Određivanje značajki napajanja vodonosnog sustava na širem području crpilišta Sikirevci u istočnoj Slavoniji

Briški, Maja

Doctoral thesis / Disertacija

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:322235

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Maja Briški

ODREĐIVANJE ZNAČAJKI NAPAJANJA VODONOSNOG SUSTAVA NA ŠIREM PODRUČJU CRPILIŠTA SIKIREVCI U ISTOČNOJ SLAVONIJI

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Kristijan Posavec

Zagreb, 2015

University of Zagreb

FACULTY OF MINING, GEOLOGY AND PETROLEUM ENGINEERING

Maja Briški

DETERMINATION OF THE AQUIFER SYSTEM RECHARGE CHARACTERISTICS ON BROADER AREA OF THE SIKIREVCI WELLFIELD IN EASTERN SLAVONIA

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Assoc. Prof. Kristijan Posavec, Ph.D.

Zagreb, 2015

MENTOR:

Dr. sc. Kristijan Posavec

Izvanredni profesor pri Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

Zahvala…

Voditeljici na Institutu dr.sc. Željki Brkić na predloženoj temi i velikoj pomoći u ostvarivanju zadanih ciljeva

Mentoru dr.sc. Kristijanu Posavcu na konstruktivnim prijedlozima koji su poboljšali kvalitetu rada

Članici komisije dr.sc. Andrei Bačani za korisne savjete i detaljan pregled rada

Kolegama na Hrvatskom geološkom institutu koji su mi pomagali na terenu i van terena

Gospodinu Ivici iz Gundinaca na pomoći pri sakupljanju uzoraka

I na kraju veliko hvala mojoj obitelji i Andreju…

SAŽETAK

Vodonosnik zahvaćen na crpilištu Sikirevci pripada strateškim zalihama podzemnih voda Republike Hrvatske. Za uspješno gospodarenje ovim važnim rezervama nužno je poznavati dinamiku podzemne vode u vodonosnom sustavu u postojećim uvjetima na temelju koje se može analizirati ponašanje sustava u različitim budućim scenarijima. Cilj provedenih istraživanja usmjeren je na detaljno istraživanje hidrodinamičkih značajki zahvaćenog vodonosnog sustava, definiranje napajanja vodonosnog sustava te porijekla i starosti podzemne vode.

Kao alat za određivanje napajanja istraživanog vodonosnog sustava korišten je trodimenzionalni numerički model. U radu je prikazan postupak izrade konceptualnog modela te izrada i kalibracija numeričkog modela vodonosnog sustava. Model je kalibriran za razdoblje od pet i pol godina na temelju izmjerenih razina podzemne vode te je postignuto vrlo dobro podudaranje mjerenih i izračunatih vrijednosti.

U sklopu terenskih istraživanja prikupljeni su uzorci podzemne vode, oborina i rijeke Save te su napravljene analize stabilnih izotopa kisika i vodika, tricija te osnovnih fizikalno-kemijskih pokazatelja. Izotopna i hidrokemijska istraživanja pomogla su u izradi konceptualnog modela. Koncentracije tricija u podzemnoj vodi pokazale su da je vrijeme zadržavanja vode dulje od 65 godina, što se slaže s rezultatima provedene simulacije trasiranja čestica. Hidrokemijska istraživanja su također pokazala da su u vodonosnom sustavu brzine toka razmjerno niske, što uzrokuje dugo zadržavanje vode u podzemlju.

Analiza bilance mase pokazala je da infiltracija oborina predstavlja glavni izvor obnavljanja podzemne vode na području modela, što je potvrđeno rezultatima analiza stabilnih izotopa kisika i vodika. Pražnjenje podzemnih voda odvija se u rijeku Savu, osim u razdobljima visokih vodostaja kada Sava napaja vodonosnik.

Iako je u prirodnim uvjetima rijeka Sava hidraulička granica, modeliranje je pokazalo da već kod relativno niskih crpnih količina od 200 L/s dolazi do toka podzemne vode ispod rijeke iz susjedne BiH, što upućuje na prekogranični karakter istraživanog vodonosnog sustava. Količine dotjecanja trebale bi se potvrditi kalibracijom desne obale Save, što nije bilo moguće zbog nepostojanja podataka o razinama podzemne vode na tom području.

Ključne riječi: aluvijalni vodonosni sustav, napajanje, numeričko modeliranje, stabilni izotopi vodika i kisika, MODFLOW, rijeka Sava, tok ispod rijeke

ABSTRACT

The aquifer captured on the wellfield Sikirevci is a part of the strategic water reserves of the Republic of Croatia. For effective management of these important water reserves it is necessary to know the dynamics of groundwater flow in the aquifer system under existing conditions which enables us to analyze the behavior of the system in a variety of future scenarios. The aim of the planned research is focused on a detailed study of hydrodynamic characteristics of the captured aquifer system, on defining recharge and also the origin and age of groundwater.

Three-dimensional numerical model was used as a tool of defining recharge of the investigated aquifer system. This paper describes the process of developing a conceptual model and the development and calibration of numerical model of groundwater system. The model was calibrated for a period of five and a half years on the basis of measured groundwater levels and very good agreement between measured and calculated values was achieved.

During field works the samples of groundwater, rainfall and river water were collected and the analysis of stable isotopes of oxygen and hydrogen, tritium and physico-chemical parameters were conducted. Isotopic and hydrochemical research helped in the development of a conceptual model. The concentrations of tritium in groundwater showed that the residence time of water is more than 65 years, which is consistent with the results of the simulation of particle tracking. Hydrochemical studies have also shown that flow rates in the aquifer system are relatively low, causing long residence time of water.

Mass balance analysis showed that the infiltration of rainfall is the main source of groundwater recharge in the area of the model. The same was confirmed by the results of the analysis of stable isotopes of oxygen and hydrogen. The groundwater discharges in the Sava river, except during periods of high water levels when Sava river recharges the aquifer.

Although the Save river forms hydraulic boundary in natural conditions, modeling results have shown that even relatively low pumping rates of 200 L/s cause the flow beneath the river from the neighbouringh Bosnia and Herzegovina to occur. This suggests transboundary character of the investigated groundwater system. The amount of inflow should be confirmed with the calibration of the right bank of the Sava river, which was not possible due to lack of groundwater levels data in that area.

Keywords: alluvial aquifer system, recharge, numerical modelling, stable isotopes of oxigen and hydrogen, MODFLOW, Sava river, under river flow

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja 3

2. PREGLED PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA 4

2.1. Geološka istraživanja šireg područja 4

2.2. Hidrogeološka istraživanja šireg područja 5

2.3. Hidrogeološka istraživanja na području regionalnog crpilišta istočne Slavonije 8

3. PRIRODNE ZNAČAJKE ŠIREG ISTRAŽIVANOG PODRUČJA 10

3.1. Geografski položaj, geomorfološke i klimatske značajke 10

3.2. Geološke značajke 16

3.2.1. Podloga kvartarno-tercijarnog kompleksa 18

3.2.2. Kvartarno-tercijarni kompleks naslaga 18

3.2.3. Strukturne značajke i tektonski razvoj 21

3.3. Hidrogeološke značajke kvartarnih vodonosnih slojeva 23

4. PROBLEMATIKA ODREĐIVANJA NAPAJANJA VODONOSNIKA 34

5. METODE ISTRAŽIVANJA 40

5.1. Terenska istraživanja 40

5.1.1. Opažanje razina podzemnih voda 40

5.1.2. Uzorkovanje 44

5.2. Izotopna i hidrokemijska istraživanja 45

5.3. Metode modeliranja podzemnih voda 50

5.3.1. Izrada konceptualnog modela 51

5.3.2. Odabir matematičkog modela toka i metode rješavanja 52

5.3.3. Izrada numeričkog modela 54

5.3.3.1. Diskretizacija prostora modela 54

5.3.3.2. Diskretizacija vremena 56

5.3.3.3. Parametri porozne sredine 56

5.3.3.4. Rubni uvjeti 57

5.3.3.5. Početni uvjeti ... 58
5.3.4. Kalibracija modela ... 59
5.3.5. Analiza pogreške modela ... 60
5.3.6. Analiza bilance mase ... 61
5.3.7. Analiza osjetljivosti i nesigurnosti ... 61
5.3.8. Verifikacija modela ... 63
5.3.9. Predviđanje ... 63
5.3.10. Simulacija trasiranja čestica ... 64
6. KONCEPTUALNI MODEL CRPILIŠTA SIKIREVCI ... 66
6.1. Karakteristike i nedostatci prethodnih modela ... 66
6.2. Rezultati motrenja dinamike podzemne vode i procesa napajanja/dreniranja vodonosnog sustava iz rijeke Save ... 68
6.3. Rezultati izotopnih i hidrokemijskih istraživanja napajanja vodonosnog sustava iz oborina i rijeke Save ... 74
6.4. Konceptualni model zahvaćenog vodonosnog sustava ... 86
7. NUMERIČKI MODEL CRPILIŠTA SIKIREVCI ... 93
7.1. Diskretizacija vremena i prostora ... 93
7.2. Parametri porozne sredine ... 95
7.3. Početni i rubni uvjeti ... 95
7.4. Kalibracija modela ... 99
7.4.1. Podaci za kalibraciju ... 99
7.4.2. Hidrogeološki parametri ... 100
7.4.3. Rubni uvjeti ... 102
7.4.3.1. Rijeka Sava ... 102
7.4.3.2. Infiltracija oborina ... 103
7.5. Rezultati kalibracije modela ... 105
7.5.1. Usporedbe mjerenih i izračunatih vrijednosti razina podzemne vode ... 105
7.5.2. Karte hidroizohipsi ... 114
7.5.3. Analiza bilance mase ... 116
7.6. Analiza osjetljivosti i nesigurnosti ... 117
7.7. Analiza vremena zadržavanja vode u podzemlju ... 125

8. NAPAJANJE VODONOSNOG SUSTAVA 127
9. RASPRAVA 134
10. ZAKLJUČAK 139
LITERATURA 143
Objavljeni radovi 143
Neobjavljeni radovi 161
Radovi u fondovima stručne dokumentacije 162

POPIS SLIKA

Slika 3.1 Geografski položaj šireg istraživanog područja 10
Slika 3.2 Reljef i hidrografska mreža šireg istraživanog područja 11
Slika 3.3 Satelitska snimka poplave u svibnju 2014. (NASA, Landsat 8) 13
Slika 3.4 Karta srednje godišnje oborine (prema Gajić-Čapka et al., 2003) 15
Slika 3.5 Karta srednje godišnje temperature zraka (prema Zaninović et al., 2004) 15
Slika 3.6 Srednje mjesečne količine oborina i srednje mjesečne temperature zraka na mjernoj stanici Slavonski Brod (prema podacima DHMZ-a) 16
Slika 3.7 Isječak iz Osnovne geološke karte Republike Hrvatske 1:300000 (prema HGI, 2009) 17
Slika 3.8 Strukturno-tektonski odnosi u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena (iz Brkić, 1999, prema Lučić et al., 2001) 22
Slika 3.9 Isječak iz Hidrogeološke karte M 1:300 000 (prema Biondić et al., 2003) 24
Slika 3.10 Tumač isječka Hidrogeološke karte M 1:300 000 sa slike 3.9 (prema Biondić et al., 2003) 25
Slika 3.11 Karta debljina kvartarnog vodonosnog kompleksa (prema Hernitz, 1983) 26
Slika 3.12 Shematiziran prikaz područja prostiranja vodonosnih slojeva do dubine 180 m (modificirano prema Miletić et al., 1986) 28
Slika 3.13 Shematiziran profil A-B pružanja vodonosnih slojeva do dubine 180 m (modificirano prema Miletić et al., 1986) 29
Slika 3.14 Profili slojeva 1-1' i 2-2' sa slike 3.12 32
Slika 5.1 Lokacije mjerenja razina podzemne vode i uzimanja uzoraka 43
Slika 5.2 Osnovni tipovi slojeva u MODFLOW programu 55
Slika 6.1 Razine podzemne vode na odabranim piezometrima i vodostaji rijeke Save 68
Slika 6.2 Usporedba razina podzemne vode u vodonosniku i krovinskim naslagama 69
Slika 6.3 Karte hidroizohipsi za srednje (26.06.2013.) i niske (29.08.2012.) (a) i visoke (27.03.2013.) (b) vode 70
Slika 6.4 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometrima na crpilištu za razdoblje lipanj 2008. - prosinac 2013. 71
Slika 6.5 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2008-2009 72
Slika 6.6 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2009-2010 72

Slika 6.7 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2010-2011 73
Slika 6.8 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2011-2012 73
Slika 6.9 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2012-2013 74
Slika 6.10 Raspodjela vrijednosti $\delta^{18}O$ u vremenu 75
Slika 6.11 Raspodjela vrijednosti $\delta^{2}H$ u vremenu 75
Slika 6.12 Minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti $\delta^{18}O$ svih prikupljenih uzoraka 76
Slika 6.13 Minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti $\delta^{2}H$ svih prikupljenih uzoraka 76
Slika 6.14 Sadržaja $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ u uzorcima podzemne vode i rijeke Save i lokalna linija meteorske vode 77
Slika 6.15 Raspodjela suviška deuterija u vremenu u podzemnoj vodi, rijeci Savi i oborinama 78
Slika 6.16 Odnos između $\delta^{18}O$ u rijeci Savi i u podzemnoj vodi 78
Slika 6.17 Piperov dijagram analiziranih uzoraka podzemne vode i rijeke Save 79
Slika 6.18 Molarni omjer Mg^{2+}/Ca^{2+} naspram Mg^{2+} 83
Slika 6.19 Odnos između molarnog omjera Mg^{2+}/Ca^{2+} i vodostaja rijeke Save 84
Slika 6.20 Bivarijatni dijagram mijašanja Na^{+}-normalizirani Ca^{2+} naspram a) Na^{+}-normalizirani Mg^{2+}; (b) Na^{+}-normallizirani HCO_3^{-} 84
Slika 6.21 Bivarijatni dijagram (Ca^{2+} i Mg^{2+}) minus (HCO_3^{-} i SO_4^{2-}) naspram Na^{+} minus Cl^{-}: a) P-KOP, P-ŠAM, V-13; b) SPB-4, SPB-7, SPB-9 85
Slika 6.22 Bivarijatni dijagram Na^{+}-normalizirani Cl^{-} naspram Cl^{-} 85
Slika 6.23 Profil naslaga pružanja Z-I na području crpilišta Sikirevci (pružanje profila označeno je na slici 5.1) 87
Slika 6.24 3D konceptualni model vodonosnika – pogled A sa slike 6.3a 88
Slika 6.25 3D konceptualni model vodonosnika – pogled B sa slike 6.3a 89
Slika 6.26 Granice konceptualnog modela 90
Slika 7.1 Prostorna domena modela. Tumač oznaka: zelena boja – neaktivni elementi, crvena boja – granica zadanog potencijala, plava boja – rijeka; crveni krug - zdenac 94
Slika 7.2 Vertikalna diskretizacija modela (profili 1 i 2 sa slike 7.1). Tumač oznaka kao na slici 7.1 94
Slika 7.3 Raspodjela potencijala u početno vrijeme na domeni modela 96
Slika 7.4 Shematski prikaz riječne granice u programu MODFLOW 98

Slika 7.5 Osrednjene razine podzemne vode i vodostaji rijeke Save te razine mjerene ručnim mjeračem 100
Slika 7.6 Hidraulička vodljivost krovinskih naslaga a) i vodonosnih naslaga b) 101
Slika 7.7 Usporedba mjesečnih količina oborina, vodostaja rijeke Save i razina podzemne vode u piezometrima te linije trendova 103
Slika 7.8 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za sve analizirane piezometre 105
Slika 7.9 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometre SPB-7 i SPB-9 106
Slika 7.10 Nivogrami kalibracije modela za piezometre SPB-7 i SPB-9 107
Slika 7.11 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometre SPB-4 i SPB-6 108
Slika 7.12 Nivogrami kalibracije modela za piezometre SPB-4 i SPB-6 108
Slika 7.13 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometre SPB-11 i SPB-20 109
Slika 7.14 Nivogrami kalibracije modela za piezometre SPB-11 i SPB-20 110
Slika 7.15 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometre SPB-24 i SPB-26 111
Slika 7.16 Nivogrami kalibracije modela za piezometre SPB-24 i SPB-26 111
Slika 7.17 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometar V-13.. 112
Slika 7.18 Nivogrami kalibracije modela za piezometre V-13, V-34 i SB-5 113
Slika 7.19 Histogram reziduala 114
Slika 7.20 Razine podzemnih voda dobivene modeliranjem za visoke i srednje (a) i niske vode (b) 115
Slika 7.21 Bilanca mase 116
Slika 7.22 Postotak diskrepancije bilance mase 116
Slika 7.23 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema hidrauličkoj vodljivosti vodonosnih naslaga 117
Slika 7.24 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema specifičnom koeficijentu uskladištenja vodonosnih naslaga 118
Slika 7.25 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema hidrauličkoj vodljivosti krovinskih naslaga 118
Slika 7.26 Različite zone hidrauličke vodljivosti u krovinskim naslagama 119
Slika 7.27 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema količini infiltracije 120

Slika 7.28 Razlike u razinama podzemne vode s i bez infiltracije uspoređeno s razinom podzemne vode na piezometru 120
Slika 7.29 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema hidrauličkoj vodljivosti naslaga riječnog dna 121
Slika 7.30 Usporedba osrednjenih mjesečnih i dnevnih razina podzemne vode i vodostaja rijeke Save 122
Slika 7.31 Usporedba krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode s dnevnim i osrednjenim mjesečnim podacima (lipanj 2008 – prosinac 2013) 123
Slika 7.32 Usporedba izračunatih razina podzemne vode s mjesečnim i dnevnim vremenskim korakom 124
Slika 7.33 Usporedba bilance mase s dnevnim i mjesečnim vremenskim korakom 124
Slika 7.34 Rezultati stacionarne simulacije trasiranja čestica u slučaju crpljenja 200 L/s 126
Slika 8.1 Bilanca mase vodonosnog sustava na lijevoj strani rijeke Save (lipanj 2008 – prosinac 2013) 127
Slika 8.2 Bilanca mase vodonosnog sustava na lijevoj strani rijeke Save izražena u postotcima (lipanj 2008 – prosinac 2013) 128
Slika 8.3 Bilanca za visoke vode (korak 930) 129
Slika 8.4 Bilanca za srednje vode (korak 1830) 129
Slika 8.5 Bilanca za niske vode (korak 1200) 130
Slika 8.6 Bilanca za sušnu hidrološku godinu (rujan 2011 – kolovoz 2012) 131
Slika 8.7 Bilanca za vlažnu hidrološku godinu (rujan 2012 – kolovoz 2013) 131
Slika 8.8 Ulazne i izlazne količine vode iz rijeke Save po hidrološkim godinama 132
Slika 8.9 Bilanca mase za razdoblje od dva mjeseca niskih voda za simulaciju s dnevnim i mjesečnim vremenskim korakom 133
Slika 8.10 Bilanca mase za razdoblje od dva mjeseca visokih voda za simulaciju s dnevnim i mjesečnim vremenskim korakom 133

POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Karakteristike objekata iz kojih su uzimani uzorci i u kojima je ručno mjerena razina podzemne vode 45
Tablica 6.1 Fizikalno-kemijske karakteristike analiziranih voda 81

1. UVOD

Poznavanje načina obnavljanja podzemne vode je vrlo važan element učinkovitog gospodarenja vodnim zalihama, njihovog korištenja i zaštite od onečišćenja. Napajanje vodonosnika, posebice onih u čijoj su krovini istaložene debele slabo propusne naslage, razmjerno je teško odrediti jer se ne može neposredno mjeriti. Također, napajanje u prirodnom stanju razlikuje se od onog u uvjetima intenzivnog crpljenja kada se prirodno stanje naruši (Brkić et al., 2013).

U modernim hidrogeološkim istraživanjima upotreba numeričkog modeliranja postala je uobičajena praksa. U zadnjih nekoliko desetljeća metode modeliranja su se intenzivno razvijale, a sve šira upotreba i dostupnost računala doprinijela je masovnijoj primjeni ovih metoda. Literatura koja se bavi ovim područjem vrlo je opsežna te je ovdje moguće navesti samo mali dio radova (Anderson & Woessner, 2002; Beckers & Frind, 2000, 2001; Boonstra & Ridder, 1981; Dodson, 2009; Franke et al., 1987; Jaworska-Szulc, 2009; Krešić, 2007; Martin & Frind, 1998; McDonald & Harbaugh, 2003; Neuman & Wierenga 2003; Olsson & Andersson, 2007; Poeter & Hill, 1997; Reilly & Harbaugh, 2004; Spitz & Moreno, 1996; Troldborg, 2004; Wilson, 2005). Pri izradi numeričkog modela posebnu pažnju treba posvetiti postavljanju konceptualnog modela. Istraživanja su pokazala da razlike u konceptualnim modelima uzrokuju različita predviđanja ponašanja sustava nakon razdoblja kalibracije (Troldborg et al., 2007) te da je nesigurnost u konceptualni model glavni izvor nesigurnosti u predviđanja modela (Harrar et al., 2003; Hojberg & Refsgaard, 2005; Neuman & Wierenga 2003). Razlike u konceptualizaciji bazirane su na subjektivnim hidrogeološkim interpretacijama, što je sastavni dio izrade konceptualnog modela (Harrar et al., 2003; Neuman & Wierenga 2003).

Dobro izrađen model vodonosnog sustava omogućava realno predviđanje promjena u sustavu koje nastaju pod utjecajem intenzivnog crpljenja. Treba napomenuti da je za izradu pouzdanog modela potrebno raspolagati detaljnim podacima o geološkoj građi i hidrogeološkim svojstvima područja zahvaćenog modelom. Na istraživanom području su u više navrata u posljednjih 40 godina izvođena hidrogeološka istraživanja, s ciljem uspostave regionalnog crpilišta. Podaci dobiveni ovim istraživanjima omogućili su detaljan uvid u građu i svojstva naslaga predmetnog područja, što je nužno za izradu kvalitetnog konceptualnog modela.

Kalibracija modela je osnovni pokazatelj realnosti modela, a za dobru kalibraciju potrebno je raspolagati s dovoljnim brojem podataka o razinama podzemne vode. Na području

crpilišta Sikirevci raspolaže se s podacima o razinama podzemne vode od 2007. do 2014. godine, što predstavlja kvalitetnu podlogu za kalibraciju modela. Kalibrirani i verificirani model može se koristiti za predviđanje ponašanja vodonosnog sustava u različitim budućim uvjetima.

Analiza bilance mase kalibriranog modela omogućuje kvantificiranje ulaznih i izlaznih količina vode u sustav iz različitih izvora. To je omogućilo da se odredi napajanje vodonosnika iz riječnog korita, infiltracijom oborina te tokom podzemne vode ispod riječnog korita. Interakcija između površinskog toka (rijeke) i podzemne vode kontrolirana je hidrauličkim značajkama naslaga riječnog dna koje se teško mogu direktno izmjeriti (Sophocleous, 2002). Te vrijednosti su se utvrdile kroz kalibraciju modela. Kontakt rijeke Save i vodonosnika je najveća nepoznanica u modelu, pošto o naslagama na kontaktu ima vrlo mali broj podataka. Ovim modelom se pokušalo što bolje definirati kontakt rijeke Save i vodonosnika s obzirom na raspoložive podatke. Pretpostavka je da je rijeka Sava u prirodnim uvjetima hidraulička granica, a simulacijom se istražilo da li u uvjetima dugotrajnog crpljenja većih količina vode može doći do toka podzemne vode ispod riječnog korita.

Za bolje sagledavanje različitih izvora napajanja vodonosnika, te za pomoć u konceptualizaciji sustava koristili su se dodatno i rezultati analiza stabilnih izotopa kisika i vodika (^{18}O i ^{2}H), analize sadržaja tricija, te rezultati hidrokemijskih istraživanja. Izotopna istraživanja koriste se za određivanje porijekla i starosti vode, za procjenu omjera miješanja voda iz različitih izvora te za proučavanje odnosa površinskih i podzemnih voda (Maloszewski et al., 1990; Yurtsever & Araguas, 1993; Boronina, et al., 2005; Fórizs et al., 2005; Hunt et al., 2005).

Rad je strukturiran na način da je prvo prikazan pregled prethodnih geoloških i hidrogeoloških istraživanja šireg područja. Zatim su opisane prirodne značajke šireg područja, koje uključuju geografski položaj, geomorfološke i klimatske značajke te geološke i hidrogeološke značajke. U nastavku slijedi teoretski dio u kojem je opisana problematika određivanja napajanja vodonosnika te metode korištene u istraživanju. Metode su podijeljene na terenska istraživanja, izotopna i hidrokemijska istraživanja te metode modeliranja podzemnih voda. Nakon teoretskih osnova prelazi se na njihovu praktičnu primjenu, tj. slijedi opis izrade konceptualnog modela šireg područja crpilišta Sikirevci, te izrade i kalibracije numeričkog modela. U poglavlju o napajanju vodonosnog sustava iznesene su pojedinačne količine napajanja vodonosnog sustava iz različitih izvora, u različitim hidrološkim uvjetima, koje su dobivene kao rezultat kalibriranog numeričkog modela. U raspravi se posvetilo problemima koji su se pojavili u tijeku istraživanja, izvorima nesigurnosti te su predloženi

daljnji koraci za smanjivanje nesigurnosti i poboljšanje modela. Modeliranje podzemnih voda je proces u kojem se svakim novim podacima s terena model može poboljšati, te se nikad ne može smatrati u potpunosti dovršenim.

1.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Ciljevi:

1. Kvantitativno odrediti napajanje vodonosnog sustava iz različitih izvora: rijeka Sava, infiltracija oborina, tok podzemne vode ispod rijeke.
2. Istražiti međusobne odnose površinskih i podzemnih voda.
3. Odrediti prekogranični karakter vodonosnog sustava.
4. Usporediti rezultate numeričkog modeliranja s rezultatima izotopnih istraživanja u smislu sagledavanja izvora napajanja vodonosnika i starosti podzemne vode.

Hipoteze:

1. Vodonosnik zahvaćen na crpilištu se dominantno napaja infiltracijom oborina, dok je iznos napajanja iz rijeke Save znatno manji.
2. Pod utjecajem intenzivnog crpljenja može doći do pojave toka podzemne vode ispod riječnog korita, dok je u prirodnim uvjetima riječno korito hidraulička granica.
3. Razmjerno stara voda ne znači da nema obnavljanja podzemne vode. Starost podzemne vode u vodonosnicima međuzrnske poroznosti može iznositi nekoliko desetljeća zbog relativno dugog vremena zadržavanja u podzemlju.

2. PREGLED PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA

2.1. Geološka istraživanja šireg područja

Dosadašnja geološka istraživanja na području istočne Slavonije razmjerno su opsežna. Prva istraživanja započinju u drugoj polovici devetnaestog stoljeća (Pilar, 1876), a vezana su za istraživanja prapornih naslaga. Praporne naslage nastavili su istraživati Šandor (1912) i Gorjanović-Kramberger (1920, 1922). Takšić (1932) piše o Rvenici kao povremenoj vezi između Vuke i Bosuta, a kasnije (1947) iznosi zapažanja o sastavu prapora i nižih pleistocenskih naslaga. Tajder (1942) analizira sastav prapornih naslaga u Srijemu, i zaključuje da on predstavlja materijal donesen vjetrom iz Alpi u razdoblju gornjeg pleistocena.

Polovicom prošlog stoljeća započela su opsežnija istraživanja dubinske građe praćena istražnim bušenjima. Zbog velikog broja objavljenih radova ovdje su pretežno opisana istraživanja koja su pridonijela poznavanju kvartarnih naslaga pošto je tema ovog rada fokusirana na kvartarne vodonosne naslage.

U šezdesetim godinama prošlog stoljeća u okviru radova na istraživanju nafte u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena poduzeće „Naftaplin“ obuhvatilo je i istočnu Slavoniju regionalnim geološkim radovima. Izveden je velik broj dubokih bušotina, a izvršena su i brojna geofizička ispitivanja. Na osnovi rezultata dubokih istražnih bušotina dobiven je redoslijed sedimentacije na južnoj rubnoj zoni Panonskog bazena (Jagačić, 1963). Šimon (1973) izdvaja 5 litostratigrafskih jedinica (formacija) unutar tercijarnog kompleksa naslaga, od kojih najmlađa (*Vuka formacija*) obuhvaća pliocen i kvartar. O strukturnim, tektonskim i litostratigrafskim odnosima unutar tercijarnih naslaga, obuhvativši i kvartarne, pisali su Kranjec et al. (1969a, 1969b, 1970), Haček i Oluić (1969), Vidović (1974) te Hernitz (1970, 1983). Prelogović i Cvijanović (1983), a u novije vrijeme Prelogović et al. (1995, 1998) te Lučić et al (2001) daju pregled neotektonskih zbivanja u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. Pavelić et al. (2003) su opisali cijeli proces tektonskog razvoja i taloženja naslaga u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. U novijim naftno-geološkim istraživanjima neogenski sedimenti jugozapadnog dijela Panonskog bazena podijeljeni su u tri megaciklusa odvojena međusobno erozijskim diskontinuitetima (Velić et al., 2002; Saftić et al., 2003).

O geološkoj građi kvartarnih naslaga pisali su Malez (1971), Šimunić et al. (1973) te Urumović i Sokač (1974). Galović i Mutić (1984) su opisali praporne naslage istočne Hrvatske. Sokač (1976) je na osnovi paleontoloških analiza raščlanio kvartarne naslage na

donji, srednji i gornji pleistocen, a Mutić (1993) je na osnovi mineraloških i petrografskih analiza odredila ishodište materijala kvartarnih naslaga i utjecaj klimatskih promjena na taloženje. Pregled pliokvartarnih naslaga (*Vuka formacije*) s naglaskom na hidrogeološke karakteristike te njihovu detaljnu podjelu dali su Urumović et al. (1976a, 1978).

Sinteza geoloških karakteristika šireg područja istraživanja prikazana je na Osnovnim geološkim kartama SFRJ 1:100 000, listovi Slavonski Brod i Vinkovci i u njihovim tumačima (Šparica et al., 1987; Brkić et al., 1989; Galović et al., 1989) te na Geološkoj karti Republike Hrvatske 1:300 000 i pratećem tumaču (HGI, 2009a; HGI 2009b).

2.2. Hidrogeološka istraživanja šireg područja

Prva sustavna hidrogeološka istraživanja savskog vodonosnika u istočnoj Slavoniji provedena su na širem području Slavonskog Broda, gdje je na Jelas Polju 1948. godine izbušeno 19 bušotina (Urumović & Mihelčić, 2000). Prvi pokusno-eksploatacijski zdenac izveden je 1950. godine, a 70-tih godina je nastavljeno s proširivanjem crpilišta. Povoljni rezultati ovih istraživanja vjerojatno su potaknuli daljnja istraživanja krajem 60-tih i početkom 70-tih u Vinkovcima, Đakovu, Županji te brojnim naseljima Brodskog Posavlja.

Miletić (1969) te Miletić et al. (1975a) daju regionalnu hidrogeološku obradu područja sjeverne Hrvatske. U radovima su opisane hidrogeološke karakteristike sjeverne Hrvatske, te je područje po vertikali podijeljeno na dvije hidrogeološke zone. Prva zona sadrži vode pogodne za vodoopskrbu, temperature do 20°C i ukupne mineralizacije do 2000 mg/l otopljenih mineralnih tvari. Podijeljena je na tri hidrogeološke jedinice. O geološkoj građi prve hidrogeološke zone na području savske doline i istočne Slavonije pišu Miletić i Urumović (1975). Druga zona sadrži termalne, mineralne i termomineralne vode temperature više od 20°C s više od 2000 mg/l otopljenih mineralnih tvari. Ova zona slabije je istražena od prve, a podijeljena je na tri arteška područja koja su ograničena rasjedima. Miletić et al. (1975b) pišu o drugoj hidrogeološkoj zoni te navode da se gornja granica nalazi na prosječnoj dubini oko 150 m (60 m-300 m) na savskom području.

Miletić et al. (1973) analiziraju pojavu željeza u podzemnim vodama u porječju Save te zaključuju da količina željeza uglavnom ovisi o hidrogeološkoj ulozi i položaju horizonta, a ne o geološkoj pripadnosti.

Regionalna hidrogeološka istraživanja koja su obuhvatila cijelo područje savskog aluvijalnog vodonosnika istočno od Slavonskog Broda provedena su 1974. i 1975. godine (Urumović et al., 1976b). Cilj istraživanja bilo je rješavanje pitanja vodoopskrbe u istočnoj

Slavoniji. Izvedeno je sedamdeset geoelektričnih sondi na tri profila, pet plitkih i šest dubokih istraživačko-piezometarskih bušotina te šest pokusno-eksploatacijskih zdenaca. Određene su prosječne vrijednosti hidrogeoloških parametara i eksploatacijske zalihe te je područje podijeljeno prema pogodnosti za izradu regionalnog i lokalnih crpilišta. Područje uz lijevu obalu Save, od Sredanaca do Bošnjaka klasificirano je kao pogodno za izgradnju regionalnog crpilišta. Daljnja istraživanja nastavljena su u periodu od 1977. do 1981. godine (Geofizika, 1978-1981) kada je izveden velik broj strukturno-piezometarskih bušotina i pokusno eksploatacijskih zdenaca na širem području.

Urumović et al. (1976a) su na temelju velikog broja podataka iz dubokih bušotina za naftu i plin te elektorkarotažnih dijagrama odredili debljinu *Lonja-Vuka-Mura formacije*, koja obuhvaća naslage pliocena i kvartara sjeverne Hrvatske. Također su razdvojili ovu formaciju na dvije litološke cjeline: gornji „rastresiti“ dio i donji dio, a granica je označena uvjetnim markerom Q'. Urumović (1977) naziva gornji „rastresiti“ dio „kvartarni vodonosni kompleks“ te prikazuje kartu debljina vodonosnog kompleksa na području istočne Posavine. Također analizira hidrogeološke odnose, bilancu podzemnih voda te potencijalne lokacije za regionalna crpilišta. Urumović et al. (1978) dijele kvartarne naslage u istočnoj Posavini na donji, srednji i gornji pleistocen s holocenom, te zaključuju da uvjetni marker Q' predstavlja približno granicu između srednjeg i donjeg pleistocena. Najveće debljine vodonosnog kompleksa iznad markera Q' iznose preko 300 m.

Na temelju novijih podataka o hidrogeološkoj građi prve hidrogeološke zone sliva Save u istočnoj Slavoniji Miletić et al. (1986) izdvajaju četiri vodonosna sloja prema dubini zalijeganja. Također procjenjuju rezerve podzemnih voda i zaključuju da se veće količine vode mogu eksploatirati jedino u prvom vodonosnom sloju koji nazivaju Velika Kopanica, prema lokaciji gdje je prvi puta određen. Grgić et al. (1991) istražuju vrijeme zadržavanja podzemne vode u drugom i trećem sloju na području Vinkovaca i Đakova uz pomoć analiza radioaktivnog izotopa ugljika i tricija. Zaključuju da ova dva sloja predstavljaju odvojene hidrogeološke sustave s različitom količinom infiltracije i područjem napajanja te da ne postoji značajna komunikacija današnje oborinske vode i promatranih vodonosnih horizonata. Capar (1992) iznosi pregled dotadašnjih istraživanja savskog sliva u istočnoj Slavoniji i na temelju podataka velikog broja bušotina i zdenaca zaključuje da vodonosni sloj Velika Kopanica ima najveće debljine i najveće rezerve podzemnih voda. Također pokazuje bolju kvalitetu vode od dubljih slojeva te je zbog svih iznesenih činjenica najpogodniji za lokaciju regionalnog crpilišta.

Miletić et al. (1993) prikazuju postupak definiranja konceptualnog modela hidrogeološkog sustava na primjeru matematičkog modela drugog vodonosnog sloja na području istočne Slavonije. Zaključuju da je utjecaj Save izrazit na području uz Savu unutar prvog vodonosnog sloja, a udaljavanjem od rijeke njezin utjecaj slabi. Ukazuju i da na dijelovima sjeverne granice postoji hidraulička veza između Savskog i Dravskog porječja, što kasnije potvrđuje i Bačani (1997). Bačani et al. (1999) istražuju utjecaj rasjednih zona, koje razdvajaju strukturno tektonske jedinice, na kontinuitet vodonosnih slojeva Savske i Dravske potoline. Zaključuju da litološki kontinuitet vodonosnih slojeva nije narušen duž rasjednih zona Đakovačko-Vinkovačkog i Vukovarskog ravnjaka što znači da na razvođu između Savskog i Dravskog sliva ne postoji nepropusna hidraulička granica. Postoje samo zone smanjene transmisivnosti te ako sniženje uzrokovano crpljenjem dosegne razvodnicu, ona će se pomaknuti sa svog prirodnog položaja.

Bačani et al. (1991) istražuju utjecaj slabopropusnih naslaga na obnavljanje zaliha podzemnih voda na području istočne Slavonije. Dolaze do zaključka da se koeficijent vertikalne hidrauličke vodljivosti krovinskih naslaga najbolje može odrediti indirektno preko interpretacije pokusnog crpljenja niže položenog vodonosnog sloja. Također ističu da specifični koeficijent uskladištenja krovinskih naslaga nije zanemariv te da je dotok vode iz njega jednokratan. Nešto kasnije Brkić (1999) istražuje značajke napajanja aluvijalnih vodonosnika cijelog područja sjeverne Hrvatske kroz polupropusne krovinske naslage. Posebnu pozornost posvećuje ulozi napajanja kroz proces infiltracije oborina.

Dio istraživanog područja nalazi se na području susjedne Bosne i Hercegovine. Hidrogeološke karakteristike sliva rijeke Save na teritoriju Bosne i Hercegovine obradili su Josipović i Atanacković (1968). Josipović (1974) daje pregled hidrogeoloških karakteristika cijelog područja Bosne i Hercegovine, a Miošić (1984) daje detaljniji pregled hidrogeoloških karakteristika aluvijalnih naslaga rijeke Bosne.

Sinteza hidrogeoloških karakteristika šireg područja istraživanja prikazana je i na hidrogeološkoj karti mjerila 1:200 000 za list Slavonski Brod i Pecs te na pratećem tumaču (Urumović et al., 1980a, 1980b). Područje je obrađeno i na hidrogeološkoj karti SFR Jugoslavije mjerila 1:500 000 i tumaču (Komatina & Ivković, 1980; Ivković et al., 1983) te kasnije na hidrogeološkoj karti Republike Hrvatske mjerila 1:300 000 (Biondić et al., 1996, 2003).

2.3. Hidrogeološka istraživanja na području regionalnog crpilišta istočne Slavonije

U prethodnom poglavlju opisana su istraživanja koja su provedena na širem istraživanom području. Ovdje će biti opisana detaljnija istraživanja koja su provedena na užem području sa ciljem uspostave regionalnog crpilišta istočne Slavonije.

Rezultati regionalnih hidrogeoloških istraživanja koja su provedena na području istočne Slavonije u 70-im godinama prošlog stoljeća pokazali su da se istočno od Slavonskog Broda, na prostoru između Velike Kopanice, Gundinaca i Kruševice nalazi vodonosnik povoljnih hidrogeoloških značajki (Geofizika, 1978-1981; Urumović et al., 1976b). Područje između Velike Kopanice i Babine Grede odabrano je kao najpovoljnije za smještaj budućeg regionalnog crpilišta (Miletić et al., 1981) te su ovdje provedeni detaljni vodoistražni radovi. Izvedeno je dvanaest strukturno-piezometarskih bušotina dubine 6 do 97 m i dva pokusno-eksploatacijska zdenca dubine 71 m (Geofizika, 1985). Početkom 90-ih godina izrađen je projekt za višenamjenski kanal Dunav-Sava čija trasa prolazi između izvedenih zdenaca te je odabrana nova lokacija za regionalno crpilište, Gundinci-Babina Greda (Bagarić, 1995). Lokacija je smještena jugoistočno od postojećih zdenaca, u blizini ceste Gundinci-Sikirevci te je na njoj 1996. godine izveden jedan pokusno-eksploatacijski zdenac. Eksploatacijske zalihe crpilišta na ovoj lokaciji procijenjene su na 2000 l/s (Bagarić, 2000). Prirodna kakvoća vode pokazala je povećane koncentracije željeza i mangana, što je odraz reduktivnih uvjeta u vodonosniku (Pekaš & Brkić, 2007). Nakon provedenih istraživanja nije došlo do realizacije crpilišta.

Hidrogeološka istraživanja su ponovo pokrenuta 2004. godine (HGI, 2005), a na temelju rezultata ovih istraživanja uslijedili su detaljni vodoistražni radovi. U razdoblju od 2005. do 2008. godine na području između Gundinaca i rijeke Save izvedeno je 26 strukturno-piezometarskih bušotina dubine 25 do 98 m i devet zdenaca prosječne dubine oko 75 m. Rezultati ovih istraživanja prikazani su u pratećim izvještajima (FIL.B.IS Hidro-geo, 2005, 2006, 2007; Geoistraživanje Osijek, 2005, 2006). U toku istraživanja uočeno je da su hidrogeološka svojstva naslaga na lokaciji Gundinci-Babina Greda lošija nego što se prije smatralo. Također se pokazalo da naslage na lokaciji između Sikirevaca i rijeke Save imaju vrlo dobre hidrogeološke karakteristike te da je prirodna kakvoća vode na tom području izuzetno dobra. Stoga je odlučeno da će se na lokaciji u Sikirevcima izgraditi regionalno crpilište ukupne izdašnosti 1000 l/s, a lokacija Gundinci-Babina Greda će ostati kao rezervno crpilište koje će se izgraditi u drugoj fazi kada potrebe za vodom prerastu kapacitet crpilišta

Sikirevci. Za vrijeme i nakon navedenih istražnih radova provedeno je i motrenje hidrokemijskih značajki i kakvoće podzemne vode u 2007. i 2008. godini te je 2007. godine uspostavljen monitoring razina podzemne vode koji se provodi do danas (Brkić & Larva, 2008).

Crpilište Sikirevci je postalo sastavni dio Regionalnog vodovoda istočne Slavonije. U pogon je pušteno početkom 2009. godine crpljenjem podzemne vode iz tri zdenca. U zdence su ugrađene crpke kapaciteta 100 l/s, a prosječna crpna količina iz sva tri zdenca do 2013. godine iznosila je oko 200 l/s. Hrvatski geološki institut, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju je na temelju ugovora s Hrvatskim vodama preuzeo obvezu provedbe motrenja razina i kakvoće podzemne vode na širem području crpilišta Sikirevci te izradu elaborata zona sanitarne zaštite crpilišta Sikirevci. Rezultati ovih radova prikazani su u popratnim izvješćima (Brkić & Briški, 2013a, 2013b), a također su korišteni za potrebe izrade ovog rada.

Prvo modeliranje na istraživanom području napravljeno je 1985. godine (Miletić et al., 1985) za prvu lokaciju crpilišta između Velike Kopanice i Babine Grede. Novi model napravljen je 2000. godine (Bagarić, 2000) za drugu lokaciju crpilišta Gundinci-Babina Greda. Nakon provedbe novih istraživanja 2004. godine model je dorađen te je u simulaciju uključena i sadašnja lokacija crpilišta u Sikirevcima s tri zdenca (HGI, 2005). HGI (2008) izrađuje matematički model za crpilište Sikirevci s crpnom količinom od 1000 l/s uz uvjet minimalnog vodostaja rijeke Save te određuje dubine postavljanja crpki u zdence. Gjetvaj et al. su 2011. godine u sklopu istraživanja međuutjecaja višenamjenskog kanala Dunav – Sava i crpilišta Sikirevci izradili trodimenzionalni numerički model toka podzemne vode šireg područja. Ovdje su samo ukratko prikazani modeli koji su rađeni na ovom području, a o detaljnim značajkama i nedostacima navedenih modela biti će govora kasnije u radu.

3. PRIRODNE ZNAČAJKE ŠIREG ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

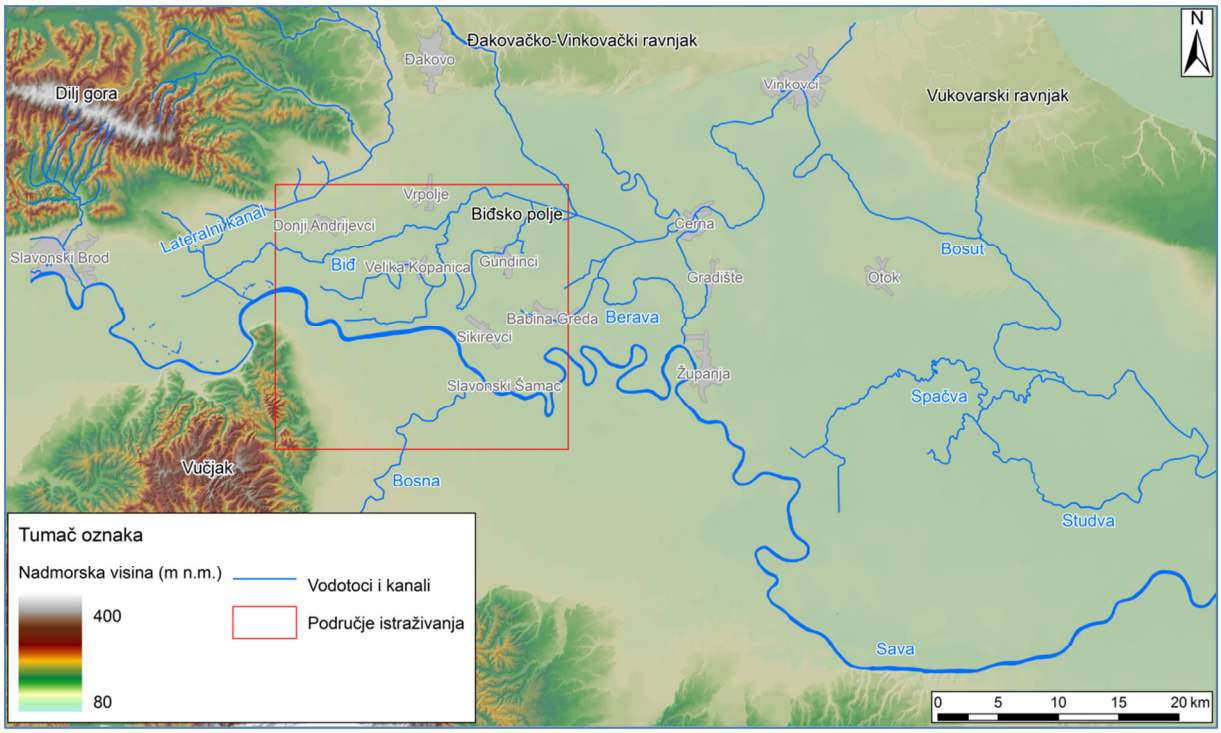
3.1. Geografski položaj, geomorfološke i klimatske značajke

Područje istraživanja smješteno je u istočnoj Slavoniji na krajnjem istočnom dijelu Brodsko-posavske županije (slika 3.1). Obuhvaća općine Velika Kopanica, Sikirevci, Gundinci i Slavonski Šamac. Također obuhvaća i dio terena južno od rijeke Save u Županiji Posavskoj u Bosni i Hercegovini.

Slika 3.1 Geografski položaj šireg istraživanog područja

Istočna Slavonija nalazi se na južnom rubnom dijelu Panonskog bazena, a reljefno je to najniži dio Sjeverne Hrvatske, s nadmorskim visinama 80 do 100 m (slika 3.2). Područjem dominira izdužena dolina rijeke Save ispunjena velikom količinom barskog i aluvijalnog sedimenta. Uz rijeku Savu šire se prostrane i vlažne poplavne ravnice. Veliki dio ovog područja nalazi se ispod razine visokih voda Save, te je nekada ovdje bilo prostrano savsko jezerište odnosno močvarište (Hernitz, 1983), ali zbog umjetno izgrađenih nasipa više ne dolazi do plavljenja šireg područja. Najbliža brdovita područja su Dilj gora i Vučjak. Greben Dilja nalazi se na sjeverozapadu, a visine je oko 400 m n.m. Vučjak se nalazi se južno od Save u BiH, visine je oko 350 m n.m., a obronci su brežuljkastih oblika s nadmorskim visinama 100 do 200 m. Na sjeveroistočnom dijelu nalazi se brežuljkasto područje Đakovačko-Vinkovačkog prapornog ravnjaka, koji je morfološki izraženom stepenicom

odvojen od posavske nizine, te tvori uvjetnu razvodnicu između porječja Drave i Dunava na sjeveru i Save na jugu. Iako su promjene nadmorskih visina na ovom području neznatne, reljefno se mogu izdvojiti dvije udoline: Biđsko polje s nadmorskom visinom oko 80 m n.m. te Spačvanski bazen s visinom oko 77 m n.m, koji je poznat kao vrijedno stanište hrasta lužnjaka. Između ovih udolina nalazi se pojas višeg zemljišta oko Gradišta i Cerne. Na prapornom Velikom brdu pokraj Gradišta visina doseže 103 m n.m. što je najviša točka područja ako se izuzme praporni ravnjak.



Slika 3.2 Reljef i hidrografska mreža šireg istraživanog područja

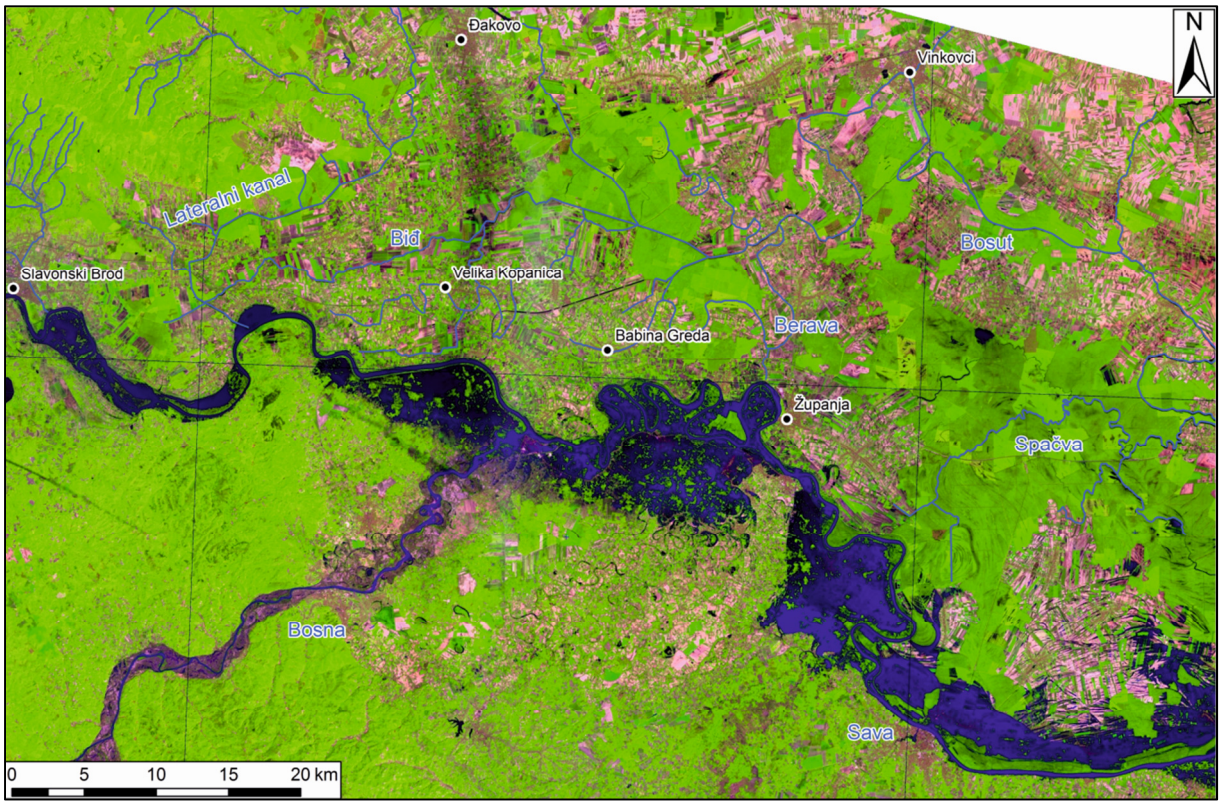
Rijeka Sava sa svojim pritocima drenira najveći dio kopnenog područja Hrvatske. Površina sliva rijeke Save do Slavonskog Šamca iznosi oko 62 000 km^2. Duljina toka rijeke kroz Republiku Hrvatsku iznosi 516 km, što čini 60% ukupne duljine. Na području Republike Hrvatske Sava ima vrlo mali nagib, nadmorske visine kreću se od oko 110 m n.m. kraj Zagreba do oko 85 m n.m. na izlazu iz Hrvatske. Glavnina pada ostvaruje se na zagrebačkom području te su nizvodno od Zagreba izraženi akumulacijski procesi. Prosječni pad korita od ušća Sutle do ušća Bosne iznosi 0.131 m/km, dok nizvodno od ušća Bosne iznosi 0.041 m/km (Gereš & Filipović, 2000). Lijeva strana savske doline niža je od desne zbog načina taloženja naslaga u mlađoj geološkoj prošlosti. Naime desni savski pritoci dolaze iz višeg planinskog područja te su donosili puno veće količine materijala od lijevih pritoka. Lijevi pritoci su mnogo kraći i dolaze iz nižih terena pa su i njihove naslage mnogo tanje. Sava i njezini desni pritoci usjekli su svoja korita u materijal koji su donosili. Lijevi pritoci ne utječu izravno u

Savu nego na znatnim udaljenostima teku paralelno s njom. Oni se za vrijeme visokih voda razlijevaju i poplavljuju najniže dijelove terena te tvore poplavna polja. Kako je korito Save izdubljeno u njenom nanosu koji nadvisuje okolno zaobalje, s lijeve strane rijeke dolazi do prodora zaobalnih voda. Zaobalne vode izvor su zamočvarivanja terena i pojave zaobalnih izvora od kojih nastaju Biđ, Berava i Spačva. Najveći pritoci Save dolaze iz njenog desnog zaobalja, na području istraživanja je to rijeka Bosna koja dolazi iz susjedne BiH. Površina sliva rijeke Bosne iznosi oko 10800 km^2, a duljine je oko 280 km.

Rijeka Sava ima snježno kišni režim. Najmanji godišnji protoci pretežno se pojavljuju u kolovozu i rujnu, a samo rijetko u siječnju i veljači. Glavni maksimum je u ožujku i travnju, a sporedni od listopada do prosinca. Na Savi i na njezinim većim pritocima uz komponentu cikličnosti, uočljiva je na pojedinim dionicama tendencija sniženja najnižih godišnjih vodostaja (Biondić, 2009). Prosječni protok Save u razdoblju od 1926. do 2010. godine kod Slavonskog Broda iznosio je oko 990 m^3/s, a kod Županje oko 1150 m^3/s (International Sava River Basin Commission, 2013). Porast protoka kod Županje vezan je uglavnom uz dotok Bosne čiji je prosječni protok u Doboju u istom razdoblju iznosio oko 170 m^3/s.

Na istraživanom području Sava nema značajnih lijevih pritoka, tek nešto nizvodnije s lijeve strane u nju utječe Bosut. Duljina Bosuta iznosi oko 180 km, a površina sliva oko 2900km^2. Bosut je specifična rijeka koja nema klasično izvorište kao druge rijeke. Nastaje spajanjem Biđa i Berave kod Cerne, a Biđ i Berava nastaju blizu lijeve obale Save od prodora zaobalnih voda. Biđ i Berava duž svog toka sakupljaju i vode iz niza kanala kojima se drenira dio oborina s ovog područja (slika 3.2). S isušivanjem ovih prostora započelo se još u rimsko doba, da bi kasnije bilo zapušteno, a unazad jednog stoljeća je obnovljeno izgradnjom mreže kanala i nasipa bez kojih ne bi bila moguća poljoprivredna proizvodnja. Ovdje treba spomenuti i Lateralni kanal, koji sakuplja vode niza stalnih i povremenih potoka s Dilja te ih odvodi direktno u Savu kod mjesta Oprisavci. Bosut je jedna od rijeka s najmanjim padom u svijetu, vrlo sporog toka, s plitkim i relativno širokim koritom. Njen tok mijenja smjer mnogo puta te teče prema svim stranama svijeta. Priča se da su stari Rimljani znali kazati kako u svom carstvu imaju rijeku koja dopodne teče na jednu stranu, a popodne na drugu, a misli se na Bosut, koji ponekad tako sporo teče da se i malim vjetrom voda pokrene u jednom ili drugom smjeru (Ćirić, 2013). Zanimljivo razmišljanje o Bosutu iznosi Brunšmid (1902) kada kaže da je koritom Bosuta nekada tekla rijeka Sava. Svoje razmišljanje potkrepljuje činjenicama da rijeka Bosut i njezini glavni pritoci Berava, Biđ, Spačva i Studva nemaju pravih izvora. Voda je u njima većim dijelom godine mrtva, te redovno ne teče prema ušću, a kako nemaju niti znatnijega pada niti brzine, teško su mogli izdubiti današnja korita (Bosut

kod Vinkovaca 6-8 m). Hernitz (1983) iznosi razmišljanje da još nedavno, tokom holocena, Sava nije na ovom području imala svoje pravo korito, već se gubila u močvarištu ili jezeristu koje se ovdje nalazilo. Najmlađa tektonska gibanja su utjecala na morfološke i hidrološke prilike te se tok Save u skladu s tim pomicao, povremeno se odvijao kroz niz odvojenih, ali i međusobno isprepletenih ili povezanih močvarišnih rukavaca. Postojanje neprohodnih močvara prije oko 1000 do 2000 godina poznato je prema povijesnim podacima (Bösendorfer, 1952), kada je Sava plavila cijeli predio Biđskog polja. Na slici 3.3 prikazana je satelitska snimka poplave koja se dogodila 22. Svibnja 2014. godine. Uz vodotok Biđa na slici se mogu vidjeti tamnija područja na kojima je za vrijeme poplave došlo do zamočvarivanja terena uslijed ekstremno visokih razina podzemne vode. Na slici se također ističu zelene površine uz tok Biđa i Spačve koje su pod šumama hrasta lužnjaka te i u današnje vrijeme povremeno plave.



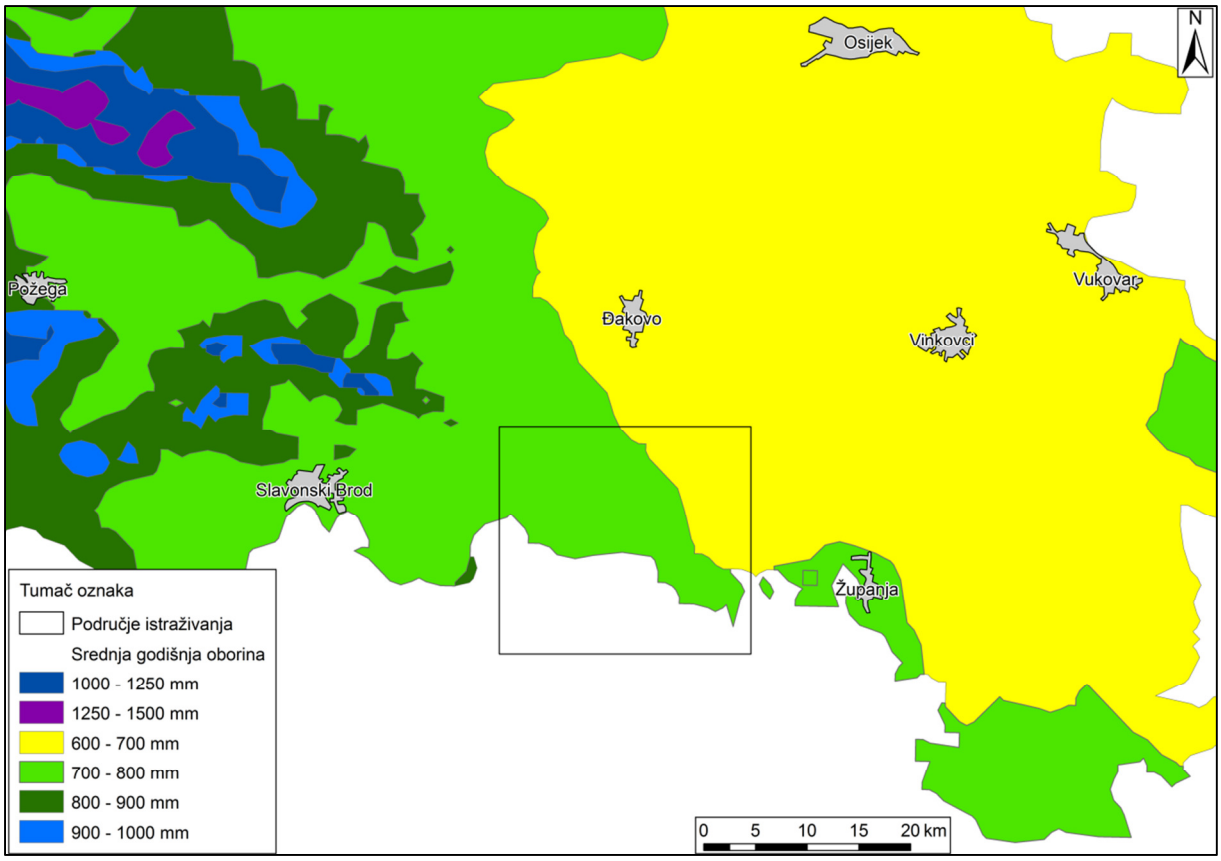
Slika 3.3 Satelitska snimka poplave u svibnju 2014. (NASA, Landsat 8)

Hidrografska mreža kojom se vrši otjecanje dijela oborina na istraživanom području je porječje Biđa i Bosuta. Površinska razvodnica između Save i Biđa i Bosuta može se postaviti dosta blizu lijevoj obali rijeke Save, ali treba uzeti u obzir da je površinsko otjecanje relativno malih iznosa te se velik dio oborina infiltrira u podzemlje. Kako Bić i Bosut nemaju duboka

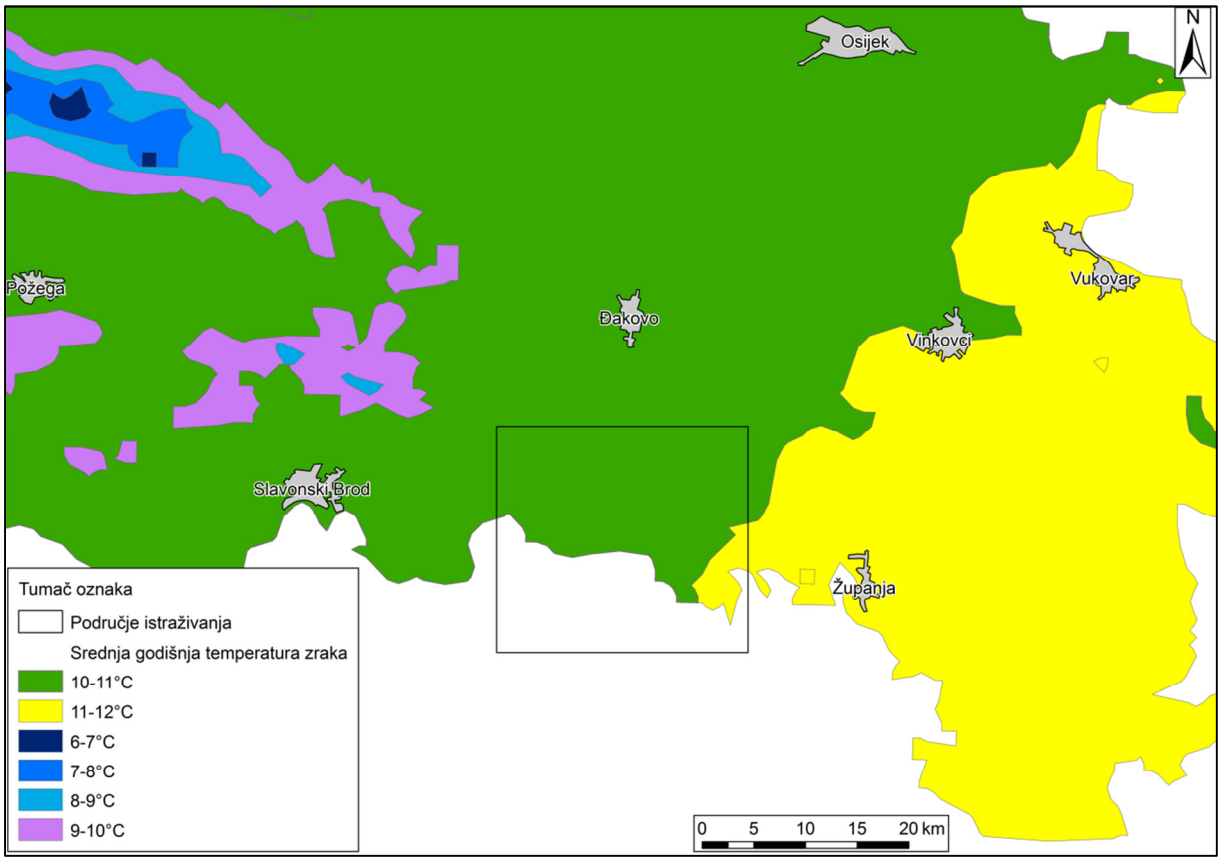
korita te ne dosežu do glavnih vodonosnih slojeva, za pretpostaviti je da je rijeka Sava glavni regionalni dren ovog područja.

Prema Köppenovoj klasifikaciji klime, koja uvažava bitne odlike srednjeg godišnjeg hoda temperature zraka i količine oborine najveći dio Hrvatske ima umjereno toplu kišnu klimu (Cb), sa srednjom mjesečnom temperaturom najhladnijeg mjeseca višom od -3°C i nižom od 18°C (oznaka C). U unutrašnjosti najtopliji mjesec u godini ima srednju temperaturu nižu od 22°C (oznaka b). Nizinski kontinentalni dio Hrvatske, kojemu pripada područje istočne Slavonije, ima klimu Cfwbx“ (Köppen, 1918). To je umjereno topla kišna klima bez dužih suhih razdoblja, s toplim ljetima. Uz spomenute temperaturne karakteristike (oznake C i b), tijekom godine nema izrazito suhih mjeseci, a mjesec s najmanje oborine u hladnom je dijelu godine (fw). U godišnjem hodu oborine javljaju se dva maksimuma (x“), jedan u rano ljeto, a drugi u jesen (Zaninović et al., 2004).

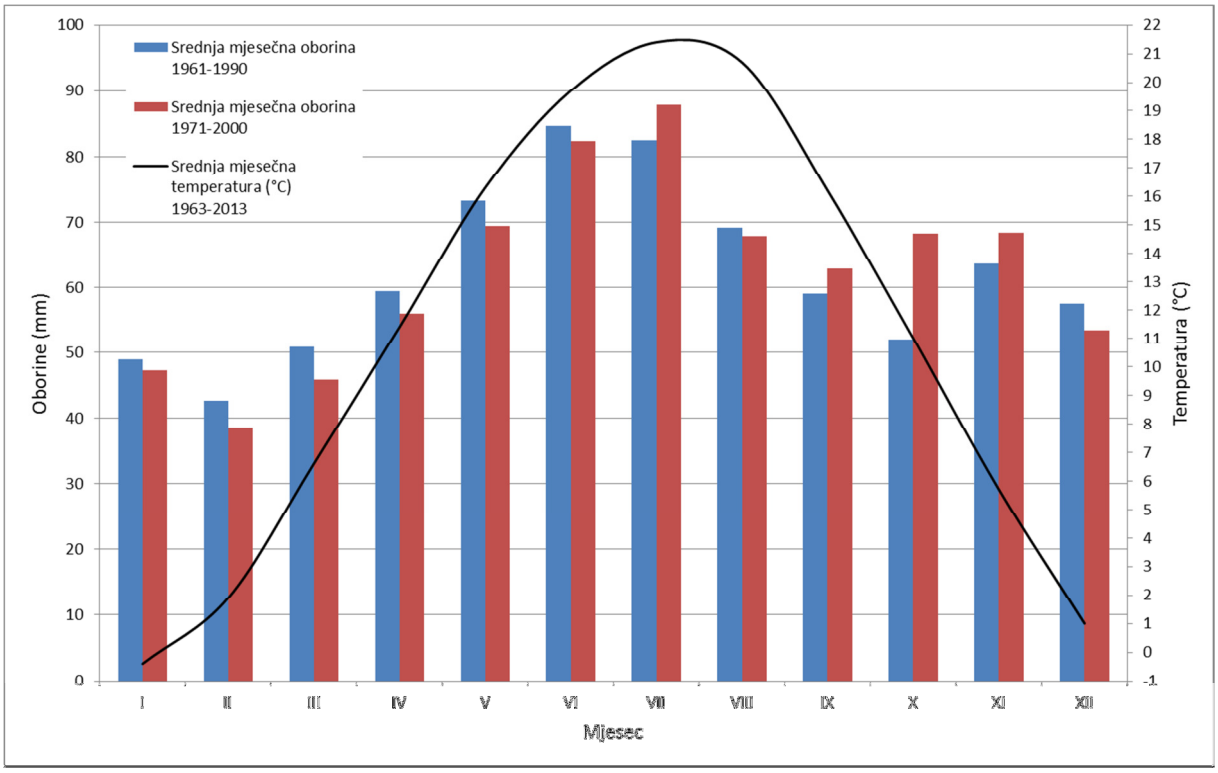
Kvantitativni meteorološki pokazatelji definirani su na temelju podataka izmjerenih u posljednjem neprekinutom 30-godišnjem razdoblju (1961.-1990.) koje se smatra reprezentativnim za donošenje pouzdanih zaključaka. Prosječna godišnja oborina na širem području istraživanja kreće se oko 750 mm/god (slika 3.4). Najviše oborina padne u lipnju, u novije vrijeme u srpnju, a najmanje u veljači (slika 3.6). Trajanje snježnog pokrivača iznosi oko 35 do 40 dana u godini, pojavljuje se uglavnom od studenog do travnja, a najviše ga ima u siječnju (Zaninović et al., 2008). Prosječna višegodišnja temperatura zraka se kreće u rasponu od 10 do 11°C (slika 3.5), najniže srednje mjesečne temperature mjere se u siječnju, a najviše u srpnju (slika 3.6). Prosječna godišnja relativna vlažnost zraka kreće se u rasponu od 75 do 80% (Zaninović et al., 2004). Najmanja vlažnost je u srpnju i travnju, a najveća u prosincu, dok se povećana vlažnost primjećuje uz rijeku Savu. Prosječna godišnja evapotranspiracija za meteorološku postaju u Osijeku iznosi 615 mm, a za Slavonski Brod 622 mm (Zaninović et al., 2008). Podaci evapotranspiracije dobiveni su proračunom pomoću Palmerova modela vodne ravnoteže (Palmer, 1965) u koju su uvedene korekcije koje uvažavaju brzinu vjetra. Model je napravljen za potrebe agronomije, pa se u proračunu komponenata vodne ravnoteže pored meteoroloških parametara (količine oborine, temperature zraka i relativne vlažnosti) koriste i podaci maksimalnog kapaciteta tla (Zaninović et al., 2008).



Slika 3.4 Karta srednje godišnje oborine (prema Gajić-Čapka et al., 2003)



Slika 3.5 Karta srednje godišnje temperature zraka (prema Zaninović et al., 2004)



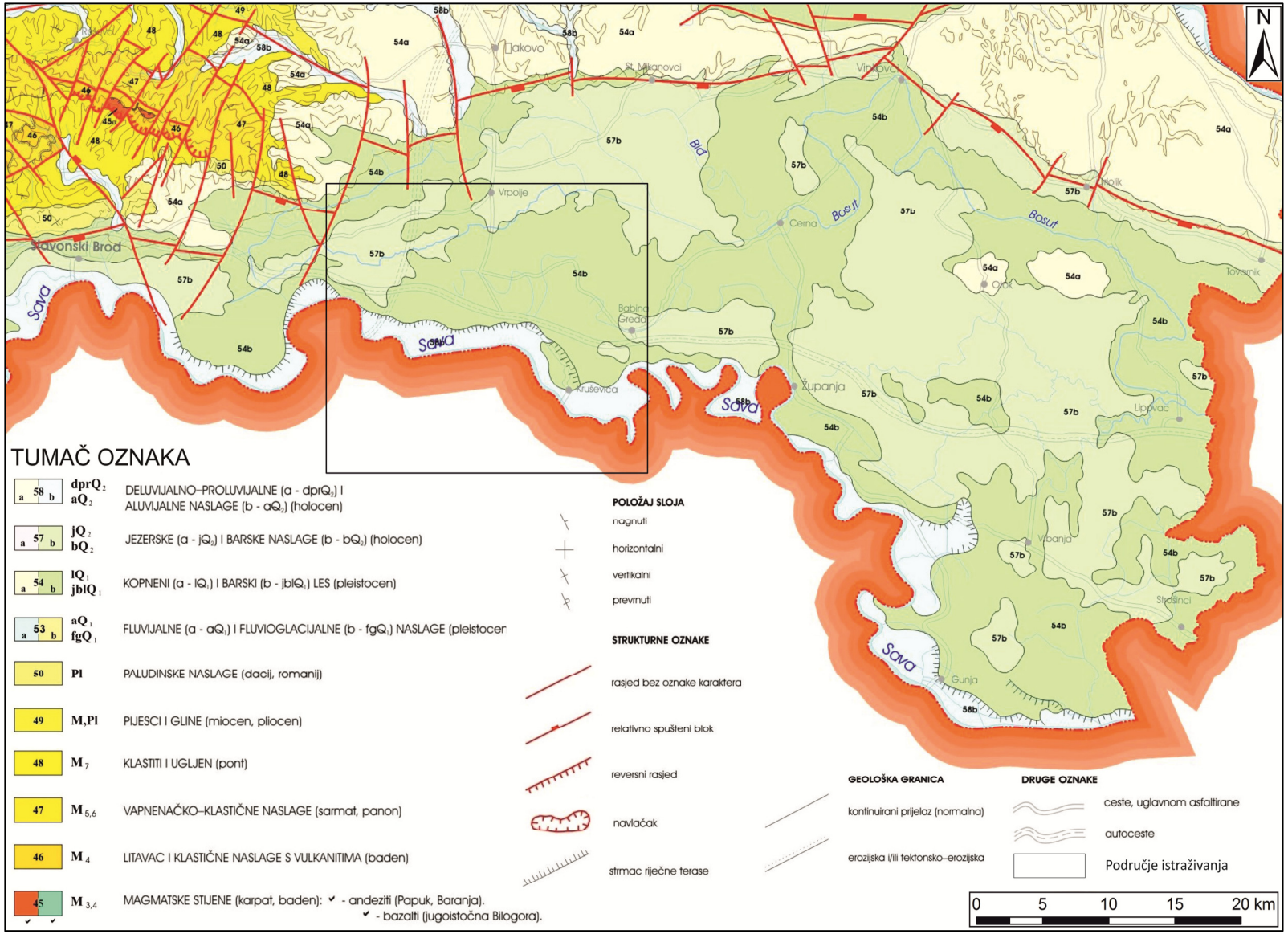
Slika 3.6 Srednje mjesečne količine oborina i srednje mjesečne temperature zraka na mjernoj stanici Slavonski Brod (prema podacima DHMZ-a)

3.2. Geološke značajke

Kao što je već spomenuto, šire istraživano područje nalazi se na južnom rubnom dijelu Panonskog bazena. Panonski bazen je neogenski bazen smješten u jugoistočnom dijelu srednje Europe, okružen orogenskim pojasevima Alpa, Karpata i Dinarida. Šire istraživano područje tektonski pripada Slavonsko-Srijemskoj potolini. Ona je od Đakovačko-Vinkovačkog ravnjaka odvojena glavnim potolinskim rasjedom koji seže u dubinu do u podlogu tercijara (Hernitz, 1983). Od Savske potoline odvojena je strukturnim uzdignućem koje je nabušeno dubokom bušotinom malo istočnije od Slavonskog Broda.

Teren je u potpunosti prekriven kvartarnim naslagama. Duž toka Save rasprostiru se holocenski aluvijalni nanosi, prema sjeveru slijedi pojas močvarnog prapora, a na padinama Dilj gore te na rubovima Đakovačko-Vinkovačkog ravnjaka istaložen je kontinentalni prapor (Urumović, 1978). Na slici 3.7 prikazan je isječak iz Osnovne geološke karte Republike Hrvatske 1:300000 (HGI, 2009).

Prema strukturnim i litološkim značajkama u vertikalnom profilu naslaga mogu se razdvojiti dvije različite cjeline: kvartarno-tercijarni kompleks naslaga te njihova podloga.



Slika 3.7 Isječak iz Osnovne geološke karte Republike Hrvatske 1:300000 (prema HGI, 2009)

3.2.1. Podloga kvartarno-tercijarnog kompleksa

U podlozi tercijarnih naslaga na ovim prostorima nalaze se magmatske, metamorfne i sedimentne stijene paleozoika i mezozoika. Opis ovih naslaga preuzet je iz Galović et al. (1989), Hernitz (1983) i Šparica et al. (1987). Predtercijarne naslage su u najdubljim dijelovima Slavonsko-Srijemske potoline pokrivene mlađim sedimentima debljine oko 4 km (Saftić et al., 2003), te se njihov razvoj može promatrati na okolnim strukturno izdignutim područjima (Slavonske planine, Vučjak, Trebovica, Fruška gora) te na bušotinskim podacima.

Najstarije su metamorfne i granitno-gnajsne stijene **starijeg paleozoika**, koje nalazimo na površini na Slavonskim planinama. Na njima slijede stijene **mlađeg paleozoika**: gruboklastične naslage kvarcnih pješčenjaka i konglomerata u izmjeni s glinenim škriljavcima i filitima.

Naslage **donjeg trijasa** zastupljene su glinovitim i pjeskovitim škriljavcima i pješčenjacima, a za njima slijede vapnenci, vapneni škriljavci i nešto dolomita. Naslage mlađeg paleozoika i donjeg trijasa mjestimično i izostaju što ukazuje na kopnenu fazu na nekim dijelovima ovog područja.

Nakon postupnog podizanja morske razine uslijedio je maksimum transgresije u **srednjem trijasu**. Taložе se vapnenci i dolomiti koji se kontinuirano nastavljaju i kroz **gornji trijas**, uz pojavu finih klastita terigenog podrijetla.

U vrijeme **jure** i **donje krede** na ovim prostorima je prevladavalo kopno. U **gornjoj kredi** ponovo započinje transgresija uz tektonske pokrete. Taložе se konglomerati, pješčenjaci, lapori i vapnenci, a dolazi i do prodora dijabaza. Krajem gornje krede nastupa laramijska orogenetska faza, dolazi do regresije i jačih tektonskih pokreta kojima je izdignuto cijelo područje istočne Slavonije. Ranije istaložene stijene postaju kopno i podvrgnute su intenzivnoj eroziji koja traje sve do kraja oligocena.

3.2.2. Kvartarno-tercijarni kompleks naslaga

Na prijelazu iz **oligocena** u miocen dolazi do transgresije koja je praćena intenzivnom tektonikom i vulkanizmom. Formirana je prostrana depresija tj. počelo je egzistirati Panonsko more kao dio Paratethysa (Šparica et al., 1987). Početkom **miocena** u plitkom moru se taložе pijesci, pjeskoviti lapori i gline, a mjestimice se pojavljuje i andezit i tuf (Capar, 1992). Sredinom miocena dolazi do jačeg spuštanja i nove transgresije. Uz obale u plitkomorskom facijesu taložе se biogeni vapnenci i konglomerati, nešto dalje vapnoviti i pjeskoviti, a još dalje glinovito-laporoviti slojevi (Hernitz, 1983). Ove naslage se u naftnoj terminologiji nazivaju *Vukovarska formacija* (Šimon, 1973) i vrlo su značajne kao nosioci nafte. U ovom

razdoblju tektonska aktivnost inicira diferencijaciju sedimentacijskog bazena te započinje formiranje Đakovačko-Vinkovačkog horsta i Slavonsko-Srijemske potoline.

Prekidom veze Parathetysa i Thetysa krajem **badena** dolazi do osjetnog oplićavanja i dotoka slatke vode te se smanjuje salinitet. Pojavljuju se regresivne tendencije uz lokalne diskordancije i prekide sedimentacije u **sarmatu**. Kroz razdoblje **donjeg panona** talože se vapneni lapori relativno malih debljina (oko 50 m) i manjeg prostiranja, poznati kao *Valpovačka formacija* (Hernitz, 1983).

U gornjem miocenu (panonu) oživljava tektonska aktivnost i Parathetys se raspada na više manjih bazena, jedan od njih je Panonski. Istočna Slavonija tone, a u produbljene dijelove talože se slatkovodne naslage: lapori i pijesci debljine nekoliko stotina metara. Ove naslage su u naftnoj terminologiji poznate kao *Vinkovačka formacija*, a talože se kroz razdoblje **gornjeg panona** i **donjeg ponta**. U Slavonsko-Srijemskoj potolini talože se lapori debljine 400 m (Galović et al.,1989). Đakovačko-Vinkovački plato ostaje kopno i jasno poprima današnje konture (Capar, 1992).

Krajem **donjeg ponta** dolazi do novog spuštanja bazena uslijed čega se otvara veza s istočnim dijelom Parathetysa. Salinitet vode se povećao pa se taloženje odvija u brakičnim uvjetima. Sedimenti su uglavnom istog litološkog sastava kao gornjopanonski. Zbog obilnog donosa materijala koji dolazi i iz udaljenih krajeva (Alpe) povećava se debljina naslaga. Talože se velike količine pijesaka, lapora i gline poznati kao *Vera formacija*.

Krajem **gornjeg ponta** ponovno se prekida veza Parathetysa s Panonskim bazenom. Stvara se niz slatkovodnih bazena, Slavonsko-Srijemska potolina se produbljuje, a Đakovačko-Vinkovački ravnjak se izdiže. Talože se debele slatkovodne naslage (*Paludinske naslage*) koje prekrivaju cijelo područje. Ove naslage uglavnom slijede konkordantno na gornjopontskima, a talože se tijekom cijelog razdoblja **pliocena**. Starije naslage zastupljene su glinama s proslojcima pijeska i ugljena, a mlađe sadrže veće količine pijeska s proslojcima šljunaka i glina. Paludinske naslage vrlo su bogate fosilnim ljušturama slatkovodnih mekušaca. Debljina naslaga je vrlo promjenjiva, u susjednoj Savskoj potolini iznosi od 350 do preko 1000 m, a na rubnim dijelovima potoline oko 400 m (HGI, 2009b). Opisane naslage dio su najmlađe litostratigrafske jedinice - *Vuka formacije*, koja obuhvaća naslage pliocena i kvartara. Granica s podinskim naslagama određena je elektrokarotažnim reperom A iznad *Vera formacije* (Urumović et al., 1976a). U Slavonsko-Srijemskoj potolini ukupna debljina *Vuka formacije* iznosi oko 1000 m.

Na prijelazu iz pliocena u pleistocen javljaju se poremećaji vezani uz Vlašku fazu, epirogenetski pokreti djeluju na produbljivanju bazena i izdizanju platoa. Naslage **pleistocena**

kontinuirano se talože na pliocenske zbog čega do sada nije određena granica između pliocena i kvartara unutar *Vuka formacije*.

Donji pleistocen zastupljen je pretežno naslagama gline, glinovitih pijesaka i pijeska. Urumović et al (1978) ističu da je moguće pretpostaviti da gornji dio paludinskih slojeva, koji se svrstavaju u gornji pliocen pripada donjem pleistocenu. Naslage donjeg pleistocena dokazane su na dubini od 201 m kod mjesta Otok nalazom donjopleistocenske ostrakodne zajednice (Sokač, 1976).

Sedimentni prostor u kojem se vrši taloženje naslaga **srednjeg** i **gornjeg pleistocena** odgovara relativno plitkoj jezerskoj sredini, a glavni izvori taloženog materijala pojavljuju se na južnom i jugozapadnom rubu. Oni uglavnom odgovaraju današnjim rijekama: Savi s Ukrinom, Bosni i Drini. Taloženje materijala bilo je uvjetovano specifičnim paleoklimatskim promjenama (glacijali i interglacijali). Ove promjene uzrokovale su cikličke izmjene gruboklastičnih i sitnoklastičnih materijala. Fluvijalne naslage koje sadrže pretežno grublji klastični materijal talože se u toplijim klimatskim fazama s većom vlažnosti kada je i energija vodenih tokova bila veća (Mutić, 1993). Transportiranje materijala odvija se od juga prema sjeveru, a taloženje se vrši u obliku lepeza (Urumović, 1977). U smjeru taloženja opada udjel krupnijih čestica, a povećava se sortiranost zrna. Stoga su se najkrupnije frakcije taložile u uvalama pojedinih izvora materijala, a daljnjim transportom materijal se sortirao, te su se najsitnije čestice taložile u središnjem dijelu potoline. U suhim i hladnim klimatskim razdobljima, kada je stagnirao rad snažnih rijeka, u plitkim vodenim sredinama taloži se eolska prašina. Naslage srednjeg pleistocena izgrađene su od relativno debelih slojeva pijeska s nešto šljunka te plavkastim i sivim glinama i proslojcima treseta, a u višim dijelovima dolazi prašinasti materijal (Hernitz, 1983). Debljine su oko 150 do 200 m. Naslage gornjeg pleistocena su manjih debljina, oko 30 do 40 m. Sastoje se od glinovitih i prašinastih materijala te šljunaka, pijesaka, treseta i prapora (Hernitz, 1983). Često sežu do površine terena (slika 3.7), osim u zonama riječnih tokova gdje su pokrivene holocenskim aluvijalnim nanosima te jezerskim i barskim naslagama.

Naslage kopnenog i barskog lesa (*prapora*) taložile su se u gornjem pleistocenu za vrijeme Würmskog glacijala. Les se sastoji se od praha s primjesama gline i pijeska, a glavni mineralni sastojak je kvarc (do 70%). Kopneni les je široko rasprostranjen na Đakovačko-Vinkovačkom ravnjaku. Nastao je eolskim transportom prašine iz područja Alpa i njezinim taloženjem na izdignutim dijelovima reljefa. Debljina naslaga najčešće iznosi oko 20 m. Barski les taložio se u spuštenim predjelima terena na područjima gdje su vladali jezersko-barsko-kopneni uvjeti sedimentacije (HGI, 2009b).

Krajem pleistocena dolazi do regresije te završava proces taloženja gruboklastičnog materijala. Đakovačko-Vinkovački ravnjak se stabilizira i okopnjava te se na njemu taloži prapor. Zavodnjenost unutarnjeg dijela istočne Posavine (Biđ-Bosutsko polje) održava se u **holocenu** čemu u prilog govore povijesni podaci (Bösendorfer, 1952), a konačno isušivanje je uzrokovano tek melioracijskim radovima. Sedimenti holocena mogu se podijeliti na aluvijalne i barske naslage. Aluvijalne naslage talože se u dolinama današnjih rijeka (Sava, Bosna). Krajem pleistocena nakon probijanja medvedničko-žumberačke barijere rijeka Sava započinje teći prisavskom ravnicom dalje prema jugoistoku (Brkić, 1999). Nizvodnije od Siska u sastavu aluvijalnih naslaga rijeke Save prevladavaju sitnozrnati sedimenti. Sastoje se pretežno od pijeska, praha i gline. Pojave šljunka vezane su samo za ušća desnih pritoka (Una, Vrbas, Ukrina, Bosna, Drina) koje donose erodirani materijal iz južnih predjela. Debljina ovih naslaga se naglo mijenja, od nekoliko decimetara do nekoliko metara. Na lijevoj obali rijeke Save istaložen je prostrani poplavni nanos koji je nastao intenzivnom plavljenjem Save i njenih pritoka, ali i spiranjem i pretaložavanjem prapora s ravnjaka (Brkić,1999). Sjeverni doseg poplavnih faza Save obilježen je nalazima enstatita koji je porijeklom iz bosanskog distributivnog područja (Mutić, 1993). Barske naslage pretežito leže na sedimentima barskog lesa, a vezane su uz nekadašnje sporije tokove ili stajaće vode koje su se u najnižim dijelovima terena pretvarale u močvarišta. Sastoje se od glina i glinovitog praha s visokim sadržajem organske tvari i malih su debljina (HGI, 2009b).

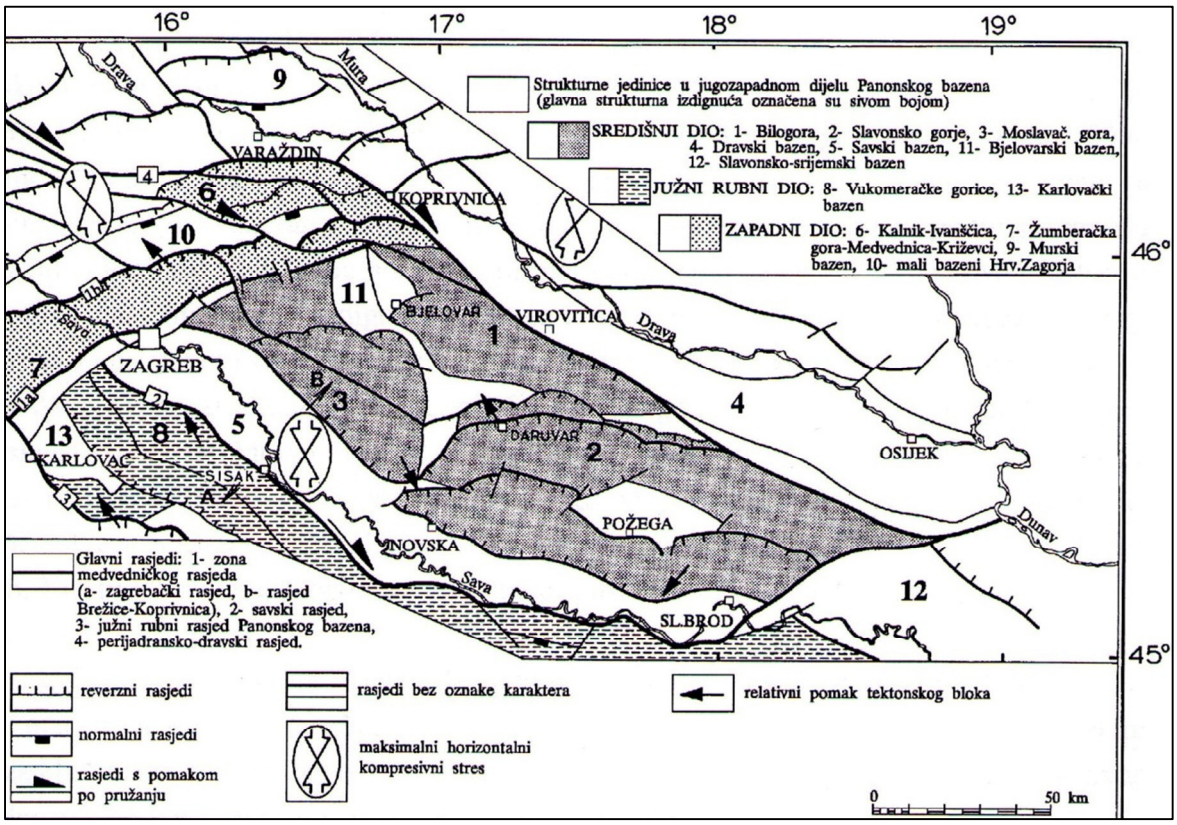
3.2.3. Strukturne značajke i tektonski razvoj

U okviru recentnog strukturnog sklopa šireg područja istraživanja mogu se izdvojiti Savska i Slavonsko-Srijemska potolina kao regionalne spuštene strukture, izdignute strukture Slavonskih planina te u njihovom nastavku Đakovačko-Vinkovački ravnjak (slika 3.8).

Glavne značajke današnjih strukturno-tektonskih odnosa ovog područja posljedica su aktivne tektonike u razdoblju gornjeg oligocena i donjeg miocena, kada je započela ekstenzijska sin-riftna tektonika na jugozapadnom dijelu Panonskog bazena (Prelogović et al., 1998; Lučić et al., 2001). Tektonski najaktivnije razdoblje bilo je u donjem i srednjem miocenu. Promjena orijentacije regionalnog stresa na SSI-JJZ uzrokovala je aktiviranje lijevih transkurentnih rasjeda na starijim strukturama, a regionalni pomaci glavnih blokova prema sjeveroistoku duž rasjeda doveli su do otvaranja regionalnih i lokalnih ekstenzijskih bazena koji su zapunjeni neogenskim sedimentima (Prelogović et al., 1995). Tijekom panona i ponta formiraju se regionalni Savski i Dravski bazen, a Slavonske planine se izdižu.

U pliocenu započinje neotektonska faza deformacija koja se nastavlja sve do danas i velikim dijelom je oblikovala današnji geomorfološki izgled terena. Orijentacija regionalnog stresa je u smjeru sjever-jug. Uspostavlja se model tzv. transpresije s dominacijom *wrench* rasjeda. Rasjedi s desnim horizontalnim pomakom dovode do ekstenzije prostora u smjeru istoka-sjeveroistoka, a između njih nastaje suženje strukturnih jedinica uz javljanje lijevih transkurentnih rasjeda (Prelogović et al., 1995).

Na slici 3.8 prikazan je recentni strukturni sklop jugozapadnog dijela Panonskog bazena. Najvažniji desni transkurentni rasjedi su Perijadranski s produžetkom u Južni rubni rasjed Dravskog bazena i Južni rubni rasjed Panonskog bazena. Između njih se tijekom pliocena i kvartara dogodila transpresija s maksimalnim transkurentnim pomacima između 7 i 20 km. Zapadni rubni dio Panonskog bazena stisnut je između Istočnih Alpi i Dinarida. Rotacija izdignutih struktura Slavonskih planina i Moslovačke gore dovodi do novog boranja u rubnim dijelovima ili unutar strukturnih depresija te uzrokuje smanjivanje okolnih taložnih bazena. Rubni rasjedi ovih struktura su i dalje aktivni (Prelogović et al., 1998).



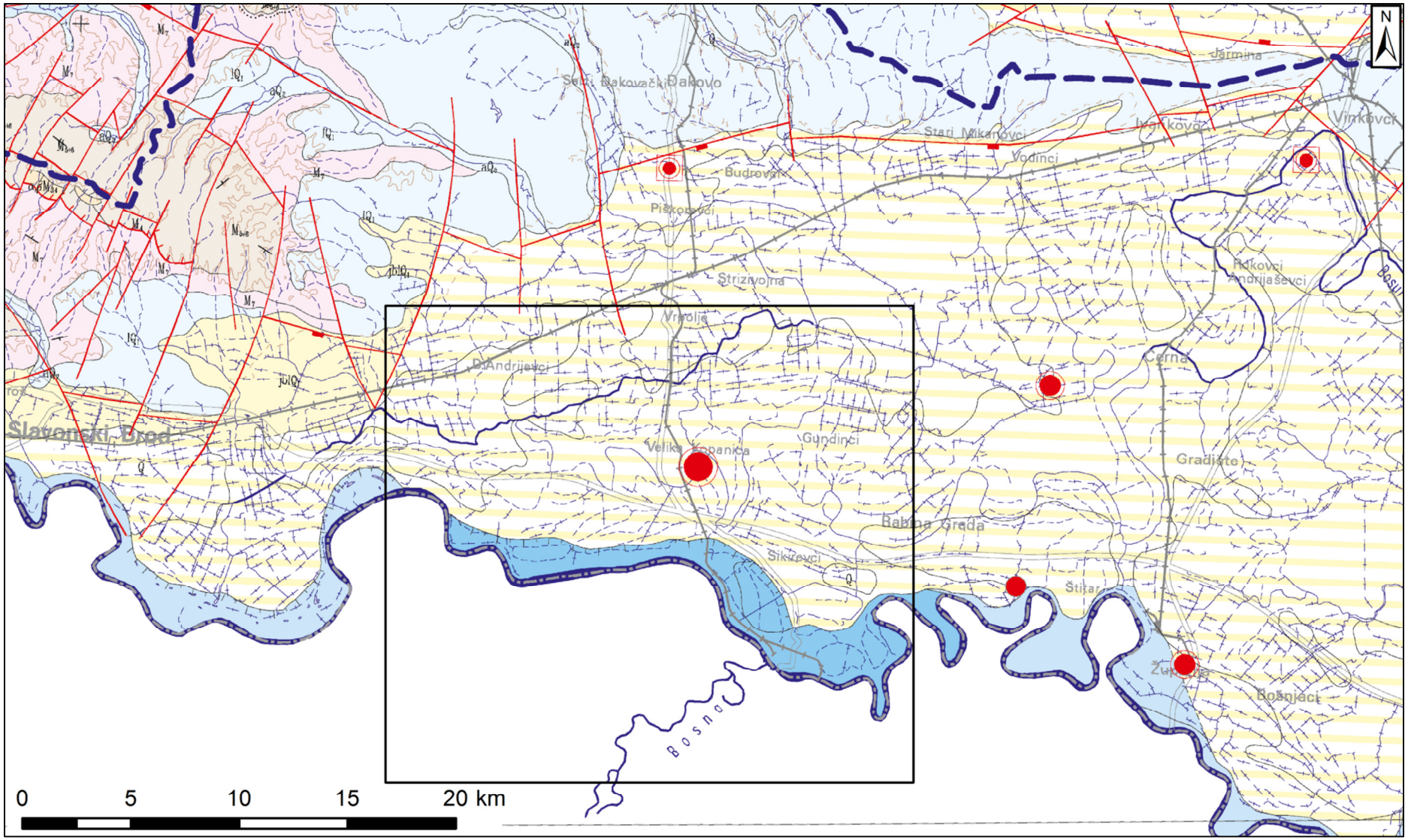
Slika 3.8 Strukturno-tektonski odnosi u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena (iz Brkić, 1999, prema Lučić et al., 2001)

Na recentnu tektonsku aktivnost upućuju podaci o seizmičkoj aktivnosti. Seizmotektonski aktivne zone vezane su uz najvažnije rasjede: Perijadransko-Dravski i Savski

rasjed te zona Medvedničkog rasjeda (Prelogović et al., 1998). Vidović (1974) navodi da je zbog izdizanja osnovnog gorja između Fruške gore i Papuka došlo do premještanje korita Save prema jugu, što također ukazuje na recentnu tektonsku aktivnost.

3.3. Hidrogeološke značajke kvartarnih vodonosnih slojeva

Osnovne hidrogeološke značajke šireg područja istraživanja prikazane su na isječku Hidrogeološke karte M 1:300 000 (Biondić et al., 2003) koji je prikazan na slici 3.9 s pratećom legendom na slici 3.10. Na karti nisu označeni zdenci na crpilištu Sikirevci jer u vrijeme izrade karte još nisu bili izvedeni. Na širem području istraživanja prevladavaju kvartarne naslage s vodonosnicima vrlo dobre do dobre transmisivnosti. U ovim naslagama akumulirane su velike količine podzemne vode koja se koristi za vodoopskrbu. Na većem dijelu Slavonsko-Srijemske depresije ove naslage su pokrivene slabo propusnim naslagama koje uglavnom ne sadrže vodonosne slojeve. Slabo propusni krovinski slojevi sastoje se od poplavnog nanosa rijeke Save i jezersko-barskih naslaga holocenske starosti, te pleistocenskog močvarnog prapora. Prosječna vertikalna hidraulička vodljivost ovih naslaga na području istočne Slavonije iznosi oko 10^{-3} m/d, dok za najslabije propusni glinoviti sloj iznosi oko 10^{-6} m/d (Bačani et al., 1991). Debljine krovinskih naslaga kreću se od nekoliko metara u južnom dijelu do nekoliko desetaka metara u sjevernim predjelima. Napajanje podzemnih voda vrši se infiltracijom oborina koja iznosi oko 11% ukupne visine godišnjih oborina (Urumović et al., 1980b). Rijeka Sava napaja podzemlje samo pri visokim vodostajima, a pri srednjim i niskim ga drenira.

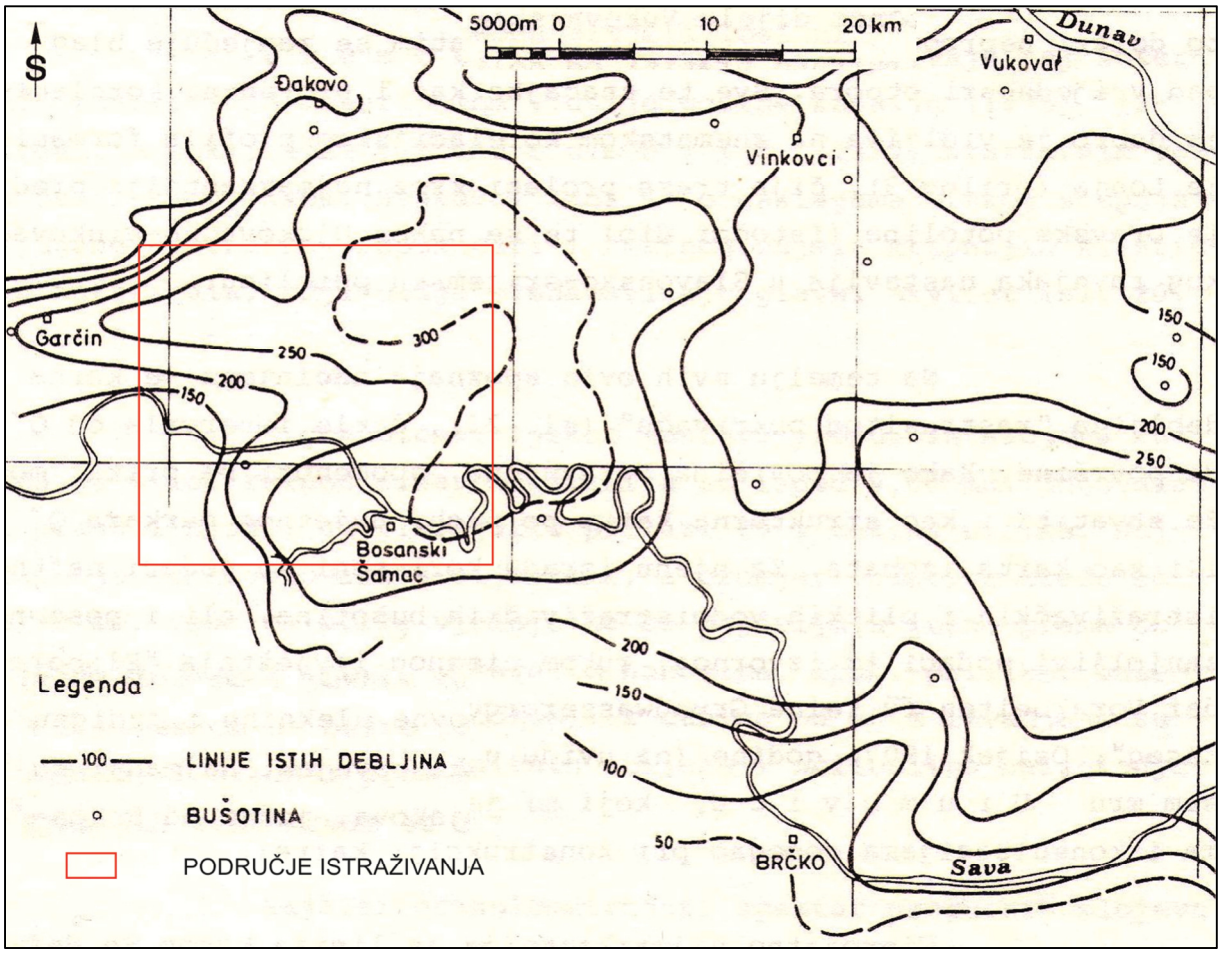


Slika 3.9 Isječak iz Hidrogeološke karte M 1:300 000 (prema Biondić et al., 2003)

Slika 3.10 Tumač isječka Hidrogeološke karte M 1:300 000 sa slike 3.9 (prema Biondić et al., 2003)

Kvartarni vodonosni slojevi zastupljeni na širem području istraživanja dio su najmlađe litostratigrafske jedinice - *Vuka formacije*. Urumović et al. (1976a) odvajaju unutar *Vuka formacije* dvije litološke cjeline: gornju čini „*rastresiti pokrivač*“ – od površine do uvjetnog markera Q', a donja obuhvaća naslage od Q' markera do podine (A marker). Gornju cjelinu Urumović (1977) naziva uvjetno „*kvartarni vodonosni kompleks*“. Ove naslage su zasićene slatkim podzemnim vodama te su s gledišta rješavanja vodoopskrbne problematike od prvenstvenog interesa. Osnovne značajke gornje cjeline su nekonsolidiranost materijala i relativno visoki udjel propusnih slojeva, a donje viši stupanj konsolidiranosti i smanjenje

udjela propusnih slojeva (Urumović et al., 1978). Na slici 3.11 prikazana je karta debljina kvartarnog vodonosnog kompleksa preuzeta iz Hernitz (1983). Pošto je površina terena relativno zaravnjena, ova karta odražava strukturu podloge kvartarnog vodonosnog kompleksa. Najveće debljine od preko 300 m zamjećuju se u zonama neotektonskog spuštanja odnosno u još do nedavno močvarišnim i poplavnim predjelima (Biđsko polje). Jedna uleknina nalazi se južno od Đakova i Vinkovaca, uz rubni rasjed Đakovačko-Vinkovačkog ravnjaka, a druga istočno od Županje prema Šidu. Na užem području istraživanja, sjeverno od Bosanskog Šamca nalazi se strukturni nos koji gotovo presijeca ulekninu južno od Đakova (slika 3.11). Ova izdignuta struktura naslijeđena je od starijih naslaga (Urumović et al., 1978). Ispod Q' markera se u najvećem broju slučajeva nalazi debeli markantni sloj gline, a dublje naslage sadrže manji broj propusnih slojeva s vodama većinom povišene mineralizacije i temperature.



Slika 3.11 Karta debljina kvartarnog vodonosnog kompleksa (prema Hernitz, 1983)

Naslage kvartarnog vodonosnog kompleksa taložile su se za vrijeme srednjeg i gornjeg pleistocena te holocena. Hidrogeološke karakteristike ovih naslaga posljedica su načina i uvjeta taloženja koji su opisani u prethodnom poglavlju. Propusni slojevi započinju

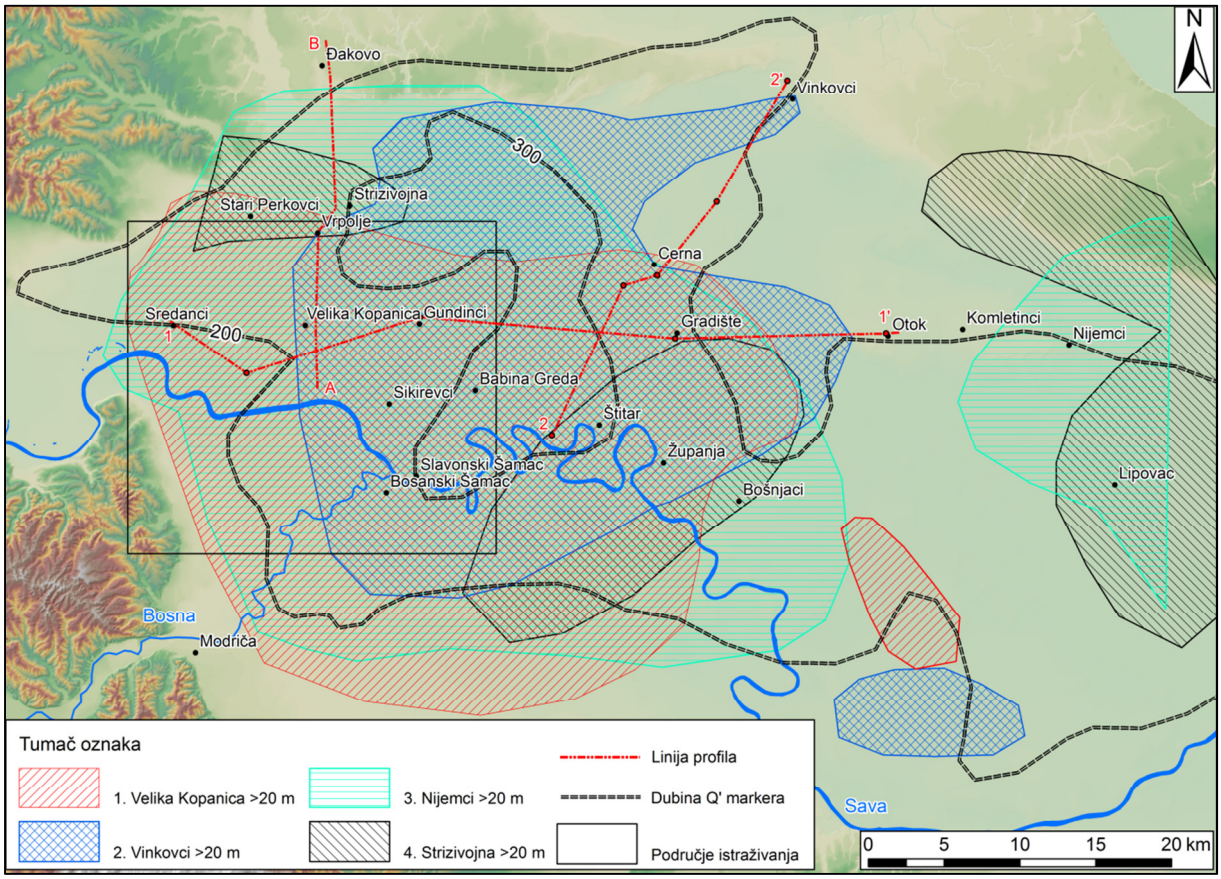
krupnim i slabo sortiranim česticama, a završavaju sitnozrnatim jednoličnim pijescima nakon kojih slijede polupropusne naslage praha i gline. U južnim dijelovima bliže ishodištu materijala često izostaju slabije propusni slojevi ili su vrlo tanki. Time je omogućen neposredni kontakt viših i nižih propusnih slojeva. Propusni slojevi se stanjuju i isklinjavaju prema sjeveru, dok polupropusni zadebljavaju. Sastav naslaga u predjelima bliže ishodištu materijala pokazuje širok granulometrijski spektar te nizak stupanj sortiranosti materijala (Urumović, 1977). U propusnim intervalima dominiraju srednje i sitnozrnati šljunci s pijeskom i nešto dispergiranog praha te pjeskoviti slojevi koji odgovaraju mirnijim uvjetima taloženja. Valutice šljunka kreću se do 50 mm, a udio pijeska je obično preko 50% uzorka. Nešto sitnijih šljunaka, u obliku leća manjeg prostiranja, pojavljuje se u zapadnom dijelu Đakovačko-Vinkovačkog ravnjaka. Udaljavanjem prema sjeveru povećava se sortiranost materijala, te su propusni slojevi predstavljeni sitno do krupnozrnatim pijescima. U središnjim dijelovima depresije zamjećuje se visok stupanj sortiranosti materijala, a propusni slojevi građeni su od sitno do srednjezrnatih jednoličnih pijesaka. Promjer zrna pijesaka kreće se od 0.1 do 0.3 mm, a pojave šljunka su rijetke, s promjerom zrna manjim od 4 mm. Prah se uglavnom pojavljuje u obliku tankih proslojaka.

Udio propusnih slojeva u ukupnoj debljini naslaga kvartarnog vodonosnog kompleksa najveći je u južnim predjelima. Ovdje odnos propusno/nepropusno iznosi više od 2/1. Povećan udio propusnih slojeva pojavljuje se i uz rasjednu zonu južnog ruba Đakovačko-Vinkovačkog ravnjaka, gdje iznosi od 2/1 do 1/1. Taloženje krupnijih frakcija na ovom području uzrokovano je diferencijalnim pokretima. Sniženje udjela propusnih slojeva te prevladavanje nepropusnih slojeva izraženo je u središnjim dijelovima potoline (Urumović, 1977).

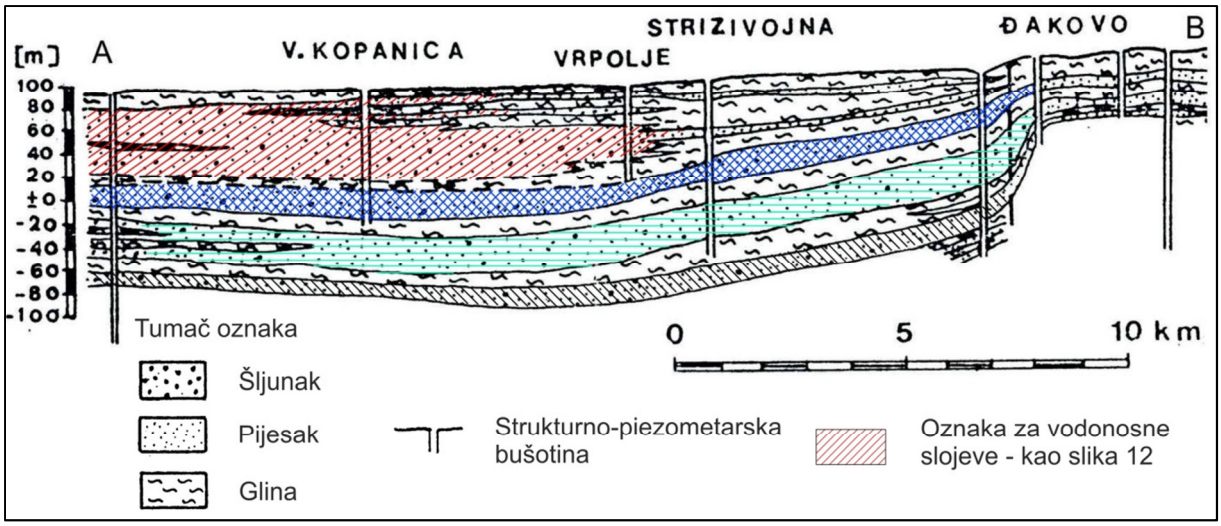
Iz svega navedenog može se zaključiti da je kvartarni vodonosni kompleks vrlo promjenjive građe u horizontalnom i vertikalnom profilu naslaga. Izražena nehomogenost naslaga uvjetuje velike promjene hidrogeoloških parametara u prostoru. Generalno se može reći da je hidraulička vodljivost naslaga najveća u područjima koja su najbliže ishodištu materijala, a opada prema sjeveru. U vertikalnom profilu hidraulička vodljivost opada s dubinom, a gledajući pojedinačne vodonosne slojeve najveća hidraulička vodljivost zapaža se u njihovim nižim tj. starijim dijelovima.

Urumović (1977) izdvaja unutar kvartarnog vodonosnog kompleksa šest markantnih vodonosnih slojeva, znatnije debljine i pružanja, koji su međusobno odvojeni polupropusnim slojevima veće debljine i kontinuiranog pružanja na većem području. Broj markantnih vodonosnih slojeva mijenja se u prostoru. Pojedini slojevi izostaju na dijelovima gdje dolazi

do stanjivanja i isklinjavanja propusnih naslaga. Na području gdje dolazi do stanjivanja i isklinjavanja polupropusnih međuslojeva dolazi do spajanja susjednih vodonosnih slojeva u jedinstveni sloj. Miletić et al. (1986) izdvajaju četiri vodonosna sloja do dubine od oko 180 m. Smatraju da su za vodoopskrbu neisplativi slojevi koji se nalaze ispod te dubine. Vodonosni slojevi nazvani su prema lokalitetima na kojima su prvi puta određeni. Od površine prema dubini izdvojeni su: 1. Velika Kopanica, 2. Vinkovci, 3. Nijemci i 4. Strizivojna. Na slici 3.12 dan je shematiziran prikaz područja prostiranja ovih vodonosnih slojeva s debljinama većim od 20 m, a na slici 3.13 prikazan je shematiziran profil pružanja slojeva (prema Miletić et al., 1986). Prostiranje slojeva s južne strane rijeke Save je pretpostavljeno. Za prikaz hidrogeoloških značajki ovih slojeva koristiti će se pretežno radovi Miletić et al. (1986) i Capar (1992). Debljine, prostiranje i parametri vodonosnih slojeva određeni su interpolacijom podataka istražnih bušenja i pokusnih crpljenja na širem prostoru. Pošto je postupak interpolacije podložan subjektivnosti autora, a zbog već spomenute izražene heterogenosti naslaga ovaj prikaz treba uzeti s rezervom. Tako na primjer u navedenim radovima vodonosni sloj Vinkovci različito interpretiraju Miletić et al. (1986) od Capar (1992).



Slika 3.12 Shematiziran prikaz područja prostiranja vodonosnih slojeva do dubine 180 m (modificirano prema Miletić et al., 1986)



Slika 3.13 Shematiziran profil A-B pružanja vodonosnih slojeva do dubine 180 m (modificirano prema Miletić et al., 1986)

Prvi vodonosni sloj – *Velika Kopanica* ima najveće debljine i najpovoljnije hidrogeološke parametre. Sastoji se od šljunaka i pijesaka s tanjim proslojcima i lećama glina. Česte su vertikalne i horizontalne litološke promjene. Na području između rijeke Save i naselja Velika Kopanica – Gundinci – Slavonski Šamac nabušene su najveće debljine krupnoklastičnih šljunkovito-pjeskovitih naslaga, kreću se od 50 do 75 m. Krovina vodonosnog sloja sastoji se od prašinasto-glinovitih ili pjeskovito-prašinastih materijala neposredno iznad vodonosnih naslaga, na kojima slijede glinovito-pjeskovite naslage. Prema površini ove naslage prelaze u glinoviti prah (močvarni les). Unutar krovine pojavljuju se tanji proslojci čistog pijeska. Debljina krovine je vrlo neujednačena, najmanja je uz rijeku Savu gdje iznosi do 10 m. Udaljavajući se prema sjeveru debljina raste do 40 m na liniji Stari Perkovci – Vrpolje. Promjenjiva građa i debljina krovine omogućuje obnavljanje vodonosnog sloja infiltracijom oborinskih voda, pogotovo u južnim predjelima gdje je debljina najmanja. Podinu vodonosnog sloja čini relativno kontinuirani glinoviti sloj, koji mjestimice prelazi u glinoviti prah, a pojavljuju se i pjeskoviti dijelovi. Debljina podine se kreće od 5 do 25 m te se može pretpostaviti da postoji direktna veza vodonosnog sloja Velika Kopanica sa dubljim vodonosnim slojem. Ova veza omogućila bi procjeđivanje vode iz sloja Vinkovci u sloj Velika Kopanica i obrnuto. Zbog nedovoljnog broja podataka do danas nije definirano postojanje i hidrauličko značenje ove veze. Hidrogeološki parametri sloja izračunati na temelju podataka pokusnih crpljenja pokazuju veće vrijednosti u zapadnom dijelu gdje su i najveće debljine, dok prema istoku opadaju njihove vrijednosti. Srednja vrijednost transmisivnosti vodonosnog sloja iznosi oko 2373 m^2/d, hidrauličke vodljivosti 70 m/d, a uskladištenja $1{,}75*10^{-3}$. Maksimalne vrijednosti hidrauličke vodljivosti iznose oko 200 m/d.

Rijeka Sava je svojim koritom mjestimice usječena u krovinske, a mjestimice u vodonosne naslage. Generalni smjer toka podzemne vode je od sjeverozapada prema jugoistoku te se vodonosni sloj drenira u Savu. Za vrijeme visokih vodostaja Sava napaja sloj, a smjer toka podzemne vode se mijenja od Save prema zaleđu. Kemijski sastav podzemne vode iz ovog sloja pokazao je bolju kvalitetu u odnosu na vode iz dubljih slojeva. Opisani vodonosni sloj zahvaćen je na regionalnom crpilištu istočne Slavonije u Sikirevcima. Ujedno je ovaj sloj i predmet istraživanja te će hidrogeološke značajke detaljnije biti opisane u narednim poglavljima. Sloj je zahvaćen i na manjim crpilištima u Babinoj Gredi, Štitaru i Cerni, ali ona su uglavnom van upotrebe otkad je vodoopskrbni sustav priključen na crpilište u Sikirevcima.

Drugi vodonosni sloj – *Vinkovci* rasprostranjen je na cijelom području hrvatskog dijela Slavonsko-Srijemske depresije, ali mu debljine i dubine zalijeganja znatno variraju (Miletić et al., 1993). Najveća dubina zalijeganja i debljina izmjerena je neposrednu uz Savu, gdje se nalazi na dubini preko 80 m, a debljina mu iznosi oko 30 m. Prema sjeveru i sjeveroistoku se stanjuje i izdiže prema površini terena, te na Đakovačko-Vinkovačkom ravnjaku ima debljinu manju od 10 m. Sloj je pretežno građen od sitnozrnatog do srednjezrnatog pijeska koji mjestimice prelazi u krupnozrnate ili prašinaste pijeske, a šljunak se pojavljuje rijetko i to na južnim i zapadnim rubnim dijelovima. Unutar sloja se često pojavljuju proslojci praha ili gline. Krovina vodonosnog sloja je u južnom dijelu predstavljena podinom vodonosnog sloja Velika Kopanica, a sjevernije je građena od glinovito-prašinastih slojeva s lećama pijeska. Na području Đakovačko-Vinkovačkog ravnjaka krovina je građena od kontinentalnog prapora debljine veće od 10 m. Vertikalna hidraulička vodljivost ovih prapora je relativno visoka što omogućava napajanje vodonosnog sloja infiltracijom oborina. Podina je građena od pjeskovitih glina s lećama i proslojcima pijeska, debljine je oko 20 m. Hidrogeološki parametri su, kao i u prethodno opisanom sloju, vrlo promjenjivi. Srednja vrijednost transmisivnosti vodonosnog sloja iznosi oko 262 m^2/d, hidrauličke vodljivosti 15 m/d, a uskladištenja $6*10^{-4}$. Maksimalne vrijednosti hidrauličke vodljivosti iznose oko 40 m/d. Sjeverni dio sloja, gdje u krovini postoje samo glinovito prašinaste naslage, razlikuje se od južnog dijela gdje se u krovini nalazi sloj Velika Kopanica. Sjeverni dio vodonosnog sloja zahvaćen je na crpilištima Vinkovci-Kanovci (90 l/s) i Đakovo-Trslana (75 l/s), a južni na crpilištu Županja-Bošnjaci (120 l/s). Na crpilištu u Cerni (100 l/s) zahvaćena su prva dva vodonosna sloja. Matematička modeliranja na ovom području pokazala su da postoji napajanje ovog vodonosnog sloja vertikalnim procjeđivanjem preko prapornog ravnjaka (Miletić et al., 1993), ali iznosi napajanja su nedostatni za potrebe eksploatacije na crpilištu u Vinkovcima. Miletić et al. (1993) ističu da je hidraulički kontinuitet ovog sloja prema Đakovu

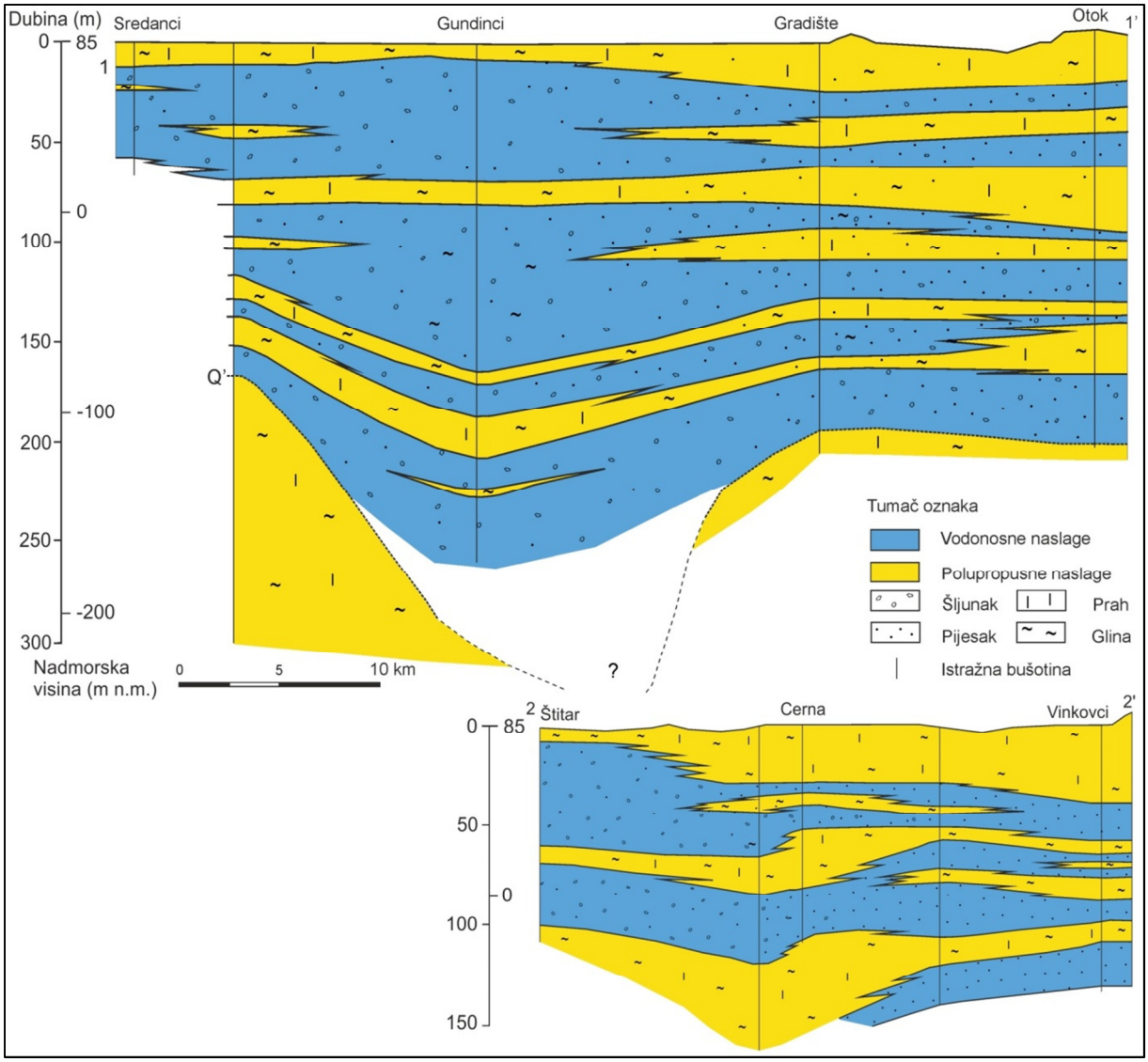
prekinut, a prema Vinkovcima oslabljen zbog slabije propusnih dijelova sloja. Na južnim dijelovima postoji realna mogućnost vertikalnog napajanja ovog sloja iz više položenog vodonosnog sloja.

Treći vodonosni sloj – *Nijemci* rasprostranjen je na širem području istraživanja. Debljine ovog sloja su nešto veće od prethodnog, ali je slabije kvalitete. Južno od linije Đakovo – Cerna – Komletinci debljine iznose nešto preko 30 m, a najmanje debljine su nabušene na području Đakovačko-Vinkovačkog ravnjaka gdje iznose manje od 10 m. Vodonosni sloj je uglavnom izgrađen od sitnozrnatih pijesaka koji su često prašinasti, a lokalno se pojavljuje i nešto šljunka. Česti su proslojci i leće glinovito prašinastog materijala. Dubina zalijeganja ovog sloja kreće se od preko 120 m na južnim dijelovima do oko 60 m na prapornom ravnjaku. Krovina je izgrađena od gline, praha i pijeska koji se nepravilno izmjenjuju. Podina se sastoji od izmjena gline i praha. Zbog znatnih debljina slabo propusnih krovinskih i podinskih naslaga za pretpostaviti je da je obnavljanje voda ovog sloja ograničeno. Srednja vrijednost transmisivnosti vodonosnog sloja iznosi oko 196 m^2/d, hidrauličke vodljivosti 10 m/d, a uskladištenja $1*10^{-3}$. Najveća vrijednosti hidrauličke vodljivosti iznosi oko 30 m/d na području Bošnjaka gdje je i debljina sloja najveća. Iz ovog sloja se djelomično eksploatira voda na crpilištima Vinkovci-Kanovci i Đakovo-Trslana.

Četvrti vodonosni sloj – *Strizivojna* nabušen je na najmanjem broju lokacija te za njega ima najmanje podataka. Stoga je i prikaz ovog sloja na slici 3.12 samo okviran. Dubina zalijeganja ovog sloja na južnom području uz Savu iznosi više od 150 m, u Strizivojni je nabušen na oko 150 m, a u Lipovcu na oko 140 m. Prema sjeveru i sjeveroistoku dubina zalijeganja se smanjuje te prati prostiranje plićih slojeva. Najmanje dubine, oko 80 m, nabušene su na području Đakovačko-Vinkovačkog ravnjaka, dok je na ostalim lokacijama redovito na dubini većoj od 100 m. Debljine sloja su relativno male, kreću se oko 10 m na prapornom ravnjaku do oko 30 m u Lipovcu. Sloj je izgrađen od sitnozrnatih pijesaka koji su često prašinasti i zaglinjeni. Krovina i podina sloja izgrađena je od glinovito prašinastih materijala. Na ovim dubinama su glinovite naslage tvrđe i često su laporovite, a pojavljuju se i vapnene konkrecije. Hidrogeološki parametri za ovaj sloj nisu određeni pošto nije zahvaćen niti jednim zdencem.

Na slici 3.14 prikazana su dva profila sa slike 3.12 napravljena na temelju dostupnih podataka istražnih bušenja. Na prikazanim profilima može se vidjeti izražena promjenjivost naslaga u prostoru. Na profilu 1-1' vidi se kako su prva dva vodonosna sloja idući od Gundinaca prema Gradištu odvojeni polupropusnim naslagama na četiri sloja. Na profilu 2-2' prikazana je jedna od mogućih interpretacija koja se razlikuje od prethodno navedene podjele

slojeva. U ovom slučaju se prvi vodonosni sloj na području Vinkovaca može tumačiti i kao horizontalni nastavak sloja Velika Kopanica. Prethodno navedena podjela naslaga na četiri vodonosna sloja do dubine od 180 m je samo jedna od mogućih interpretacija ovog složenog vodonosnog sustava. Ona se može koristiti da bi se dobio uvid o okvirnim vrijednostima hidrogeoloških parametara i debljinama pojedinih slojeva, posebice na lokacijama većih crpilišta, gdje je provedeno najviše istražnih radova.



Slika 3.14 Profili slojeva 1-1' i 2-2' sa slike 3.12

Opisani vodonosni slojevi južno od rijeke Save u susjednoj BiH slabije su istraživani, a do podataka o provedenim istraživanjima teško je doći. Debljina kvartarnog vodonosnog kompleksa na ovom području iznosi oko 150 m. Prema Miošiću (1984) debljina šljunčano-pjeskovitih kvartarnih vodonosnika kreće se od 20 do 75 m između Modriče i Bosanskog Šamca. Napajanje vodonosnih slojeva vrši se infiltracijom oborina u rubnim dijelovima

terena, te za vrijeme visokih vodostaja iz rijeke Save i Bosne. Pražnjenje podzemnih voda odvija se u rijeku Savu. Dublji vodonosni slojevi na širem području Odžačko-Brčanske Posavine dosežu do 220 m dubine i imaju karakteristike arteških slojeva (Drobne et al., 1969). Istraživačkm radovima koji su provedeni 1990. godine (Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Sarajevu, 1990) za potrebe izgradnje crpilišta u Bosanskom Šamcu nabušen je šljunkovito-pjeskoviti vodonosnik na dubini od 16 do 62 m. U podini vodonosnika nalaze se pjeskovite gline za koje autori na temelju geofizičkih istraživanja pretpostavljaju da dosežu do 150 m dubine. Unutar krovine vodonosnika, koja je građena od glinovito-prašinastih naslaga s nešto pijeska, nalazi se šljunkovito-pjeskoviti sloj debljine oko 5 m. Ovaj sloj ima dobre hidrogeološke parametre ali lošiju kvalitetu vode od niže položenih vodonosnih slojeva. Novija istraživanja na proširivanju crpilišta u Bosanskom Šamcu (Novaković, 2002, 2004) pokazala su sličan sastav naslaga. Šljunkovito-pjeskoviti vodonosni sloj nalazi se na prosječnoj dubini od oko 30 m, a podinske naslage na dubini od 72 m. Hidraulička vodljivost ovog sloja iznosi oko 180 m/d.

4. PROBLEMATIKA ODREĐIVANJA NAPAJANJA VODONOSNIKA

Određivanje napajanja vodonosnika je jedan od najvažnijih, a ujedno i najtežih zadataka u hidrogeologiji. Napajanje je teško odrediti jer se u većini slučajeva komponente napajanja ne mogu direktno izmjeriti. One se često procjenjuju posredno korištenjem metode vodne bilance i mjerenjem povezanih fizičkih pokazatelja kao što su na primjer količina oborina, temperatura zraka, kolebanje razine podzemne vode, značajke površinskih tokova, sadržaj vlage u tlu, kapacitet infiltracije (Krešić, 2007). Jednadžba bilance predstavlja odnos ulaznih i izlaznih količina vode na nekom području. Kada se promatra dio nekog slijeva, jednadžba bilance koja ga opisuje je (Scanlon et al., 2002):

$$P+Q_{on} = ET+Q_{off}+\Delta S$$

gdje je: P – količina oborina pala na promatrano područje

Q_{on} – dotok u promatrano područje (površinski i podzemni)

ET – evapotranspiracija (ukupno isparavanje s promatranog područja)

Q_{off} –otjecanje iz promatranog područja (površinsko i podzemno)

ΔS – promjena u uskladištenju (uključuje jezera, snijeg, vlagu u tlu i podzemne vode).

Infiltracija je proces ulaska vode s površine terena u podzemlje. Napajanje se može definirati kao količina vode koja dolazi u vodonosnik iz bilo kojeg smjera, odozgora, odozdo ili bočno, ali ovdje će se uzeti u obzir samo proces kretanja vode prema dolje preko vodnog lica. Dio infiltrirane vode koji se procijedi do vodnog lica naziva se efektivna infiltracija. Prirodno napajanje odvija se infiltracijom oborina ili procjeđivanjem iz rijeka, kanala i jezera. Difuzno ili direktno napajanje odnosi se na napajanje infiltracijom oborina koje se odvija relativno jednoliko na većem području, dok je lokalizirano napajanje koncentrirano napajanje iz depresija u terenu kao što su rijeke, kanali i jezera (Scanlon et al., 2002). Rushton (1997) razlikuje stvarno i potencijalno napajanje. Stvarno napajanje je ono koje doseže do vodnog lica, a procijenjeno je na temelju tehnika koje se baziraju na podacima o podzemnoj vodi, dok je potencijalno napajanje procijenjeno na temelju proučavanja površinskih voda i procesa u nesaturiranoj zoni. Potencijalno napajanje je voda koja se infiltrirala te može, ali i ne mora doći do vodnog lica zbog procesa koji vladaju u nesaturiranoj zoni, ili zbog sposobnosti saturirane zone da primi napajanje.

Glavni čimbenici koji utječu na napajanje vodonosnika su topografija odnosno reljef, geološka građa naslaga i klima (Boonstra & Ridder, 1981), a veliku ulogu ima i vrsta tla i vegetacijski pokrov. Područja pretežito nizinskog reljefa s relativno vlažnom klimom, kao što je to područje istraživanja ovog rada, obično su karakterizirana plitkim vodnim licem.

Vodonosnici su često puni, a podzemna voda se prazni evapotranspiracijom i baznim otjecanjem u površinske tokove. Na ovakvim područjima dominira difuzno napajanje. Količina napajanja u ovim područjima je često ograničena sposobnošću vodonosnika da uskladišti i prenosi vodu, što je kontrolirano hidrogeološkim svojstvima naslaga (Sanford, 2002; Scanlon, 2002).

Efektivna infiltracija izražena jednadžbom bilance jednaka je ukupnoj količini oborina umanjenoj za ukupnu evapotranspiraciju, površinsko otjecanje i količinu vode koja je potrebna za podmirenje deficita vlage u tlu. Evapotranspiracija predstavlja ukupno isparavanje s promatranog područja, a obuhvaća isparavanje s vodene površine, s površine tla i transpiraciju biljaka. Izražava se u milimetrima stupca vode. Ovisi o velikom broju čimbenika, a najvažniji su temperatura, brzina vjetra, atmosferski tlak, vlažnost zraka, svojstva površine tla te pokrivenost tla vegetacijom (Bačani, 2006). Postoje razni instrumenti za mjerenje evapotranspiracije, a jedan od njih je lizimetar o kojem će biti govora nešto kasnije. Osim direktnim mjerenjima, veličina evapotranspiracije može se računati i pomoću empirijskih formula koje koriste podatke o visini oborina, temperaturi zraka, relativnoj vlazi, insolaciji, brzini vjetra itd. Neke od poznatih empirijskih metoda za izračun evapotranspiracije su metoda Thornthwaitea (1948), Penmanova metoda (1948), metoda Turca (1961), metoda Blaney-Criddlea (1962), pojednostavljena metoda Penman-Monteith (Priestley & Taylor, 1972) i modificirana metoda Penmana (Doorenbos & Pruitt, 1977). Kod promatranja procesa evapotranspiracije može se razlikovati potencijalna i stvarna evapotranspiracija. Potencijalna evapotranspiracija je ukupna količina vode koja bi isparila s promatranog područja kada bi vode bilo neograničeno. To je gornja granica stvarne evapotranspiracije. Odnos potencijalne evapotranspiracije i oborina određuje da li će u tlu vladati deficit vlage (kada je ona veća od oborina) ili će u tlu biti višak vode (kada je ona manja od oborina).

Prvi korak u određivanju napajanja je prikupljanje podataka o klimi, hidrologiji, geomorfologiji i geologiji istraživanog područja. Ovi podaci se koriste da bi se razvio konceptualni model napajanja istraživanog sustava. Taj model opisuje lokaciju, vrijeme i mehanizme napajanja i može dati početne procjene količina napajanja (Scanlon et al., 2002).

Metode za ocjenu napajanja mogu se podijeliti prema zonama iz kojih se uzimaju podaci, to su površinske vode, nesaturirana zona i saturirana zona. Različite zone omogućuju procjenu napajanja različitog prostornog i vremenskog obuhvata. U svakoj zoni se metode mogu podijeliti dodatno na fizičke metode, metode trasiranja i metode numeričkog modeliranja. Scanlon et al. (2002) su dali detaljan pregled i preporuke za izbor prikladne metode za ocjenu napajanja.

Korištenjem podataka površinskih tokova (nivogrami, hidrogrami, procjeđivanje kroz dno korita, temperatura i kemijski sastav vode) dobiva se procjena veličine napajanja podzemnih voda iz površinskih voda ili pražnjenja podzemnih voda u površinske tokove. Na ovaj način se posredno može doći i do procjene ukupnog napajanja podzemnih voda, ali treba uzeti u obzir i ostale komponente vodne bilance. Jedna od metoda vezanih uz površinske tokove je i analiza krivulja trajanja vodotoka. Iz oblika krivulje trajanja može se kvalitativno odrediti dinamika toka i dominantna vrsta napajanja. Strmi nagib dijela krivulje najčešće ukazuje na napajanje površinskim dotjecanjem, dok blagi nagib završnog dijela krivulje ukazuje na napajanje podzemnim dotjecanjem (Healy, 2010). Usporedbom krivulja trajanja vodostaja površinskog toka i razine podzemne vode na piezometru koji se nalazi u smjeru toka podzemne vode može se doći do podataka o odnosu između podzemne i površinske vode. U razdobljima kada je vodostaj iznad razine podzemne vode potencijalno se odvija napajanje podzemne vode iz površinskog toka. U razdobljima kada je razina podzemne vode iznad vodostaja, podzemna voda se drenira u površinski tok (Bouwer & Maddock, 1997). Na ovaj se način analizom krivulja trajanja može doći do vrijednih podataka o napajanju vodonosnog sustava koji je povezan s površinskim tokom.

Metode bazirane na proučavanju nesaturirane zone se najčešće primjenjuju u aridnim i semiaridnim područjima gdje je debljina ove zone velika. Procjene napajanja dobivene ovim metodama su relativno malog prostornog obuhvata. Ove metode daju procjene potencijalnog napajanja na temelju količine dreniranja ispod zone korijenja, što kod većih debljina nesaturirane zone ne odražava ujedno i trenutno napajanje u razini vodnog lica.

Neke od fizičkih metoda su lizimetar, infiltrometar, ravnina nultog toka (Richards et al., 1956) i Darcyev zakon. Stupanj saturacije tla s vodom direktno utječe na količinu infiltracije. Stoga se mjerenje vlage u tlu naširoko primjenjuje za procjenu potencijalne infiltracije. Lizimetar predstavlja blok tla unutar kojeg je moguće mjeriti vertikalni tok vode, te se njime mjere razne komponente za proračun vlage u tlu. Podaci o napajanju dobiveni na ovaj način su točkastog karaktera, te često variraju u velikim rasponima na malim udaljenostima (Brkić, 1999; Krešić, 2007). Pokazalo se da su lizimetri prikladniji za određivanje evapotranspiracije nego napajanja (Scanlon et al., 2002). Infiltrometar je uređaj kojim se fizički mjeri količina vode koja se procijedila u tlo te se na taj način računa ukupna infiltracija.

Ravnina nultog toka predstavlja ravninu na kojoj je vertikalni hidraulički gradijent jednak nuli. Ona odvaja zonu evapotranspiracije (kretanje vode prema gore) od zone u kojoj se voda kreće prema dolje. U metodi koja koristi ravninu nultog toka napajanje se izjednačuje

s promjenama u uskladištenju ispod ove ravnine. Ova metoda zahtjeva mjerenje količine vode u tlu na temelju kojeg se procjenjuju promjene u uskladištenju (Scanlon et al., 2002). Ova metoda daje točkaste podatke, a ne može se koristiti u slučajevima kada je tok vode usmjeren prema dolje kroz cijeli profil tla ili kada vodno lice nije ispod ravnine nultog toka.

Tok podzemne vode kroz nesaturiranu zonu može se opisati Darcyevim zakonom. Taj proces razlikuje se od toka u zasićenoj sredini jer se hidraulička vodljivost mijenja sa sadržajem vlage, a oba parametra su u funkciji tlaka. Darcyev zakon koristi se za računanje napajanja u nesaturiranoj zoni prema jednadžbi (Scanlon et al., 2002):

$$R = -K(\theta)\,(dh/dz+1)$$

gdje je: R – napajanje; K(θ) – hidraulička vodljivost pri sadržaju vlage θ; h – kapilarni pritisak; z – visina. Primjena ove metode zahtjeva mjerenje vertikalnog gradijenta i nesaturirane hidrauličke vodljivosti pri prisutnom sadržaju vlage.

Od metoda trasiranja u nesaturiranoj zoni koristi se trasiranje prirodnim i umjetnim traserima. Kao prirodni traseri koriste se npr. kloridi koji se već nalaze u atmosferi ili tricij čija je koncentracija povećana nuklearnim testiranjima 1960-ih godina. Umjetni traseri se ubacuju na površinu ili određenu dubinu te se zatim infiltracijom transportiraju u dublje dijelove. Vertikalna distribucija trasera omogućuje procjenu evapotranspiracije te brzine i količine napajanja.

Metode numeričkog modeliranja nesaturirane zone su razvojem računala i računalnih kodova u sve široj upotrebi. Razni kodovi često koriste numerička rješenja Richardsove jednadžbe (Richards, 1931) koja predstavlja osnovnu diferencijalnu jednadžbu za tok vode kroz nesaturiranu poroznu sredinu. Dobivena je kombinacijom Darcyevog zakona i jednadžbe ravnoteže. Zbog nelinearne zavisnosti između hidrauličke vodljivosti nesaturirane zone i sadržaja vlage, koji su uključeni u ovu jednadžbu, procjene napajanja koje se temelje na modeliranju nesaturirane zone (koristeći Richardsovu jednadžbu) mogu biti vrlo nesigurne. Stoga je nužno provjeriti rezultate koristeći neke od drugih metoda u nesaturiranoj zoni.

Metodama koje koriste podatke iz saturirane zone dobivaju se procjene stvarnog napajanja, za razliku od prethodno spomenutih metoda u nesaturiranoj zoni i površinskim tokovima koje omogućuju procjene potencijalnog napajanja. Također najčešće pokrivaju puno veće područje od metoda u nesaturiranoj zoni. Jedna od fizičkih metoda koja se koristi u ovoj zoni je metoda kolebanja vodnog lica. Ona se temelji na pretpostavci da je podizanje razine podzemne vode u otvorenom vodonosniku uzrokovano napajanjem. Napajanje je u ovom slučaju jednako (Scanlon et al., 2002):

$$R = S_y\,\Delta h/\Delta t$$

gdje je: R – napajanje; S_y – specifično davanje; h – razina vodnog lica, t – vrijeme.
Ova metoda se najbolje može primijeniti kroz kratke vremenske intervale, u područjima s plitkim vodnim licem koje pokazuje oštra podizanja i spuštanja razine vode. Problemi kod primjene su povezani s određivanjem reprezentativne veličine specifičnog davanja i sigurnosti da su fluktuacije vodnog lica vezane uz napajanje, a ne rezultat promjene atmosferskog tlaka, prisutnosti zarobljenog zraka, crpljenja ili neke druge pojave.

Metode trasiranja u saturiranoj zoni koriste tricij, a u novije vrijeme kloroflorougljike (CFC) i tricij/helij-3. U područjima gdje je tok podzemne vode dominantno vertikalan, kao što je to u blizini razvodnica, prva pojava trasera kao što je CFC ili tricij/helij-3, može se koristiti za procjenu količine napajanja. Količine napajanja mogu se odrediti i procjenom starosti podzemne vode usporedbom koncentracije trasera u oborinama i u podzemnoj vodi. U otvorenim vodonosnicima starost podzemne vode se povećava s dubinom, a brzina kretanja vode se smanjuje. Datiranjem uzoraka vode s nekoliko različitih dubina u vertikalnom profilu vodonosnika dobivaju se vrijednosti brzina preko kojih se, uz podatke o poroznosti, može odrediti veličina napajanja vodonosnika (Scanlon et al., 2002). CFC i tricij/helij-3 koriste se za određivanje starosti podzemne vode do oko 50 godina, dok se za starije vode (200-20 000 godina) može koristiti radioaktivni ugljik ^{14}C. U zatvorenim vodonosnicima se horizontalne brzine toka mogu procijeniti pomoću radioaktivnog raspada ^{14}C ili ^{36}Cl te se iz njih mogu zatim procijeniti količine napajanja. Metode trasiranja korisne su za procjenu napajanja kroz duge vremenske periode, ali generalno ne omogućuju detaljne informacije o promjenjivosti napajanja u kraćem vremenu. Podaci o starosti podzemne vode dobivene ovim metodama često se koriste u numeričkom modeliranju.

Već najranija regionalna modeliranja podzemnih voda ukazala su da se modeli mogu koristiti kao pomoć u procjeni raspodjele napajanja (Freeze & Witherspoon, 1966; Tóth, 1963). U današnje vrijeme je numeričko modeliranje postalo metoda koja se vrlo često primjenjuje za procjenu napajanja vodonosnika (Anderson & Evans, 2007; Doble et al., 2009; Jaworska-Szulc, 2009; Jyrkama et al., 2002; Liu et al., 2014; Sophocleous & Perkins, 2000; Xu et al., 2012). Kroz kalibraciju numeričkog modela vodonosnog sustava može se predvidjeti količina napajanja iz informacija o piezometarskim razinama, hidrauličkoj vodljivosti i drugim parametrima (Sanford, 2002; Scanlon et al., 2002). Napajanje je često korelirano s hidrauličkom vodljivosti te je inverzno modeliranje, u kojem se koriste samo podaci o piezometarskim razinama, ograničeno na procjenu omjera napajanja i hidrauličke vodljivosti. Pouzdanost procijenjene količine napajanja u tom slučaju ovisi o točnosti podataka o hidrauličkoj vodljivosti. Često procijenjeno napajanje nije jednoznačno jer se ista

raspodjela piezometarskih razina može dobiti s cijelim rasponom količina napajanja, dokle god omjer napajanja prema hidrauličkog vodljivosti ostaje isti. Starost podzemne vode osjetljiva je na omjer napajanja i poroznosti, te se ona može koristiti da bi se suzio mogući raspon vrijednosti napajanja. U ovu svrhu se također mogu koristiti i drugi podaci mjerenja protoka kao što su npr. podaci o baznom toku površinskih voda. Modeli kao što su model crne kutije i „lumped“ model koriste hidrokemijske i izotopne podatke za ocrtavanje područja napajanja i procjenu količina napajanja.

Prikazane metode za kvantificiranje napajanja razlikuju se u rasponu količine napajanja koju mogu procijeniti, i u vremenskom i prostornom mjerilu kojeg obuhvaćaju. Dobivene vrijednosti napajanja trebaju se ocijeniti analizom nesigurnosti koja uključuje nesigurnost u konceptualni model i u ulazne i izlazne parametre. Nesigurnosti svakog od ovih pristupa ukazuju na potrebu za primjenom više metoda da bi se povećala pouzdanost procjene napajanja (Scanlon et al., 2002). Sophocleous & Perkins (2000) su dali primjer integracije modela sliva i modela podzemne vode, što je omogućilo cjelovitu analizu sustava i bolju kalibraciju modela. Često je teško ocijeniti koja od mnogih dostupnih metoda će dati pouzdanu procjenu napajanja. Kod biranja metode koja će se koristiti treba uzeti u obzir razne faktore. Prostorno i vremensko mjerilo procjene napajanja koje je potrebno razlikuje se ovisno o svrsi istraživanja. Kod ocjene mogućnosti zagađenja vodonosnika biti će bitna prostorna promjenjivost napajanja u lokalnom mjerilu, dok je za gospodarenje zalihama podzemnih voda potrebno regionalno mjerilo. Za procjenu napajanja u budućnosti koriste se metode numeričkog modeliranja. Ove metode se mogu koristiti za procjenu bilo kojeg raspona napajanja, na velikom prostoru te kroz veliki vremenski raspon, ali pouzdanost ovih procjena treba se ocijeniti na temelju nesigurnosti u parametre modela. Procjenjivanje napajanja je ponavljajući proces koji uključuje poboljšavanje procjena kada se prikupe novi podaci.

5. METODE ISTRAŽIVANJA

5.1. Terenska istraživanja

Terenska istraživanja za potrebe izrade ovog rada provedena su dijelom u sklopu projekta motrenja razina i kakvoće podzemne vode na širem području crpilišta Sikirevci. Projekt je vodio Hrvatski geološki institut, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju na temelju ugovora s Hrvatskim vodama. Rezultati ovih radova prikazani su u popratnom izvješću (Brkić & Briški, 2013a).

5.1.1. Opažanje razina podzemnih voda

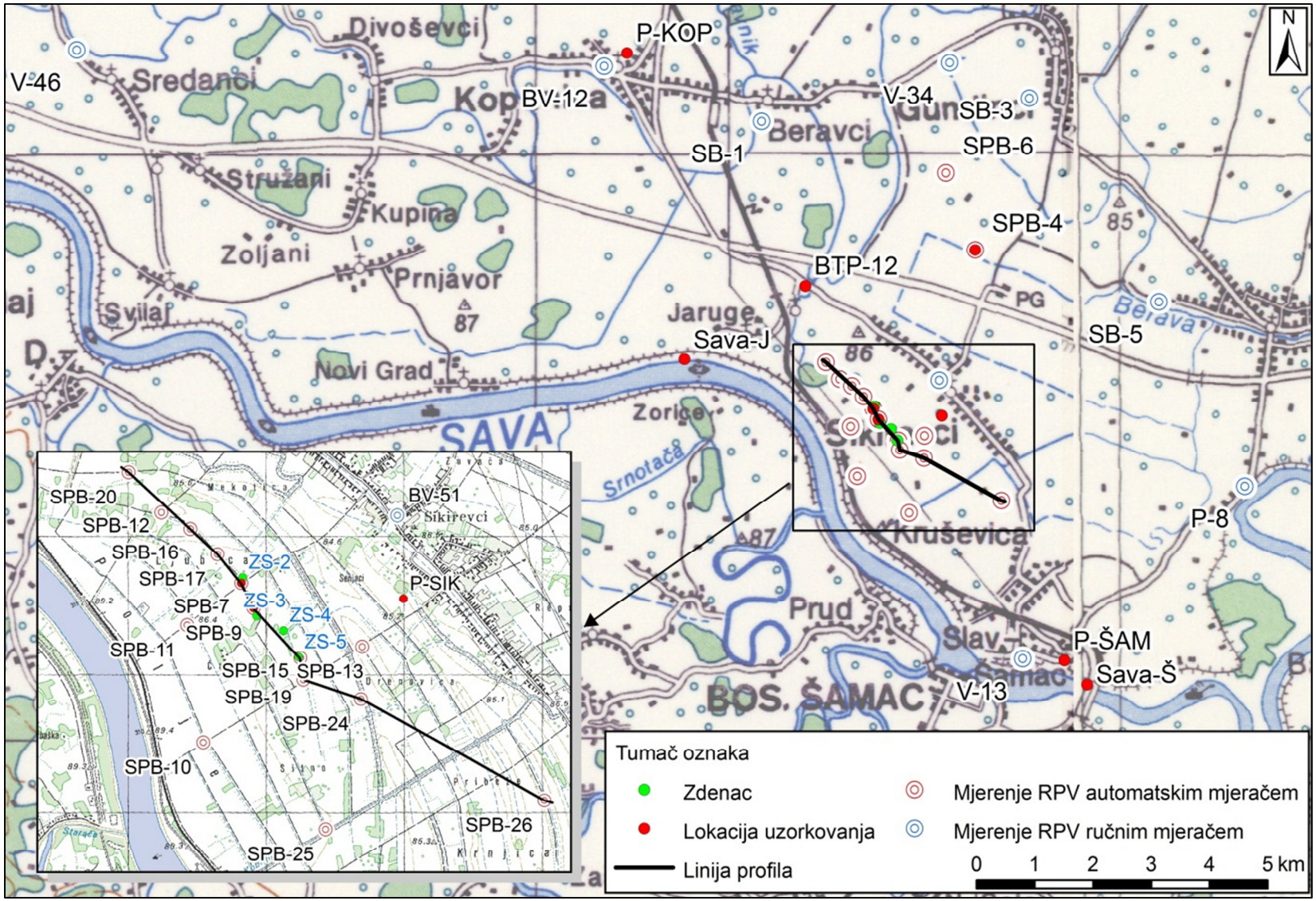
Svrha hidrogeološke opažačke mreže je izrada karti hidroizohipsi. Takve karte daju informacije o toku podzemne vode, područjima napajanja i pražnjenja, učincima crpljenja i promjena u uskladištenju te o području prostiranja vodonosnika i vrsti granica. Mjerenja razina podzemnih voda vrlo su važna jer se na temelju izmjerenih vrijednosti provodi kalibracija modela što je osnovni pokazatelj realnosti modela. U heterogenim naslagama potrebno je izvesti grupu opažačkih objekata koji zahvaćaju različite zone vodonosnog sustava da bi se odredile moguće interakcije vodonosnih slojeva i da bi se mogle uspoređivati razine podzemnih voda u njima. Kod istraživanja utjecaja crpljenja na promatrani vodonosni sustav opažački objekti trebaju biti smješteni u blizini vodocrpilišta te zahvaćati crpljeni vodonosnik, krovinske i podinske naslage. Kod određivanja utjecaja rijeka i kanala na režim podzemnih voda opažački objekti se postavljaju u liniji preko površinskih vodnih tijela. Često se u istraživanjima ne mogu financirati izvedbe novih opažačkih objekata zbog njihove visoke cijene, te se tada koriste postojeći objekti koji nisu uvijek izvedeni na način koji bi najbolje odgovarao potrebama istraživanja. U tom slučaju se od raspoloživih objekata biraju oni koji će omogućiti prikupljanje reprezentativnih podataka o promatranom sustavu.

U novije vrijeme se za kontinuirano mjerenje razina podzemne vode koriste automatski mjerači razina koji se ugrađuju u opažačke piezometre. U terenskim istraživanjima koja su provedena u sklopu izrade ovog rada korišteni su HOBO mjerači koje proizvodi Onset Computer Corporation, SAD. Mjerenja se ostvaruju posredstvom keramičkog senzora koji je smješten unutar čeličnog kućišta unutar kojega se nalazi i baterija. Kalibrirani su za temperaturni raspon od 0-40º C. Osim tlaka, uređaj mjeri i okolišnu temperaturu u zadanim vremenskim intervalima. Postoji mogućnost definiranja 8 različitih vremenskih intervala mjerenja u rasponu od 1 sekunde do 18 sati. Postoje četiri izvedbe s obzirom na raspon dubina

vode koji je moguće mjeriti. O tome ovisi točnost mjerenja koja iznosi ±0.05-0.075 % dubinskog intervala, te rezolucija koja se nalazi u rasponu od 0.14-0.87 cm. U piezometre na istraživanom području ugrađeni su mjerači za dubinski interval 0-9 m. Izmjerene vrijednosti očitavaju se pomoću računala i pripadajućeg optičkog čitača. Budući da senzor mjeri sumarnu vrijednost atmosferskog i hidrostatskog tlaka, izmjerene vrijednosti potrebno je kompenzirati s obzirom na varijacije atmosferskog tlaka. U tu se svrhu jedan mjerač postavlja za mjerenje atmosferskog tlaka. Kompenzacija i proračun stvarnih dubina do podzemne vode radi se pomoću odgovarajućeg računalnog programa (HOBOware Pro). Mjerač atmosferskog tlaka je konstrukcijski identičan onome koji se ugrađuje ispod površine vode. Zbog razmjerno malih dimenzija (promjer 2.46 cm) HOBO mjerači su pogodni za ugrađivanje i u piezometre manjih promjera - do 1.5". Važno je napomenuti da je na početku nužno istovremeno izmjeriti dubinu do podzemne vode ručnim mjeračem i HOBO automatskim mjeračem jer se preko te vrijednosti izračunavaju sve ostale stvarne dubine do vode za vrijednosti očitane automatskim mjeračem. Radi kontrole točnosti izmjerenih podataka važno je i kasnije povremeno izmjeriti razinu vode ručnim mjeračem. Ukoliko je poznata apsolutna visina piezometarske cijevi od koje se mjeri dubina vode moguće je izračunati i apsolutnu visinu razine podzemne vode.

Opažanje razina podzemne vode na istraživanom prostoru nije se provodilo do 2004. godine, kada je u okviru hidrogeoloških istraživanja uspostavljen monitoring razina podzemne vode u već davno izvedenim piezometrima. Opažanje razina provodilo se jednom tjedno ručnim mjeračima razine tijekom dvije godine. U kolovozu 2007. godine, u okviru radova za potrebe izgradnje crpilišta Sikirevci, u piezometarske bušotine ugrađeni su HOBO mjerači za kontinuirano mjerenje razina podzemne vode radi detaljnijeg snimanja oscilacija razina podzemne vode prije puštanja crpilišta u eksploataciju kao i nakon početka rada crpilišta (Brkić & Larva, 2008). Daljnji monitoring je nastavio Hrvatski geološki institut u okviru projekta „Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske“ (181-1811096-3165) financiran od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske, a i nakon završetka tog projekta 2013. godine mjerenja su se nastavila. Mjerenja su se provodila dva puta dnevno, a podaci s mjerača su očitavani svaka tri mjeseca. Na ovaj način mjerene su razine podzemne vode u dvanaest piezometara na području crpilišta, koji filtrima zahvaćaju vodonosni sloj iz kojeg se eksploatira podzemna voda (slika 5.1). Osim mjerenja razina podzemne vode automatskim mjeračima na području crpilišta Sikirevci, u sklopu terenskih istraživanja su se provodila i mjerenja razina podzemne vode uz pomoć ručnog mjerača na širem istraživanom području (slika 5.1). Ova mjerenja provodila su se jednom mjesečno od svibnja 2012. do studenog 2013. godine u osam opažačkih objekata. Ovi podaci potrebni su da bi se dobio uvid

u širu sliku ponašanja podzemnih voda u okolici crpilišta. Kako na širem području crpilišta ne postoje piezometri koji zahvaćaju dublji vodonosni sloj, nije bilo moguće izmjeriti razinu podzemne vode ovog sloja. Razine podzemne vode unutar krovinskih naslaga bilo je moguće mjeriti samo na piezometru BTP-12 (slika 5.1) koji je dubok 10 m, a izveden je u sklopu istraživanja za potrebe izgradnje višenamjenskog kanala Dunav-Sava. Na ovom piezometru razine su mjerene ručnim mjeračem jednom mjesečno, od svibnja do prosinca 2012. godine, nakon čega je uništen prilikom arheoloških radova.



Slika 5.1 Lokacije mjerenja razina podzemne vode i uzimanja uzoraka

5.1.2. Uzorkovanje

Osim mjerenja razina podzemne vode provodilo se i uzorkovanje podzemne vode na širem području crpilišta. Uzorci su uzimani jednom mjesečno na deset lokacija u razdoblju od svibnja 2012. do studenog 2013. godine (slika 5.1). Uzorci su uzimani nakon crpljenja tri volumena vode iz dubokih piezometara ili spuštanjem semplera u razinu filtra, te ručnim crpkama koje su već ugrađene u plitke privatne bušotine. Prilikom uzorkovanja, *in situ* su mjereni fizikalno-kemijski pokazatelji koji su posebno osjetljivi na promjene uvjeta okoliša, te ih je nužno izmjeriti na samom terenu. Mjereni su elektrolitička vodljivost (EC), temperatura (T), pH i zasićenost vode kisikom. Parametri su mjereni sondama proizvođača WTW. Uzimani su uzorci podzemne vode iz piezometara SPB-4, SPB-7, SPB-9, V-13, iz plitkih privatnih bušotina u Velikoj Kopanici (P-KOP), Sikirevcima (P-SIK) i u Slavonskom Šamcu (P-ŠAM), iz plitkog piezometra BTP-12 te voda iz rijeke Save na dvije lokacije (Jaruge i Slavonski Šamac). Piezometri za uzorkovanje su izabrani na način da se dobije uvid u fizikalno-kemijske značajke i kakvoću podzemne vode na širem prostoru crpilišta i to u: (1) vodonosniku zahvaćenom na crpilištu (SPB-7 i SPB-9); (2) vodonosniku na lokaciji Gundinci (SPB-4); (3) vodonosniku uz rijeku Savu (V-13); te (4) plitkom propusnom sloju koji nije zahvaćen i nalazi se unutar krovinskih naslaga iznad zahvaćenog vodonosnika (BTP-12, P-KOP, P-SIK, P-ŠAM). Na piezometru BTP-12 uzorci su uzimani samo prvih osam mjeseci, nakon čega je uništen te nije više bilo moguće uzimati uzorke. Za usporedbu su također izabrane i dvije lokacije za uzorkovanje rijeke Save, uzvodno od crpilišta kod Jaruga i nakon ušća rijeke Bosne u Savu u Slavonskom Šamcu (Brkić & Briški, 2013a). Uzorci vode su analizirani u Hidrokemijskom laboratoriju Zavoda za hidrogeologiju i inženjersku geologiju Hrvatskog geološkog instituta.

Na svim nabrojanim lokacijama se u istom razdoblju provodilo i mjesečno uzorkovanje podzemne vode za analize na stabilne izotope. Također su se prikupljale mjesečne oborine u Gundincima te su i one analizirane na stabilne izotope. Prikupljeni su i uzorci za analizu sadržaja tricija u podzemnoj vodi pomoću kojega se odredila relativna starost vode.

U tablici 5.1 prikazane su dubine, intervali filtra i udaljenosti od rijeke Save za objekte u kojima su uzimani uzorci podzemne vode odnosno u kojima je ručno mjerena razina podzemne vode.

OBJEKT	LOKACIJA	DUBINA/ *IZMJERENA DUBINA	INTERVAL FILTRA	UDALJENOST OD SAVE (m)
SPB-4	Crpilište Gundinci	68.7	29.7-35.7 39.7-45.7 60.7-66.7	4061
SPB-9	Crpilište Sikirevci	77.5	25.8-31.8 40.8-46.8 60.8-66.8 69.5-75.5	1017
SPB-7	Crpilište Sikirevci	71.3	27.3-33.3 37.3-43.3 51.3-57.3 63.3-69.3	1027
P-KOP	Velika Kopanica	18*	-	5414
P-ŠAM	Slavonski Šamac	11.5*	-	313
P-SIK	Crpilište Sikirevci	15.6*	-	2118
BTP-12	Jaruge-Sikirevci	10.25*	6.5-8.5	1776
V-13	Slavonski Šamac	32.6*	22.25-31.25	503
SB-1	Beravci	81.0	29.5-41.5 53.5-57.5	4306
SB-3	Gundinci	50.0	29.5-39.5	6684
SB-5	Babina Greda	54.0	41.5-51.5	6300
BV-51	Sikirevci	54.0	29.5-35.5 42.1-50.1	2263
V-12	Velika Kopanica	48.8*	39-47 51-57	5315
P-8	Babina G.-Sl.Šamac	55.0	9.5-15.0	300
V-34	Gundinci	80.4	35.5-41.5	6444
V-46	Sredanci	60.0	35.5-41.5	2437

Tablica 5.1 Karakteristike objekata iz kojih su uzimani uzorci i u kojima je ručno mjerena razina podzemne vode

5.2. Izotopna i hidrokemijska istraživanja

Istraživanja okolišnih izotopa se rutinski koriste kao nadopuna hidrogeološkim istraživanjima (Atkinson et al., 2014; Clark & Fritz, 1997; Cook & Herczeg, 2000). Sastav stabilnih izotopa u vodi se mijenja kroz atmosferske procese te će oborine koje napajaju sustav u nekom određenom okolišu imati karakterističan izotopni sastav. Taj karakterističan sastav može služiti kao prirodni traser u određivanju porijekla podzemne vode. Raspad radioaktivnih izotopa omogućuje mjerenje protoka vremena odnosno određivanje starosti podzemne vode. Osim što omogućuju određivanje porijekla i starosti vode, okolišni izotopi govore i o kvaliteti podzemne vode, geokemijskom razvoju, procesima napajanja, interakciji

vode sa stijenama te izvoru saliniteta i procesima zagađenja (Clark & Fritz, 1997; Leibundgut et al., 2009; Zoellmann et al., 2001).

Okolišni izotopi su izotopi elemenata koji se prirodno pojavljuju u velikim količinama u okolišu te su glavni elementi hidroloških, geoloških i bioloških sustava. U njih spadaju izotopi vodika, ugljika, dušika, kisika i sumpora. Relativne razlike u masi između izotopa ovih elemenata su velike što uzrokuje mjerljivu frakcionaciju tijekom fizičkih i kemijskih reakcija. Izotopni sastav izražava se kao omjer promatranog izotopa prema najzastupljenijem izotopu danog elementa. Za izotop kisika je to omjer $^{18}O/^{16}O$, a za izotop vodika $^{2}H/^{1}H$. Izotopne koncentracije se izražavaju relativnim odstupanjem (δ) omjera izotopa u uzorku od omjera izotopa u referentnom uzorku (standardu) na slijedeći način (Clark & Fritz, 1997):

$$\delta^{18}O_{uzorak} = [(^{18}O/^{16}O)_{uzorak}/(^{18}O/^{16}O)_{standard} - 1]\ 1000‰\ VSMOW$$

gdje je VSMOW ime standarda koji je korišten, u ovom slučaju je to *Vienna Standard Mean Ocean Water*, koji je međunarodno prihvaćen kao standard za određivanje izotopa kisika i vodika u vodi. Kako su varijacije u koncentracijama izotopa malih iznosa, vrijednosti se izražavaju kao dijelovi na tisuću odnosno u promilima razlike od standarda. Standard za neki izotop ima δ vrijednosti 0‰, materijal koji sadrži više težeg izotopa od standarda ima pozitivne δ vrijednosti, a materijal koji ima manjak težih izotopa ima negativne δ vrijednosti.

Promjena agregatnog stanja vode (isparavanje i kondenzacija) je temeljni princip u hidrološkom ciklusu i igra važnu ulogu u dijeljenju teških izotopa kisika (^{18}O) i vodika (^{2}H) između raznih rezervoara (oceani, oblaci, kiša, površinske vode, podzemne vode, snijeg, led). Izotopna frakcionacija (dijeljenje izotopa) je termodinamička reakcija koja je pod jakim utjecajem temperature. Što je temperatura niža stupanj frakcionacije je viši. Teži izotopi se uvijek koncentriraju u fazi s čvršćom vezom, odnosno nižim energetskim stanjem. Isparavanjem vode iz oceana kroz proces frakcionacije dolazi do nakupljanja lakših izotopa u vodenoj pari. Kondenzacijom vodene pare u oblacima najprije se kondenziraju teži izotopi pa vodena para ostaje sve siromašnija težim izotopima. Rezultat ovih procesa su uočljive promjene u vremenskoj i prostornoj raspodjeli izotopnog sastava oborina (Gat & Gonfiantini, 1981). Oborine u polarnim područjima su siromašnije težim izotopom od oborina u ekvatorijalnom području. Također idući od oceana prema unutrašnjosti kontinenta oborine postaju sve siromašnije težim izotopima, a isto se događa idući od nižih prema većim nadmorskim visinama. Zbog temperaturnog utjecaja na frakcionaciju nastaju sezonske promjene u izotopnom sastavu oborina (Dansgaard, 1964). Ljeti su oborine bogatije težim izotopima, dok su zimi zbog niže temperature siromašnije težim izotopima. Kod površinskih

stajaćih voda dolazi do obogaćivanja težim izotopima jer se procesom isparavanja gube lakši izotopi (Clark & Fritz, 1997).

Craig (1961) je primijetio da se površinske tekuće vode mogu korelirati na globalnom nivou. Ustanovio je linearni odnos između δ^2H i $\delta^{18}O$, koji se naziva globalna linija meteorske vode (GMWL – engl. Global Meteoric Water Line), te ga je prikazao jednadžbom pravca:

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O+10$$

Ova linija predstavlja prosjek mnogih lokalnih i regionalnih linija meteorske vode, koje se razlikuju od globalne zbog različitih klimatskih i geografskih parametara. Za praktičnu primjenu u hidrološkim i hidrogeološkim istraživanjima koristi se linija meteorske vode dobivena za točno određeno područje odnosno lokalna linija meteorske vode (LMWL – engl. Local Meteoric Water Line).

Podzemne vode, ukoliko nisu izložene temperaturama iznad 60-80ºC, ne mijenjaju svoj izotopni sastav kroz relativno duga vremenska razdoblja. Zbog toga se preko sadržaja izotopa u podzemnoj vodi može odrediti porijeklo te vode (Gat & Gonfiantini, 1981). Usporedba izotopnog sastava kisika i vodika u oborinama i u podzemnoj vodi služi kao alat za određivanje mehanizama napajanja (Blasch & Bryson, 2007; Han et al., 2009; Yeh et al., 2014). U umjerenim klimatskim područjima izotopni sastav podzemnih voda, koje se napajaju infiltracijom oborina, često je blizak prosječnom izotopnom sastavu oborina. Ovo ukazuje da su sezonske varijacije u izotopnom sastavu oborina prigušene prilikom prolaska vode kroz nesaturiranu zonu. Prigušivanje je rezultat hidrodinamičke disperzije unutar tla, a ovisno je o fizičkim i hidrauličkim parametrima nesaturirane zone. Intenzitet prigušenja je proporcionalan duljini prijeđenog puta vode, odnosno vremenu toka kroz nesaturiranu zonu. U sitnozrnatim tlima je dubina kod koje sezonski signal nestaje manja nego kod krupnije zrnatih tala (Leibundgut et al., 2009). Mjerenjem sezonskih varijacija u podzemnoj vodi i oborinama može se odrediti vrijeme putovanja vode kroz nesaturiranu zonu (Clark & Fritz, 1997). Na temelju sezonskih varijacija tj. identificiranjem pikova ljetnih i zimskih oborina u nesaturiranoj zoni, može se izračunati količina napajanja. Kod plitkih podzemnih voda, gdje je vodno lice iznad dubine prigušenja, može doći do održavanja malih sezonskih varijacija u podzemnoj vodi, koje ukazuju na kratko vrijeme boravka vode u podzemlju. Postojanje varijacija u izotopnom sastavu ispod dubine prigušenja ukazuje na preferirane tokove ili miješanje različitih voda. Razlika izotopnog sastava podzemne vode u odnosu na prosječni sastav godišnjih oborina može biti posljedica sezonskog utjecaja evapotranspiracije i smrzavanja na količinu infiltracije. Ljetne oborine uglavnom se izgube evapotranspiracijom, a zimske su pohranjene u snijegu te se dijelom gube površinskim otjecanjem na proljeće. Na taj

način izotopni sastav podzemnih voda postaje sličniji prosječnom sastavu proljetnih i jesenskih oborina. Kod vodonosnika koji su povezani s površinskim tokovima, odnosno rijekama, moguće je na temelju izotopnog sastava podzemne vode i rijeke odrediti udio napajanja podzemnih voda iz površinskih tokova te vrijeme putovanja vode od površinskog toka do mjesta uzorkovanja podzemne vode (Hunt et al., 2005; Maloszewski et al., 1990; Yeh et al., 2014). U kompleksnim vodonosnim sustavima može se odvijati miješanje podzemnih voda različitog izvora napajanja, različitih vodonosnih slojeva i različitih sustava toka. Izotopna istraživanja u ovakvim sustavima mogu se koristiti za kvantificiranje podzemnih voda različitog porijekla. Miješanje podzemnih voda različitog porijekla u regionalnom sustavu uprosječuje njihov izotopni sastav. U ovakvim slučajevima se stabilni izotopi mogu koristiti kao indikatori regionalnog toka, a ne za identifikaciju određenog područja napajanja (Boronina et al., 2005; Clark & Fritz, 1997; Davisson et al., 1999).

Izotopna istraživanja se često koriste kod izrade konceptualnog modela te u kombinaciji s numeričkim modeliranjem. Ona pridonose boljem razumijevanju cjelokupnog sustava, a mogu se koristiti i kao dodatni podaci za kalibraciju modela (Fórizs et al., 2005; Hunt et al., 2005; Liu et al, 2014; Mattle et al., 2001; Stichler et al., 2008).

U sklopu terenskih istraživanja koja su provedena za potrebe izrade ovog rada prikupljeni su uzorci podzemne i površinske vode, kako je opisano u prethodnom poglavlju. Za bolje sagledavanje različitih izvora napajanja vodonosnika na svim prikupljenim uzorcima vode izvršile su se analize sadržaja stabilnih izotopa kisika i vodika (^{18}O i ^{2}H). Analize su napravljene u Laboratoriju za stabilne izotope (SILab) na Medicinskom fakultetu u Rijeci uz pomoć masenog spektrometra DELTA plus XP. Također su se sakupljale mjesečne oborine na području istraživanja da bi se utvrdila lokalna linija meteorske vode.

Radioaktivni okolišni izotopi koji se najčešće koriste za određivanje starosti podzemne vode su ^{14}C i ^{3}H, a u novije vrijeme postaje šire dostupno i korištenje ^{36}Cl. Tricij (^{3}H) je radioaktivni izotop vodika s vremenom poluraspada od 12.43 godine. Koristi se kao hidrološki traser i kao sredstvo za datiranje podzemnih voda. Koncentracije tricija izražavaju se kao apsolutne koncentracije u tricijskim jedinicama (TU), a jedna tricijska jedinica odgovara jednom atomu tricija na 10^{18} atoma vodika. Tricij nastaje u malim koncentracijama prirodnim procesima u gornjim slojevima atmosfere, procjenjuje se da je prirodna koncentracija tricija u oborinama između 5 i 20 tricijskih jedinica (TU) (Kauffman & Libby, 1954). Upotreba tricija kao trasera povezana je s oslobađanjem velikih količina u atmosferu za vrijeme testiranja atomskog oružja u 1950-im i ranim 1960-im godinama. Distribucija tricija u oborinama, u vrijeme vrhunca aktivnosti, za razne dijelove svijeta može se izračunati

uz pomoć modela Doney et al. (1992), koji su unaprijedili Zhang et al. (2011). Najveće koncentracije tricija nastale u vrijeme vrhunca testiranja služe kao apsolutni vremenski marker preko kojeg se može procijeniti starost podzemne vode. No procesi radioaktivnog raspada i hidrodinamičke disperzije su uzrokovali veliko smanjivanje maksimalnih koncentracija tricija u podzemnoj vodi, te je identificiranje vrhunca aktivnosti postalo vrlo otežano (Krešić, 2007). Na temelju koncentracije tricija u podzemnoj vodi može se, između ostalog, kvalitativno odrediti starost podzemne vode (Clark & Fritz, 1997):

<0.8 TU	Submoderna voda – napajanje prije 1952.
0.8 do oko 4 TU	Miješanje submodernog i recentnog napajanja
5 do 15 TU	Moderna voda (<5 do 10 godina)
15 do 30 TU	Prisutan dio vode iz vremena atomskog testiranja
>30 TU	Značajna komponenta napajanja iz razdoblja 1960. do 1970.
>50 TU	Dominantno napajanje iz 1960-ih.

Da bi se odredila relativna starost podzemne vode sadržaj tricija analiziran je na šest uzoraka podzemne vode i jednom uzorku vode iz rijeke Save. Uzorci su uzeti za vrijeme razdoblja visokih voda, a analize su napravljene u laboratoriju Hydrosys Labor Ltd. u Budimpešti prema važećim standardima.

Osim izotopnih istraživanja, i hidrokemijska istraživanja mogu pomoći u određivanju porijekla podzemne vode i hidrodinamičkih uvjeta koji vladaju u vodonosniku te mehanizama koji upravljaju regionalnim varijacijama u kemijskom sastavu voda (Folch et al., 2011; Han et al., 2009; Huang & Pang, 2010; Lamouroux & Azzedine, 2006; Li et al., 2008; Marković et al., 2013; Schofield & Jankowski, 2004; Zhu et al., 2007).

Glavni kationi (natrij, kalij, kalcij, magnezij) i glavni anioni (kloridi, bikarbonati i sulfati) obično tvore 98% svih soli otopljenih u podzemnoj vodi. Mjerenje koncentracija ovih glavnih sastojaka omogućuje određivanje prisutnih otopljenih mineralnih vrsta, odnosno određivanje reakcija koje se odvijaju u vodonosniku. Ovi podaci se zatim mogu koristiti za određivanje karaktera i povijesti interakcije vode i stijene u vodonosniku (Appelo & Postma, 1996). Kemizam podzemne vode može ukazivati na varijacije u svojstvima vodonosnika, a također omogućuje praćenje ponašanja podzemne vode unutar litološki promjenjivih vodonosnika kao što su to aluvijalni vodonosnici. U aluvijalnim vodonosnicima povećani udio otopljenih iona može ukazivati na područja manje propusnosti, odnosno na dulje vrijeme zadržavanja podzemne vode i s tim povezano povećano trošenje minerala (Garcia et al., 2001; Jankowski & Beck, 2000)

Kemijski sastav podzemne vode u vodonosnim sustavima rezultat je interakcija različitih procesa koje je teško razlikovati samo na temelju ravnoteže otopine. U zatvorenim vodonosnim sustavima s razdvojenim zonama napajanja i pražnjenja i sporim tokom, mineralno trošenje može biti izrazitije u područjima napajanja, dok proces kationske zamjene može biti aktivniji blizu ili u zonama pražnjenja (Guo & Wang, 2004, 2005).

Na svim prikupljenim uzorcima podzemne i površinske vode napravljene su hidrokemijske analize u Hidrokemijskom laboratoriju Zavoda za hidrogeologiju i inženjersku geologiju Hrvatskog geološkog instituta. Mjereni su osnovni anioni (SO_4^{2-}, NO_3^- i Cl^-) pomoću ionskog kromatografa tvrtke LabAlliance, te osnovni kationi (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ i K^+), sadržaji željeza, mangana i arsena pomoću atomskog apsorbera tvrtke Perkin Elmer. Sadržaj hidrogenkarbonatnih iona mjeren je titrimetrijskom metodom sa sulfatnom kiselinom i kiselinsko-baznim indikatorima fenol-ftaleinom i bromkrezol-zelenom digitalnim titratorom tvrtke HACH. Koncentracije amonijaka i ortofosfata mjerene su kolorimetrijskom metodom pomoću spektrofotometra DL/2010 tvrtke HACH. Korišteni postupci pripreme i mjerenja uzoraka uobičajeni su u hidrokemiji, a kemikalije korištene za pripremu uzoraka i standardne otopine proizvodi su tvrtke HACH i AccuStandard.

5.3. Metode modeliranja podzemnih voda

Postojeća literatura o metodologiji istraživanja u modeliranju podzemnih voda je vrlo opsežna. U ovom poglavlju su za prikaz teoretskih osnova iz ovog područja pretežito korištene knjige autora Anderson & Woessner (2002) i Krešić (2007).

U hidrogeologiji se vrlo često traži predviđanje ponašanja vodonosnog sustava u budućnosti. To je potrebno da bi se moglo učinkovito gospodariti raspoloživim zalihama podzemnih voda. Da bi to bilo moguće potrebno je izraditi točan konceptualni model, odabrati vrijednosti parametara koje opisuju prostornu promjenjivost unutar promatranog sustava podzemne vode, kao i prostorne i vremenske trendove u hidrološkim stresovima te prošle i buduće trendove razina vode. Za analiziranje složenih hidrogeoloških problema često nije dovoljno samo kvalitetno izučavanje i rezoniranje. Najbolji dostupni alat za pomoć pri analiziranju i predviđanju ponašanja vodonosnog sustava je izrada modela strujanja podzemne vode. Prednost modela je što ujedinjuje suptilnost ljudskog rasuđivanja s mogućnostima digitalnih računala.

Prije početka izrade modela nužno je odrediti njegovu svrhu. Pitanja koje se postavljaju su:

- Da li će model služiti za predviđanje, interpretaciju sustava ili kao opća vježba modeliranja?
- Što se želi naučiti iz modela i na koja pitanja se traže odgovori uz pomoć modela?
- Da li je model najbolji način za dobiti odgovore na postavljena pitanja?
- Može li analitički model poslužiti svrsi, ili je potrebno izraditi numerički model?

Odgovori na ova pitanja će odrediti opseg modeliranja i vrstu modela koji će se koristiti. Model toka podzemne vode može imati različitu primjenu. Može se koristiti za predviđanje promjena u sustavu (model prognoze), za opisivanje sustava tj. njegove dinamike ili za analiziranje principa toka podzemne vode u hipotetskom sustavu. Većina modela toka podzemne vode koriste se kao modeli prognoze.

5.3.1. Izrada konceptualnog modela

Nakon što je određena svrha modela sljedeći korak je izrada konceptualnog modela. To je najvažniji dio u procesu modeliranja. Zahtjeva dobro razumijevanje hidrogeologije, hidrologije i dinamike toka podzemne vode. Njime se definiraju hidrogeološki uvjeti istraživanog područja, uključujući svojstva naslaga i njihovu raspodjelu, te tok podzemne vode u njima (Brkić, 1999). Kvaliteta konceptualnog modela primarno ovisi o poznavanju i kvaliteti hidrogeoloških podataka. Konceptualni model mora što vjernije opisivati situaciju u prirodi, a istovremeno treba biti pojednostavljen što je više moguće. Kod izrade konceptualnog modela koriste se postojeće baze podataka i terenska istraživanja.

Prvi korak u izradi konceptualnog modela je definiranje područja interesa tj. postavljanje granica modela. Vanjske granice modela mogu biti fizičke (stvarne) i hidrauličke (umjetne). Fizičke granice su dobro definirane geološke i hidrološke značajke koje trajno utječu na tok podzemne vode (kontakt vodonosnika i nepropusnih naslaga, rasjed, kontakt poroznog medija s površinskim vodnim tijelom itd.). Hidrauličke granice proizlaze iz mreže toka podzemne vode. One mogu biti granice bez dotoka predstavljene odabranom strujnicom ili granice poznatog potencijala predstavljene ekvipotencijalnom linijom. Kad god je moguće poželjno je iskoristiti fizičke hidrogeološke granice kao granice modela jer su hidrauličke granice promjenjive u vremenu. Glavni zahtjev kod postavljanja hidrauličkih granica je da one budu dovoljno udaljene od interesnog područja u modelu, da ne bi utjecale na buduće uvjete toka koji se simuliraju modelom. Pri određivanju horizontalnih i vertikalnih granica sustava koriste se geološke karte i profili te topografske karte s površinskim vodnim tijelima i razvodnicama.

Da bi se definirala geometrija vodonosnog sustava tj. vertikalno i lateralno prostiranje vodonosnika i njegove krovine i podine potrebno je prikupiti sve dostupne podatke istražnih bušenja te izraditi karte izostrata podina vodonosnih naslaga i slabopropusnih ili nepropusnih naslaga. Nakon toga potrebno je odrediti numeričke vrijednosti hidrogeoloških parametara vodonosnika. Tu spada hidraulička vodljivost, transmisivnost i specifični koeficijent uskladištenja pojedinih slojeva. U tome će najviše koristiti podaci pokusnih crpljenja ako postoje i granulometrijske analize. Često su dostupni podaci o vrijednostima hidrauličke vodljivosti koncentrirani na užim područjima crpilišta te je za izradu modela potrebno interpolirati postojeće podatke na cijelo područje obuhvaćeno modelom.

Izvori napajanja sustava, očekivani smjerovi toka i točke pražnjenja trebaju biti dio konceptualnog modela. Napajanje sustava odvija se infiltracijom oborina, procjeđivanjem iz vodotokova i iz površinskih vodnih tijela. Pražnjenje sustava može uključivati otjecanje u vodotokove, evapotranspiraciju i crpljenje. Također u sustavu može biti prisutno podzemno dotjecanje ili otjecanje. Korištenjem podataka s terena priprema se vodna bilanca koja uključuje procijenjene veličine svih navedenih tokova.

Hidrološke informacije koriste se da bi se definirao sustav toka podzemne vode. Koriste se informacije o oborinama, evaporaciji, površinskom otjecanju, razine podzemne vode u piezometrima i geokemijske informacije. Mjerenja razina podzemne vode koriste se da bi se odredio generalni smjer toka podzemne vode, područja napajanja i pražnjenja te povezanost vodonosnika s površinskim tokovima. Definiranje sustava toka može biti bazirano samo na fizičkim hidrološkim podacima, ali poželjno je koristiti i geokemijske podatke kad god je to moguće da se potvrdi konceptualni model.

5.3.2. Odabir matematičkog modela toka i metode rješavanja

Matematički model simulira tok podzemne vode indirektno preko skupa diferencijalnih matematičkih jednadžbi koje predstavljaju fizičke procese koji se odvijaju u sustavu. Sastoji se od jednadžbe toka, rubnih i početnih uvjeta. Jednadžba toka sastoji se od zakona o očuvanju mase (jednadžba kontinuiteta) i Darcyjevog zakona. Trodimenzionalno gibanje podzemne vode konstantne gustoće kroz porozni medij može se opisati parcijalnom diferencijalnom jednadžbom (Bear, 1979):

$$\partial/\partial x\,(K_{xx}\,\partial h/\partial x) + \partial/\partial y\,(K_{yy}\,\partial h/\partial y) + \partial/\partial z\,(K_{zz}\,\partial h/\partial z) - W = S_s\,\partial h/\partial t$$

gdje je: K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}– vrijednosti hidrauličke vodljivosti u smjeru x, y i z koordinatnih osi za koje se pretpostavlja da su paralelne s glavnim osima hidrauličke vodljivosti [L/T]

h – piezometarska razina [L]

W – volumetrijski fluks po jediničnom volumenu [1/T]

S_s – specifični koeficijent uskladištenja vodonosnika [1/L]

t – vrijeme [T]

Vrijednosti S_s i K mogu biti funkcije prostora, a W može biti funkcija prostora i vremena. Prikazana jednadžba opisuje gibanje podzemne vode u neravnotežnim uvjetima u heterogenoj i anizotropnoj poroznoj sredini, uz pretpostavku da su glavne osi hidrauličke vodljivosti paralelne s osima koordinatnog ustava.

Rubni uvjeti predstavljaju dotjecanja i otjecanja te potencijal na granicama vodonosnog sustava. Hidrogeološke granice predstavljene su s tri tipa matematičkih uvjeta: Dirichletova granica je granica zadanog potencijala, Neumannova granica je granica sa zadanim tokom preko granice, a Cauchyjeva granica predstavljena je tokom ovisnim o potencijalu.

Početni uvjet predstavlja raspodjela razine podzemne vode odnosno potencijala na početku simulacije.

Za rješavanje matematičkih modela mogu se koristiti analitičke i numeričke metode. Analitičke metode su egzaktne metode za rješavanje diferencijalnih jednadžbi, ali one zahtijevaju jednostavne početne i rubne uvjete, te homogenu i izotropnu sredinu što najčešće ne odgovara uvjetima u prirodi te je zbog toga fleksibilnost analitičkih modela ograničena. Zbog složenosti geoloških i hidrogeoloških uvjeta u prirodi najčešće je potrebno koristiti numeričke metode kojima se dobiva približno rješenje. Numerički modeli opisuju cijelo interesno polje toka istovremeno te daju rješenja za više točaka koje definira korisnik. Područje modela je podijeljeno na mnogo malih elemenata te se za svaki element rješava jednadžba toka. Rješenje numeričkog modela je raspodjela potencijala u točkama koje predstavljaju elemente. Bazična diferencijalna jednadžba toka za svaki element aproksimirana je s algebarskom jednadžbom tako da je cijelo polje toka predstavljeno s x nepoznanica (x je broj elemenata). Sustav algebarskih jednadžbi rješava se numerički kroz iterativni proces. Na temelju različitih metoda aproksimacije diferencijalnih jednadžbi toka te različitih metoda rješavanja sustava algebarskih jednadžbi, numeričke metode se dijele na dvije glavne skupine: metoda konačnih diferencija i metoda konačnih elemenata. Obe imaju prednosti i mane, ali su u hidrogeološkoj praksi prevladali modeli temeljeni na metodi konačnih diferencija zbog toga što su lakši za izradu i razumijevanje te zahtijevaju manje podataka.

Numerički računalni kod služi kao alat za rješavanje jednadžbe toka. Ovaj kod se pretvara u model podzemne vode uključivanjem specifične geometrije istraživanog sustava, rubnih uvjeta i stvarnih parametara toka te kalibracijom i verifikacijom modela (Spitz &

Moreno, 1996). MODFLOW (A modular tree-dimensional finite difference groundwater flow model) je jedan od najraširenijih računalnih kodova (programa) za modeliranje toka podzemne vode koji se temelji na metodi konačnih direfencija. Razvili su ga na USGS-u McDonald i Harbaugh (1988), a kasnije je dalje unaprjeđivan (Harbaug & Mc Donald, 1996; Harbaug et al., 2000; Harbaug, 2005). Smatra se najpouzdanijim, najbolje testiranim i verificiranim kodom koji je danas dostupan. U ovom radu je za rješavanje matematičkog modela toka odabran kod MODFLOW-2000 kao sastavni dio programskog paketa VisualMODFLOW v 2011.1.

5.3.3. Izrada numeričkog modela

VisualMODFLOW je računalni programski paket s grafičkim sučeljem koje omogućava relativno jednostavno unošenje ulaznih podataka i kreiranje ulaznih datoteka za MODFLOW program, te provođenje simulacija i prikaz i obradu rezultata simulacija. Preko grafičkog sučelja unose se početni i rubni uvjeti te hidrogeološki parametri koje program koristi za rješavanje matematičkog modela toka. Detaljan opis karakteristika programskog paketa te upute za unošenje podataka u računalni program dane su u korisničkom priručniku (Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual). U ovom poglavlju su navedene glavne smjernice za oblikovanje računalnog modela.

5.3.3.1. Diskretizacija prostora modela

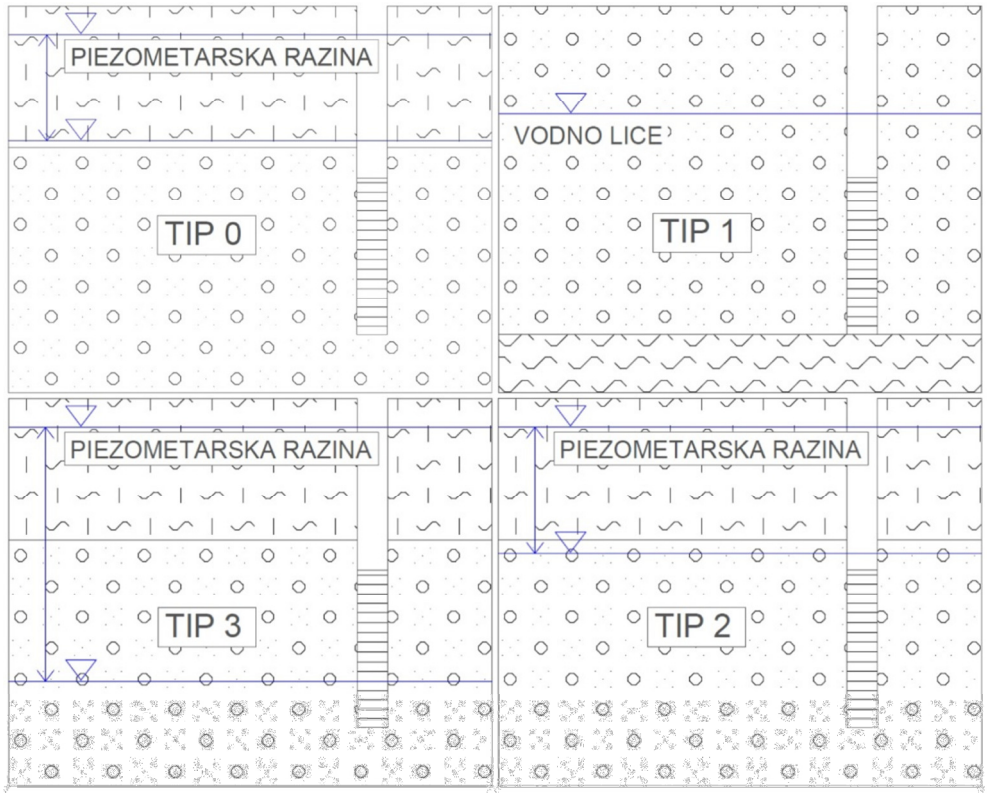
Prvi korak pri unošenju konceptualnog modela u računalni program je diskretizacija prostora modela. U MODFLOW programu domena modela je podijeljena na ortogonalne elemente. U sredini svakog elementa nalazi se čvor za koji model računa piezometarsku razinu. Pretpostavlja se da su hidrogeološki i hidraulički parametri jednoliki u svakom elementu te je element predstavljen svojim čvorom.

Ortogonalna mreža može biti jednolika kada svi elementi imaju jednake dimenzije, ili veličine elemenata mogu varirati. S matematičke točke gledišta preferira se jednolika mreža, ali često je nužno upotrijebiti mrežu s elementima različitih dimenzija. Jednolika mreža je bolji izbor kada su dostupni podaci o sustavu jednoliko raspoređeni u prostoru te kada je cijelo promatrano polje toka od jednake važnosti. Elementi različitih dimenzija su prikladni kada su raspoloživi podaci grupirani na određenim područjima modela, i kada je naglašen interes za manja područja unutar modela. Interesno područje se diskretizira na manje elemente te se na taj način postiže bolja točnosti rezultata na tom području. Poželjno je ovakvu diskretizaciju primijeniti i duž granica modela da bi ih se bolje opisalo. Kod promjenjivih

veličina elemenata treba imati na umu pravilo palca koje kaže da se susjedni elementi ne smiju razlikovati u veličini za više od 1.5 puta u bilo kojem smjeru (red, kolona, sloj). Ovo je nužno za očuvanje matematičke stabilnosti numeričkog rješenja.

Kod modeliranja anizotropnih vodonosnika ortogonalnu mrežu treba orijentirati tako da se horizontalne koordinatne osi modela (x i y) podudaraju s glavnim osima tenzora hidrauličke vodljivosti (K_x i K_y), a vertikalna os se treba podudarati sa smjerom vertikalne hidrauličke vodljivosti (K_z).

Na temelju konceptualnog modela donosi se odluka na koliko slojeva će se podijeliti model. Najčešće se hidrogeološke jedinice mogu simulirati s horizontalnim slojevima u modelu. MODFLOW program ima četiri osnovna tipa slojeva (slika 5.2):



Slika 5.2 Osnovni tipovi slojeva u MODFLOW programu

- Tip 0: za simulaciju zatvorenih uvjeta – transmisivnost se ne mijenja u vremenu. Zadaje se specifični koeficijent uskladištenja.
- Tip 1: za simulaciju otvorenih uvjeta – samo za prvi sloj, transmisivnost se mijenja promjenom debljine saturiranog dijela sloja. Zadaje se specifično davanje.
- Tip 2: za slučaj kada vodonosnik varira između zatvorenog i otvorenog – pretpostavlja se ne promjenjiva transmisivnost, zadaje se specifični koeficijent

uskladištenja (za uvjete potpune saturacije) i specifično davanje (za uvjete kada se razina u vodonosniku spusti ispod krovine).

- Tip 3: za slučaj kada vodonosnik varira između zatvorenog i otvorenog – promjenjiva transmisivnost ovisno o debljini saturiranog dijela sloja, zadaje se specifični koeficijent uskladištenja i specifično davanje.

Karte izostrata podine i krovine pojedinih slojeva, koje su napravljene u sklopu izrade konceptualnog modela, koriste se za definiranje elevacije podine i krovine slojeva modela.

5.3.3.2. Diskretizacija vremena

Vremenske parametre potrebno je zadati kada se simuliraju nestacionarni uvjeti. Oni uključuju vremensku jedinicu, duljinu i broj vremenskih perioda te broj vremenskih koraka unutar svakog vremenskog perioda. Tokom jednog vremenskog perioda svi parametri modela vezani uz rubne uvjete i različite stresove ostaju nepromijenjeni. Povećanje broja vremenskih perioda omogućuje mijenjanje parametara kroz vrijeme. Vremenski koraci na koje je podijeljen vremenski period korisni su za analiziranje sniženja i promjena u potencijalu. Što je vremenski korak manji to će rješenje modela biti točnije i model će biti stabilniji. Duljine vremenskih koraka mogu se mijenjati prema potrebi, npr. u vremenu kada na sustav počinje djelovati novi stres treba smanjiti duljinu vremenskih koraka.

5.3.3.3. Parametri porozne sredine

Hidraulička vodljivost je u mnogim slučajevima najkritičniji parametar u modeliranju. Kod izrade modela treba se potruditi da vrijednosti hidrauličke vodljivosti budu što realnije, ako je moguće dobivene iz terenskih podataka pokusnih crpljenja. Program računa transmisivnost iz podataka o hidrauličkoj vodljivosti i debljini (ili saturiranoj debljini). Vertikalna hidraulička vodljivost potrebna je za računanje procjeđivanja između susjednih slojeva. Kada ne postoje podaci često se pretpostavlja da je vertikalna hidraulička vodljivost za jedan red veličine manja od horizontalne za većinu uslojenih sedimentnih stijena.

Uskladištenje odnosno specifični koeficijent uskladištenja (zatvoreni sloj) i specifično davanje (otvoreni sloj) potrebni su samo za nestacionarne simulacije. Specifični koeficijent uskladištenja i specifično davanje mogu se odrediti pokusnim crpljenjem. Ako nema dostupnih podataka ovi parametri se mogu procijeniti uz pomoć podataka iz literature.

Efektivnu poroznost potrebno je unijeti ako se rezultati modela planiraju koristiti za računanje efektivne brzine toka podzemne vode (koja je potrebna npr. za simulaciju trasiranja čestica).

5.3.3.4. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti su matematičke tvrdnje koje određuju zavisne varijable (razina podzemne vode) i derivaciju zavisne varijable (tok) na granicama modeliranog područja. Ispravan odabir rubnih uvjeta je kritičan korak u izradi modela, a ujedno je to korak koji je najpodložniji ozbiljnim pogreškama.

Granica zadanog potencijala simulira se zadavanjem vrijednosti potencijala u čvorovima duž granice. Koristi se za hidrauličke granice koje su određene ekvipotencijalnom linijom ili npr. za fizičku granicu koja je određena kontaktom vodonosnika s većim površinskim vodnim tijelom. Važno je imati na umu da ova granica predstavlja nepresušni izvor vode u sustavu jer se zadana vrijednost potencijala ne mijenja pod utjecajem napajanja ili pražnjenja koji dolaze iz sustava. Korisnik može mijenjati vrijednosti zadanog potencijala tokom simulacije ako je to potrebno i opravdano. U VisualMODFLOW programu uključen je programski paket za granicu stalnog potencijala (Constant Head) koji omogućuje unos vrijednosti potencijala za svaki vremenski period nestacionarne simulacije. Program zatim linearnom interpolacijom zadanih vrijednosti za početak i kraj vremenskog perioda računa međuvrijednosti za svaki vremenski korak unutar vremenskog perioda. Granica se može zadati površinski ili linijski. Ovaj paket također omogućava zadavanje vrijednosti potencijala u početnoj i završnoj točki linijske granice koje se zatim linearno interpoliraju duž cijele granice.

Granica zadanog toka preko granice koristi se za simuliranje dotjecanja i otjecanja kroz bočne kontakte između različitih vodonosnika, procjeđivanje iz susjednih slojeva, istjecanje na izvorima, dotjecanje ili otjecanje u površinske tokove te podzemni dotok. Kad god je moguće model bi trebao imati i granice opisane sa zadanim potencijalom ili tokom ovisnim o potencijalu radije nego samo sa zadanim tokom. Glavni programski paketi kojima se simulira granica zadanog toka su paket napajanja (Recharge package) i paket zdenaca (Well package). Napajanje elemenata modela (Recharge package) zadano je intenzitetom napajanja te ima dimenziju brzine. Model računa dotok množenjem intenziteta s površinom elemenata. Ovaj paket koristi se za simulaciju napajanja vodonosnika infiltracijom oborina. Zdenački paket simulira crpljenje ili upumpavanje preko crpnih količina. Količina crpljenja ili upumpavanja neovisna je o površini elementa i potencijalu u elementu, a može se zadati za bilo koji element u modelu. Zato se ovaj paket osim za simulaciju stvarnih zdenaca koristi i za simuliranje granica zadanog toka. Granice bez dotoka su granice u kojima zadan tok ima vrijednost nula. To su nepropusne granice u modelu, a simuliraju se neaktivnim elementima.

MODFLOW automatski zadaje granice bez dotoka oko zadane ortogonalne mreže u slučaju kada korisnik sam ne odredi tip granice.

Granica s tokom ovisnim o potencijalu je granica u kojoj se računa protok iz razlike u potencijalu između elemenata granice i susjednih elemenata. U MODFLOW programu se ova granica može simulirati s tri paketa: rijeka (River package), drenažna cijev (Drain package) i opća granica potencijala (General head boundary package). Zajedničko kod svih navedenih paketa je da korisnik mora zadati provodljivost naslaga (engl. Conductance) koje se nalaze između vodnog tijela i vodonosnika (npr. provodljivost sedimenata korita rijeke), koja se često može u potpunosti definirati tek kroz kalibraciju modela. Provodljivost ovisi o vertikalnoj hidrauličkoj vodljivosti sloja kroz koji se voda procjeđuje, njegovoj debljini te površini koju zauzima u elementu. Množenjem provodljivosti i razlike potencijala u susjednim elementima dobiva se protok na granici. U ovaj tip granice spada i vertikalno procjeđivanje tj. tok vode kroz naslage koje imaju vertikalnu hidrauličku vodljivost nižu od vodonosnika. Ono ovisi o vertikalnoj hidrauličkoj vodljivosti slojeva i njihovoj debljini. Količina procjeđivanja ovisi o razlici potencijala u vodonosniku i izvornom sloju. Smjer i količina procjeđivanja mijenjaju se tokom simulacije kako se mijenja razina vode u vodonosniku.

Neki autori (Anderson & Woessner, 2002) u grupu granica s tokom ovisnim o potencijalu svrstavaju i evapotranspiraciju (Evapotranspiration package), dok je drugi svrstavaju u granice sa zadanim tokom (Krešić, 2007).

Voda u model može ući ili iz njega izaći na dva načina: preko granica koje su definirane rubnim uvjetima, ili kroz izvore i ponore u unutrašnjosti modela (ovaj tok je sastavni dio jednadžbe toka). Za simuliranje napajanja ili pražnjenja unutar sustava koriste se isti paketi kao i za rubne uvjete. Zdenci koji se crpe ili upumpavaju su točkasti izvor ili ponor i predstavljeni su u modelu čvorom za koji korisnik zadaje crpnu količinu.

5.3.3.5. Početni uvjeti

Početni uvjeti su vrijednosti potencijala za svaki aktivni element modela na početku simulacije. Kod zadavanja početnih uvjeta treba paziti da zadana vrijednost potencijala bude iznad dna sloja u kojem je zadana. Vrijednosti potencijala za početne uvjete treba odrediti prema podacima s terena. Iako je zadavanje početnih uvjeta nužno samo za nestacionarne simulacije, preporučljivo je da se oni zadaju i kod stacionarnih simulacija jer se time ubrzava programski proces rješavanja modela.

5.3.4. Kalibracija modela

Literatura koja se bavi kalibracijom numeričkih modela toka podzemne vode je vrlo opsežna. Neki od važnih radova iz ovog područja su: ASTM (1999), Carrera (1988), Carrera & Neuman (1986), Cooley & Naff (1990), Doherty et al. (1994), Hill (1998), Hill et al. (2000), Hill & Tiedeman (2007), Konikow (1978), Kovar & Hrkal (2003), Peck et al. (1988), Yeh (1986). U daljnjem tekstu dane su skraćene smjernice za kalibraciju modela temeljene na knjigama autora Anderson & Woessner (2002) i Krešić (2007). Naglasak ovog rada biti će na konkretnom primjeru kalibracije modela crpilišta Sikirevci.

Kalibracija modela je proces kroz koji se pronalaze rubni uvjeti, stresovi i hidrogeološki parametri koji će dati rezultat koji se najbolje poklapa s terenskim mjerenjima razina podzemne vode i protoka. Prije kalibracije treba se zadati vrijednost prihvatljive pogreške modela. Ova vrijednost će najviše ovisiti o svrsi modela. Kvaliteta kalibracije ovisi o količini i kvaliteti dostupnih terenskih podataka. Kalibracija se može raditi za stacionarne i nestacionarne uvjete, ali kad god je moguće bolje je kalibrirati model u nestacionarnim uvjetima. Za nestacionarnu kalibraciju idealno je imati podatke o mjesečnim razinama podzemne vode, mjesečnim oborinama, mjesečnom vodostaju rijeke i mjesečnim crpnim količinama. Mjesečne vrijednosti za nestacionarnu kalibraciju su pogodnije od dnevnih ili tjednih jer sustavi podzemnih voda obično reagiraju sa zakašnjenjem na površinske stresove. Mjesečni podaci omogućuju i analizu sezonskih utjecaja, što je važno kod dugoročnih prognoza.

Postoje dvije metode kalibracije: metoda pokušaja i pogrešaka (ručna) i automatska kalibracija. Metoda pokušaja i pogrešaka se prva primjenjivala u modeliranju podzemnih voda i još uvijek se preferira od većine korisnika. Tokom ručne kalibracije mijenjaju se rubni uvjeti, vrijednosti parametara i stresovi uzastopno za svako pokretanje modela dok se izračunate vrijednosti potencijala ne poklope s mjerenim.

Prva faza kalibracije modela završava kada se postigne dobro vizualno poklapanje između izračunatih i mjerenih razina na kartama hidroizohipsi. Slijedeći korak je kvantifikacija pogreške modela kroz različite statističke parametre kao što su standardna devijacija i raspodjela reziduala. Kada se pogreške svedu na prihvatljive razine model je spreman za korištenje u predviđanju.

Tokom kalibracije naglasak se treba staviti na parametre čije su vrijednosti manje pouzdane ili pretpostavljene, a parametre koji su određeni s većom sigurnošću samo malo mijenjati. Hidraulička vodljivost je često najosjetljiviji parametar čije mijenjanje značajno

utječe na raspodjelu potencijala. Kalibracija metodom pokušaja i pogrešaka nije jednoznačna jer različite kombinacije parametara mogu dati slične ili čak iste rezultate.

Automatska kalibracija postala je popularna otkad su računalni programi postali široko dostupni. To je tehnika razvijena da bi se smanjile nesigurnosti povezane sa subjektivnošću korisnika. Većina računalnih kodova za automatsku kalibraciju traži optimalni skup parametara za koje je zbroj kvadratnih devijacija između mjerenih i izračunatih vrijednosti smanjen na minimum. Najpoznatiji program za automatsku kalibraciju je PEST (Doherty et al., 1994) koji je integriran u većinu računalnih programa koji se temelje na MODFLOW kodu.

5.3.5. Analiza pogreške modela

Kvalitativna mjera uspješnosti kalibracije je vizualna usporedba mjerenih i simuliranih vrijednosti potencijala na kartama hidroizohipsi i na dijagramima.

Kvantitativne tehnike za uspoređivanje rezultata modela i podataka s terena uključuju računanje reziduala, procjenjivanje korelacije između reziduala te prikazivanje reziduala na kartama i dijagramima. Reziduali se računaju oduzimanjem vrijednosti izmjerene na terenu od vrijednosti dobivene modelom. Ako je rezidual pozitivan izračunata vrijednost je previsoka, a ako je negativan ona je preniska. Srednji rezidual je aritmetička sredina svih reziduala. Što je srednji rezidual bliži nuli to je model bolje iskalibriran. Može se dogoditi da se velike pozitivne i negativne vrijednosti reziduala međusobno ponište te rezultiraju niskim srednjim rezidualom. Zato se srednji reziduali nikada ne promatraju zasebno, već u kombinaciji s drugim kvalitativnim i kvantitativnim pokazateljima. Apsolutni srednji rezidual je aritmetička sredina apsolutnih vrijednosti svih reziduala. Bolji je pokazatelj od srednjeg reziduala jer se u ovom slučaju reziduali ne mogu međusobno poništiti.

Kalibracija se također treba ocijeniti uz pomoć standardne statističke metode kao što je srednje kvadratno odstupanje (RMS – Root mean square Error) koje se računa prema jednadžbi:

$$RMS = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^{n} (H_o - H_c)_i^2}$$

gdje je: n – broj izmjerenih vrijednosti potencijala; Ho – izmjerena vrijednost potencijala; Hc – izračunata vrijednost potencijala.

Normalizirano srednje kvadratno odstupanje (NRMS) računa se dijeljenjem RMS-a s razlikom maksimalne i minimalne mjerene vrijednosti potencijala. Izražava se kao postotak i bolji je pokazatelj poklapanja od RMS-a jer uključuje i učinak raspona vrijednosti podataka.

Koeficijent korelacije između mjerenih i izračunatih vrijednosti pokazuje da li se ova dva skupa podataka kreću zajedno tj. da li velike vrijednosti iz jednog odgovaraju velikim vrijednostima iz drugog skupa (pozitivna korelacija) ili male vrijednosti iz jednog odgovaraju velikim vrijednostima iz drugog skupa (negativna korelacija). Ako su vrijednosti skupova nepovezane korelacija će biti oko nule. Koeficijent korelacije kreće se od -1 do 1. Računa se kao kovarijanca između izračunatih i izmjerenih vrijednosti u odabranoj točki, podijeljena s umnoškom standardnih devijacija ovih vrijednosti.

Prostorne i vremenske korelacije između reziduala mogu ukazivati na nedostatke u modelu. Korelacije se mogu identificirati preko dijagrama i karata. Prostorna korelacija ocjenjuje se prikazom reziduala s predznakom na kartama ili profilima. Očiti trendovi ili prostorne korelacije ukazuju da je potrebno korigirati parametre ili rubne uvjete u području modela gdje se pojavljuju. Kod nestacionarnih simulacija analizira se vremenska korelacija prikazom reziduala u određenoj točki modela kroz vrijeme. Vremenske korelacije među rezidualima mogu ukazivati na potrebu promjene uskladištenja vodonosnika ili početnih uvjeta (ASTM,1999).

5.3.6. Analiza bilance mase

Vrlo dobar pokazatelj uspješnosti kalibracije je analiza bilance mase. MODFLOW program računa tokove preko granica, tokove iz i u izvore i ponore i tokove dobivene iz uskladištenja. Ove izračunate vrijednosti trebaju se usporediti s mjerenjima i procjenama napravljenim u sklopu konceptualizacije modela. Nerealne komponente bilance mase trebaju se analizirati da bi se kalibrirali parametri i uvjeti koji ih uzrokuju.

Greška bilance mase računa se tako da se razlika između ukupnog izračunatog ulaza i izlaza podijeli s ukupnim izračunatim ulazom ili izlazom. Ako je greška bilance mase u simulaciji oko 1% za većinu vremenskih perioda tada se rezultati modela mogu smatrati prihvatljivim (Anderson & Woessner, 2002). U radu autora Konikow (1978) navodi se da bi u idealnom slučaju greška bilance mase trebala biti manja od 0.1%.

Osim što služi kao provjera točnosti rješenja, bilanca mase može pomoći i u identificiranju pogrešaka u postavljanju modela. Nerazumno veliki tokovi u ili iz modela ukazuju na pogrešku kod zadavanja transmisivnosti. Rješenje s velikom pogreškom u bilanci mase ukazuje na pogrešku kod unošenja podataka, ili na pogrešno postavljen konceptualni model sustava.

5.3.7. Analiza osjetljivosti i nesigurnosti

Svrha analize osjetljivosti je kvantifikacija nesigurnosti kalibriranog modela koja je uzrokovana nesigurnošću u procjenama parametara vodonosnika, stresova i rubnih uvjeta. U sklopu analize osjetljivosti mijenjaju se kalibrirane vrijednosti parametara u unaprijed određenom realnom rasponu te se promatra učinak te promjene na rezultate modela. Uobičajeno je da se mijenja jedan po jedan parametar da bi se utvrdio njegov utjecaj na rezultate. Utjecaj promjene parametara ocjenjuje se uz pomoć istih statističkih metoda kao i kalibracija modela. Veličina promjene vrijednosti potencijala u odnosu na kalibrirani model je jedna od mjera osjetljivosti modela na taj određeni parametar. Što su rezultati modela osjetljiviji na promjenu nekog parametra, to je važnije znati kolika je nesigurnost tog parametra.

Nesigurnost rezultata modela proizlazi iz nesigurnosti parametara, konceptualnog modela, opažačkih podataka i nesigurnosti rubnih uvjeta (takozvana nesigurnost scenarija). Dostupnost hidrogeoloških podataka je uvijek ograničena, stoga je nesigurnost u parametre (hidraulička vodljivost, transmisivnost, uskladištenje) uzrokovana nerazumnom raspodjelom parametara, vremenskom i prostornom promjenjivošću parametara i utjecajem mjerila parametara (Wu & Zeng, 2013).

Pri izradi konceptualnog modela često se stvarni hidrogeološki uvjeti netočno pojednostavljuju, stoga je nesigurnost u strukturu modela pod utjecajem mnogih faktora, kao što je netočno definiranje vodonosnog sustava u prostoru, nerealna procjena uvjeta na granicama modela te aproksimacija procesa u podzemnoj vodi. U zadnjih desetak godina se sve više pažnje posvećuje analizi nesigurnosti konceptualnog modela pošto se pokazalo da je ova nesigurnost glavni izvor nesigurnosti u predviđanje modela (Bredehoeft, 2003; Bredehoeft, 2005; Harrar et al., 2003; Hojberg & Refsgaard, 2005; Neuman, 2003; Neuman & Wierenga 2003; Poeter & Anderson, 2005; Rojas et al., 2008, 2010; Troldborg et al., 2007; Ye et al., 2004). Razvijene su razne statističke i stohastičke metode, tako npr. Singh et al. (2010) uspoređuju četiri različite tehnike za procjenu nesigurnosti konceptualnog modela koje se temelje na Monte Carlo pristupu te na Bayesovom i Akaikeovom informacijskom kriteriju.

Opažački podaci (npr. razne podzemne vode) često se koriste i kao ulazni podaci za izradu modela i kao podaci za kalibraciju modela. Nesigurnost u te podatke je vrlo široka, a uključuje sistematske i nasumične pogreške koje nastaju u toku procesa mjerenja, sakupljanja, skladištenja i unošenja podataka. Nesigurnost opažačkih podataka se često podcjenjuje jer se ti podaci smatraju točnima.

U nesigurnost scenarija spadaju nesigurnosti vezane uz rubne uvjete, kao npr. nesigurnost u količinu napajanja ili dreniranja, odnosno u razne komponente vodne bilance.

Analiza nesigurnosti scenarija, koja uzima u obzir nepredvidive buduće okolnosti, omogućuje realniju i vjerojatno pouzdaniju procjenu nesigurnosti predviđanja modela (Rojas et al., 2010).

5.3.8. Verifikacija modela

Model je verificiran ako je testovima neovisnim o podacima korištenim za kalibraciju dokazano da se njegova točnost i sposobnost predviđanja nalazi unutar prihvatljivih granica pogreške (Konikow, 1978). Verifikacija se obično provodi na dodatnom neovisnom skupu podataka s terena u stacionarnom ili nestacionarnom stanju. Ako su parametri i rubni uvjeti kalibriranog modela dobro postavljeni tada će se rezultati modela dobro poklapati s novim skupom podataka s terena za nove rubne uvjete i stresove. Model se smatra verificiranim ako se izračunate razine dobro podudaraju s novim mjerenim razinama s terena. Ako je potrebno mijenjati parametre modela da bi se dobilo podudaranje izračunatih i mjerenih vrijednosti tada verifikacija modela postaje nova kalibracija te je potreban novi neovisni skup podataka da bi se model verificirao. Na žalost često se kod izrade modela podzemne vode ne raspolaže s dovoljno podataka te se model ne može verificirati. Predviđanja koja se dobivaju s kalibriranim, ali ne verificiranim modelom biti će nesigurnija od predviđanja dobivenih verificiranim modelom.

5.3.9. Predviđanje

Kada je model kalibriran i verificiran može se koristiti za predviđanje, što je osnovna svrha većine modela. U predviđanju se parametri određeni kalibracijom i verifikacijom koriste da bi se predvidio odgovor sustava na buduće događaje. Ako se predviđanje provodi za neke općenite svrhe tada je pristup stacionarnog stanja opravdan, u ostalim slučajevima poželjno je uključiti promjene u rubnim uvjetima i stresovima za vrijeme perioda predviđanja. Predviđanje u nestacionarnom stanju je važno za uspješno gospodarenje rezervama podzemnih voda jer omogućava preciznije projektiranje crpilišta i crpnih količina. Važna zadaća kod predviđanja je da se odredi duljina vremenskog perioda u kojem će model točno predviđati. Pouzdanost predviđanja ovisi o rezultatima kalibracije i analiza osjetljivosti te o verifikaciji. Faust et al. (1981) sugeriraju da duljina perioda predviđanja ne smije biti veća od dvaput od perioda kalibracije. Glavne nesigurnosti u predviđanju su nesigurnost u kalibrirani model i nesigurnost u buduće hidrološke stresove. Zato se i u predviđanju provode analize osjetljivosti da bi se testirao učinak nesigurnosti kalibriranih parametara te učinak različitih budućih scenarija.

5.3.10. Simulacija trasiranja čestica

Trasiranje čestica koristi se da bi se obilježile linije toka odnosno trajektorije, na način da se obilježava kretanje beskonačno malih zamišljenih čestica koje se postavljaju u polje toka. Kodovi za praćenje čestica su postprocesori modela toka, jer prihvaćaju raspodjelu razina modela toka, te ju koriste za računanje raspodjele brzina, koja se zatim koristi za praćenje čestica. Točnost dobivenih trajektorija ovisi o prostornoj diskterizaciji modela te o točnosti raspodjele razina koje se koriste. Jednadžbe trasiranja čestica izvedene su pod pretpostavkom da se sve čestice otopine kreću efektivnom brzinom toka podzemne vode. Da bi se u domeni modela toka izračunala efektivna brzina toka podzemne vode program koristi parametar efektivnu poroznost. Na osnovi rezultata modela toka i prostorne raspodjele efektivne poroznosti izračunava se raspodjela efektivnih brzina toka podzemne vode. Kako se čestice kreću kontinuirano kroz prostornu domenu, a brzine koje se računaju iz raspodjele razina poznate su samo u čvorovima elemenata, da bi se dobile brzine na lokacijama čestica potrebna je interpolacijska shema. Razni kodovi koji se upotrebljavaju za simuliranje trasiranja čestica razlikuju se po interpolacijskim shemama i metodama pomicanja čestica koje koriste.

MODPATH (Pollock, 1989, 1994) je programski kod za trodimenzionalno trasiranje čestica koji koristi razine dobivene MODFLOW programom. Ovaj kod koristi metode linearne interpolacije za računanje brzina i semianalitička rješenja za pomicanje čestica. Prva verzija programa bila je ograničena na stacionarne simulacije (Pollock, 1989), dok je u drugoj dodana podrška za nestacionarne simulacije (Pollock, 1994).

Analize trasiranja čestica trebaju se koristiti rutinski s modeliranjem toka da bi se otkrile konceptualne greške koje se ne mogu otkriti samo proučavanjem raspodjele razina. Postavljanjem čestica u svaku ćeliju na granicama modela može se dobiti slika polja toka, što pomaže u ocjenjivanju različitih rubnih uvjeta. Trasiranjem čestica mogu se odrediti i lokacije punjenja i pražnjenja sustava. Iako je kretanje zagađivala u podzemnoj vodi, osim o advekciji, ovisno i o disperziji i kemijskim reakcijama s okolinom, trasiranje čestica može pomoći u procjenjivanju putanja, točaka pražnjenja i prosječnog vremena putovanja zagađivala. Praćenje čestica unatrag od mjesta gdje je zagađivalo otkriveno može ukazati na izvor zagađenja. Kako disperzija nije uključena u kodove za praćenje čestica, ova metoda se ne može koristiti ako je potrebno odrediti vrijeme prvog nailaska zagađivala. Metoda trasiranja čestica može se koristiti i za određivanje priljevnih zona crpilišta na način da se čestice postave u zdence te se prate unatrag do mjesta njihovog izvora. Na ovaj način se mogu

odrediti i zaštitne zone crpilišta. Praćenjem čestica unatrag se također mogu odrediti i priljevne zone npr. jezera ili rijeke, te provjeriti ili nadopuniti rezultati izotopnih istraživanja (Pint et al., 2003).

6. KONCEPTUALNI MODEL CRPILIŠTA SIKIREVCI

6.1. Karakteristike i nedostatci prethodnih modela

Prvo modeliranje na istraživanom području napravljeno je 1985. godine (Miletić et al., 1985) za prvu lokaciju crpilišta, koje je bilo smješteno malo južnije od Gundinaca. U sklopu ovog rada napravljena je procjena eksploatacijskih zaliha ovog područja pomoću analitičkih i numeričkih matematičkih modela i zaključeno je da je na prostoru između Velike Kopanice i Babine Grede moguće crpiti 1000 l/s vode pomoću osam zdenaca, znači po zdencu 125 l/s uz pretpostavljeni razmještaj zdenaca praktički u liniji zapad-istok s minimalnom udaljenošću od 500 m između dva susjedna zdenca. Uz pretpostavku nestacionarnog toka u neograničenom vodonosnom sloju najveće simulirano sniženje u baraži zdenaca iznosilo je nakon 30 godina crpljenja 11.14 m. Slične vrijednosti dobivene su i uz pretpostavku nestacionarnog toka u sloju koji je na sjeveru ograničen nepropusnom granicom (po liniji prirodnog isklinjavanja šljunka), a na jugu granicom stalnog potencijala (rijeka Sava). Najveće sniženje iznosilo je 11.3 m. Uz pretpostavku istih graničnih uvjeta, ali stacionarnog stanja toka najveća sniženja su 3.88 odnosno 3.82 m. Obnavljanje podzemnih voda u uvjetima eksploatacije pretpostavlja se dotokom iz Save i podređeno infiltracijom oborinskih voda. U vrijeme izrade ovog modela nije bilo značajnijeg crpljenja kao ni mjerenja razina podzemne vode na ovom području. Današnja lokacija crpilišta se nalazi 4 km južnije te se rezultati modela ne mogu koristiti, ali se mogu koristiti podaci o geometriji vodonosnika i hidrogeološki parametri.

Novi model napravljen je 2000. godine (Bagarić, 2000) za novu lokaciju crpilišta, uz Jasinjski kanal, nešto južnije od prve lokacije. Autor nanovo procjenjuje eksploatacijske zalihe crpilišta na novoj lokaciji i zaključuje da je moguće crpiti 2000 l/s vode pomoću 16 zdenaca u nizu s međusobnim razmakom zdenaca od 200 m uz sniženja od 19 m. Nakon provedbe novih istraživanja 2004. godine model je dorađen te je u simulaciju uključena i sadašnja lokacija crpilišta u Sikirevcima s tri zdenca (HGI, 2005). U modelu je zanemareno obnavljanje podzemne vode infiltracijom oborina te se rijeka Sava smatra glavnim izvorom napajanja. Sjeverna i istočna granica modela simulirane su kao nepropusne, a rijeka Sava je simulirana kao granica stalnog potencijala. Na širem području crpilišta Gundinci - Sikirevci kontinuirano su se pratile razine podzemne vode u razdoblju od 1.7.2004. do 3.11.2005. godine na 17 piezometara. Ova mjerenja su poslužila za provjeru ponašanja matematičkog modela pri simuliranju prve varijante strujanja podzemne vode, odnosno za strujanje bez eksploatacije podzemne vode iz crpilišta uz promjenjive vodostaje rijeke Save. Postignuto je

relativno dobro slaganje mjerenih i računatih potencijala na cijelom području crpilišta Gundinci – Sikirevci (HGI, 2005). Napravljene su još tri varijante strujanja s crpljenjem na lokaciji Gundinci, Sikirevci i na obje lokacije istovremeno, uz minimalni vodostaj rijeke Save. U simulaciji crpljenja na obje lokacije, s ukupno 600 l/s, dobiveno je sniženje razina vode u iznosima od 3 do 5 m. U vrijeme izrade ovog modela također nije bilo značajnijeg crpljenja podzemne vode.

Gjetvaj et al. su 2011. godine u sklopu istraživanja međuutjecaja višenamjenskog kanala Dunav – Sava i crpilišta Sikirevci izradili trodimenzionalni numerički model toka podzemne vode. U modelu je zanemareno napajanje vodonosnika infiltracijom oborina te je krovina usvojena kao nepropusna. Na osnovi kalibracije zaključeno je da je dotok sa sjevera, zapada i istoka zanemariv te je usvojeno da nema protoka preko tih granica. Rijeka Sava smatra se dominantnim čimbenikom vodne bilance na ovom prostoru. Elementi modela južno od Save tretirani su kao neaktivni. Model je kalibriran na temelju podataka o razinama podzemne vode na piezometrima i vodostajima rijeke Save u razdoblju od godinu dana (od studenog 2004. do studenog 2005.) te je postignuto relativno dobro poklapanje mjerenih i izračunatih razina podzemne vode. Nakon toka su napravljene simulacije strujanja podzemne vode za isto razdoblje, ali u različitim uvjetima crpljenja (od 375 l/s na crpilištu Sikirevci, do ukupno 2000 l/s na crpilištima Gundinci i Sikirevci). Također je napravljena simulacija strujanja s izgrađenim kanalom Dunav – Sava te je zaključeno da sniženja uzrokovana izgradnjom kanala neće ugroziti izdašnost crpilišta.

U dosadašnjim modelima na istraživanom području rijeka Sava se smatrala glavnim izvorom napajanja vodonosnika, a zanemarivalo se obnavljanje podzemne vode infiltracijom oborina. Usporedbe mjerenih razina podzemne vode u proteklih šest godina i vodostaja rijeke Save odnosno analize krivulja trajanja (vidi poglavlje 6.2), pokazale su da do napajanja iz Save dolazi samo kod visokih vodostaja, a pri niskim i srednjim vodostajima Sava drenira podzemlje. Napajanje aluvijalnih vodonosnika sjeverne Hrvatske odvija se najvećim dijelom infiltracijom oborina kroz polupropusne krovinske naslage (Brkić, 1999) stoga se novim modelom istražila ova važna komponenta vodne bilance.

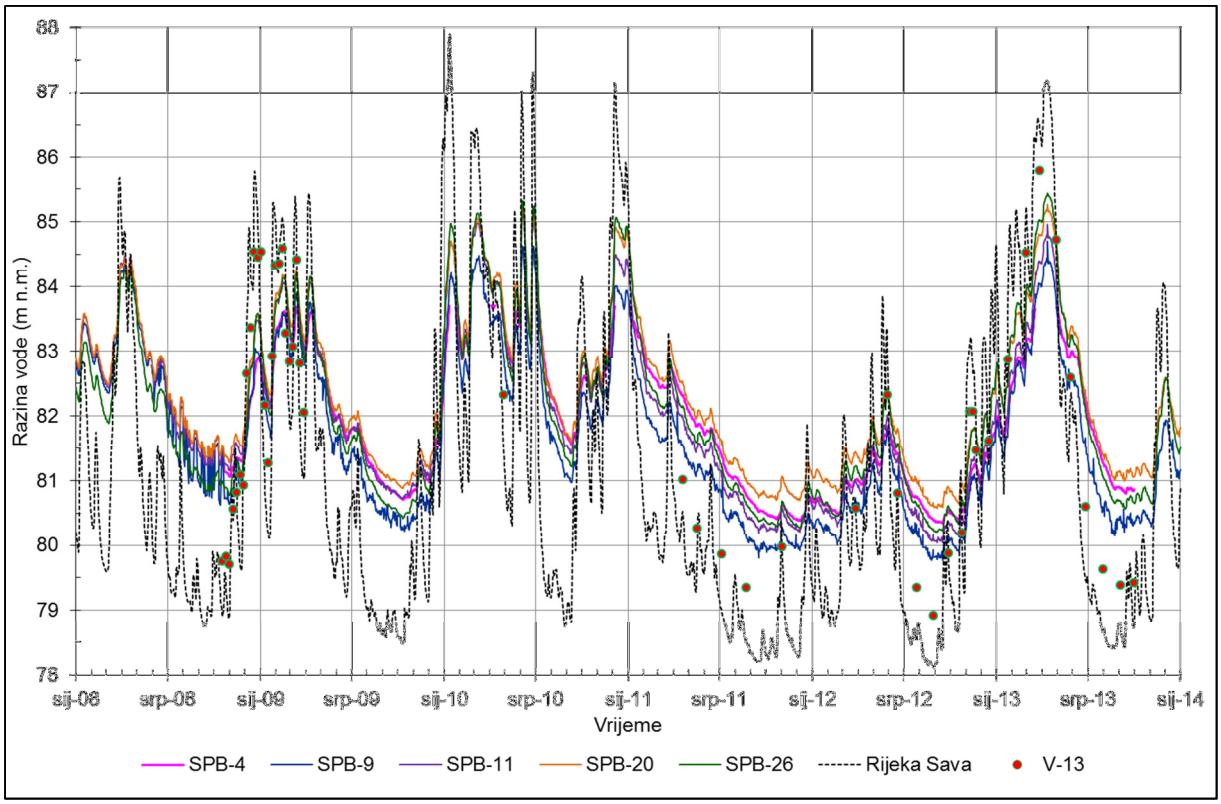
Niti jedan model do sada nije uzimao u obzir dotok vode s druge strane rijeke Save, već je Sava bila granica modeliranog područja. Novim modelom se istražila mogućnost dotoka ispod rijeke pod utjecajem dugotrajnog crpljenja velikih količina podzemne vode.

Svi dosadašnji modeli rađeni su prije početka eksploatacije podzemne vode na crpilištu. Crpilište je pušteno u pogon sredinom 2008. godine te se novi model kalibrirao za razdoblje od pet i pol godina rada crpilišta. Također se raspolagalo s podacima o razinama

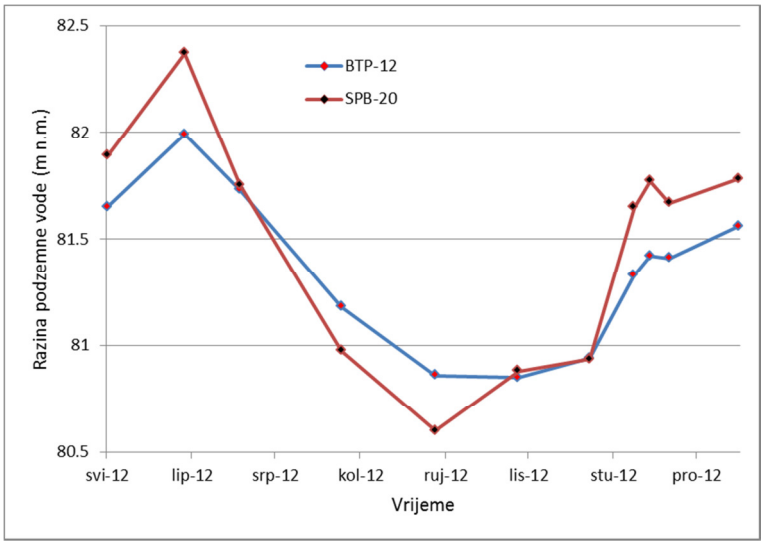
podzemne vode na širem području crpilišta u razdoblju od šest godina što je omogućilo bolju kalibraciju modela.

6.2. Rezultati motrenja dinamike podzemne vode i procesa napajanja/dreniranja vodonosnog sustava iz rijeke Save

Na slici 6.1 prikazane su razine podzemne vode na nekoliko odabranih piezometara i vodostaji rijeke Save u blizini crpilišta. Vodostaji rijeke Save preuzeti su od Državnog Hidrometeorološkog Zavoda za mjerne stanice u Slavonskom Brodu, Slavonskom Šamcu i Županji. Vrijednosti vodostaja su zatim linearno interpolirani da bi se dobile približne vrijednosti vodostaja u blizini crpilišta. Na dijagramu na slici 6.1 može se vidjeti da su razine podzemne vode iznad vodostaja Save veći dio godine dok su razdoblja kada su vodostaji Save iznad razina podzemne vode relativno kratka.



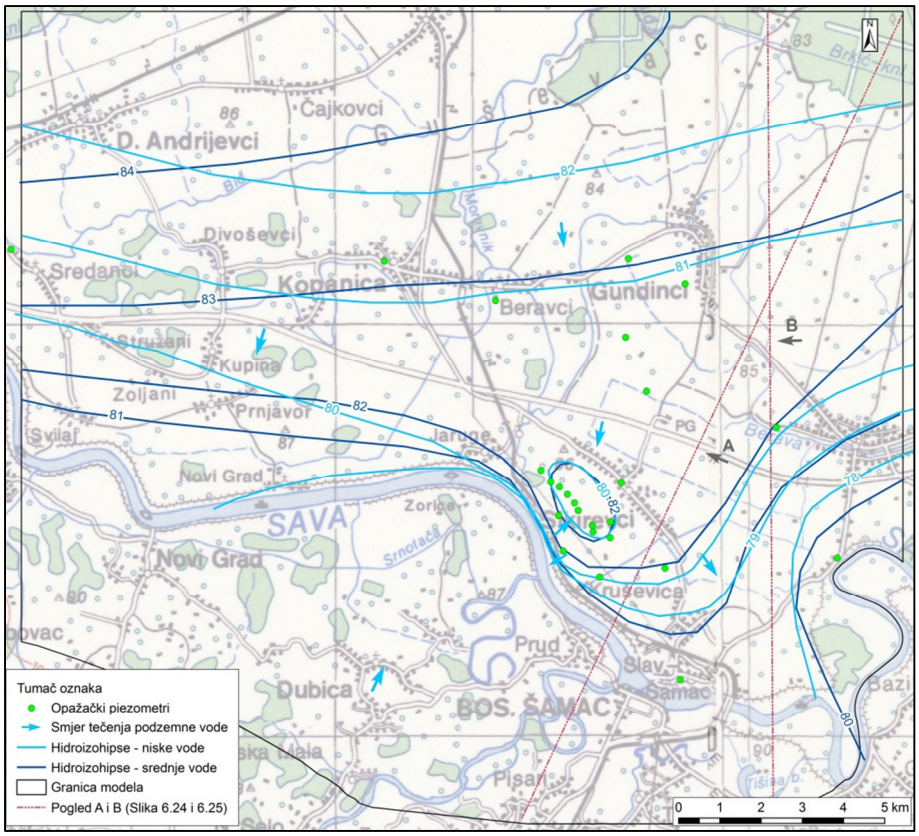
Slika 6.1 Razine podzemne vode na odabranim piezometrima i vodostaji rijeke Save



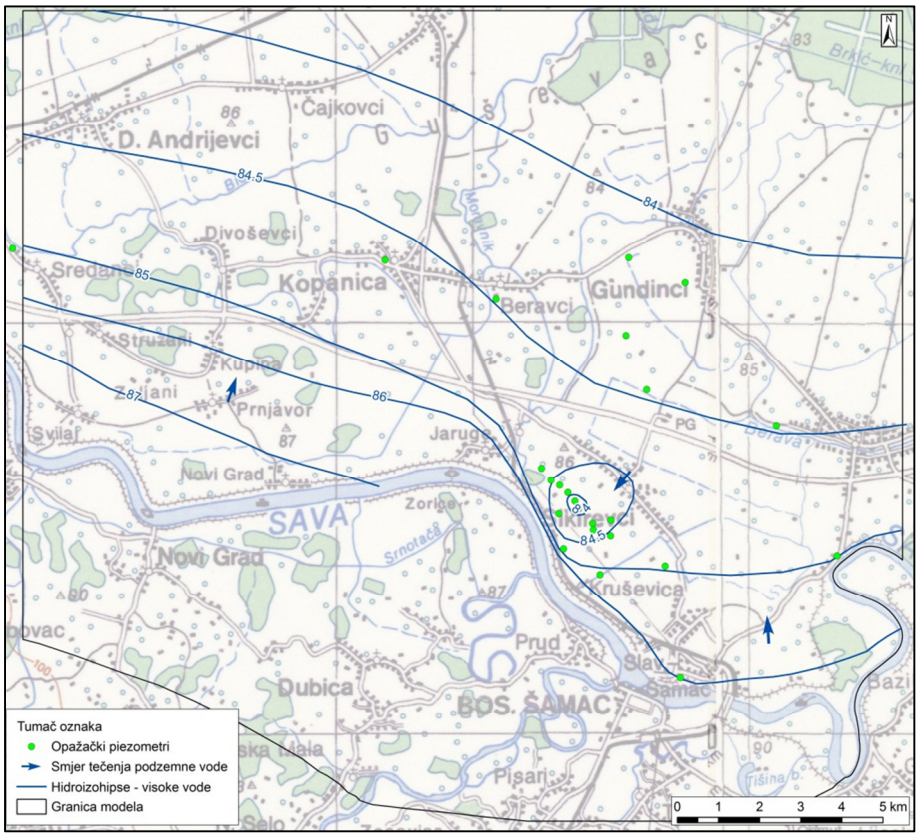
Slika 6.2 Usporedba razina podzemne vode u vodonosniku i krovinskim naslagama

Na slici 6.2 prikazane su razine podzemne vode izmjerene na piezometru BTP-12, koji je dubok 10 m te zahvaća sloj pijeska s prahom koji se nalazi unutar krovinskih naslaga vodonosnika. Također su, radi usporedbe, prikazane piezometarske razine na piezometru koji zahvaća vodonosnik, a nalazi se najbliže piezometru BTP-12. Iako je razdoblje prikazano na slici relativno kratko, jer je piezometar BTP-12 u međuvremenu uništen, može se vidjeti da su razine u vodonosniku iznad razina u krovinskim naslagama za vrijeme visokih voda, dok je za vrijeme niskih voda situacija obrnuta. Iz ovog odnosa može se zaključiti da se u razdoblju niskih voda odvija procjeđivanje vode iz krovinskih naslaga u vodonosnik.

Iz podataka o razinama podzemne vode na piezometrima i razinama rijeke Save nacrtane su karte hidroizohipsi za različite hidrološke uvjete te je određen generalni smjer toka podzemne vode. Na dijelu područja zahvaćenog modelom koje se nalazi na teritoriju Republike Bosne i Hercegovine postoje podaci o razinama podzemne vode samo na crpilištu u Bosanskom Šamcu. Stoga je generalni smjer toka na tom području usvojen s Hidrogeološke karte SFR Jugoslavije 1:500 000 (1980). Na slici 6.3 (a i b) prikazane su karte hidroizohipsi za niske, srednje i visoke vode. Na kartama se može vidjeti da kod visokih voda Sava napaja podzemlje, a u uvjetima srednjih i niskih voda ga drenira. Također se ističe da se u uvjetima srednjih i niskih voda između crpilišta i rijeke Save formira lokalna razvodnica uslijed crpljenja podzemne vode (Brkić & Briški, 2013a). Ona je smještena razmjerno blizu rijeke Save pa je za očekivati da će s povećanjem crpne količine postupno nestati te da će se i tijekom ovakvih hidroloških uvjeta ostvarivati napajanje iz Save što su pokazali rezultati do sada provedenih matematičkih modeliranja strujanja podzemne vode (Miletić et al., 1985; Bagarić, 2000; HGI, 2005, 2008; Gjetvaj et al. 2011).



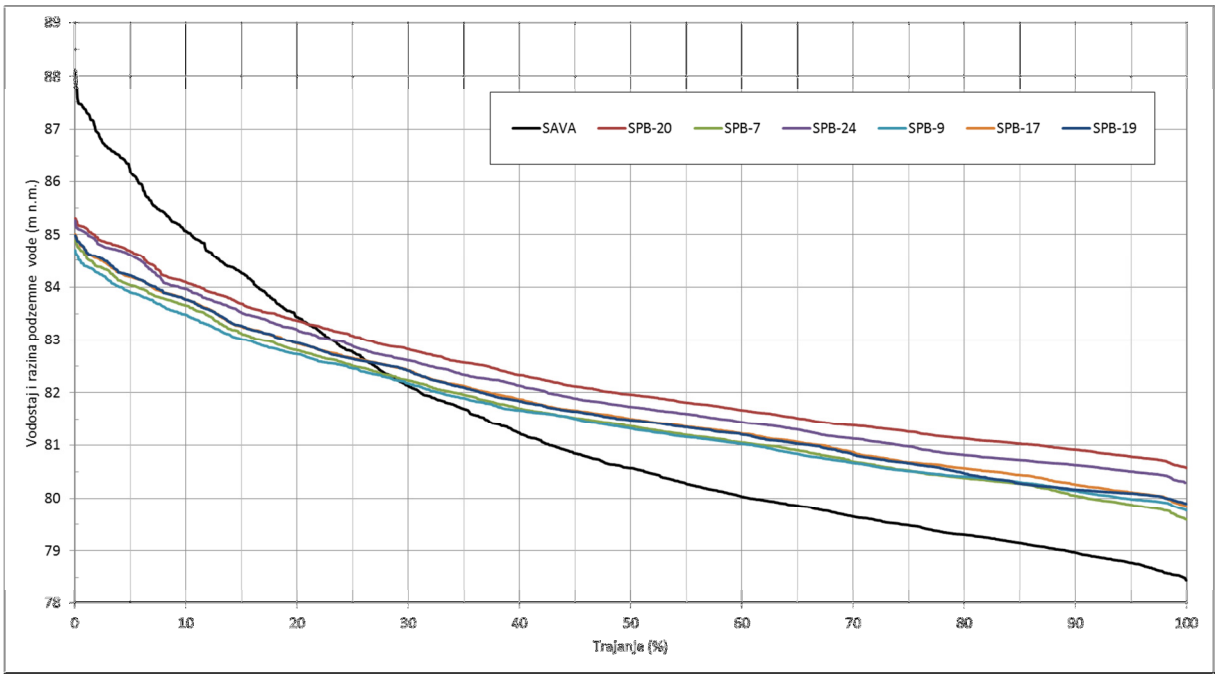
a)



b)

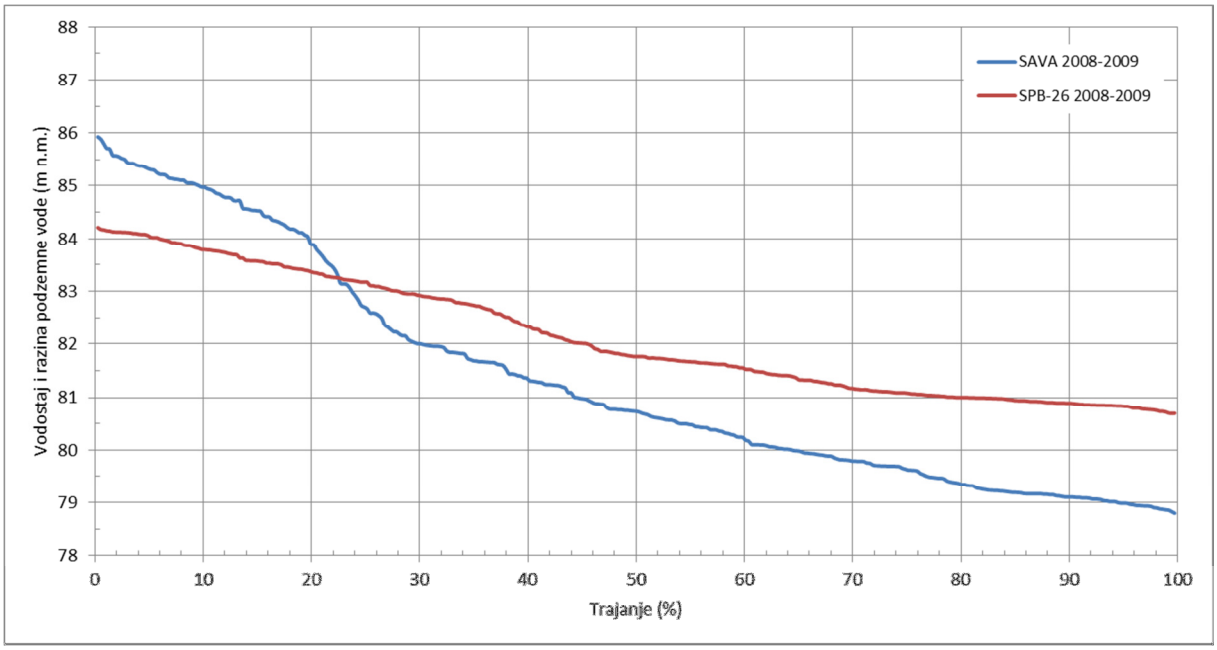
Slika 6.3 Karte hidroizohipsi za srednje (26.06.2013.) i niske (29.08.2012.) (a) i visoke (27.03.2013.) (b) vode

Odnos vodostaja rijeke Save i razina podzemne vode analiziran je i kroz krivulje trajanja. Za izradu krivulja trajanja korišten je Microsoft Excel program za automatsko računanje krivulja trajanja (Posavec et al., 2010). Na slici 6.4 prikazane su krivulje trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode u piezometrima na crpilištu u razdoblju od lipnja 2008. do prosinca 2013. godine. Iz ovog odnosa može se vidjeti da je vodostaj Save oko 20% vremena iznad razine podzemne vode na piezometru SPB-20 koji se nalazi zapadno od crpnih zdenaca, dok je na piezometru SPB-9 koji se nalazi uz zdenac vodostaj oko 30% vremena iznad razine podzemne vode. Ovakav odnos slaže se s kartama hidroizohipsi.

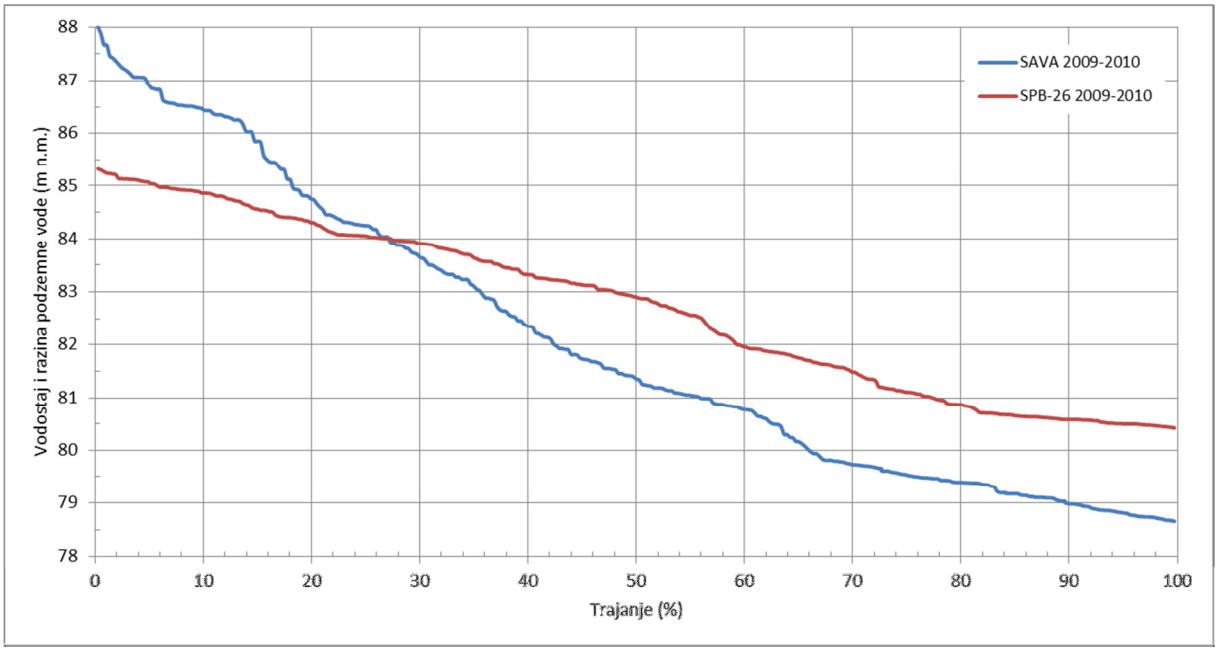


Slika 6.4 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometrima na crpilištu za razdoblje lipanj 2008. - prosinac 2013.

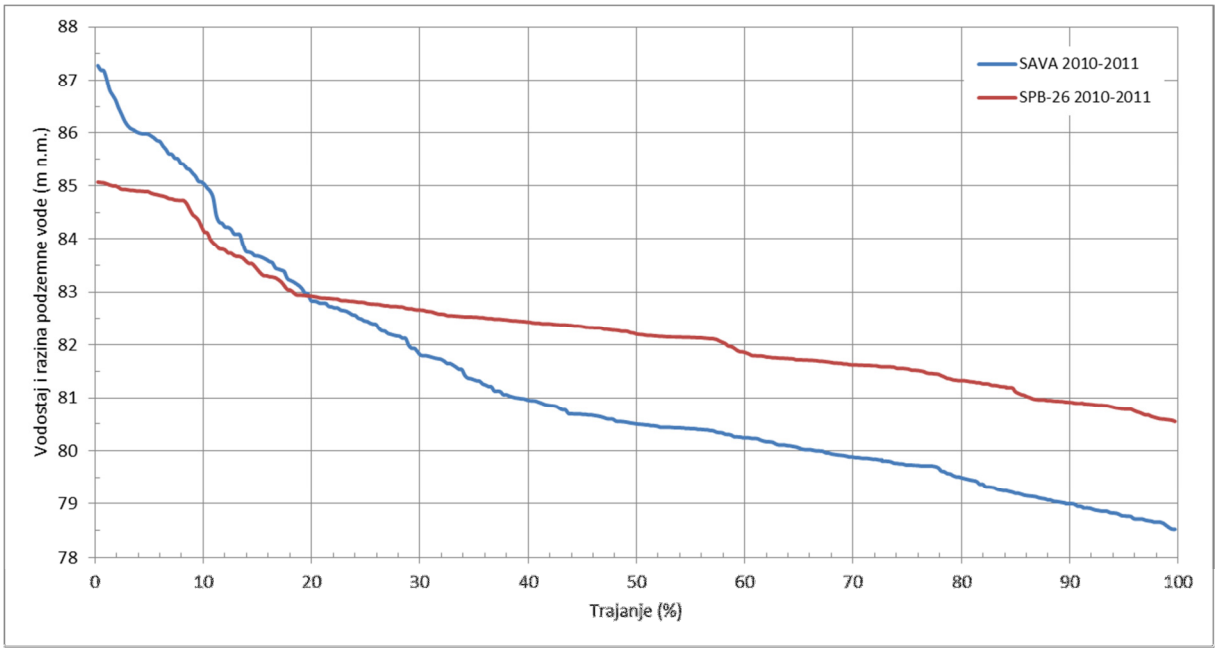
Na slikama od 6.5 do 6.9 prikazane su krivulje trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode u piezometru SPB-26, za svaku hidrološku godinu posebno, u razdoblju od rujna 2008 do rujna 2013. godine. U prve tri godine (slika 6.5, 6.6 i 6.7) vodostaj Save je bio iznad razine podzemne vode oko 20 do 30% vremena. Velika razlika može se vidjeti na slici 6.8 koja prikazuje sušnu hidrološku godinu 2011-2012. U ovoj godini je vodostaj Save samo 10% vremena bio iznad razine podzemne vode. Suprotno tome naredna godina (2012-2013) bila je izrazito kišna, te je u njoj vodostaj bio iznad razine podzemne vode i do 50% vremena (slika 6.9). Ovi odnosi pokazuju da se u sušnim razdobljima odvija pražnjenje podzemnih voda u rijeku Savu, dok za vrijeme izrazito vlažnih razdoblja rijeka Sava napaja podzemlje.



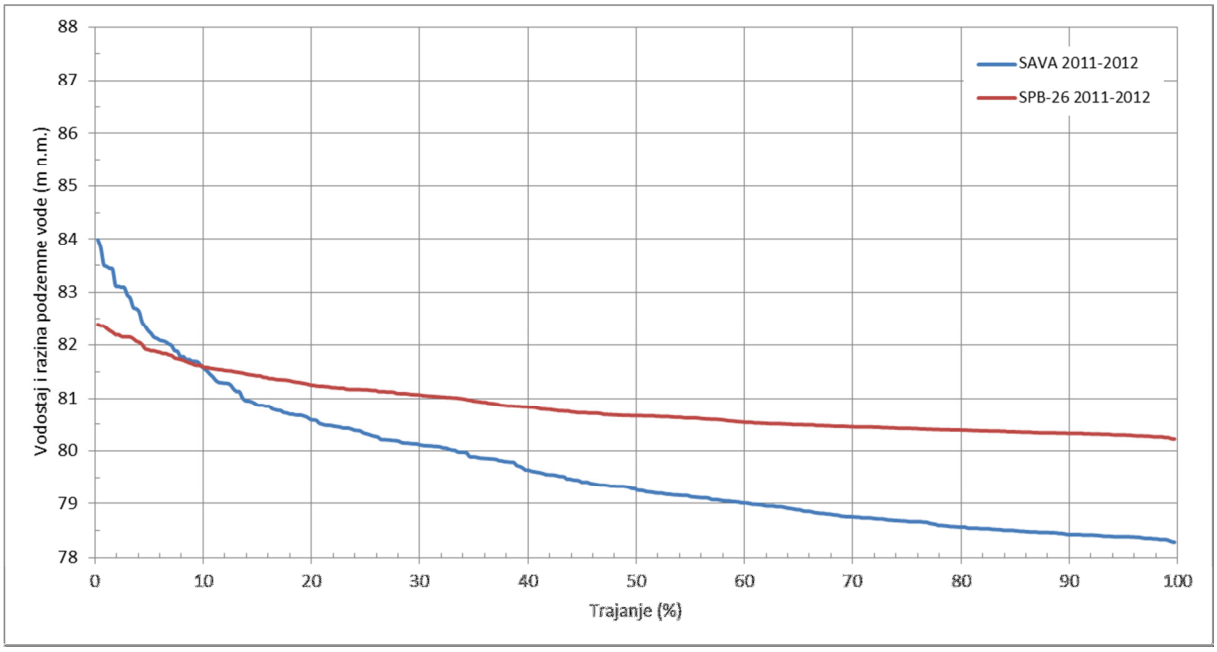
Slika 6.5 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2008-2009



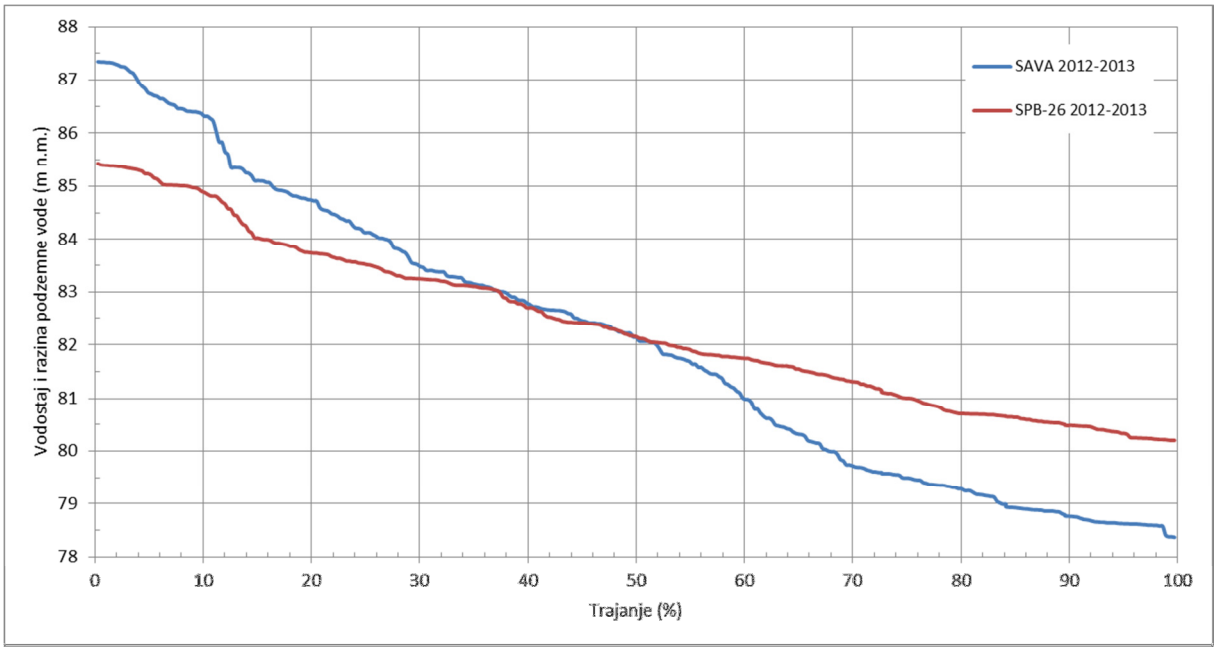
Slika 6.6 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2009-2010



Slika 6.7 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2010-2011



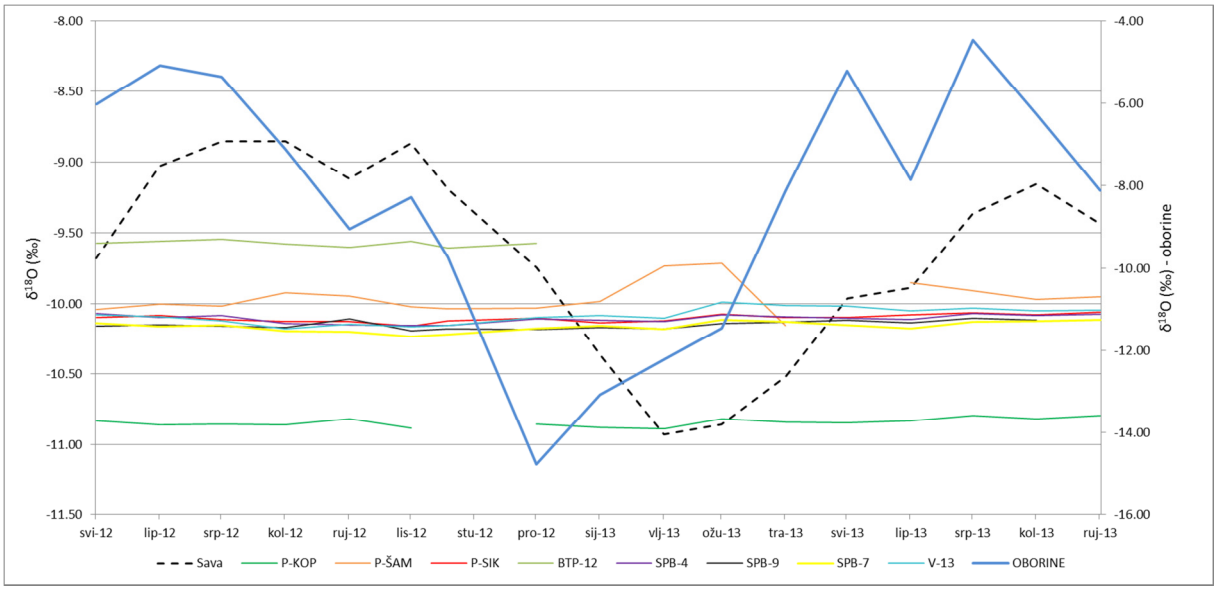
Slika 6.8 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2011-2012



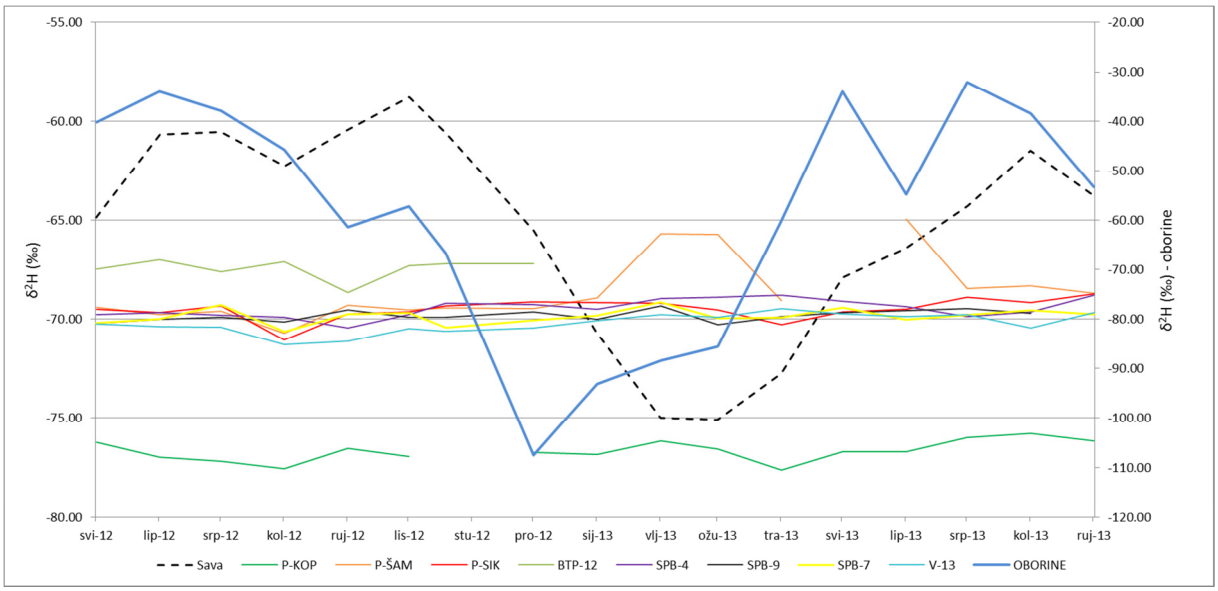
Slika 6.9 Krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode na piezometru SPB-26 za hidrološku godinu 2012-2013

6.3. Rezultati izotopnih i hidrokemijskih istraživanja napajanja vodonosnog sustava iz oborina i rijeke Save

U poglavlju 5.1.2. opisan je način uzimanja uzoraka, a na slici 5.1 dan je prikaz lokacija na kojima su uzimani uzorci podzemne vode i rijeke Save. Iz rezultata analiza stabilnih izotopa prikazanih na slikama 6.10 i 6.11 može se vidjeti da je sadržaj $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ u oborinama najniži u zimskim mjesecima, a najviši u ljetnim. Vrijednosti u oborinama prikazane su na zasebnoj osi u dijagramima jer imaju puno veće fluktuacije od ostalih uzoraka. Sadržaj u rijeci Savi slično je raspoređen kroz godinu, samo najviše vrijednosti kasne oko dva mjeseca za najvišim vrijednostima u oborinama. Utjecaj sezonskih varijacija izotopnog sastava u oborinama i rijeci Savi u velikoj mjeri je prigušen u većini uzoraka podzemne vode. Jedino se na uzorcima iz bušotine P-ŠAM može zamijetiti blago obogaćenje u periodu od veljače do travnja 2013. godine. Uzorci iz plitke bušotine BTP-12 pokazuju najviše vrijednosti $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$, dok su uzorci iz P-KOP izrazito osiromašeni u odnosu na uzorke iz ostalih bušotina.

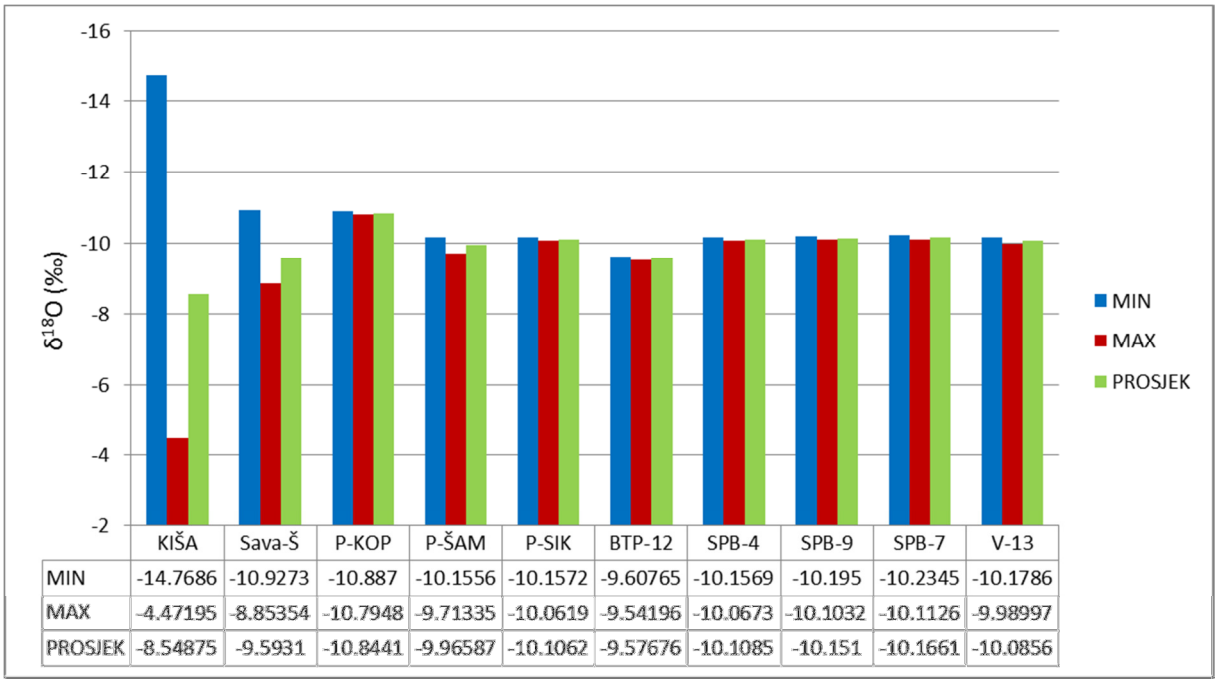


Slika 6.10 Raspodjela vrijednosti $\delta^{18}O$ u vremenu



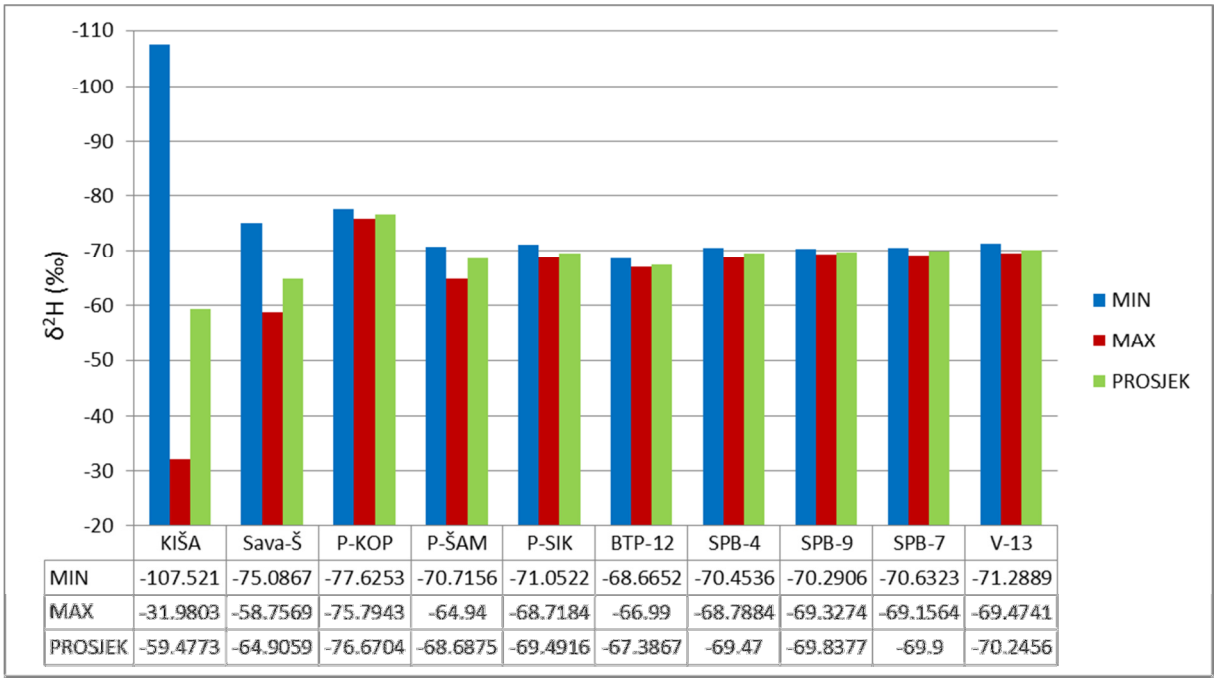
Slika 6.11 Raspodjela vrijednosti $\delta^{2}H$ u vremenu

Na slikama 6.12 i 6.13 prikazane su minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti sadržaja $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ u svim prikupljenim uzorcima. Najviše vrijednosti $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ zabilježene su u oborinskim vodama, nakon kojih slijedi rijeka Sava. Ista je situacija i s najnižim vrijednostima $\delta^{18}O$, dok su najniže vrijednosti $\delta^{2}H$ zabilježene u oborinskim vodama i u bušotini P-KOP, a tek iza slijede uzorci iz rijeke Save. Kada se izračuna prosječni izotopni sastav oborina u razdoblju od rujna do travnja dobivaju se vrijednosti koje odgovaraju prosječnom izotopnom sastavu uzoraka iz bušotine P-KOP. Ovo se može uzeti kao pokazatelj da se podzemna voda u bušotini P-KOP dominantno napaja jesensko-zimsko-proljetnim oborinama.



	KIŠA	Sava-Š	P-KOP	P-ŠAM	P-SIK	BTP-12	SPB-4	SPB-9	SPB-7	V-13
MIN	-14.7686	-10.9273	-10.887	-10.1556	-10.1572	-9.60765	-10.1569	-10.195	-10.2345	-10.1786
MAX	-4.47195	-8.85354	-10.7948	-9.71335	-10.0619	-9.54196	-10.0673	-10.1032	-10.1126	-9.98997
PROSJEK	-8.54875	-9.5931	-10.8441	-9.96587	-10.1062	-9.57676	-10.1085	-10.151	-10.1661	-10.0856

Slika 6.12 Minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti $\delta^{18}O$ svih prikupljenih uzoraka

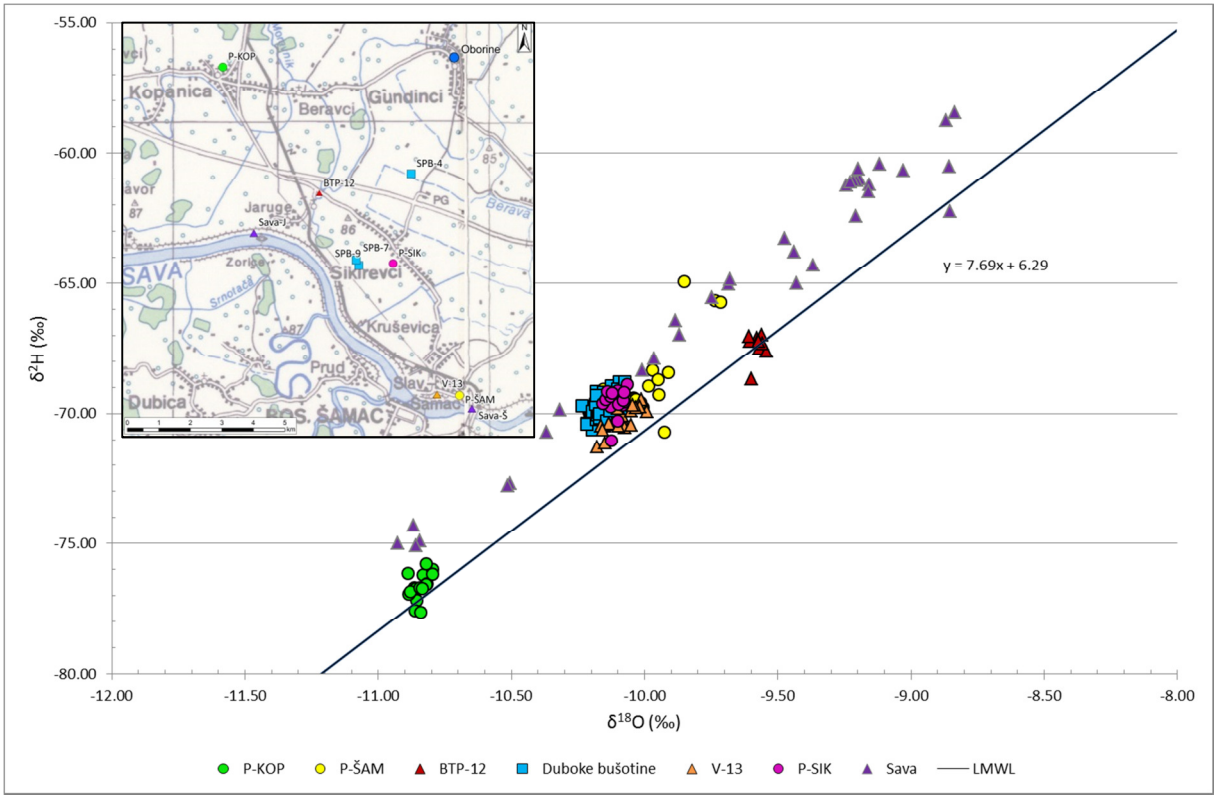


	KIŠA	Sava-Š	P-KOP	P-ŠAM	P-SIK	BTP-12	SPB-4	SPB-9	SPB-7	V-13
MIN	-107.521	-75.0867	-77.6253	-70.7156	-71.0522	-68.6652	-70.4536	-70.2906	-70.6323	-71.2889
MAX	-31.9803	-58.7569	-75.7943	-64.94	-68.7184	-66.99	-68.7884	-69.3274	-69.1564	-69.4741
PROSJEK	-59.4773	-64.9059	-76.6704	-68.6875	-69.4916	-67.3867	-69.47	-69.8377	-69.9	-70.2456

Slika 6.13 Minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti $\delta^{2}H$ svih prikupljenih uzoraka

Na slici 6.14 prikazan je odnos sadržaja $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ u svim prikupljenim uzorcima podzemne vode i rijeke Save, te lokalna linija oborinske vode (LMWL). Također je prikazana karta s lokacijama prikupljenih uzoraka. Lokalna linija meteorske vode opisana je jednadžbom pravca: $\delta^{2}H = 7.69\ \delta^{18}O + 6.29$, s korelacijskim faktorom 0.98. Vrijednosti $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ uzoraka iz rijeke Save nalaze se iznad LMWL, što se može objasniti činjenicom da se zona izviranja rijeke Save nalazi daleko uzvodno od područja istraživanja te je pod utjecajem

drugačije klime. Desne pritoke rijeke Save koje pridonose najvećim količinama vode u rijeku također su pod utjecajem drugačije klime. I na ovom dijagramu se ističu uzorci iz bušotine P-KOP kao najviše osiromašeni stabilnim izotopima kisika i vodika. Uzorci iz dubokih bušotina (SPB-4, SPB-7 i SPB-9), V-13 i plitke bušotine P-SIK smještene su malo iznad LMWL. Oni pokazuju vrlo blago osiromašenje teškim izotopima u odnosu na prosječni sastav oborina. Uzorci iz plitke bušotine P-ŠAM, smještene blizu rijeke Save, najviše variraju te su nekad slični uzorcima iz rijeke, a nekad oborinama. Iz toga se može zaključiti da voda iz rijeke ima utjecaj na podzemnu vodu u blizini rijeke. Uzorci iz plitke bušotine BTP-12 su u odnosu na ostale uzorke obogaćeni stabilnim izotopima, ali ovi uzorci su uzimani samo osam mjeseci (svibanj – prosinac 2012), što je vrlo kratko razdoblje i ne uključuje cijelu hidrološku godinu. Stoga se na temelju njih ne mogu donositi sigurni zaključci.

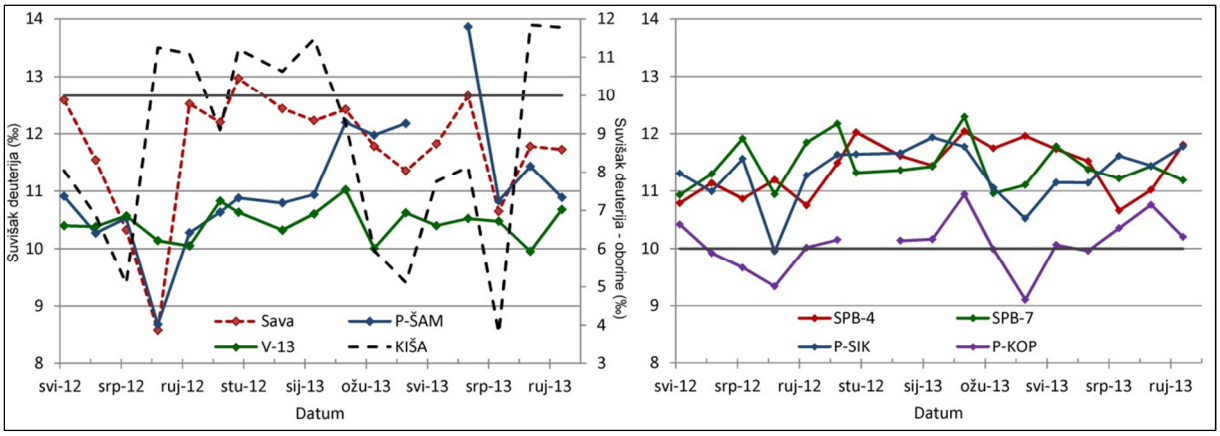


Slika 6.14 Sadržaja $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ u uzorcima podzemne vode i rijeke Save i lokalna linija meteorske vode

Na slici 6.15 prikazan je suvišak deuterija (engl. d-excess) izračunat prema jednadžbi (Dansgaard, 1964): $d = \delta^{2}H - 8\,\delta^{18}O$

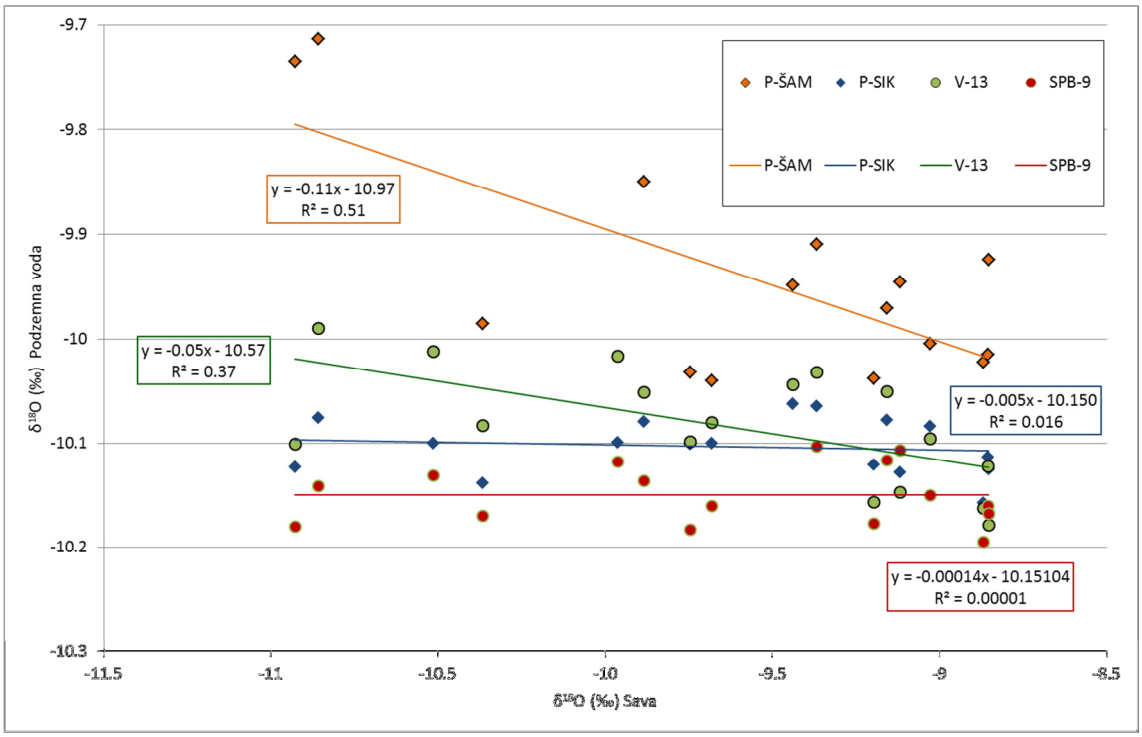
Također je označena linija od 10 ‰ koja označava prosječan suvišak deuterija u globalnoj liniji meteorske vode. Oborine u prosjeku imaju smanjen suvišak deuterija u odnosu na globalne oborine, s tim da je ljeti suvišak izrazito smanjen, dok je zimi malo iznad globalnog prosjeka. Suvišak u rijeci Savi je veći nego u oborinama, te je veći dio godine iznad globalnog

prosjeka. Uzorci iz plitke bušotine u Slavonskom Šamcu (P-ŠAM) dosta dobro prate kolebanje u rijeci Savi, dok uzorci iz dublje bušotine (V-13) imaju puno manju amplitudu kolebanja, i cijelo vrijeme se nalaze iznad globalnog prosjeka. U plitkoj bušotini P-KOP suvišak deuterija kreće se od 9 do 11 ‰, a u P-SIK od 10 do 12 ‰. U dubokim bušotinama SPB-7 i SPB-4 suvišak se kreće od 11 do 12 ‰, te su u njima sezonske promjene skoro u potpunosti prigušene.



Slika 6.15 Raspodjela suviška deuterija u vremenu u podzemnoj vodi, rijeci Savi i oborinama

Na slici 6.16 prikazan je odnos sadržaja $\delta^{18}O$ u rijeci Savi prema sadržaju u podzemnoj vodi. Između rijeke Save i bušotina P-ŠAM i V-13 postoji srednje jaka korelacija, dok ne postoji korelacija između SPB-9 i P-SIK i rijeke Save.

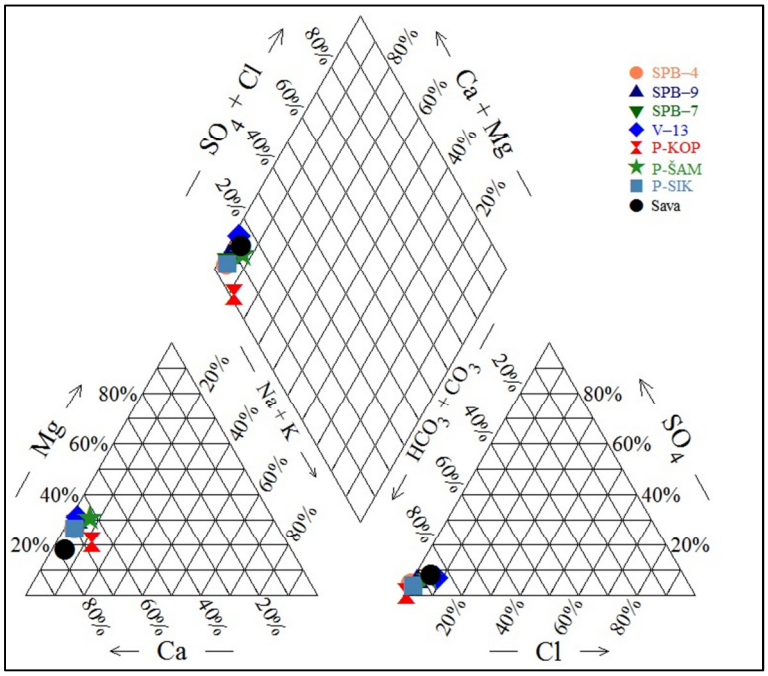


Slika 6.16 Odnos između $\delta^{18}O$ u rijeci Savi i u podzemnoj vodi

Provedene analize sadržaja stabilnih izotopa kisika i vodika u podzemnim vodama, rijeci Savi i oborinskim vodama ukazuju da se podzemna voda dominantno napaja infiltracijom oborinskih voda, dok se utjecaj rijeke Save zapaža samo na području blizu rijeke. Suvišak deuterija koji se primjećuje na uzorcima iz dubokih bušotina mogao bi biti posljedica dotoka podzemne vode iz dubljih slojeva koji se nalaze ispod zahvaćenog vodonosnika. Ali zbog nemogućnosti uzimanja uzoraka podzemne vode iz dubljih slojeva ta se pretpostavka ne može provjeriti.

Osim analiza sadržaja stabilnih izotopa, na sedam uzoraka je napravljena i analiza sadržaja tricija. Uzorci su uzeti u travnju 2013. godine za vrijeme razdoblja visokih voda koje je trajalo od studenog 2012. Izmjerene vrijednosti tricija iznosile su <0.5 TU na bušotinama SPB-7, SPB-9, P-SIK i P-KOP. Ove vrijednosti ukazuju na vodu stariju od 1952. godine, te na dugo vrijeme zadržavanja. Koncentracija u rijeci Savi iznosila je 5.2 TU, u bušotini V-13 4.9 TU, a u bušotini P-ŠAM 6.3 TU. Ove vrijednosti ukazuju na modernu vodu staru 5 do 10 godina, što potvrđuje interakciju riječne vode s podzemnom vodom u zaleđu.

Prema osnovnom ionskom sastavu uzorkovane vode pripadaju CaMg-HCO_3 tipu voda (slika 6.17).



Slika 6.17 Piperov dijagram analiziranih uzoraka podzemne vode i rijeke Save

U tablici 6.1 prikazani su analizirani fizikalno-kemijski pokazatelji podzemnih i površinskih voda. Vrijednosti elektrolitičke vodljivosti (EC) podzemnih voda varirale su od 329 do 762 µS/cm. Najveće vrijednosti su registrirane u plitkoj bušotini P-ŠAM koja zahvaća pjeskovito-prahoviti, mjestimice šljunkoviti sloj u krovini vodonosnika. Vrijednosti u

piezometru V-13 u njegovoj blizini koji zahvaća šljunkovito-pjeskoviti vodonosnik, te u plitkoj bušotini u Velikoj Kopanici (P-KOP) su nešto niže. Najniže vrijednosti zabilježene su u piezometrima SPB-4, SPB-7 i SPB-9, a slične su bile i u rijeci Savi samo s većim fluktuacijama. Vrijednost elektrolitičke vodljivosti ovisi o količini otopljenih tvari u vodi. Što je veća količina otopljenih tvari u vodi to je njezina vrijednost veća. Temperature podzemne vode kretale su se od 10.7 do 15.5°C, a temperature vode u rijeci Savi od 3.9 do 27.7°C. Vrijednosti pH podzemnih voda kretale su se od 7.1 do 8.1, što ove vode svrstava u blago alkalne. U riječnoj vodi se pH kretao od 6.7 do 8.2. Najveći sadržaj otopljenog kisika, 21.1 mg/L izmjeren je u riječnoj vodi, dok je sadržaj u podzemnoj vodi bio niži te se kretao između 1 i 7 mg/L u dubokim bušotinama. U plitkim bušotinama se sadržaj otopljenog kisika kretao od 1 do 13 mg/L.

	SPB-4			SPB-9			SPB-7			V-13			P-KOP			P-ŠAM			P-SIK			Sava		
	min	**max**	**sred.**	**min**	**max**	**sred.**	**min**	**max**	**sred.**	**min**	**max**	**sred.**	**min**	**max**	**sred.**	**min**	**max**	**sred.**	**min**	**max**	**sred.**	**min**	**max**	**sred.**
EC	329	370	362	350	382	367	350	370	365	515	598	552	522	531	526	488	762	645	393	406	402	338	546	430
pH	7.3	8.1	7.7	7.2	7.8	7.6	7.1	8.0	7.6	7.3	7.8	7.5	7.1	7.6	7.4	7.2	7.7	7.4	7.3	7.8	7.6	7.5	8.2	7.9
T (°C)	12.2	15.2	13.8	11.9	14.6	13.6	11.9	14.9	13.5	10.7	15.5	13.6	11.7	14.1	13.1	11.3	14.5	13.2	10.9	14.1	13.2	3.9	27.7	16.0
O_2 (mg/L)	1.1	3.1	1.9	2.1	4.2	3.3	1.7	4.8	3.2	1.1	6.3	3.7	1.2	7.1	2.6	1.3	7.1	4.2	1.0	6.6	2.8	3.8	21.1	9.6
HCO_3^- (mg/L)	228	319	282	217	310	278	226	305	278	278	483	350	316	487	369	273	483	363	253	349	293	208	312	263
Ca^{2+} (mg/L)	63.9	77.6	67.9	61.0	72.8	66.7	60.3	73.3	66.8	77.6	122.1	94.8	70.1	112.8	85.5	74.4	117.0	92.9	68.7	94.5	74.1	70.5	91.3	81.6
Mg^{2+} (mg/L)	12.9	17.8	15.5	14.8	20.1	17.1	14.2	20.7	17.3	17.5	31.8	25.6	11.6	28.2	16.4	14.1	33.3	25.6	13.8	18.2	16.3	8.0	15.5	11.3
Na^+ (mg/L)	0.7	5.9	3.5	0.6	4.3	2.8	0.4	5.8	2.9	0.7	4.3	2.7	1.8	23.1	15.9	2.2	22.1	7.3	1.5	5.6	3.5	2.2	20.5	6.7
K^+ (mg/L)	0.6	0.9	0.8	0.7	1.1	0.9	0.7	1.4	0.8	0.9	1.7	1.1	0.9	19.6	2.5	1.1	16.3	9.1	0.8	42.8	3.2	0.9	1.8	1.4
Cl^- (mg/L)	0.7	2.1	1.2	2.5	5.2	3.7	2.1	4.7	3.2	10.3	34.1	19.3	0.7	9.4	2.9	6.3	27.6	15.2	1.8	3.6	2.7	3.9	44.9	17.0
SO_4^{2-} (mg/L)	4.4	13.7	9.7	7.6	15.7	11.9	7.6	15.7	11.6	10.9	28.1	19.5	0.0	4.3	1.0	16.6	35.8	23.4	6.2	11.6	8.8	8.5	29.0	19.7
NO_3^- (mg/L)	0.1	1.6	0.6	1.9	5.6	2.9	0.3	5.2	2.3	4.7	15.3	8.5	0.2	2.4	1.1	7.1	38.2	21.5	0.1	1.5	0.5	1.9	11.7	5.3
NH_4^+ (mg/L)	<0.01	0.48	0.27	<0.01	0.10	0.02	<0.01	0.10	0.02	<0.01	0.11	0.04	<0.01	6.50	1.39	<0.01	0.08	0.03	<0.01	2.90	0.71	<0.01	0.22	0.08

Tablica 6.1 Fizikalno-kemijske karakteristike analiziranih voda

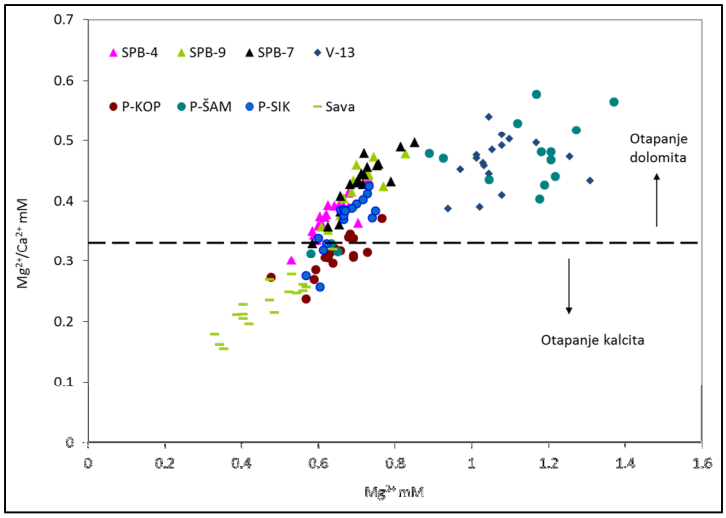
Najveće koncentracije natrija i kalija izmjerene su u bušotini P-KOP, a malo niže od njih bile su u bušotini P-ŠAM. U ostalim uzorcima su ove koncentracije bile znatno niže i manje promjenjive u vremenu. Koncentracije kalcija bile su najviše u plitkim bušotinama P-ŠAM i P-KOP, te u bušotini V-13, a u rijeci Savi i bušotini P-SIK bile su nešto niže. Najviše koncentracije magnezija izmjerene su u bušotinama V-13 i P-ŠAM, u Savi su izmjerene najniže, dok su se u ostalim uzorcima koncentracije kretale između ovih dviju vrijednosti. Koncentracije amonijaka varirale su od <0.01 do 6.5 mg/L, a najviše su izmjerene u bušotini P-KOP. Koncentracije nitrata varirale su od 0.1 do 38.2 mg/L. Najviše koncentracije su izmjerene u bušotini P-ŠAM, a u bušotini V-13, kao i u rijeci Savi su bile blago povišene u odnosu na ostale bušotine. Koncentracije sulfata kretale su se od <1 do 35.8 mg/L, najviše koncentracije izmjerene su na bušotinama P-ŠAM i V-13 te u rijeci Savi. U bušotini P-KOP su ove koncentracije bile vrlo niske u odnosu na ostale uzorke. Koncentracije klorida su se kretale od 5 do 40 mg/L u rijeci Savi i bušotinama P-ŠAM i V-13, dok su u ostalim uzorcima bile znatno niže, od 0.5 do 5 mg/L. Najniže koncentracije klorida izmjerene su na bušotini SPB-4. Povišeni sadržaj klorida, sulfata i nitrata u rijeci Savi i bušotinama P-ŠAM i V-13 ukazuje na njihovu dobru međusobnu povezanost. Najviše koncentracije bikarbonata izmjerene su u bušotinama P-KOP, P-ŠAM i V-13, dok su se u ostalim uzorcima kretale oko relativno sličnih vrijednosti.

Za osnovna obilježja kakvoće podzemnih voda posebno su važni uvjeti nastanka naslaga pošto su se tijekom geološke prošlosti prostorno i vremenski izmjenjivale kopnene i zavodnjene sredine taloženja. U zavodnjenim sredinama razvijala su se močvarišta pa su prevladavali reduktivni uvjeti taloženja. U ovakvim sredinama postoje uvjeti za otapanje željeza, pa takve vode sadrže povišeni sadržaj otopljenog željeza, mangana, fosilnog amonijaka i pratećih sastojaka. U kopnenim i isušenim područjima ostvareni su oksidativni uvjeti, zbog čega nije dolazilo do otapanja željeza i pojave pratećih sastojaka ili je nastupala djelomična ili potpuna oksidacija i njihovo taloženje. Sadržaj željeza, mangana i arsena u podzemnoj vodi na području južno od Sikirevaca u svim opažanim piezometrima koji zahvaćaju vodonosnik (SPB-7, SPB-9, V-13) je ispod maksimalno dozvoljenih granica u vodi za piće. Na lokaciji piezometra SPB-4, smještenog sjevernije od pokusno-eksploatacijskih zdenaca, uz razmjerno visoke koncentracije željeza (do 970 ppb), zabilježen je i povećan sadržaj mangana (do 117 ppb) i arsena (do 82 ppb). Kako se povećava koncentracija željeza u podzemnoj vodi iz vodonosnika od juga prema sjeveru, isto se zapaža i u podzemnoj vodi iz plitkih zdenaca, odnosno u podzemnoj vodi iz krovinskog sloja. Na bušotinama P-SIK i P-KOP sadržaj željeza dosezao je i do 2500 ppb, a mangana do 116 ppb. Visoke koncentracije

željeza, mangana i arsena u analiziranim vodama su prirodnog podrijetla i vezane su za reduktivne uvjete u vodonosniku. Kolike će njihove koncentracije biti i da li će se istovremeno pojaviti u visokim koncentracijama ovisi o Eh-pH uvjetima (stabilnost mineralnih i kemijskih vrsta u pogledu aktivnosti vodikovih iona (pH) i djelovanja elektrona (EH)).

Kemijske karakteristike podzemnih voda na istraživanom području kontrolirane su prirodnim geokemijskim procesima. U plitkom dijelu vodonosnog sustava zapaža se i utjecaj ljudske aktivnosti na kemijske karakteristike podzemnih voda. Istraživanja mineralnog sastava naslaga na području istraživanja (Mutić, 1993) pokazala su da se čestice šljunka, pijeska i praha uglavnom sastoje od silikatnih i karbonatnih minerala. Također je zapaženo da u plitkom dijelu naslaga prevladava sadržaj kalcita, dok s dubinom raste sadržaj dolomita. Kalcij i magnezij u podzemnim vodama stoga mogu nastati trošenjem siliktnih i karbonatnih minerala. Natrij i kalij mogu dospjeti u podzemnu vodi inkongruentnim otapanjem silikatnih minerala, ili zbog ljudske aktivnosti. Bikarbonati mogu dospjeti u podzemnu vodu otapanjem karbonata, trošenjem silikata, oksidacijom organske tvari ili biogenim otapanjem ugljikovog dioksida (Garrels, 1967).

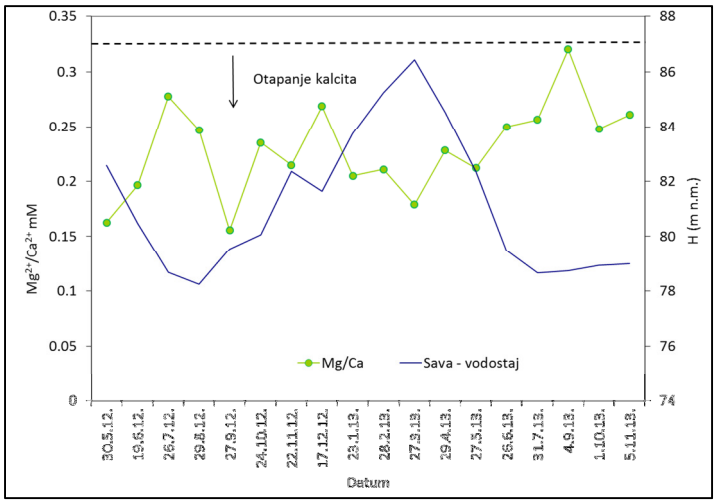
Otapanje karbonata je dominantni proces koji pridonosi nakupljanju iona (kalcij, magnezij, bikarbonati) u podzemnoj vodi istraživanog vodonosnog sustava. Proces otapanja kalcita dominantan je na uzorcima bušotine P-KOP, dok je na ostalim bušotinama dominantan proces otapanja dolomita (slika 6.18).



Slika 6.18 Molarni omjer Mg^{2+}/Ca^{2+} naspram Mg^{2+}

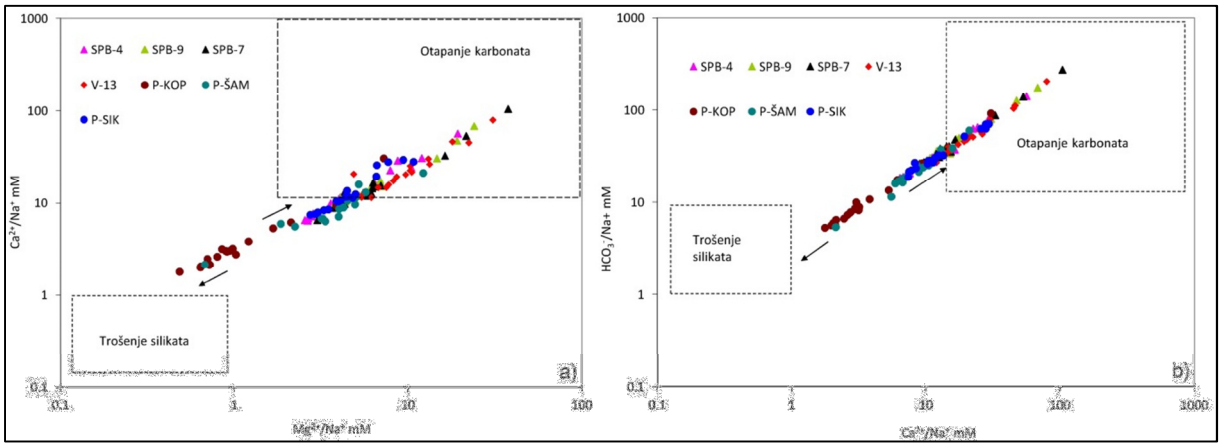
Za vrijeme visokih voda u rijeci Savi molarni omjer magnezijevog i kalcijevog iona ukazuje na otapanje kalcita. Za vrijeme niskih voda ovaj omjer se povećava, što ukazuje na

utjecaj otapanja dolomita (slika 6.19). Ovaj proces se može tumačiti kao utjecaj podzemnih voda na riječnu vodu za vrijeme perioda niskih voda.



Slika 6.19 Odnos između molarnog omjera Mg^{2+}/Ca^{2+} i vodostaja rijeke Save

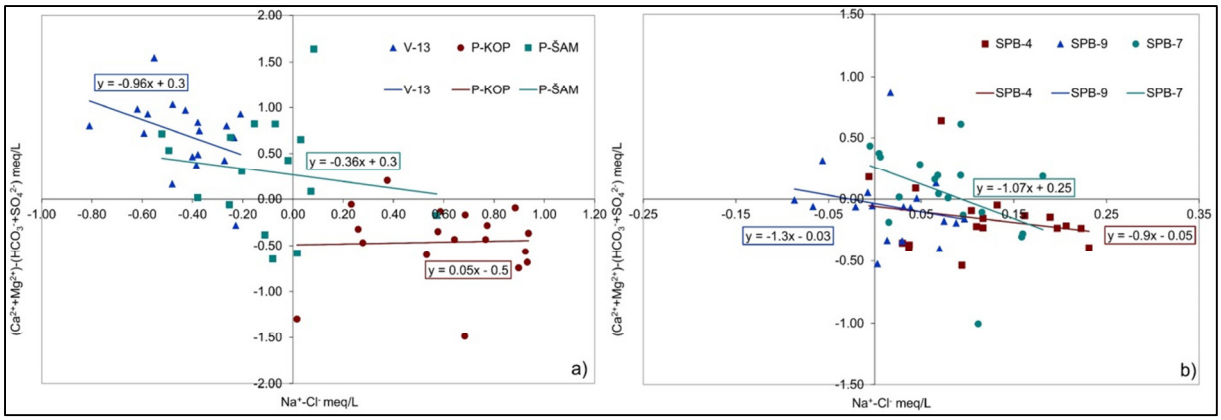
Utjecaj otapanja silikata na sastav podzemne vode analiziran je uz pomoć bivarijatnog dijagrama miješanja: Na^{+}-normalizirani Ca^{2+}, naspram Na^{+}-normalizirani Mg^{2+} i HCO_3^{-} (slika 6.20a i b). Analiza je pokazala da je dominantni proces karbonatno otapanje, a trošenje silikata prisutno je u maloj mjeri na uzorcima iz bušotine P-KOP, te je tek naznačeno na uzorcima iz SPB-4, P-SIK i P-ŠAM.



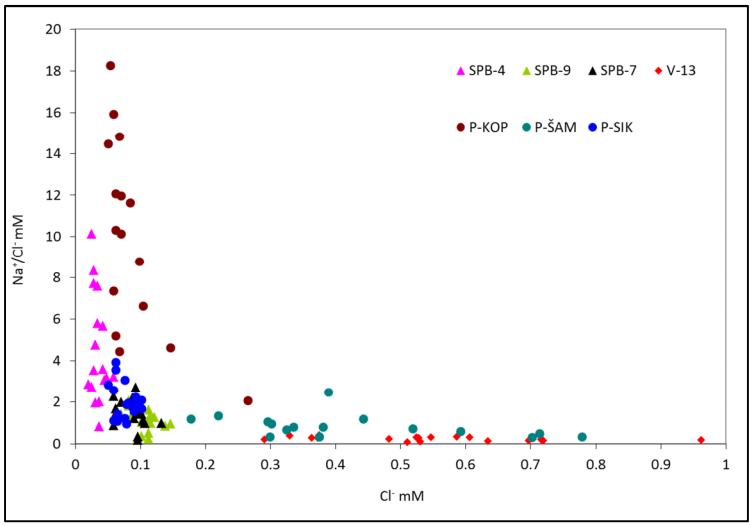
Slika 6.20 Bivarijatni dijagram mijašanja Na^{+}-normalizirani Ca^{2+} naspram a) Na^{+}-normalizirani Mg^{2+}; (b) Na^{+}-normallizirani HCO_3^{-}

Osim otapanja karbonata i trošenja silikata, proces kationske zamjene također može doprinijeti povećanju otopljenih tvari u podzemnoj vodi. Utjecaj kationske zamjene ocijenjen je uz pomoć ekvivalentnog bivarijatnog dijagrama ispravljenih dvovalentnih kationa naspram ispravljenog natrija. Koncentracije iona ispravljaju se da bi se izuzeli ioni koji dospijevaju u otopinu drugim procesima osim kationske zamjene. Kod aktivnog procesa kationske zamjene

nagib ovog dijagrama kreće se oko -1 (y = -x). Nagib pravca za uzorke vode iz bušotine P-KOP ukazuje da ovdje nije prisutan proces kationske zamjene (slika 6.21a), dok uzorci bušotine V-13 pokazuju nagib blizu -1, što znači da je ovdje prisutan proces kationske zamjene. Proces kationske zamjene na bušotinama SPB-4, SPB-7 i SPB-9 (slika 6.21b) potaknut je relativno dugim vremenom zadržavanja, dok je na bušotinama P-ŠAM i V-13 pod utjecajem otpadnih voda s površine i vode iz rijeke Save. Ovaj utjecaj vidi se na slici 6.22, gdje se uzorci V-13 i P-ŠAM odvajaju od ostalih zbog visokog sadržaja klorida.



Slika 6.21 Bivarijatni dijagram (Ca^{2+} i Mg^{2+}) minus (HCO_3^- i SO_4^{2-}) naspram Na^+ minus Cl^-: a) P-KOP, P-ŠAM, V-13; b) SPB-4, SPB-7, SPB-9



Slika 6.22 Bivarijatni dijagram Na^+-normalizirani Cl^- naspram Cl^-

Na temelju provedenih fizikalno-kemijskih analiza uzoraka podzemnih voda i rijeke Save može se zaključiti da su u promatranom vodonosnom sustavu brzine toka razmjerno niske, što uzrokuje dugo zadržavanje vode u podzemlju. Mineralno trošenje odvija se u zoni napajanja, a procesi kationske zamjene odvijaju se na području bliže rijeci Savi.

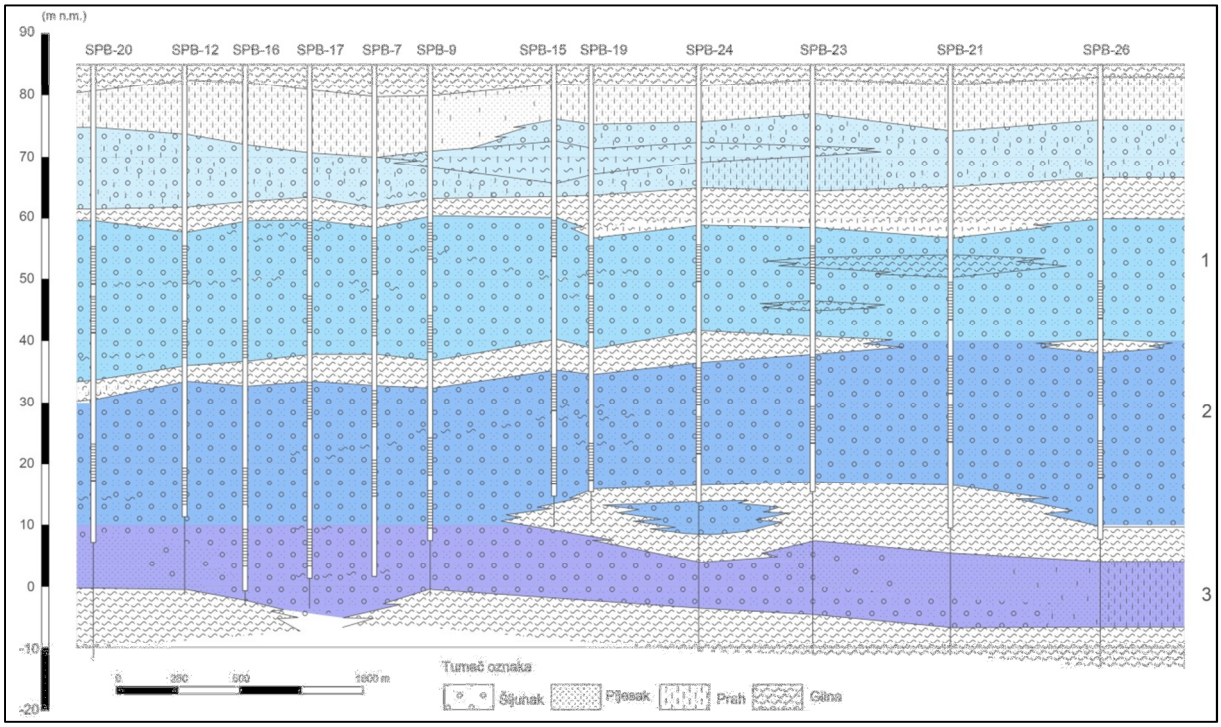
6.4. Konceptualni model zahvaćenog vodonosnog sustava

Za izradu konceptualnog hidrogeološkog modela na širem području crpilišta Sikirevci korišteni su svi dostupni podaci: istražna bušenja, pokusna crpljenja, vodostaj rijeke Save, razine podzemne vode u piezometrima te rezultati izotopnih i hidrokemijskih istraživanja. Definirane su granice modela, geometrija vodonosnog sustava, hidrogeološki parametri vodonosnika te sustav toka podzemne vode (Briški et al., 2013). Konceptualnim modelom je obuhvaćen vodonosni sustav do dubine od oko 80 m, koji se u literaturi često navodi kao vodonosni sloj *Velika Kopanica* (vidi poglavlje 3.3).

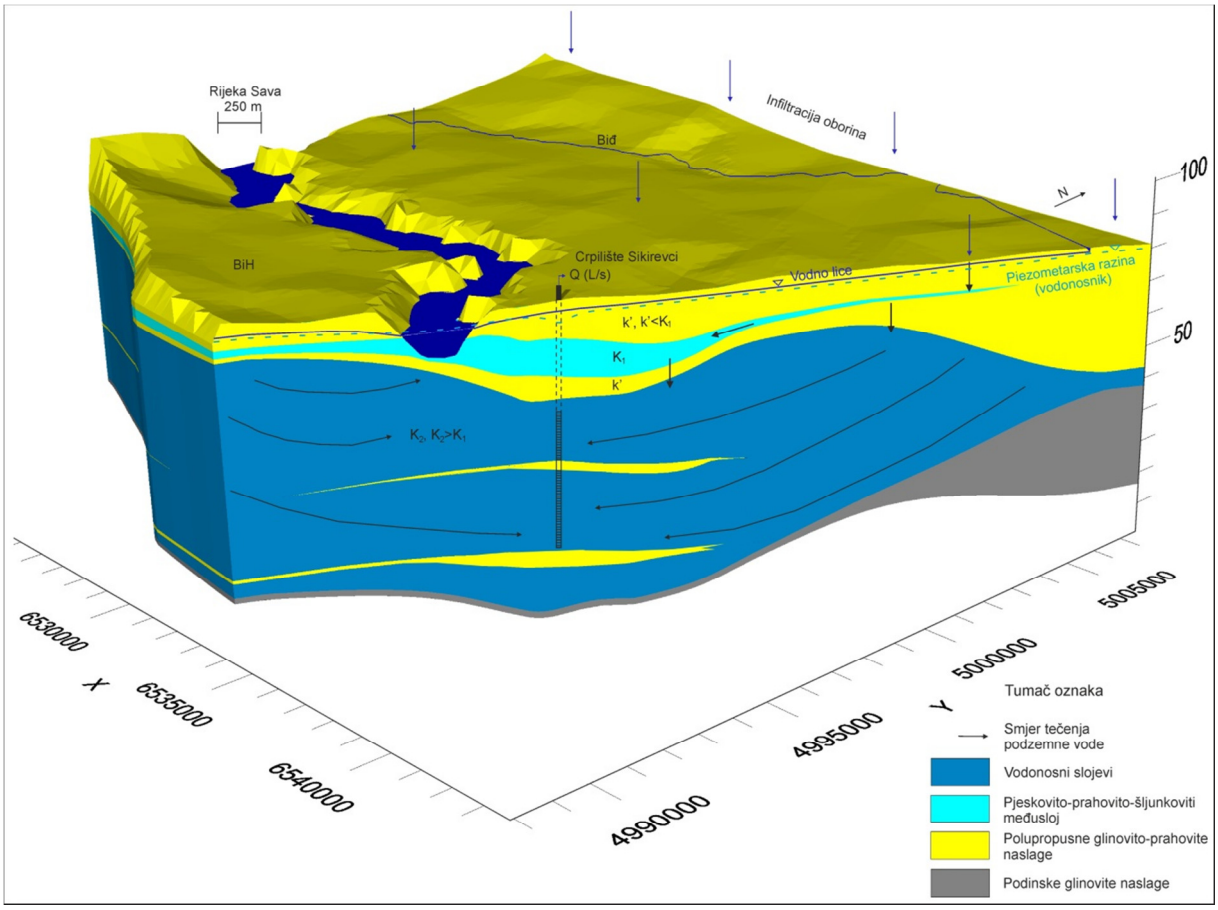
Geometrija vodonosnog sustava definirana je na temelju podataka istražnih bušenja. Litološka građa ovog prostora je vrlo promjenjiva i u lateralnom i u vertikalnom profilu što uzrokuje promjenjive hidrogeološke karakteristike. Krovinu vodonosnika tvore naslage gline, pijeska i praha u različitim omjerima. Debljina krovinskih naslaga iznad zahvaćenog vodonosnika varira od 5 m na pojedinim dijelovima uz rijeku Savu do 25 m na području crpilišta. Na širem području crpilišta, od Save do Gundinaca, se unutar krovinskih naslaga nalazi šljunkovito-pjeskoviti sloj sa znatnim primjesama praha i mjestimice gline. Debljine je od 5 do 10 m te predstavlja izvorni sloj preko kojega se odvija infiltracija oborina i napajanje niže zahvaćenog vodonosnika. U sklopu terenskih istraživanja provodilo se uzorkovanje podzemne vode iz ovog sloja na piezometru (BTP-12). Tokom crpljenja podzemne vode iz piezometra dobivena je voda puna pijeska i praha što potvrđuje sastav ovog sloja. Vodonosni sustav može se podijeliti na tri šljunkovito-pjeskovita sloja koji su djelomično odvojeni slojevima tvrde plastične gline debljine 3 do 7 m. Ukupna debljina vodonosnih naslaga iznosi oko 60 m na širem području crpilišta, a prema rubovima modela debljina se smanjuje. Na sjeveroistočnom rubu modela vodonosnik isklinjava. Podinu vodonosnika čine naslage gline na prosječnoj dubini od 82 m. Hidrogeološke značajke naslaga na desnoj obali rijeke Save u Bosni i Hercegovini su slične značajkama na lijevoj obali rijeke. Debljina šljunkovito-pjeskovitih naslaga iznosi 50 do 100 m (IPSA Institut, 2007). Na slici 6.23 prikazan je profil naslaga na području crpilišta, a na slikama 6.24 i 6.25 3D model vodonosnika koji je napravljen u programu Visual MODFLOW Flex 2012.2. Prikazani model obuhvaća naslage do dubine od oko 80 m (sloj *Velika Kopanica*).

Prikazani hidrogeološki model bilo je potrebno pojednostaviti da bi se mogao prevesti u numerički model. Razlog tome je što za mnoge slojeve ne postoje podaci o hidrogeološkim parametrima kao ni o razinama podzemne vode. Piezometri u kojima se mjerila razina podzemne vode zahvaćaju gotovo sve šljunkovito-pjeskovite slojeve unutar vodonosnog

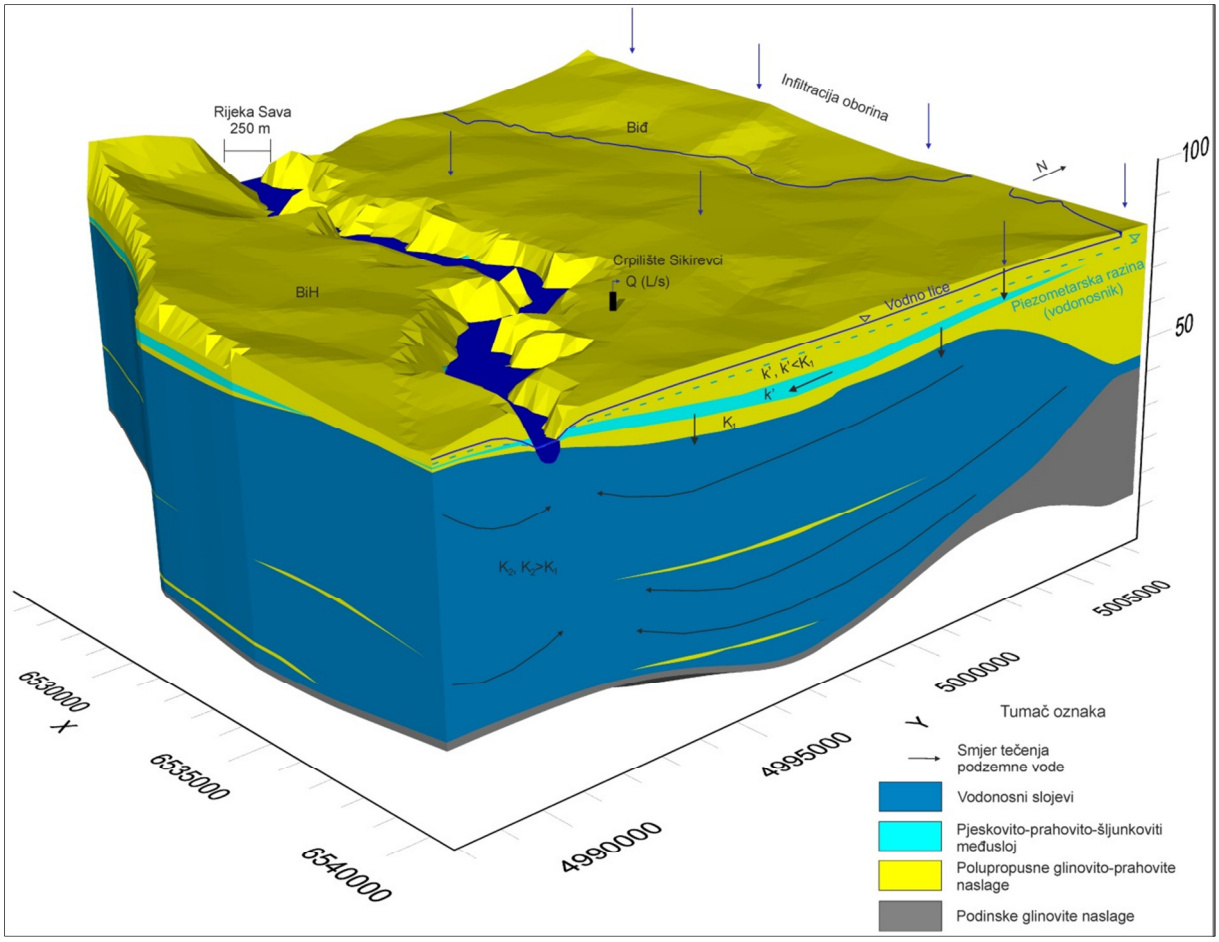
sustava te u njima izmjerene razine odgovaraju osrednjenim razinama u vodonosniku. Pojednostavljeni model je u hidrogeološkom smislu definiran kao dvoslojna sredina. Ukupne krovinske naslage predstavljene su jednom hidrogeološkom sredinom, a vodonosne naslage drugom hidrogeološkom sredinom. Ovaj pristup je opravdan jer se na temelju do sada prikupljenih hidrogeoloških podataka na širem području crpilišta utvrdilo da je cijeli vodonosni sustav vertikalno povezan, a slabo propusni ili nepropusni slojevi nisu kontinuirani pa se strujanje može simulirati kao jednoslojno i pored značajne nehomogenosti sloja (HGI, 2005).



Slika 6.23 Profil naslaga pružanja Z-I na području crpilišta Sikirevci (pružanje profila označeno je na slici 5.1)



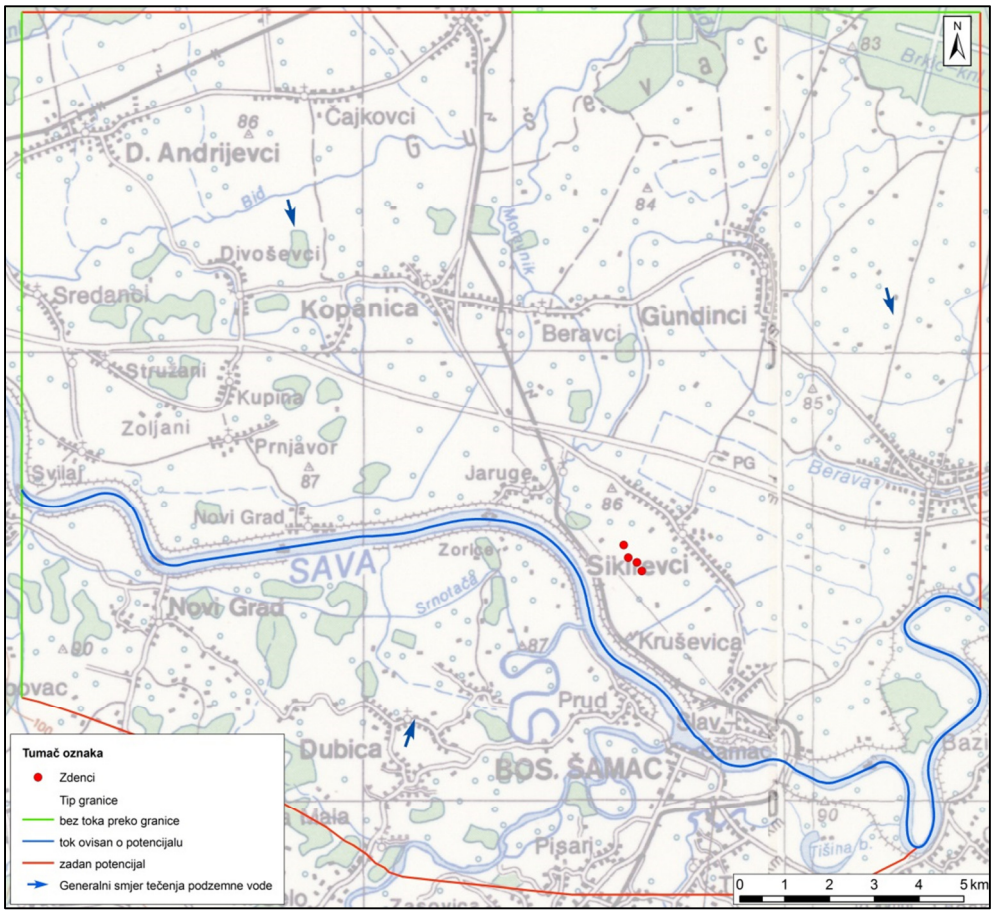
Slika 6.24 3D konceptualni model vodonosnika – pogled A sa slike 6.3a



Slika 6.25 3D konceptualni model vodonosnika – pogled B sa slike 6.3a

Kod postavljanja vanjskih granica modela utvrđeno je da se samo na sjeveroistočnoj strani može postaviti fizička granica jer tu vodonosnik isklinjava, što pokazuje litološki profil strukturne bušotine V-35 smještene istočno od Vrpolja. Ostale granice postavit će se kao hidrauličke granice te one moraju biti na dovoljnoj udaljenosti od područja crpilišta da ne bi utjecale na buduće uvjete toka koji će se simulirati modelom. Odnos rijeke Save i vodonosnika interpretiran je korištenjem uzdužnog profila korita rijeke između Slavonskog Broda i Županje te istražnih bušotina smještenih u blizini rijeke. Na temelju podataka o nadmorskoj visini korita rijeke Save i debljini krovinskih naslaga na području toka rijeke utvrđeno je da je Sava usječena u vodonosnik nizvodno od Slavonskog Šamca, gdje se dno korita nalazi na oko 70 m n.m. Pretpostavlja se da je na uzvodnim dijelovima korito Save uglavnom usječeno u krovinske naslage, posebice na potezu od Novog Grada do Slavonskog Šamca, gdje je debljina krovinskih naslaga veća, a dno korita kreće se od 74 do 78 m n.m. Uzvodno od Novog Grada dno korita rijeke nalazi se oko granice između vodonosnika i krovinskih naslaga te se mjestimice usijeca u vodonosnik. Crpljenjem velikih količina podzemne vode može se ostvariti dotok ispod korita rijeke Save, a time se i priljevno područje

crpilišta može proširiti na teritorij Republike Bosne i Hercegovine. Zbog svega navedenog rijeka Sava nije uzeta kao fizička granica modela, već je granica postavljena 4-6 km južnije na području R BiH kao granica zadanog potencijala. Sjeverna granica modela postavljena je na liniji Stari Perkovci – Vrpolje. Zapadni dio te granice opisan je granicom zadanog potencijala. Analiza podataka o razinama podzemne vode pokazala je da u većem dijelu godine podzemna voda teče s tog područja prema crpilištu i rijeci Savi (slika 6.3a). Na temelju podataka o litološkom sastavu naslaga nabušenih na lokaciji bušotine V-35 istočni dio sjeverne granice modela postavljen je kao nepropusna granica. Zapadna granica modela postavljena je na liniji Stružani-Andrijevci te je usvojena kao granica bez dotoka predstavljena strujnicom. Istočna granica modela na liniji rijeka Sava-Babina Greda je zadana kao granica zadanog potencijala. Na slici 6.26 prikazane su opisane granice konceptualnog modela. Navedenim granicama obuhvaćeno je područje dimenzija otprilike 20 x 20 km.



Slika 6.26 Granice konceptualnog modela

Hidrogeološki parametri vodonosnika određeni su na temelju podataka pokusnih crpljenja zdenaca. Izračunate vrijednosti transmisivnosti vodonosnika kreću se od 5180 do 9500 m^2/d, a debljina vodonosnika varira od 40 do 60 m. Hidraulička vodljivost izračunata na

temelju ovih podataka iznosi od 86 do 170 m/d. Uskladištenje vodonosnih naslaga iznosi oko $2x10^{-4}$. Iako se unutar krovinskih naslaga nalaze različiti litotipovi (glina, prah, muljeviti šljunak, sitnozrnati pijesak i njihove izmjene), zbog nedovoljnog poznavanja njihovih pojedinačnih hidrogeoloških karakteristika one su do oko 25 m dubine aproksimirane jednim slojem. U skladu s dosadašnjim istraživanjima prosječne hidrauličke vodljivosti krovinskih naslaga (Bačani et al., 1991; Brkić et al., 2013; Urumović et al., 2011), prosječna vrijednost hidrauličke vodljivosti pretpostavljena je u iznosu od 10^{-3} m/d u sva tri smjera.

Na desnoj obali rijeke Save, između Modriče i Bosanskog Šamca vrijednosti hidrauličke vodljivosti šljunkovito-pjeskovitog vodonosnika variraju u rasponu od 8 do 430 m/d, a transmisivnost vodonosnika od 430 do 1730 m^2/d (Miošić, 1984). Nakon što je opisani model već bio u visokoj fazi izrade nabavljeni su podaci o hidrogeološkim istraživanjima na području crpilišta u Bosanskom Šamcu. Prema podacima o izvedbi zdenaca B-1 i B-2 (Novaković, 2002) promatrani vodonosnik se na ovom području nalazi na nešto većoj dubini (42 - 72 m), a vrijednost hidrauličke vodljivosti iznosi oko 170 m/d. Noviji podaci o izvedbi zdenca B-3, također na crpilištu u Bosanskom Šamcu (Novaković, 2004) pokazali su da vodonosne naslage započinju pliće, na dubini od 28 m, a podina nije nabušena jer je bušenje završilo na 46 m dubine u vodonosnim naslagama. Transmisivnost određena pokusnim crpljenjem ovog zdenca iznosila je 3223 m^2/d. Dijeljenjem transmisivnosti s debljinom vodonosnih naslaga dobiva se hidraulička vodljivost od 170 m/d.

S obzirom na tok podzemne vode koji se tijekom većeg dijela godine odvija od sjeverozapada prema rijeci Savi može se pretpostaviti da je obnavljanje podzemne vode infiltracijom oborina kroz polupropusne krovinske naslage važan faktor vodne bilance na ovom području. Na to ukazuju i literaturni podaci o prethodnim istraživanjima ovog prostora (Urumović, 1977). Sastav stabilnih izotopa kisika i vodika uzoraka podzemne vode pokazao je meteorsko porijeklo. Izvorni pjeskoviti sloj u krovinskim naslagama napaja se infiltracijom oborina, koje se procjeđuju vertikalno kroz polupropusne naslage iznad izvornog sloja. Ovaj proces traje relativno dugo. Nakon toga podzemna voda kreće se horizontalno kroz izvorni sloj od sjeverozapada prema jugu, te se procjeđuje vertikalno kroz polupropusne naslage u zahvaćeni vodonosnik (slika 6.24 i 6.25). Mehanizam napajanja može se zamisliti kao proces relativno stalnog toka vode od površine terena do njezinog ulaska u regionalni tok. Vrijeme kašnjenja može u tom slučaju iznositi nekoliko desetljeća. Koncentracije tricija u podzemnoj vodi pokazale su da je vrijeme zadržavanja vode dulje od 65 godina, što potvrđuje ovu pretpostavku. Hidrokemijska istraživanja su također pokazala da su u vodonosnom sustavu brzine toka razmjerno niske, što uzrokuje dugo zadržavanje vode u podzemlju. Gledajući

proces napajanja podzemne vode, stvarno obnavljanje podzemne vode ne zaostaje za oborinama koje ga uzrokuju, jer se ono događa kao posljedica premještanja vode, a ne kao materijalni dotok u tom trenutku infiltrirane vode (Bear, 1979).

Do napajanja iz Save dolazi kod visokih vodostaja, a pri niskim i srednjim vodostajima Sava drenira podzemlje, što pokazuje i usporedba krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razina podzemne vode (slike 6.4 do 6.9). Karte hidroizohipsi (slika 6.3a) pokazuju da u većem dijelu godine postoji regionalni dotok vode sa sjeverozapadne strane, a na istočnoj strani modela voda podzemno otječe. S južne (desne) strane rijeke Save također se odvija dotjecanje, ali pretpostavka je da u prirodnim uvjetima ne postoji tok ispod rijeke jer je ona regionalno najniža točka. Mogućnosti dotoka ispod rijeke pod utjecajem crpljenja podzemne vode istražila se nakon kalibracije modela, analizom bilance mase lijeve obale Save.

Literaturni podaci i podaci dobiveni istražnim bušenjem pokazuju da je podina vodonosnika na širem području vrlo promjenjiva. Osim naslaga gline pojavljuju se i prašinasto glinovite pa čak i pjeskovite naslage, a debljina im se kreće u rasponu od 5 do 25 m. Ispod podinskih naslaga nalazi se drugi vodonosni sloj. Zbog oscilacija u debljini i litološkom sastavu podine može se pretpostaviti postojanje direktne veze promatranog vodonosnika s dubljim vodonosnim slojem, ali hidrauličko značenje tog kontakta je teško odrediti (Miletić et al., 1986). Prilikom istražnog bušenja u naseljima Prnjavor i Donji Andrijevci, u vodonosnom sloju na dubini od 300 m ustanovljena je voda pod arteškim tlakom, što ukazuje na mogućnost procjeđivanja vode iz dubljih u pliće vodonosne slojeve. Kako ne postoje detaljni podaci o razinama podzemne vode u niže položenom vodonosnom sloju na području istraživanja, u ovom trenutku se ne može odrediti da li se odvija procjeđivanje vode iz tog sloja u promatrani vodonosnik. Ako do procjeđivanja dolazi pretpostavka je da je ono relativno malih iznosa te nema veliki utjecaj na bilancu vode u promatranom vodonosniku. Stoga je podina vodonosnika usvojena kao nepropusna granica.

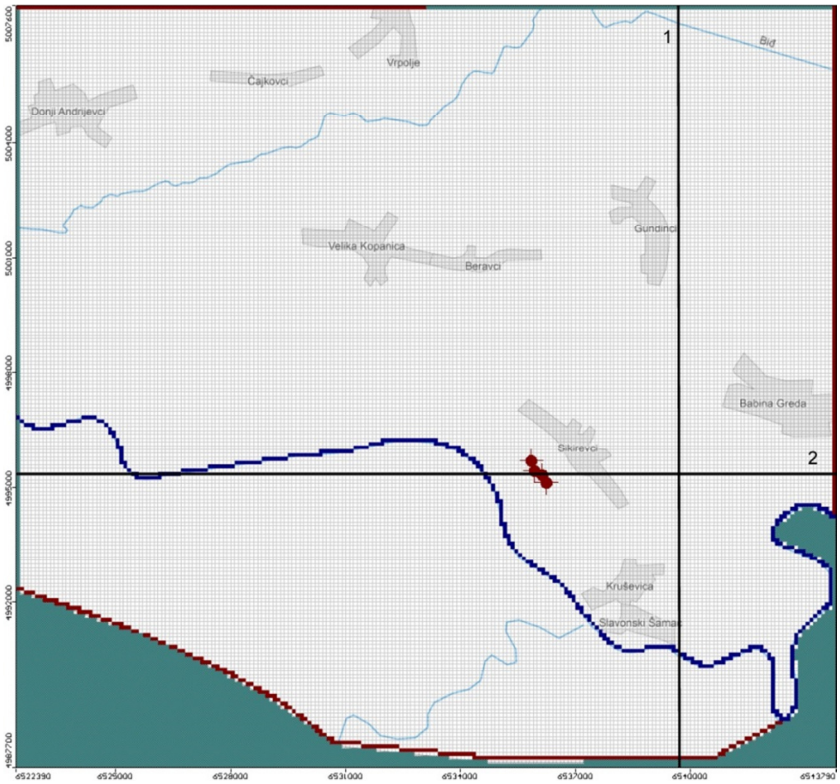
7. NUMERIČKI MODEL CRPILIŠTA SIKIREVCI

Kao što je već navedeno u poglavlju o metodama istraživanja, u ovom radu je za rješavanje matematičkog modela toka odabran program MODFLOW-2000, koji se temelji na numeričkoj metodi konačnih diferencija, a sastavni je dio programskog paketa VisualMODFLOW v 2011.1.

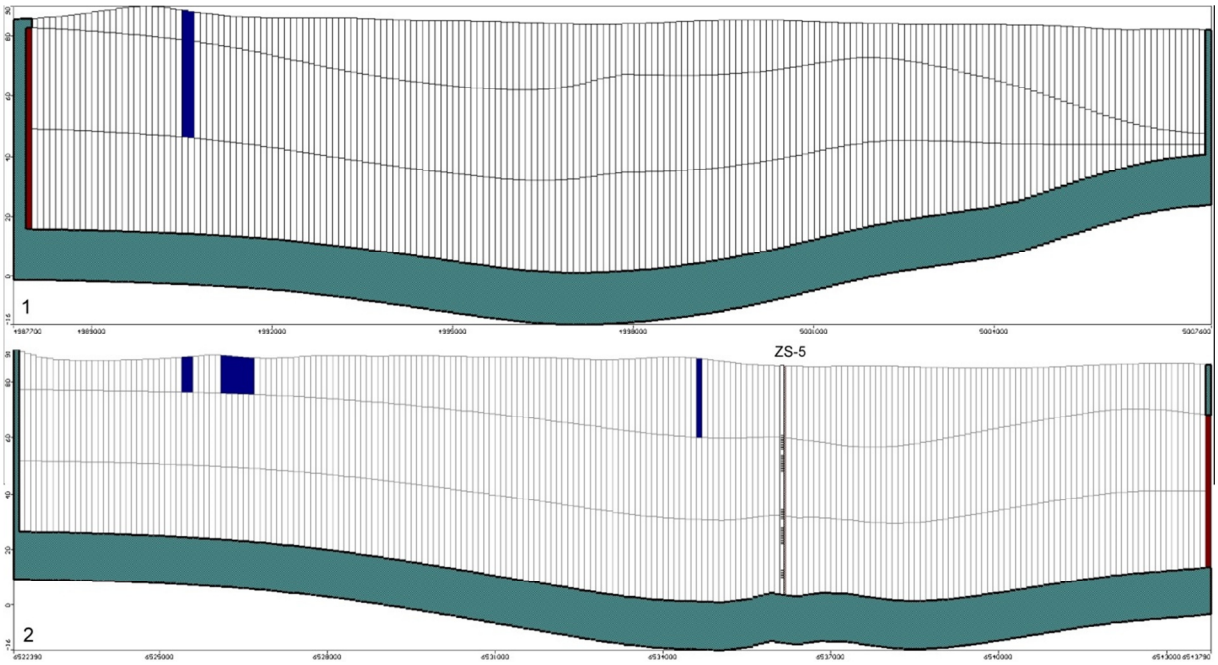
7.1. Diskretizacija vremena i prostora

Konceptualnim modelom određena je prostorna domena modela. U skladu s pretpostavkama metode konačnih diferencija domena modela je podijeljena na ortogonalne elemente veličine 100 x 100 metara (slika 7.1). Mreža dobivena na ovaj način sastoji se od 199 redova i 214 kolona.

Karte izostrata podina slojeva, koje su napravljene u sklopu izrade konceptualnog modela, korištene su za vertikalnu diskretizaciju modela. Model je podijeljen na tri sloja (slika 7.2): krovinske naslage čine jedan sloj te su određene kao tip 1, a vodonosne naslage su podijeljene u dva sloja istih hidrogeoloških svojstava i određene su kao tip 0. Ovakva podjela vodonosnih naslaga napravljena je da bi se moglo analizirati potencijalno strujanje podzemne vode ispod rijeke Save, te da bi se postigla bolja točnost rezultata modela. Podina vodonosnika zadana je kao nepropusna granica.



Slika 7.1 Prostorna domena modela. Tumač oznaka: zelena boja – neaktivni elementi, crvena boja – granica zadanog potencijala, plava boja – rijeka; crveni krug - zdenac



Slika 7.2 Vertikalna diskretizacija modela (profili 1 i 2 sa slike 7.1). Tumač oznaka kao na slici 7.1

Duljina nestacionarne simulacije bila je pet i pol godina (od lipnja 2008. do prosinca 2013. godine). To je razdoblje podijeljeno na 67 vremenskih perioda (67 mjeseci) za koje su definirani rubni uvjeti. Svaki period je dodatno podijeljen na 10 vremenskih koraka tijekom kojih su uvjeti na granicama modela ostali nepromijenjeni.

7.2. Parametri porozne sredine

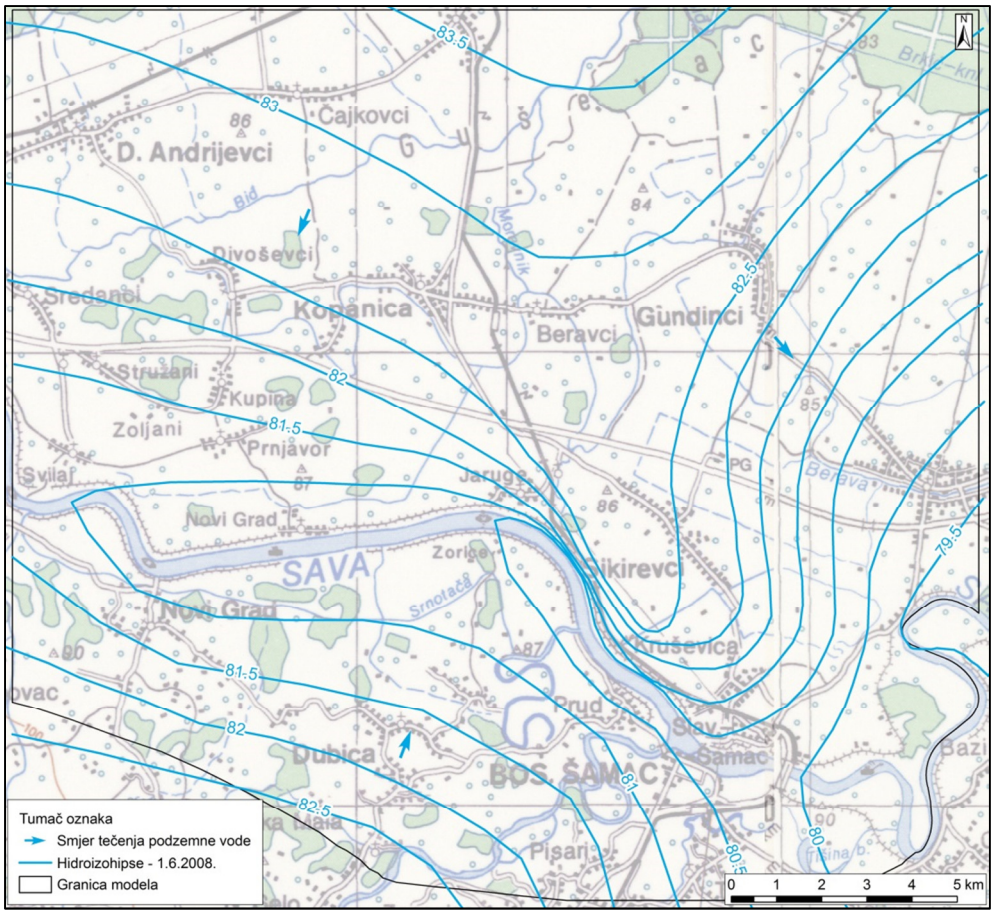
Vrijednosti hidrauličke vodljivosti vodonosnih naslaga određene su na temelju podataka pokusnih crpljenja zdenaca u sklopu izrade konceptualnog modela. Podaci pokusnih crpljenja su grupirani na središnjem području modela te je bilo potrebno ekstrapolirati vrijednosti hidrauličke vodljivosti na cijelo modelirano područje. Kao što je već spomenuto, istraživani vodonosnik dio je aluvijalne lepeze rijeke Bosne. Promatrajući od rijeke Save prema sjeveru lepeza se stanjuje, a udio sitnijih čestica se povećava. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti ekstrapolirane su uzimajući u obzir podatke o litološkim svojstvima naslaga te teoriju sedimentacije aluvijalnih lepeza prema kojoj veličina zrna opada prema donjem dijelu lepeze (Reading, 2009). Smanjenjem veličine zrna i povećanjem udjela sve sitnijih čestica smanjuje se i vrijednost hidrauličke vodljivosti naslaga. Početne vrijednosti hidrauličke vodljivosti zadane u modelu kreću se od 150 m/d na području crpilišta do 80 m/d na sjevernim rubnim dijelovima modela (slika 7.6b). Pošto ne postoje podaci o vertikalnoj hidrauličkoj vodljivosti ona je za vodonosne naslage pretpostavljena u vrijednostima deset puta manjim od horizontalne hidrauličke vodljivosti. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti su se dodatno utvrdile kroz kalibraciju modela.

Vrijednosti specifičnog koeficijenta uskladištenja vodonosnih naslaga dobivene su dijeljenjem uskladištenja iz podataka pokusnih crpljenja s prosječnom debljinom naslaga te je usvojena prosječna vrijednost $S_s = 4x10^{-6}$ m^{-1} na cijeloj domeni modela.

Prosječna vrijednost hidrauličke vodljivosti krovinskih naslaga pretpostavljena je u iznosu od 10^{-3} m/d u sva tri smjera, na cijeloj domeni modela, a specifično davanje $S_y = 0.1$.

7.3. Početni i rubni uvjeti

Za početne uvjete u prirodnom stanju napravljena je karta hidroizohipsi na temelju razina podzemne vode u piezometrima prije službenog početka rada crpilišta (1.6.2008.), te vodostaja rijeke Save na isti datum. Razine su interpolirane i ekstrapolirane po cijelom području modela (slika 7.3).



Slika 7.3 Raspodjela potencijala u početno vrijeme na domeni modela

Na slici 7.1 prikazani su rubni uvjeti postavljeni u modelu. Granice zadanog potencijala (označene crvenom bojom na slici 7.1) definirane su kroz programski paket za granicu stalnog potencijala (Constant head). Ovaj paket omogućuje unos vrijednosti potencijala na granici za početak i kraj svakog vremenskog perioda. Potrebne vrijednosti potencijala na granicama dobivene su na način da su prvo dnevni podaci o razinama podzemne vode u piezometrima osrednjeni za svaki mjesec tj. vremenski period u modelu. Podaci o vodostajima rijeke Save na postajama Slavonski Brod, Slavonski Šamac i Županja su linearno interpolirani da bi se dobili vodostaji za početnu i završnu točku rijeke Save u modelu, te za točku u kojoj južna granica stalnog potencijala siječe rijeku. Za linearnu interpolaciju korištena je jednadžba:

$$X_i = x_p + ((x_z - x_p)/L) \cdot L_i$$

gdje je: x_i – vodostaj na i-toj lokaciji između početne i završne hidrološke stanice [m n.n.]

x_p – vodostaj na početnoj hidrološkoj stanici [m n.n.]

x_z – vodostaj na završnoj hidrološkoj stanici [m n.n.]

L – udaljenost između početne i završne hidrološke stanice [m]

L_i – udaljenost između početne stanice i i-te lokacije (m)

Dobivene vrijednosti vodostaja su nakon toga osrednjene za svaki mjesec. Na temelju mjesečnih vrijednosti razina podzemne vode u piezometrima i vodostaja rijeke Save nacrtane su karte hidroizohipsi na domeni modela za svaki vremenski period (67 mjeseci). Iz ovih karata su zatim očitane vrijednosti potencijala u početnim i završnim točkama granica stalnog potencijala za svaki vremenski period. U programu je odabrana opcija koja iz vrijednosti potencijala u početnoj i završnoj točki granice računa međuvrijednosti za svaki element granice metodom linearne interpolacije.

Zapadna granica modela i istočni dio sjeverne granice simulirane su kao granice bez dotoka na način da su označene kao neaktivni elementi. Podina vodonosnika je također zadana kao granica bez dotoka.

Sve rubne granice modela postavljene su dovoljno daleko od crpilišta i ne nalaze se unutar izravnog utjecaja crpljenja podzemne vode. Najveći utjecaj na raspodjelu potencijala na području crpilišta i u njegovoj neposrednoj blizini ima rijeka Sava i infiltracija oborina.

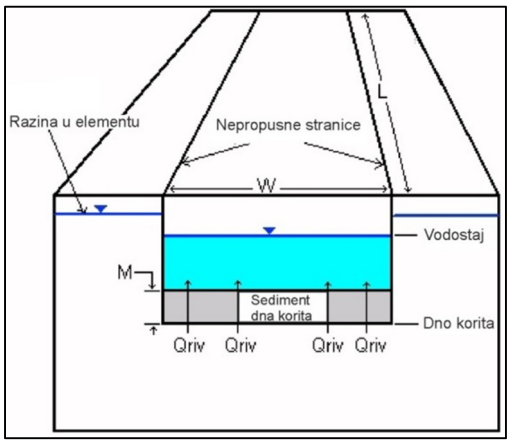
Granicom zadanog toka opisano je napajanje vodonosnika infiltracijom oborina i crpljenje podzemne vode iz zdenaca. Podaci o mjesečnim količinama oborina preuzeti su s kišomjerne stanice Slavonski Šamac. Infiltracija u krovinski sloj preko kojeg se odvija napajanje vodonosnika istraživala se tijekom kalibracije modela koristeći do sada poznate literaturne podatke. Na crpilištu Sikirevci podzemna voda se eksplotira iz četiri zdenca (ZS-2, ZS-3, ZS-4 i ZS-5) u koje su ugrađene crpke izdašnosti 100 l/s. Zdenačka konstrukcija ugrađena u zdence sastoji se od punih inox cijevi promjera Ø 508/498 mm, te zdenačkih filtra promjera Ø 508/498 mm s veličinom otvora d = 2 mm. Zdencima je vodonosnik zahvaćen s tri do četiri filtra na dubini od 25 do 75 m. U razdoblju od puštanja crpilišta u eksploataciju (krajem 2008. godine) do srpnja 2013. godine ukupna crpna količina prosječno je iznosila 170 l/s iz tri zdenca. Prosječne izdašnosti iz pojedinačnih zdenaca su bile: 28 l/s (ZS-2), 68 l/s (ZS-3), te 70 l/s (ZS-4). Zadnji zdenac (ZS-5) u pogon je pušten u drugoj polovici 2013. godine i u tom kratkom razdoblju iz njega se crpilo prosječno 84 l/s podzemne vode, te je ukupna prosječna crpna količina povećana na oko 220 l/s. Iz Hrvatskih voda su dobiveni podaci o iscrpljenim količinama vode za svaki mjesec te su iz njih izračunate mjesečne crpne količine u svakom zdencu koje se unose u program.

Rijeka Sava zadana je kao granica s tokom ovisnim o potencijalu. U uvjetima niskih i srednjih voda Sava drenira podzemlje na području Hrvatske i na području Bosne i Hercegovine (Drobne et al., 1969). U uvjetima visokih voda Sava napaja zaobalje. Korito rijeke je u modelu usječeno u krovinske naslage uzvodno od Slavonskog Šamca, a nizvodno od toga je usječeno u vodonosnik. U programu je rijeka Sava definirana kroz programski

paket za rijeku. Podaci koji se trebaju unijeti u program su vodostaji za svaki vremenski period i kote dna korita u početnoj i završnoj točki te provodljivost naslaga riječnog dna. Provodljivost naslaga (engl. Conductance) je parametar koji predstavlja otpor protjecanju između vodotoka i okolnih naslaga, a računa se iz slijedećeg odnosa:

$$C = \frac{K*L*W}{M}$$

gdje je: C – provodljivost naslaga riječnog dna [L^2/T]; K – vertikalna hidraulička vodljivost naslaga riječnog dna [L/T]; L – duljina rijeke u elementu [L]; W – širina rijeke u elementu [L]; M – debljina naslaga riječnog dna [L] (slika 7.4).



Slika 7.4 Shematski prikaz riječne granice u programu MODFLOW

Vertikalnu hidrauličku vodljivost naslaga riječnog dna je vrlo teško odrediti jer se teško može direktno mjeriti te je vrlo promjenjiva u prostoru i vremenu (Genereux et al., 2008). Prostorna promjenjivost ovisi o distribuciji i stupnju heterogenosti sedimenata riječnog dna (Wojner, 2008). Promjene u vremenu događaju se pod utjecajem taloženja ili erozije sedimenta riječnog dna pri različitim uvjetima toka. Za vrijeme niskih vodostaja taložiti će se sitne čestice koje mogu stvoriti tanki sloj niske hidrauličke vodljivosti (Wojner, 2008). Za vrijeme visokih voda i poplava dolazi do erozije ovog sloja te se povećava hidraulička vodljivost naslaga riječnog dna (Doppler et al., 2007). Prema Wojner (2008) vertikalna hidraulička vodljivost kreće se u vrijednostima od 0.017 do 3.2 m/d za mješovite naslage gline, praha i sitnog pijeska, a od 0.07 do 14.9 m/d za krupnije naslage šljunka i pijeska. U radu Calver (2001) navodi podatke mnogih autora o vertikalnoj hidrauličkoj vodljivosti s raznih lokacija, određivano na različite načine (terenska mjerenja, laboratorijske analize, numeričko modeliranje). Vrijednosti se razlikuju i do šest redova veličine na istoj lokaciji. Zbog vrlo malo podataka o svojstvima naslaga na kontaktu rijeke Save i zaobalja uvjeti na ovoj granici su se definirali kroz kalibraciju modela. Utjecaj rijeke se definirao prilagodbom

hidrauličke vodljivosti vodonosnih i krovinskih naslaga u neposrednoj okolici rijeke kao i hidrauličke vodljivost naslaga riječnog dna kroz koje se odvija procjeđivanje vode između rijeke i okolnih naslaga. Za početne vrijednosti pretpostavljena je debljina naslaga riječnog dna od 0.5 m, te vertikalna hidraulička vodljivost od 0.05 m/d.

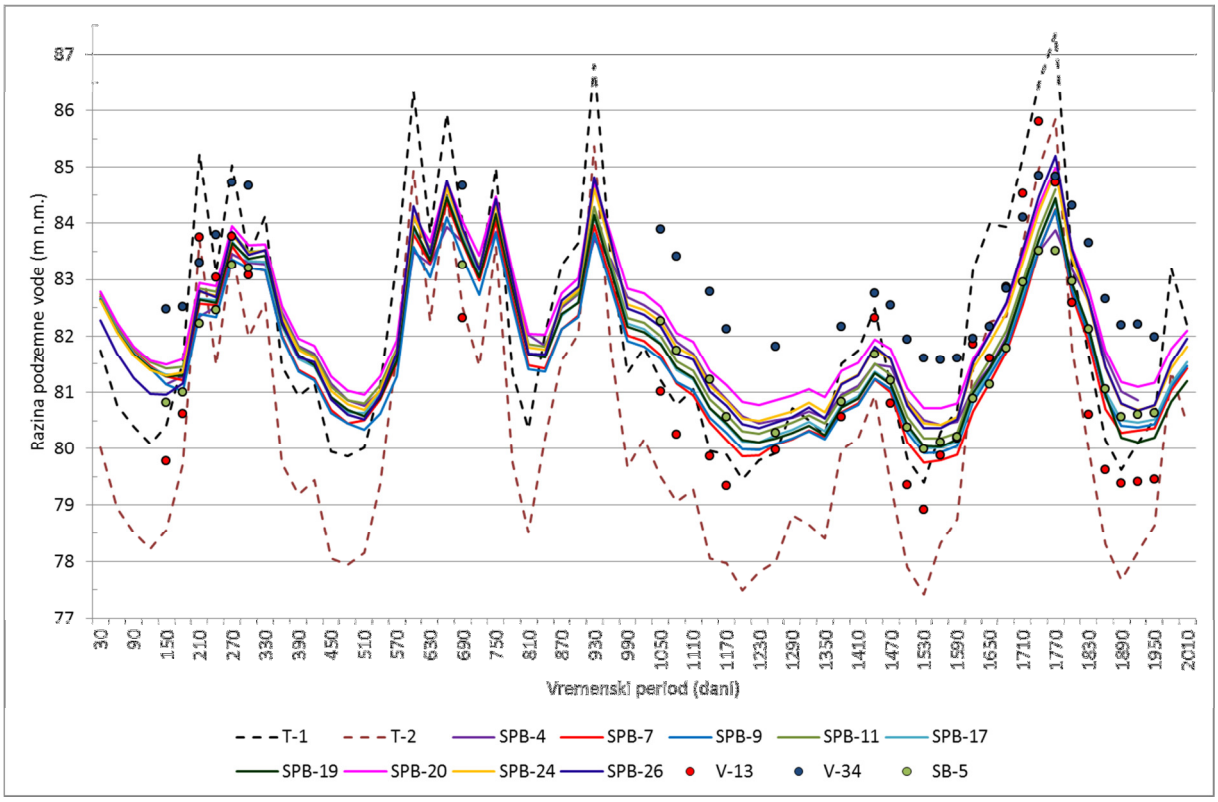
Na utjecajnom području crpilišta Sikirevci prolazi trasa višenamjenskog kanala Dunav – Sava (VKDS) čija je izgradnja u tijeku. Utjecaj kanala već je istraživan (Bagarić, 1995; Gjetvaj et al. 2011) i zaključeno je da ne predstavlja posebnu opasnost za crpilište jer će biti usječen u krovinske naslage, a kvaliteta vode u kanalu biti će slična kvaliteti vode u Savi. Prije nego se započne s radovima na izgradnji punog profila kanala kojima bi se u potpunosti realizirala njegova plovna funkcija, nužno je načiniti novu analizu utjecaja kanala na crpilište koje je u međuvremenu pušteno u pogon (Brkić & Briški, 2013b). U tom smislu se kanal može promatrati kao dodatni rubni uvjet u modelu tj. kao granica s tokom ovisnim o potencijalu.

7.4. Kalibracija modela

Postupak kalibracije modela napravljen je za pet i pol godina rada crpilišta. To je razdoblje podijeljeno na 67 vremenskih perioda (67 mjeseci) za koje su definirani rubni uvjeti. Svaki period dodatno je podijeljen na 10 vremenskih koraka tijekom kojih su uvjeti na granicama modela ostali nepromijenjeni. U kalibraciji je pozornost posvećena identifikaciji hidrauličke vodljivosti vodonosnika i krovinskih naslaga, određivanju količine infiltracije oborina i određivanju uvjeta na granici rijeke Save i okolnih naslaga. Kalibracija je rađena metodom pokušaja i pogrešaka.

7.4.1. Podaci za kalibraciju

Za potrebe kalibracije modela podaci o razinama podzemne vode i vodostaji rijeke Save osrednjeni su za svaki mjesec tj. vremenski period u modelu. Na slici 7.5 su prikazane osrednjene razine podzemne vode u opažačkim objektima za cijelo razdoblje kalibracije te osrednjeni vodostaji rijeke Save u početnoj i završnoj točki modela (T-1 i T-2). Također su prikazane razine podzemne vode mjerene ručnim mjeračem na piezometrima V-13, SB-5 i V-34.



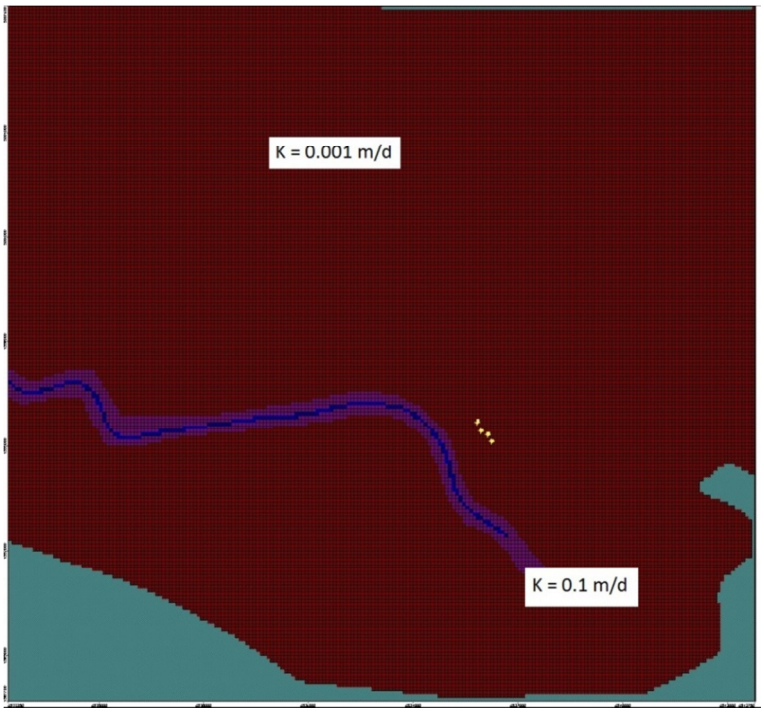
Slika 7.5 Osrednjene razine podzemne vode i vodostaji rijeke Save te razine mjerene ručnim mjeračem

7.4.2. Hidrogeološki parametri

Na slici 7.6b prikazani su poligoni s različitim vrijednostima hidrauličke vodljivosti vodonosnih naslaga koje su usvojene kroz proces kalibracije modela. Kroz kalibraciju modela testirane su vrijednosti od 130 do 170 m/d na području označenom bijelom bojom; od 100 do 120 m/d na području tamnozelene boje; 80 do 100 m/d na području svijetlozelene boje te 50 do 80 m/d na plavim područjima. Hidraulička vodljivost vodonosnih naslaga na kontaktu s rijekom Savom je smanjena da bi se ublažio utjecaj dreniranja vodonosnika u Savu za vrijeme niskih i srednjih vodostaja (smeđi poligon na slici 7.6b).

Kao što je već spomenuto krovinske naslage vrlo su promjenjive (glina, prah, muljeviti šljunak, sitnozrnati pijesak i njihove izmjene). U prvoj verziji modela pokušalo se krovinske naslage simulirati s tri sloja različitih svojstava, ali zbog nedovoljnog poznavanja njihovih pojedinačnih hidrogeoloških karakteristika nije se moglo postići prihvatljivo rješenje. Zato su na kraju krovinske naslage do oko 25 m dubine aproksimirane jednim slojem. Prosječna vrijednost hidrauličke vodljivosti pretpostavljena je u iznosu od 10^{-3} m/d u sva tri smjera (slika 7.6a). Hidraulička vodljivost krovinskih naslaga na kontaktu s rijekom Savom povećana je da bi se postigla bolja veza rijeke i vodonosnih naslaga (poligon roza boje na slici 7.6a).

Testirane su vrijednosti od 0.01 do 1 m/d, a najbolji rezultati dobiveni su s vrijednosti od 0.1 m/d.



a)

b)

Slika 7.6 Hidraulička vodljivost krovinskih naslaga a) i vodonosnih naslaga b)

7.4.3. Rubni uvjeti

7.4.3.1. Rijeka Sava

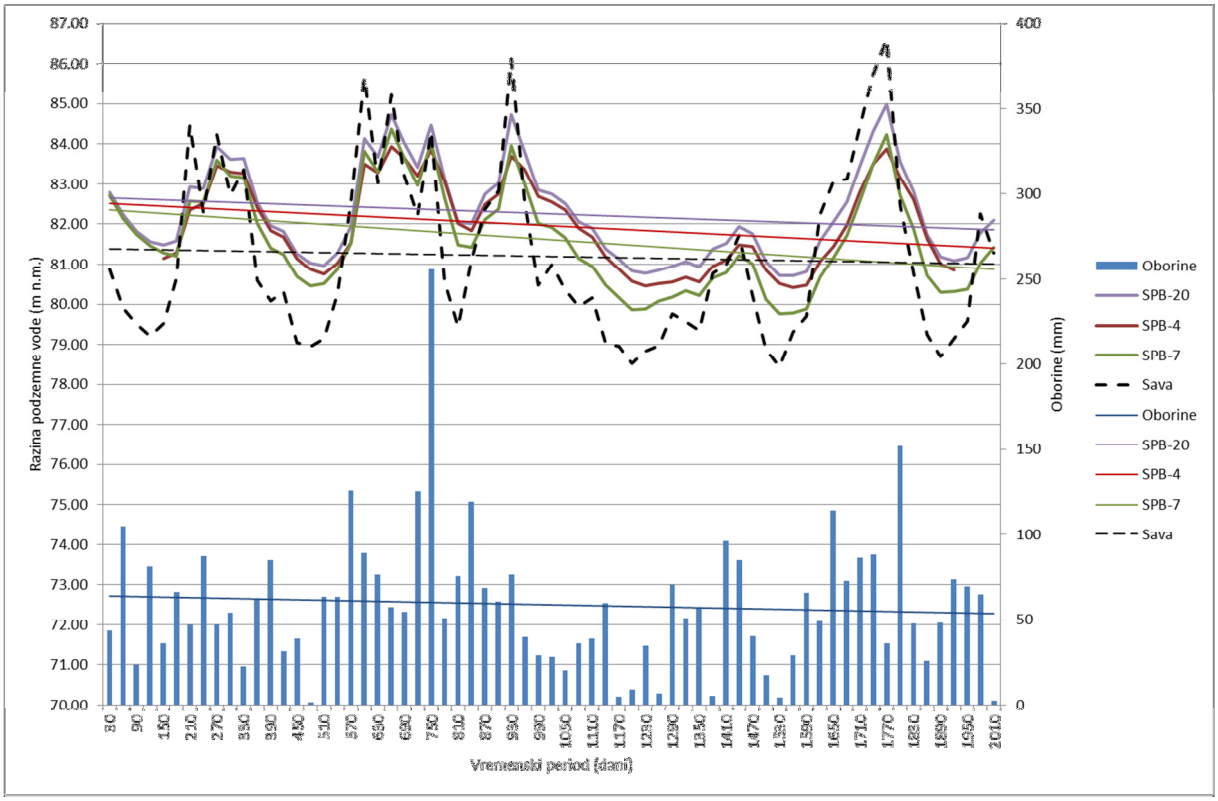
Osnovne poteškoće u kalibraciji vezene uz rubni uvjet rijeke Save bile su nepostojanje strukturno-piezometarskih bušotina u blizini rijeke što je za posljedicu imalo nedovoljno poznavanje kontakta između rijeke i zaobalja. Utjecaj rijeke Save definiran je prilagodbom hidrauličke vodljivosti vodonosnika i krovinskih naslaga u neposrednoj okolici rijeke, te hidrauličke vodljivosti naslaga riječnog dna kroz koje se odvija procjeđivanje vode iz rijeke u okolne naslage.

Kao što je već spomenuto u poglavlju 6.4, položaj rijeke Save u odnosu na vodonosne naslage s najvećom sigurnošću je definiran nizvodno od Slavonskog Šamca. Zbog nesigurnosti u položaj Save uzvodno od Slavonskog Šamca napravljene su različite verzije modela: 1) Sava cijelim tokom položena u vodonosnik; 2) Sava u krovini od Novog Grada do Slavonskog Šamca; 3) Sava u krovini od ulaza u model do Slavonskog Šamca. Najbolji rezultati postignuti su postavkom da je uzvodno od Slavonskog Šamca korito rijeke Save usječeno u krovinske naslage, a nizvodno u vodonosnik. Vjerojatnije je da je uzvodno od Slavonskog Šamca savsko korito mjestimice usječeno u krovinu vodonosnika, a mjestimice i u sam vodonosnik, međutim zbog nedovoljno ulaznih podataka to nije bilo moguće detaljnije postaviti. Zbog toga je prosječna hidraulička vodljivost krovinskih naslaga na tom području u okolici rijeke Save postavljena u nešto većem iznosu (0.1 m/d) nego na ostalom području (slika 7.6a). Hidraulička vodljivost vodonosnih naslaga na kontaktu s rijekom Savom također je istraživana kroz kalibraciju (slika 7.6b). Testirane su vrijednosti od 1 m/d pa do 100 m/d. Pokušalo se pronaći optimalne vrijednosti koje će omogućiti dovoljno napajanje iz rijeke za vrijeme visokih voda, a istovremeno ublažiti utjecaj dreniranja za vrijeme srednjih i niskih voda. Najbolji rezultati dobiveni su s vrijednosti horizontalne hidrauličke vodljivosti od 100 m/d, te vertikalne od 10 m/d.

Prosječna hidraulička vodljivost naslaga riječnog dna postupno je smanjivana kroz kalibraciju modela od početnih 3 m/d do 0.01 m/d, a debljina naslaga mijenjana je od 1 m do 0.5 m. Na kraju je usvojena debljina naslaga 0.5 m, a vrijednosti hidrauličke vodljivosti u iznosu od 0.01 m/d nizvodno od Novog Grada, te 0.1 m/d uzvodno od Novog Grada. Na taj način se pokušalo simulirati mjestimično usijecanje Save u vodonosnik koje je pretpostavljeno uzvodno od Novog Grada.

7.4.3.2. Infiltracija oborina

Podaci o mjesečnim količinama oborina koji su korišteni u kalibracijskom postupku preuzeti su s kišomjerne stanice Slavonski Šamac. Na slici 7.7 prikazane su mjesečne količine oborina, vodostaj rijeke Save u blizini crpilišta te razine podzemne vode u odabranim piezometrima. Također su prikazane linije trendova iz kojih se vidi da vodostaji rijeke Save i količine oborina pokazuju blagi trend pada, a za njima slijedi piezometar SPB-20 smješten zapadno od crpnih zdenaca. Najveći trend pada pokazuju razine podzemne vode u piezometru SPB-7 koji je smješten uz crpni zdenac. Može se primijetiti da piezometarske razine prate vodostaje rijeke Save, a korelacija s količinama oborina je samo sezonska. Detaljniju korelaciju razina podzemne vode s količinama oborina je teško utvrditi jer rijeka Sava utječe na razinu podzemne vode u vodonosniku, te prikriva utjecaj infiltracije oborina. Utjecaj rijeke Save najjači je za vrijeme visokih vodostaja, kada Sava napaja dio vodonosnika uz njenu obalu, posebno na istočnom dijelu toka gdje je usječena u vodonosne naslage. Kako se dio vodonosnika uz rijeku puni, tako tlak podzemne vode raste i u područjima udaljenim od rijeke, iako fizički voda iz rijeke ne dolazi do tih područja. Ovaj porast tlaka uzrokovan porastom vodostaja Save osjeti se sve do piezometra V-34 (slika 5.1), koji je udaljen od Save preko 6 km.



Slika 7.7 Usporedba mjesečnih količina oborina, vodostaja rijeke Save i razina podzemne vode u piezometrima te linije trendova

Za prve tri godine simulacije zadana je infiltracija od 2%, 5% i 10% mjesečnih oborina, a za druge tri godine 14%. Kroz kalibracijski postupak infiltracija za prve tri godine je postupno povećavana do 10%. Ove vrijednosti dale su zadovoljavajuće rezultate, ali se kroz daljnju kalibraciju došlo do zaključka da su iznosi infiltracije još veći. Usvojene su vrijednosti od 14% za sve godine osim 2010., koja je bila izrazito kišna (1110 mm/god), te su za nju usvojene vrijednosti 10% ukupnih mjesečnih oborina. Ovakve vrijednosti podudaraju se s dosadašnjim istraživanjima napajanja ovakvih vodonosnika na regionalnim modelima strujanja podzemne vode (Brkić et al., 2013; Urumović et al., 2011). Urumović (1977) je izračunao prosječnu godišnju efektivnu infiltraciju od 78 mm/god na području između Babine Grede i Vinkovaca. Izračun je napravljen na temelju porasta razina podzemne vode uzrokovanog infiltracijom oborina, u razdoblju od 1962. do 1968. godine, u piezometrima koji su zacjevljeni u krovinskim naslagama vodonosnika. Autor navodi kako se u južnim predjelima, gdje raste udio prašinasto-pjeskovitih materijala u krovinskim naslagama, mogu očekivati znatno više vrijednosti efektivne infiltracije. Prosječna infiltracija kalibriranog modela za cijelo razdoblje simulacije iznosi oko 89 mm/god, što se dobro slaže s navedenim radom.

Dio modeliranog područja uz hidrografsku mrežu Biđa je nešto nižih nadmorskih visina od područja uz Savu. Stoga dio oborina s ovog područja površinski otječe u Biđ te dalje prema istoku izvan domene modela. Zbog toga je uz vodotok Biđ zadana zona s nižom količinom infiltracije. U ovoj zoni zadana je infiltracija od 10% mjesečnih oborina.

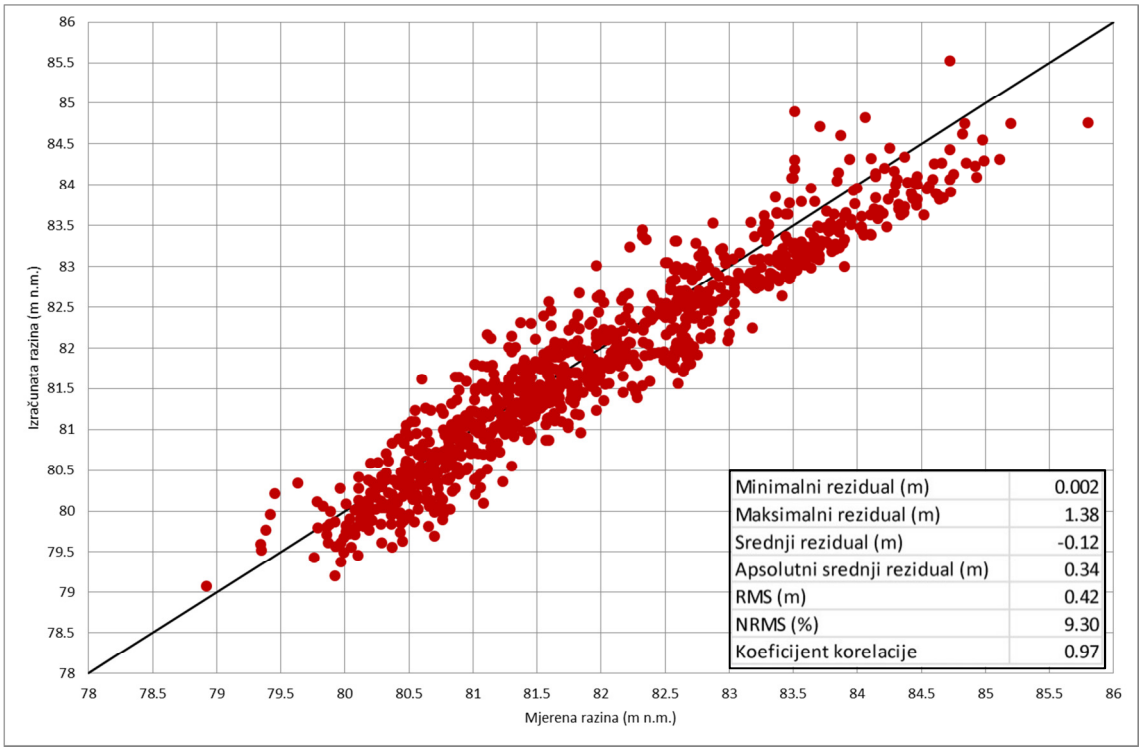
Sezonske razlike u efektivnoj infiltraciji mogu biti vrlo velike, ljeti je ona smanjena zbog deficita vlage u tlu, dok je zimi velika. Zbog toga je u modelu smanjena infiltracija za srpanj i kolovoz na 10% mjesečnih oborina.

Osim litološkog sastava polupropusnih krovinskih naslaga tj. njihove vertikalne hidrauličke vodljivosti, na veličinu infiltracije veliki utjecaj imaju vlažnost tla, vegetacija te način obrade tla (Brkić, 1999). Na istraživanom području prevladavaju oranice vrlo sličnih obilježja, a područja pokrivena šumom su vrlo malih dimenzija te je bilo teško moguće izdvajati zone s različitim količinama infiltracije s obzirom na vegetaciju i način korištenja zemljišta.

7.5. Rezultati kalibracije modela

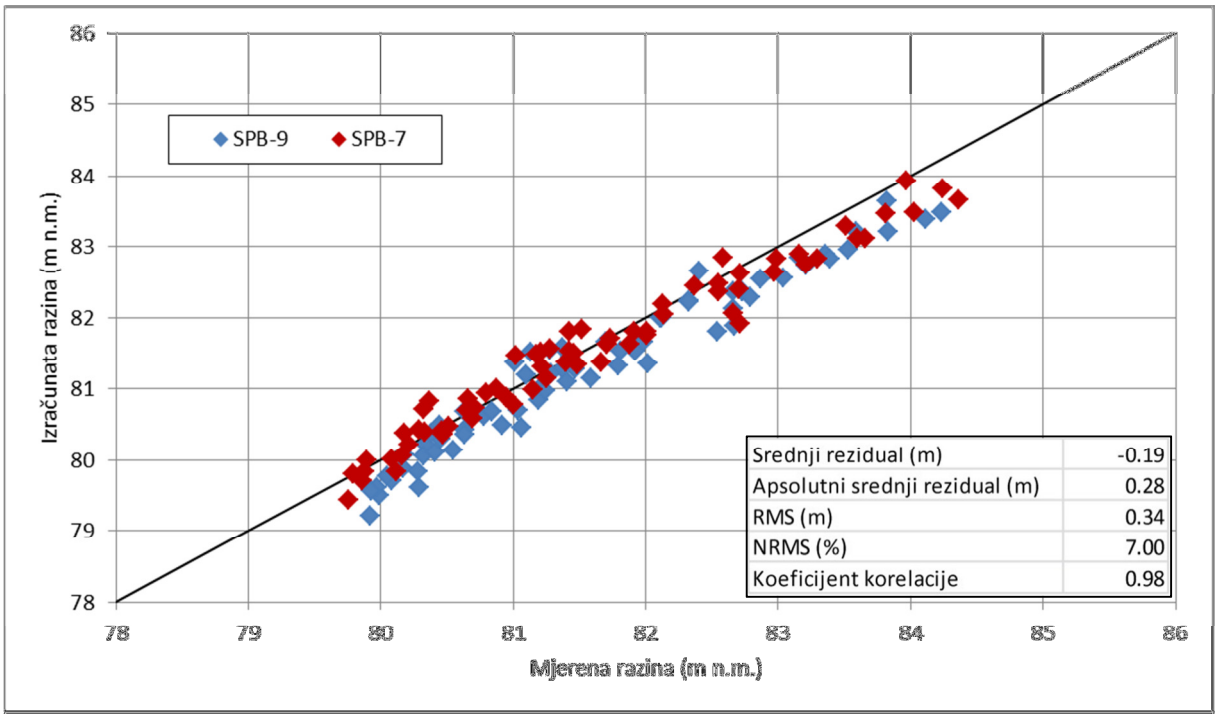
7.5.1. Usporedbe mjerenih i izračunatih vrijednosti razina podzemne vode

Rezultati kalibracije modela prikazani su na slikama 7.8 do 7.18, a lokacije piezometara korištenih za kalibraciju i crpnih zdenaca prikazane su na slici 5.1. Dijagram na slici 7.8 prikazuje usporedbu izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina u svim analiziranim piezometrima (SPB-4, SPB-6, SPB-7, SPB-9, SPB-10, SPB-11, SPB-12, SPB-13, SPB-15, SPB-17, SPB-19, SPB-20, SPB-24, SPB-25, SPB-26, V-13, SB-5 i V-34) za sve vremenske periode. Na slici se može zamijetiti da su za većinu mjerenja izmjerene vrijednosti razina vode nešto više od onih izračunatih. To se odnosi na sve piezometre osim piezometara SPB-4 i SPB-6 koji su smješteni nešto sjevernije od Sikirevaca. Apsolutni srednji rezidual kalibracije modela pri usporedbi izmjerenih i izračunatih razina vode za sve gore navedene piezometre i za sve vremenske korake iznosi 0.34 m, srednje kvadratno odstupanje 0.42 m, a normalizirano srednje kvadratno odstupanje 9.3% (slika 7.8). Koeficijent korelacije iznosi 0.97. Prihvatljivim rezultatima kalibracije smatraju se oni za koje je normalizirano srednje kvadratno odstupanje manje od 10%. S obzirom na ove statističke pokazatelje može se zaključiti da su uvjeti strujanja podzemne vode pri dosadašnjem režimu rada crpilišta Sikirevci dobro simulirani.

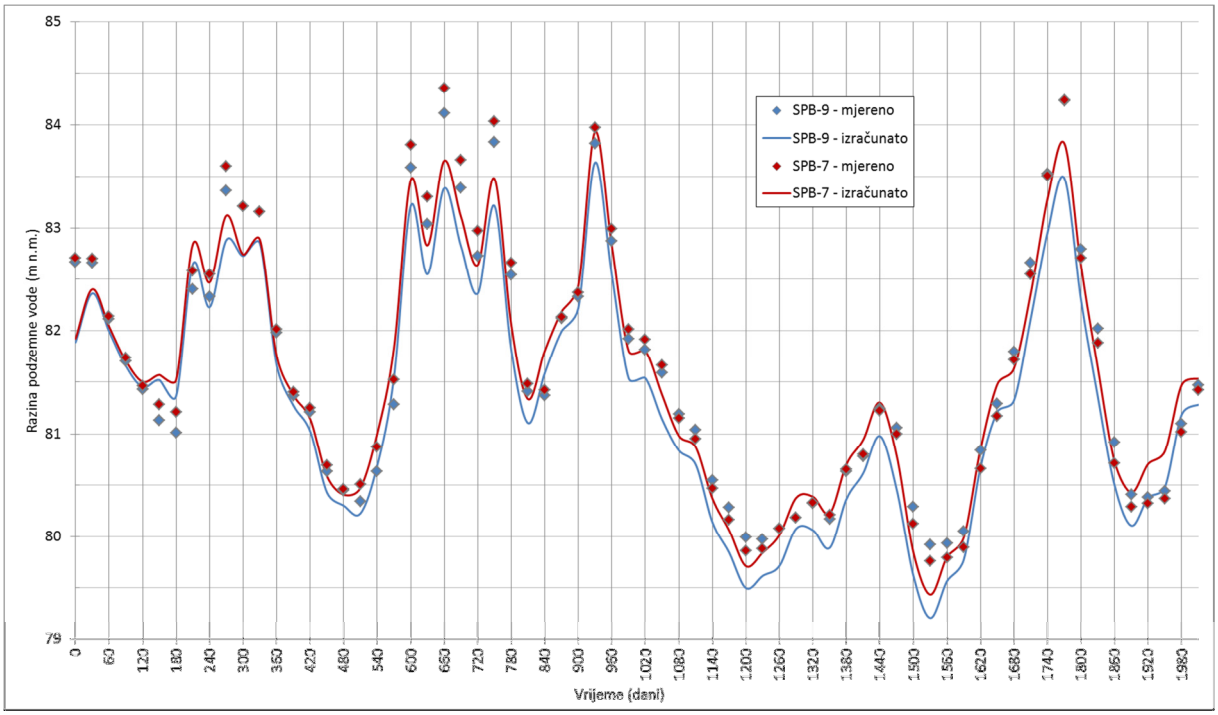


Slika 7.8 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za sve analizirane piezometre

Dijagram na slici 7.9 pokazuje usporedbu izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina u piezometrima SPB-7 i SPB-9 za sve vremenske periode. Piezometar SPB-7 nalazi se u blizini crpnog zdenca ZS-2, a piezometar SPB-9 u blizini crpnog zdenca ZS-3 (slika 5.1). Apsolutni srednji rezidual iznosi 0.28 m, srednje kvadratno odstupanje 0.34 m, a normalizirano srednje kvadratno odstupanje 7%. Koeficijent korelacije iznosi 0.98. I u ovom slučaju može se zaključiti da statistički pokazatelji pokazuju dobru simulaciju uvjeta strujanja podzemne vode iako su izmjerene razine vode nešto više od izračunatih, što je posebno izraženo u razdobljima vrlo niskih i vrlo visokih voda (slika 7.10).

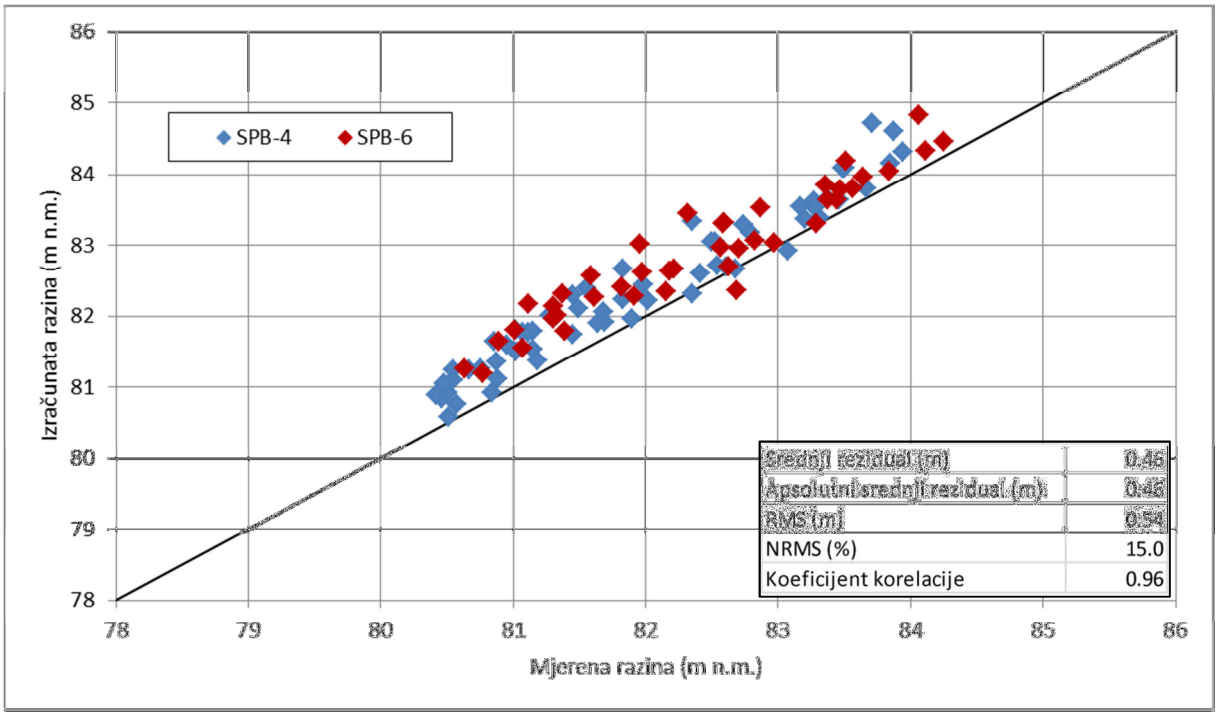


Slika 7.9 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometre SPB-7 i SPB-9

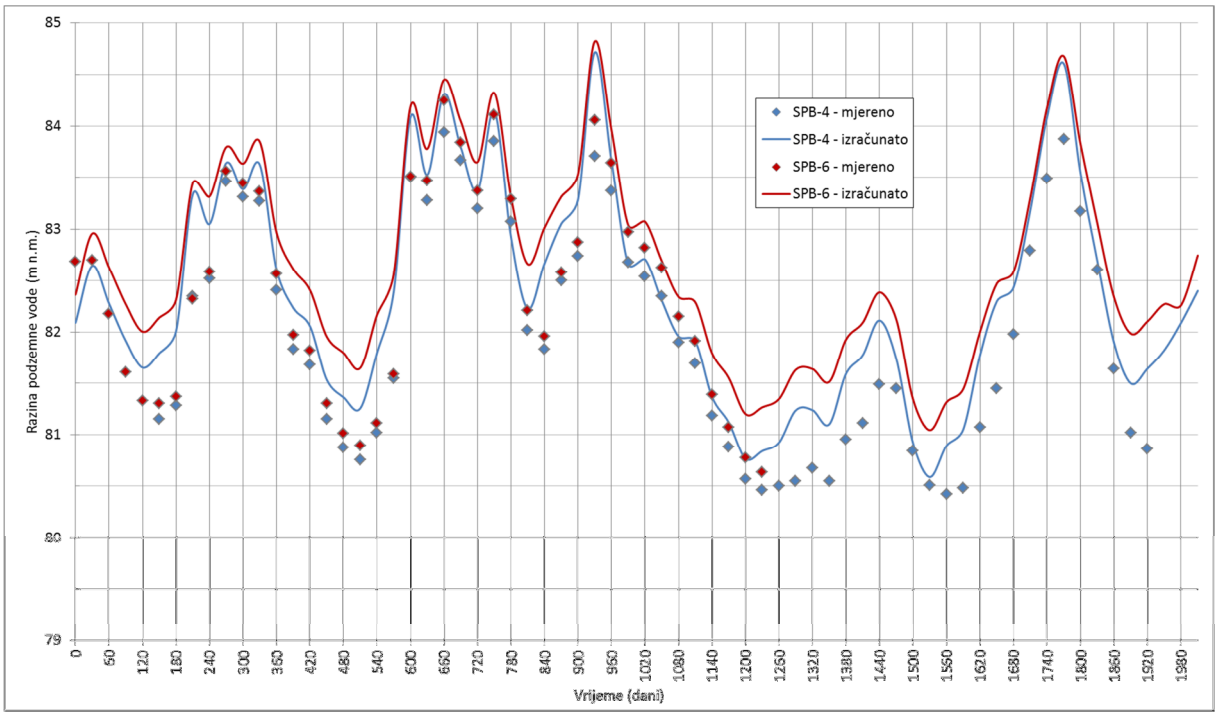


Slika 7.10 Nivogrami kalibracije modela za piezometre SPB-7 i SPB-9

Dijagram na slici 7.11 prikazuje usporedbu izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina u piezometrima SPB-4 i SPB-6 za sve vremenske periode. U ovom slučaju su izmjerene razine vode nešto niže od izračunatih (slike 7.11 i 7.12). Koeficijent korelacije je nešto niži od onog za sve opažane piezometre te iznosi 0.96. Apsolutni srednji rezidual iznosi 0.46 m, a srednje kvadratno odstupanje 0.54 m. Normalizirano srednje kvadratno odstupanje je veće od prosjeka za sve piezometre te iznosi 15%. Razlog tome je što je na ovim piezometrima razlika između maksimalnih i minimalnih mjerenih vrijednosti manja nego na ostalim piezometrima. Na piezometru SPB-4 je u više navrata u razdoblju velikih voda zapaženo prelijevanje vode preko vrha piezometarske cijevi. Za ta razdoblja su podaci o razinama s loggera za automatsko očitavanje podcijenjeni, jer logger ne mjeri stvarnu razinu do koje bi se voda podigla da je cijev piezometra duža. Stoga kod promatranja najvećih maksimuma treba uzeti u obzir da su stvarne razine više od mjerenih, tj. bliže računatim vrijednostima. Ovo također utječe i na normalizirano srednje kvadratno odstupanje, jer je u stvarnosti razlika između minimalne i maksimalne razine nešto veća te bi normalizirano srednje kvadratno odstupanje bilo manje kad bi uzeli u obzir stvarnu maksimalnu razinu. Kada se normalizirano srednje kvadratno odstupanje izračuna s prosječnom razlikom minimalne i maksimalne razine podzemne vode svih piezometara (4.5 m) ono iznosi oko 12%.



Slika 7.11 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometre SPB-4 i SPB-6

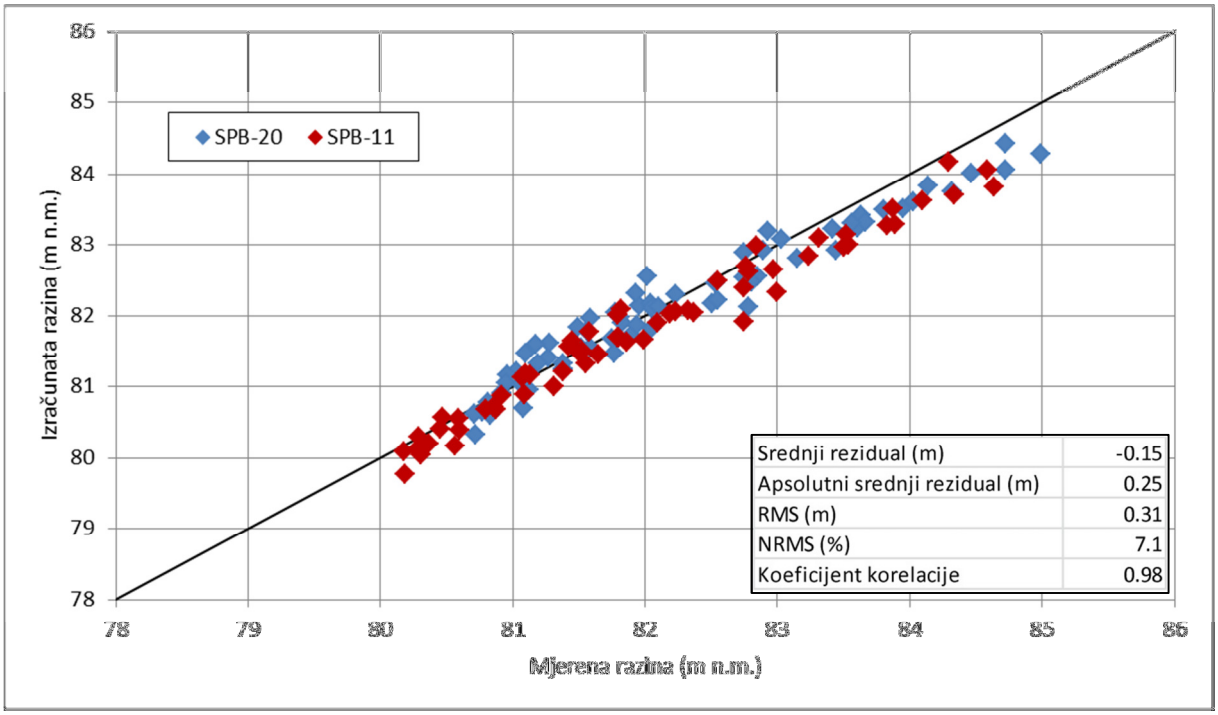


Slika 7.12 Nivogrami kalibracije modela za piezometre SPB-4 i SPB-6

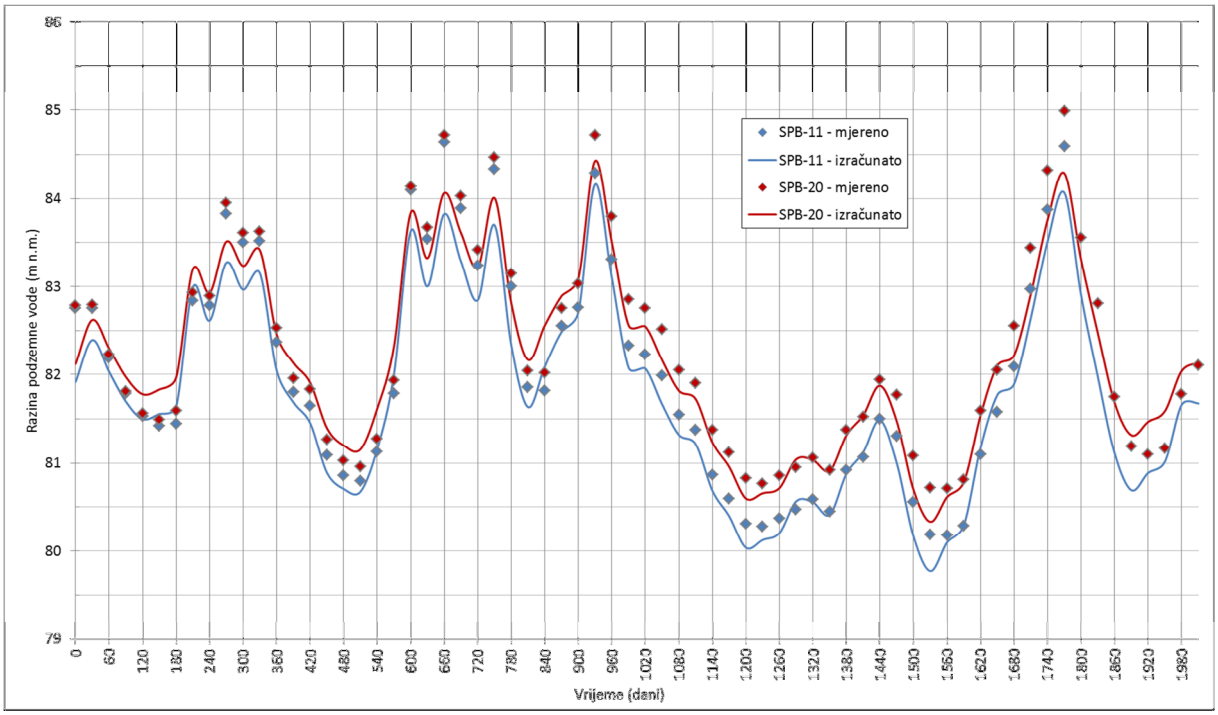
Najveće razlike između izmjerenih i izračunatih razina vode u piezometrima SPB-4 i SPB-6 zapažaju se krajem ljeta u razdoblju niskih voda te tijekom punjenja vodonosnog sustava koje obično traje od listopada tekuće do ožujka sljedeće godine. Te su razlike posebno izražene u zadnje dvije godine kalibracije što se uočava na primjeru piezometra SPB-4. Pošto su ovi piezometri udaljeniji od Save, utjecaj rijeke manje je izražen na njima nego na piezometrima

na crpilištu Sikirevci. Stoga su se pri kalibraciji modela razine na ovim piezometrima koristile kao glavni pokazatelj dobro odabranih količina infiltracije oborina.

Dijagram na slici 7.13 pokazuje usporedbu izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina u piezometrima SPB-11 i SPB-20 koji se nalaze sjeverozapadno i jugozapadno od zdenaca (slika 5.1), a na slici 7.14 su prikazani njihovi nivogrami kalibracije. Na ovim piezometrima su izračunate vrijednosti vrlo blizu mjerenih, a najveća odstupanja pojavljuju se u razdobljima visokih voda kada su izračunate razine preniske. Razlog za ovakva odstupanja može biti osrednjavanje vodostaja rijeke Save, kojim se gube najveći vodostaji, ali i nedovoljno dobro poznavanje kontakta rijeke Save i vodonosnika, odnosno krovinskih naslaga.

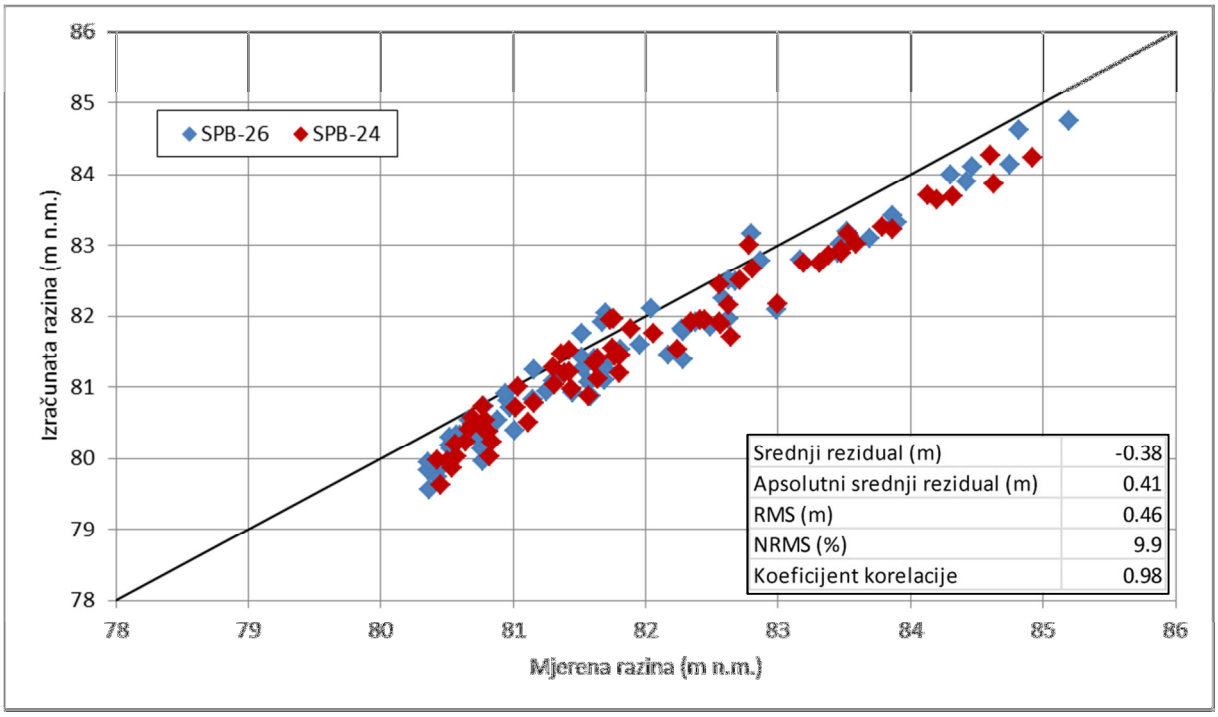


Slika 7.13 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometre SPB-11 i SPB-20

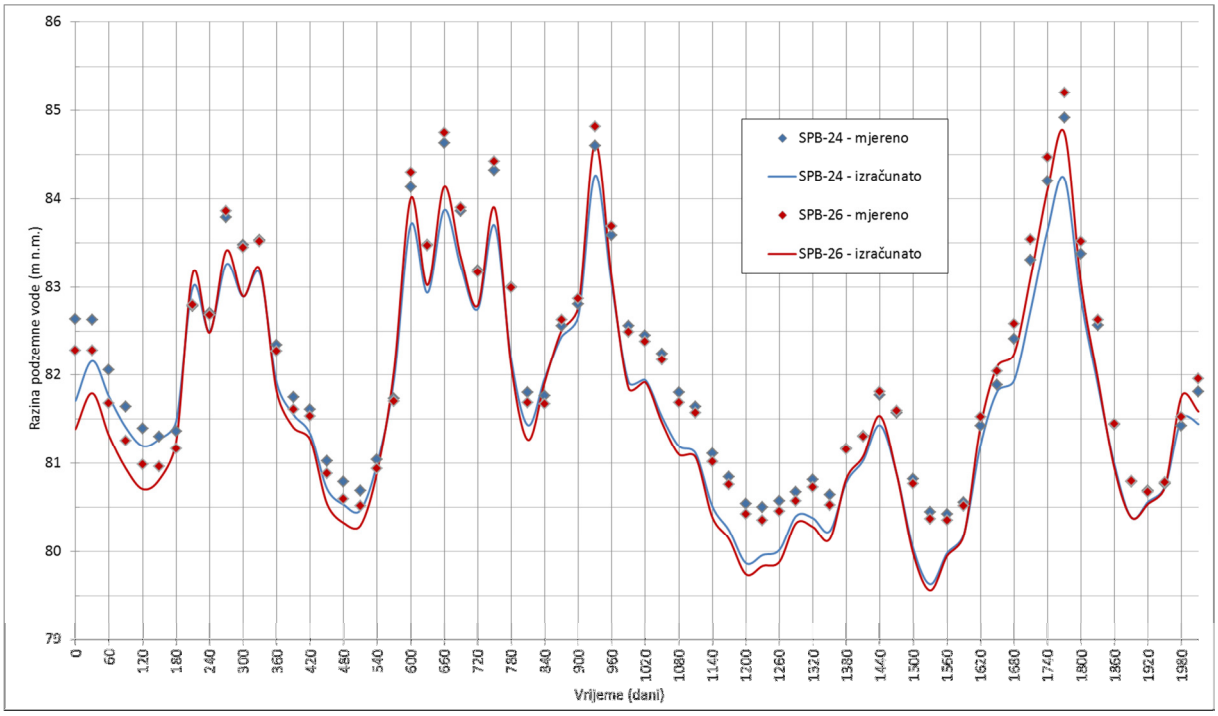


Slika 7.14 Nivogrami kalibracije modela za piezometre SPB-11 i SPB-20

Na slikama 7.15 i 7.16 prikazana je usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina u piezometrima SPB-24 i SPB-26 za sve vremenske periode te njihovi nivogrami. Rezultati dobiveni na ovim piezometrima su nešto lošiji od prosjeka za sve opažane piezometre. Posebno do izražaja dolaze odstupanja u ljetnom razdoblju 2011. i 2012. godine (korak 1200, 1500) kada su izračunate vrijednosti niže od mjerenih za preko 0.5 m. Razlog za ovako niske izračunate razine je što su ovi piezometri bliži području u kojem je Sava usječena u vodonosne naslage, te se kod niskih vodostaja na njima pojačano osjeti drenirajući utjecaj Save. Zbog relativno malo podataka kontakt rijeke Save i okolnih naslaga nije se mogao bolje opisati.



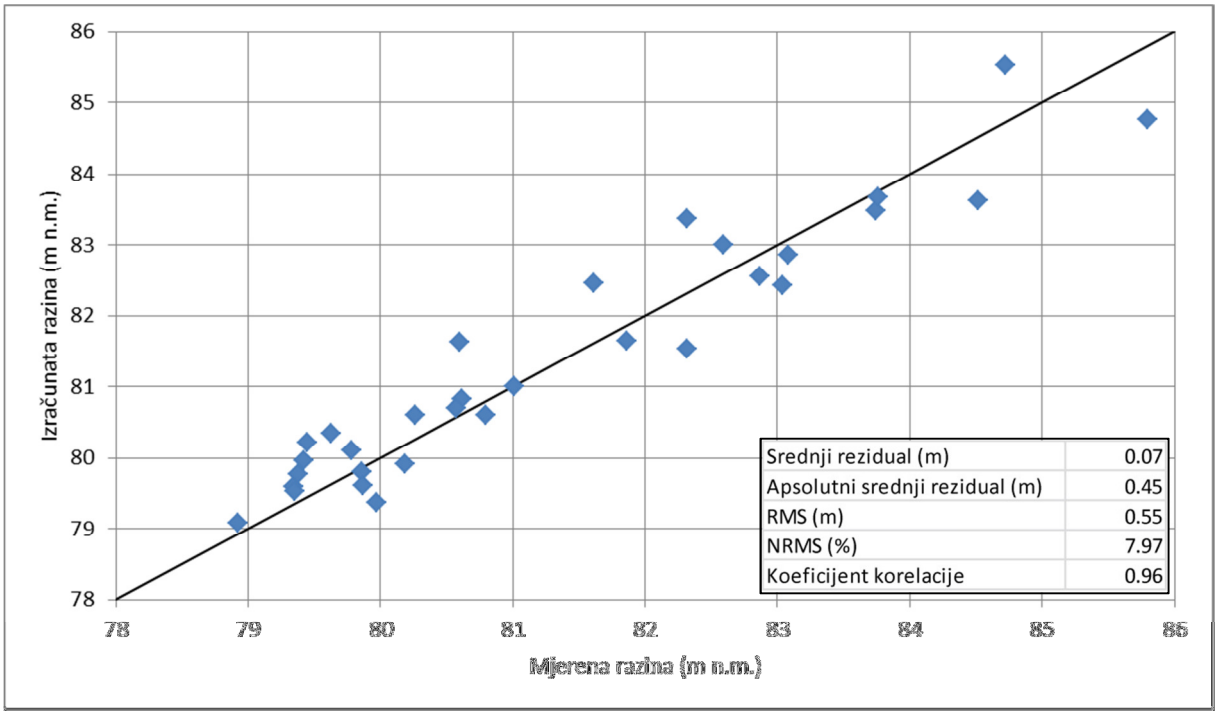
Slika 7.15 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometre SPB-24 i SPB-26



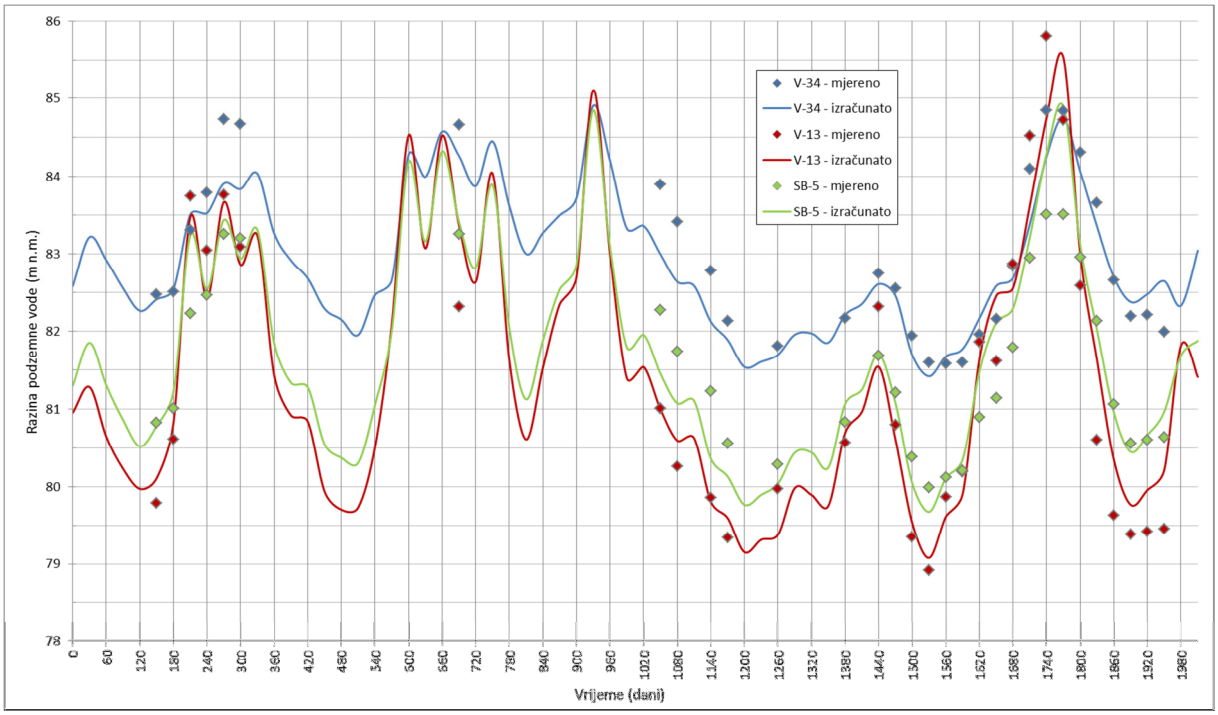
Slika 7.16 Nivogrami kalibracije modela za piezometre SPB-24 i SPB-26

Piezometarske razine u piezometrima V-13, SB-5 i V-34 mjerene su u nekoliko navrata 2008. i 2011. godine te redovito od svibnja 2012. do listopada 2013. godine. Za ove piezometre ima najmanji broj podataka, ali je usprkos tome postignuta dosta dobra korelacija. Odstupanja izračunatih od mjerenih vrijednosti su u zadovoljavajućim granicama, posebno ako se uzme u obzir da su mjerene vrijednosti na ovim piezometrima točkasti podaci (razine

mjerene na određeni datum), a ne mjesečni srednjaci kao što su to razine na ostalim piezometrima i vodostaji rijeke Save. Rezultati kalibracije modela za ove piezometre prikazani su na slikama 7.17 i 7.18. Za piezometar V-13 apsolutni srednji rezidual iznosi 0.45 m, srednje kvadratno odstupanje 0.55 m, a normalizirano srednje kvadratno odstupanje 8%. Koeficijent korelacije iznosi 0.96. Pošto se piezometar V-13 nalazi vrlo blizu rijeci Savi ovi podaci pokazuju da je na ovom dijelu modela kontakt vodonosnika i rijeke Save dobro simuliran. Normalizirano srednje kvadratno odstupanje za piezometre SB-5 i V-34 je nešto više te iznosi oko 13%. Ova vrijednost je prihvatljiva ako se uzme u obzir da zbog nedovoljne gustoće mjerenja nisu zabilježene najniže i najviše razine u ovim piezometrima u razdoblju simulacije, a vrijednost NRMS-a ovisi o razlici minimalne i maksimalne zabilježene razine.

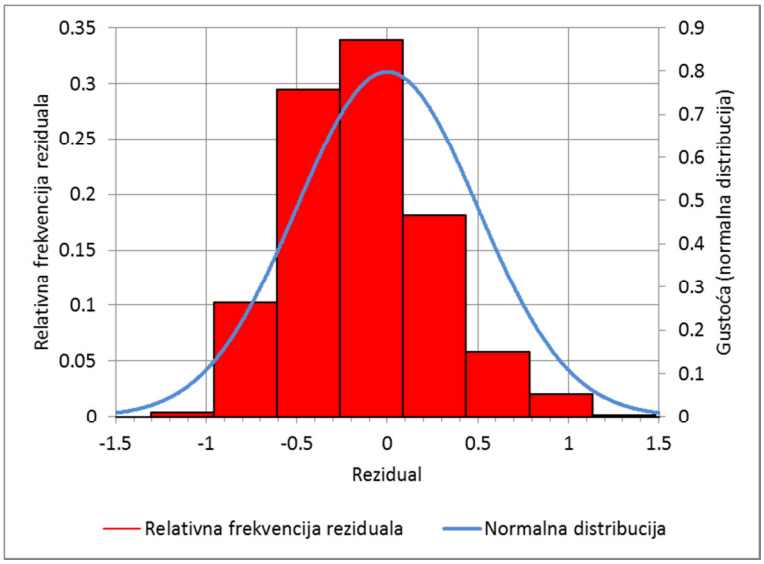


Slika 7.17 Usporedba izmjerenih i izračunatih piezometarskih razina za piezometar V-13



Slika 7.18 Nivogrami kalibracije modela za piezometre V-13, V-34 i SB-5

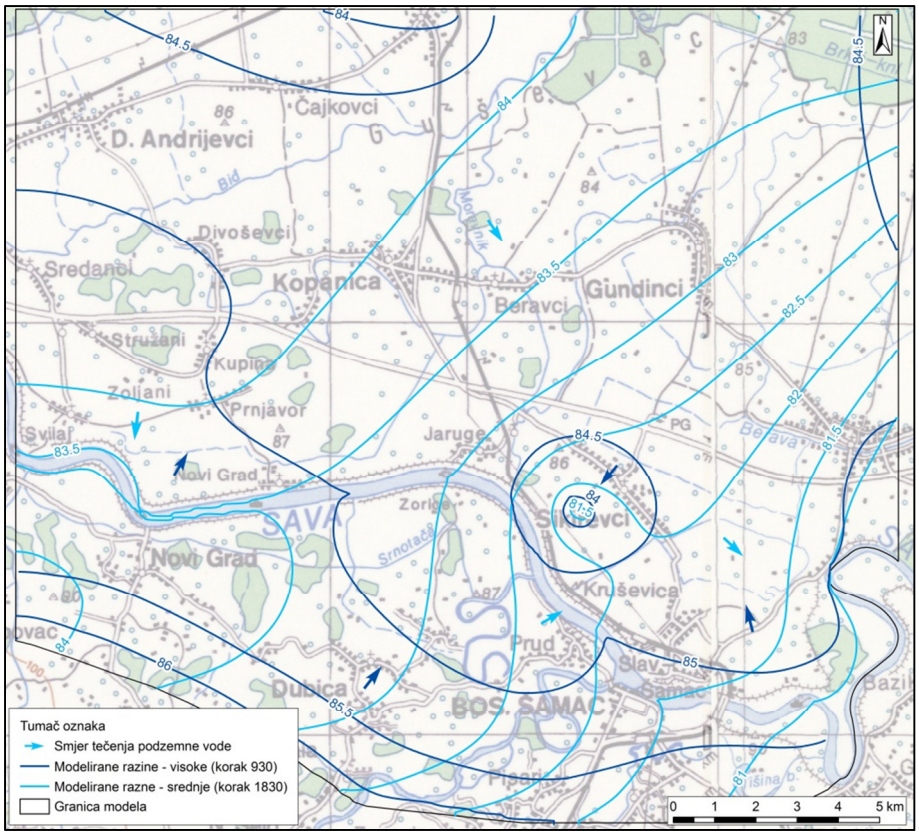
Na slici 7.19 prikazan je histogram reziduala za sve analizirane piezometre. Za usporedbu je prikazana i krivulja normalne distribucije (srednja vrijednost $\mu = 0$, standardna devijacija $\sigma = 0.5$). U idealnom slučaju bi histogram reziduala trebao biti normalno raspoređen oko nule, sa srednjim rezidualom jednakim nula. Standardna devijacija reziduala iznosi 0.39, a srednja vrijednost - 0.13 m. Relativna frekvencija reziduala je broj pojavljivanja određenog raspona reziduala podijeljen s ukupnim brojem reziduala. Množenjem relativne frekvencije sa 100 dobiva se postotak određenog raspona reziduala u ukupnom boju reziduala. Histogram reziduala pokazuje veći udio negativnih reziduala, što znači da su češće mjerene razine više od izračunatih. To su pokazali i nivogrami mjerenih i izračunatih razina za većinu analiziranih piezometara.



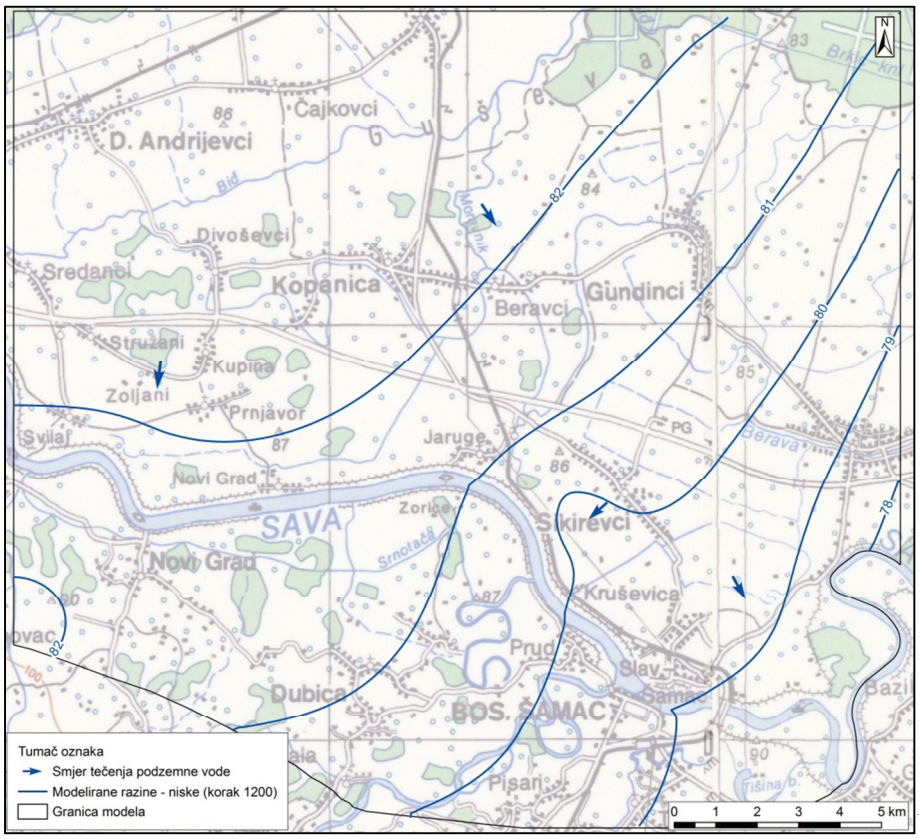
Slika 7.19 Histogram reziduala

7.5.2. Karte hidroizohipsi

Na slici 7.20 prikazane su karte hidroizohipsi dobivene modelom za razdoblje visokih, srednjih (a) i niskih (b) voda. Najveće razlike između ovih karata i onih koje su nacrtane na temelju podataka o razinama podzemne vode i vodostajima rijeke Save (slika 6.3 a i b) primjećuju se na području uz rijeku Savu. Razlog za to je što se kod crtanja karata razina u rijeci uzimala kao referentna, iako su razine podzemne vode u vodonosniku na području gornjeg toka rijeke (do Slavonskog Šamca) više od razina u rijeci. No kako nije bilo podataka o razinama neposredno uz rijeku, niti s druge strane rijeke u BiH podaci o razinama su se interpolirali koristeći vodostaje rijeke. Na taj način dobivene karte nisu u potpunosti realne, ali opisuju generalni smjer toka podzemne vode. Kod modeliranih razina utjecaj rijeke Save je ublažen jer je ona usječena u krovinske naslage. Na užem području crpilišta se hidroizohipse dobivene modelom dobro poklapaju s hidroizohipsama dobivenim interpolacijom mjerenih podataka o razinama.



a)

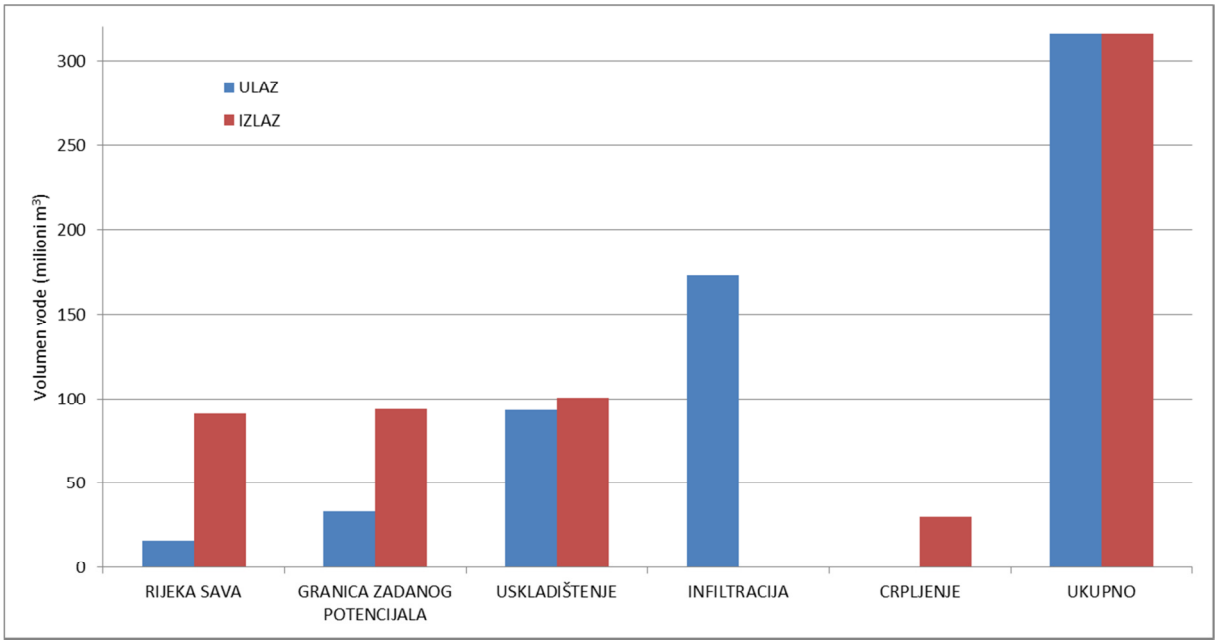


b)

Slika 7.20 Razine podzemnih voda dobivene modeliranjem za visoke i srednje (a) i niske vode (b)

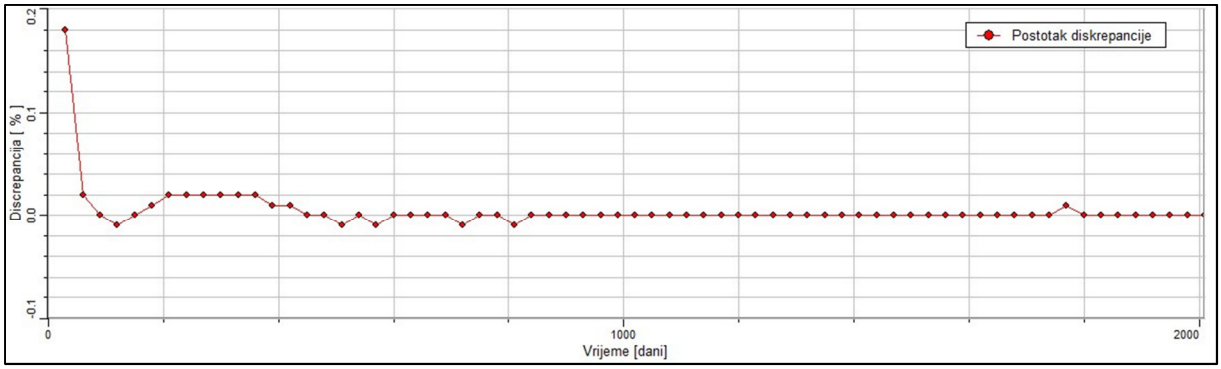
7.5.3. Analiza bilance mase

Bilanca mase je jedan od važnih pokazatelja uspješne kalibracije modela. Dijagram bilance mase vodonosnog sustava na slici 7.21 prikazuje ukupne vrijednosti volumena vode koja ulazi i izlazi iz sustava kroz granice modela toka. Iz dijagrama je vidljivo da kada se uzmu ukupne količine vode za cijelo razdoblje simulacije infiltracija oborina predstavlja glavni izvor obnavljanja podzemne vode.



Slika 7.21 Bilanca mase

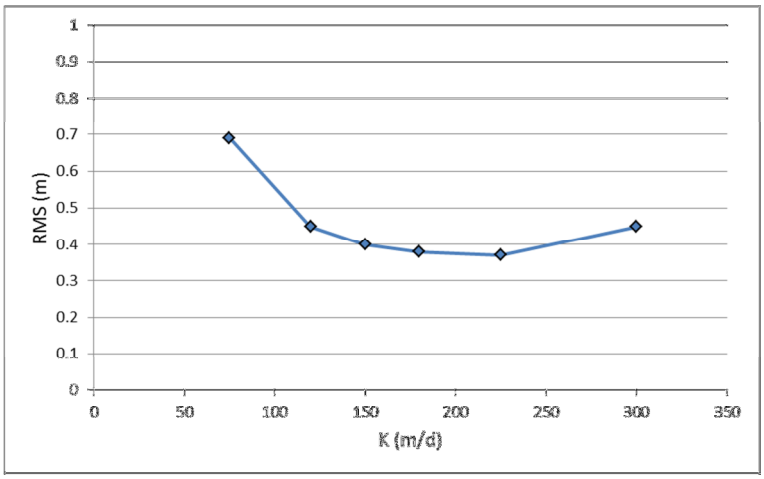
Na dijagramu na slici 7.22 prikazan je postotak diskrepancije bilance mase kroz vremenske periode na kojem se vidi da se greška bilance mase uglavnom kreće između 0% i 0.02% što je vrlo dobar rezultat. U korisničkom priručniku računalnog programa (Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual) navodi se da se rezultati simulacije mogu smatrati generalno prihvatljivim ako je greška bilance mase i do 2%, dok Konikow (1978) navodi da bi u idealnom slučaju greška bilance mase trebala biti manja od 0.1%.



Slika 7.22 Postotak diskrepancije bilance mase

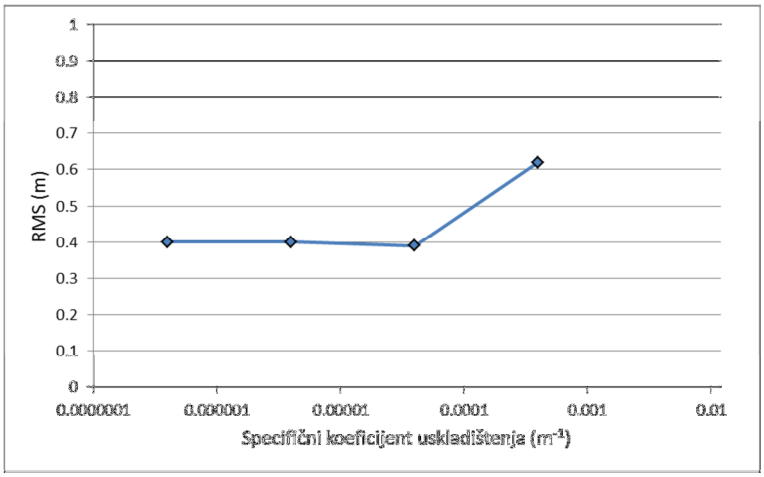
7.6. Analiza osjetljivosti i nesigurnosti

Da bi se odredilo u kojoj mjeri je kalibrirani model osjetljiv na promjene parametara vodonosnika, provedena je analiza osjetljivosti na hidrauličku vodljivost i specifični koeficijent uskladištenja. Hidraulička vodljivost je mijenjana množenjem kalibrirane vrijednosti s 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 i 2. Osjetljivost je analizirana usporedbom srednjih kvadratnih odstupanja (RMS) na nekoliko odabranih piezometara za svih pet provedenih simulacija. Na slici 7.23 prikazani su dobiveni rezultati. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti na dijagramu prikazane su za zonu s najvećom hidrauličkom vodljivošću (slika 7.6b), ali na isti način su mijenjane i vrijednosti ostalih zona. Analiza je pokazala da je model osjetljiviji na smanjivanje hidrauličke vodljivosti nego na njezino povećavanje.



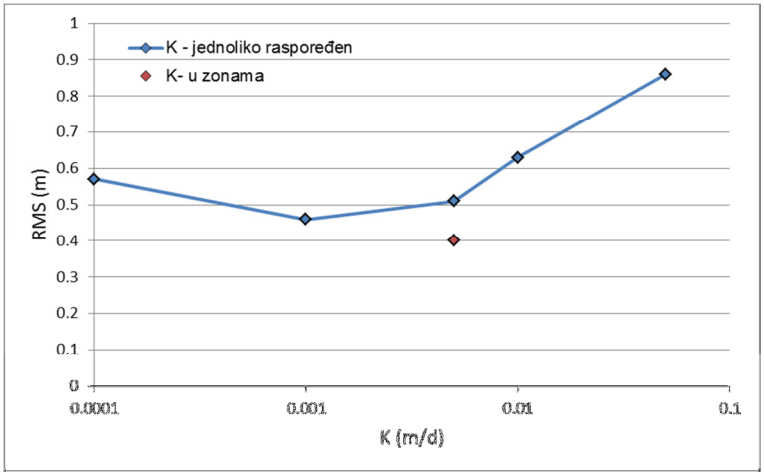
Slika 7.23 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema hidrauličkoj vodljivosti vodonosnih naslaga

Specifični koeficijent uskladištenja mijenjan je za jedan i dva reda veličine veće i jedan red veličine manje od kalibrirane vrijednosti (slika 7.24). Rezultati su pokazali da je model vrlo malo osjetljiv na smanjivanje veličine specifičnog koeficijenta uskladištenja, dok je osjetljiv na njezino povećavanje.

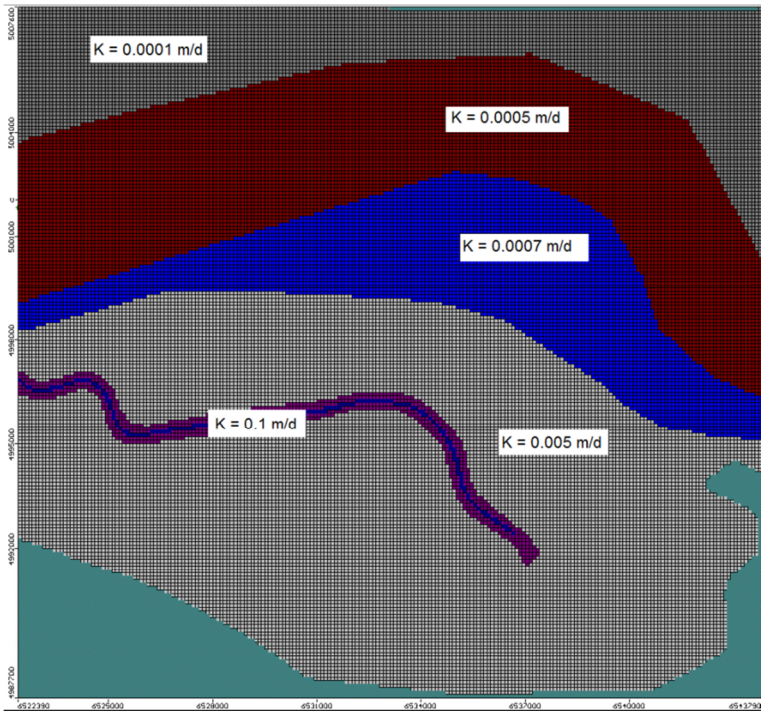


Slika 7.24 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema specifičnom koeficijentu uskladištenja vodonosnih naslaga

Osim utjecaja promjene parametara vodonosnih naslaga, provedena je i analiza utjecaja promjene parametara krovinskog sloja. Hidraulička vodljivost krovinskog sloja mijenjana je od 0.05 m/d do 0.0001 m/d. Rezultati su prikazani na slici 7.25. Analiza je pokazala da je model osjetljiv i na povećavanje i na smanjivanje hidrauličke vodljivosti krovinskih naslaga. Testiran je i slučaj sa zonama različite vrijednosti hidrauličke vodljivosti koje su prikazane na slici 7.26. Vrijednosti su smanjivane prema sjeveru kao i u vodonosnim naslagama. Iako vrijednosti u ovim zonama variraju za više od jednog reda veličine rezultat je sličan rezultatu koji je dobiven s primjenom jedne zone od 0.001 m/d (slika 7.6a). No primjenom različitih zona hidrauličke vodljivosti u krovinskim naslagama postignuto je bolje poklapanje mjerenih i izračunatih vrijednosti za piezometre udaljenije od Save (SPB-4 i SPB-6) te je stoga ovakva zonacija usvojena u konačnoj verziji kalibriranog modela.



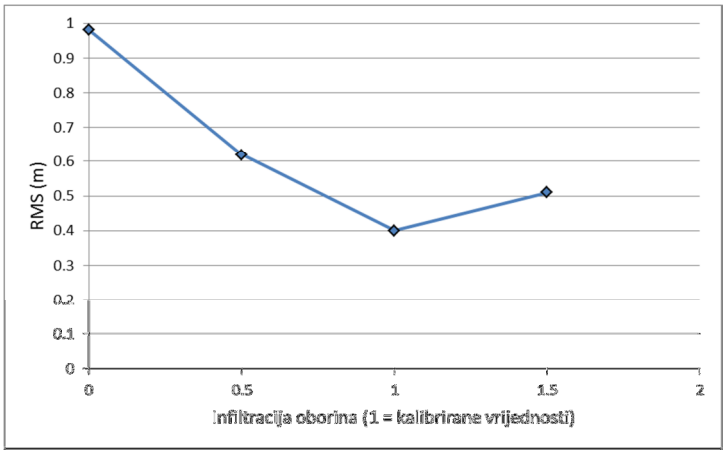
Slika 7.25 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema hidrauličkoj vodljivosti krovinskih naslaga



Slika 7.26 Različite zone hidrauličke vodljivosti u krovinskim naslagama

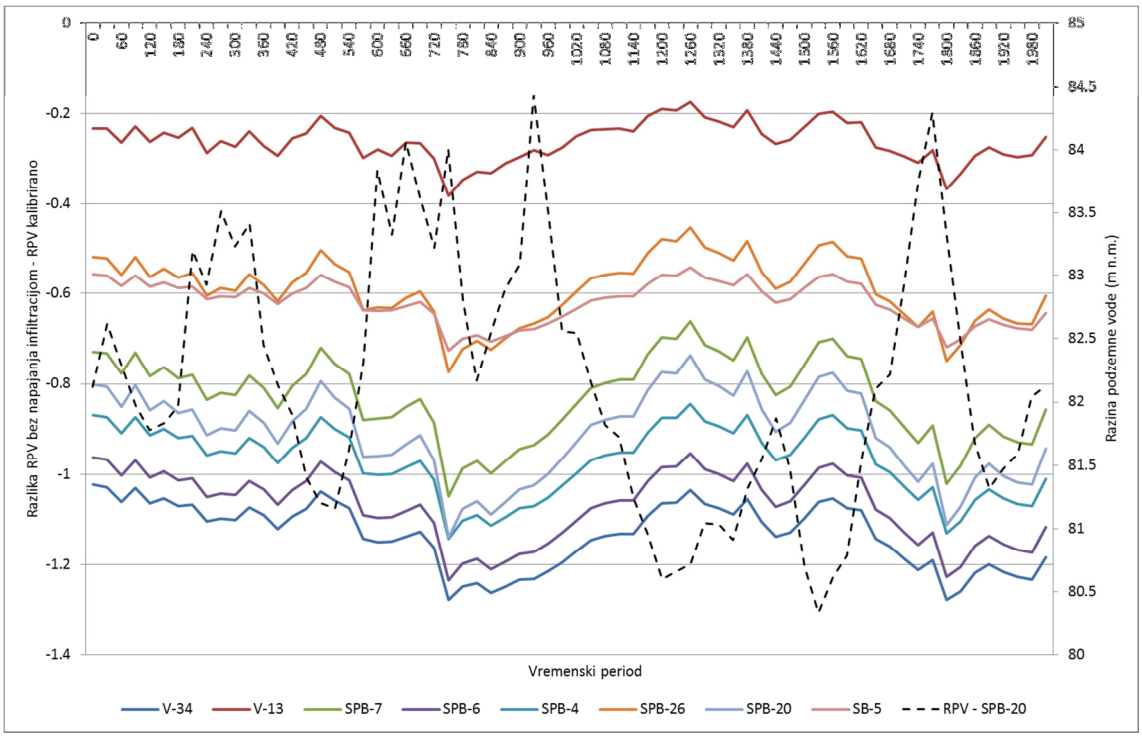
Utjecaj rubnih uvjeta na rezultate modela analiziran je na način da je provedena simulacija u kojoj su sve granice zadanog potencijala prikazane kao granice bez dotoka. RMS za tako provedenu simulaciju iznosio je 1.08 m, što je više nego dvostruko veća vrijednost od RMS-a kalibriranog modela (0.4 m). Također je napravljena simulacija u kojoj su na granicama zadanog potencijala zadane vrijednosti početnih uvjeta kroz cijelo razdoblje simulacije. RMS za tako provedenu simulaciju iznosio je 0.87 m. Ova analiza je pokazala da iako su granice modela izvan izravnog utjecaja crpljenja, način njihovog definiranja utječe na rezultate dobivene modelom.

Utjecaj promjene količine infiltracije oborina na konačni rezultat modela prikazan je na slici 7.27. Testirane su vrijednosti 0.5 i 1.5 od kalibriranih količina infiltracije. Analiza je pokazala da je model u manjoj mjeri osjetljiv na povećavanje, a u većoj na smanjivanje količine infiltracije oborina. Kroz kalibraciju su usvojene vrijednosti od 14% mjesečnih oborina za sve godine osim 2010., za koju su usvojene vrijednosti od 10%. Uz vodotok Bić zadana je zona s nižom količinom infiltracije od 10% mjesečnih oborina, a također su niže količine infiltracije (10%) zadane za ljetne mjesece (srpanj i kolovoz) na cijelom modeliranom području. Prosječna vrijednost ovako zadanih količina infiltracije za cijelo razdoblje simulacije iznosi oko 89 mm/god, te oko 71 mm/god na području Bića.



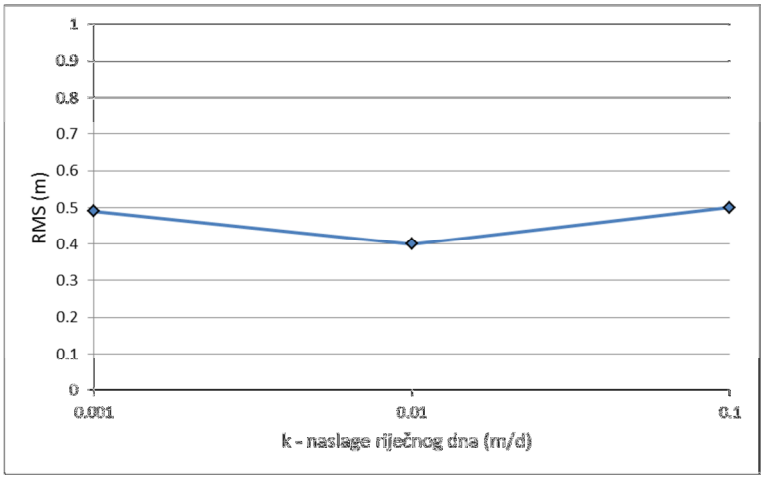
Slika 7.27 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema količini infiltracije

Napravljena je i simulacija bez napajanja infiltracijom oborina te su uspoređene razlike u dobivenim razinama podzemne vode s razinama dobivenim kalibriranim modelom. Na slici 7.28 prikazana je usporedba tih razlika na nekoliko piezometara. Primjećuje se da je razlika najveća na piezometrima koji su najudaljeniji od rijeke Save, a najmanja je na piezometru V-13 koji je najbliži rijeci. Na slici je prikazana i razina podzemne vode na piezometru SPB-20 za usporedbu te se može primijetiti da su razlike veće u razdobljima kada su razine vode najviše, a u razdobljima niskih voda razlike su najmanje. Razlog za to je što su u razdobljima visokih voda i količine napajanja infiltracijom oborina najveće, te tada najviše dolazi do izražaja ako ih se ne uzme u obzir.



Slika 7.28 Razlike u razinama podzemne vode s i bez infiltracije uspoređeno s razinom podzemne vode na piezometru

Kao što je već spomenuto u poglavlju o kalibraciji modela, utjecaj rijeke Save je, zbog nedovoljnog broja podataka, definiran kroz proces kalibracije modela. Osjetljivost modela na promjenu hidrauličke vodljivosti vodonosnika i krovinskih naslaga u neposrednoj okolici rijeke, te hidrauličke vodljivosti naslaga riječnog dna analizirana je u sklopu kalibracije modela. Osim što su promjene ovih parametara utjecale na RMS, utjecale su i na strujnu sliku, koja je u slučaju prevelikog smanjenja hidrauličke vodljivosti naslaga na granici s rijekom postala nerealna. Na slici 7.29 prikazan je utjecaj promjene hidrauličke vodljivosti naslaga riječnog dna na rezultat. Testirane su vrijednosti za jedan red veličine manje i veće od kalibrirane, i pokazalo se da u jednakoj mjeri utječu na rezultat. Kroz kalibraciju je također analizirana i osjetljivost modela na promjenu položaja korita Save. U slučaju kada je rijeka Sava bila cijelom tokom položena u vodonosne naslage izračunate razine podzemnih voda bile su niže od mjerenih za oko 1 do 1.5 m, te se nije mogao postići bolji rezultat.

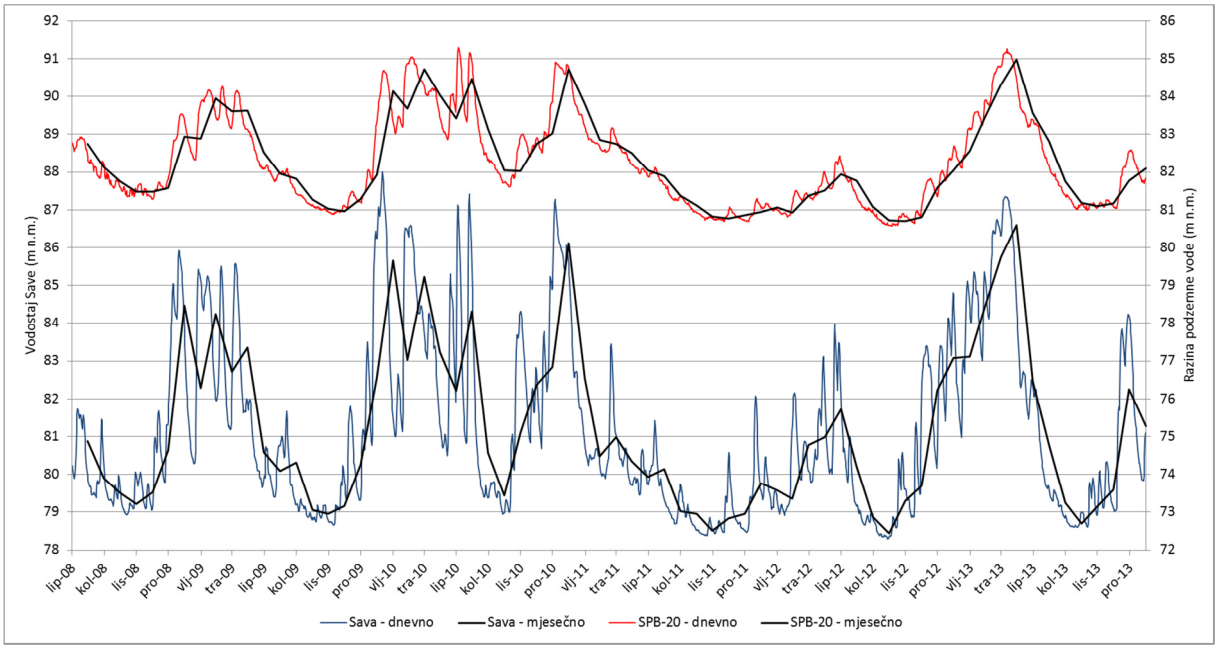


Slika 7.29 Odnos srednjeg kvadratnog odstupanja (RMS) prema hidrauličkoj vodljivosti naslaga riječnog dna

Iz provedene analize osjetljivosti može se zaključiti da je model najosjetljiviji na smanjivanje količine infiltracije, na način definiranja rubnog uvjeta rijeke te na promjene uvjeta na granicama domene modela. Ostali parametri ne utječu znatnije na rezultat ako se mijenjaju u realnim rasponima.

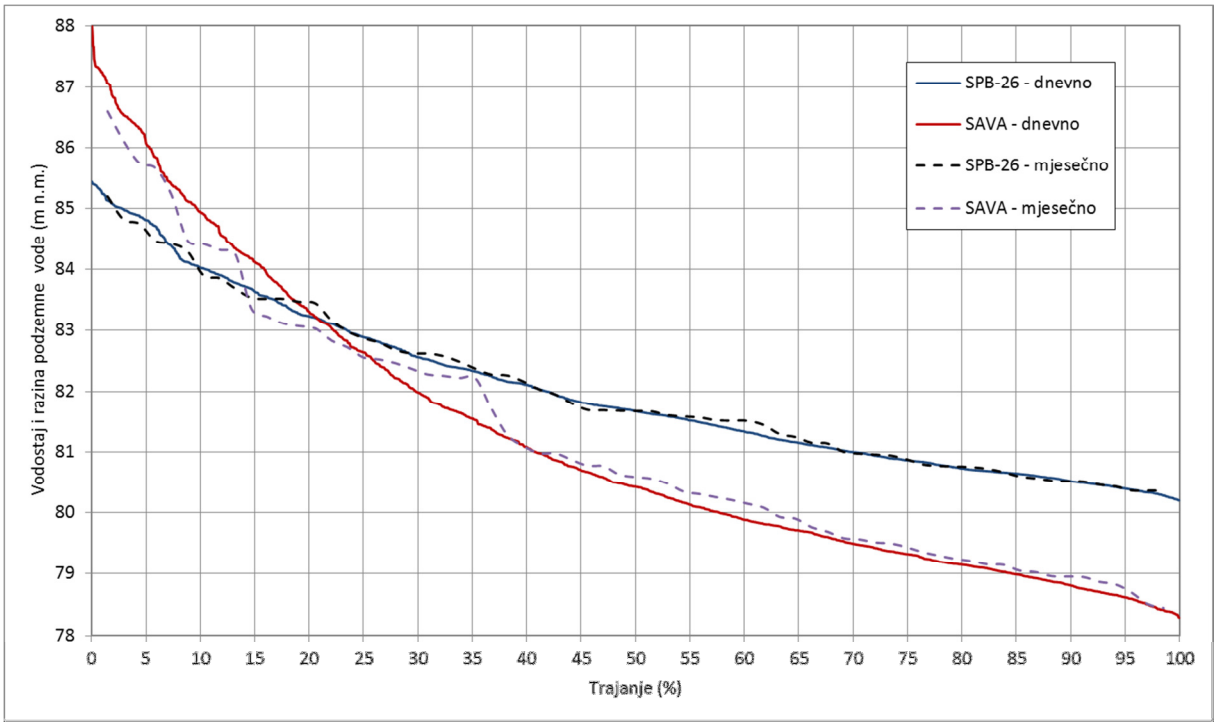
U sklopu analize nesigurnosti ispitan je utjecaj mjesečnog vremenskog koraka. Kao što je već prethodno opisano, za potrebe zadavanja rubnih uvjeta, kao i za kalibraciju modela korištene su osrednjene mjesečne vrijednosti razina podzemne vode i vodostaja rijeke Save. Ta odluka je donesena jer se smatralo da osrednjavanje neće bitno utjecati na konačni rezultat modela, a korištenje mjesečnog vremenskog koraka značajno skraćuje vrijeme potrebno za provođenje računalne simulacije. Na slici 7.30 prikazane su dnevne i osrednjene mjesečne razine podzemne vode i vodostaji rijeke Save. Može se vidjeti da se osrednjavanjem razine

podzemne vode na piezometru u manjoj mjeri gube maksimalne i minimalne razine te da osrednjene razine relativno dobro prate dnevne razine. U slučaju vodostaja rijeke Save osrednjavanjem se gubi i do oko 2 m maksimuma i minimuma. Pošto su pikovi koji se gube relativno kratkog trajanja, a vrijeme simulacije je relativno dugačko, pretpostavilo se da se osrednjavanjem ne utječe znatno na konačni rezultat.



Slika 7.30 Usporedba osrednjenih mjesečnih i dnevnih razina podzemne vode i vodostaja rijeke Save

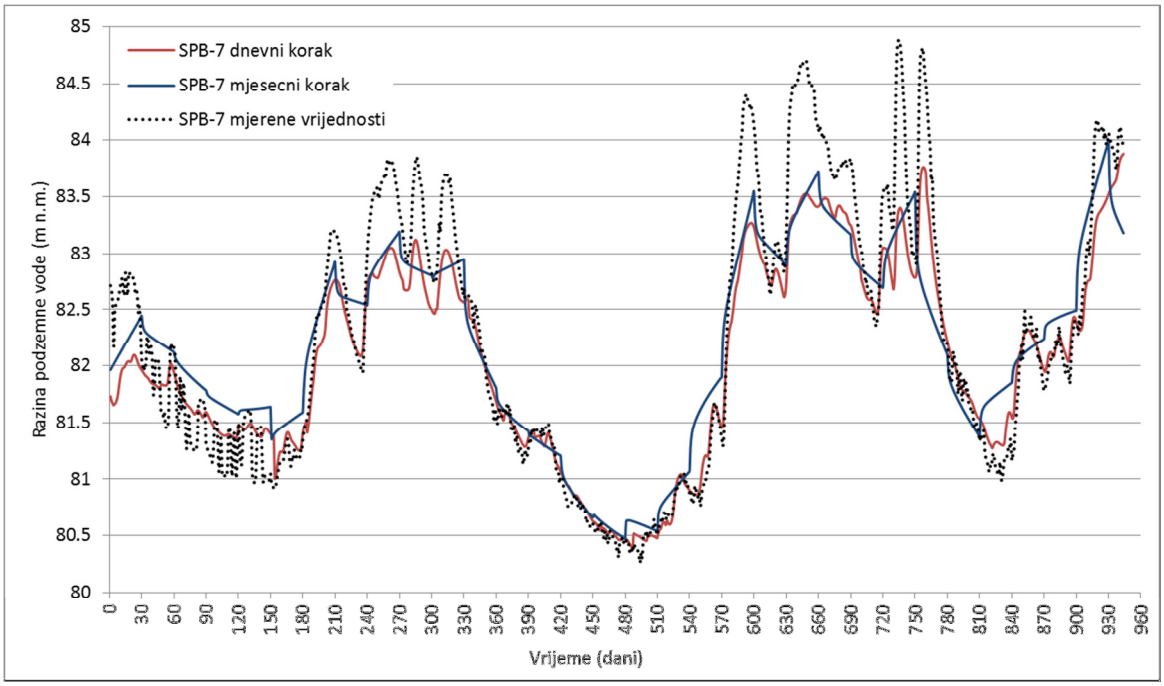
Na slici 7.31 prikazana je usporedba krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode s dnevnim i osrednjenim mjesečnim podacima u razdoblju simulacije (lipanj 2008 – prosinac 2013). Krivulje trajanja za piezometar napravljene s osrednjenim mjesečnim i dnevnim podacima se dobro poklapaju, dok se krivulje rijeke Save razlikuju pri vodostajima višim od 81 m n.m. Usprkos tome postotak vremena u kojem je vodostaj Save iznad razine podzemne vode prema mjesečnim i dnevnim podacima bitno se ne razlikuje, u prvom slučaju iznosi 15%, a u drugom 20%.



Slika 7.31 Usporedba krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razine podzemne vode s dnevnim i osrednjenim mjesečnim podacima (lipanj 2008 – prosinac 2013)

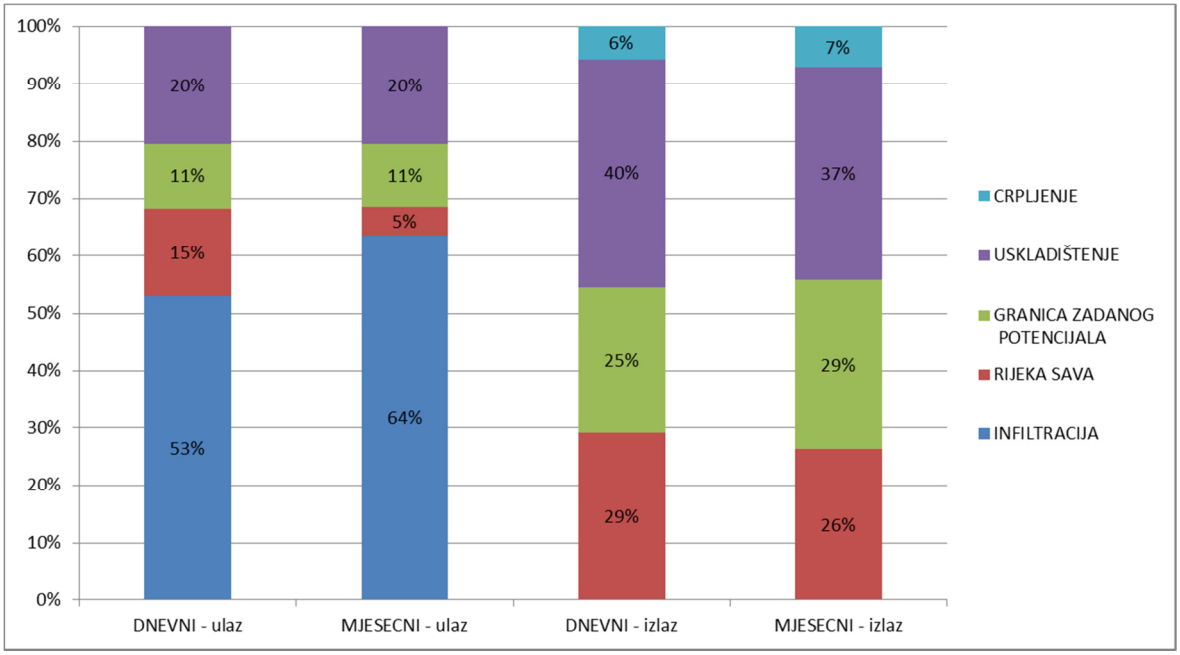
Da bi se provjerilo u kojoj mjeri osrednjavanje vodostaja Save utječe na konačni rezultat napravljena je simulacija u kojoj su uneseni dnevni vodostaji rijeke Save i dnevne razine podzemne vode. Uvjeti na vanjskim granicama modela i crpne količine su ostavljeni na mjesečnim razinama. Ova simulacija napravljena je za prve dvije i pol godine (od lipnja 2008. do prosinca 2010.) kalibriranog razdoblja. Srednje kvadratno odstupanje (RMS) za jedanaest piezometara na području crpilišta, tako postavljenog modela iznosilo je 0.46 m, a normalizirano srednje kvadratno odstupanje iznosilo je 8.7%. Srednje kvadratno odstupanje s mjesečnim korakom je za iste piezometre, u istom razdoblju iznosilo 0.54 m, a normalizirano srednje kvadratno odstupanje 10%. Pošto je ova simulacija napravljena prije konačne kalibracije modela, statistički pokazatelji navedeni za simulaciju s mjesečnim korakom u maloj mjeri se razlikuju od onih prikazanih u prethodnom poglavlju.

Na slici 7.32 prikazane su izračunate razine podzemne vode dobivene s mjesečnim i dnevnim vremenskim korakom te mjerene razine. Razine dobivene s mjesečnim korakom se generalno podudaraju s razinama dobivenim s dnevnim korakom, ali dnevnim korakom se bolje prate kratkotrajna kolebanja razine podzemne vode. Može se pretpostaviti da ova kratkotrajna kolebanja ne utječu značajno na bilancu podzemne vode, te da je za određivanje značajki napajanja vodonosnog sustava model u kojem se koriste osrednjene mjesečne razine dovoljno precizan.



Slika 7.32 Usporedba izračunatih razina podzemne vode s mjesečnim i dnevnim vremenskim korakom

Na slici 7.33 prikazane su bilance mase dobivene s dnevnim i mjesečnim vremenskim korakom izražene kao postotak od ukupnog ulaza ili izlaza. Najveće razlike zapažaju se u količinama dotjecanja i otjecanja u rijeku Savu. Kod modela s dnevnim korakom dotjecanje iz rijeke je za 10% veće od dotjecanja s mjesečnim korakom, a otjecanje u rijeku je veće za 3%. U ukupnoj bilanci u modelu s dnevnim korakom nešto manje vode se izgubi u rijeci nego u modelu s mjesečnim korakom. Ta razlika prema prikazanoj bilanci odlazi u uskladištenje vodonosnika ili otječe kroz istočnu granicu zadanog potencijala.



Slika 7.33 Usporedba bilance mase s dnevnim i mjesečnim vremenskim korakom

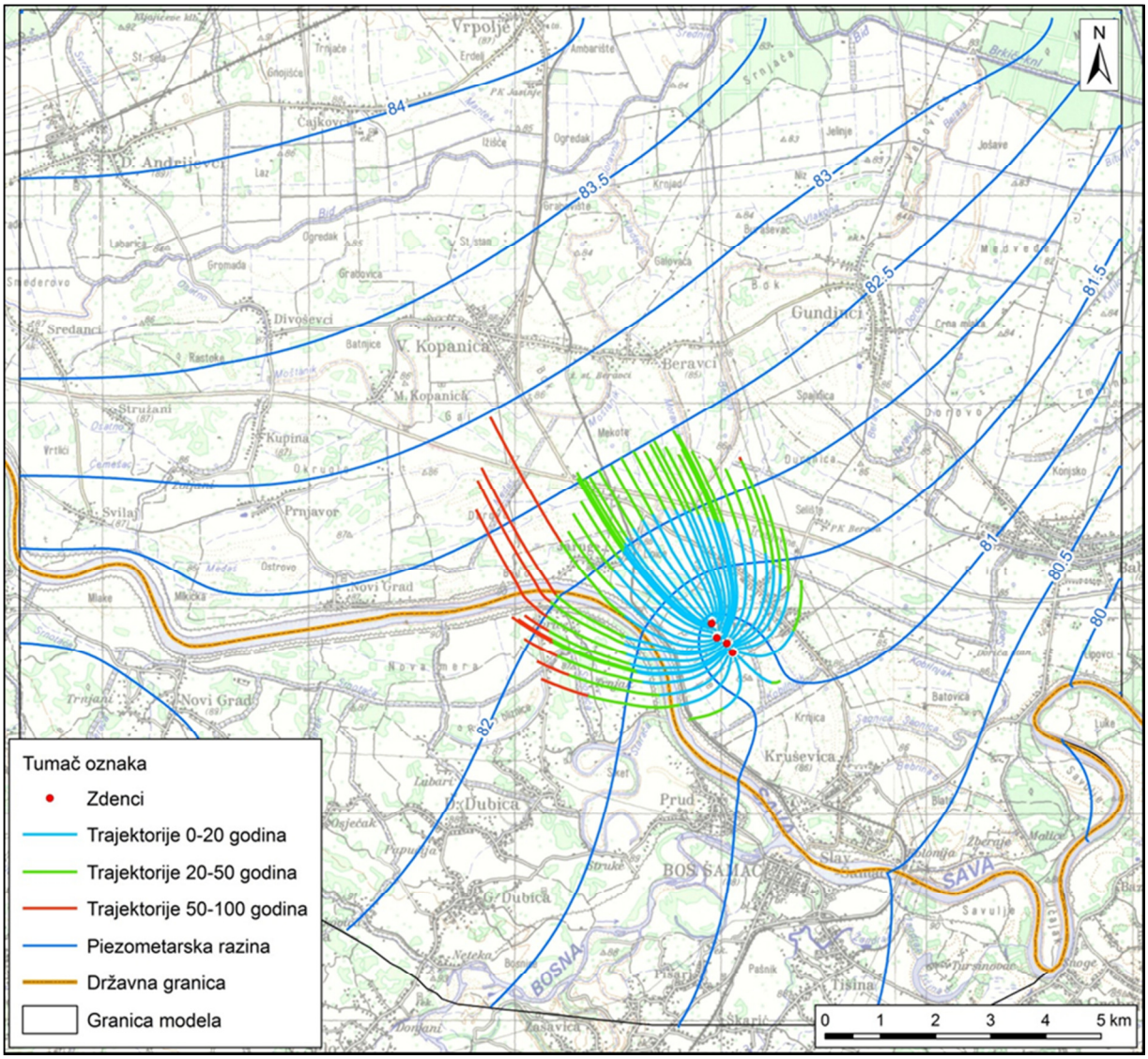
7.7. Analiza vremena zadržavanja vode u podzemlju

Nakon provedene kalibracije i dobivanja prihvatljivih rezultata napravljena je stacionarna simulacija strujanja podzemne vode u uvjetima srednjih voda zabilježenim u razdoblju od sredine 2008. do kraja 2013. godine. Simulacija je rađena s ciljem određivanja okvirnog vremena zadržavanja vode u podzemlju. Dobiveno vrijeme zadržavanja je hipotetsko, jer stacionarna simulacija pretpostavlja pravocrtno gibanje čestice, dok će u stvarnosti čestica mijenjati smjer gibanja ovisno o promjeni smjera toka podzemne vode.

U okviru stacionarne simulacije razmatran je slučaj s prosječnim crpljenjem od 200 l/s iz četiri zdenca na crpilištu Sikirevci, kakvo je bilo u razdoblju kalibracije. Vrijeme zadržavanja podzemne vode u saturiranoj zoni vodonosnika na putu prema zdencima definirano je modelom praćenja čestica. Za simulacije trasiranja čestica korišten je prethodno opisani MODPATH program (Pollock, 1994). Efektivna poroznost vodonosnika u modelu je pretpostavljena u iznosu od 20%. Ova vrijednost procijenjena je na temelju literaturnih podataka prema kojima se efektivna poroznost pijeska i šljunka kreće od 0.15 do 0.35 (Domenico & Schwartz, 1990; Sara, 2003; Walton, 1987). Na osnovi rezultata modela toka i veličine efektivne poroznosti izračunata je raspodjela efektivnih brzina toka podzemne vode.

Rezultati provedene stacionarne simulacije toka podzemne vode prikazani su na slici 7.34. Simulacija je provedena za razdoblje od 100 godina. Za količinu infiltracije oborina uzeta je prosječna količina dobivena kroz kalibraciju modela, koja iznosi oko 90 mm/god odnosno 70 mm/god na području oko Biđa. Čestice su upuštene u zdence te su praćene unatrag do mjesta ulaska u vodonosnik. Na slici su prikazane simulirane trajektorije za 20, 50 i 100-godišnje zadržavanje vode u vodonosniku. Nakon što se procijedi iz krovine u vodonosnik, dio vode se kreće minimalno 50 godina u horizontalnom toku kroz vodonosne naslage prema crpljenim zdencima. Dio vode koji se infiltrira na većoj udaljenosti od crpilišta putuje više od 100 godina prema zdencima.

Dobiveno vrijeme zadržavanja slaže se s rezultatima dobivenim analizom sadržaja tricija u podzemnoj vodi. Vrijednosti tricija iz podzemne vode ukazuju na vodu stariju od 1952. godine, odnosno na dugo vrijeme zadržavanja.



Slika 7.34 Rezultati stacionarne simulacije trasiranja čestica u slučaju crpljenja 200 l/s

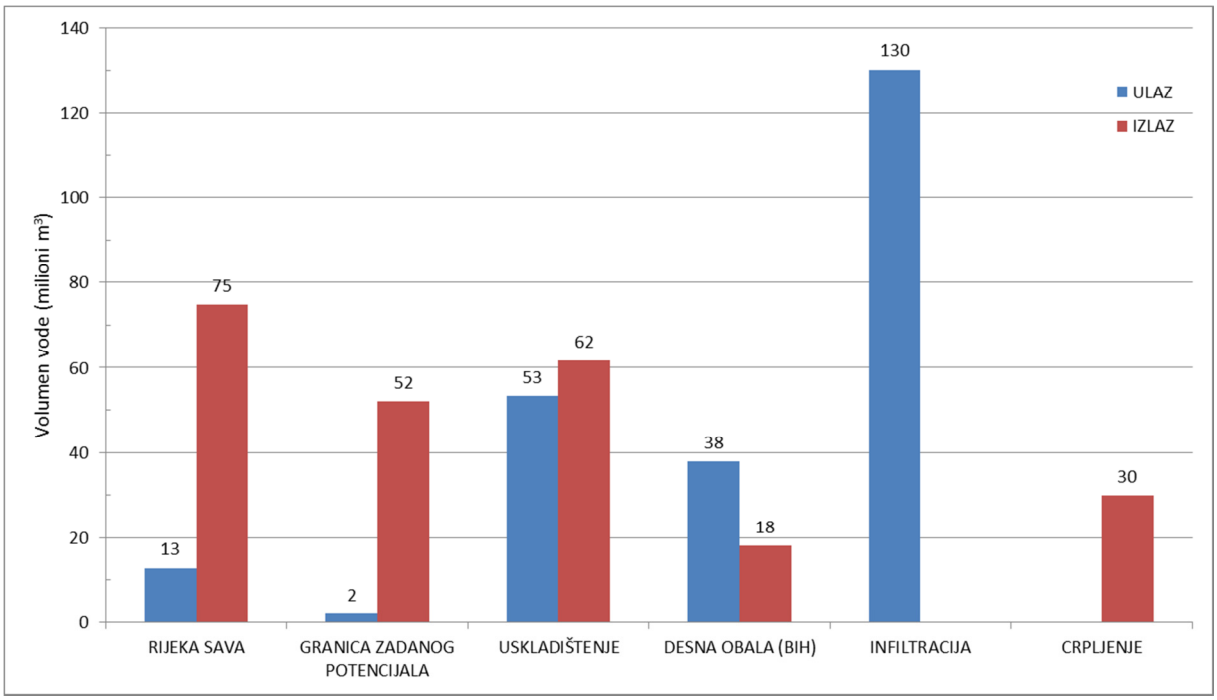
8. NAPAJANJE VODONOSNOG SUSTAVA

Glavne značajke napajanja vodonosnog sustava određene su kroz izradu konceptualnog modela. Pokazalo se da infiltracija oborina kroz polupropusne krovinske naslage predstavlja glavni izvor napajanja, dok rijeka Sava samo povremeno napaja vodonosnik. Izrada i kalibracija numeričkog modela omogućila je detaljnije analiziranje napajanja te određivanje količina vode koje dotječu u modelirani vodonosni sustav iz različitih izvora. Područje modela podijeljeno je u dvije zone: lijeva (HR) i desna (BiH) obala rijeke Save, te je analizirana bilanca mase za lijevu zonu za cijelo razdoblje simulacije te u različitim hidrološkim uvjetima.

Na slici 8.1 prikazana je ukupna bilanca mase za cijelo razdoblje simulacije. Ako se oduzmu izlazne od ulaznih količina vode za svaki čimbenik prikazane bilance, bilanca se može izraziti jednadžbom:

$$I + Q_{BIH} = Q_{SAVA} + Q_{CH} + \Delta S + Q_{CRPLJENJE}$$

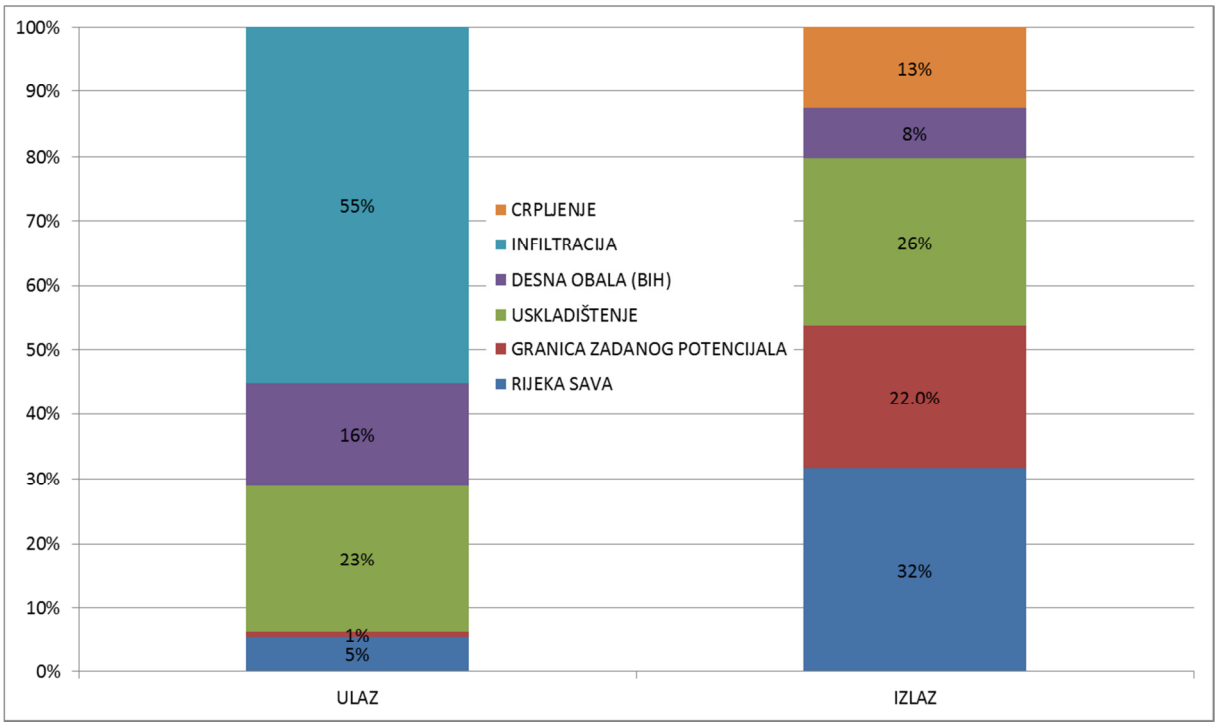
gdje je: I – infiltracija oborina; Q_{BIH} – dotjecanje ispod Save iz BiH; Q_{SAVA} – otjecanje u Savu; Q_{CH} – otjecanje kroz istočnu granicu zadanog potencijala; ΔS – promjena u uskladištenju; $Q_{CRPLJENJE}$ – iscrpljena količina vode. Izraženo u milionima m^3 vode gornja jednadžba se može pisati kao: 130 + 20 = 62 + 50 + 9 + 30 = 150



Slika 8.1 Bilanca mase vodonosnog sustava na lijevoj strani rijeke Save (lipanj 2008 – prosinac 2013)

U navedenoj jednadžbi 87% ulaza čini infiltracija oborina, a preostalih 13% dotjecanje ispod rijeke Save. Kako ne postoje podaci o razinama podzemne vode s desne strane rijeke Save u susjednoj BiH, taj dio domene modela nije se mogao iskalibrirati. Stoga se količine dotjecanja ispod korita Save trebaju uzeti s rezervom. Najveća količina otjecanja podzemnih voda odvija se u rijeku Savu te kroz istočnu granicu zadanog potencijala. Na crpljenje podzemne vode troši se 23% od ukupne količine infiltracije. Za očekivati je da će se povećanjem crpnih količina smanjiti otjecanje podzemnih voda u rijeku Savu.

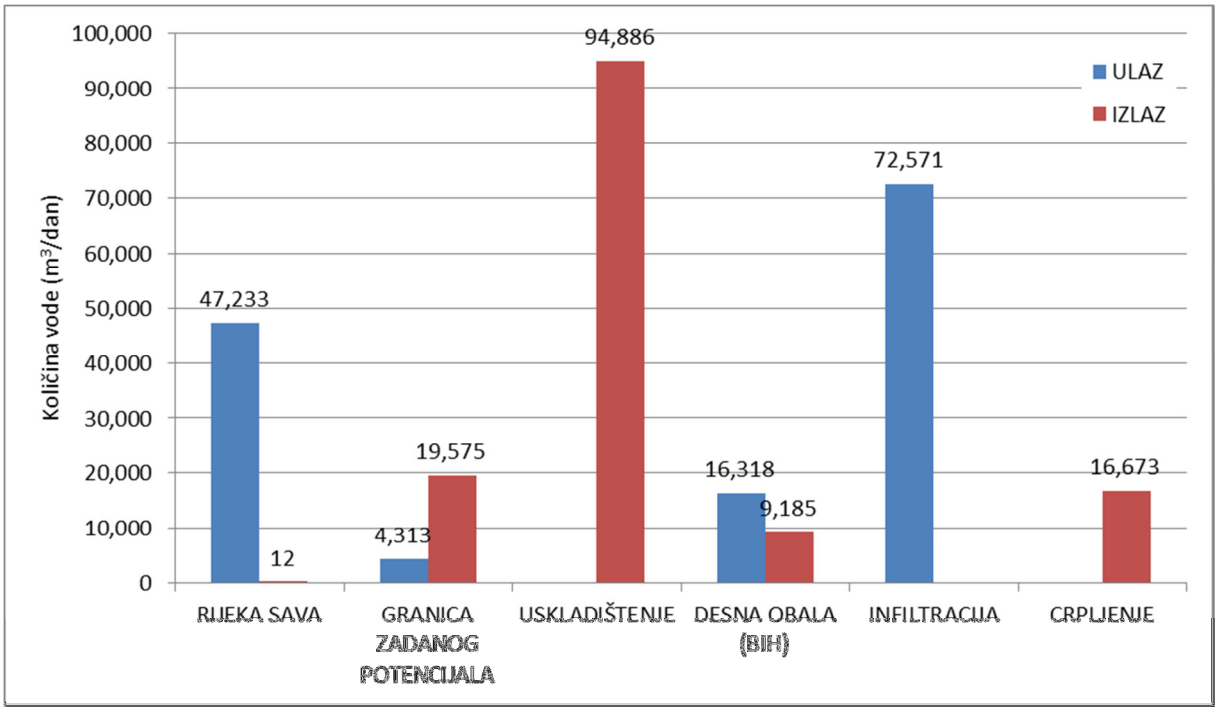
Na slici 8.2 prikazana je bilanca mase izražena u postotcima za svaki čimbenik vodne bilance. Ukupni volumen ulaznih i izlaznih količina vode u modeliranom razdoblju iznosio je oko 236 miliona m^3. Infiltracija oborina iznosi 55% od ukupnog ulaza dok dotjecanje iz rijeke Save čini samo 5% ukupnog ulaza. Otjecanje u rijeku čini oko 30% ukupnog izlaza. Ovakva bilanca slaže se s rezultatima analiza stabilnih izotopa kisika i vodika, koje su pokazale da podzemna voda ima meteorsko porijeklo. Neposredni utjecaj rijeke se u izotopnom sastavu osjetio samo na bušotinama koje se nalaze u njezinoj neposrednoj blizini.



Slika 8.2 Bilanca mase vodonosnog sustava na lijevoj strani rijeke Save izražena u postotcima (lipanj 2008 – prosinac 2013)

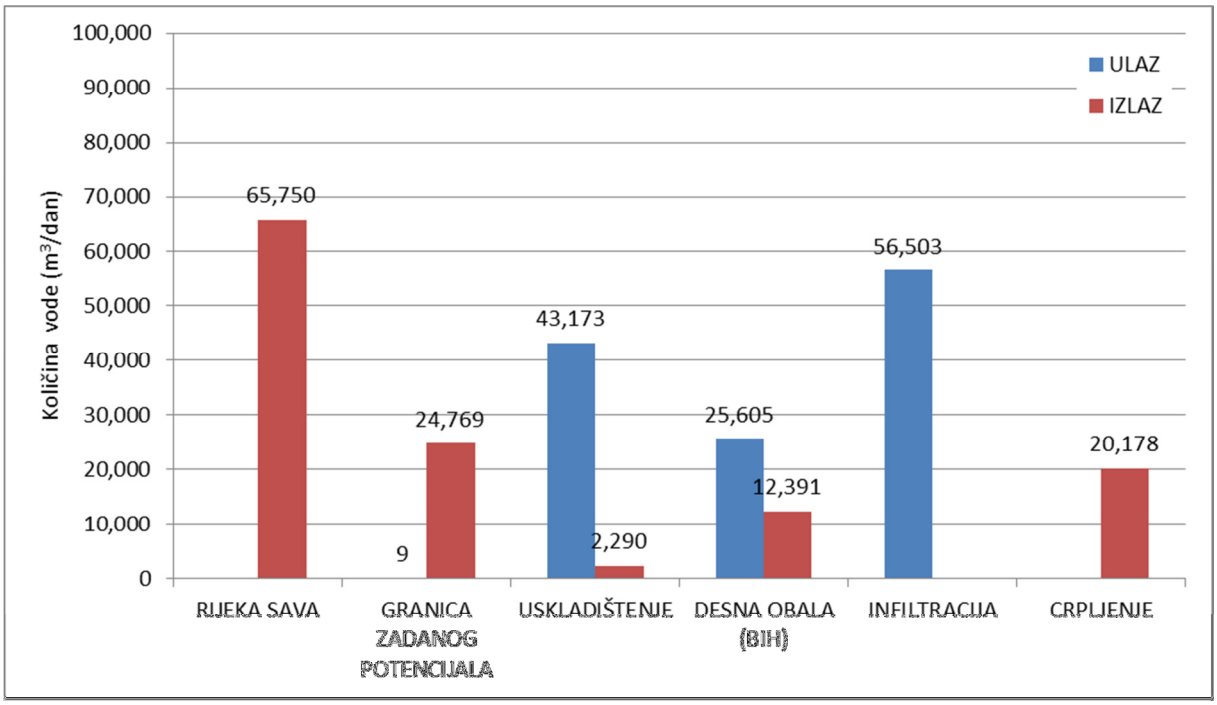
Da bi se dobio uvid u promjene količina napajanja u različitim hidrološkim uvjetima analizirane su bilance za odabrane visoke, srednje i niske vode (slika 8.3, 8.4 i 8.5). Količine vode izražene su u m^3/dan. U razdoblju visokih voda (slika 8.3) rijeka Sava sudjeluje s 34%, a

infiltracija oborina s 52% ukupnog ulaza. Veći dio izlaza u ovom razdoblju odlazi u uskladištenje (68%).



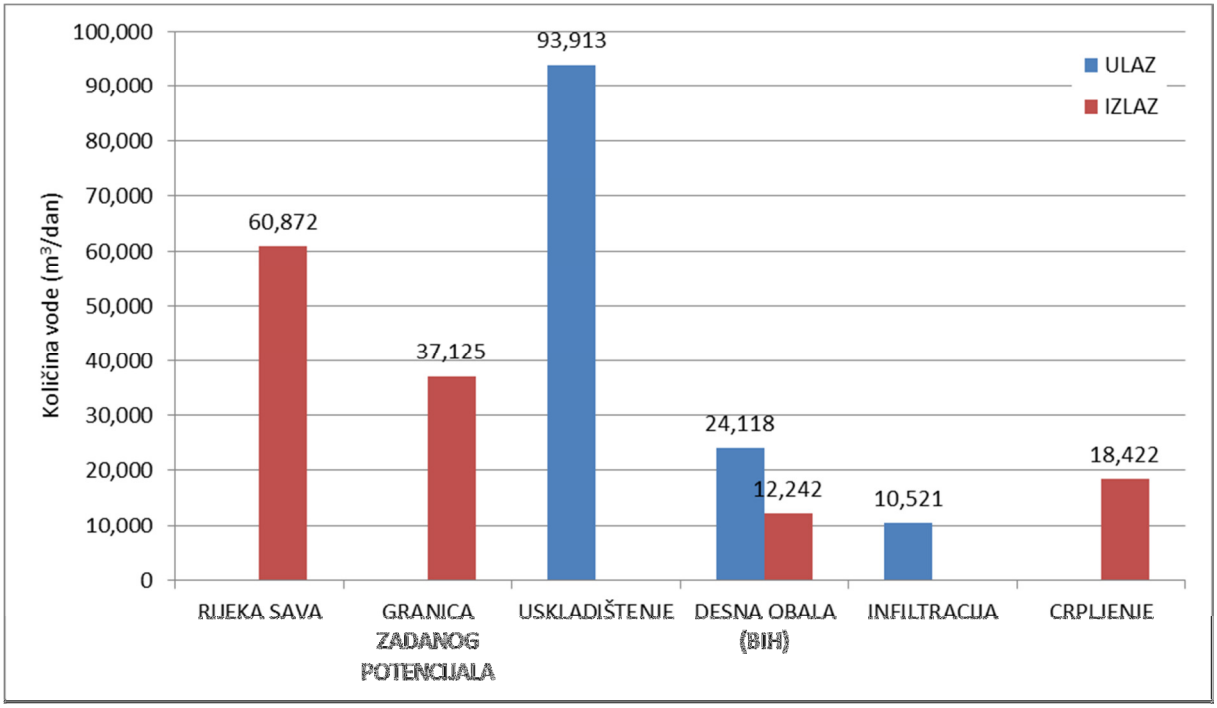
Slika 8.3 Bilanca za visoke vode (korak 930)

U razdoblju srednjih voda (slika 8.4) glavni izvor napajanja je infiltracija oborina s 45%, a slijedi uskladištenje s 34%. Dotjecanje ispod rijeke s desne strane iznosi 20%, dok otjecanje na desnu stranu iznosi 10%. Veći dio izlaza odlazi u rijeku Savu (52%).



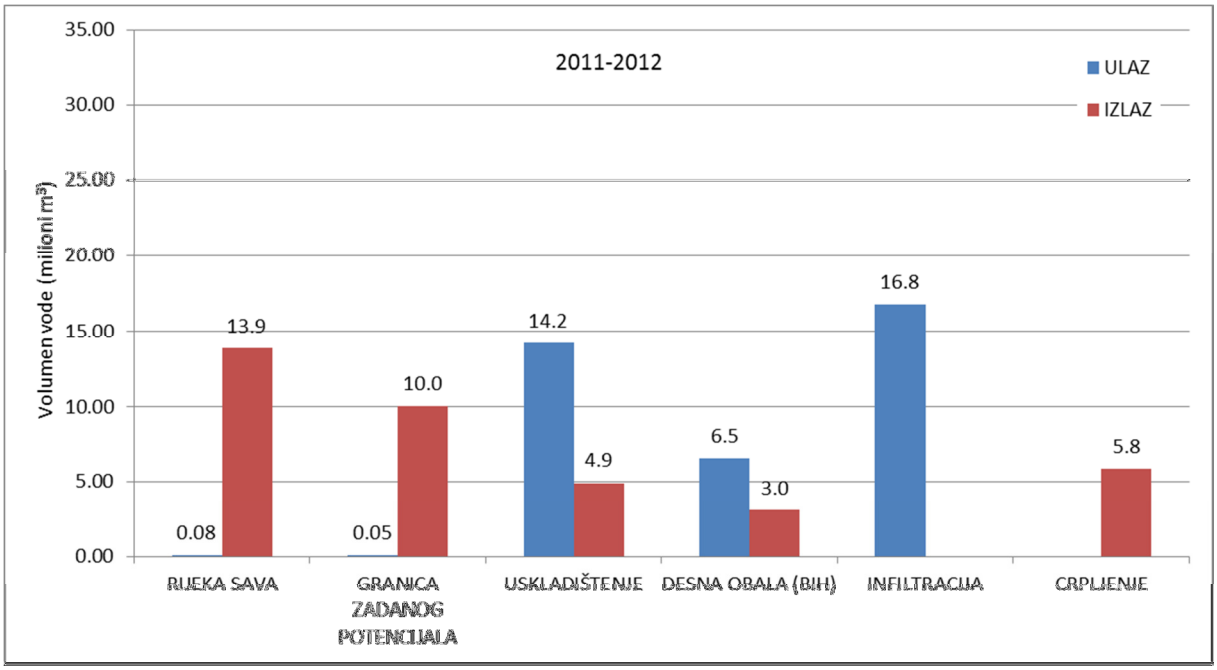
Slika 8.4 Bilanca za srednje vode (korak 1830)

U razdoblju niskih voda (slika 8.5) glavni izvor napajanja ostvaruje se iz uskladištenja vodonosnika, ono iznosi 73% od ukupnog ulaza. Infiltracija oborina iznosi 8%, a dotjecanje s desne strane 19%. Otjecanje na desnu stranu iznosi 10%. I u ovom slučaju veći dio izlaza otječe u rijeku Savu (47%), a 30% otječe kroz istočnu granicu zadanog potencijala.



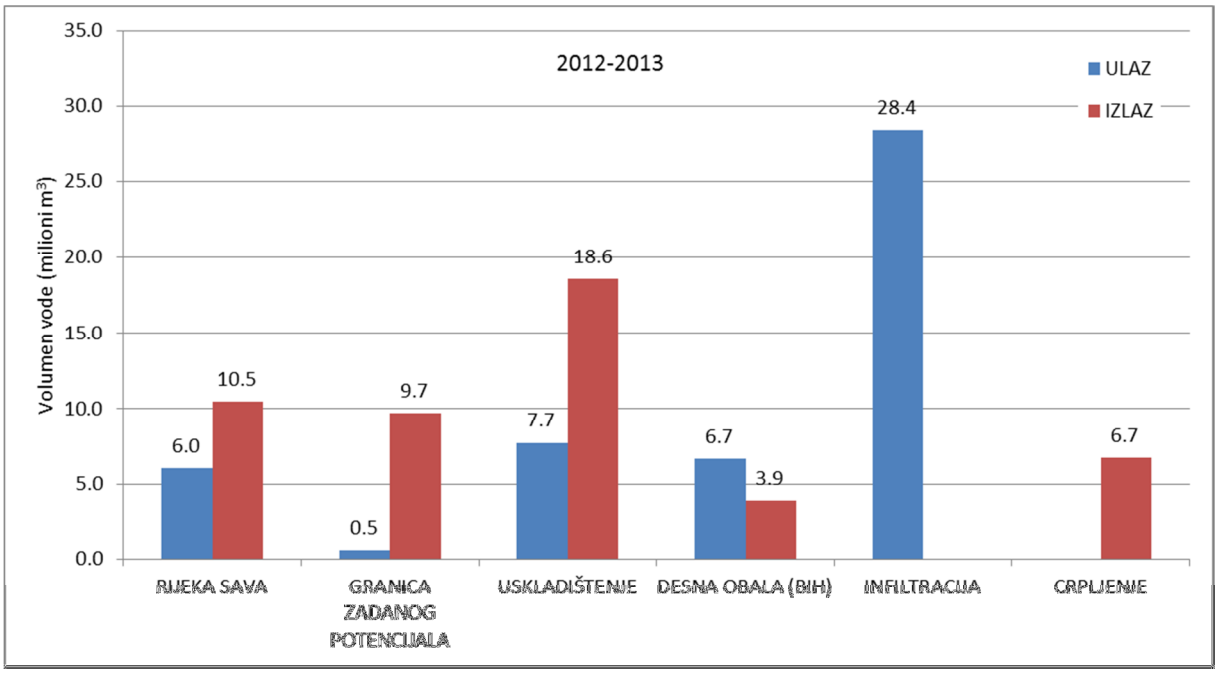
Slika 8.5 Bilanca za niske vode (korak 1200)

Bilanca mase napravljena je i za sušnu i vlažnu hidrološku godinu (slika 8.6 i 8.7) da bi se prikazao moguć utjecaj promjene klimatskih uvjeta na dugoročno napajanje vodonosnika. Količine su prikazane kao volumen vode u milionima m^3. U sušnoj godini infiltracija sudjeluje s 45% ulaza, uskladištenje s 38%, dok ispod rijeke dotječe 17% ukupnog ulaza. Veći dio vode otječe u Savu (37%) te kroz istočnu granicu zadanog potencijala (27%). S ovakvom bilancom slažu se i krivulje trajanja vodostaja Save i razine na piezometru prikazane na slici 6.8. Usporedba krivulja pokazuje da je vodostaj Save samo 10% vremena bio iznad razine podzemne vode.



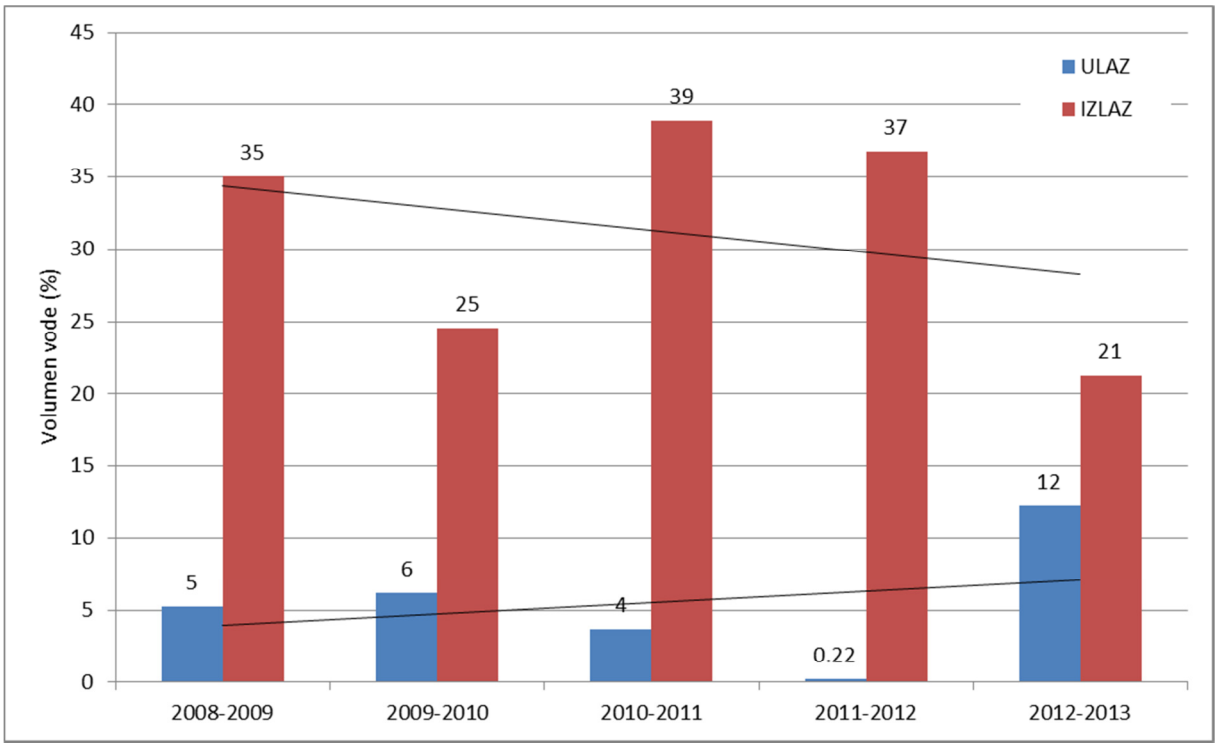
Slika 8.6 Bilanca za sušnu hidrološku godinu (rujan 2011 – kolovoz 2012)

U vlažnoj godini infiltracija je dominantna s 57% ulaznih količina, slijedi uskladištenje s 16% te rijeka Sava s 12%. Od izlaznih količina najviše vode odlazi u uskladištenje vodonosnika (38%), a u rijeku Savu i kroz istočnu granicu zadanog potencijala odlazi oko 20%. Usporedba krivulja trajanja (slika 6.9) pokazala je da je vodostaj Save oko 35 do 45% vremena bio iznad razine podzemne vode. Otjecanje ispod rijeke sudjeluje s približno istim postotkom (8%) i u vlažnim i u sušnim uvjetima, a dotjecanje se kreće od 14% u vlažnoj do 17% u sušnoj godini.



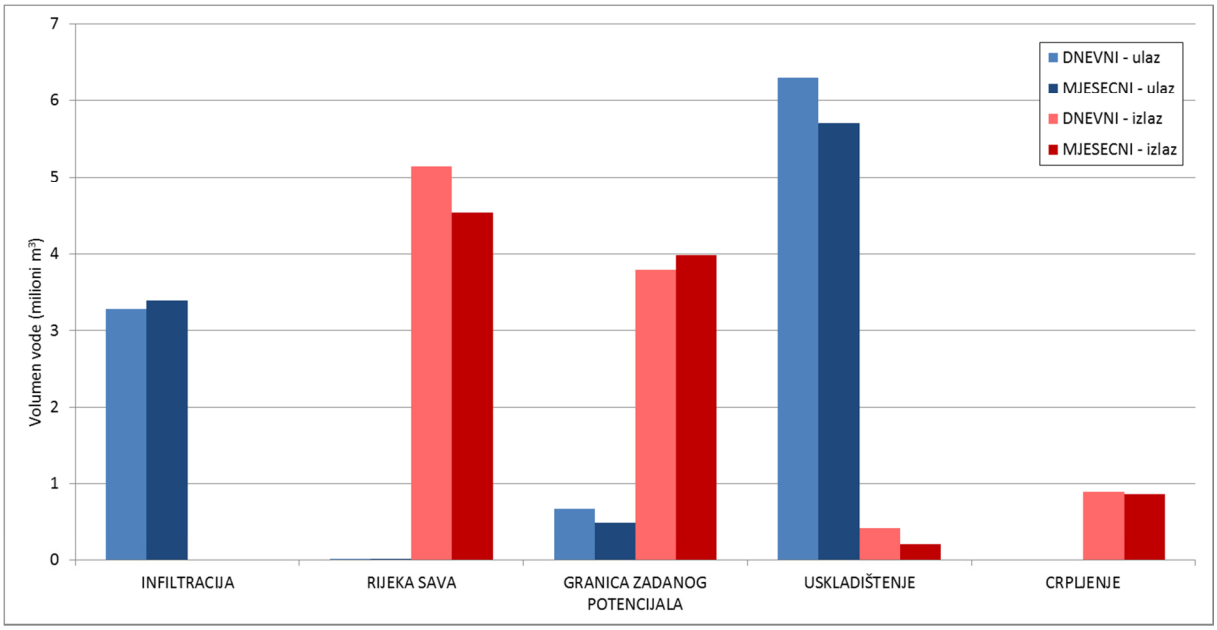
Slika 8.7 Bilanca za vlažnu hidrološku godinu (rujan 2012 – kolovoz 2013)

Pošto je rijeka Sava važan element bilance vode, na slici 8.8 su prikazane ulazne i izlazne količine vode iz rijeke kroz hidrološke godine. Količine su prikazane kao postotak od ukupnog ulaza ili izlaza. Napajanje iz rijeke pokazuje generalni trend rasta, dok se otjecanje u rijeku smanjuje. Teško je odrediti u kojoj mjeri na ovaj trend utječe crpljenje podzemne vode, jer ono predstavlja samo oko 15% izlaznih količina vode. Velik utjecaj na bilancu imaju klimatske prilike, pa ako se izuzme vlažna hidrološka godina 2012-2013 dolazi do promjene oba trenda u suprotni. U tom slučaju napajanje iz rijeke pokazuje trend pada, a otjecanje u rijeku trend rasta. Za pouzdanije određivanje trendova potreban bi bio puno dulji vremenski niz podataka.



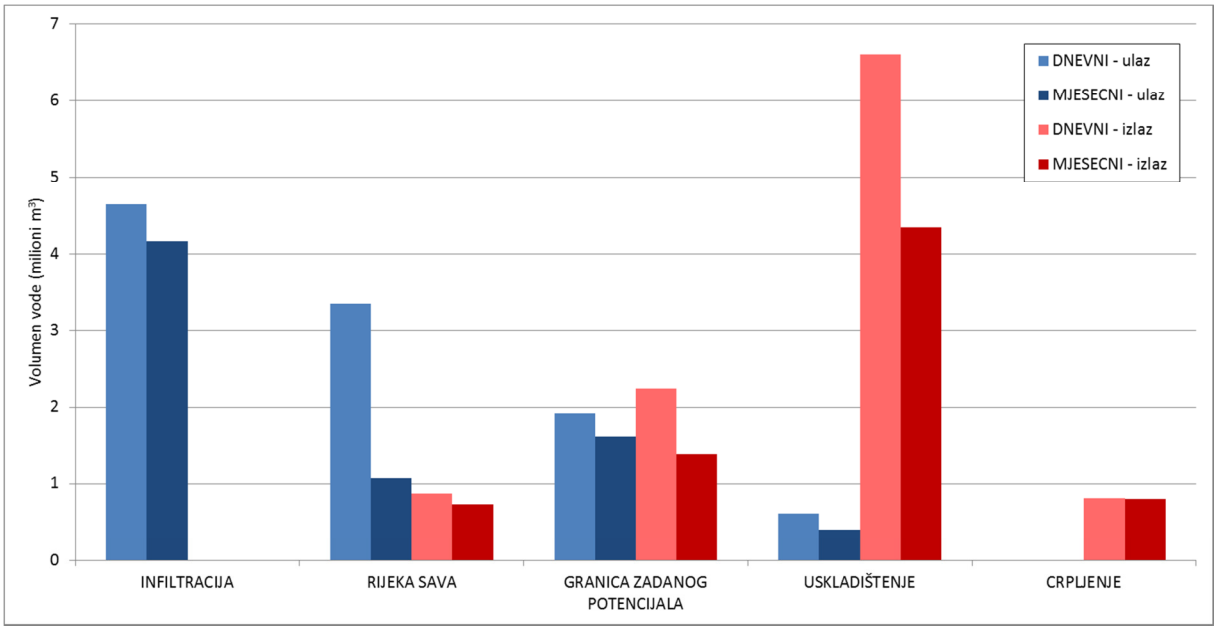
Slika 8.8 Ulazne i izlazne količine vode iz rijeke Save po hidrološkim godinama

U prethodnom poglavlju opisana je analiza nesigurnosti korištenja mjesečnog vremenskog koraka. Analiza je pokazala da korištenje mjesečnog koraka u najvećoj mjeri utječe na bilancu vezanu uz rijeku Savu. Korištenjem mjesečnog koraka dolazi do podcjenjivanja količine napajanja vodonosnika iz rijeke Save. Napajanje iz rijeke Save je najintenzivnije u razdoblju visokih voda, a dreniranje u Savu najveće je u razdoblju niskih voda. Stoga je za usporedbu izdvojeno razdoblje niskih i visokih voda te su napravljene bilance s mjesečnim i dnevnim vremenskim korakom. Na slici 8.9 je prikazana bilanca mase za razdoblje od dva mjeseca niskih voda (korak 450 do 510 sa slike 7.32). Na slici se može vidjeti da nema velikih odstupanja između vrijednosti dobivenih s dnevnim i mjesečnim vremenskim korakom.



Slika 8.9 Bilanca mase za razdoblje od dva mjeseca niskih voda za simulaciju s dnevnim i mjesečnim vremenskim korakom

Na slici 8.10 je prikazana bilanca mase za razdoblje od dva mjeseca visokih voda (korak 630 do 690 sa slike 7.32). Najveće razlike zapažaju se u količinama koje dolaze u vodonosnik iz rijeke Save. U simulaciji s dnevnim vremenskim korakom ove količine su oko tri puta veće nego u simulaciji s mjesečnim korakom. Također se zapažaju razlike u uskladištenju, kod dnevnog koraka u uskladištenje odlazi oko jedan i pol puta više vode.



Slika 8.10 Bilanca mase za razdoblje od dva mjeseca visokih voda za simulaciju s dnevnim i mjesečnim vremenskim korakom

9. RASPRAVA

Na istraživanom području već su izrađivani modeli toka podzemne vode (vidi poglavlje 6.1). Svim ovim modelima zajedničko je da se rijeka Sava smatrala glavnim izvorom napajanja vodonosnika, a zanemarivalo se obnavljanje podzemnih voda infiltracijom oborina, iako još prije izrade ovih modela Urumović (1977) ističe da infiltracija oborina predstavlja glavni izvor napajanja podzemnih voda. Prosječna godišnja evapotranspiracija na području istraživanja iznosi oko 620 mm (Zaninović et al., 2008), što je oko 82% prosječnih godišnjih oborina za tridesetogodišnje razdoblje (750 mm/god). Kroz kalibraciju modela dobivena je prosječna vrijednost infiltracije od 89 mm/god, što iznosi oko 12% od tridesetogodišnjeg prosjeka oborina (750 mm/god). Na taj način preostaje još 6% oborina koje se troše na površinsko otjecanje.

Urumović (1977) također ističe da rijeka Sava napaja vodonosni sustav samo pri visokim vodostajima. S ovom tvrdnjom se slažu i usporedbe mjerenih razina podzemne vode u proteklih šest godina s vodostajima rijeke Save. Analize krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razina podzemne vode su pokazale da do napajanja iz Save može doći samo kod visokih vodostaja, dok pri niskim i srednjim vodostajima Sava drenira podzemlje.

U navedenim modelima niti jedan nije uzimao u obzir dotok vode s druge strane rijeke Save, već je Sava postavljena kao južna granica modeliranog područja. Korito rijeke Save je u svim spomenutim modelima pretpostavljeno usječeno u vodonosne naslage. Da bi se provjerilo da li je ovakvo postavljanje granice opravdano, istražen je odnos rijeke Save i okolnih naslaga. Usporedbom uzdužnog profila korita rijeke između Slavonskog Broda i Županje te istražnih bušotina smještenih u blizini rijeke došlo se do zaključka da je rijeka Sava usječena u vodonosne naslage nizvodno od Slavonskog Šamca. Uzvodno od Slavonskog Šamca raspolaže se s malim brojem bušotina u blizini rijeke, od kojih je većina smještena južno od crpilišta, a jedna bušotina nalazi se u pokraj naselja Jaruge. Na temelju podataka ovih bušotina zaključeno je da je korito Save na području južno od crpilišta usječeno u krovinske naslage, otprilike u razini pjeskovito-prahovito-šljunkovitog sloja. Na taj način se komunikacija rijeke i vodonosnika može odvijati preko propusnog sloja u krovini vodonosnika, ali je prigušena u odnosu na situaciju kada je rijeka usječena direktno u vodonosne naslage. Uzvodno od Jaruga ne postoje bušotine u blizini rijeke, već se najbliža nalazi na udaljenosti 1.2 km, stoga se na ovom dijelu toka ne može se sa sigurnošću tvrditi o točnom položaju rijeke. Ipak se na temelju ekstrapolirane debljine krovinskih naslaga i nadmorske visine dna korita Save može pretpostaviti da je korito uglavnom usječeno u

krovinske naslage nizvodno od Novog Grada. Uzvodno od Novog Grada dno korita rijeke nalazi se oko granice između vodonosnika i krovinskih naslaga te postoji mogućnost da se mjestimice usijeca u vodonosnik. U svrhu provjere ovakve interpretacije položaja korita Save provedena je simulacija u kojoj je rijeka Sava cijelom dužinom toka smještena u vodonosne naslage. Izračunate razine podzemnih voda bile su niže od mjerenih za oko 1 do 1.5 m, te se nije mogao dobiti bolji rezultat. Odstupanja su bila najveća u razdobljima niskih voda kada se odvija najveće dreniranje podzemnih voda u rijeku Savu. Stoga je zaključeno da je pretpostavka o položaju Save u krovinskim naslagama na središnjem dijelu toka kroz domenu modela opravdana. Kao što je već spomenuto, rijeka Sava u prirodnim uvjetima predstavlja hidrauličku granicu odnosno regionalni dren podzemnih voda. No pod utjecajem crpljenja, kada se poremete prirodni uvjeti, može doći do toka podzemne vode ispod riječnog korita iz susjedne Republike Bosne i Hercegovine. Kako bi se istražila ova mogućnost granica modela nije postavljena na rijeku Savu već je domena modela proširena i na teritorij Bosne i Hercegovine.

Model je najpouzdaniji u središnjem dijelu, u okolici crpilišta Sikirevci, gdje ima najviše podataka, na rubnim dijelovima raspolaže se sa manje podataka pa ima više pretpostavki. Analiza osjetljivosti je pokazala da je model osjetljiv na promjene granica zadanog potencijala (sjeverna, južna i istočna granica). U svrhu smanjivanja nesigurnosti rubnih uvjeta potrebno je izvesti minimalno dvije nove bušotine te u njima provoditi redoviti monitoring razina podzemne vode. Jedna bi trebala biti smještena sjeverno od Donjih Andrijevaca, na zapadnom dijelu sjeverne granice modela, a druga na sjevernom dijelu istočne granice modela.

Jedan od izvora nesigurnosti u modelu predstavlja korištenje mjesečnog vremenskog koraka. Mjesečnim vremenskim korakom pretpostavlja se stacionarnost pojave vodostaja unutar razdoblja od jednog mjeseca. Tok u rijeci Savi na istraživanom području karakterizira izrazita nestacionarnost, te promjene vodostaja mogu unutar jednog mjeseca iznositi i do nekoliko metara. Osrednjavanjem mjerenih vrijednosti vodostaja Save na srednje mjesečne gube se pikovi i trajanja visokih i niskih vodostaja, te se mijenjaju i hidraulički gradijenti između rijeke i podzemne vode. Na taj način utječe se na protoke iz rijeke u vodonosnik i obrnuto, što utječe direktno i na vodnu bilancu. Da bi se ocijenila sigurnost i pouzdanost rezultata modela s mjesečnim vremenskim korakom provedena je analiza nesigurnosti koja je prikazana u poglavlju 7.6. i 8. Usporedbom vodnih bilanci prve dvije i pol godine simulacija u kojima je primijenjen mjesečni i dnevni vremenski korak, kvantificirana su odstupanja u vodnoj bilanci. Pokazalo se da korištenje mjesečnog vremenskog koraka dovodi do

podcjenjivanja količine dotjecanja i otjecanja u rijeku Savu. Najveće razlike zapažaju se u količini napajanja iz rijeke koje je pri korištenju dnevnog vremenskog koraka tri puta veće nego pri korištenju mjesečnog vremenskog koraka (slika 7.33 i 8.10). Kod količina otjecanja u rijeku Savu razlike su puno manje izražene (slika 7.33, 8.9 i 8.10). Iako su količine dotjecanja dobivene dnevnim vremenskim korakom veće, i u ovom slučaju je otjecanje u rijeku Savu veće od dotjecanja, te se generalni odnosi u vodnoj bilanci sustava bitno ne mijenjaju. Na količine dotjecanja iz rijeke u vodonosnik osim vodostaja velik utjecaj imaju i naslage na kontaktu, te položaj rijeke u odnosu na vodonosne i krovinske naslage. S obzirom na mnogo nepoznanica vezanih uz ovaj rubni uvjet, te premalu količinu raspoloživih podataka, zaključeno je da je mjesečni korak dovoljno precizan u trenutnim okolnostima. Da bi se preciznije definirale količine dotjecanja iz rijeke u vodonosnik potrebno je prikupiti nove podatke kojima će se kontakt rijeke i okolnih naslaga moći definirati s većom sigurnošću, te u tom slučaju primijeniti dnevni vremenski korak kojim se količine napajanja iz rijeke Save mogu detaljnije odrediti. Za bolje definiranje rubnog uvjeta rijeke Save nužno je izvesti nove strukturno-piezometarske bušotine u neposrednoj blizini rijeke te u njima provoditi redoviti monitoring razina podzemne vode.

Stacionarna simulacija trasiranja čestica u uvjetima srednjih voda i s crpnim količinama od 200 l/s (vidi poglavlje 7.7) pokazala je da vrijeme zadržavanja podzemne vode u vodonosnom sustavu, u horizontalnom toku prema zdencima, iznosi minimalno 50 godina. Na dugo vrijeme zadržavanja ukazao je i sadržaj tricija, prema kojem je uzorkovana voda starija od 1950. godine. Samo je na bušotinama uz Savu sadržaj tricija bio viši zbog napajanja vodom iz rijeke koja je također imala blago povišen sadržaj tricija. Uzorci su uzeti u travnju 2013. godine u razdoblju visokih voda, kada je smjer toka podzemne vode usmjeren od rijeke Save prema unutrašnjosti.

Dotjecanje ispod rijeke Save u sadašnjim uvjetima crpljenja, koje iznosi oko 200 l/s, relativno je malih iznosa u odnosu na količine koje se dobivaju kroz infiltraciju oborina. Ali povećanjem crpnih količina do predviđenih 1000 l/s na crpilištu Sikirevci za očekivati je da će se utjecaj dotjecanja ispod rijeke Save povećati. Vodonosne naslage imaju nekoliko redova veličine veću hidrauličku vodljivost od krovinskih naslaga, a rijeka Sava je na području crpilišta usječena u krovinske naslage. Prema reljefu terena i sastavu naslaga, odnosno već spomenutom načinu taloženja naslaga od juga prema sjeveru, može se pretpostaviti da su razine podzemne vode uz rijeku Savu u BiH jednake ili više nego s Hrvatske strane rijeke. Stoga se može opravdano pretpostaviti da će se sniženjem razine podzemne vode na crpilištu, odnosno povećanjem hidrauličkog gradijenta, ostvariti povećani dotok ispod rijeke Save iz

susjedne države. Za izračun količina dotjecanja koje bi se ostvarile u opisanim uvjetima potrebno je pratiti razine podzemne vode i s desne strane rijeke u susjednoj državi, te na temelju tih podataka kalibrirati i taj dio domene modela. Ovo pitanje je važno ne samo zbog gospodarenja već i zbog zaštite podzemnih voda. Provedbu zaštite na prekograničnom području nužno je dogovarati kroz bilateralne odnose između dvije susjedne države.

U poglavlju 6.4 navedeno je da se ispod podinskih naslaga vodonosnika nalazi dublji vodonosni sloj, te da postoji mogućnost procjeđivanja podzemne vode iz ovog sloja u zahvaćeni vodonosnik. Ako do procjeđivanja dolazi pretpostavka je da je ono relativno malih iznosa te da nema veliki utjecaj na bilancu u promatranom vodonosniku u sadašnjim uvjetima crpljenja. Na širem području istraživanja ustanovljen je gradijent razine vode usmjeren od dubljih prema plićim vodonosnim slojevima, te treba pretpostaviti da je u vodonosnom sloju ispod istraživanog vodonosnika razina podzemne vode jednaka ili veća nego u promatranom vodonosniku. Povećanjem crpnih količina (do planiranih 1000 l/s) za očekivati je da će doći do sniženja razine podzemne vode na području crpilišta. Snižavanjem razine u vodonosniku došlo bi do povećanja hidrauličkog gradijenta između zahvaćenog vodonosnika i dubljeg sloja, te je za očekivati da bi to uzrokovalo povećanje količine procjeđivanja iz ovog sloja. U svrhu određivanja u kojoj mjeri bi ovo procjeđivanje utjecalo na bilancu vodonosnog sustava nužno je na širem području crpilišta izvesti nekoliko strukturno-piezometarskih bušotina sa zacjevljenjem u dubljem vodonosnom sloju. Bušenje bi omogućilo dobivanje podataka o debljini i granulometrijskom sastavu podinskih naslaga te određivanje njihove hidrauličke vodljivosti. Monitoring razina podzemnih voda kroz razdoblje od minimalno jedne hidrološke godine omogućio bi detaljnije određivanje količine procjeđivanja iz dubljeg sloja pri većim crpnim količinama. Analiziranje izotopnog sastava vode iz dubljeg sloja i usporedba s izotopnim sastavom vode iz zahvaćenog vodonosnika također može pomoći u određivanju postojanja hidrauličke veze između njih.

U uvodnom poglavlju rada navedeni su postavljeni ciljevi i hipoteze provedenog istraživanja. Prva hipoteza da se vodonosnik zahvaćen na crpilištu dominantno napaja infiltracijom oborina, dok je iznos napajanja iz rijeke Save znatno manji, potvrđena je kroz dobivenu bilancu mase numeričkog modela, analizom krivulja trajanja te analizom sadržaja stabilnih izotopa kisika i vodika. Bilancom mase je ujedno i dijelom postignut prvi cilj istraživanja, tj. kvantitativno je određena količina napajanja iz rijeke Save i infiltracijom oborina. Napajanje tokom podzemne vode ispod rijeke Save nije moguće sa sigurnošću kvantitativno izraziti dok se ne kalibrira desna obala rijeke Save, za što je potrebno na tom području uspostaviti monitoring podzemne vode. Druga hipoteza ističe da pod utjecajem

intenzivnog crpljenja može doći do pojave toka podzemne vode ispod riječnog korita, dok je u prirodnim uvjetima riječno korito hidraulička granica. Istraživanja su pokazala da već kod relativno niskih crpnih količina od oko 200 l/s dolazi do toka podzemne vode ispod rijeke Save, što ujedno upućuje na prekogranični karakter vodonosnog sustava. Sadržaj tricija u podzemnoj vodi pokazao je da je podzemna voda stara nekoliko desetljeća, što se slaže i s provedenom simulacijom trasiranja čestica. Na relativno dugo vrijeme zadržavanja u podzemlju ukazala su i provedena hidrokemijska istraživanja. Sastav stabilnih izotopa kisika i vodika upućuje da je prisutno obnavljanje podzemne vode koje se odvija infiltracijom oborina. Na taj način potvrđena je treća hipoteza istraživanja. Rezultati numeričkog modeliranja uspoređeni su s rezultatima izotopnih istraživanja u smislu sagledavanja izvora napajanja vodonosnika. Numeričko modeliranje pokazalo je da je infiltracija oborina glavni izvor napajanja vodonosnika, što je potvrdio i sastav stabilnih izotopa kisika i vodika u podzemnoj vodi.

10. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana su istraživanja s ciljem izrade konceptualnog i numeričkog modela vodonosnog sustava zahvaćenog na crpilištu Sikirevci. Svrha izrade modela je određivanje značajki napajanja vodonosnog sustava, relativne starosti vode i vremena zadržavanja te prekograničnog karaktera vodonosnog sustava. U izradi modela korišteni su i rezultati izotopnih i hidrokemijskih istraživanja. Iz provedenih istraživanja su proizašli sljedeći zaključci:

- Tok podzemne vode se tijekom većeg dijela godine odvija od sjeverozapada prema rijeci Savi, a obnavljanje podzemne vode infiltracijom oborina kroz polupropusne krovinske naslage je važan faktor vodne bilance na ovom području. Izvorni pjeskovito-prahoviti, mjestimice šljunkoviti sloj u krovinskim naslagama napaja se infiltracijom oborina, koje se procjeđuju vertikalno kroz polupropusne naslage iznad izvornog sloja. Nakon toga podzemna voda se kreće horizontalno kroz izvorni sloj od sjeverozapada prema jugu, te se procjeđuje vertikalno kroz polupropusne naslage u zahvaćeni vodonosnik. Opisani proces traje relativno dugo, te stoga podzemna voda ima dugo vrijeme zadržavanja.
- Analiza rezultata kalibracije modela pokazala je da su uvjeti strujanja podzemne vode pri dosadašnjem režimu rada crpilišta Sikirevci dobro simulirani. Normalizirano srednje kvadratno odstupanje manje je od 10% što je unutar prihvatljivog stupnja pogreške.
- Analiza bilance mase pokazuje da infiltracija oborina sudjeluje s 55% od ukupnih ulaznih količina vode u sustav, te predstavlja glavni izvor obnavljanja podzemne vode u vodonosniku zahvaćenom na crpilištu Sikirevci. Količina infiltracije određena kroz kalibraciju modela iznosi oko 14% prosječnih godišnjih oborina.
- Na crpljenje podzemne vode troši se 23% od ukupne infiltracije oborina.
- Analiza sadržaja stabilnih izotopa kisika i vodika u uzorcima podzemne vode, oborinskih voda i rijeke Save potvrđuje meteorsko podrijetlo podzemnih voda. Utjecaj rijeke Save na sastav podzemne vode zapaža se samo na području blizu rijeke.
- Koncentracije tricija u podzemnoj vodi pokazuju da je vrijeme zadržavanja vode dulje od 65 godina, što pokazuje i provedena stacionarna simulacija trasiranja

čestica. Na bušotinama uz Savu je sadržaj tricija viši zbog napajanja vodom iz rijeke koja također ima blago povišen sadržaj tricija.

- Hidrokemijska istraživanja također pokazuju da su u vodonosnom sustavu brzine toka razmjerno niske, što uzrokuje dugo zadržavanje vode u podzemlju. Sadržaj klorida u uzorcima iz rijeke Save i bušotina u blizini rijeke potvrđuje njihovu povezanost.
- Hidrauličke značajke kontakta rijeke Save i vodonosnika bile su najveća nepoznanica u modelu. Kroz postupak kalibracije modela se pokušalo što bolje definirati odnose rijeke i podzemlja te posredno doći do zaključaka o tokovima podzemnih voda u okolici rijeke. Najbolji rezultati postignuti su postavljanjem korita rijeke Save u krovinske naslage od ulaza u model do Slavonskog Šamca, a nizvodno u vodonosne naslage.
- Analiza osjetljivosti pokazuje da je model osjetljiv na promjene rubnog uvjeta rijeke Save. Da bi se bolje definirao kontakt rijeke Save i vodonosnika nužno je izvesti nove strukturno-piezometarske bušotine u neposrednoj blizini rijeke, na potezu od naselja Svilaj do Babine Grede. U novo izvedenim bušotinama treba uspostaviti monitoring razina podzemnih voda. Na taj način smanjiti će se nesigurnost modela vezana uz ovaj rubni uvjet.
- Pražnjenje podzemnih voda odvija se u rijeku Savu, osim za vrijeme visokih vodostaja kada Sava napaja vodonosnik. Pošto su razdoblja visokih voda relativno kratka u ukupnoj bilanci gubici podzemne vode u korito Save znatno su veći od procjeđivanja iz Save u vodonosnik, te je rijeka Sava glavni dren podzemnih voda na ovom području. U bilanci vodonosnog sustava s lijeve strane rijeke Save, u razdoblju kalibracije (lipanj 2008 – prosinac 2013), 5% ulaznih količina vode dolazi iz rijeke, dok 32% izlaznih količina odlazi u rijeku. Ovakve odnose potvrdile su i analize krivulja trajanja vodostaja rijeke Save i razina podzemne vode.
- U razdobljima visokih voda napajanje iz rijeke Save doseže do 34% od ukupnih ulaznih količina vode, dok u razdobljima srednjih i niskih voda otjecanje u Savu može iznositi i do 50% od ukupnih izlaznih količina vode.
- Analiza nesigurnosti korištenja mjesečnog vremenskog koraka napravljena je za prve dvije i pol godine simulacije. Pokazalo se da korištenjem mjesečnog koraka dolazi do podcjenjivanja količina dotjecanja iz rijeke Save u vodonosnik. Korištenjem dnevnog vremenskog koraka dobivaju se tri puta veće ulazne količine

iz rijeke Save, odnosno one iznose oko 15% ukupnih ulaznih količina za analizirano razdoblje. Razlike u izlaznim količinama iz vodonosnika u rijeku su neznatne. I s ovako dobivenim povećanim ulaznim količinama iz rijeke Save, otjecanje u Savu je i dalje veće od dotjecanja, te se generalni odnosi u vodnoj bilanci sustava bitno ne mijenjaju. S obzirom na već spomenute nesigurnosti vezane uz nedovoljno dobro poznavanje rubnog uvjeta rijeke Save, korištenje dnevnog vremenskog koraka preporuča se kada se nabave novi podaci koji će omogućiti sigurnije definiranje ovog rubnog uvjeta.

- Kod velikih crpnih količina utjecaj crpljenja se širi i prema sjeverozapadnoj i sjeveroistočnoj granici modela gdje ne postoje opažački piezometri. Na tim dijelovima je potrebno izvesti barem dvije strukturno-piezometarske bušotine te u njima provoditi monitoring razina podzemnih voda. Na taj način će se povećati točnost modela i smanjiti nesigurnost u predviđanju budućih uvjeta.
- Iako se nije raspolagalo s podacima o razinama podzemne vode s desne strane rijeke Save u susjednoj BiH, na temelju bilance mase se moglo utvrditi postojanje toka ispod rijeke te se definirao prekogranični karakter zahvaćenog vodonosnog sustava.
- Pri sadašnjim crpnim količinama procijenjene količine dotjecanja ispod korita Save iz susjedne BiH su relativno malih iznosa, te iznose oko 16% od ukupnih ulaznih količina vode u sustav. Ova vrijednost se treba potvrditi kalibracijom desne obale rijeke Save.
- Kod velikih crpnih količina za očekivati je da se povećava i utjecaj crpljenja u susjednoj BiH. Da bi se povećala sigurnost predviđanja ponašanja sustava u uvjetima većih crpnih količina, potrebno je uspostaviti monitoring razina podzemnih voda i s desne strane rijeke u susjednoj državi, te na temelju tih podataka kalibrirati i taj dio domene modela.
- Pitanje prekograničnog utjecaja crpljenja je važno i zbog zaštite podzemnih voda. Provedba zaštite na prekograničnom području trebala bi se dogovarati kroz bilateralne odnose između dviju susjednih država.
- Kako bi se s većom sigurnošću simulirao utjecaj planiranog crpljenja većih količina vode na dinamiku podzemne vode u istraživanom vodonosnom sustavu, potrebno je upotpuniti izrađeni numerički model s novim podacima.
- Iz navedenih zaključaka proizlazi da su postavljeni ciljevi uspješno ispunjeni, izuzev kvantitativnog određivanja dotjecanja ispod rijeke Save, koje se treba

potvrditi kalibracijom desne obale na području BiH. Sve tri postavljene hipoteze su potvrđene rezultatima numeričkog modela, te također izotopnim istraživanjima.

LITERATURA

Objavljeni radovi

ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W.W. (2002): Applied groundwater modeling, Simulation of flow and advective transport. Academic Press, An Imprint of Elsevier, 381 str., San Diego.

ANDERSON, W. P. & EVANS, D. G. (2007): On the interpretation of recharge estimates from steady-state model calibrations. Groundwater, 45(4), 499-505.

APPELO, C. A. J. & POSTMA, D. (2005): Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema Publishers, 668 str., Leiden.

ASTM (1999): ASTM standards on determining subsurface hydraulic properties and groundwater modeling, 2nd ed. ASTM International, 320 str.

ATKINSON, A.P., CARTWRIGHT, I., GLIFEDDER, B.S., CENDÓN, D.I., UNLAND, N.P. & HOFMANN, H. (2014): Using ^{14}C and ^{3}H to understand groundwater flow and recharge in an aquifer window. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18, 4951-4964.

BAČANI, A. (2006): Hidrogeologija I. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 198 str., Zagreb

BAČANI, A. MILETIĆ, P. & HEINRICH-MILETIĆ, M. (1991): Utjecaj slabopropusnih naslaga na obnavljanje zaliha podzemnih voda na primjeru istočne Slavonije. Geol. vjesnik, 44, 269-273.

BAČANI, A., ŠPARICA, M. & VELIĆ, J. (1999): Quaternary deposits as the hydrogeological system of Eastern Slavonia. Geologia Croatica, 52(2), 141-152.

BOUWER, H. & MADDOCK III, T. (1997): Making Sense of the Interactions Between Groundwater and Streamflow: Lessons for Water Masters and Adjudicators. Rivers, 6, 19-31.

BEAR, J. (1979): Hydraulics of groundwater. Mc-Graw Hill Inter. Book Comp., 567str., New York.

BECKERS, J. & FRIND, E. O. (2000): Simulating groundwater flow and runoff for the Oro Moraine aquifer system. Part I. Model formulation and conceptual analysis. Journal of Hydrology, 229(3), 265-280.

BECKERS, J. & FRIND, E. O. (2001): Simulating groundwater flow and runoff for the Oro Moraine aquifer system. Part II. Automated calibration and mass balance calculations. Journal of Hydrology, 243(1), 73-90.

BIONDIĆ, D. (2009): Strategija upravljanja vodama. Hrvatske vode, 165 str., Zagreb.

BLANEY, H.F. & CRIDDLE, W.D. (1962): Determining consumptive use and irrigation water requirements. U. S. Dept. Agr. Agricultural Research Service Tech Bull 1275, 59 str.

BLASCH, K.W. & BRYSON, J.R. (2007): Distinguishing sources of ground water recharge by using δ^2H and δ^{18}O. Ground Water, 45, 294-308.

BOONSTRA, J. & DE RIDDER, N.A. (1981): Numerical modelling of groundwater basins: a user-oriented manual. International Institute for Land Reclamation and Improvement, 226 str., Wageningen.

BORONINA, A., BALDERER, W., RENARD, P. & STICHLER, W. (2005): Study of stable isotopes in the Kouris catchment (Cyprus) for the description of the regional groundwater flow. Journal of hydrology, 308, 214-226.

BÖSENDORFER, J. (1952): Istočna granica Tomislavove, Krešimirove i Zvonimirove Hrvatske u savsko-dravskom interamniju. Rad JAZU, 286, 143-170.

BREDEHOEFT, J. (2003): From models to performance assessment: The conceptualization problem. Groundwater, 41(5), 571-577.

BREDEHOEFT, J. (2005): The conceptualization model problem—surprise. Hydrogeology journal, 13(1), 37-46.

BRIŠKI, M., BRKIĆ, Ž. & URUMOVIĆ, K. (2013): Konceptualni model vodonosnog sustava na širem području Sikirevaca. U: Babajić, E. (ur.), V. Savjetovanje geologa Bosne i Hercegovine. Udruženje/udruga geologa Bosne i Hercegovine, Pale, 77-78.

BRKIĆ, M., GALOVIĆ, I. & BUZALJKO, R. (1989): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Vinkovci L34-98. Savezni geološki zavod, Beograd.

BRKIĆ Ž. & LARVA O. (2008): Uspostava motrenja razina podzemne vode na području crpilišta Regionalnog vodovoda istočne Slavonije. U: Ožanić, N. (ur), Savjetovanje: Hidrološka mjerenja i obrada podataka. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 257-267.

BRKIĆ, Ž., URUMOVIĆ, K. & BRIŠKI, M. (2013): Post audit analysis of a groundwater level prediction model in developed semiconfined aquifer system. Water Resources Management, 27 (9), 3349-3363.

BRUNŠMID, J. (1902): Colonia Aurelia Cibalae. Vjesnik arheološkog muzeja u Zagrebu, 6 (1), 117-166.

CALVER, A. (2001): Riverbed permeabilities: Information from pooled data. Ground Water, 39 (4), 546-553.

CAPAR, A. (1992): Poznavanje i istraženost hidrogeologije savskog sliva istočne Slavonije. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 4, 23-35.

CARRERA. J. (1988): State of the Art of the Inverse Problem Applied to the Flow and Solute Transport Equations, U: Groundwater Flow and Quality Modelling. Springer Netherlands, 549-583.

CARRERA, J. & NEUMAN, S.P. (1986): Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 1. Maximum Likelihood Method Incorporating Prior Information. Water recources research, 22(2), 199-210.

CLARK, I. D. & FRITZ, P. (1997): Environmental isotopes in hydrogeology. CRC press, 328 str., New York.

COOK, P. G. & HERCZEG, A. L. (2000): Environmental tracers in subsurface hydrology. Springer Science & Business Media, 529 str., New York.

COOLEY, R.L. & NAFF, R.L. (1990): Regression modeling of ground-water flow. USGS, Techniques of water-resources investigations 03-B4, 232 str.

CRAIG, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133, 1702-1703.

DANSGAARD, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. Tellus, 16(4), 436-468.

DAVISSON, M. L., SMITH, D. K., KENNEALLY, J. & ROSE, T. P. (1999): Isotope hydrology of southern Nevada groundwater: stable isotopes and radiocarbon. Water Resources Research, 35(1), 279-294.

DOBLE, R.C., SIMMONS, C.T. & WALKER, G.R. (2009): Using MODFLOW 2000 to model ET and recharge for shallow ground water problems. Ground Water 47 (1), 129-135.

DODSON, W. J. (2009): Groundwater recharge from the Gascoyne River, Western Australia. Department of Water. Report No HG32, 240 str.

DOHERTY, J., BREBBER, L. & WHYTE, P. (1994): PEST – Model-independent parameter estimation. User's manual. Watermark Computing, Australia.

DOMENICO P.A., SCHWARTZ F.W. (1990): Physical and Chemical Hydrogeology. John Willey and Sons, New York, 824 str.

DONEY, S. C., GLOVER, D. M. & JENKINS, W. J. (1992): A model function of the global bomb tritium distribution in precipitation, 1960–1986. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 97(C4), 5481-5492.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. (1977): Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 24, 144 str., Roma.

DOPPLER, T., FRANSSEN, H.J.H., KAISER, H.P., KUHLMAN, U. & STAUFFER, F. (2007): Field evidence of a dynamic leakage coefficient for modelling river–aquifer interactions. Journal of Hydrology, 347, 177-187.

DROBNE, F. (1969): Geologija i hidrogeologija sliva rijeke Save. Regulacija i uređenje rijeke Save. Narodne novine, 65 str., Zagreb.

FOLCH, A., MENCIÓ, A., PUIG, R., SOLER, A. & MAS-PLA, J. (2011): Groundwater development effects on different scale hydrogeological systems using head,

hydrochemical and isotopic data and implications for water resources management: The Selva basin (NE Spain). J. Hydrol. 403, 83-102.

FÓRIZS, I., BERECZ, T, MOLNÁR, Z. & SÜVEGES, M. (2005): Origin of shallow groundwater of Csepel Island (south of Budapest, Hungary, River Danube): isotopic and chemical approach. Hydrological prosesses, 19, 3299-3312.

FRANKE, O. L., REILLY, T. E. & BENNETT, G. D. (1987): Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems: an introduction. US Government Printing Office, 14 str, Washington.

FREEZE, R.A. & WITHERSPOON, P.A. (1966): Theoretical analysis of regional groundwater flow 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. Water Resour Res, 2, 641-656.

GAJIĆ-ČAPKA, M., PERČEC-TADIĆ, M., PATARČIĆ, M. (2003): Digitalna godišnja oborinska karta Hrvatske. Hrvatski meteorološki časopis, 38, 21-33.

GALOVIĆ, I. & MUTIĆ, R. (1984): Gornjopleistocenski sedimenti Istočne Slavonije (Hrvatska). Rad JAZU, 411 (20), 299-356.

GALOVIĆ, I., BRKIĆ, M. & BUZALJKO, R. (1989): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Vinkovci L34-98. Savezni geološki zavod, Beograd, 49 str.

GARCÍA, G. M., HIDALGO, M. D. V. & BLESA, M. A. (2001): Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina. Hydrogeology Journal, 9(6), 597-610.

GARRELS, R.M. (1967): Genesis of some ground waters from igneous rocks. U: Abelson, P.H. (ur.), Researches in Geochemistry. John Wiley & Sons, New York, 405-421.

GAT, J. R. & GONFIANTINI, R. (1981): Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Tehnical reports series, 210, IAEA, 339 str., Vienna.

GENEREUX, D.P., LEAHY S., MITASOVA H., KENNEDY, C.D. & CORBETT D.R. (2008):Spatial and temporal variability of streambed hydraulic conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA. Journal of Hydrology, 358, 332-353.

GEREŠ, D. & FILIPOVIĆ, M. (2000): Upravljanje vodnim resursima slivnog područja Save. U: Trninić, D. (ur.), Okrugli stol, Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima. Hrvatsko hidrološko društvo, Hrvatsko društvo za odvodnju i navodnjavanje, Slavonski Brod, 205-216.

GJETVAJ, G., LONČAR, G., MALUS, D. & OCVIRK, E. (2011): Primjeri međuutjecaja površinskih i podzemnih voda. Građevinar, 63 (11), 941-951, Zagreb.

GORJANOVIĆ-KRAMBERGER, D. (1920): Morfološke i hidrografske prilike srijemskog lesa. Glasnik geografskog društva, 5, 17-53.

GORJANOVIĆ-KRAMBERGER, D. (1922): Morfologijske i hidrogeologijske prilike prapornih predjela te pograničnih česti Županije virovitičke. Glasnik Hrvatskog prirodoslovnog društva, 34 (2), 111-164.

GRGIĆ, S., HORVATINČIĆ, N. & MILETIĆ, P. (1991): Radiocarbon and tritium measurements of groundwater in eastern Slavonia. Geološki vjesnik, 44, 309-312.

GUO, H.M. & WANG, Y.X. (2004): Hydrogeochemical processes in shallow quaternary aquifers from the northern part of Datong Basin, China. Appl. Geochem. 19, 19-27.

GUO, H.M. & WANG, Y. (2005): Geochemical characteristics of shallow groundwater in Datong Basin, northwestern China. J. Geochem. Explor. 87, 109-120.

HAČEK, M. & OLUIĆ, M. (1969): Prikaz rezultata fotogeološke interpretacije srednje i istočne Slavonije. Nafta, 7, 333-336.

HAN, D., LIANG, X., JIN, M., CURRELL, M.J., HAN, Y. & SONG, X. (2009): Hydrochemical indicators of groundwater flow systems in the Yangwu River Alluvial Fan, Xinzhou Basin, Shanxi, China. Environ. Manage. 44, 243-255.

HARBAUGH, A.W. & MC DONALD, M.G. (1996): User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report 96-485, 56 str.

HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C. & MCDONALD, M.G. (2000): MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User

guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 str.

HARBAUGH, A.W. (2005): MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model: the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

HARRAR W.G., SONNENBORG T.O. & HENRIKSEN H.J. (2003): Capture zone, travel time, and solute-transport predictions using inverse modeling and different geological models. Hydrogeology Journal, 11, 536-548.

HEALY, R.W. (2010): Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press, 238 str., Cambridge.

HERNITZ, Z. (1970): Prilog poznavanju paleostrukturnih odnosa neogensko-kvartarnih sedimenata u širem području Šamca. Geološki vjesnik, 23, 55-67.

HERNITZ, Z. (1983): Dubinski strukturno-tektonski odnosi u području istočne Slavonije. Nafta, 221 str., Zagreb.

HGI (2009a): Geološka karta Republike Hrvatske 1:300 000. Hrvatski geološki institut, Zagreb.

HGI (2009b): Tumač Geološke karte Republike Hrvatske 1:300 000. Ur.: Velić, I., Vlahović, I., Hrvatski geološki institut, Zagreb, 141 str.

HILL, M.C. (1998): Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4005, Denver.

HILL, M.C., BANTA, E.R., HARBAUGH, A.W., & ANDERMAN, E.R. (2000): MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model—User guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-184, 210 str.

HILL, M. C. & TIEDEMAN, C. R. (2007): Effective groundwater model calibration With analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty. John Wiley & Sons, 480 str., New Jersey.

HOJBERG A.L. & REFSGAARD J.C. (2005): Model uncertainty: parameter uncertainty versus conceptual models. Water Sci Technol, 52(6), 177-186.

HUANG, T. & PANG, Z. (2010): Changes in groundwater induced by water diversion in the Lower Tarim River, Xinjiang Uygur, NW Chine: Evidence from environmental isotopes and water chemistry. J. Hydrol. 387, 188-201.

HUNT, R.J., COPLEN, T.B., HAAS, N.L., SAAD, D.A. & BORCHARDT, M.A. (2005): Investigation surface water-well interaction using stable isotope ratios of water. Journal of hydrology, 302, 154-172.

IVKOVIĆ, A., ŠARIN, A. & KOMATINA, M. (1983): Tumač za hidrogeološku kartu SFR Jugoslavije 1:500 000. Savezni geološki zavod, Beograd, 121 str.

JAGAČIĆ, T. (1963): Stratigrafski i tektonski odnosi istočnog dijela Slavonije na osnovu dubokih istražnih bušotina. Geološki vjesnik, 15(2), 341-354.

JANKOWSKI, J. & BECK, P. (2000): Aquifer heterogeneity: hydrogeological and hydrochemical properties of the Botany Sands aquifer and their impact on contaminant transport. Australian Journal of Earth Sciences, 47(1), 45-64.

JAWORSKA-SZULC, B. (2009): Groundwater flow modelling of multi-aquifer systems for regional resources evaluation: the Gdansk hydrogeological system, Poland. Hydrogeology journal, 17(6), 1521-1542.

JOSIPOVIĆ, J. (1974): Osnovne hidrogeološke odlike teritorije Bosne i Hercegovine. U: 3. Jugoslavenski simpozij o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji: Problemi hidrogeologije i inženjerske geologije Jugoslavije, Knjiga 1. Hidrogeologija. Jugoslavenski komitet za hidrogeologiju inženjersku geologiju i geofiziku, Opatija, 133-148.

JYRKAMA, M. I., SYKES, J. F. & NORMANI, S. D. (2002): Recharge estimation for transient ground water modeling. Groundwater, 40(6), 638-648.

KAUFMAN, S. & LIBBY, W. F. (1954): The natural distribution of tritium. Physical Review, 93(6), 1337-1344.

KOMATINA, M. & IVKOVIĆ, A. (1980): Hidrogeološka karta SFR Jugoslavije 1:500 000. Savezni geološki zavod, Beograd.

KONIKOW, L.F. (1978): Calibration of ground-water models. In Verification of Mathematical and Physical Models in Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, 87-93.

KÖPPEN, W. (1918): Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. Petermanns Geographische Mitteilungen, 64, 193-203.

KOVAR, K. & HRKAL, Z. (2003): Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: A Few Steps Closer to Reality. Proceedings of the ModelCARE 2002 Conference. IAHS Publication 277.

KRANJEC, V., HERNITZ, Z., PRELOGOVIĆ, E., BLAŠKOVIĆ, I. & ŠIMON, J. (1969a): Geološki razvoj Đakovačko-Vinkovačkog platoa (Istočna Slavonija). Geološki vjesnik, 22, 111-121.

KRANJEC, V., HERNITZ, Z., PRELOGOVIĆ, E., ŠIMON, J. & BLAŠKOVIĆ, I. (1969b): On the tectonism and sedimentation of Tertiary deposits in Eastern Slavonia and neighbouring areas (Pannonian Basin). Bull. Sci. Yugosl., 13, 67-70.

KRANJEC, V., HERNITZ, Z., PRELOGOVIĆ, E. & BLAŠKOVIĆ, I. (1970): Dubinsko litofacijelno kartiranje područja istočne Slavonije i bosanske Posavine. Zbornik radova RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 2, 165-174.

KREŠIĆ, N. (2007): Hydrogeology and groundwater modeling, Second edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 807 str., Boca Raton.

LAMOUROUX, C. & HANI, A. (2006): Identification of groundwater flow paths in complex aquifer systems. Hydrological processes, 20(14), 2971-2987.

LEIBUNDGUT, C., MALOSZEWSKI, P. & KÜLLS, C. (2011): Tracers in hydrology. John Wiley & Sons, 415 str., Chichester.

LI, F., PAN, G., TANG, C., ZHANG, Q. & YU, J (2008): Recharge source and hydrogeochemical evolution of shallow groundwater in a complex alluvial fan system, southwest of North China Plain. Environ. Geol., 55, 1109-1122.

LIU, Y., YAMANAKA, T., ZHOU, X., TIAN, F. & MA, W. (2014): Combined use of tracer approach and numerical simulation to estimate groundwater recharge in an alluvial aquifer system: A case study of Nasunogahara area, central Japan. J. Hydrol. 519, 833-847.

LUČIĆ, D., SAFTIĆ, B., KRIZMANIĆ, K., PRELOGOVIĆ, E., BRITVIĆ, V., MESIĆ, I. & TADEJ, J. (2001): The Neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatia. Marine and petroleum Geology, 18(1), 133-147.

MALEZ, M. (1971): Kvartarogeološke karakteristike Brodskog Posavlja. Radovi Centra za org. naučno-istr. rada u Vinkovcima, JAZU, 1, 373-383.

MALOSZEWSKI, P., MOSER, H., STICHLER, W., BERTLEFF, B. & HEDIN, K. (1990): Modeling of groundwater pollution by river bank filtration using oxygen-18 data. Groundwater Monitoring and Management (Proceedings of the Dresden Symposium, March 1987), IAHS Publ. no. 173, 153-161.

MARKOVIĆ, T., BRKIĆ, Ž. & LARVA, O. (2013): Using hydrochemical data and modelling to enhance the knowledge of groundwater flow and quality in an alluvial aquifer of Zagreb, Croatia. Science of the total environment, 458-460, 508-516.

MARTIN P.J. & FRIND E.O. (1998): Modeling a complex multi-aquifer system: the Waterloo Moraine. Ground Water, 36, 679-690.

MATTLE, N., KINZELBACH, W., BEYERLE, U., HUGGENBERGER, P. & LOOSLI, H. H. (2001): Exploring an aquifer system by integrating hydraulic, hydrogeologic and environmental tracer data in a three-dimensional hydrodynamic transport model. Journal of Hydrology, 242(3), 183-196.

MCDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W. (1988): MODFLOW, A Modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586 str.

MCDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W. (2003): The history of MODFLOW. Groundwater, 41(2), 280-283.

MILETIĆ, P. (1969): Hidrogeološke karakteristike sjeverne Hrvatske. Geološki vjesnik, 22, 511-524.

MILETIĆ, P., TURIĆ, G., URUMOVIĆ, K. & BLAŠKOVIĆ, V. (1973): Željezo u podzemnim vodama porječja Save u sjevernoj Hrvatskoj. Geološki vjesnik, 26, 227-232.

MILETIĆ, P. & URUMOVIĆ, K. (1975): O geološkom okviru hidrogeoloških značajki savske doline u Hrvatskoj. Zbornik radova RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u povodu 35 godina rada (1939-1974), 101-105.

MILETIĆ, P., URUMOVIĆ, K. & BLAŠKOVIĆ, V. (1975a): Regionalna hidrogeološka istraživanja i hidrogeološka rajonizacija sjeverne Hrvatske. Zbornik radova RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u povodu 35 godina rada (1939-1974), 93-95.

MILETIĆ, P., NOWINSKI, A. & URUMOVIĆ, K. (1975b): O drugoj hidrogeološkoj zoni sjeverne Hrvatske. Zbornik radova RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u povodu 35 godina rada (1939-1974), 97-100.

MILETIĆ, P., BAČANI, A., MAYER, D. & CAPAR, A. (1986): Prilog poznavanju hidrogeoloških značajki prve hidrogeološke zone na području istočne Slavonije. Geol. vjesnik, 39, 137-150.

MILETIĆ, P., HEINRICH-MILETIĆ, M. & BAČANI, A. (1993): Konceptualni hidrogeološki model za hidrogeološki sustav istočne Slavonije. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 5, 65-73.

MIOŠIĆ, N. (1984): Osnovne karakteristike podzemnih voda Bosne i Hercegovine. U: 8. Jugoslavenski simpozij o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji: Problemi hidrogeologije i inženjerske geologije Jugoslavije, Knjiga 1. Hidrogeologija. Jugoslavenski komitet za hidrogeologiju inženjersku geologiju i geofiziku, Budva, 507-353.

MUTIĆ, R. (1993): Korelacija kvartara istočne Slavonije na osnovi podataka mineraloško-petrografskih analiza (Istočna Hrvatska). Dio III: Slavonsko-srijemska potolina. Acta Geologica 23 (1), 1-37.

NEUMAN, S. P. (2003). Maximum likelihood Bayesian averaging of uncertain model predictions. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 17(5), 291-305.

NEUMAN S.P. & WIERENGA P.J. (2003): A comprehensive strategy of hydrogeologic modeling and uncertainty analysis for nuclear facilities and sites. NUREG/CR-6805, University of Arizona, 239 str., Tucson.

OLSSON, J. A. & ANDERSSON, L. (2007): Possibilities and problems with the use of models as a communication tool in water resource management. U:Integrated Assessment of Water Resources and Global Change. Springer, Netherlands, 97-110.

PALMER, C. W. (1965): Meteorological drought. US Department of comerce. Research paper No 45, 58 str., Washington.

PAVELIĆ, D., AVANIĆ, A., KOVAČIĆ, M., VRSALJKO, D. & MIKNIĆ, M. (2003): An outline of the evolution of the Croatian part of the Pannonian basin system. U: Vlahović, I. & Tišljar, J. (ur.), Evolution of depositional environments from the paleozoic to the quaternary in the karst Dinarides and the Pannonian basin, Field trip guidebook. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 155-161.

PECK, A., GORELICK, S.M., DE MARSILY, G., FOSTER, S. & KOVALEVSKY, V. (1988): Consequences of spatial variability in aquifer properties and data limitations for groundwater modelling practice. International Association of Hydrological Sciences, 175, 272 str.

PEKAŠ, Ž. & BRKIĆ, Ž. (2007): Crpilište Regionalnog vodovoda istočne Slavonije – rezultati 30-godišnjih istraživanja. U: Gereš, D. (ur.), 4. Hrvatska konferencija o vodama: Hrvatske vode i Europska unija – izazovi i mogućnosti. Hrvatske vode, Zagreb, 786-796.

PENMAN, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Royal Soc. London, 193(1032), 120-145.

PILAR, Đ. (1876): Podravina, Đakovština i Dilj gora. Rad JAZU, 33, 38-57.

PINT, C. D., HUNT, R. J. & ANDERSON, M. P. (2003): Flowpath delineation and ground water age, Allequash Basin, Wisconsin. Groundwater, 41(7), 895-902.

POETER, E. P. & HILL, M. C. (1997): Inverse models: A necessary next step in ground-water modeling. Groundwater, 35(2), 250-260.

POETER, E. & ANDERSON, D. (2005): Multimodel ranking and inference in ground water modeling. Ground Water, 43(4), 597-605.

POLLOCK, D.W. (1989): Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. USGS Open-File Report 89-381, 188 str.

POLLOCK, D.W. (1994): User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the USGS finte-difference groundwater flow model. USGS Open-File Report 94-464, 249 str.

POSAVEC, K., PARLOV, J. & NAKIĆ, Z. (2010): Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation. Ground Water, 2010, 48(4), 598-603.

PRELOGOVIĆ, E. & CVIJANOVIĆ, D. (1983): Prikaz neotektonske aktivnosti dijela Slavonije, Baranje i Bačke. Geološki vjesnik, 36, 241-254.

PRELOGOVIĆ, E., JAMIČIĆ, D., ALJINOVIĆ, B., VELIĆ, J., SAFTIĆ, B. & DRAGAŠ, M. (1995): Dinamika nastanka struktura južnog dijela Panonskog bazena. U: Vlahović, I., Velić, I. & Šparica, M. (ur.), 1. Hrvatski geološki kongres. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 481-486.

PRELOGOVIĆ, E., SAFTIĆ, B., KUK, V., VELIĆ, J., DRAGAŠ, M. & LUČIĆ, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin. Tectonophysics, 297(1), 283-293.

PRIESTLEY, C.H.B. & TAYLOR, R.J. (1972): On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Monthly weather review, 100(2), 81-92.

READING, H. G. (2009): Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy. John Wiley & Sons, 704 str.

REILLY, T. E. & HARBAUGH, A. W. (2004): Guidelines for evaluating ground-water flow models. US Geological Survey, Scientific Investigations Report 2004-5038.

RICHARDS, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. Journal of Applied Physics, 1(5), 318-333.

RICHARDS, L. A., GARDNER, W. R., & OGATA, G. (1956): Physical processes determining water loss from soil. Soil Science Society of America Journal, 20(3), 310-314.

ROJAS, R., FEYEN, L. & DASSARGUES, A. (2008): Conceptual model uncertainty in groundwater modeling: Combining generalized likelihood uncertainty estimation and Bayesian model averaging. Water Resources Research, 44(12).

ROJAS, R., KAHUNDE, S., PEETERS, L., BATELAAN, O., FEYEN, L. & DASSARGUES, A. (2010): Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario uncertainties in groundwater modelling. Journal of Hydrology, 394(3), 416-435.

RUSHTON, K. R. (1997): Recharge from permanent water bodies. U: Simmers, I. (ur.) Recharge of phreatic aquifers in (semi)arid areas. AA Balkema, Rotterdam, 215-255.

SAFTIĆ, B., VELIĆ, J., SZATANO, O., JUHASZ, G. & IVKOVIĆ, Ž. (2003): Tertiary Subsurface Facies, Source Rocks and Hydrocarbon Reservoirs in the SW Part of the Pannonian Basin (Northern Croatia and South-Western Hungary). Geologia Croatica, 56(1), 101-122.

SANFORD, W. (2002): Recharge and groundwater models: an overview. Hydrogeology Journal, 10, 110-120.

SARA, M. N. (2003): Site assessment and remediation handbook. CRC Press, New York, 944 str.

SCANLON, B. R., HEALY, R. W. & COOK, P. G. (2002): Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal, 10(1), 18-39.

SINGH, A., MISHRA, S. & RUSKAUFF, G.(2010): Model averaging techniques for quantifying conceptual model uncertainty. Ground Water, 48, 701-715.

SOKAČ, A. (1976): Pleistocenska fauna ostrakoda iz nekih bušotina u istočnoj Slavoniji (sjeverna Hrvatska). Geološki vjesnik, 29, 159-172.

SOPHOCLEOUS, M., PERKINS, S.P. (2000): Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. J.Hydrol, 236,185-201.

SOPHOCLEOUS, M. (2002): Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. Hydrogeology journal, 10(1), 52-67.

SPITZ, K. & MORENO, J. (1996): A practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley and Sons, 461 str., New York.

STICHLER, W., MALOSZEWSKI, P., BERTLEFF, B. & WATZEL, R. (2008): Use of environmental isotopes to define the capture zone of a drinking water supply situated near a dredge lake. Journal of Hydrology, 362(3), 220-233.

ŠANDOR, F. (1912): Istraživanje prapora iz Vukovara, Bilogore i sa Rajne (prethodne obavijesti). Vijesti geol. povjerenstva, 2, 103-107.

ŠIMON, J. (1973): O litostratigrafskom stupu tercijarnih naslaga u području istočne Slavonije. Nafta, 3, 119-127.

ŠIMUNIĆ, AN., ŠPARICA, M. & ŠIMUNIĆ, AL. (1973): Kvartarne naslage na području Slavonski Brod-Staro Petrovo Selo. Geološki vjesnik, 26, 73-82.

ŠPARICA, M, BUZALJKO, R. & PAVELIĆ, D. (1987):Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Slavonski Brod L34-97. Savezni geološki zavod, Beograd, 56 str.

ŠPARICA, M, BUZALJKO, R. & MOJIĆEVIĆ, M. (1987):Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Slavonski Brod L34-97. Savezni geološki zavod, Beograd.

TAJDER, M. (1942): Sastav i postanak srijemskog prapora. Spomenica vukovarske real. gimnazije, 107-112.

TAKŠIĆ, A. (1932): Rvenica, vodena veza međ Vukom i Bosutom. Hrvatski geografski glasnik, 4, 279-283.

TAKŠIĆ, A. (1947): Prinos poznavanju prapora istočne Hrvatske. Geološki vjesnik 1, 202-231.

THORNTHWAITE, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38(1), 55-94.

TÓTH, J. (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. Journal of geophysical research, 68(16), 4795-4812.

TROLDBORG, L. (2004): The influence of conceptual geological models on the simulation of flow and transport in Quaternary aquifer systems. Environment & Resources, Technical University of Denmark.

TROLDBORG, L., REFSGAARD, J. C., JENSEN, K. H. & ENGESGAARD, P. (2007): The importance of alternative conceptual models for simulation of concentrations in a multi-aquifer system. Hydrogeology Journal, 15(5), 843-860.

TURC, L. (1961): Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. Annals of Agronomy, 12(1), 13-49.

URUMOVIĆ, K. & SOKAČ, A. (1974): O kvartarnim naslagama Županje (istočna Slavonija, SR Hrvatska). Geološki vjesnik, 27, 319-330.

URUMOVIĆ, K., HERNITZ, Z., ŠIMON, J. & VELIĆ, J. (1976a): O propusnom mediju kvartarnih te gornjo i srednjopliocenskih naslaga sjeverne Hrvatske. U: 4. Jugoslavenski simpozij o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji: Problemi hidrogeologije i inženjerske geologije Jugoslavije, Knjiga 1. Hidrogeologija. Jugoslavenski komitet za hidrogeologiju inženjersku geologiju i geofiziku, Skoplje, 395-410.

URUMOVIĆ, K., HERNITZ, Z. & ŠIMON, J. (1978): O kvartarnim naslagama istočne Posavine (SR Hrvatska). Geološki vjesnik, 30(1), 297-308.

URUMOVIĆ, K. & MIHELČIĆ, D. (2000): Podzemne vode savskoga vodonosnika. U: Trninić, D. (ur.), Okrugli stol, Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima. Hrvatsko hidrološko društvo, Hrvatsko društvo za odvodnju i navodnjavanje, Slavonski Brod, 205-216.

URUMOVIĆ, K., DUIĆ, Ž. & HLEVNJAK, B. (2011): Impact of rainfall infiltration on groundwater recharge of a deep quaternary aquifer. Geologia Croatica, 64(1), 17-30.

VELIĆ, J., WEISSER, M., SAFTIĆ, B., VRBANAC, B. & IVKOVIĆ, Ž. (2002): Petroleum-geological characteristics and exploration level of the three Neogene depositional megacycles in the Croatian part of the Panonian basin. Nafta, 53/6-7, 239-249.

VIDOVIĆ, M. (1974): O kvartarnim i recentnim vertikalnim tektonskim pokretima u SI Bosni. III simpozij Dinarske asocijacije (1968), Zagreb.

WALTON, W.C. (1987): Groundwater pumping test: Design and analysis. Lewis Publishers, Chelsea.

WOJNAR, A.J. (2008): Investigating riverbed hydraulic conductivity at several well fields along the Great Miami River, southwest Ohio. Faculty of Miami University, Department of Geology, 113 str.

WU, J. & ZENG, X. (2013): Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation. Chinese Science Bulletin, 58(25), 3044-3052.

XU, X., HUANG, G., ZHAN, H., QU, Z. & HUANG, Q. (2012): Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas. Journal of Hydrology, 412, 170-181.

YE, M., NEUMAN, S. P. & MEYER, P. D. (2004): Maximum likelihood Bayesian averaging of spatial variability models in unsaturated fractured tuff. Water Resources Research, 40(5).

YEH, W. (1986): Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem. Water Resources Research, 22(2), 95-108.

YEH, H. F., LIN, H. I., LEE, C. H., HSU, K. C. & WU, C. S. (2014): Identifying Seasonal Groundwater Recharge Using Environmental Stable Isotopes. Water, 6(10), 2849-2861.

YURTSEVER, Y., & ARAGUAS, L.A. (1993): Environmental isotope applications in hydrology: an overview of the IAEA's activities, experiences, and prospects. Tracers in hydrology (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993), IAHS Publ. 215, 3-20.

ZANINOVIĆ, K., SRNEC, L. & PERČEC TADIĆ, M. (2004): Digitalna godišnja temperaturna karta Hrvatske. Hrvatski meteorološki časopis, 39, 51-58.

ZANINOVIĆ, K., GAJIĆ-ČAPKA, M., PERČEC-TADIĆ, M. et al. (2008): Klimatski atlas Hrvatske 1961–1990., 1971–2000. Državni hidrometeorološki zavod, 200 str., Zagreb.

ZHANG, Y., YE, S. & WU, J. (2011): A modified global model for predicting the tritium distribution in precipitation, 1960–2005. Hydrological Processes, 25(15), 2379-2392.

ZHU, G. F., LI, Z. Z., SU, Y. H., MA, J. Z. & ZHANG, Y. Y. (2007): Hydrogeochemical and isotope evidence of groundwater evolution and recharge in Minqin Basin, Northwest China. Journal of Hydrology, 333(2), 239-251.

ZOELLMANN, K., KINZELBACH, W. & FULDA, C. (2001): Environmental tracer transport (^3H and SF_6) in the saturated and unsaturated zones and its use in nitrate pollution management. Journal of Hydrology, 240(3), 187-205.

Neobjavljeni radovi

BAČANI, A. (1997): Značajke hidrauličkih granica vodonosnih slojeva na vododjelnici savskog i dravskog porječja u istočnoj Slavoniji. Disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 156 str.

BRKIĆ, Ž. (1999): Napajanje aluvijalnih vodonosnika sjeverne Hrvatske kroz slabije propusne krovinske naslage. Disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 157 str.

ĆIRIĆ, V. (2013): Vukovarsko-Srijemska županija, Prirodno-geografska i kulturno-povijesna baština, 32 str., Vinkovci.

INTERNATIONAL SAVA RIVER BASIN COMMISSION (2013): The 2010 hydrological yearbook of the Sava River Basin. International Sava River Basin Commission, Zagreb.

URUMOVIĆ, K. (1977): Hidrogeološke značajke istočne Posavine u SR Hrvatskoj. Magistarski rad. Sveučilište u Zagrebu, Centar za postdiplomski studij, 92 str.

Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual: http://trials.swstechnology.com/software/Visual_MODFLOW/2011/Manuals_and_Guides/VMOD-2011.1_Manual.pdf

WILSON, A. S. (2005): Hydrogeology, conceptual model and groundwater flow within alluvial aquifers of the Tenthill and Ma Ma catchments, Lockyer Valley, Queensland. Doctoral dissertation, Queensland University of Technology, 141 str.

Radovi u fondovima stručne dokumentacije

BAGARIĆ, I. (1995): Izvješće o rezultatima istraživanja utjecaja kanala Dunav – Sava na kvalitetu podzemne vode u području crpilišta budućeg regionalnog vodovoda Istočne Slavonije. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

BAGARIĆ, I. (2000): Crpilište regionalnog vodovoda Istočne Slavonije „Gudinci-Babina Greda“. Matematički model strujanja podzemne vode u području crpilišta – prva faza izgradnje crpilišta. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

BIONDIĆ, B., BRKIĆ, Ž. & BIONDIĆ, R. (1996): Vodnogospodarska osnova Republike Hrvatske. Hidrogeologija, I faza. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.

BIONDIĆ, B., BRKIĆ, Ž. & BIONDIĆ, R. (2003): Hidrogeološka karta M:300 000. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.

BRKIĆ, Ž. & BRIŠKI, M. (2013a): Izvorište Sikirevci Regionalnog vodovoda istočne Slavonije – monitoring razina i kakvoće podzemne vode. Hrvatski geološki institut, Zagreb.

BRKIĆ, Ž. & BRIŠKI, M. (2013b): Izvorište Sikirevci Regionalnog vodovoda istočne Slavonije – elaborat o zonama sanitarne zaštite. Hrvatski geološki institut, Zagreb.

FIL.B.IS HIDRO-GEO (2005): Izvještaj o izvođenju vodoistražnih radova na regionalnom crpilištu Babina Greda-Gundinci. Izrada istražno-eksploatacijskih zdenaca. Zagreb.

FIL.B.IS. HIDRO-GEO (2006): Izvještaj o izvođenju vodoistražnih radova na regionalnom crpilištu Babina Greda-Gudinci, Izrada istražno-eksploatacijskih zdenaca. Zagreb.

FIL.B.IS HIDRO-GEO (2007): Izvještaj o izvođenju vodoistražnih radova na crpilištu regionalnog vodovoda Istočne Slavonije. Izrada istražno-eksploatacijskih zdenaca. Zagreb.

GEOFIZIKA (1978-1981): Vodoistražni i vodozahvatni radovi Vinkovci 1977, 1978/8, 1978/80/81. Geofizika, Zagreb.

GEOFIZIKA (1985): Vodozahvatni radovi na regionalnom crpilištu Istočne Slavonije. Vinkovci 1984/85. Bunari B-1 i B-2 (Babina Greda). Geofizika, Zagreb.

GEOISTRAŽIVANJE OSIJEK (2005): Vodoistražni radovi na crpilištu regionalnog vodovoda Istočne Slavonije. Izrada istražno-piezometarskih bušotina.

GEOISTRAŽIVANJE OSIJEK (2006): Vodoistražni radovi na crpilištu regionalnog vodovoda istočne Slavonije, Izrada istražno-piezometarskih bušotina, Izvješće o izvedenim radovima.

HGI (2005): Hidrogeološka istraživanja u cilju defiiniranja eksploatacijskih zaliha podzemne vode na potencijalnom regionalnom crpilištu „Gudinci-Sikirevci“. Hrvatski geološki institut, Zagreb.

HGI (2008): Definiranje eksploatacijskog režima crpljenja na crpilištu Regionalnog vodovoda istočne Slavonije u Sikirevcima. Hrvatski geološki institut, Zagreb.

IPSA INSTITUT (2007): Plansko-studijska dokumentacija autoputu na koridoru Vc, LOT1: dionica: Svilaj-Doboj jug. Studija utjecaja na okolinu. Sarajevo.

JOSIPOVIĆ, J. & ATANACKOVIĆ, M. (1968): Hidrogeološke karakteristike sliva reke Save na teritoriju SR Bosne i Hercegovine. Fond zavoda za vodoprivredu, Sarajevo.

MILETIĆ, P., CAPAR, A., MAYER, D., TURIĆ, G., PLANČIĆ, A. & ŽUPARIĆ, A. (1981): Studija rezervi podzemne vode istočne Slavonije, III. faza. RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

MILETIĆ, P., BOŠKOVIĆ, D., GJETVAJ, G., MAYER, D., HEINRICH-MILETIĆ, M. & KLANJEC, D. (1985): Hidrogeološka istraživanja istočne Slavonije, I dio. Regionalno crpilište istočne Slavonije, I. vodonosni sloj: Matematički model. RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

NOVAKOVIĆ, V. (2002): Idejni projekat istražno-eksploatacionog bunara Vodovoda Šamac. D.o.o. „Ipin“ PO, Bijeljina.

NOVAKOVIĆ, V. (2004): Izvještaj o bušenju, osvajanju i testiranju bunara B-3 crpilišta Vodovoda Šamac. D.o.o. „Ipin“ PO, Bijeljina.

URUMOVIĆ, K., HERNITZ, Z., ŠIMON, J., TIŠLJAR, J., SOKAČ, A. & VELIĆ, J. (1976b): Studija određivanja zaliha podzemnih voda u istočnoj Slavoniji. Rezultati

hidrogeoloških istraživanja u 1974. i 1975. godini. RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

URUMOVIĆ, K, ČAKARUN, I., ŠARIN, A. & KOSTOVIĆ-DONADINI, K. (1980a): Hidrogeološka karta SR Hrvatske M 1:200 000, List Slavonski Brod i Pecs. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.

URUMOVIĆ, K, ČAKARUN, I., ŠARIN, A. & KOSTOVIĆ-DONADINI, K. (1980b): Hidrogeološka karta SR Hrvatske M 1:200 000, List Slavonski Brod i Pecs, Tumač. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.

ZAVOD ZA HIDROTEHNIKU GRAĐEVINSKOG FAKULTETA U SARAJEVU (1990): Istraživački radovi druge faze za definisanje nove lokacije izvorišta vodovodnog sistema „Bosanski Šamac“. Zavod za hidrotehniku građevinskog fakulteta u Sarajevu.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI:

Prezime:	Briški
Ime:	Maja
Datum rođenja:	19. svibnja 1984.
Adresa:	P.P. Njegoša 11/1, 10000 Zagreb
Telefon:	+385 92 1060 597
e-mail:	maja.briski@hgi-cgs.hr

OBRAZOVANJE:

2003. - 2009.	Diplomirani inženjer geologije, smjer Inženjerska geologija i hidrogeologija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
2009. - danas	Poslijediplomski studij na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, smjer geološkog inženjerstva, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

RADNO ISKUSTVO:

2009. - danas	Hrvatski geološki institut, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju, radno mjesto znanstvenog novaka.

USAVRŠAVANJE:

2010.	CC-WaterS - Climate Change and Impacts on Water Supply - 1st Student Training Course - “Water Supply in a Changing Environment”, Nyiregyhaza, Hungary.
2013.	Groundwater online training course – An introduction to MODFLOW modeling using Visual MODFLOW Flex, Schlumberger Water Services.

SUDJELOVANJE NA PROJEKTIMA:

2009. – danas	znanstveni novak na projektu "Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske" (01810102, 181-1811096-3165)

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA:

BRIŠKI, M., BRKIĆ, Ž. & URUMOVIĆ, K. (2013): Konceptualni model vodonosnog sustava na širem području Sikirevaca. U: Babajić, E. (ur.), V. Savjetovanje geologa Bosne i Hercegovine. Udruženje/udruga geologa Bosne i Hercegovine, Pale, 77-78.

BRKIĆ Ž., URUMOVIĆ K., BRIŠKI M. (2013): Post audit analysis of groundwater level prediction model in developed semiconfined aquifer system. Water resources menagement, 27,9, 3349-3363.

BRKIĆ Ž., URUMOVIĆ K., BRIŠKI M. (2010): Crpilište Ravnik – stanje i perspektive. U: Horvat, M. (ur.), 4. Hrvatski geološki kongres s međunarodnim sudjelovanjem, Knjiga sažetaka. Hrvatski geološki institut, Zagreb, 186-187.

BRKIĆ Ž., URUMOVIĆ K., BRIŠKI M., PEKAŠ Ž., LARVA O. (2010): Hidrogeološke karakteristike vodonosnika na budućem crpilištu regionalnog vodovoda kod Đurđevca. U: Horvat, M. (ur.), 4. Hrvatski geološki kongres s međunarodnim sudjelovanjem, Knjiga sažetaka. Hrvatski geološki institut, Zagreb, 188-189.

DUIĆ Ž., BRIŠKI M. (2010): Učinak geoloških struktura na hidrogeološke značajke kvartarnih naslaga u Baranji. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 22, 1-9.

MARKOVIĆ T., BRKIĆ Ž., LARVA O., PEKAŠ Ž., URUMOVIĆ K., BRIŠKI M. (2010): Kakvoća podzemne vode na području Dravskog bazena. U: Horvat, M. (ur.), 4. Hrvatski geološki kongres s međunarodnim sudjelovanjem, Knjiga sažetaka. Hrvatski geološki institut, Zagreb, 213-214.

URUMOVIĆ, K., BRKIĆ, Ž. & BRIŠKI, M. (2013): Korištenje snimki loggera pri identifikaciji zdenačkih gubitaka. U: Babajić, E. (ur.), V. Savjetovanje geologa Bosne i Hercegovine. Udruženje/udruga geologa Bosne i Hercegovine, Pale, 130-131.