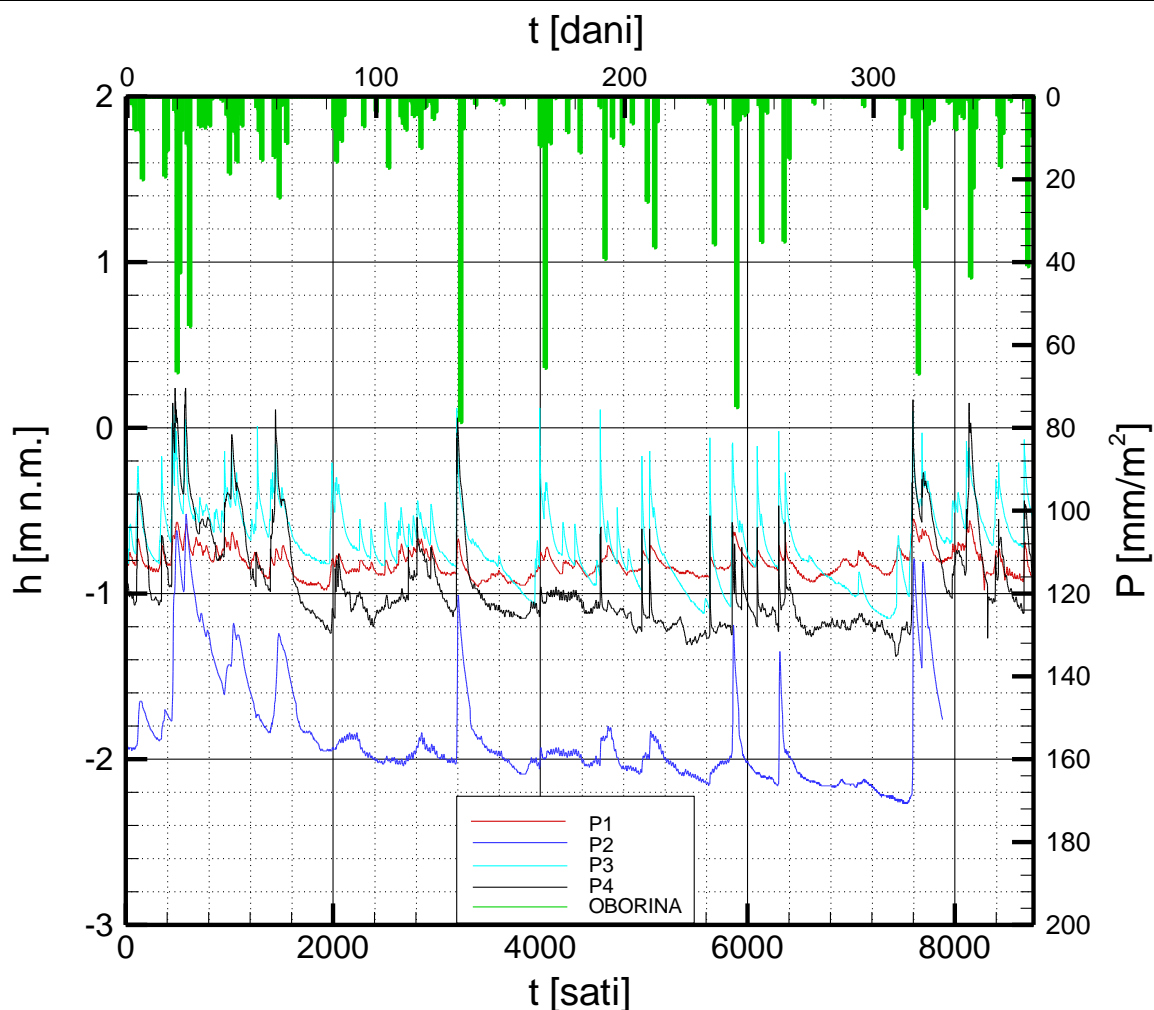
Analiza je vršena analogno s analizom iz dubokog vodonosnika (vidi točku 4.2.3.). Korelacija je nešto veća nego u dubokim pijezometrima, ali je svakako s matematičke strane beznačajna. Kako je već naglašeno, razlog ovako niske korelacije krije se u crpljenju zajedno s osrednjavanjem pijezometarskih stanja na dnevnu skalu.

Varijable	Koef. korelacije r
Oborina/P1	r=0,44
Oborina/P2	r=0,32
Oborina/P3	r=0,57
Oborina/P4	r=0,35

**Tablica 4.7.** Prikaz koeficijenta korelacije odnosa oborine i plitkih pijezometri

Na slici 4.12., zorno se vidi kako pijezometri trenutno odgovaraju na palu oborinu, a isto tako, jako brzo se osjeti smanjenje stanja u pijezometrima uslijed crpljenja. Pritom, sniženo stanje P2 u usporedbi s ostalim pijezometrima je posljedica što CS Modrič na mjestu usisa stvara depresiju koja u obliku vodnog udara putuje kroz kanale te zahvaća pijezometar P2 koji se nalazi tek 30 ak metara od kanala.

Dakle, možemo zaključiti kako postoji jaka veza između oborine i stanja u plitkim pijezometrima. Ova teza se najbolje opisuje usporedbom oborine i P3 na donjoj slici, gdje se vidi da i jako male oborine, trenutno podižu razine vode u gornjem vodonosniku, odnosno plitkim pijezometrima.

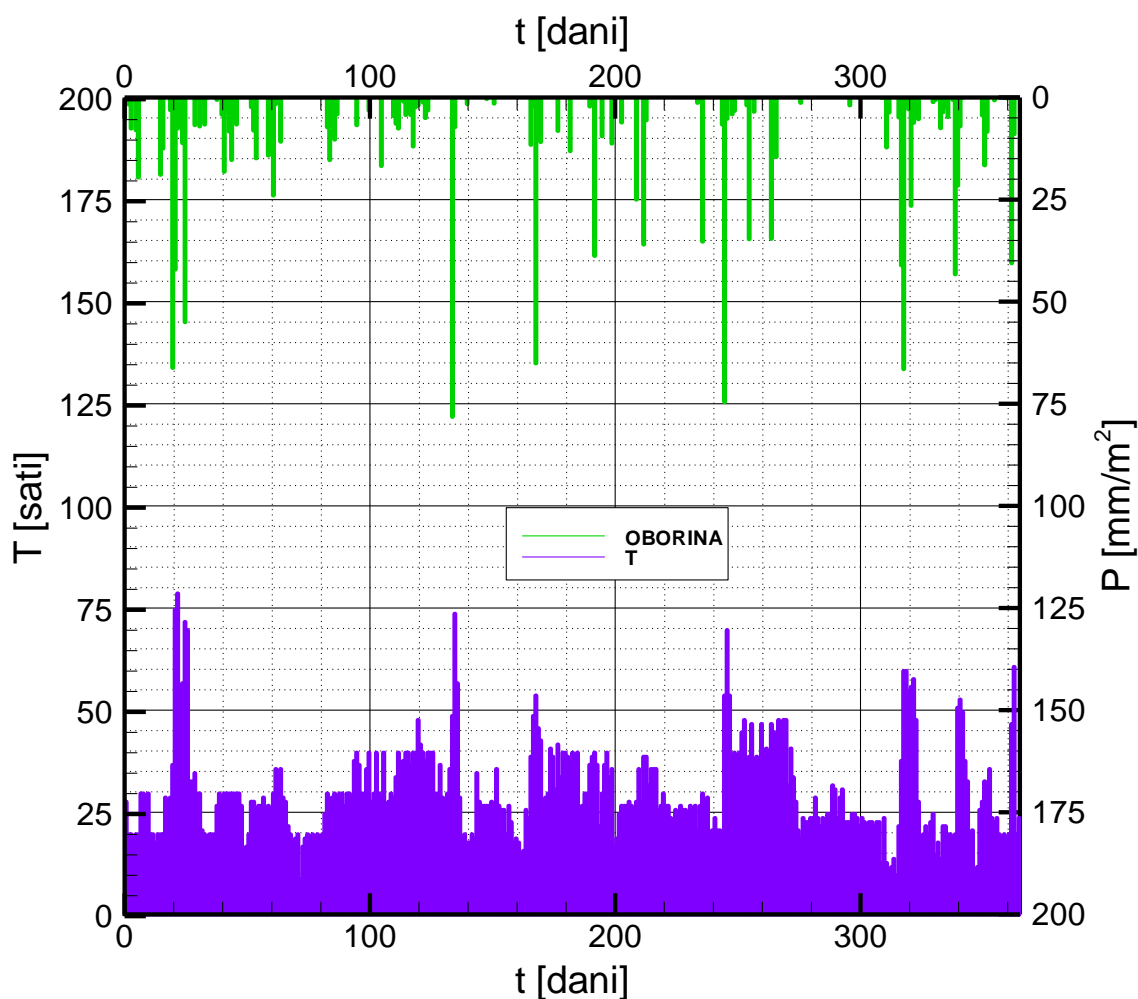


**Slika 4.12.** Prikaz piježometarskih stanja plitkih piježometara i oborine

#### 4.3.4. Analiza odnosa oborine i vremena crpljenja

Pri analizi korišteni su dnevni podaci oborine te dnevni podaci vremena crpljenja (T) CS Modrič. Vrijeme crpljenja je dobiveno obradom podataka iz [9], na način da su se za jedan dan zbrojili radni sati svih crpki koje su taj dan radile.

U regresijskoj analizi su korišteni samo oni dani u kojima je postojala oborina, dok su dani bez oborine zanemareni. Analizom je dobiven zanemariv koeficijent korelacije,  $r=0.39$ . Ovako malen koeficijent je posljedica što crpke rade svakodnevno bez obzira je li taj dan bilo oborina ili ne. Naravno, za vrijeme većih oborina rade intenzivnije.



**Slika 4.13.** Prikaz oborine i vremena crpljenja CS Modrič

Iz slike je vidljiv trend pojačanog rada crpki za vrijeme kišnih dana ("peak"-ovi oborina odgovaraju "peak"-ovima vremena rada crpki), te se može ustvrditi kako postoji dobra veza između oborine i vremena rada crpki. Da bi se povećao korelacijski koeficijent, potrebno je reducirati crpljenje u periodima bez oborine.

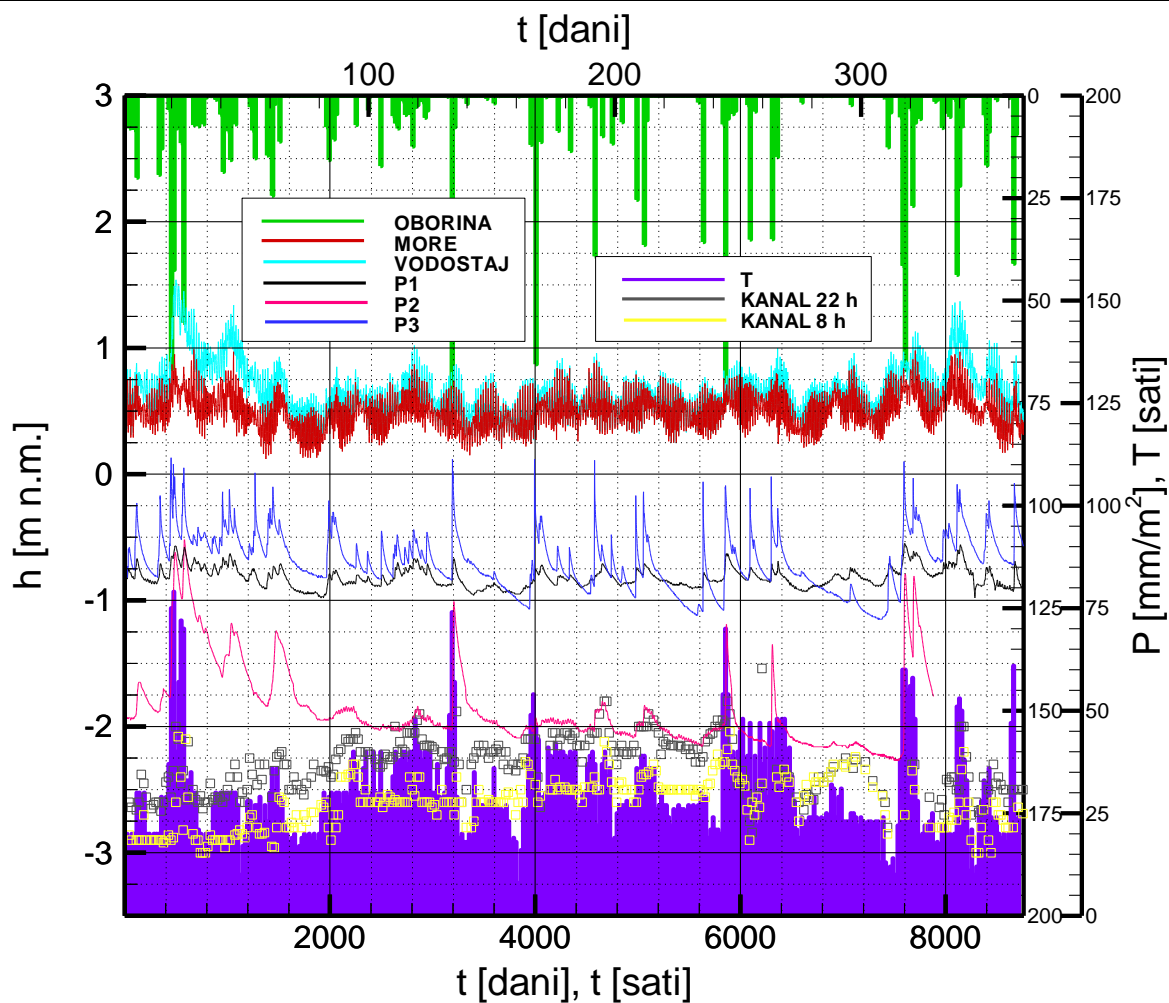
Trenutni režim rada crpki nije najbolje rješenje jer se ono bazira isključivo na ljudskoj procjeni i iskustvu. Naime, u sadašnjem stanju cijeli proces crpljenja se svodi na podatke s mjerne letve u crpnom bazenu iz kojeg se crpi voda, a s obzirom da je analizom dobiveno da je voda u kanalu dosta niža nego u vodonosniku (vidi točku 4.3.5.), povlači se pitanje je li se crpljenjem ispumpava prevelika količina vode.

Također, pitanje je što se događa i na rubovima sustava prilikom crpljenja, odnosno kada se ono tamo počinje osjećati. Da bi se došlo do kvalitetnog rješenja, trebalo bi izraditi nestacionarni numerički model iz kojeg bi se odredila "tromost" sustava, tj. vremenski period koji je potreban da se aktivnosti u vidu pada razine počnu osjećati na nekoj lokaciji (prvenstveno se misli na najudaljenije, područje kraj Opuzena). Određivanjem vremena koje je potrebno za aktivaciju cijelog sustava te uz praćenje hidrometeoroloških prilika, moglo bi se puno kvalitetnije i ekonomičnije upravljati sustavom. Na ovaj način bi se crpke palile ranije, za izračunati vremenski period, nego što se očekuje oborina. Naravno, protok crpki bi se uskladio s očekivanim trajanjem i intenzitetom oborine.

Analogni rezultati i zaključci vrijede za CS Prag tako da se ona neće posebno analizirati.

#### **4.3.5. Prikaz i analiza svih ostalih relevantnih parametara plitkog vodonosnika**

Kako je vidljivo iz gornjih analiza, regresijska analiza nije najbolje mjerilo povezanosti pojedinih varijabli u ovom vodonosniku, a razlog se, kako je već rečeno krije u režimu crpljenja. Zbog toga će u nastavku biti prikazani svi relevantni faktori plitkog vodonosnika na jednoj slici (vidi sliku 4.14.), kako bi se što bolje prikazao odnos i međusobna povezanost pojedinih varijabli.



**Slika 4.14.** Prikaz svih relevantnih parametara plitkog vodonosnika

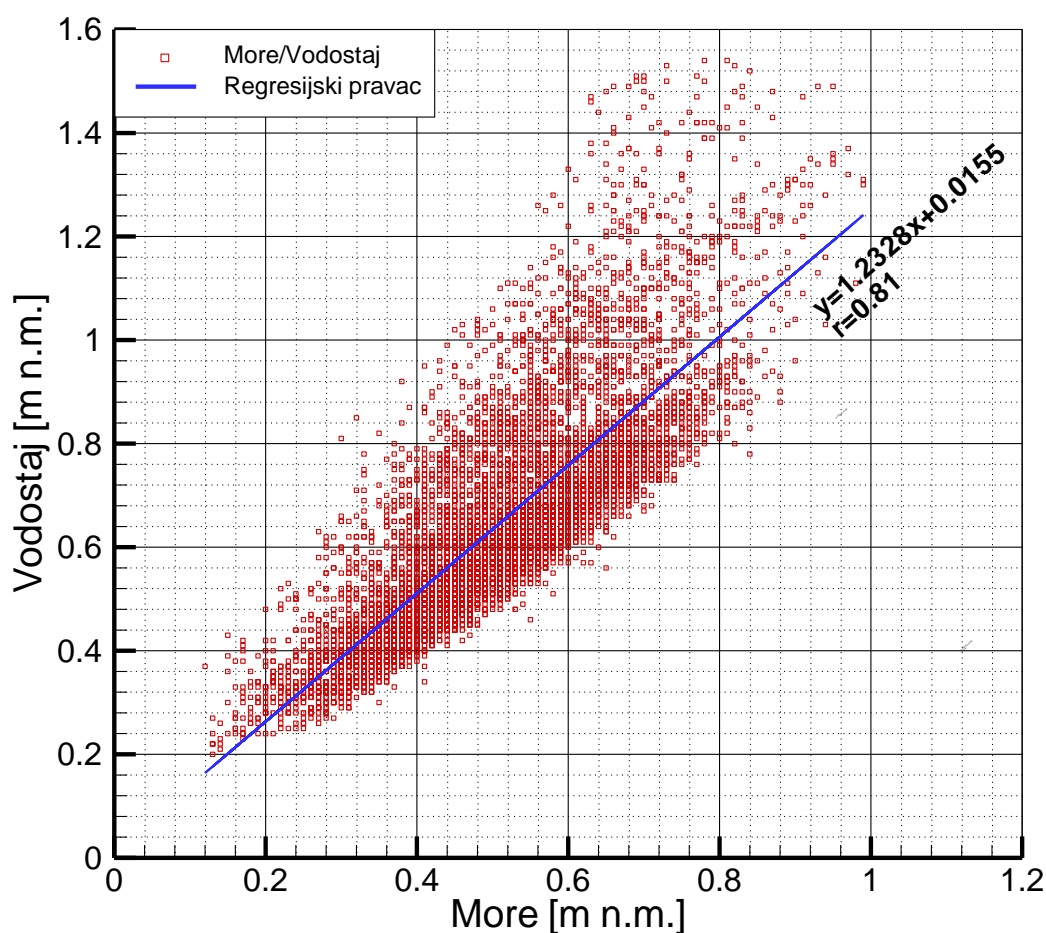
Na slici nije prikazan pijezometar P4, s obzirom da su na istoj slici prikazani podaci vezani sa CS Modrič.

Svakako treba primijetiti da stanje u kanalu, prije paljenja crpki, koincidira s P2, osobito u ljetnom razdoblju kada nema dugog rada crpki zbog smanjenih oborina, iako se regresijskom analizom dobije beznačajan koeficijent korelacije,  $r=0.41$ .

#### 4.4. Analiza odnosa mora i vodostaja

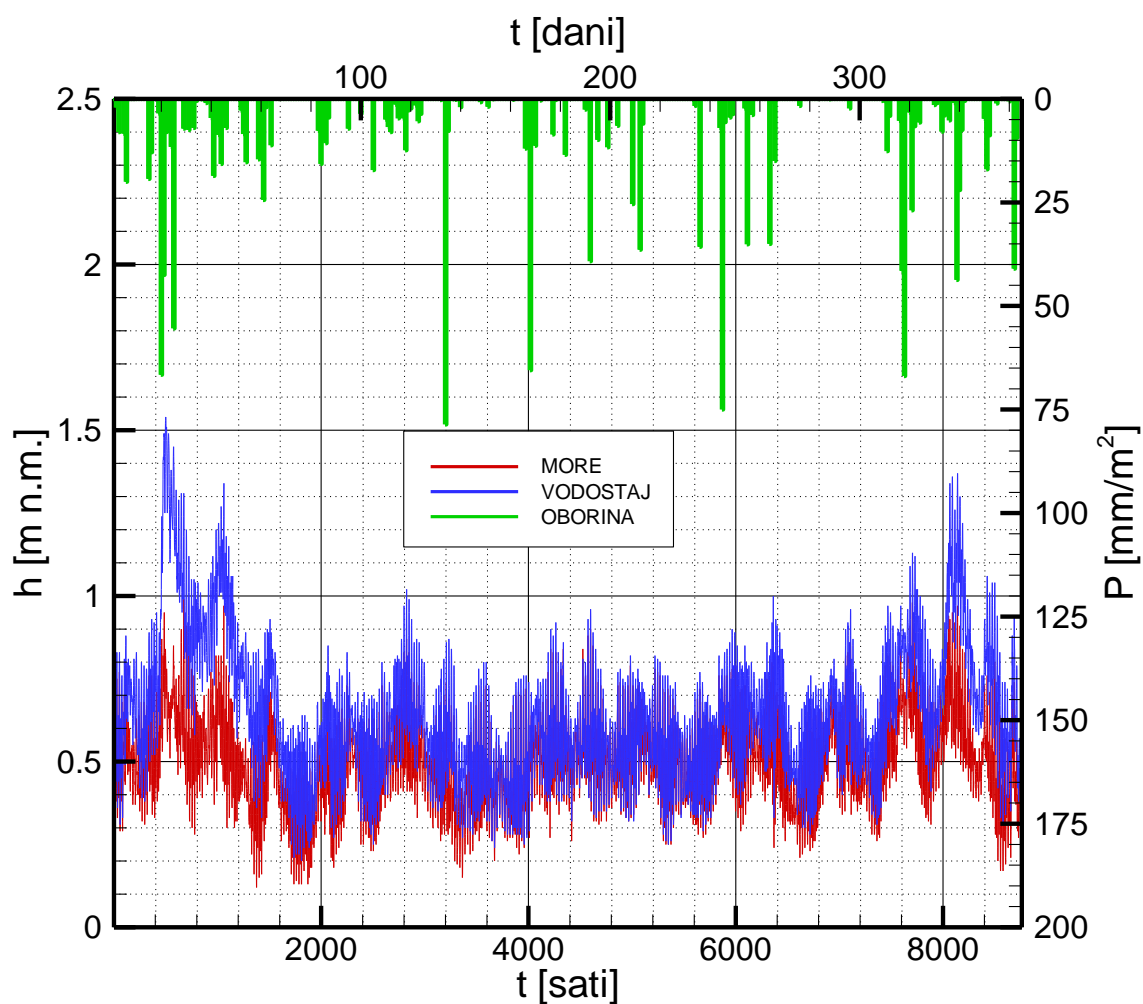
Na temelju točaka 4.2.1. i 4.2.2., može se zaključiti kako je rijeka Neretva pod izravnim utjecajem mora. Naravno, razlika će se javiti u kišnim periodima (vidi sliku 4.15.), kada se vodostaj Neretve izdigne zbog velikog dotoka vode sa sliva, dok razina mora i dalje fluktuirá na isti način, tj. oborina nema nikakav utjecaj na fluktuacije mora.

Analizom se dobio značajan koeficijent korelacije  $r=0.81$ .



Slika 4.15. Grafički prikaz povezanosti varijabli more i vodostaj





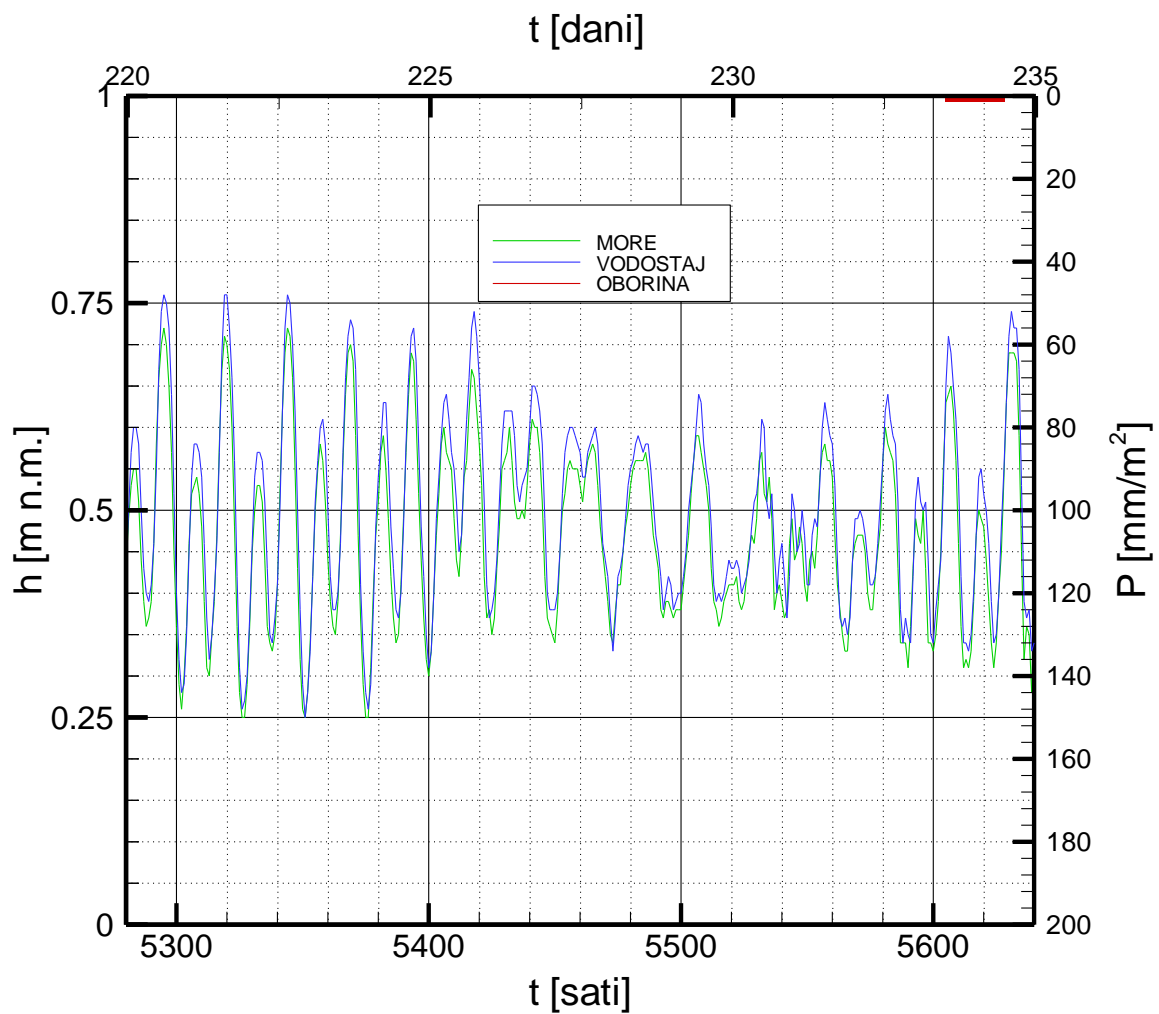
**Slika 4.16.** Prikaz stanja razine mora i vodostaja s oborinom

Vidljivo je kako oborina direktno djeluje na stanje Neretve, odnosno podiže ga u kišnom dijelu godine. Međutim, u sušnom dijelu godine, kada se protok kroz Neretvu, zbog malog dotoka sa sliva, smanji na ispod  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , očigledno je da na stanje Neretve gotovo isključivo utječe more.

Da bi se u što većoj mjeri anulirao utjecaj oborine, urađena je i analiza samo za ljetni period (od 1.6.2014.-31.8.2014.) te je dobiven koeficijent korelacije  $r=0.97$ .

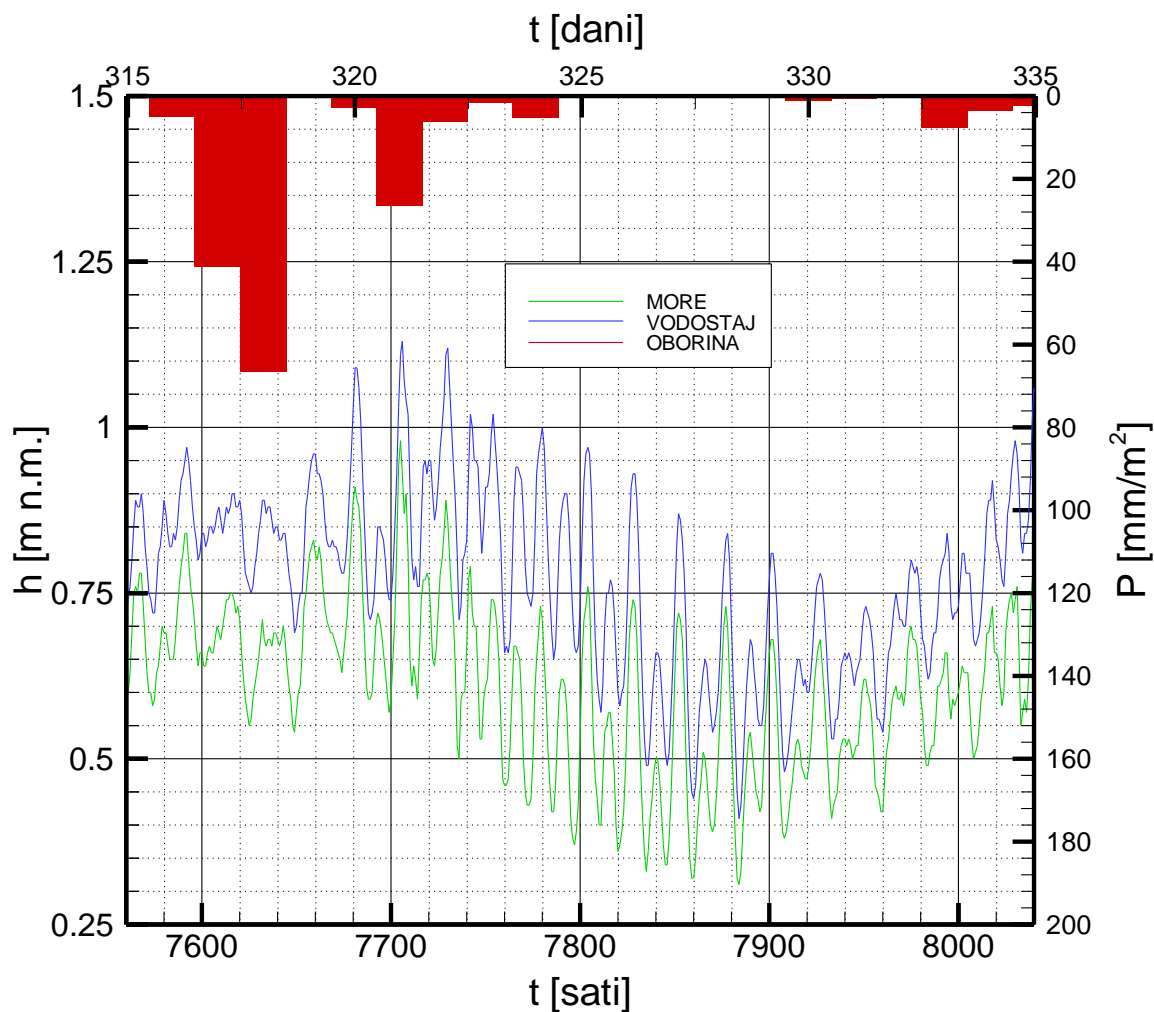
Ovaj rezultat ukazuje da se more kroz Neretvu propagira duboko u unutrašnjost područja Donje Neretve. Treba napomenuti da se vodostaj mjeri u Opuzenu.

Na slikama 4.17. i 4.18. vidi se stanje Neretve u odnosu na more za vrijeme sušnog perioda, odnosno nakon palih kiša.



**Slika 4.17.** Prikaz stanja razine mora i vodostaja za vrijeme sušnog razdoblja

Očigledno je da se vodostaj ponaša po obliku i vrijednostima u skladu s fluktuacijama mora, te možemo zaključiti da se u donjim slojevima Neretve nalazi more, tj. slani klin se uvukao u Neretvu te seže uzvodnije od Opuzena. Vidi sliku 7.2., klin u Neretvi, na mjernoj postaji Opuzen, nalazi se na svega 3.5 m dubine.

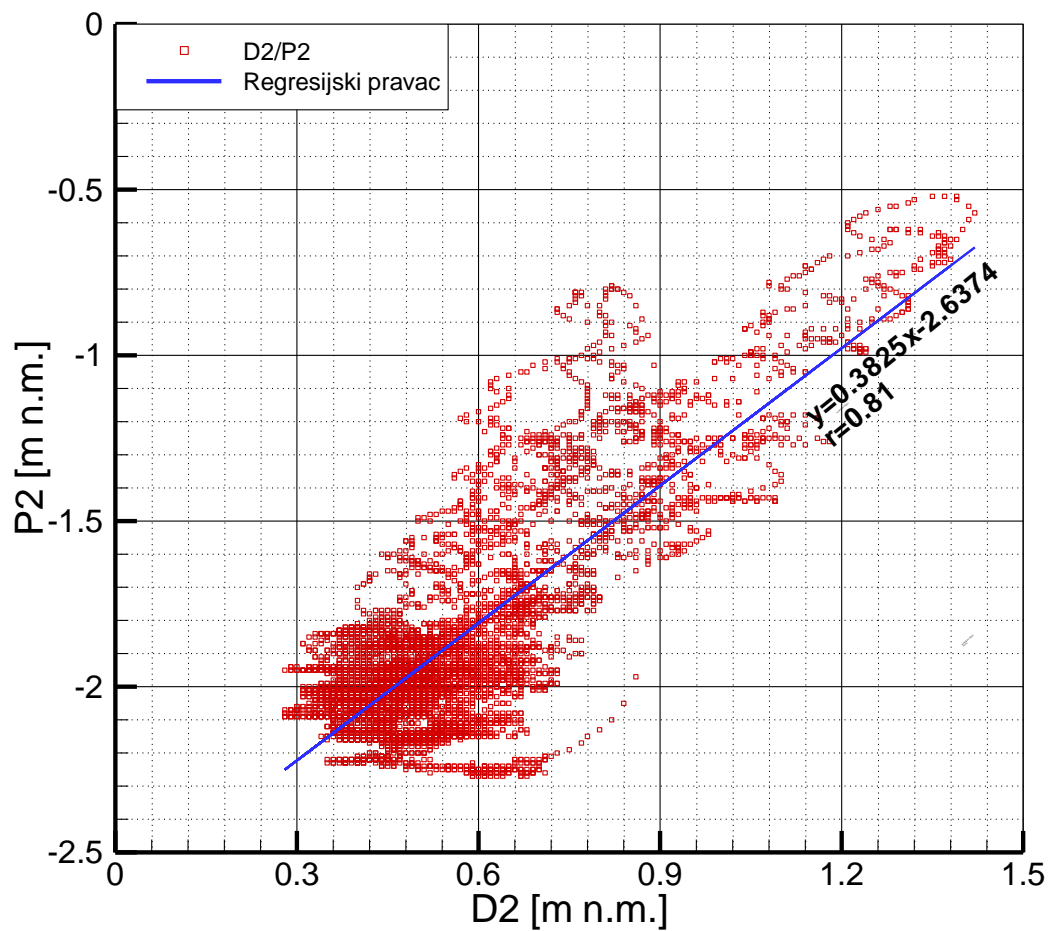


**Slika 4.18.** Prikaz stanja razine mora i vodostaja u kišnom periodu

Za vrijeme velikih oborina vidljivo je povećanje razine vodostaja Neretve, čime se slani klin iz Neretve povlači natrag prema moru. Vidi sliku 7.5., klin je toliko nisko da mjerenjima nije zabilježen.

#### 4.5. Analiza odnosa dubokih i plitkih pijezometara

Analizom je ustanovljeno da usprkos crpljenju plitkog vodonosnika, postoji dobra statistička veza njega i vodonosnika pod tlakom (vidi sliku 4.19.).

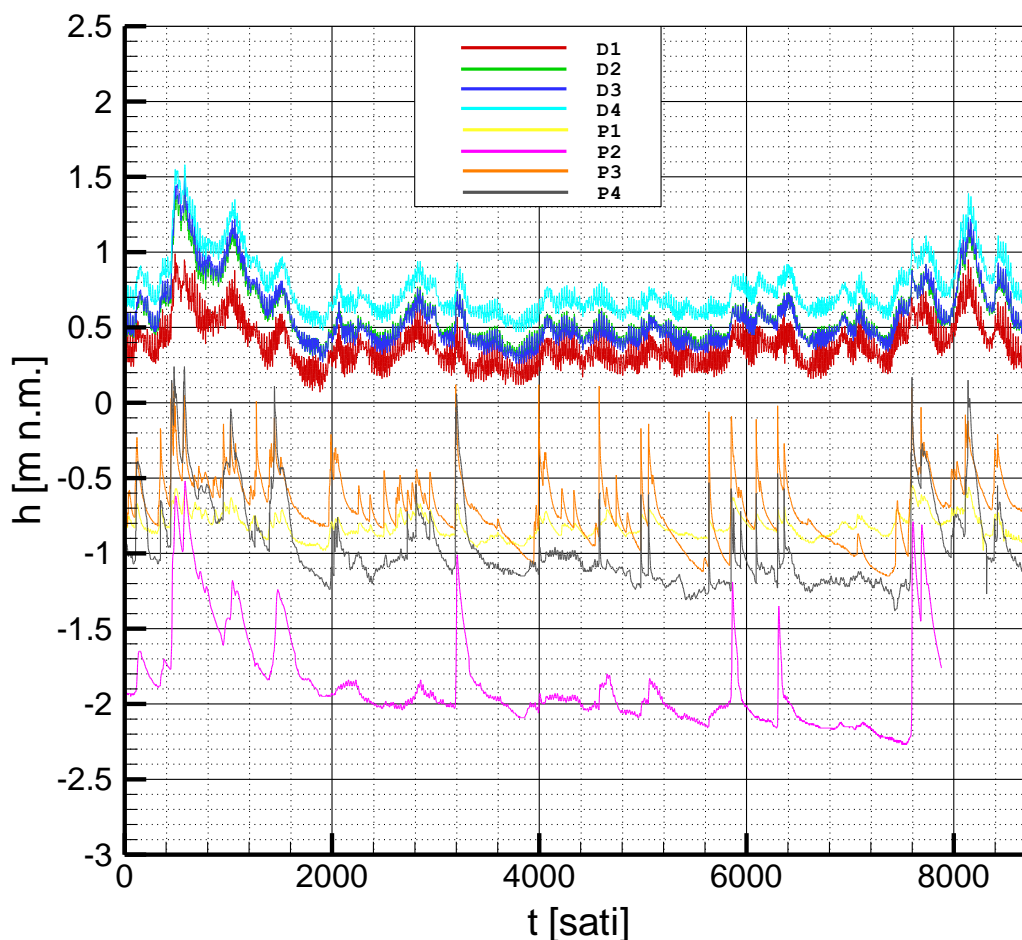


Slika 4.19. Grafički prikaz povezanosti varijabli D2 i P2

Varijable	Koef. korelacije r
D1/P1	r=0,77
D2/P2	r=0,81
D3/P3	r=0,67
D4/P4	r=0,81

Tablica 4.8. Prikaz koeficijenta korelacije odnosa dubokih i plitkih pijezometara

Lako je za primijetiti da, kada ne bi bilo crpljenja, ova veza bila još jača.

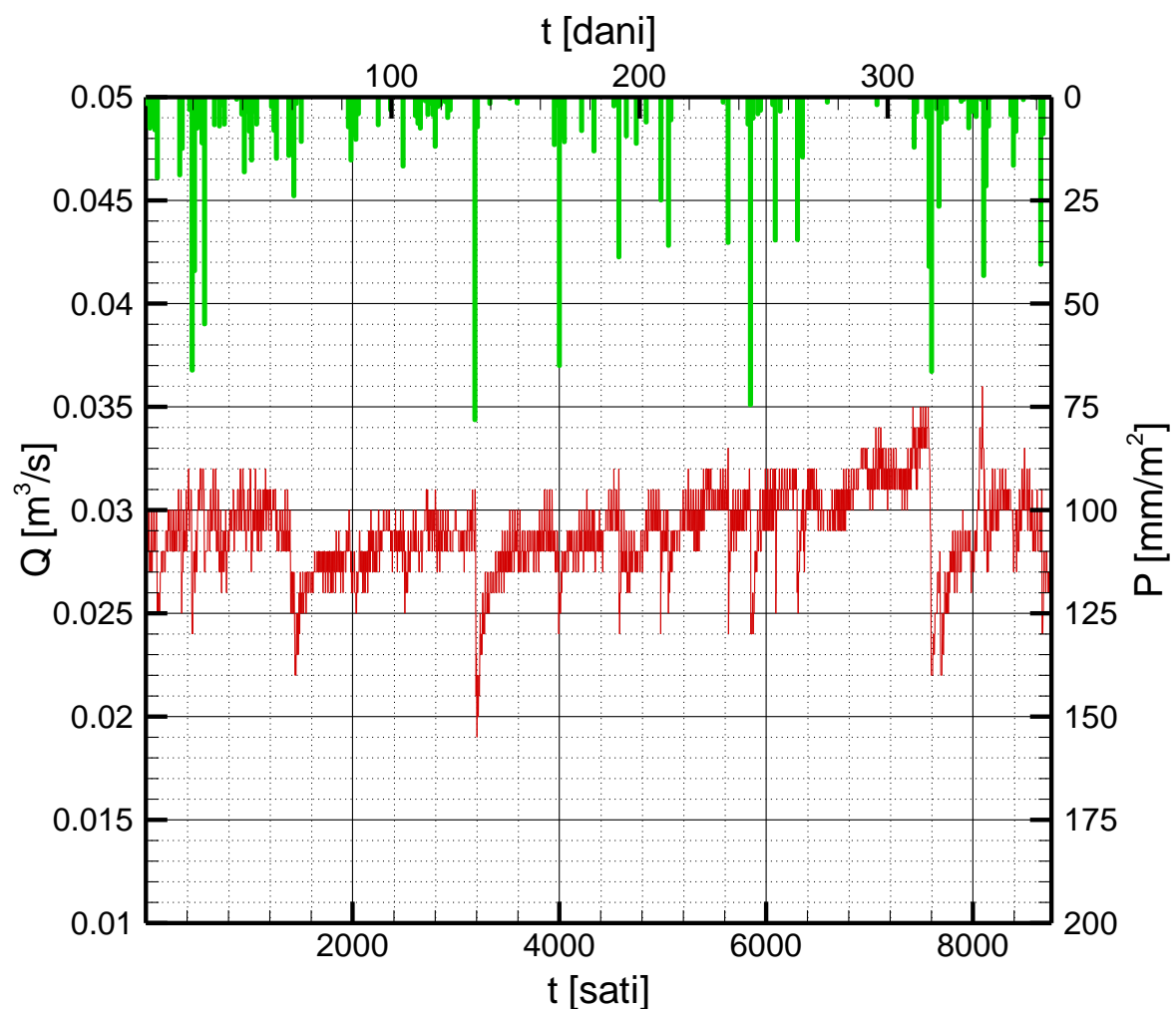


**Slika 4.20.** Prikaz stanja u dubokim i plitkim pijezometrима

Razine vode u plitkom vodonosniku određene su oborinama koje padnu na područje i režimom rada sustava unutrašnje odvodnje. Na slici 4.20. primjećuju se specifična stanja različita po dijelovima područja. Tako se dobro vidi da je u plitkim pijezometrима 1 i 3, stanje vrlo slično i u jakoj korelaciji s oborinama, dok je u pijezometru 2, naglašen utjecaj niskih stanja razina u odvodnim kanalima.

Utvrđena je razlika u pijezometarskim stanjima vodonosnika pod tlakom i plitkog vodonosnika ( $\Delta h$ ), kao razlika prosjeka dubokih i plitkih pijezometara, u iznosu od 1.65 m u korist vodonosnika pod tlakom. Ovom razlikom uspostavlja se gradijent te dolazi do toka ( $Q_D^G$ ) iz vodonosnika pod tlakom u plitki vodonosnik, čime dolazi do njegovog zaslanjivanja iz podzemlja (vidi sliku 4.21).

Skokovi na slici su direktna posljedica oborine, odnosno s oborinom povezanog crpljenja. Vidi se kako protok iz vodonosnika pod tlakom u plitki vodonosnik ( $Q_D^G$ ) koincidira s oborinom prilikom kišnog perioda. Nakon pada znatnije oborine vidljiv je nagli pad protoka, što je posljedica povećanja razine vode u plitkom vodonosniku, čime se smanjuje gradijent između njega i vodonosnika pod tlakom. Međutim, povećanjem razine vode u plitkom vodonosniku pale se crpke kako nebi došlo do zaslanjivanja sloja važnog za rast i razvoj poljoprivrednih kultura, čime se ponovno povećava gradijent, a samim time i protok.



**Slika 4.21.** Prikaz protoka  $Q_D^G$  iz vodonosnika pod tlakom u plitki vodonosnik u ovisnosti o oborini

Ovaj tok je vrlo teško kvalitetno kvantificirati zbog varijabilnosti kako sastava tla tako i njegovih parametara te ga treba uzeti kao orijentacijski. Prema ovim rezultatima može se reći da je tok prilično malen s obzirom na površinu, a da bi mogao biti i još manji kada bi se kvalitetnije upravljalo s režimom odvodnje.

Za proračun  $Q_D^G$  uzeto je da je sloj gline (vidi točku 3.1.) , koji se nalazi između vodonosnika pod tlakom i plitkog vodonosnog sloja prosječne debljine  $d_{gline}=20$  m, koeficijenta propusnosti  $K=10^{-8}$  m/s [8], da je razlika potencijala  $\Delta h=1,65$  m, dok je površina područja procijenjena s  $A=3500$  ha.

Sami proračun je izvršen pomoću Darcy-eva zakona:

$$Q_G^D = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{d_{gline}} \quad (8)$$

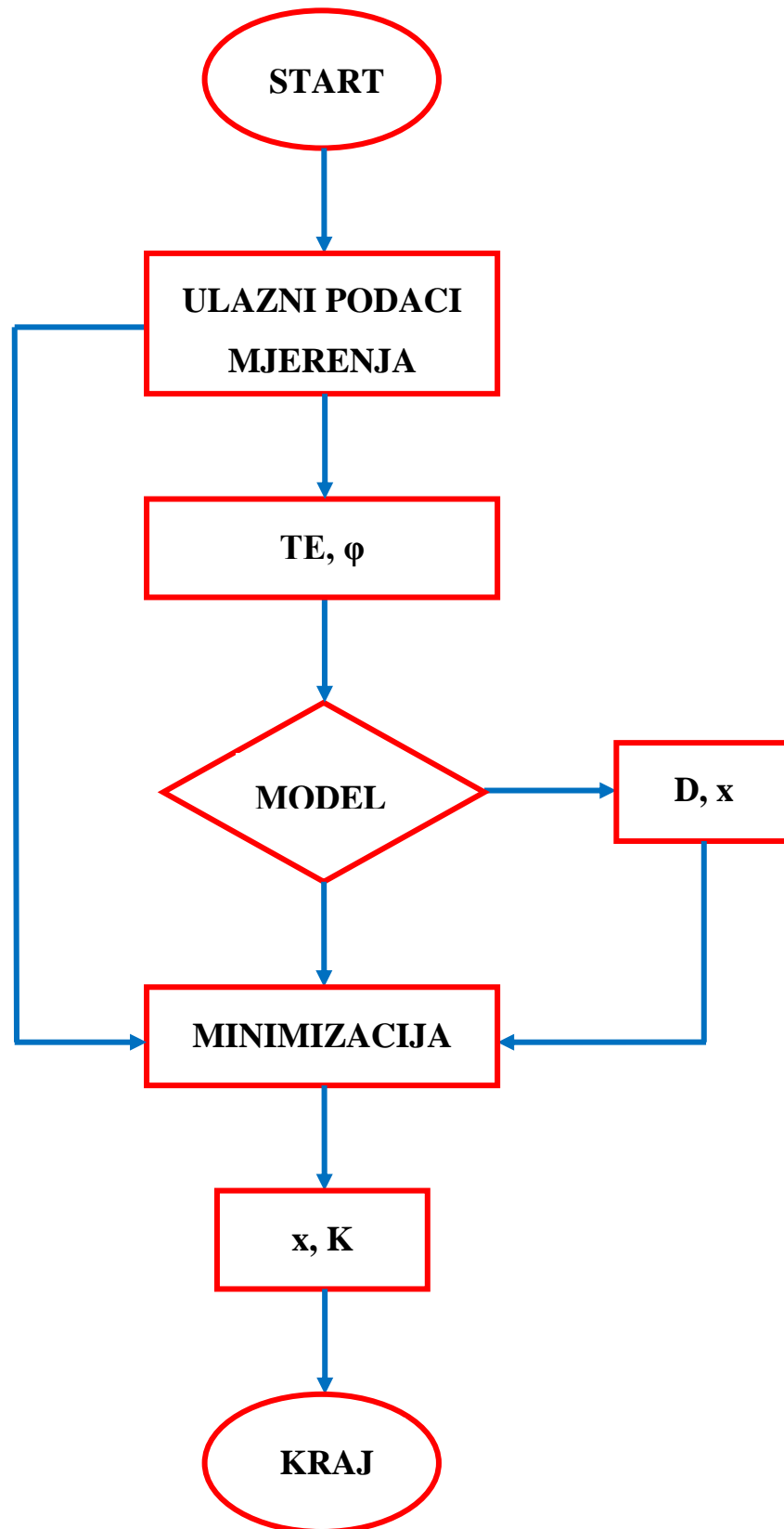
## **5. DEFINIRANJE PARAMETARA VODONOSNIKA POD TLAKOM**

Iz raznih istraživanja i ispitivanja koja su vršena na području obuhvata 60 ih godina prošlog stoljeća te nedavnih iz 2008. i 2012. godine došlo se do okvirnih vrijednosti parametara vodonosnika pod tlakom (vidi točku 3.1).

U ovom dijelu rada će se na temelju mjerenja iz 2009. - 2014. godine te donijetih zaključaka iz poglavlja 4 ovog rada, uporabom analitičkih izraza i numeričkih metoda odrediti parametri vodonosnika pod tlakom te ih usporediti s parametrima dobivenim iz istraživanja 60 ih godina prošlog stoljeća te novih istraživanja i ispitivanja iz 2008. i 2012. godine. Pod parametre se prvenstveno misli na koeficijent propusnosti  $K$ , kao glavni parametar toka u podzemlju te s njom povezanu hidrauličku difuzivnost  $D$ .

Shematski prikaz načina određivanja parametara vodonosnika pod tlakom, koji je izvršen u ovom radu, prikazan je na donjoj slici, a svaki od njegovih pojedinih dijelova će biti detaljnije obrazložen u točkama 5.1.2. i 5.1.3. .





**Slika 5.1.** Shema postupka određivanja parametara vodonosnika pod tlakom

### 5.1. Parametri iz istraživanja i ispitivanja

Kako je već naznačeno u točki 3.1., prema istraživanjima koja su vršena 60 ih godina, procijenjena vrijednost koeficijenta propusnosti (K), za vodonosnik pod tlakom, iznosi oko  $K=30$  m/dan (približno  $3,5 \cdot 10^{-4}$  m/s).

Međutim, na temelju istraživanjima i ispitivanjima iz 2008. i 2012. godine dane su poprilično drukčije procjene koeficijenta propusnosti  $K=10^{-2}$ - $10^{-3}$  m/s [15].

Također, nova istraživanja su pokazala da je sloj gline na mjestu buduće pregrade na Neretvi, koji se nalazi iznad dubokog vodonosnika, približne debljine 10 m (vidi prilog 1), a ne 20 i više metara kako je zaključeno iz istraživanja 60 ih godina. Naravno, i jedne i druge podatke treba uzeti s rezervom jer bi već s novom bušotinom dobili prilično drukčije rezultate. Primjer bušotine CSO-B-1 i CSO-B-2 [15].

### 5.2. Procjena parametara vodonosnika pod tlakom pomoću tzv. direktnih metoda

U tzv. direktne metode određivanja hidrauličke difuzivnosti priobalnih ograničenih i neograničenih vodonosnika spadaju "tidal efficiency" (TE) i "time lag" ( $\phi$ ) metoda. Hidraulički difuzivitet  $D$  [ $m^2/s$ ] vodonosnika se definira kao odnos transmisivnosti  $T$  [ $m^2/s$ ] i koeficijenta uskladištenja tzv. "storage"-a  $S$  [-] vodonosnika (tj.  $T/S$ ), a predstavlja brzinu propagacije mora u podzemlje odnosno vodonosnik.

Kao ulazni podaci, korišteni su podaci s vremenskim inkrementom od pet minuta kako bi se što bolje "uhvatile" promjene u razinama. Podaci koji su korišteni su: razine mora, Neretve i podzemne vode u obzervacijskim bušotinama (D1, D2 i D4) koje su izmjerene u sušnom periodu (18.09.2009. - 21.09.2009. godine) u trajanju malo manjem od tri dana (vidi točku 3.2. i 3.3.).

#### "Tidal efficiency"

"Tidal efficiency" se definira kao odnos amplitude fluktuacije podzemne vode  $A_{GW}$  [m] u vodonosniku i amplitude mora  $A_M$  [m] uzrokovanih morskim mjenama (plimom i osekom), odnosno, predstavlja mjeru koja pokazuje koliki je utjecaj mora na pojedinoj lokaciji u priobalnom vodonosniku [17].

U ograničenim vodonosnicima, utjecaj mora preko TE se osjeti i do nekoliko kilometara u kopnu, dok se kod neograničenih utjecaj proteže svega nekoliko stotina metara [1].

"Tidal efficiency" eksponencijalno opada s povećanjem udaljenosti od obale, a matematički se definira kao [1, 17]:

$$TE = e^{(-\frac{x}{x_0})} \quad (9)$$

gdje je:

$$x_0 = [\frac{Tt_0}{\pi S}]^{1/2} \quad (10)$$

x- udaljenost obzervacijske bušotine od obale [m]

$x_0$ - tzv. "referentna udaljenost" [m]

$t_0$ - period morske mijene [T]

Izvodom iz jednadžbe 10, hidraulički difuzivitet se može pisati kao:

$$D = \frac{\pi x_0^2}{t_0} \quad (11)$$

Da bi se dobio što točniji izračun "tidal efficiency"-a, umjesto odnosa samo amplituda podzemne vode i mora, korišteni su svi podaci, tj. "tidal efficiency" je za sve tri lokacije izračunat kao odnos standardne devijacije amplituda podzemne vode pomaknute u horizontalnom smjeru za "time lag" ( $\sigma_{A_{GW}}^{pom}$ ) i standardne devijacije amplituda mora ( $\sigma_{AM}$ ):

$$TE = \frac{\sigma_{A_{GW}}^{pom}}{\sigma_{AM}} \quad (12)$$

Nakon proračuna "tidal efficiency"-a, referentna udaljenost ( $x_0$ ), je za sve tri lokacije određena upotrebom jednadžbe (9). Konačno, hidraulički difuzivitet (D) je izračunat upotrebom jednadžbe (11).

Udaljenosti (x) obzervacijske bušotine od uzroka osciliranja podzemne vode su odabrane na slijedeći način:

$x_1$ - udaljenost pijezometra D1 od mora ( $x_1=100$  m)

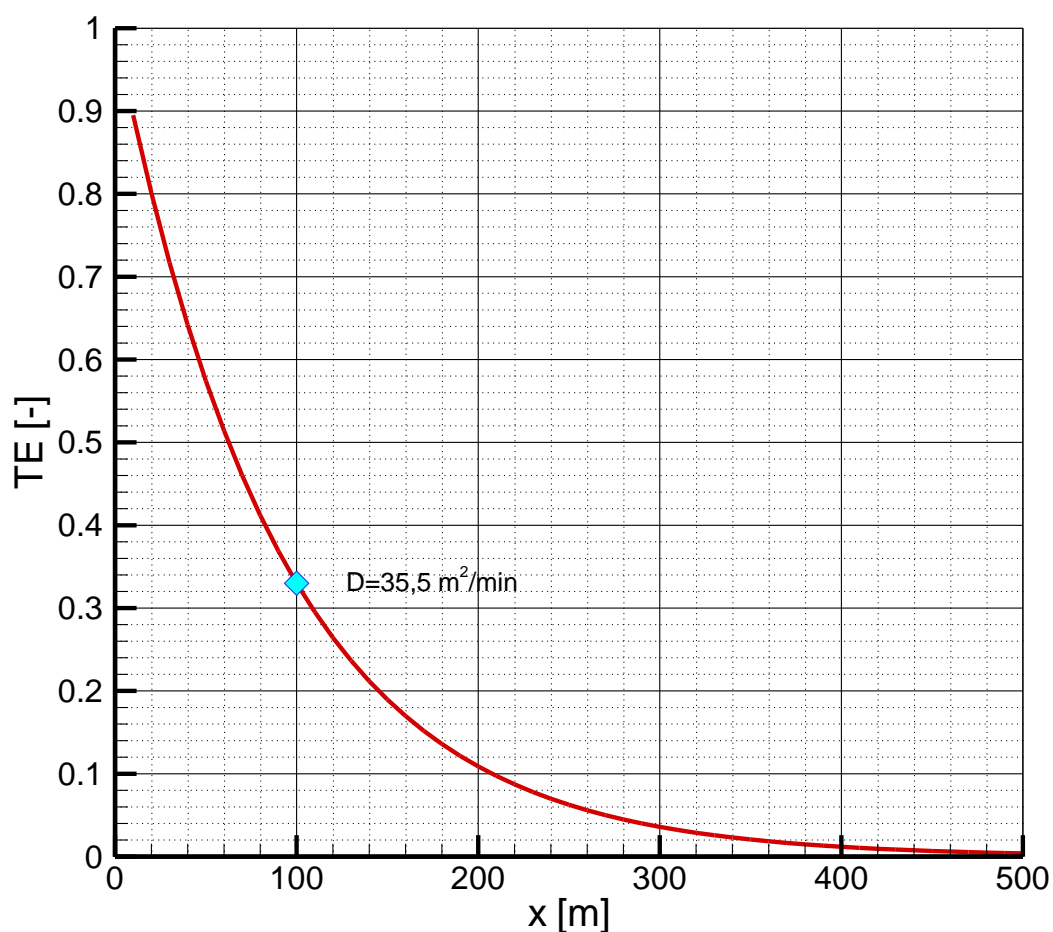
$x_2$ - udaljenost pijezometra D2 od Neretve ( $x_2=1250$  m)

x3- udaljenost pijezometra D4 od krša ( $x_3=1700$  m)

Udaljenost  $x_2$  je odabrana u odnosu na Neretvu jer u usporedbi s pijezometrom D1, TE pijezometra D2 neznatno opadne, a udaljenost D2 od mora je veća od 3 km. Iz ovog zaključka može se pretpostaviti da postoji veza Neretva-D2 odnosno, Neretva-donji vodonosnik.

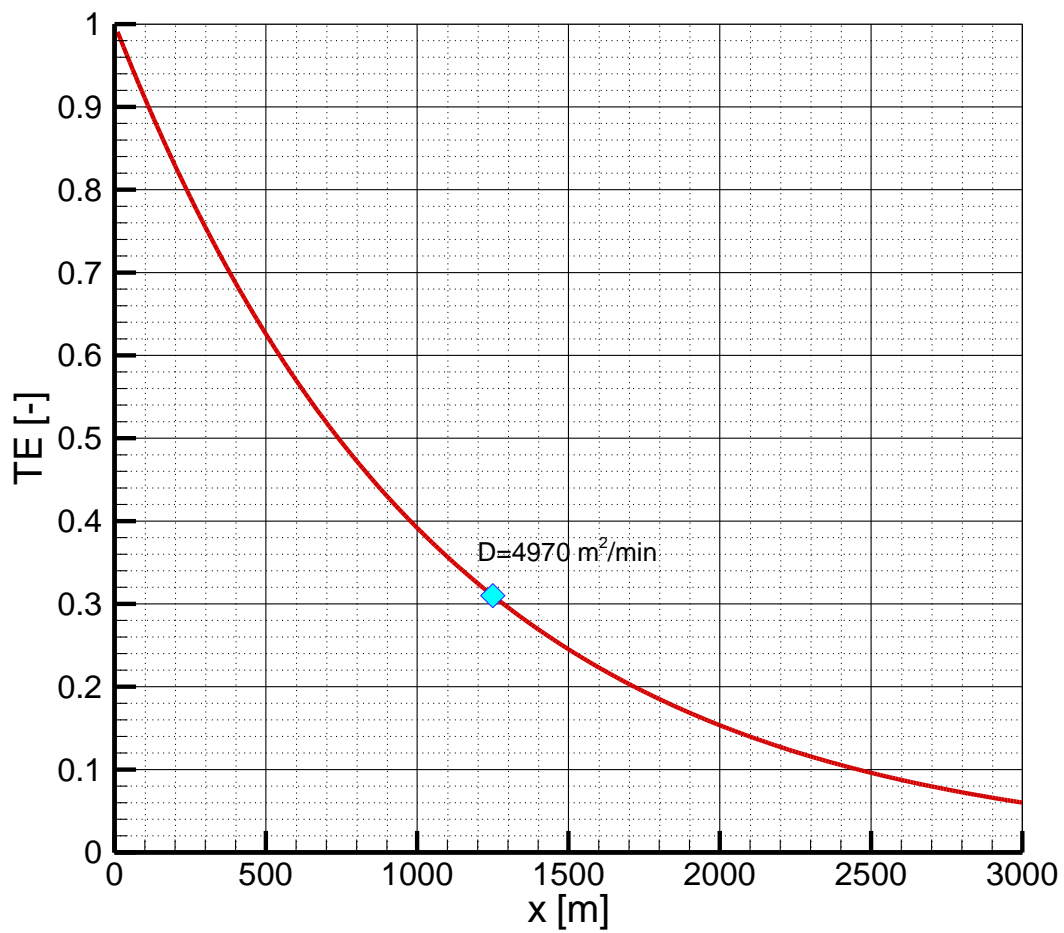
Udaljenost  $x_3$  je odabrana u odnosu na krški masiv koji omeđuje dolinu s južne strane, iz istog razloga kao i udaljenost  $x_2$ . Usmenim putem došlo se do podatka da je voda podno tog krškog masiva, u kanalu, zaslanjena.

Rezultati proračuna dani su na donjim slikama:



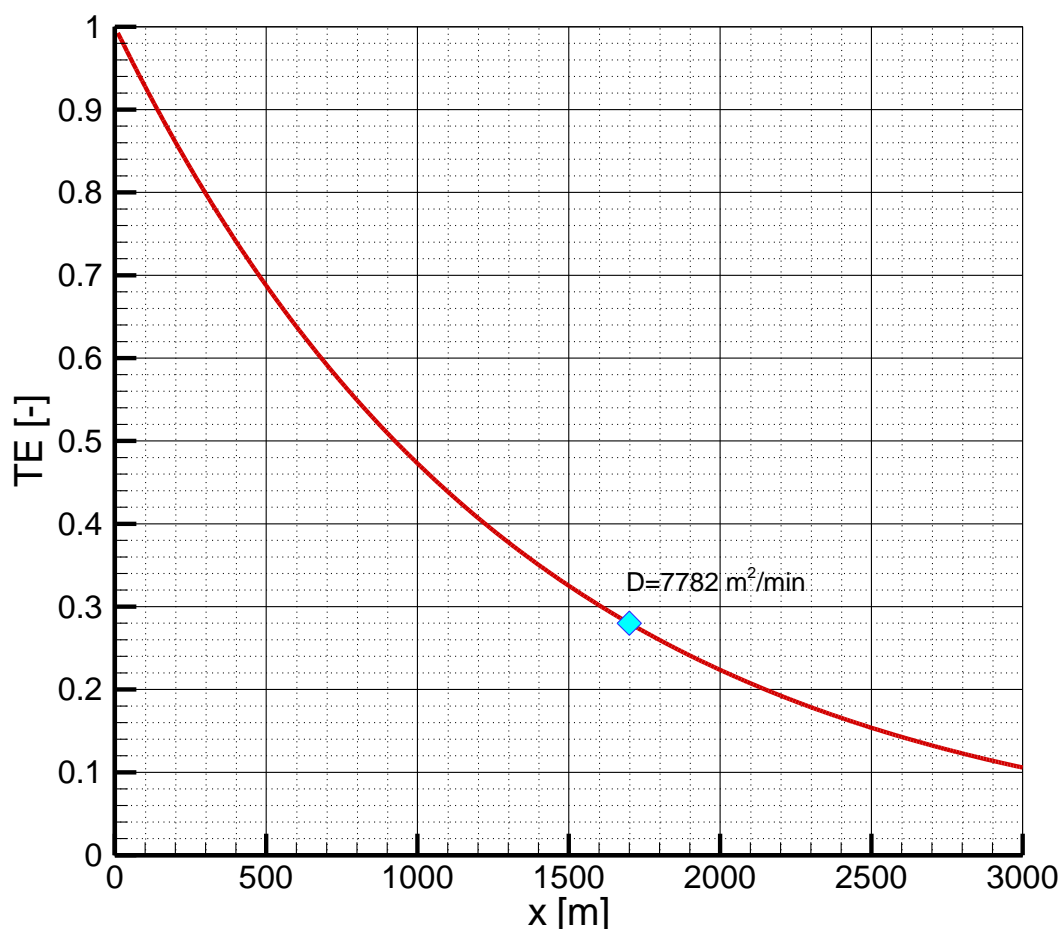
**Slika 5.2.** Prikaz opadanja TE-a u ovisnosti o udaljenosti x za pijezometar D1

Iz jednadžbe (12), dobiven je  $TE=0.33$ , a iz jednadžbe (11), izračunat je  $D=35.5$  m<sup>2</sup>/min (vidi gornju sliku).



**Slika 5.3.** Prikaz opadanja TE-a u ovisnosti o udaljenosti x za pijezometar D2

Iz jednadžbe (12), dobiven je  $TE=0.31$ , a iz jednadžbe (11), izračunat je  $D=4970 \text{ m}^2/\text{min}$  (vidi gornju sliku).



**Slika 5.4.** Prikaz opadanja TE-a u ovisnosti o udaljenosti x za piježometar D4

Iz jednadžbe (12), dobiven je  $TE=0.28$ , a iz jednadžbe (11), izračunat je  $D=7782 \text{ m}^2/\text{min}$  (vidi gornju sliku).

Proračun koeficijenta propusnosti iz dobivenog hidrauličkog difuziviteta, izvršen je uz procijenjenu vrijednost koeficijenta uskladištenja  $S$ , tzv. "storage"-a i debljine vodonosnika pod tlakom ( $b$ ), koji je procijenjen na  $b=60 \text{ m}$ . Vrijednost "storage"-a je procijenjen na  $S=0.01$ , a dobivena je kao vrijednost koja se nalazi između preporučenih vrijednosti "storage"-a za ograničeni, odnosno neograničeni vodonosnik [4].

Naime, kako je jasno da zaslanjena voda (more) dolazi iz donjeg u gornji vodonosnik zbog razlike potencijala, ovaj vodonosnik ne možemo smatrati čisto ograničenim, već polu ograničenim te je iz tog razloga uzeta spomenuta vrijednost "storage"-a.

Vrijednosti koeficijenta propusnosti vodonosnika pod tlakom u ovisnosti o lokaciji piježometara, izračunati "tidal efficiency" metodom, dani su u donjoj tablici:

Pijezometar	Udaljenost x [m]	TE [-]	D [m <sup>2</sup> /min]	K [m/min]	K [m/s]
D1	100	0,33	35,5	5,92E-03	9,86E-05
D2	1250	0,31	4970	8,28E-01	1,38E-02
D4	1700	0,28	7782	1,30E+00	2,16E-02

**Tablica 5.1.** Prikaz koeficijenta propusnosti (K) izračunatog "tidal efficiency" metodom

### "Time lag"

"Time lag" predstavlja vremensku razliku između lokalnog ekstrema (dol ili brijeg) fluktuacije mora i lokalnog ekstrema fluktuacije podzemne vode (vidi sliku 5.5.), odnosno, predstavlja vrijeme koje je potrebno da se bilo kakva promjena u razini mora osjeti u podzemnoj vodi na nekoj lokaciji u priobalju [17].

"Time lag" izraz se izražava s [1, 17]:

$$t_{lag} = xt_0 / (2\pi x_0) \quad (13)$$

Proračun "time lag"-a je proveden za vremenski period od dva dana, na način da je najprije određen nivo podzemne vode pomaknut vertikalno, tako da ima istu srednju vrijednost kao i fluktuacije mora. Korišten je slijedeći izraz [1, 17]:

$$h'(t) = H_{sre} + [h(t) - h_{sre}] / TE \quad (14)$$

$h'(t)$ -vertikalno pomaknuta razina podzemne vode u vrijeme (t) i uvećana sa TE [m n.m.]

$H_{sre}$  - srednja razina mora u periodu obzervacije [m n.m.]

$h(t)$  - izmjerena razina podzemne vode u vrijeme t [m n.m.]

$h_{sre}$  - srednja razina podzemne vode u periodu obzervacije [m n.m.]

Koristeći petominutne vremenske serije vertikalno pomaknute podzemne vode ( $h'(t)$ ) i razine mora, "time lag" je za sve tri lokacije obzervacijskih bušotina izračunat metodom najmanjih kvadrata pogreške (vidi točku 4.1), koristeći slijedeću formulu:

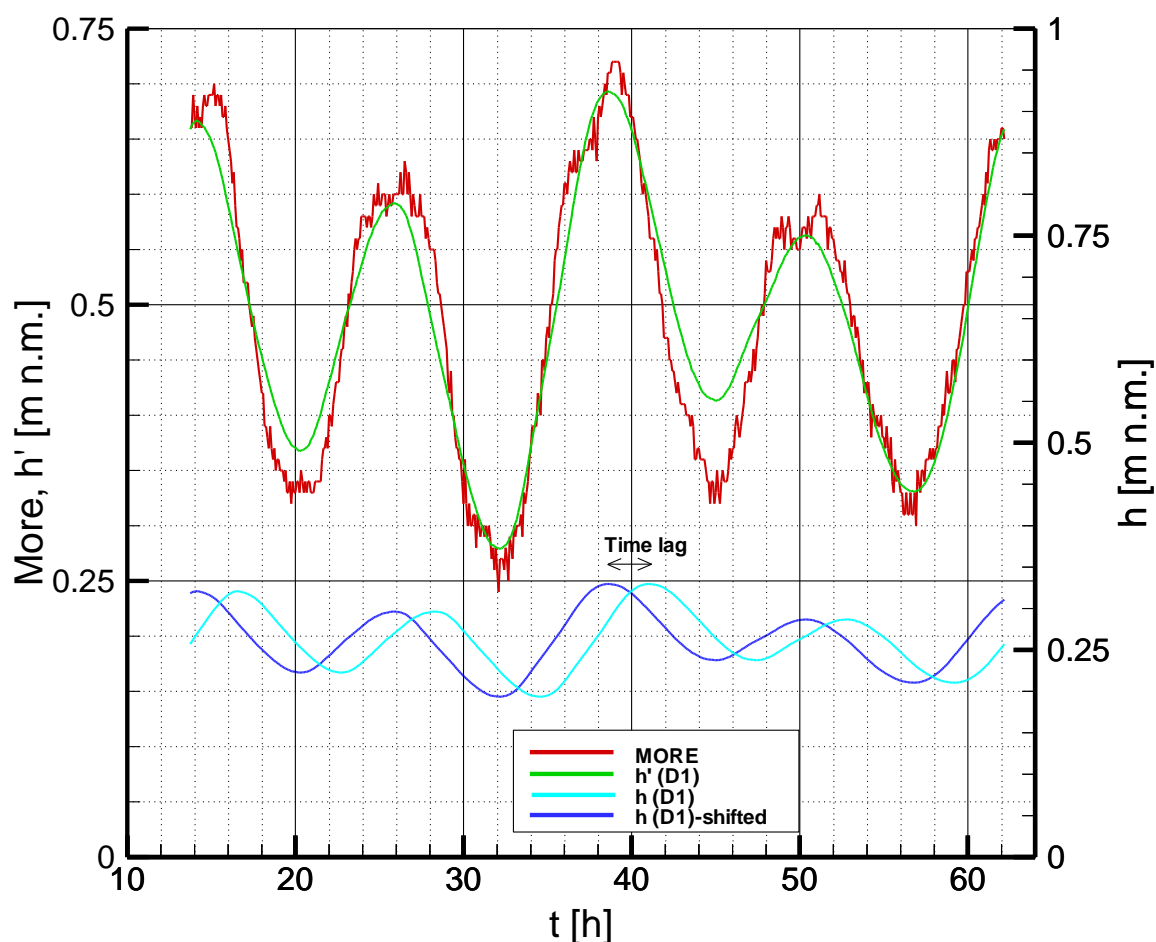
$$\text{Min } \sum [h'(t) - H(t - \varphi)]^2 \quad (15)$$

Postupak je vršen na način, da je razina podzemne vode u svakoj seriji pomicala horizontalno (ulijevo) za pet minuta te je za svaku pojedinu seriju računat kvadrat pogreške koristeći jednadžbu (15). Iz serije podataka u kojoj je kvadrat pogreške minimalan, određen je "time lag" ( $\phi$ ) (vidi sliku 5.6).

Odredivši "time lag" na gore prikazani način, očigledno je da se iz jednadžbe (13) može odrediti vrijednost referentne udaljenosti za sve tri lokacije. Upotrebom istih udaljenosti ( $x$ ) kao i kod TE metode te upotrebom jednadžbe (11) određena je vrijednost  $D$ .

U nastavku su prikazani rezultati proračuna za svaki pijezometar:

D1:



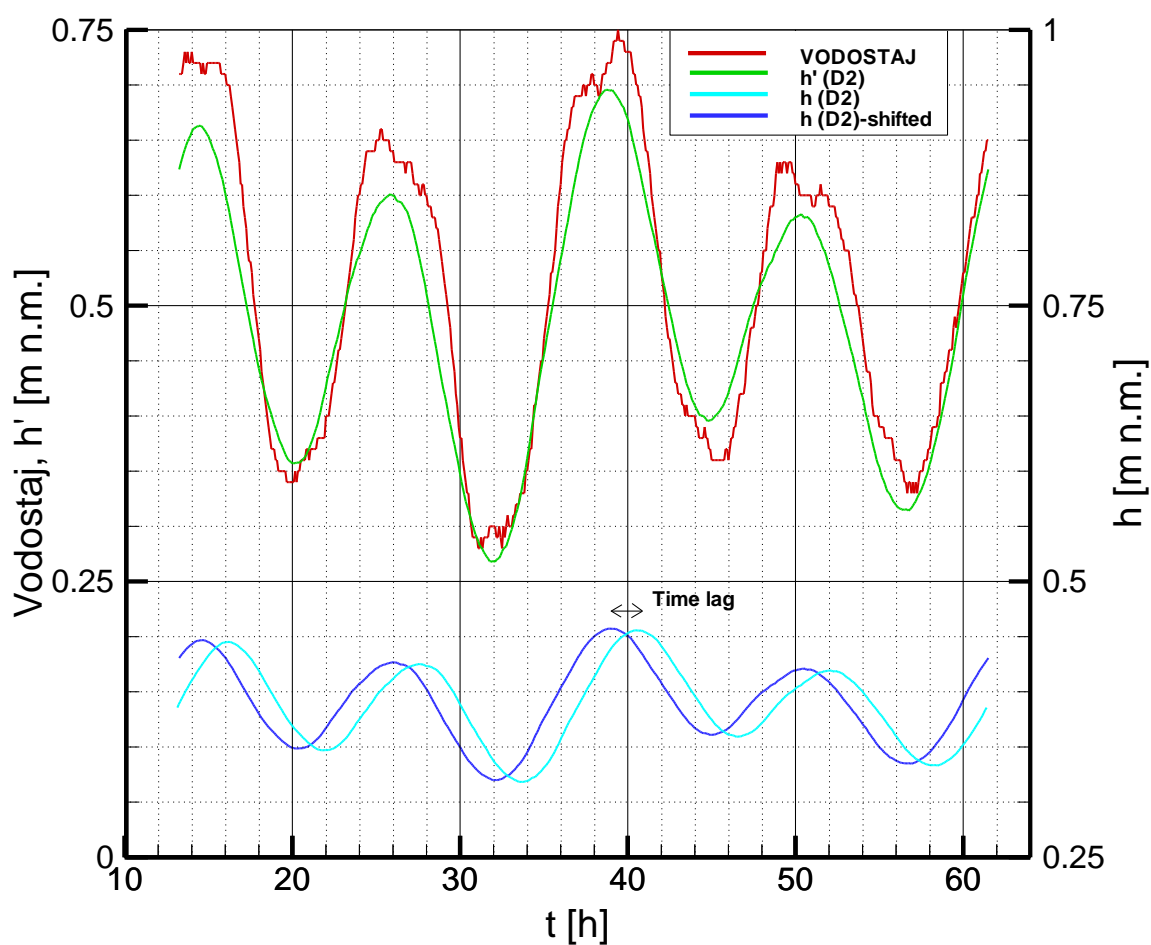
**Slika 5.5.** Prikaz,  $h$  (D1): razine vode u D1,  $h$  (D1)-shifted: razine vode u D1 korektno pomaknute za „time lag“,  $h'$  (D1): razine vode u D1 pomaknute vertikalno, tako da srednja razina D1 odgovara srednjoj razini izmjerene mora, horizontalno za „time lag“ te pojačana za TE i mora



Proračunom je dobivena vrijednost "time lag"-a od 145 minuta, dok je regresijskom analizom između mora i modificiranog stanja podzemne vode u D1, korektno pomaknutog za "time lag", dobiven koeficijent korelacije  $r=0.97$ .

Iz jednadžbi (13) i (11), za  $x=100$  m i  $t_0=12$  h, određen je hidraulički difuzivitet  $D=27$  m<sup>2</sup>/min.

D2:

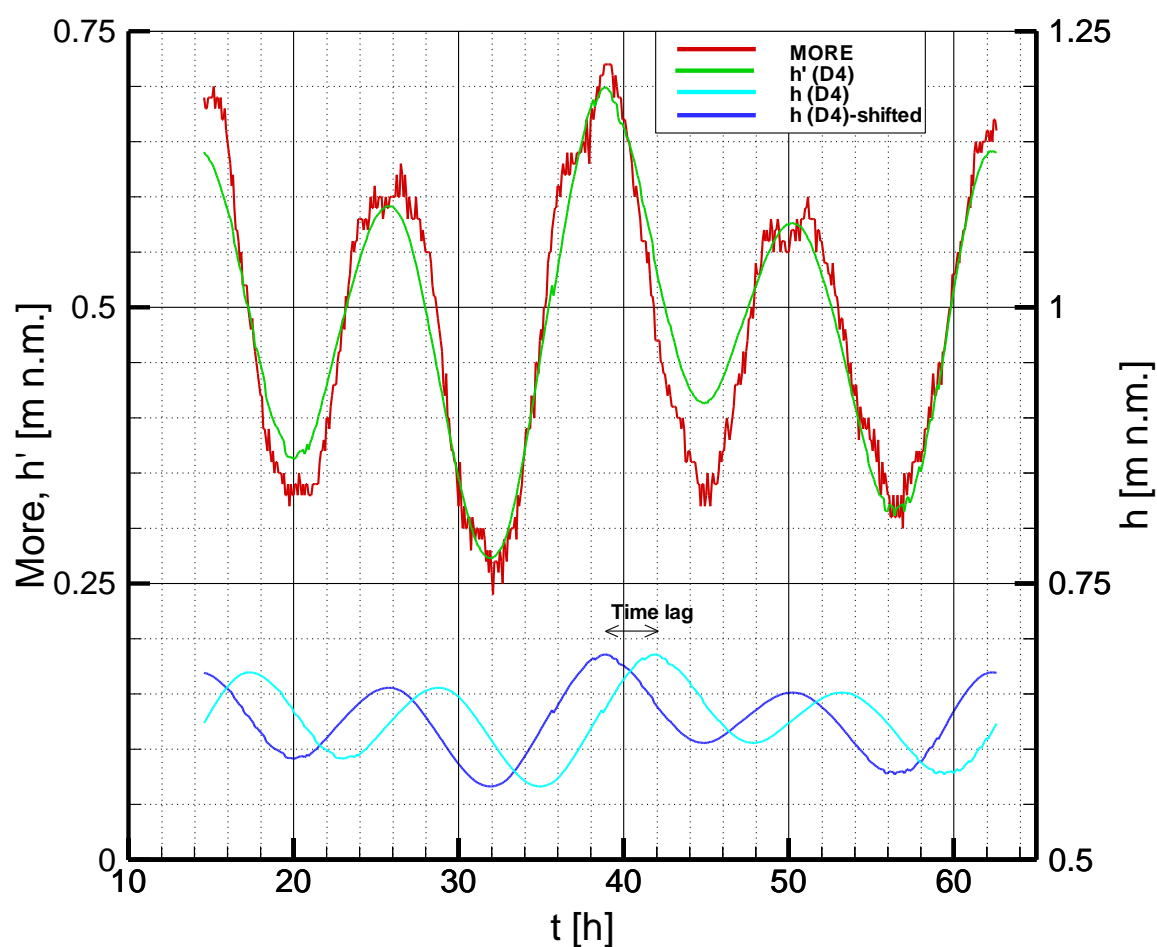


**Slika 5.6.** Prikaz,  $h(D2)$ : razine vode u D2,  $h(D2)$ -shifted: razine vode u D2 korektno pomaknute za "time lag",  $h'(D2)$ : razine vode u D2 pomaknute, vertikalno tako da srednja razina D2 odgovara srednjoj razini izmjerenoj vodostaju u Neretvi, horizontalno za "time lag" te pojačana za TE i vodostaj Neretve

Proračunom je dobivena vrijednost "time lag"-a od 100 minuta, dok je regresijskom analizom između vodostaja i modificiranog stanja podzemne vode u D2, korektno pomaknutog za "time lag", dobiven koeficijent korelacije  $r=0.97$ .

Iz jednadžbi (13) i (11), za  $x=1250$  m i  $t_0=12$  h, određen je hidraulički difuzivitet  $D=8952$   $\text{m}^2/\text{min}$ .

D4:



**Slika 5.7.** Prikaz,  $h$  (D4): razine vode u D4,  $h$  (D4)-shifted: razine vode u D4 korektno pomaknute za „time lag“,  $h'$  (D4): razine vode u D4 pomaknute vertikalno, tako da srednja razina D4 odgovara srednjoj razini izmjerene mora, horizontalno za "time lag" te pojačana za TE i mora

Proračunom je dobivena vrijednost "time lag"-a od 180 minuta, dok je regresijskom analizom između vodostaja i modificiranog stanja podzemne vode u D4, korektno pomaknutog za "time lag", dobiven koeficijent korelacije  $r=0.96$ .

Iz jednadžbi (13) i (11), za  $x=1700$  m i  $t_0=12$  h, određen je hidraulički difuzivitet  $D=5110$  m<sup>2</sup>/min.

Iz gornjih slika je vidljivo da se u piježometarskim stanjima piježometara ne pojavljuju "zubovi" (nagle promjene) kao u moru, već je stanje prilično "glatko". Razlog tome je hidraulički difuzivitet (D), odnosno njegova nedovoljno velika vrijednost. Drugim riječima, medij usporava poremećaj (oscilacije mora) te se on dok dođe do piježometra "ispegla", tj. postane gladak.

Ipak, usporedbom piježometra D4 sa piježometrima D1 i D2, vidljivo je da se kod piježometra D4 počinju pojavljivati "zubovi", što je, kako je gore već rečeno, posljedica poprilično velike vrijednosti hidrauličkog difuziviteta.

Vrijednosti koeficijenta propusnosti (K) vodonosnika pod tlakom u ovisnosti o lokaciji piježometara, izračunati "time lag" metodom, na isti način kao i kod "tidal efficiency" metode, dani su u donjoj tablici:

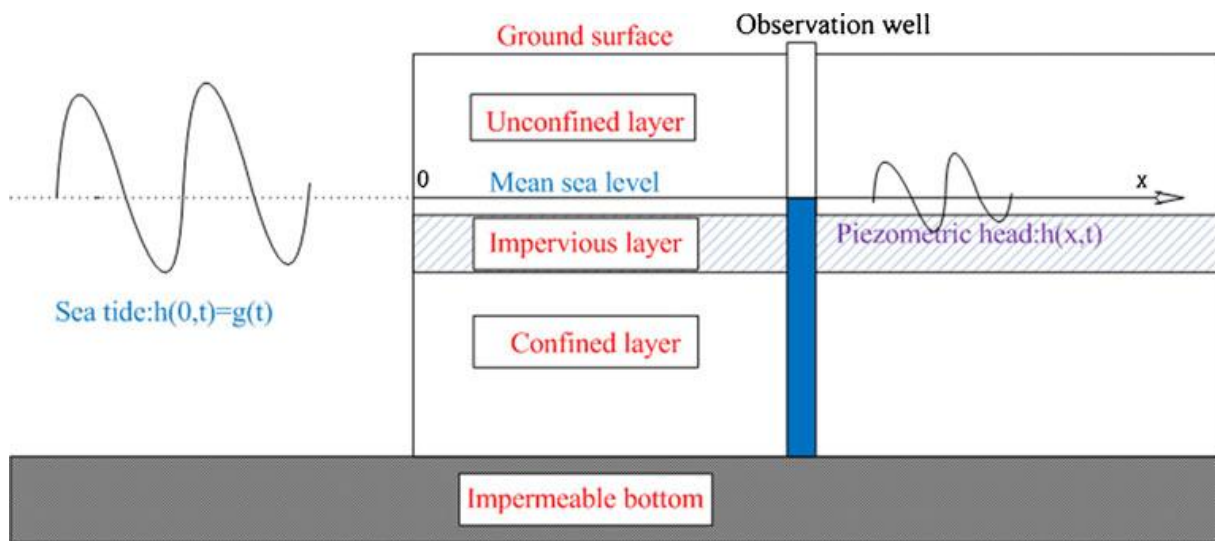
Piježometar	Udaljenost x [m]	Time lag [min]	D [m <sup>2</sup> /min]	K [m/min]	K [m/s]
D1	100	145	27	4,50E-03	7,50E-05
D2	1250	100	8952	1,49E+00	2,49E-02
D4	1700	180	5110	8,52E-01	1,42E-02

**Tablica 5.2.** Prikaz koeficijent propusnosti (K) izračunatog "time lag" metodom

### 5.3. Procjena parametara donjeg vodonosnika pomoću matematičkog modela

Cilj ovog rješenja je da se pomoću matematičkog modela što bolje opišu fluktuacije podzemne vode u vodonosniku pod tlakom, nastale uslijed fluktuacija mora (plime i oseke), da bi se na temelju njih moglo procijeniti parametre vodonosnika (D, odnosno K) te ih usporediti s prethodnim metodama i izvršenim istraživanjima i ispitivanjima. Radi jednostavnosti, pretpostavljeno je da se radi o vertikalnoj i ravnoj obali te 1D tečenju [16].

Konceptualni model prikazan je na slici 5.10..



Slika 5.8. Konceptualni model [16]

Treba napomenuti da ovdje nije uzet u obzir protok iz donjeg u gornji vodonosnik ( $Q_D^G$ ), kao ni eventualni utjecaj Neretve, već je pretpostavljeno da se radi o ograničenom sloju.

Kao polazna jednačba za određivanje fluktuacija podzemne vode u 1D uslijed fluktuacija mora u ograničenom vodonosniku, uzeta je tzv. Bussinesq-ova jednačba [16]:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \quad x > 0, t > 0, \quad (16)7$$

s rubnim uvjetima:

$$h(0,t) = g(t), \quad t > 0 \text{ i} \quad (17)$$

$$h(+\infty,0) = 0, \quad t > 0, \quad (18)$$

i početnim uvjetom:

$$h(x,0) = 0, \quad x > 0 \quad (19)1$$

gdje su:

$g(t)$  - izmjerene fluktuacije mora

$h(x,t)$  - modelska pijeziometarska visina podzemne vode

Za ovaj model upotrebljeno je analitičko rješenje (vidi jed. (20)) fluktuacije podzemne vode, koje je dobiveno upotrebom Fourierove sinusne transformacije (Bracewell 1978), a koje se

bazira na stvarnoj fluktuaciji morske razine, a ne na linearnoj superpoziciji sinusnih komponenti [16].

$$h(x,t) = \frac{\sqrt{\frac{1}{D}} x}{2\sqrt{\Pi}} \int_0^t g(\gamma)(t-\gamma)^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D(t-\gamma)}\right) d\gamma, \quad (20)$$

gdje su:

$g(\gamma)$  – izmjerene fluktuacije mora,

$\gamma$  – relativno vrijeme,  $t \in [0, t)$ .

Prednost upotrebe stvarno izmjerenih vrijednosti fluktuacije mora je tim veći kad se zna da fluktuacije mora nisu sastavljene samo od periodičkih komponenti, već i od stohanstičkih i trendovskih komponenti (Brockwell and Davis 2006) [16].

Detaljniji prikaz i izvod jednadžbe (20) koja zadovoljava jednadžbe (16), (17), (18) i (19) može se pronaći u [16].

Modelsko rješenje  $h(x,t)$  je izvedeno u programskom jeziku "Fortran f90", na način da se minimizirao kvadrat pogreške između analitičkog (modelskog) rješenja nivoa podzemne vode kroz vrijeme i obzervacijskog, za pijezometre D1, D2 i D4:

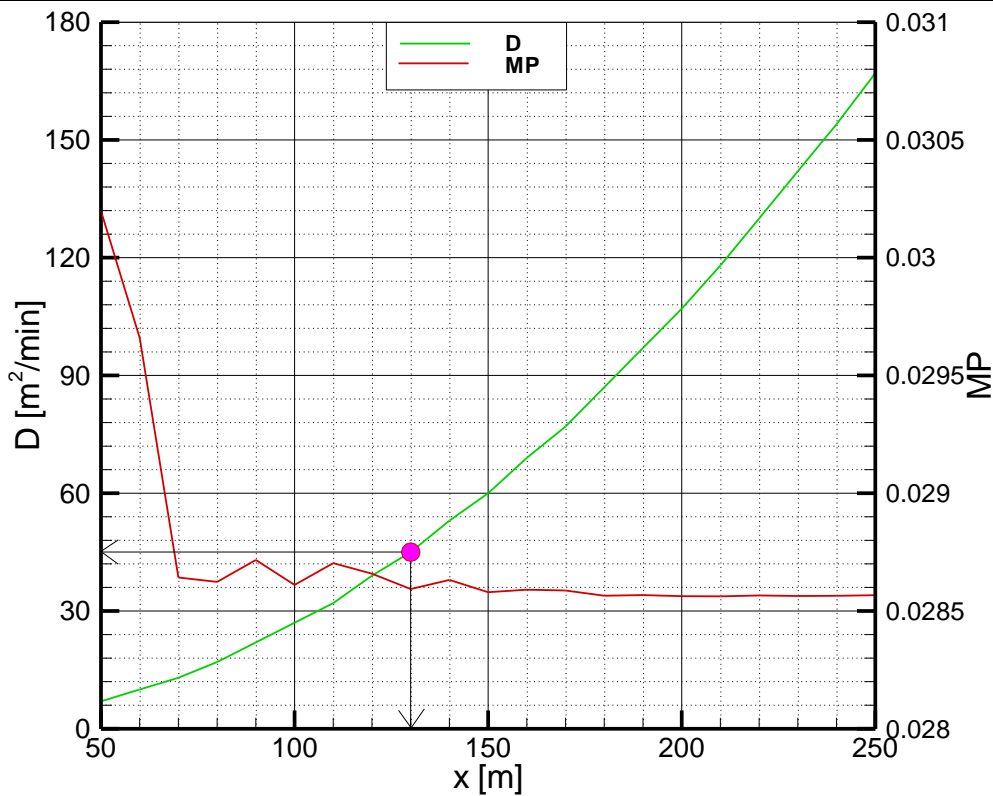
$$\text{Min}\Sigma[h(x,t) - h_{D_i}^{\text{obzervacij}}(x,t)]^2, \quad i = 1, 2 \text{ i } 4. \quad (21)$$

Rješenje je traženo u dvije dimenzije, tj. rješenje jednadžbe (11) je određeno za kombinaciju dviju nepoznanica "x" – udaljenost pijezometra od obale i "D" – hidraulički difuzivitet vodonosnika pod tlakom, koje za postavljeni kriterij, jednadžba (21), daju najbolje rješenje.

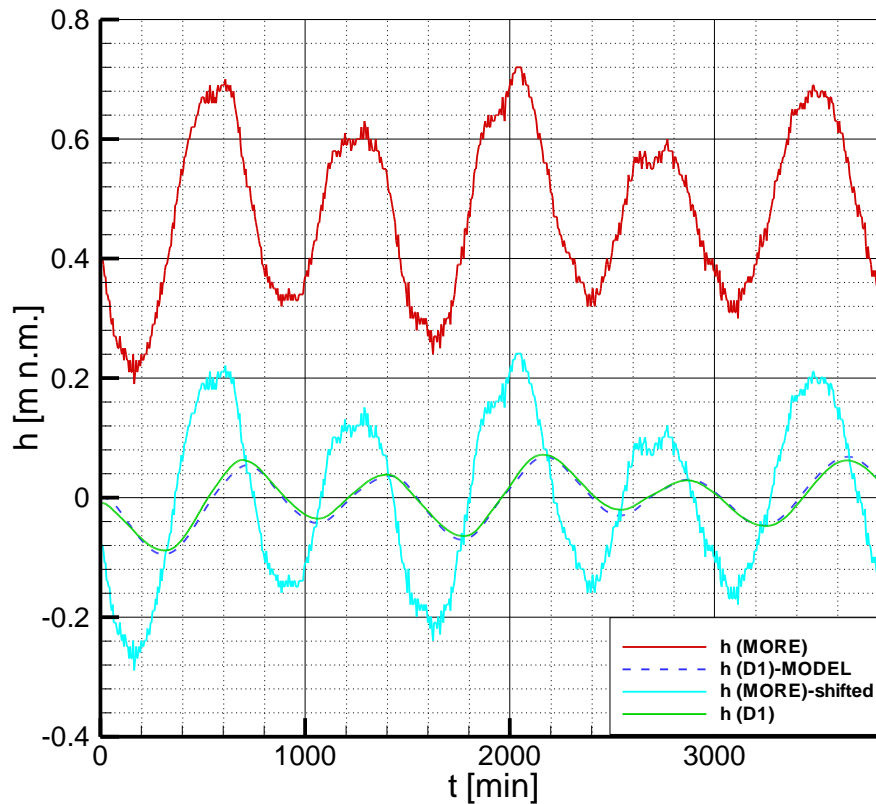
Rješenja za pojedine pijezometre su dana u nastavku:

D1:

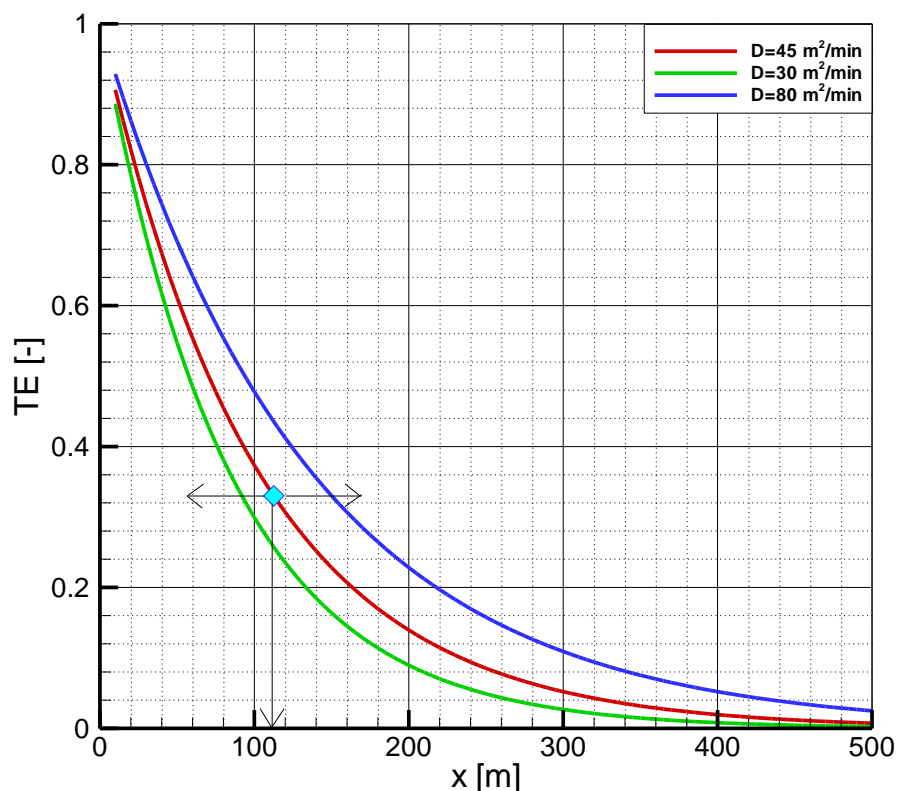
Dobivena su rješenja:  $x=130$  m i  $D=45$  m<sup>2</sup>/min (vidi slike 5.10. i 5.11.).



Slika 5.9. Procjena hidrauličkog difuziviteta D za piježometar D1 s obzirom na minimum pogreške MP



Slika 5.10. Usporedba izmjerenog piježometarskog stanja i modelskog rješenja



Slika 5.11. Procjena intervala unutar kojeg se očekuju parametri  $x$  i  $D$  za piježometar D1

Iz hidrauličkog difuziviteta  $D=45 \text{ m}^2/\text{min}$  je na isti način kao i kod direktnih metoda (vidi točku 5.2.) izračunat koeficijenta propusnosti  $K=1.25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ .

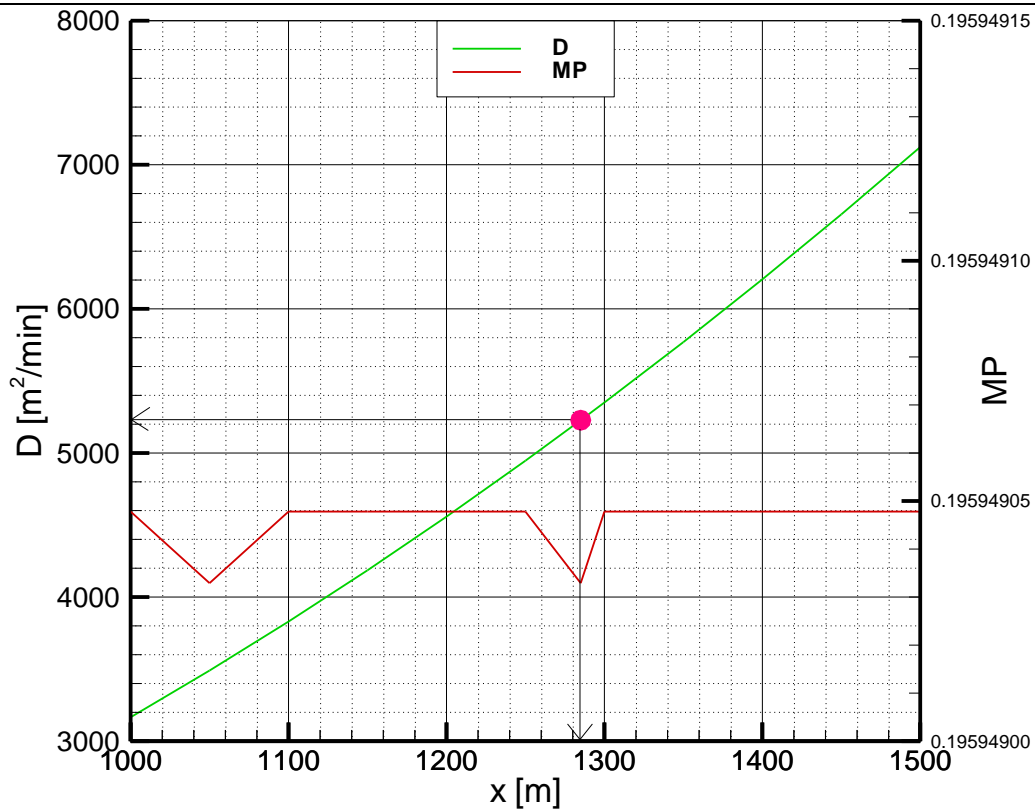
Na slici 5.11. je prikazan interval hidrauličkog difuziviteta,  $D=30\text{-}80 \text{ m}^2/\text{min}$ , unutar kojeg se smatra da se nalaziti stvarni  $D$  vodonosnika pod tlakom u okolici piježometra D1, a koji je određen na temelju slike 5.10. i fizičkih mogućnosti.

Za  $D=30 \text{ m}^2/\text{min}$ , dobiva se  $K=8.33 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ , dok se za  $D=80 \text{ m}^2/\text{min}$  dobiva  $K=2.22 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ .

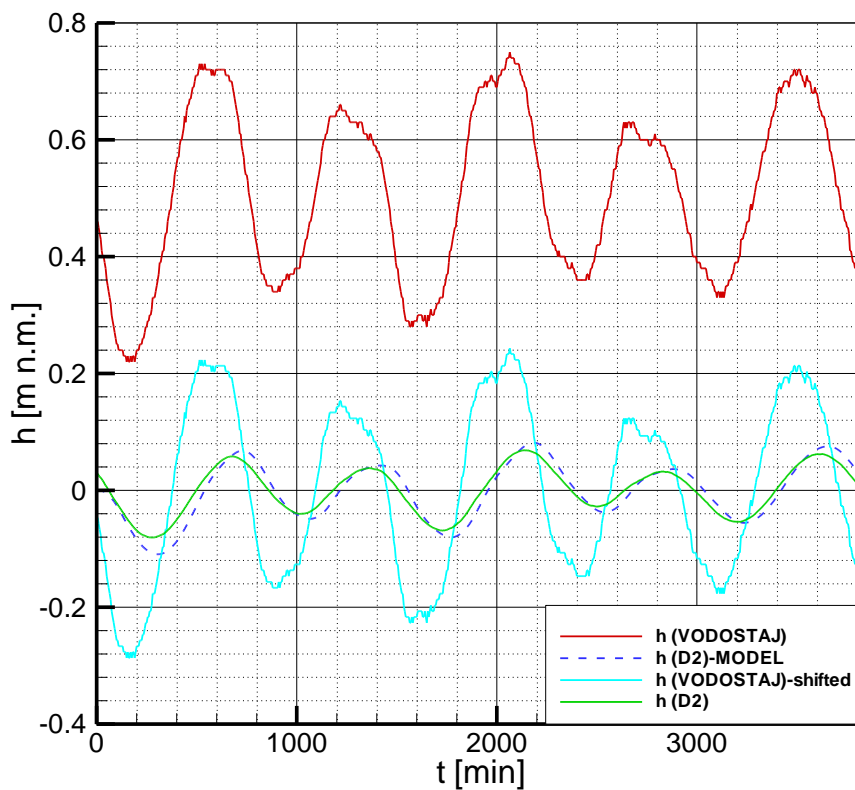
Iz ovog proizlazi da se stvarni  $K$  u okolici piježometra D1 nalazi u intervalu  $K=8.33 \cdot 10^{-5} - 2.22 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ .

D2:

Dobivena su rješenja:  $x=1285 \text{ m}$  i  $D=5227 \text{ m}^2/\text{min}$  (vidi slike 5.13. i 5.14.).

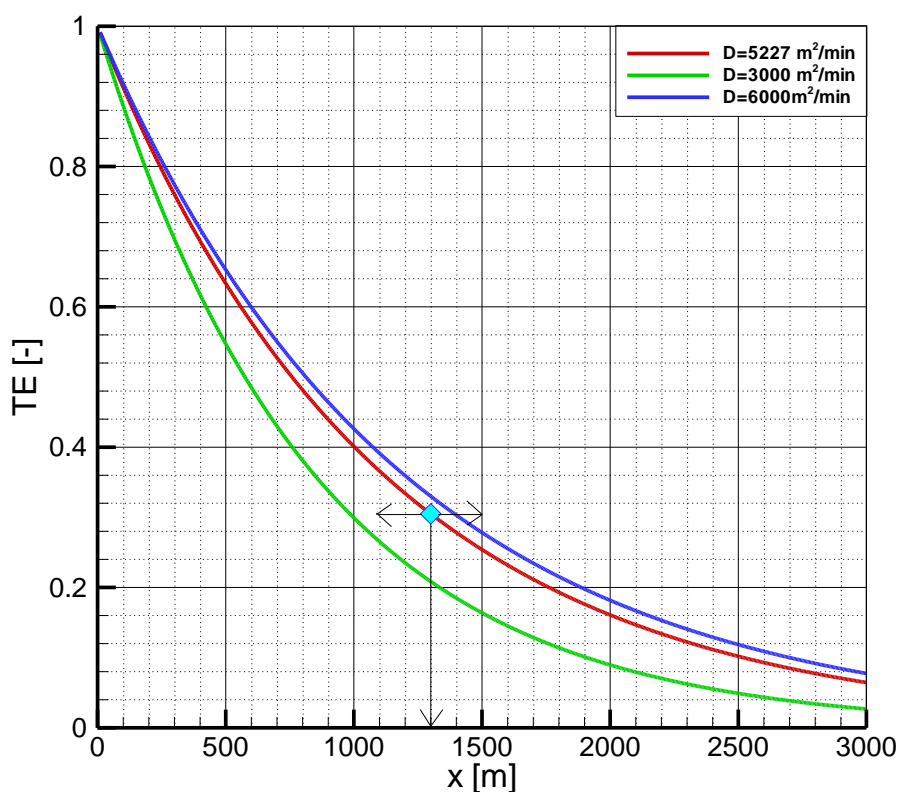


Slika 5.12. Procjena hidrauličkog difuziviteta ( $D$ ) za piježometar D2 s obzirom na minimum pogreške ( $MP$ )



Slika 5.13. Usporedba izmjerenog piježometarskog stanja u D2 i modelskog rješenja





**Slika 5.14.** Procjena intervala unutar kojeg se očekuju parametri  $x$  i  $D$  za piježometar D2

Na temelju hidrauličkog difuziviteta  $D=5227 \text{ m}^2/\text{min}$ , izračunat je koeficijenta propusnosti  $K=1.45 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ .

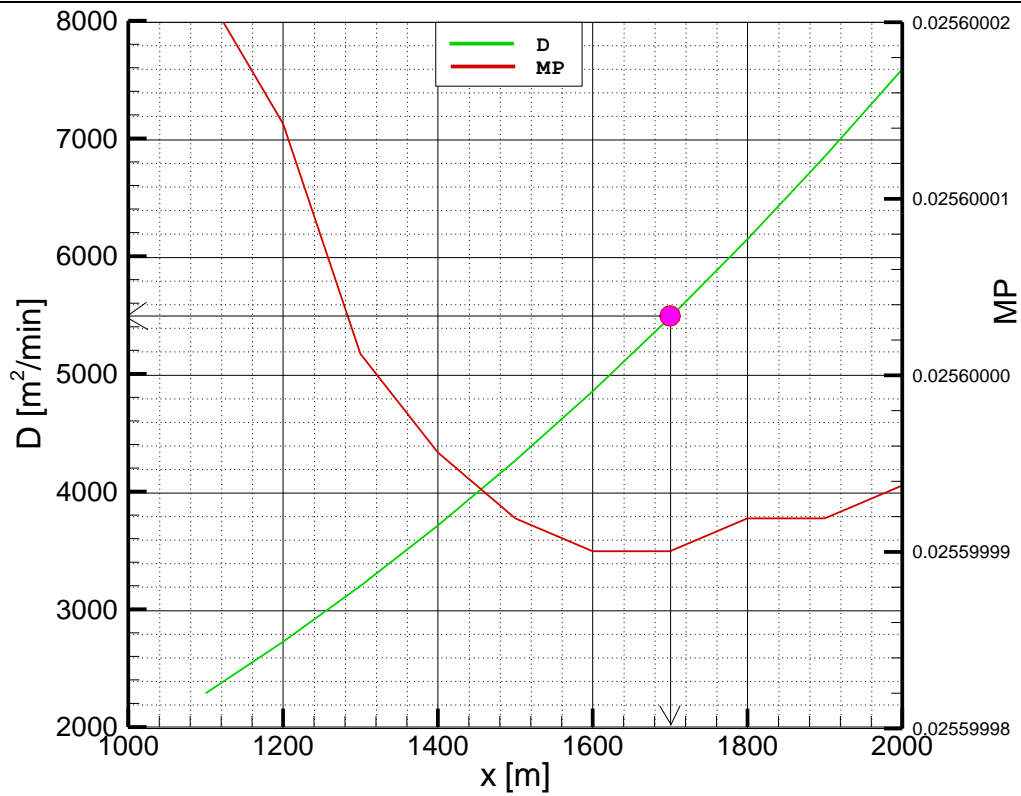
Na slici 5.14. je prikazan interval hidrauličkog difuziviteta  $D$  ( $D=3000\text{-}6000 \text{ m}^2/\text{min}$ ) unutar kojeg se smatra da se nalaziti stvarni  $D$  donjeg vodonosnika u okolici piježometra D2, a koji je određen na temelju slike 5.13. i fizičkih mogućnosti.

Za  $D=3000 \text{ m}^2/\text{min}$  dobiva se  $K=8.33 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , dok se za  $D=6000 \text{ m}^2/\text{min}$  dobiva  $K=1.67 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ .

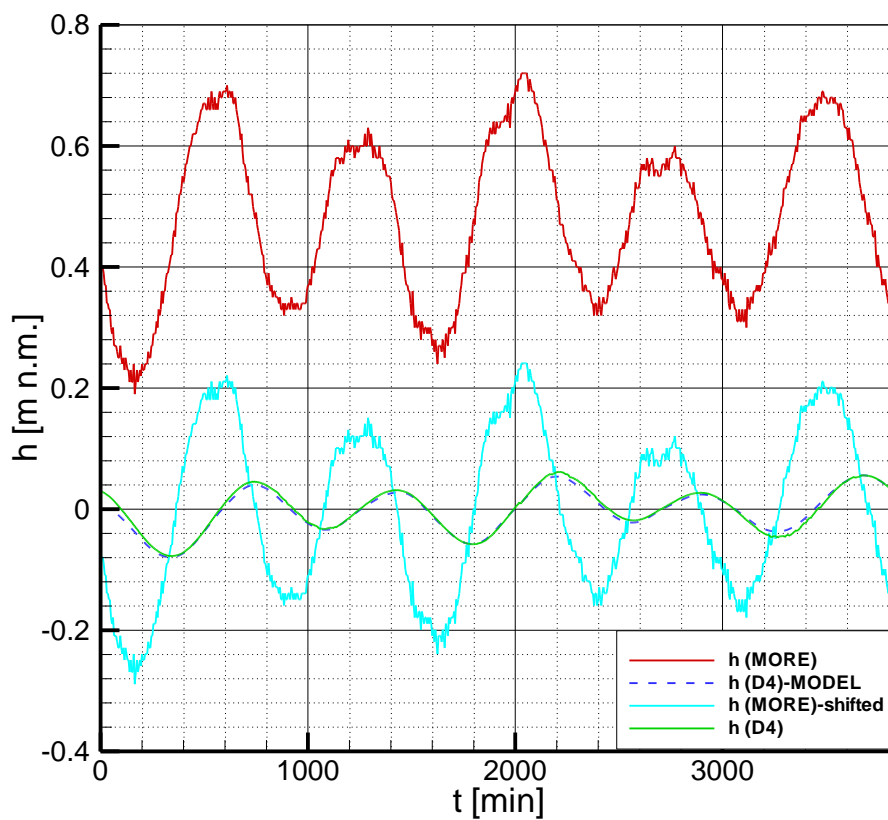
Iz ovog proizlazi da se stvarni  $K$  u okolici piježometra D1 nalazi u intervalu  $K=8.33 \cdot 10^{-3} - 1.67 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ .

D4:

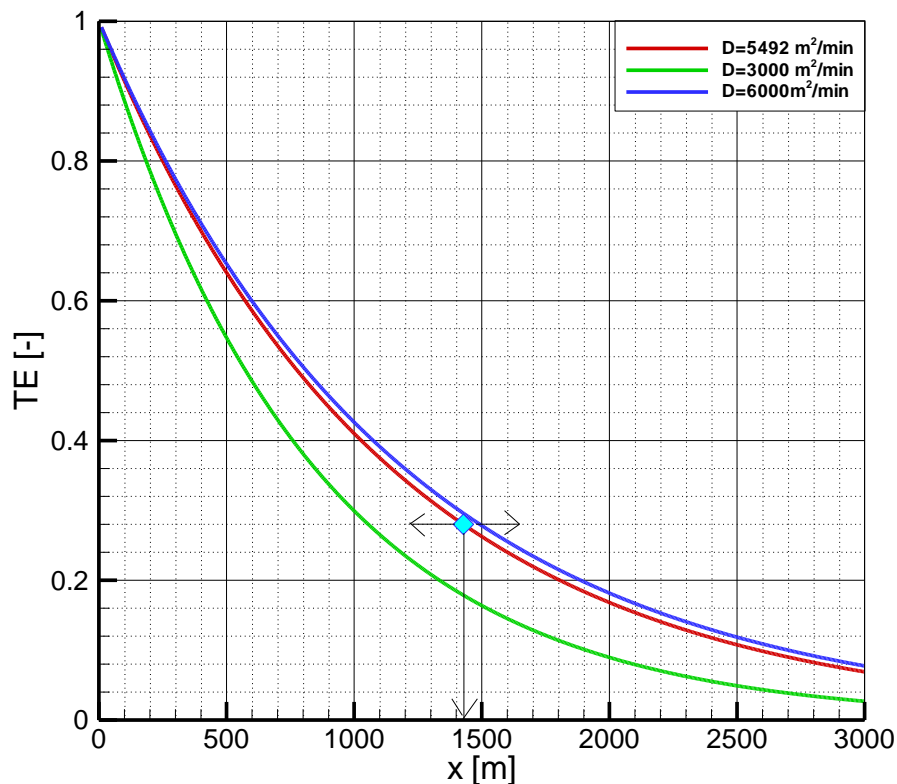
Dobivena su rješenja:  $x=1700 \text{ m}$  i  $D=5492 \text{ m}^2/\text{min}$  (vidi slike 5.16. i 5.17.).



Slika 5.15. Procjena hidrauličkog difuziviteta ( $D$ ) za piježometar D4 s obzirom na minimum pogreške ( $MP$ )



Slika 5.16. Usporedba izmjerenog piježometarskog stanja u D4 i modelskog rješenja



**Slika 5.17.** Procjena intervala unutar kojeg se očekuju parametri  $x$  i  $D$  za piježometar D4

Na temelju hidrauličkog difuziviteta  $D = 5492 \text{ m}^2/\text{min}$ , izračunat je koeficijenta propusnosti  $K = 1.53 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ .

Na slici 5.17. je prikazan interval hidrauličkog difuziviteta  $D$  ( $D = 3000 - 6000 \text{ m}^2/\text{min}$ ) unutar kojeg se smatra da se nalaziti stvarni  $D$  vodonosnika pod tlakom u okolici piježometra D4, a koji je određen na temelju slike 5.16. i fizikalnih mogućnosti. Vidljivo je kako odabrani interval odgovara intervalu za piježometar D2, a što je razumljivo s obzirom da se za oba piježometra dobio podjednaki  $D$ .

#### 5.4. Usporedba rezultata i njihova interpretacija

Pijezometar	Udaljenost x [m]	TE [-]	D [m <sup>2</sup> /min]	K [m/min]	K [m/s]
D1	100	0,33	35,5	5,92E-03	9,86E-05
D2	1250	0,31	4970	8,28E-01	1,38E-02
D4	1700	0,28	7782	1,30E+00	2,16E-02

Pijezometar	Udaljenost x [m]	Time lag [min]	D [m <sup>2</sup> /min]	K [m/min]	K [m/s]
D1	100	145	27	4,50E-03	7,50E-05
D2	1250	100	8952	1,49E+00	2,49E-02
D4	1700	180	5110	8,52E-01	1,42E-02

Pijezometar	Udaljenost x [m]	D [m <sup>2</sup> /min]	K [m/min]	K [m/s]
D1	130	45	7,50E-03	1,25E-04
D2	1285	5227	8,71E-01	1,45E-02
D4	1700	5492	9,15E-01	1,53E-02

**Tablica 5.3.** Prikaz izračunatih/odabranih vrijednosti hidrauličkog difuziviteta (D), odnosno, koeficijenta propusnosti (K) za pijezometre D1, D2 i D4, dobivenih pomoću "tidal efficiency" metode, "time lag" metode te matematičkog modela, redosljedom.

Iz gornjih rezultata vidljivo je, da je hidraulički difuzivitet za pijezometar D1 za sve tri metode približno isti, odnosno, kreće se u intervalu  $D=27-45 \text{ m}^2/\text{min}$ . Kako je nemoguće odrediti egzaktno rješenje, koeficijenta propusnosti K je procijenjen s  $K=10^{-4} \text{ m/s}$ , što predstavlja približno srednju vrijednost triju metoda, dok je za udaljenost x, na isti način odabrana vrijednost  $x_1=110 \text{ m}$ .

U usporedbi s prijašnjim rezultatima, procijenjena vrijednost K je istog reda veličine kao i iz rezultata 60-ih godina prošlog stoljeća ( $K=3.5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ ), dok u usporedbi s vrijednostima od IGH d.d. iz 2008. i 2012. godine ( $K=10^{-2}-10^{-3} \text{ m/s}$ ), postoje značajna odstupanja.

Ova odstupanja su logična jer ispitivanja od IGH d.d. nisu izvedena u blizini pijezometra D1, već uzvodnije, gdje se u prošlosti taložio krupniji materijal od onog koji je dolazio do ušća, odnosno pijezometra D1.

Kod pijezometra D2, vidljivo je da "time lag" metoda daje mnogo veću vrijednost D od preostale dvije metode. Iako autor ima više povjerenja u rezultate dobivene iz matematičkog modela, iz slike 5.13. je vidljivo kako postoji značajnije odstupanje modelskog rješenja od stanja izmjenjenog u pijezometru. Uočava se da modelsko rješenje malo precjenjuje vrijednost hidrauličkog difuziviteta, odnosno koeficijenta propusnosti K. Iz tog razloga vrijednost K je procijenjena s  $K=1.38 \cdot 10^{-2}$  m/s, a udaljenost x s  $x_2=1250$  m što predstavlja rješenje iz "tidal efficiency" metode.

Ukoliko se odabrana vrijednost K usporedi s procijenom iz ispitivanja IGH d.d. ( $K=10^{-2}-10^{-3}$  m/s), vidljivo je da se ona nalazi blizu gornje vrijednosti  $K=10^{-2}$  m/s.

Promatrajući pijezometar D4, uočljive su slične vrijednosti parametara kao i kod pijezometra D2. Za razliku od pijezometra D2 u kojem smo odbacili rješenje dobiveno "time lag" metodom, kod pijezometra D4 je uočena slična situacija, ali je ovaj put "tidal efficiency" metoda dala vrijednost hidrauličkog difuziviteta koji je značajno veći od onog dobivenog s preostale dvije metode.

Modelsko rješenje za pijezometar D4 gotovo se idealno preklapa sa stanjem izmjenjenim u pijezometru te se iz tog razloga to rješenje,  $K=1.53 \cdot 10^{-2}$  m/s i  $x_4=1700$  m, uzima kao mjerodavno.

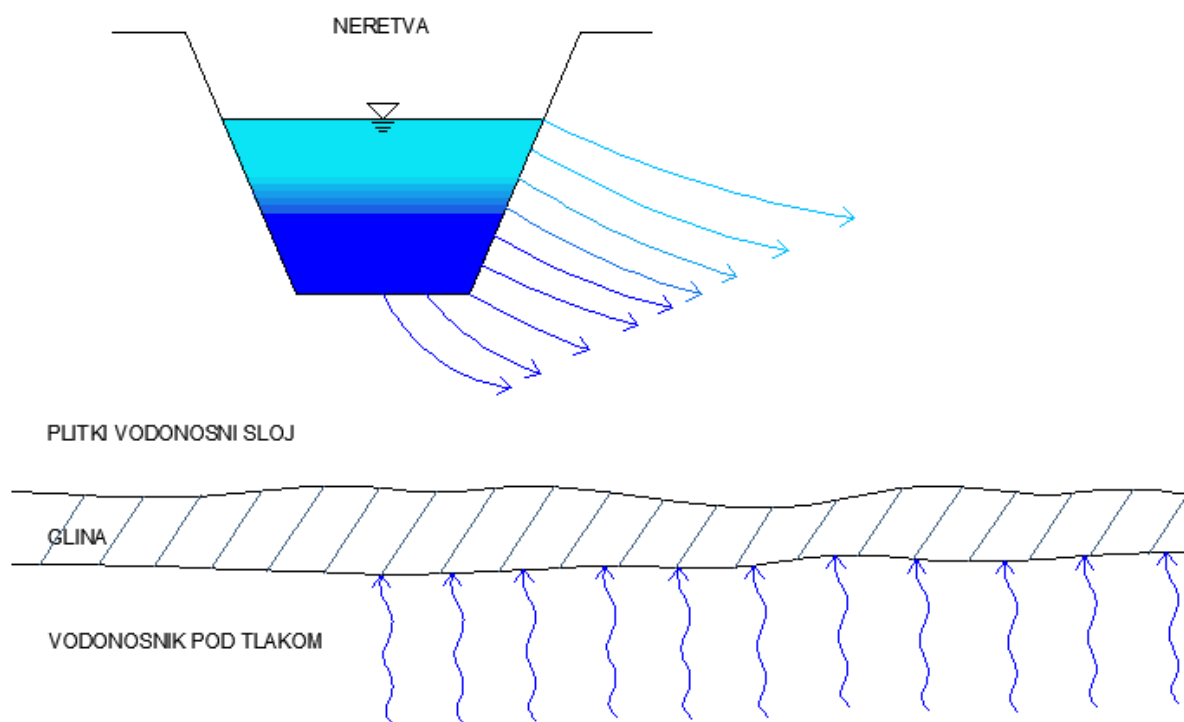
Treba naglasiti, da je udaljenost  $x_4=1700$  m (vidi sliku 5.15.) uzeta kao gornja vrijednost i da bi se isto tako dobilo jako dobro poklapanje modelskog rješenja i izmjenjenog stanja, ukoliko bi za udaljenost x išli sa npr.  $x_4=1600$  m ili  $x_4=1500$  m. Također, treba naglasiti da bi se sa ovim relativno malim smanjenjem vrijednosti  $x_4$  dobile i nešto manje vrijednosti hidrauličkog difuziviteta, odnosno koeficijenta propusnosti K. Ovo se naglašava jer bi se u tom slučaju dobila jako slična vrijednost koeficijenta propusnosti K za pijezometre D2 i D4.

Može se zaključiti da bi gornja vrijednost iz ispitivanja IGH d.d.,  $K=10^{-2}$  m/s, zajedno s ovim rezultatima trebala biti orijentir za buduće proračune za područja u okolini pijezometara D2 i D4. Što se tiče područja uz pijezometar D1, autor smatra da je procijenjeno rješenje,  $K=10^{-4}$  m/s korektno, s obzirom na sve dostupne podatke te izvršena ispitivanja i istraživanja.

## 6. MJERENJA SLANOSTI U PIJEZOMETRIMA I NERETVI

U ovom poglavlju će se interpretirati podaci stanja slanosti u Neretvi te dubokim i plitkim pijezometrima za 2014. godinu. Za analizu su korišteni podaci slanosti u Neretvi na mjernom profilu Opuzen i slanosti u pijezometrima P1/D1 i P2/D2, a koji su dobiveni mjerenjima sondom od strane profesora s FGAG-a. U 2014. godini mjerenja su vršena pet puta, 15.07., 13.08., 18.09., 20.10. i 25.11. .

Kako je već naglašeno na početku ovog rada, jedan od najvećih problema ovog područja je njegova zaslanjenost. Sol u plitki vodonosnik može doći iz dva smjera (vidi sliku 6.1.), intruzijom mora u područje, bilo direktno preko Dige ili posredno preko rijeke Neretve i iz donjih slojeva, odnosno, vodonosnika pod tlakom preko već spomenutog protoka ( $Q_D^G$ ) (vidi točku 4.5.).



**Slika 6.1.** Prodor zaslanjene vode u plitki vodonosni sloj iz Neretve i iz vodonosnika pod tlakom

Stanje soli u Neretvi, odnosno visina klina, ovisi isključivo o dva parametra. Prvi je razina mora, a drugi protok ili s njim povezan vodostaj. Kako protok za 2014. godinu nije raspoloživ, on je procijenjen pomoću stanja vrijednosti u periodu 2010.–2013. godine. Naime, na temelju razine mora, klina u Neretvi (mjerna stanica Opuzen) te protoka u periodu 2010.–2013. godine, generirana je tablica iz koje se za poznatu razinu mora i klina u Neretvi, procijenio protok kroz Neretvu (Q). Za izradu ove tablice, upotrebljeni su podaci na datume kada se vršila terenska izmjera kvalitete vode, odnosno saliniteta u Neretvi [18, 19, 21, 22].

Protok kroz Neretvu (Q), za pojedini datum, određen je na način opisan u točki 3.7. .

Nažalost, obrada nije dala planirane rezultate (vidi tablicu 6.1.). Mišljenje je da za to postoje dva razloga:

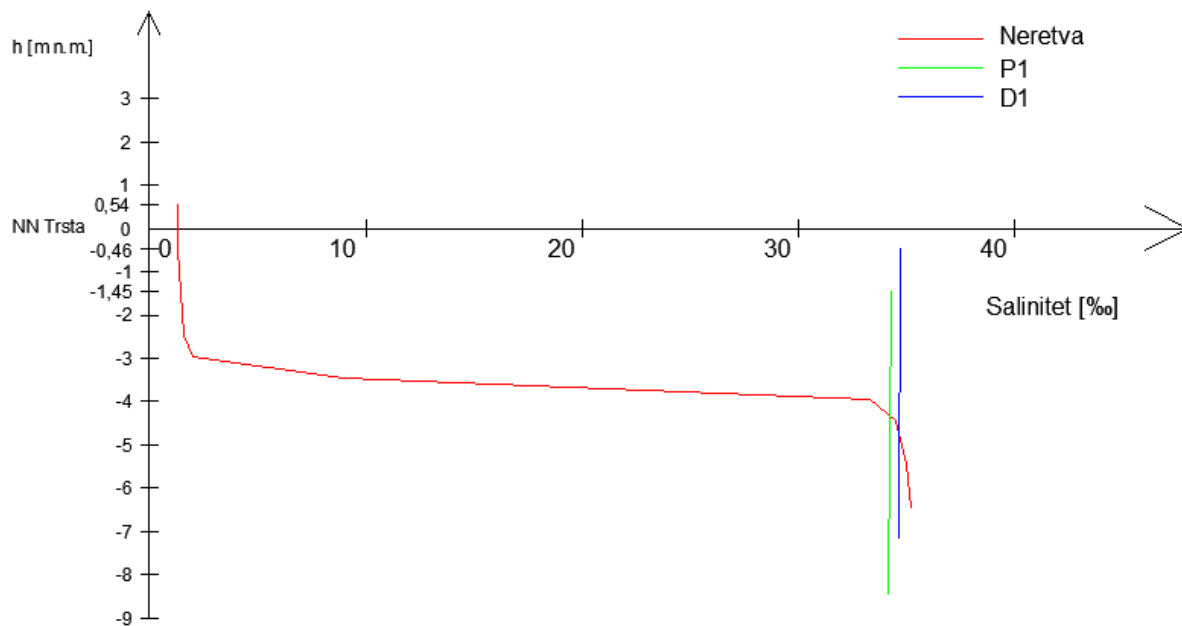
1. Nije uzeto u obzir da li se u mjenom trenutku slanosti more nalazi u silaznoj ili uzlaznoj putanji. U slučaju da je more u silaznoj putanji, ono za sobom povlači i vodu (ili more u vidu slanog klina), čime se dobiva manja vrijednost vodostaja. U slučaju da je more u uzlaznoj putanji, ono usporava tok i povećava razinu rijeke (vodostaj).
2. Mjerna postaja mjerenja protoka u Neretvi je u Žitomisliću, koje se od područja Donje Neretve nalazi na prilično velikoj udaljenosti i ne uključuje donji dio sliva. Naime, uz to što je sami protok kroz Neretvu upitan, upitan je također i protok u pritokama, a koji osim onog iz Trebižata nisu poznati.

More [m n.m.]	Klin [m n.m.]	Protok [m <sup>3</sup> /s]
0,34	-2,76	93,50
0,38	-3,79	130,80
0,39	-2,72	106,70
0,39	-2,91	123,60
0,40	-2,31	79,30
0,40	-6,24	203,50
0,46	-3,32	114,50
0,49	-3,69	154,00
0,49	-3,09	107,60
0,50	-3,76	82,00
0,50	-2,24	121,80
0,51	-4,96	80,00
0,53	-2,15	181,50
0,63	-5,14	153,40
0,64	-2,49	87,80
0,66	-3,68	124,20
0,68	-2,75	85,70
0,69	-4,56	86,40
0,70	-7,99	488,50
0,74	-2,19	93,50
0,77	-3,02	126,00
0,79	-5,39	149,50
0,86	-6,81	212,70

**Tablica 6.1.** Prikaz ovisnosti protoka o razini mora i visini klina u Neretvi

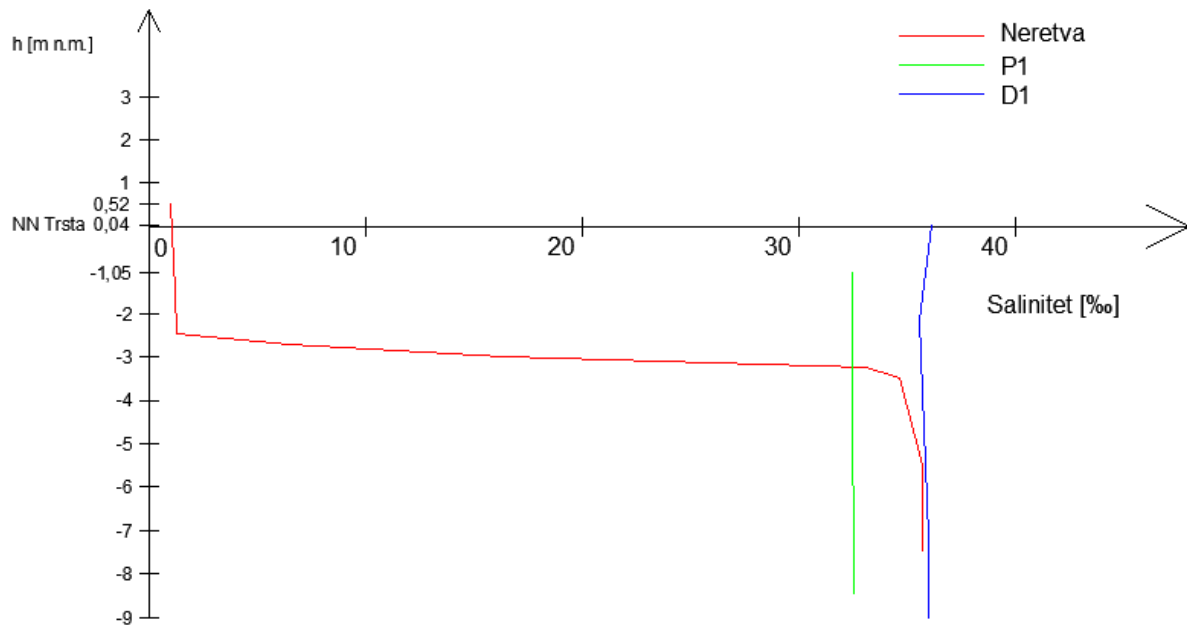
U nastavku su prikazani obrađeni podaci, koji su za ovu analizu svedeni u isti visinski koordinatni sustav, te njihova interpretacija.





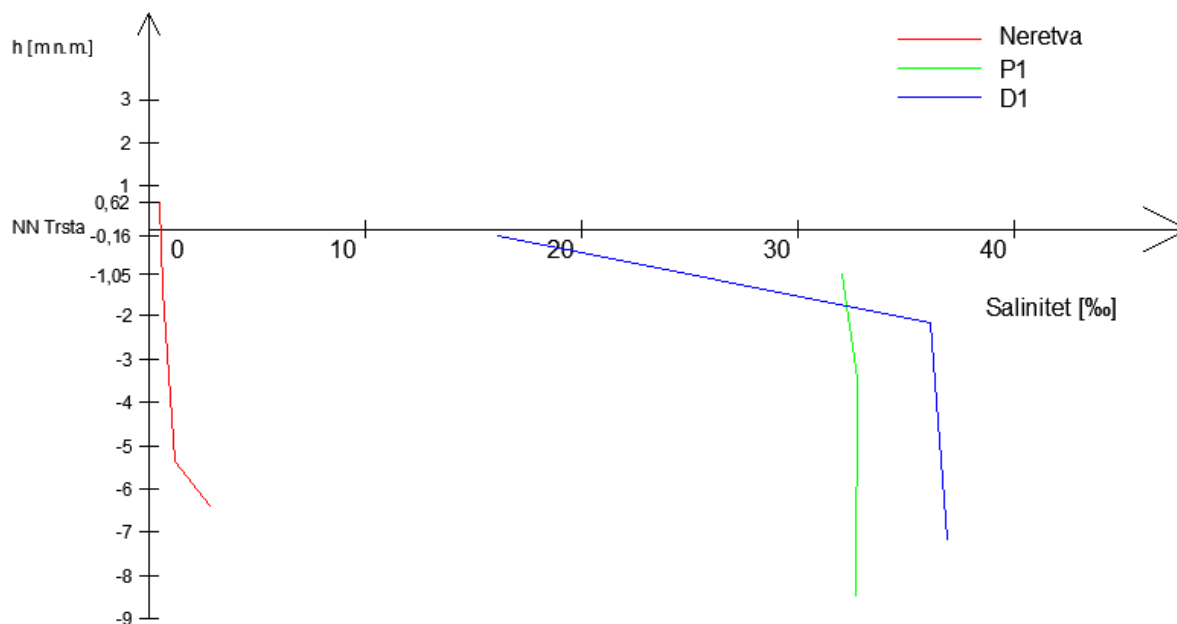
**Slika 6.2.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te piježometrima P1 i D1 dana 15.07.2014. godine

- Klin se profilu Neretva-Opuzen nalazi se na koti -3.50 m n.m. .
- Slanost u vodonosniku pod tlakom i plitkom vodonosniku je konstantna po vertikali i na razini je slanosti mora – u skladu je sa korelacijom mora / D1.
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.48$  m n.m., a u rijeci se protok na temelju tablice 6.1. iz dosadašnjih mjerenja visinskog položaja klina na profilu Opuzen procjenjuje na  $Q=100$  m<sup>3</sup>/s.
- Očit je dominantan utjecaj mora na stanje soli u plitkom vodonosniku.
- Oborine nema.



**Slika 6.3.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te pijezometrima P1 i D1 dana 13.08.2014. godine

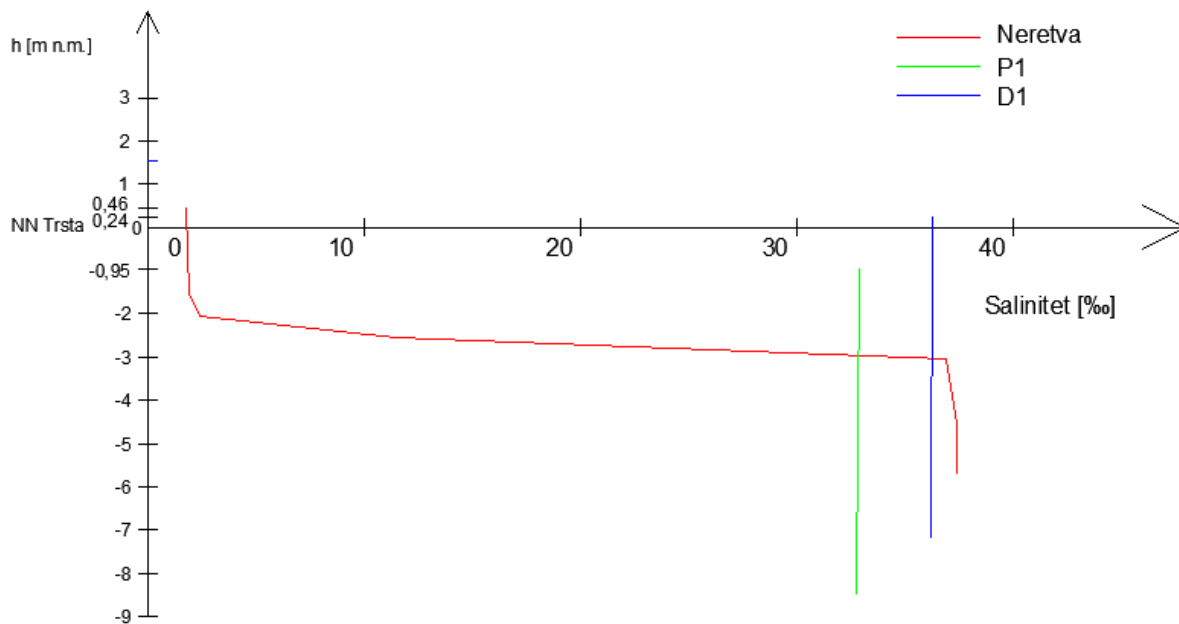
- Klin na profilu Neretva-Opuzen se nalazi na koti -3.00 m n.m. .
- Slanost u vodonosniku pod tlakom i plitkom vodonosniku je približno konstantna i na razini je slanosti mora - što je u skladu s korelacijom mora / D1.
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.45$  m n.m., a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q=100$  m<sup>3</sup>/s.
- Očito je da Neretva nema utjecaj na slanost u plitkom vodonosniku, već ona dolazi intruzijom direktno iz mora.
- Oborine nema.



**Slika 6.4.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te piježometrima P1 i D1 dana 18.09.2014. godine

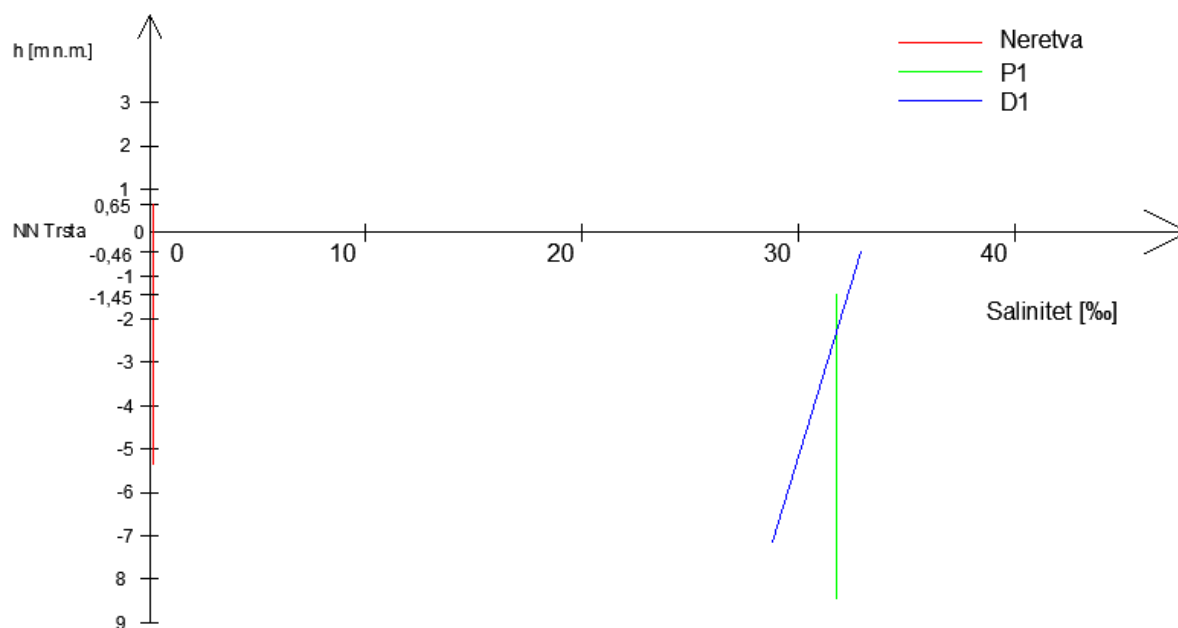
- Klin na profilu Neretva-Opuzen otprilike se nalazi na koti -6.50 m n.m. .
- Iako je klin u Neretvi vrlo nisko, što je posljedica niske razine mora, slanost u plitkom vodonosniku je skoro na razini mora.
- Nagli skok slanosti u piježometru D1 vjerojatno je posljedica greške mjerenja.
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.53$  m n.m., a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q=300$  m<sup>3</sup>/s.
- Očit je da Neretva nema utjecaj na slanost u plitkom vodonosniku, već ona dolazi intruzijom direktno iz mora, što je u skladu s procijenjenim protokom i korelacijskim odnosom more / D1.
- Prethodnih dana pala velika oborina  $P>100$  mm/m<sup>2</sup>.
- Vertikalni transport vode postoji, izračunati  $Q_D^G$  (vidi sliku 4.15.).

Treba napomenuti da bi uzorak koji se uzme iz vodonosnika pod tlakom trebao odgovarati stanju na mjestu perforacije, netom ispod glinenog sloja. Međutim, da bi to bio slučaj, potrebno je s vremenom ispumpati određenu količinu vode iz piježometra, kako bi se, ono stanje koje se nalazi ispod gline, stvarno i pokazalo u mjerenjima. Nažalost, prema dostupnim informacijama to nije praksa.



**Slika 6.5.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te piježometrima P1 i D1 dana 20.10.2014. godine

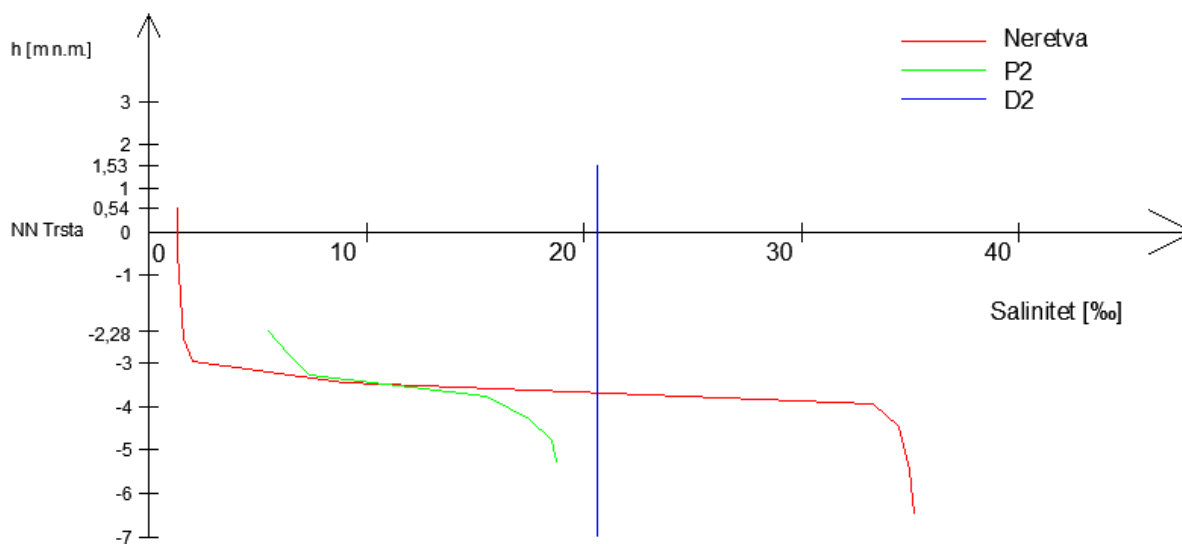
- Klin na profilu Neretva-Opuzen nalazi se na koti -2,60 m n.m. .
- Slanost u plitkom vodonosniku i vodonosniku pod tlakom je približno konstantna po vertikali i u skladu je s korelacijskim odnosom more / D1.
- Oborine nema.
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.43$  m n.m., a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q=90$  m<sup>3</sup>/s.
- Kako je već rečeno, očit je utjecaj intruzije mora kroz plitki, a i vodonosnik pod tlakom.



**Slika 6.6.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te pijezometrima P1 i D1 dana 25.11.2014. godine

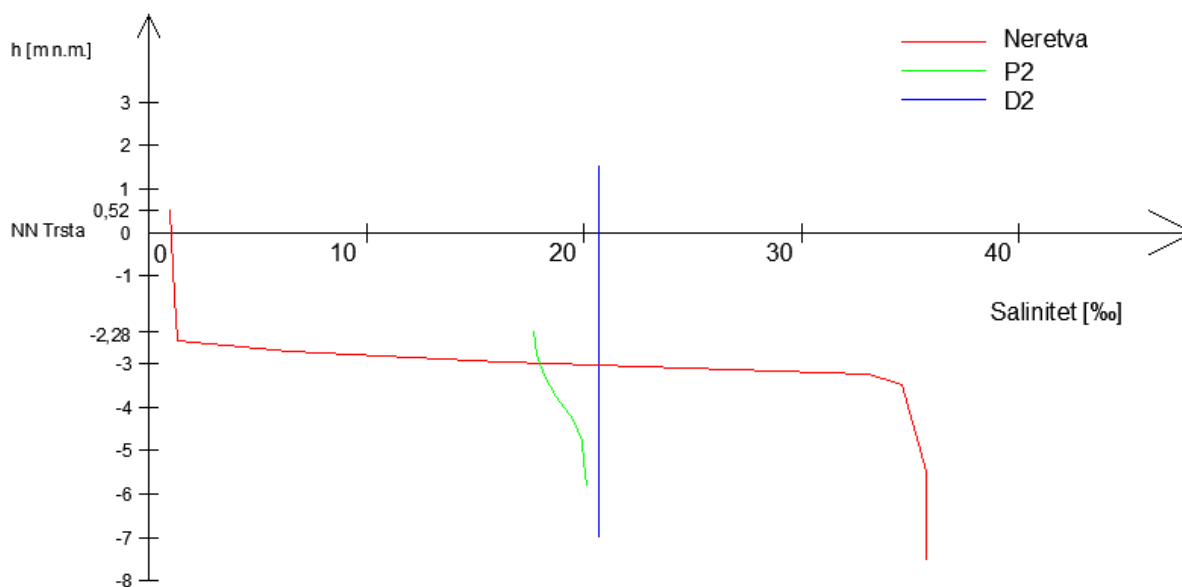
- Klin na profilu Neretva-Opuzen izostaje do dubine mjerenja.
- Slanost u plitkom vodonosniku je konstantna po vertikali, dok se u vodonosniku pod tlakom blago linearno smanjuje po dubini.
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.49$  m n.m., a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q=300$   $m^3/s$  i više.
- Zbog velike oborine  $P>100$  [ $mm/m^2$ ] koja je pala prethodnih dana, pretpostavlja se da u vodonosniku pod tlakom postoji leća slatke vode te se iz tog razloga, u gornjem dijelu pijezometra, nalazi voda manje slanosti od one u plitkom vodonosniku. Osim vertikalnog, očit je i horizontalni tok leće koja putuje prema moru te se pretpostavlja da je to razlog smanjenja slanosti na ovoj lokaciji, koja se nalazi neposredno uz more.
- Vertikalni transport vode postoji, izračunati  $Q_D^G$  (vidi sliku 4.15.).
- Očit je dominantni utjecaj mora na P1 i D1, što je u skladu s korelacijskim odnosom i i njegovom interpretacijom.

Iz gore prikazanih slika i danih obrazloženja, može se zaključiti da se pijezometri P1 i D1, odnosno, vodonosnik pod tlakom i plitki vodonosnik, u blizini ušća nalaze u potpunosti pod utjecajem mora. More se intruzijom uvlači kroz plitke i duboke slojeve te ih zaslanjuje.



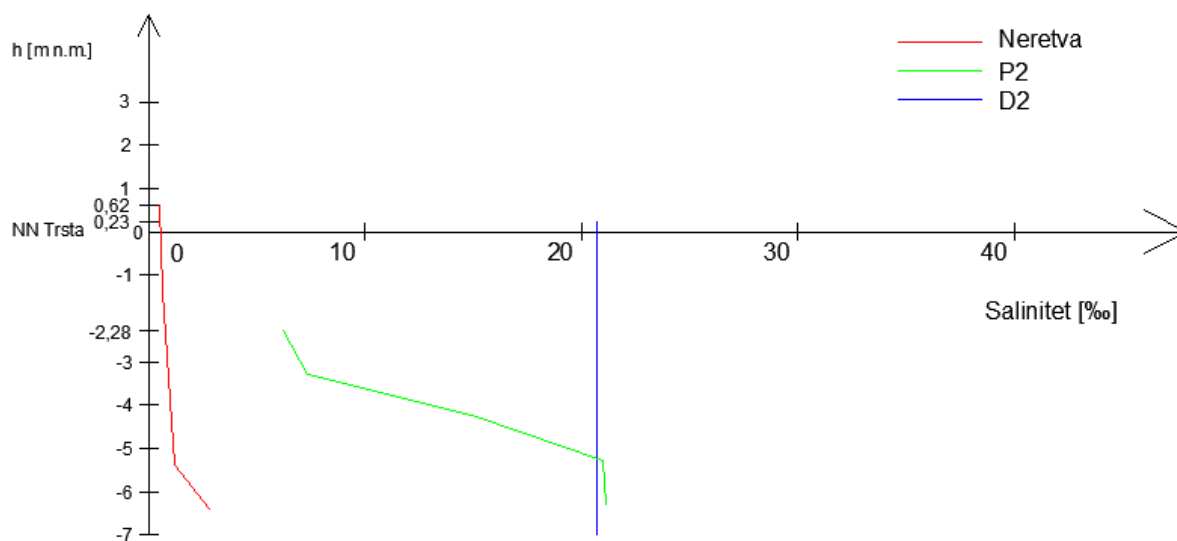
**Slika 6.7.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te pijezometrima P2 i D2 dana 15.07.2014. godine

- Klin na profilu Neretva-Opuzen nalazi se na koti -3.50 m n.m., a na istoj koti se nalazi i klin u plitkom vodonosniku.
- Slanost u vodonosniku pod tlakom konstantna po vertikali, dok se u plitkom povećava s dubinom, analogno s Neretvom - što je u skladu s korelacijskim odnosom Neretva / P2.
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.48$  m n.m., a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q=100$  m<sup>3</sup>/s.
- Očit je dominantan utjecaj mora kroz Neretvu na stanje soli u plitkom vodonosniku.
- Oborine nema te očigledno dolazi do vertikalnog transporta zaslanjene vode ( $Q_D^G$ )
- Očita je redukcija slanosti u plitkom vodonosniku.



**Slika 6.8.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te piježometrima P2 i D2 dana 13.08.2014. godine

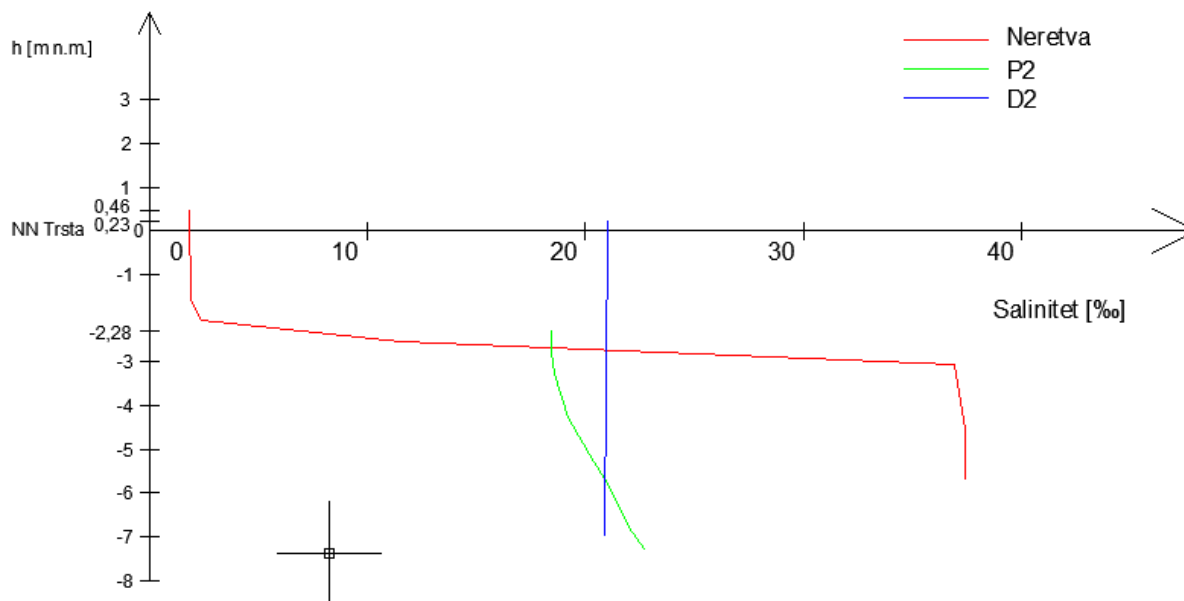
- Klin na profilu Neretva-Opuzen nalazi se na koti -3.00 m n.m. .
- Slanost u vodonosniku pod tlakom je konstantna po vertikali, dok se u plitkom blago povećava s dubinom te asimptotski približava slanosti vodonosnika pod tlakom.
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.45$  m n.m., a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q=100$   $m^3/s$ .
- Očit je značajan utjecaj Neretve na stanje soli u plitkom vodonosniku, a što je u skladu s analizom more / P2.
- Oborine nema te očigledno dolazi do vertikalnog transporta zaslanjene vode  $Q_D^G$
- Očita je redukcija slanosti u plitkom vodonosniku.
- Stanje u dubokom piježometru tj. njegova konstantnost kroz sva mjerenja bi mogla biti posljedica zadržavanja iste vode u njemu, a koje bi se rješilo, već spomenutim isumpavanjem vode iz piježometra.



**Slika 6.9.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te pijezometrima P2 i D2 dana 18.09.2014. godine

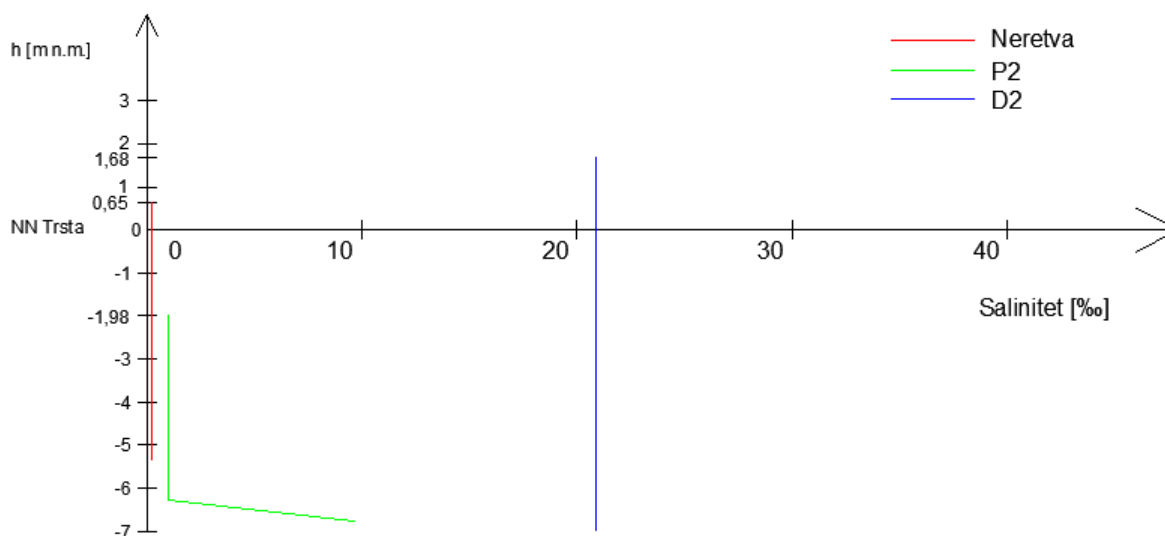
- Klin na profilu Neretva-Opuzen se otprilike nalazi na koti -6,50 m n.m. .
- Slanost u vodonosniku pod tlakom je konstantna po vertikali, dok se u plitkom povećava s dubinom i približno na koti -5.00 [m n.m] postaje veća od slanosti u vodonosniku pod tlakom.
- Zbog velike oborine  $P > 100 \text{ mm/m}^2$  koja je pala prethodnih dana, pretpostavlja se da u vodonosniku pod tlakom postoji leća slatke vode
- Vertikalni transport vode postoji, izračunati  $Q_D^G$  (vidi sliku 4.15.)
- Iz leće se transportira slatka voda
- U moru se bilježi razina  $h_M = 0.53 \text{ m n.m.}$ , a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Očito da na stanje soli u plitkom vodonosniku djeluje Neretva, s obzirom da sol od nigdje drugdje ne može doći i u skladu je s korelacijskim odnosom Neretva / P2 i njegovom interpretacijom (uz uvjet da nema grške mjerenja), iako, klin se nalazi duboko u koritu rijeke.





**Slika 6.10.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te pijezometrima P2 i D2 dana 20.10.2014. godine

- Klin na profilu Neretva-Opuzen nalazi se na koti -2,60 m n.m. .
- Slanost u vodonosniku pod tlakom je konstantna po vertikali, dok u plitkom blago opada i približno na koti -5,50 m n.m. postaje veća od slanosti u vodonosniku pod tlakom.
- Oborine nema.
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.43$  m n.m., a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q=90$  m<sup>3</sup>/s.
- Očito je da na stanje soli u plitkom vodonosniku isključivo djeluje Neretva s obzirom da sol od nigdje drugdje ne može doći, a klin u Neretvi se nalazi jako visoko
- Naravno, pretpostavke vrijede uz uvjet ispravnosti mjerenja



**Slika 6.11.** Slanost vode u Neretvi (Opuzen) te piježometrima P2 i D2 dana 25.11.2014. godine

- Klin na profilu Neretva-Opuzen izostaje do dubine mjerenja
- Slanost u vodonosniku pod tlakom je konstantna po vertikali
- U moru se bilježi razina  $h_M=0.49$  m n.m., a u rijeci se protok procjenjuje na  $Q=300$   $m^3/s$  i više.
- Očita je redukcija slanosti u plitkom vodonosniku, kao i dominantan utjecaj Neretve na njegovu slanost, odnosno neslanost, što je u skladu s korelacijskim odnosom Neretva / P2 i njegovom interpretacijom.

Za piježometre P1 i P2, očito je da dominantan utjecaj na slanost plitkog vodonosnog sloja ima Neretva, odnosno stanje klina u njoj. Iz Neretve se slanost infiltracijom uvlači u plitki vodonosnik te ga zaslanjuje. Manji dio zaslanjivanja vrlo vjerojatno dolazi i iz vodonosnika pod tlakom, međutim, smatra se da je taj udio zaslanjivanja zanemariv u usporedbi sa zaslanjivanjem iz Neretve. Za bolju analizu slanosti vodonosnika pod tlakom, vrijedilo bi izvršiti, već spomenutu, provjeru mjerenja u dubokim piježometrima.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je identifikacija procesa koji se događaju u sustavu, procjena parametara vodonosnika pod tlakom s obzirom na identificirane procese te interpretacija zaslanjenosti vodonosnika s obzirom na mjerene podatke.

Cilj navedenih analiza je u što većoj mjeri odrediti međusobne ovisnosti parametara i njihovo djelovanje na sustav kako bi se riješili problemi zaslanjivanja vode i tla u području obuhvata.

Identifikacija procesa, izvršena putem regresijske analize, ukazuje da postoje dva primarna parametra o kojima ovisi prodor soli u područje. Razina mora, neposredno, i oborina, posredno preko protoka, određuju hoće li i koliki biti prodor soli, kako u Neretvu putem slanog klina tako i u područje. Naime, utjecaj ova dva parametra varira, kako vremenski tako i po području.

Utjecaj mora je najizraženiji u ljetnom (sušnom) periodu kada gotovo da i nema oborine, odnosno kada je protok kroz rijeku minimalan. U tom vremenu, more ulazi duboko u Neretvu. Na mjernoj stanici u Opuzen, u tom periodu, slani klin se nalazi na dubini od svega 3.00 m, što ukazuje da more, koje se uvuklo u rijeku, intruzijom kroz korito značajno ulazi u plitki vodonosnik (korelacijski koeficijent za odnos vodostaj / P1 iznosi  $r=0.67$ ). Prodor soli na ovaj način je potpomognut i niskom razinom vode u plitkom vodonosniku zbog crpljenja, čime se uspostavlja još veći gradijent za protok slane vode iz rijeke. Ovaj gradijent je bitan i zbog prodora soli iz pravca vodonosnika pod tlakom u plitki vodonosnik, za koji se u ovom radu nesumnjivo utvrdilo da postoji, međutim njegov intenzitet je dosta upitan s obzirom na parametre o kojima ovisi ( $d_{gline}$  i  $K_{gline}$ ). Treba napomenuti da je utjecaj mora, logično, najveći u njegovoj neposrednoj blizini- iza Dige.

Oborina je najizraženija u zimskom (kišnom) periodu. U tom periodu protok, kao njena posljedica, istiskuje slani klin prema obali. U mjerenjima slanosti, primijećeno je da se slani klin, u kišnom periodu nalazi na velikoj dubini iz čega se zaključuje da on nema značajnije djelovanje na prodor soli.

Također, ovdje treba spomenuti i na jako veliku povezanost ( $r=0.86-0.97$ ) razine vode u rijeci Neretvi i razine u vodonosniku pod tlakom. Ovakva povezanost, dovodi do zaključka da među njima vjerojatno postoji i direktna veza (ne samo preko masiva po obodu doline) što bi

značilo da sloj gline nije kontinuiran, a što se može vidjeti iz istražnih bušotina CSO-B-1 i CSO-B-2 (vidi prilog 1).

Određivanje parametra (K) vodonosnika pod tlakom izvršeno je pomoću tri metode:

1. "Tidal efficiency" metodom
2. "Time lag" metodom
3. Matematičkim modelom

Sva rješenja su dobivena u pretpostavljenim okvirima i rezultatima iz prethodnih ispitivanja i istraživanja [7, 15].

Očekivano, najmanji koeficijent propusnosti ( $K \approx 10^{-4}$  m/s) je dobiven za područje uz pijezometar D1, što je logično jer su tu kroz prošlost nakupile finije čestice.

Praćenjem logičnog slijeda granulometrijskog sastava, dade se zaključiti kako bi pijezometri D2 i D4 trebali dati slične vrijednosti. Dobiveni su rezultati  $K = 1.38 \cdot 10^{-2}$  m/s za D2 i  $K = 1.53 \cdot 10^{-2}$  m/s za D4, što se i pretpostavljalo. Ovi rezultati u manjoj mjeri odstupaju od onih procijenjenih iz istražnih bušotina ( $K = 10^{-2} - 10^{-3}$  m/s). Zaključak je da bi smjernica za buduće radove trebala biti vrijednost  $K \approx 10^{-2}$  m/s.

S obzirom na dosadašnja istraživanja u navedenom području, rezultati ukazuju na kvalitativno podudaranje (koeficijent propusnosti [7, 15], vertikalni protok [8]). Stvarno stanje rezultat je prirodnih procesa i ljudske potrebe za iskorištenjem plodnog tla. U težnji ka ostvarenju cilja, čovjek je izmijenio prirodne režime dinamike procesa na području obuhvata. Mjerenja ukazuju na dominantan utjecaj rijeke i primaran doprinos soli upravo iz Neretve čak i u središnji dio doline. Detaljno razumijevanje procesa i interakcija u sustavu moguće je razvojem modela koji u realnom vremenu simulira procese i obuhvaća sve prisutne varijable. U tom slučaju provedena mjerenja mogu i trebaju poslužiti za kalibraciju modela i korištenje istog u nadolazećim scenarijima.

## 8. LITERATURA

- [1] A. Vallejos, F. Sola, A. Pulido-Bosch, Processes Influencing Groundwater Level and Freshwater-Saltwater Interface in a Coastal Aquifer, *Water Resour Manage* (2015) 29:679-697, 2014.
- [2] B. Todorović, Delta Neretve – od močvare do intenzivne poljoprivrede, *Geografija.hr*, 2005.
- [3] B. Vrdoljak, *Vjerojatnost i statistika / interna skripta*, GAF Split, 2010.
- [4] C. W. Fetter, *Applied Hydrogeology (Third edition): Aquifer characteristics*, Prentice Hall, str. 115-118, 1994.
- [5] *Geofizika – Zagreb, Vodoistražni radovi Opuzen – Modrič*, 1966.
- [6] *Geofizika – Zagreb, Vodoistražni radovi Opuzen – Vidrice*, 1966.
- [7] Građevinski fakultet Split, *Studija: Vodnogospodarsko rješenje i uređenje sliva Donje Neretve - knjiga 2: Podloge i podaci*, 1996.
- [8] Građevinski fakultet Split, *Studija: Vodnogospodarsko rješenje i uređenje sliva Donje Neretve - knjiga 6: Podzemne vode*, 1996.
- [9] Hrvatske vode, *Rad crpne stanice Modrič za 2014. godinu*.
- [10] Hrvatske vode, *Rad crpne stanice Prag (Vidrice) za 2014. godinu*.
- [11] <http://oliver.efri.hr/~statist/Regresija%20i%20korelacija.pdf>
- [12] [http://veleri.hr/~ljstambuk/Kvantitativne%20za%20web/Korelacija%20i%20regresija\\_pod.pdf](http://veleri.hr/~ljstambuk/Kvantitativne%20za%20web/Korelacija%20i%20regresija_pod.pdf)
- [13] I. Ljubenković, M. Vranješ, Numerički model uslojenog tečenja – primjer zaslanjivanja korita rijeke Neretve (2004.), *Građevinar* 2/12, 2012.
- [14] IGH d.d., *SUO PILOT PROJEKTA NAVODNJAVANJA DONJE NERETVE*, 2010.
- [15] IGH d.d., *Sustav navodnjavanja u Donjoj Neretvi – podsustav Opuzen (faza A i J)- Geotehnički elaborat*, 2013.
- [16] L. Dong, J. Chen, C. Fu, H. Jiang, Analysis of groundwater-level fluctuation in a coastal confined aquifer induced by sea-level variation, *Hydrogeology Journal* (2012) 20: 719-726, 2012.

- [17] Madan K. Jha, Deldan Namgial, Y. Kamii, Stefan Peiffer, Hydraulic Parameters of Coastal Aquifer Systems by Direct Methods and an Extended Tide-Aquifer Interaction Technique, *Water Resour Manage* (2008) 22:1899-1923, 2008.
- [18] Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Sveučilište u Splitu Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Monitoring zaslanjivanja tla i vode u dolini Neretve / Izvješće za 2012. godinu, 2012.
- [19] Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Sveučilište u Splitu Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Monitoring zaslanjivanja tla i vode u dolini Neretve / Izvješće za 2013. godinu, 2013.
- [20] Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Sveučilište u Splitu Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Monitoring zaslanjivanja tla i vode u dolini Neretve / Izvješće za 2014. godinu, 2014.
- [21] Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Sveučilište u Splitu Građevinsko-arhitektonski fakultet, Monitoring zaslanjivanja tla i vode u dolini Neretve / Izvješće za 2010. godinu, 2010.
- [22] Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Sveučilište u Splitu Građevinsko-arhitektonski fakultet, Monitoring zaslanjivanja tla i vode u dolini Neretve / Izvješće za 2011. godinu, 2011.

## **9. PRILOZI**

PRILOG 1: Istražne bušotine na mjesto buduće, CS Opuzen i mobilne pregrade [15].

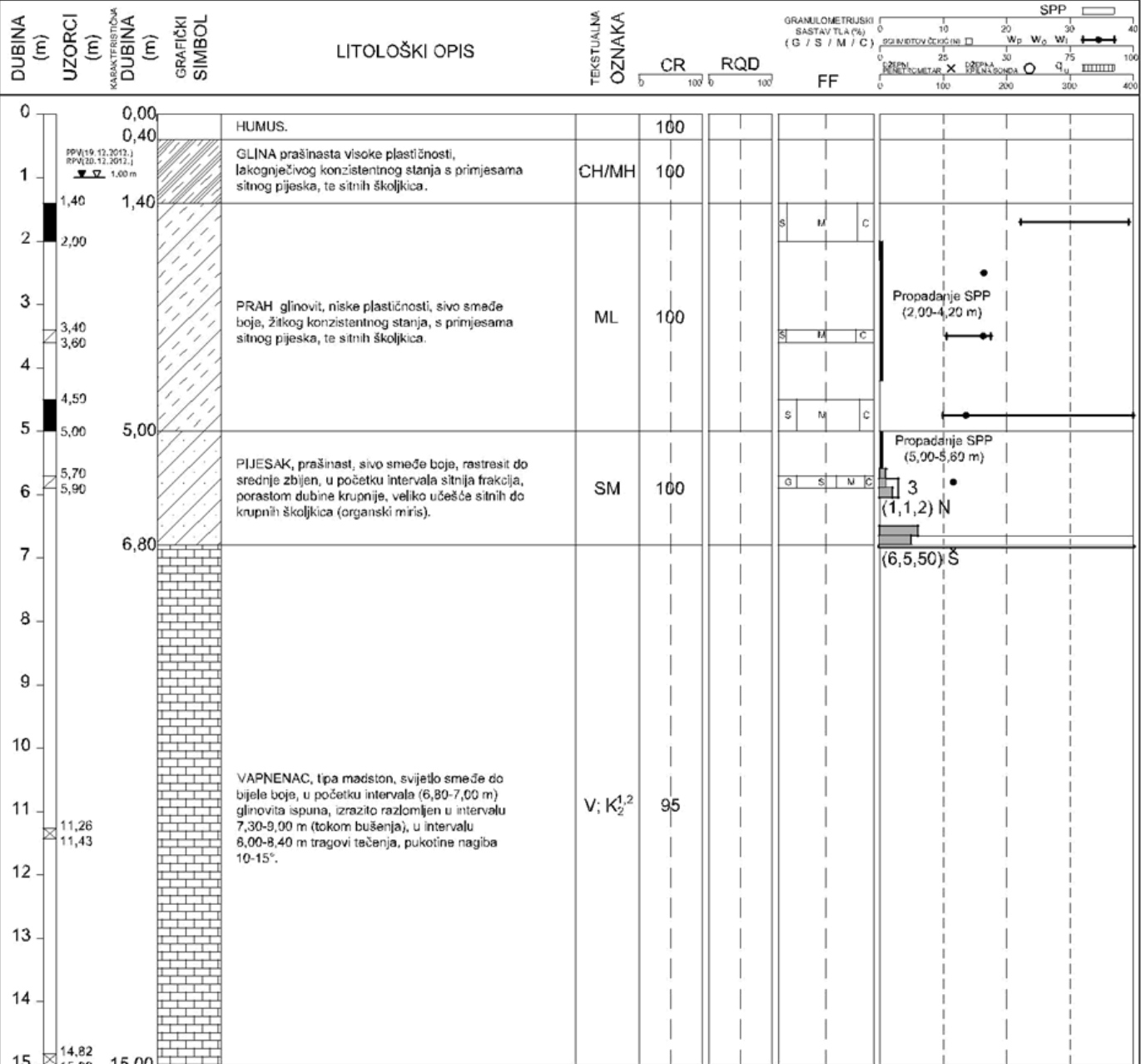
RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: CRPNA STANICA OPUZEN

## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: CSO-B-1

KOORDINATE: E= 6463478.33      DATUM: 19.12.2012. - 20.12.2012.  
 N= 4761754.26      DETERMINACIJA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.  
 H= -1,30 m n.m.      OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.  
 POZICIJA: M 1:100

LIST 1 / 1

☒ POREMEĆENI UZORAK (tlo)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-tlo, MPa-stijena)  
 ■ NEPOREMEĆENI UZORAK (tlo, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 ▽ POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m<sup>2</sup>)       $w_p, w_o, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)





RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: CRPNA STANICA OPUZEN

INSTITUT IGH d.d.  
 ZAGREB  
 Zavod za geotehniku



## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: CSO-B-2

KOORDINATE: E= 6463454.52  
 N= 4761754.17  
 H= 0,108 m n.m.

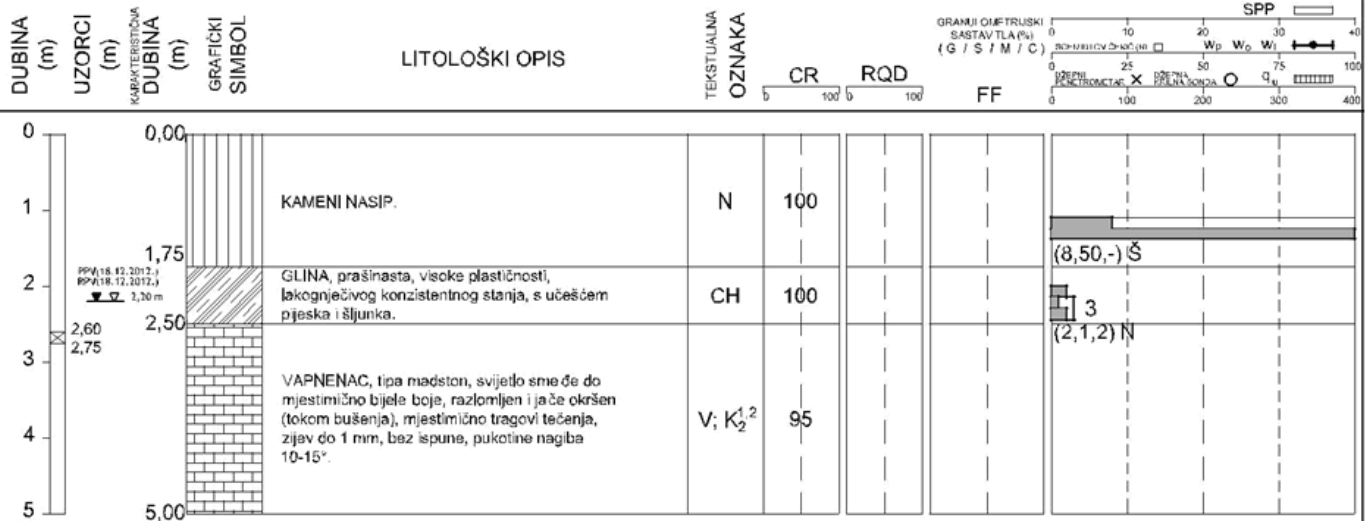
DATUM: 18.12.2012.  
 DETERMINACIJA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.  
 OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.

POZICIJA:

M 1:100

LIST 1 / 1

POREMEĆENI UZORAK (tlo)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-tlo, MPa-stijena)  
 NEPOREMEĆENI UZORAK (tlo, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m<sup>2</sup>)       $w_p, w_o, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)



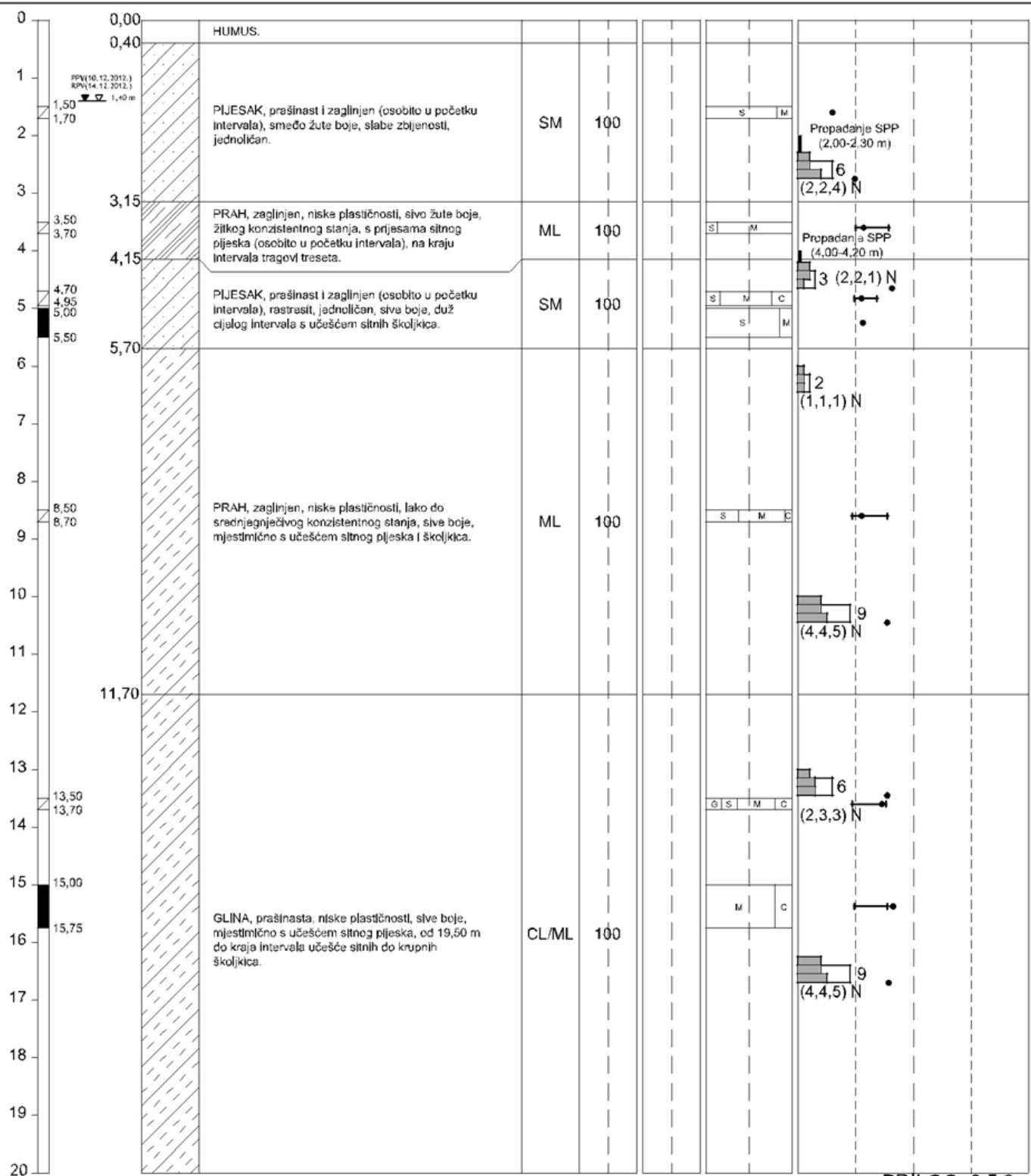
RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: PODSUSTAV "OPUZEN"-PREGRADA

## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: POP-B-1

KOORDINATE: E= 6463842.42      DATUM: 10.12.2012. - 14.12.2012.  
                   N= 4765253.59      DETERMINACIJA: Goran Dizdar dipl.ing.grad.  
                   H= 1,678 m n.m.      OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.grad.  
 POZICIJA: M 1:100

LIST 1 / 2

POREMEĆENI UZORAK (do)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-do, MPa-stijena)  
 NEPOREMEĆENI UZORAK (do, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m')       $w_p, w_o, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)



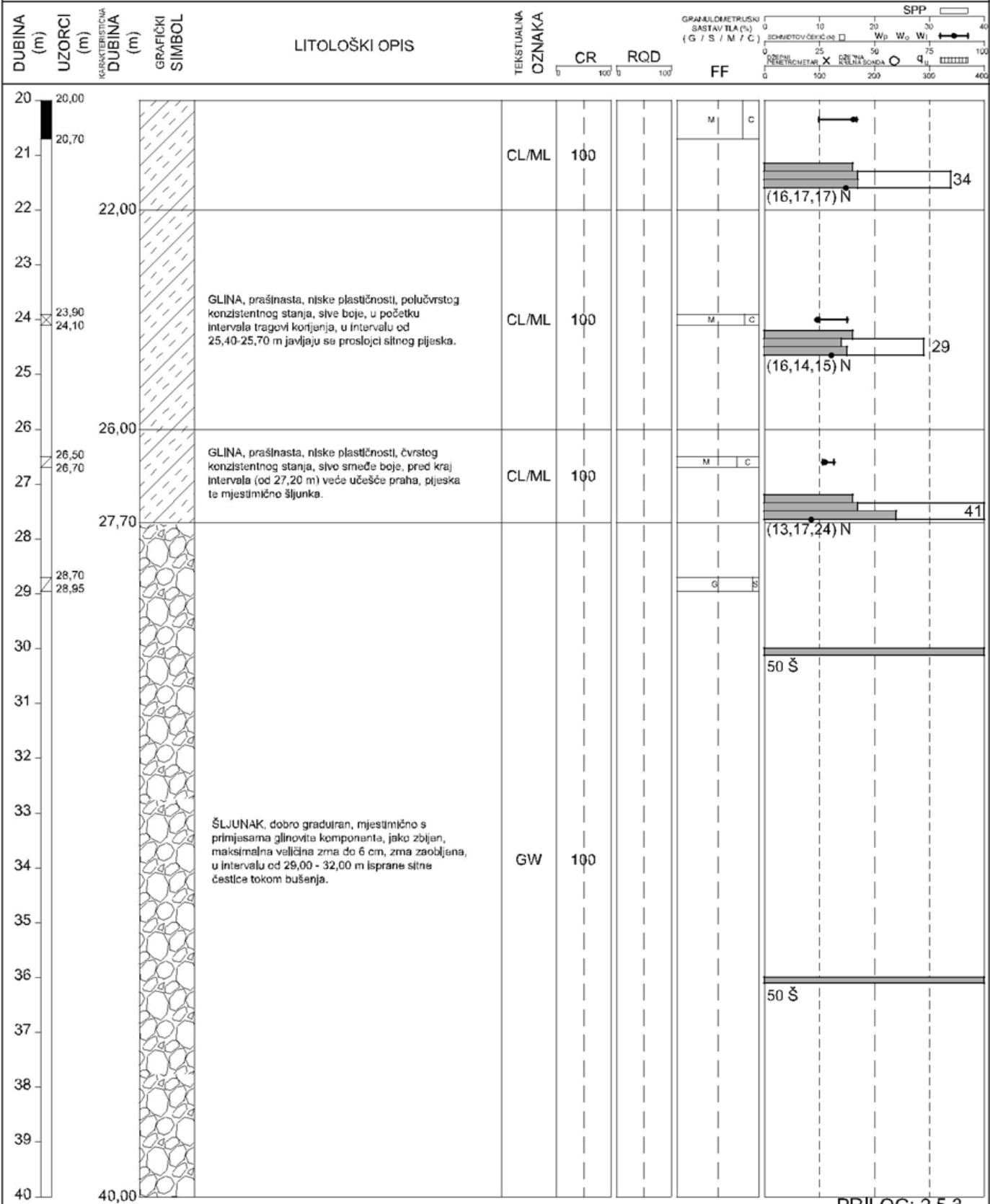
RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: PODSUSTAV "OPUZEN"-PREGRADA

## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: POP-B-1

KOORDINATE: E= 6463842.42      DATUM: 10.12.2012. - 14.12.2012.  
 N= 4765253.59      DETERMINACIJA: Goran Dizdar dipl.ing.grad.  
 H= 1,678 m n.m.      OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.grad.  
 POZICIJA: M 1:100

LIST 2 / 2

☒ POREMEĆENI UZORAK (do)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-do, MPa-stijena)  
 ■ NEPOREMEĆENI UZORAK (do, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 ⚡ POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m')       $w_p, w_o, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)



RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: PODSUSTAV "OPUZEN"-PREGRADA

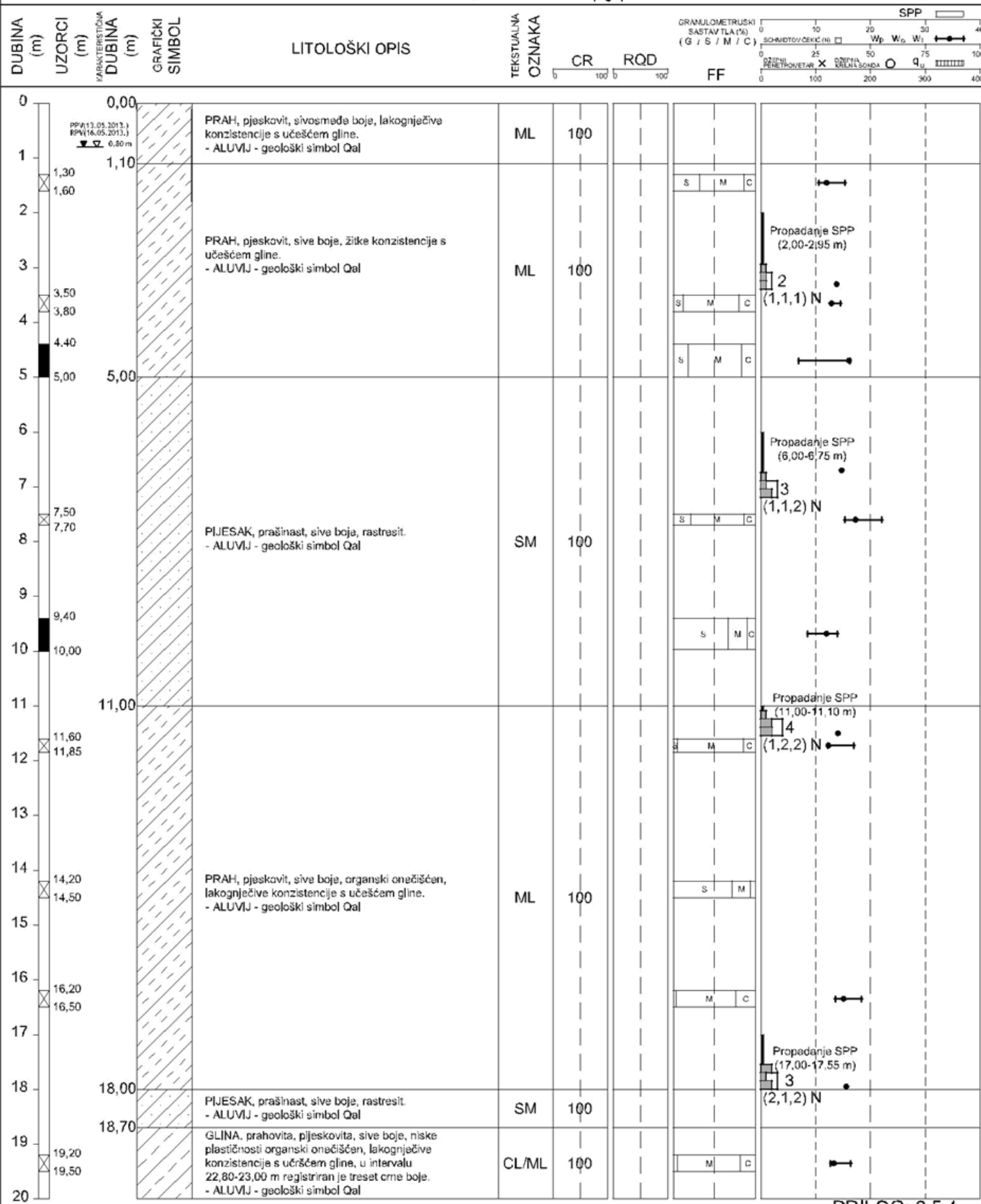
## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: POP-B-2

KOORDINATE: E= 6463994,38      DATUM: 13.05.2013. - 15.05.2013.  
 N= 4765251,58      DETERMINACIJA: Ivan Grabovac dipl.ing.geol.  
 0,836 m n.m.      OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.

POZICIJA: M 1:100

LIST 1 / 2

☒ POREMEĆENI UZORAK (tlo)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-tlo, MPa-stijena)  
 ■ NEPOREMEĆENI UZORAK (tlo, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 ▽ POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m')       $w_p, w_o, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)



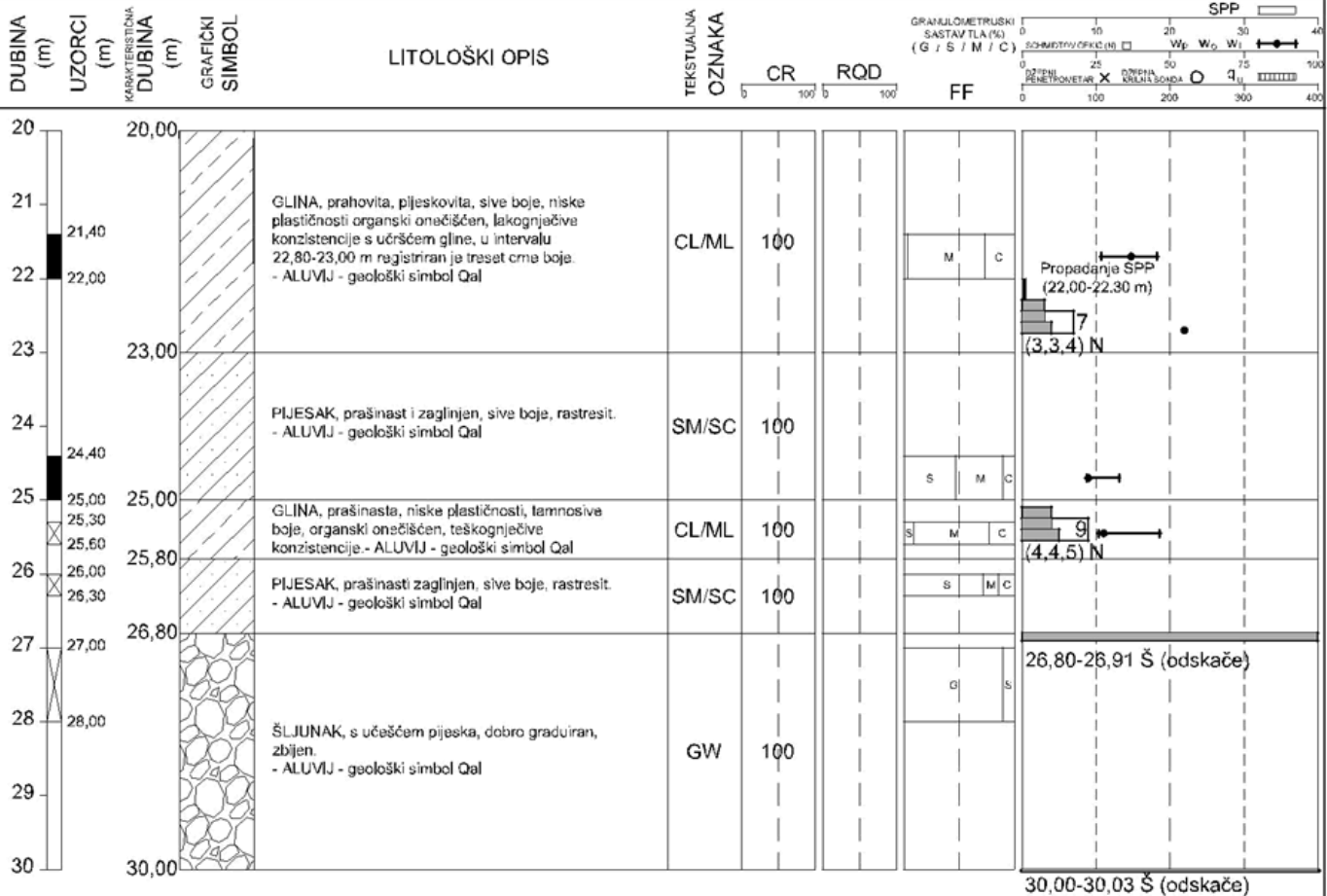
RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: PODSUSTAV "OPUZEN"-PREGRADA

## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: POP-B-2

KOORDINATE: E= 6463994,38      DATUM: 13.05.2013. - 15.05.2013.  
                   N= 4765251,58      DETERMINACIJA: Ivan Grabovac dipl.ing.geol.  
                   0,836 m n.m.          OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.

POZICIJA: M 1:100 LIST 2 / 2

POREMEĆENI UZORAK (tlo)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-tlo, MPa-stijena)  
 NEPOREMEĆENI UZORAK (tlo, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m')       $w_p, w_o, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)



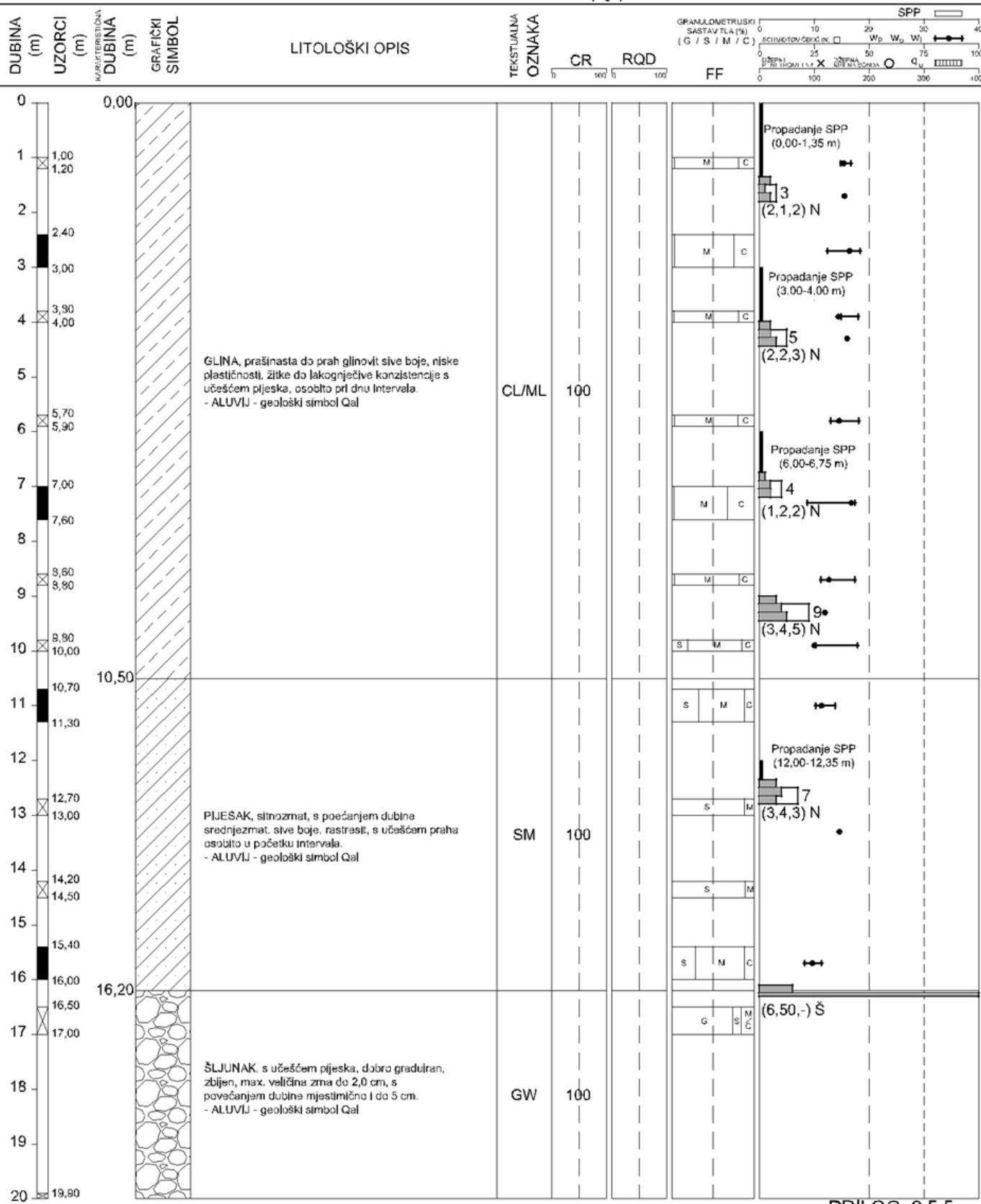
RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: PODSUSTAV "OPUZEN"-PREGRADA

## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: POP-B-3

KOORDINATE: E= 6463888,82      DATUM: 07.05.2013. - 08.05.2013.  
 N= 4765266,11      DETERMINACIJA: Ivan Grabovac dipl.ing.geol.  
 -10,10 m n.m.      OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.  
 POZICIJA: M 1:100

LIST 1 / 2

☒ POREMEĆENI UZORAK (tlo)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-tlo, MPa-stijena)  
 ■ NEPOREMEĆENI UZORAK (tlo, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 ▽ POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m')       $w_p, w_g, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)



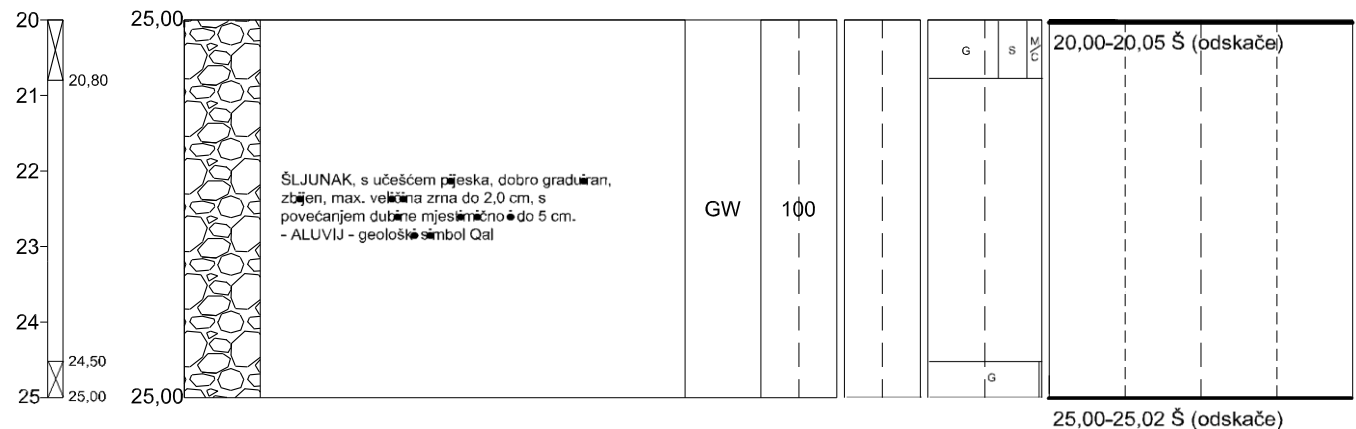
RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: PODSUSTAV "OPUZEN"-PREGRADA

### PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: POP-B-3

KOORDINATE: E= 6463888,82      DATUM: 07.05.2013. - 08.05.2013.  
 N= 4765266,11      DETERMINACIJA: Ivan Grabovac dipl.Ing.geol.  
 -10,10 m n.m.      OBRADA: Goran Dlzdar dipl.Ing.građ.  
 POZICIJA: M 1:100

LIST 2 / 2

☒ POREMEĆENI UZORAK (tlo)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-tlo, MPa-sijena)  
 ■ NEPOREMEĆENI UZORAK (tlo, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 ▽ POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m')       $w_p, w_o, w_L$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)



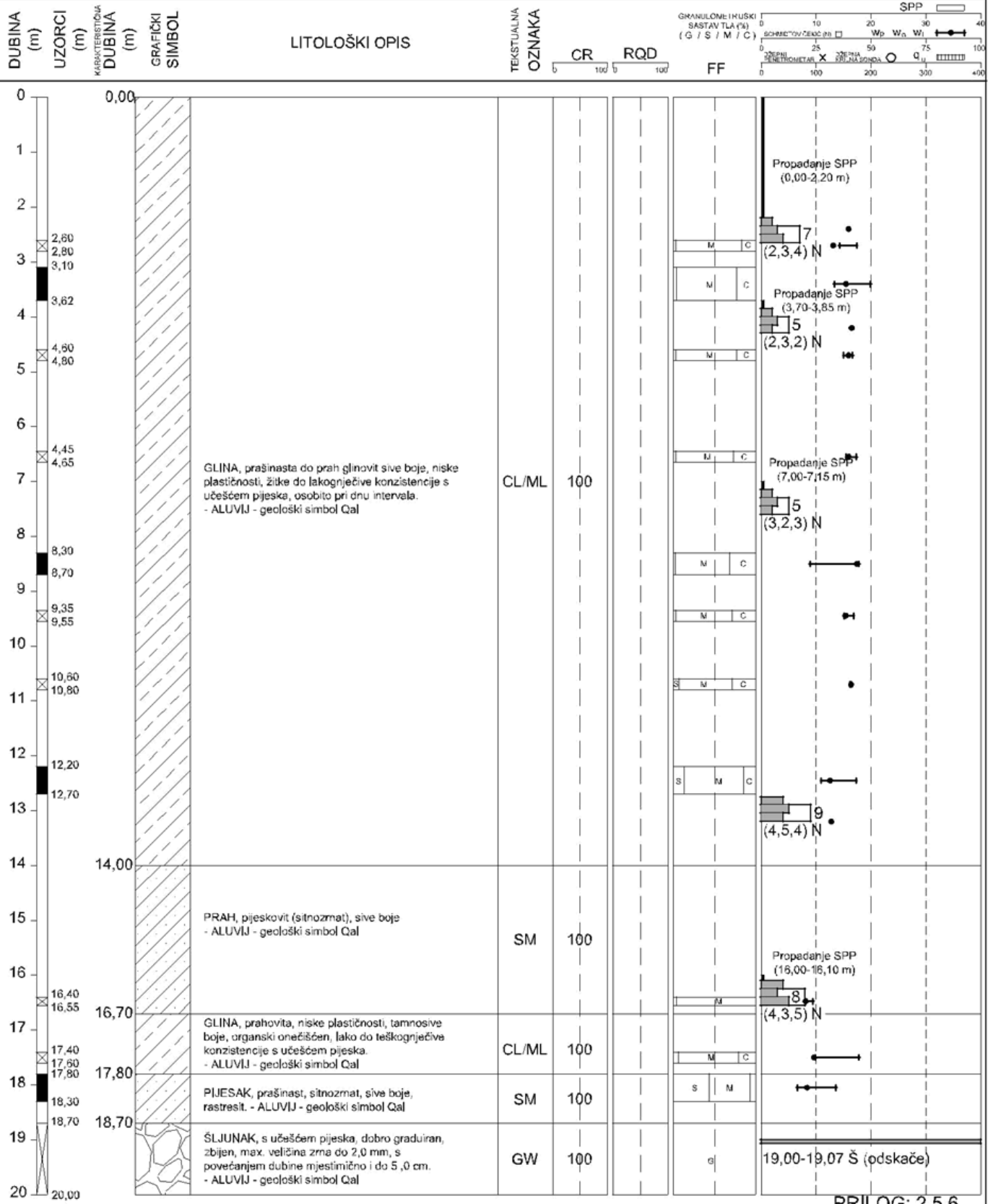
RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: PODSUSTAV "OPUZEN"-PREGRADA

## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: POP-B-4

KOORDINATE: E= 6463939,29      DATUM: 09.05.2013. - 10.05.2013.  
 N= 4765279,91      DETERMINACIJA: Ivan Grabovac dipl.ing.geol.  
 -8,30 m n.m.      OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.  
 POZICIJA: M 1:100

LIST 1 / 2

☒ POREMEĆENI UZORAK (tlo)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-tlo, MPa-stijena)  
 ■ NEPOREMEĆENI UZORAK (tlo, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 ▽ POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m')       $w_p, w_o, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)





RN: 77506056  
 NARUČITELJ: HRVATSKE VODE  
 IZVOĐAČ: IGH d.d.  
 GRAĐEVINA: PODSUSTAV "OPUZEN"-PREGRADA

INSTITUT IGH d.d.  
 ZAGREB  
 Zavod za geotehniku



## PRESJEK ISTRAŽIVAČKE BUŠOTINE: POP-B-4

KOORDINATE: E= 6463939,29  
 N= 4765279,91  
 -8,30 m n.m.

DATUM: 09.05.2013. - 10.05.2013.  
 DETERMINACIJA: Ivan Grabovac dipl.ing.geol.  
 OBRADA: Goran Dizdar dipl.ing.građ.

POZICIJA:

M 1:100

LIST 2 / 2

POREMEĆENI UZORAK (tlo)      CR DOBIVENA JEZGRA (%)       $q_u$  JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (kPa-tlo, MPa-stijena)  
 NEPOREMEĆENI UZORAK (tlo, stijena)      RQD KVALITETA STIJENE (%)      SPP STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS (broj udaraca)  
 POJAVA / RAZINA PODZEMNE VODE      FF UČESTALOST PUKOTINA (N / m')       $w_p, w_o, w_l$  ATTERBERGOVE GRANICE (%)

