

Opremanje zdenaca za proizvodnju podzemnih voda i korištenje u energetske svrhe

Tomić, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:169:807471>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

Diplomski rad

OPREMANJE ZDENACA ZA PROIZVODNJU PODZEMNIH VODA I KORIŠTENJE
U ENERGETSKE SVRHE

Dario Tomić

N 171

Zagreb, 2017

OPREMANJE ZDENACA ZA PROIZVODNJU PODZEMNIH VODA I KORIŠTENJE U ENERGETSKE
SVRHE

Dario Tomić

Rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U diplomskom radu prikazan je sustav iskorištavanja podzemnih voda u energetske svrhe pomoću dizalice topline. Opisan je slučaj zagrebačkog vodonosnika uključujući njegove hidrogeološke i geološke značajke. Kao primjer iskorištavanja podzemnih voda, urađena je analiza slučaja na zapadnom dijelu zagrebačkog vodonosnika, za čije je potrebe korištena oprema proizvođača PANCERA, te crpka proizvođača GRUNDFOS. Predviđeno je bušenje direktnom rotacijskom metodom, te su obrađeni podaci vodoistražnih radova i tehničke konstrukcije zdenaca.

Ključne riječi: zagrebački vodonosnik, podzemne vode, zdenac, dizalica topline

Završni rad sadrži: 42 stranice, 8 tablica, 23 slike i 23 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF

Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

COMPLETION OF WATER WELLS IN ORDER TO PRODUCE GROUNDWATER AND ITS
UTILIZATION AS AN ENERGY RESOURCE

Dario Tomić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Master thesis gives an overview of groundwater use in energy purpose including heat pumps as a part of a system. Zagreb aquifer case is described including its hidrogeological and geological features. As an example of groundwater utilization, study case is made on the west side of Zagreb aquifer, for whose purposes is used equipment produced by PANCERA and pump produced by GRUNDFOS. Directional drilling is planned, technical construcion data and exploration data are processed.

Keywords: Zagreb aquifer, groundwater, water well, heat pump

Thesis contains: 42 pages, 8 tables, 23 figures and 23 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: PhD Tomislav Kurevija, Full Professor

Reviewers: PhD Tomislav Kurevija, Full Professsor

PhD Luka Perković, Assistant Professor

PhD Vladislav Brkić, Assistant Professor

Sadržaj:

1. UVOD.....	1
2. TIPOVI VODONOSNIKA.....	4
2.1. Otvoreni vodonosnik.....	4
2.2. Zatvoreni vodonosnik	5
2.3. Poluotvoreni vodonosnik	6
2.4. Svojstva vodonosnika	7
2.4.1. Poroznost	8
2.4.2. Specifično otpuštanje.....	9
2.4.3. Specifična retencija.....	10
2.4.4. Skladišni koeficijent	10
2.4.5. Propusnost	11
2.4.6. Hidraulički gradijent.....	12
2.4.7. Hidraulička vodljivost	12
2.4.8. Transmisivnost	14
2.5. Tok podzemne vode.....	15
3. ZNAČAJKE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA.....	17
3.1. Opći podaci o vodonosniku	17
3.2. Geološke značajke	18
3.3. Hidrogeološke značajke	19
4. METODE BUŠENJA PRILIKOM IZRADE ZDENACA	24
4.1. Rotacijsko bušenje	24
4.2. Bušenje DTH čekićem	25
4.3. Reverzno bušenje	25
4.4. Spiralno bušenje.....	26
5. PROJEKTIRANJE ZDENCA	27
5.1. Opremanje i zaštita zdenaca.....	27

5.2. Čišćenje i osvajanje zdenaca.....	32
6. ANALIZA SLUČAJA NA ZAPADNOM DIJELU ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA.....	35
7. ZAKLJUČAK.....	40
8. LITERATURA	41

Popis slika:

Slika 1.1. T,S dijagram idealnog ciklusa dizalice topline	1
Slika 1.2. Ukupan broj pumpi u radu u 2013. i 2014. godini	2
Slika 2.1. Razina vode u bušotinama s obzirom na hidraulički potencijal	5
Slika 2.2. Poprečni presjek poluotvorenog vodonosnika	6
Slika 2.3. Hidraulička vodljivost	13
Slika 2.4. Hidraulička vodljivost i propusnost u RH	14
Slika 2.5. Definicija transmisivnosti	15
Slika 3.1. Geografski položaj zagrebačkog vodonosnika	17
Slika 3.2. Geološka karta zagrebačkog područja	18
Slika 3.3. Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava	19
Slika 3.4. 3D geološki model Zagrebačkog vodonosnika	20
Slika 3.5. Izopahe aluvija	21
Slika 3.6. Izopahe vodonosnog sustava	22
Slika 3.7. Izoterme prosječnih godišnjih temperatura podzemne vode	23
Slika 5.1. Izgled filtarskih cijevi: čelične mostićave, čelične spiralne, PVC i čelične s uzdužnim otvorima	29
Slika 5.2. Zavisnost položaja ekvipotencijalnih linija o tipu filtra	29
Slika 5.3. PVC filter cijevi	30
Slika 5.4. Spiralne filter cijevi	31
Slika 5.5. Mostićave filter cijevi	31
Slika 5.6. Čelične filter cijevi s uzdužnim otvorima	32
Slika 6.1. Hidrogram pokusnog crpljenja eksploatacijskog zdenca EZ-1	37
Slika 6.2. Hidrogram upojnosti utisnog zdenca UZ-1	38
Slika 6.3. Crpna karakteristika crpke	39

Popis tablica:

Tablica 2-1. Reprezentativne vrijednosti apsolutne poroznosti za stijene i nekonsolidirane sedimente.....	9
Tablica 2-2. Vrijednost specifičnog otpuštanja geoloških materijala.....	10
Tablica 5-1. Tipične čvrstoće odabranih zaštitnih cijevi.....	27
Tablica 5-2. Odabir promjera filtra.....	28
Tablica 6-1. Tehnička konstrukcija eksploatacijskog zdenca EZ-1	35
Tablica 6-2. Vrijednosti crpne količine u određenom vremenskom intervalu	36
Tablica 6-3. Litološki opis nabušenih naslaga eksploatacijskog zdenca EZ-1.....	37
Tablica 6-4. Litološki opis nabušenih naslaga utisnog zdenca UZ-1	38

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

- A – površina vodonosnika (m^2)
- A – površina poprečnog presjeka pješčanog filtra (m^2)
- A – površina poprečnog presjeka filtra (cm^2)
- c – bezdimenzionalni koeficijent koji objedinjuje značajke stijene (-)
- d – promjer (m)
- f – ukupni perforirani dio filtera u postocima (%)
- g – gravitacijska konstanta ($9.81 m/s^2$)
- h - razlika u razinama podzemne vode u mjerenim točkama (m)
- h_1, h_2 – visine stupca vode u manometrima (m)
- Δh – promjena razine podzemne vode (m^3)
- I – hidraulički gradijent (-)
- K – konstanta proporcionalnosti, ovisna o karakteristikama pješčanog filtra (-)
- K – hidraulička vodljivost (m/dan)
- K – hidraulička vodljivost filtra (cm/s)
- L – ukupna duljina ugrađenog filtra (m)
- l – visina pješčanog filtra (m)
- m – debljina vodonosnog sloja (m)
- P – snaga kompresora (W)
- S – skladišni koeficijent (-)
- S_r – specifična retencija (%)
- S_y – specifično otpuštanje (%)
- s – sniženje (m)
- T – transmisivnost (m^2/dan)
- V_b – ukupni obujam stijene (m^3)
- V_p – obujam pora (m^3)
- V_{pp} – obujam povezanih pora (m^3)
- V_{vd} – obujam vode koji stijena otpusti (m^3)
- V_{vr} – obujam vode koji stijena zadrži (m^3)
- ΔV – obujam otpuštene ili uskladištene vode (m^3)
- Q – vertikalni protok kroz filter (dm^3/s)
- Q – učinak dizalice topline (W)
- Q_{uk} – maksimalni projektirani kapacitet prihrane vode u zdenac za laminarni tok (l/s)
- q – obujamski protok vode (m^3/s)

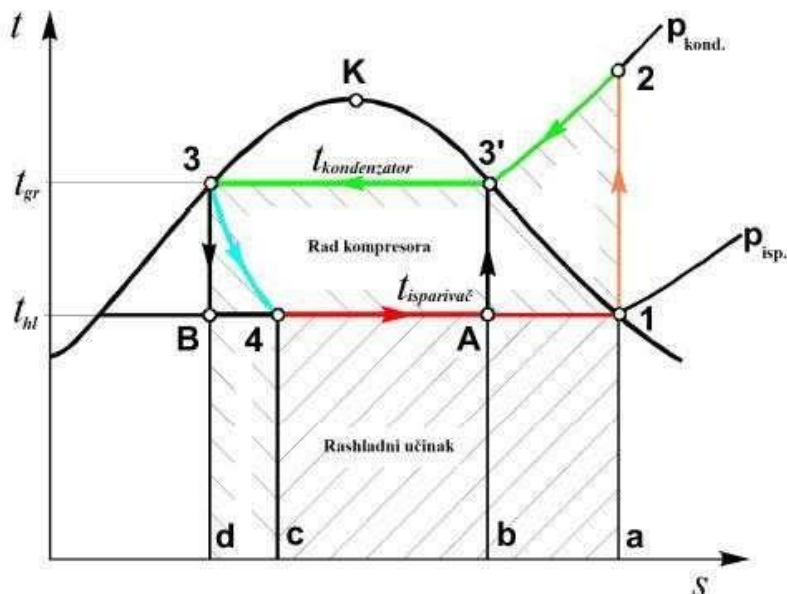
μ – dinamička viskoznost (Pas; g/s/cm)

ρ – gustoća fluida (kg/m^3)

\emptyset – poroznost ukupnog obujma stijene (-)

1. UVOD

Zemlja se ponaša kao veliko skladište toplinske energije u svojoj unutrašnjosti, prije svega kao posljedica radijacije Sunca, koja se naziva geotermalnom energijom. Bitne karakteristike geotermalne energije su čistoća i održivost. Može se koristiti kao toplinski izvor zimi, ili kao toplinski ponor ljeti, te se također može koristiti za modificiranje temperature građevina koje stoje na njoj. Pod geotermalnom energijom smatramo energiju koja se može pridobiti iz Zemljine unutrašnjosti i iskoristiti u energetske svrhe. Razni su načini, te je širok raspon potencijalne primjene prilikom iskorištavanja geotermalne energije. Izvori geotermalne energije mogu biti dublji dijelovi Zemljine unutrašnjosti, topla voda, te vruće stijene. Dizalice topline (engl. *heat pump*) su uređaji koji podižu toplinsku energiju s niže na višu energetska razinu (temperaturu) uz privedeni vanjski rad, s ciljem korištenja toplinske energije više razine. Iako postoji nekoliko termodinamičkih ciklusa po kojima dizalica topline može raditi, najčešći i komercijalno najekonomičniji je princip parnog kompresijskog ciklusa, a ostali mogući ciklusi su: apsorpcija, adsorpcija, Vuilleumier, Stirling, plinski kompresijski ciklus itd. Carnotov lijevokretni ciklus, koji je potpuno reverzibilan, idealan je rashladni ciklus koji radi između dvije izoterme i dvije adijabate. Svi lijevokretni termodinamički ciklusi temelje se na Carnotovu, iako su u stvarnosti različiti od njega (Kurevija 2010). Parni kompresijski ciklus na slici 1.1. po kojem radi dizalica topline i ostali rashladni uređaji, zapravo je obrnuti Rankineov ciklus.



Slika 1.1. T,S dijagram idealnog ciklusa dizalnice topline (Budin i Mihelić-Bogdanić, 2002)

Više od 1,7 milijuna sustava dizalica topline je prodano u Europskoj Uniji u 2014. godini. Procijenjena energije dobivena iz dizalica topline u 2014. je 8 Mtoe. Također značajan je i porast od 10% dizalica topline na sustavu zrak-zrak. Na slici 1.2. može se vidjeti ukupan broj pumpi u radu u 2013. i 2014. godini, na razini Europske Unije. Visina naknade za korištenje podzemnih voda u RH određena je uredbom o visini naknade za korištenje voda (Narodne novine 82/10) u iznosu od 0,10 kuna za 1 m³ zahvaćene vode te je istom uredbom određeno da je korisnik dužan putem mjernog uređaja (vodomjera) registrirati zahvaćenu količinu vode.

Država	2013			2014		
	Aerotermaalne pumpe	Geotermaalne pumpe	Ukupno toplinske pumpe	Aerotermaalne pumpe	Geotermaalne pumpe	Ukupno toplinske pumpe
Italija*	16 900 000	12 400	16 912 400	17 718 000	13 200	17 731 200
Francuska*	3 879 383	140 820	4 020 203	4 295 091	144 069	4 439 160
Švedska	892 916	453 486	1 346 402	954 271	476 842	1 431 113
Njemačka	265 181	297 191	562 372	305 137	314 502	619 639
Finska	472 207	74 182	546 389	528 276	85 307	613 583
Španjolska	246 246	1 144	247 390	300 247	1 144	301 391
Danska	211 077	49 747	260 824	225 209	51 638	276 847
Austrija	150 891	89 161	240 052	160 032	94 288	254 320
Nizozemska	155 594	43 882	199 476	199 148	45 986	245 134
Bugarska	194 244	3 740	197 984	214 971	4 272	219 243
Ujedinjeno Kraljestvo	81 491	20 560	102 051	97 851	22 750	120 601
Estonija	72 357	7 355	79 712	86 697	8 875	95 572
Portugal	83 755	3 020	86 775	91 276	3 020	94 296
Češka	30 572	18 330	48 902	36 819	19 908	56 727
Poljska	6 699	25 763	32 462	9 007	31 038	40 045
Belgija	22 993	6 008	29 001	27 545	6 996	34 541
Slovenija	17 004	5 110	22 114	22 231	5 500	27 731
Irska	3 862	2 693	6 555	5 678	3 201	8 879
Slovačka	5 238	2 527	7 765	5 886	2 839	8 725
Mađarska	1 955	2 087	4 042	2 228	2 597	4 825
Litva	920	2 093	3 013	1 260	2 828	4 088
Luksemburg	742	106	848	742	106	848
Europska Unija	23 695 327	1 261 405	24 956 732	25 287 602	1 340 906	26 628 508

Slika 1.2. Ukupan broj pumpi u radu u 2013. i 2014. godini (<http://www.eurobserv-er.org>)

Uloga dizalica topline u RH nije toliko zastupljena, prije svega zbog složenog hrvatskog zakonodavstva. Za dobivanje dozvole za korištenje podzemnih voda potrebno je prikupiti dokumentaciju za izdavanje vodopravnih uvjeta. Dokumentacija za izdavanje vodopravnih uvjeta kojima mora udovoljavati zahvat u prostoru, ovisno o vrsti i složenosti zahvata sadrži (Narodne novine, 78/10):

- a) idejni projekt za zahvat u prostoru koji sadrži:
 - podatke o lokaciji (opis, izvod iz katastarskog plana, gruntovni izvadak)
 - osnovne tehničke podatke o zahvatu (namjena, gabariti, kapacitet)
 - tehničko-tehnološko rješenje za postrojenje
 - podatke o potrebnim količinama, kakvoći i načinu opskrbe vodom

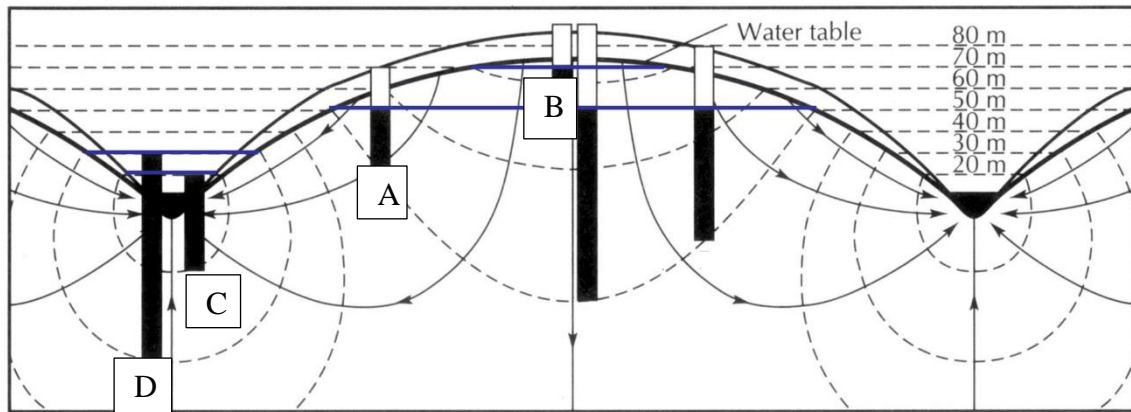
- podatke o količinama, stupnju onečišćenja, planiranom načinu ispuštanja otpadnih voda
 - načelno tehničko-tehnološko rješenje odvodnje i pročišćenje otpadnih voda
- b) studiju o utjecaju zahvata na okoliš i rješenje o prihvatljivosti zahvata na okoliš sa popisom mjera zaštite i programom praćenja stanja okoliša
- c) akt o ocjeni prihvatljivosti zahvata za ekološku mrežu.

2. TIPOVI VODONOSNIKA

Vodonosnik se definira kao zasićeni geološki materijal koji sadrži vodu u takvim količinama da ekonomski može biti iskoristiv. Da bi se smatrao vodonosnikom, geološki materijal mora sadržavati pore ili otvorene prostore ispunjene vodom. Pore moraju biti dovoljno dobro povezane, odnosno propusne, kako bi voda mogla prolaziti u potrebnim količinama. Veličina pora i broj pora unutar geološkog materijala može varirati, ovisno o tipu stijene, te geološkoj i kemijskoj prošlosti nastanka geološke formacije. Na primjer, pore unutar gline su ekstremno male, ali kombinirani obujam pora može biti neobično velik. Poroznost nedavno istaložene gline može dosegnuti i do 60%. Naredna kompakcija gline smanjuje porni prostor značajno. Suprotno tomu, poroznost nekonsolidirane pješćane jedinice može biti otprilike 25%. Iako glina ima veliki kapacitet za zadržavanje vode, ista se ne može lako i brzo kretati kroz uski porni prostor iz razloga što pore nisu dovoljno dobro povezane. To znači da se iz gline u normalnim okolnostima ne proizvode značajne količine vode te se stoga ne smatra vodonosnikom iako može biti zasićena vodom. Geološke jedinice koje daju određenu količinu vode, ali ne proizvode dovoljno da zadovolje potrebe, zovu se akvitarđovi – propusni granični slojevi vodonosnog horizonta. U sjevernoj Hrvatskoj glavni vodonosnici su aluvijalne šljunkovito-pjeskovite taložine kvartarne starosti, dok su u južnoj Hrvatskoj glavni vodonosnici raspucali i okršeni vapnenci, najčešće kredne starosti.

2.1. Otvoreni vodonosnik

Postoje tri tipa vodonosnika: otvoreni, zatvoreni i poluotvoreni tip, stoga se voda u vodonosnicima pojavljuje u dva različita uvjeta tlaka. U uvjetima gdje se gornja površina slobodno podiže i spušta, voda je pokretljiva i nije izolirana. Takvi vodonosnici su otvorenog tipa i također se nazivaju vodonosnici s vodnim zrcalom. Tlak mjerjen na razini podzemne vode je jednak atmosferskom. Podzemne vode se kreću iz područja većeg ukupnog potencijala prema području manjeg ukupnog potencijala. Slika 2.1. pokazuje bušotinu (D) koja presreće veći potencijal s dubinom. Ta se situacija pojavljuje u zoni istjecanja. Suprotna situacija se pojavljuje u zoni nadopunjavanja; ukupni potencijal pada s dubinom. Razina vode u bušotini B je manje od razine podzemne vode, tako se voda kreće prema dolje. Slika također pokazuje da je razina vode u bušotini D veća nego uzdignuće u bušotini C, pa tako voda teče od bušotine D prema bušotini C. Razina vode u bušotini D je iznad zemljine površine, što pokazuje uvjete kretanja vode.



Slika 2.1. Razina vode u bušotinama s obzirom na hidraulički potencijal (Sterett, 2007)

Pri neograničenim uvjetima razina podzemne vode se spušta i diže. Tijekom perioda suša, razina podzemne vode može pasti i do nekoliko metara, također kao posljedica istjecanja prema rijekama i bušotinama. Razine vode u bušotinama koje su perforirane na sličnoj dubini unutar otvorenog tipa vodonosnika mogu biti ocrtane. Topografija razine podzemne vode općenito naliči na topografiju zemljine površine, osobito u predjelima vlažne klime. Ocrtavanje podignuća razina vode unutar bušotina omogućuje izrađivanje karte koja prezentira razinu podzemne vode.

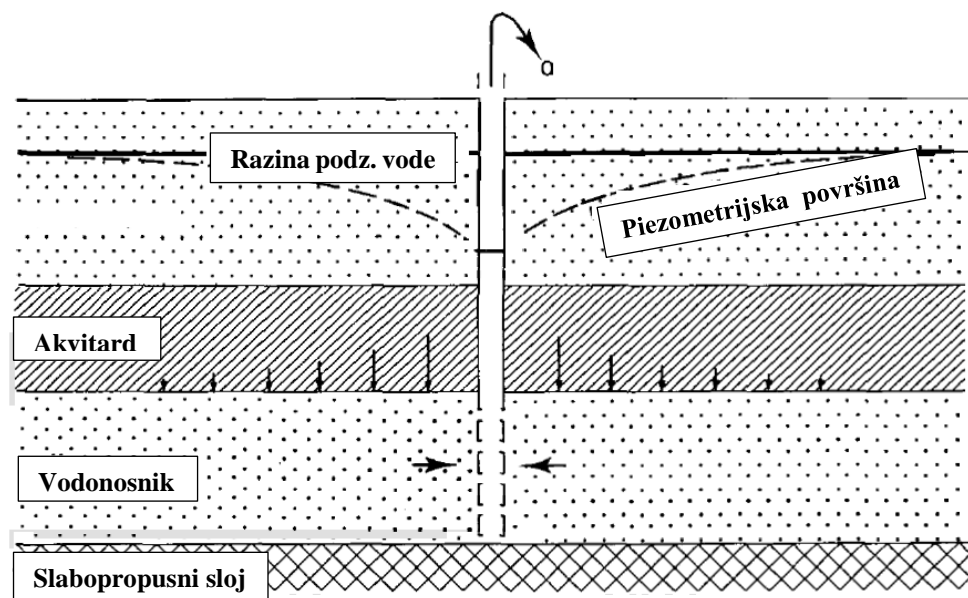
2.2. Zatvoreni vodonosnik

Podzemne vode se također pojavljuju i u ograničenim uvjetima. U takvim uvjetima podzemna voda je izolirana od atmosfere geološkim materijalom izrazito male propusnosti, i tlak u zatvorenim vodonosnicima je uglavnom mnogo veći od atmosferskog tlaka tako da je piezometrijska visina viša od vodnog lica. Prilikom instaliranja bušotine kroz slabopropusni sloj u zatvoreni vodonosnik, voda se u bušotini podiže do određene razine iznad vrha vodonosnika, i kao takva predstavlja tlak koji pritišće vrh vodonosnika. Granični tlak je definiran kao vertikalna udaljenost između razine vode u bušotini i vrha vodonosnika, ili dna akvitarda. Uzdignuće do kojeg se voda podiže unutar bušotine koja prolazi kroz zatvoreni vodonosnik se naziva njegovom piezometrijskom razinom. U zatvorenim, ograničenim uvjetima, piezometrijska površina je imaginarna površina koja predstavlja ukupni potencijal (hidrostatski tlak uvećan za tlak uzdignuća) kroz cijeli ili određeni dio zatvorenog vodonosnika. Hidrostatski tlak unutar zatvorenog vodonosnika može biti dovoljan da uzrokuje podizanje vode unutar bušotine na površinu. Statička razina vode u ovom slučaju je iznad površine i može se mjeriti zatvaranjem bušotine i mjerenjem tlaka

pomoću manometra. Piezometrijska površina u zatvorenom vodonosniku također se može podizati i spuštati ovisno o obujmu vode unutar vodonosnika. Prilikom prodiranja bušotine, tlak unutar vodonosnika pada i težina pokrovnih stijena tlači vodonosnik. Pore unutar vodonosnika ostaju zasićene sve dok se piezometrijska površina nalazi iznad vrha vodonosnika. U trenutku kada ona padne ispod vrha vodonosnika, stvara se vodonosnik otvorenog tipa. Uklanjanje vode iz vodonosnika otvorenog tipa je lagano za razumjeti za razliku od zatvorenog tipa. Utvrđeno je da je veća količina vode, koja se može ukloniti iz bušotine u zatvorenom vodonosniku, od one koja teče prema bušotini. Također je zaključeno da se glavni izvori vode u bušotini u zatvorenom vodonosniku sastoje od vode koja se kreće kroz vodonosnik prema bušotini, vode čije kretanje je uzrokovano težinom pokrovnih stijena, ekspanzijom vode koja je rezultat smanjenja tlaka u vodonosniku, te vode čije je kretanje uzrokovano tlačenjem okolnih akvitardova. Tlačenje akvitardova i vodonosnika može izazvati popuštanje na površini zbog uklanjanja fluida u zatvorenom vodonosniku.

2.3. Poluotvoreni vodonosnik

Poluotvoreni tip vodonosnika se u prirodi češće pojavljuje od savršeno zatvorenog tipa koji je prethodno spomenut. Nepropusne stijene u krovini i podini vodonosnika su rijetko potpuno nepropusne, većina njih je napuknuta u određenim predjelima. Kad voda prilazi u bušotinu iz poluotvorenog vodonosnika, ona ne dolazi isključivo iz vodonosnika, nego također iz akvitardova koji okružuju vodonosnik. Sustav poluotvorenog vodonosnika je prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2. Poprečni presjek poluotvorenog vodonosnika (Sterett, 2007)

To je troslojni sustav koji se sastoji od 2 vodonosnika, međusobno odvojena akvitarodom. Donji vodonosnik leži na djelomično vodonepropusnom sloju. Bušotina u potpunosti prolazi kroz donji vodonosnik i perforirana je dužinom cijele stijenke vodonosnika. Bušotina nije perforirana u gornjem vodonosniku otvorenog tipa. Prije početka crpljenja vode, sustav miruje, piezometrijska površina donjeg vodonosnika podudara se sa razinom podzemne vode u gornjem vodonosniku, otvorenog tipa. Kada voda pođe ulaziti u bušotinu, hidraulički potencijal u donjem vodonosniku će pasti, tako tvoreći hidraulički gradijent ne samo u vodonosniku nego i u akvitaradu. Pretpostavka je da je tok vode induciran crpljenjem vertikalna na razini akvitarada i horizontalna na razini vodonosnika. Pogreška uvedena ovom pretpostavkom je obično manja od 5% ako je hidraulički konduktivitet vodonosnika dva ili više puta veći od onog unutar tog akvitarada. Voda koja u bušotinu dolazi iz vodonosnika, dolazi iz skladišta vodonosnika. Voda koju pridonosi akvitarad, dolazi iz skladišta akvitarada i dio prolazi kroz njega iz gornjeg neperforiranog vodonosnika otvorenog tipa. Daljnjim dolaskom vode u bušotinu, sve više vode prolazi kao posljedica propuštanja akvitarada iz gornjeg vodonosnika i nešto manje iz skladišta akvitarada. Nakon određenog vremena, istjecanje iz bušotine dolazi u ravnotežu s propuštanjem kroz akvitarad i stacionarni tok se uspostavlja. Pod takvim uvjetima akvitarad služi tek toliko da održava prijenos vode umjerenim, i udio vode koji dolazi iz njegovog skladišta postaje zanemariv. Rješenja za problem stacionarnog toka se temelje na dvije vrlo ograničene pretpostavke. Prva je da tijekom crpljenja razina podzemne vode u gornjem vodonosniku ostaje konstantna, a druga da mjera propuštanja kroz vodonosnik poluotvorenog vodonosnika je proporcionalna hidrauličkom gradijentu kroz akvitarad. Ali kako se crpljenje nastavlja, razina podzemne vode u gornjem vodonosniku će padati zbog sve većeg protjecanja vode kroz akvitarad u perforirani vodonosnik. Pretpostavka konstante će biti zadovoljena jedino ako je gornji vodonosnik zamijenjen nekim vanjskim, sekundarnim izvorom, kao voda s površine koja se distribuira preko gornjeg vodonosnika sustavom usko spojenih jaraka. Druga pretpostavka u potpunosti zanemaruje skladišni kapacitet akvitarada. To je dokazano kad tok kroz bušotinu postane stacionaran i količina vode dobivena iz skladišta akvitarada postane neznatno manja.

2.4. Svojstva vodonosnika

Vodonosnik ima dvije bitne funkcije: skladištenje i prijenos vode. Sposobnost vodonosnika da skladišti, prima i provodi vodu određena je svojstvima stijene kao što su poroznost, hidraulička vodljivost, propusnost, koeficijent skladištenja, transmisivnost, specifična retencija i specifični prinos/izdašnost.

2.4.1. Poroznost

Poroznost neke stijene je mjera njenog skladišnog prostora koji može sadržavati fluide, izražena je kao dio cijelog, a često se iskazuje kao postotak (%), a definirana je kao:

$$\emptyset = \frac{V_p}{V_b} \quad (2-1)$$

gdje su:

\emptyset – poroznost ukupnog obujma stijene

V_p – obujam pora (m^3)

V_b – ukupni obujam stijene (m^3)

Ovisno o podrijetlu, poroznost stijena može biti primarna i sekundarna. Primarna je nastala u stijeni prilikom njezinog postanka, a sekundarna poroznost karakterizira čvrste stijene koje su naknadno bile izložene nekim tektonskim silama. Za kretanje vode, za razliku od apsolutne poroznosti, bitna je efektivna poroznost koja predstavlja obujam povezanih pora kroz koje se može ostvariti kretanje vode, u odnosu na ukupan obujam stijene, koja je definirana kao:

$$\emptyset = \frac{V_{pp}}{V_b} \quad (2-2)$$

gdje je:

V_{pp} – obujam povezanih pora (m^3)

Vrijednost efektivne poroznosti se koristi u inženjerskim proračunima, budući da ona predstavlja povezani porni prostor koji sadrži pridobivu vodu. Ta se vrijednost može izmjeriti posebnim laboratorijskim tehnikama ili karotažnim i hidrodinamičkim mjerenjima. Reprezentativne vrijednosti apsolutne poroznosti za stijene i nekonsolidirane sedimente su prikazane u tablici 2-1.

Tablica 2-1. Reprezentativne vrijednosti apsolutne poroznosti za stijene i nekonsolidirane sedimente (Davis, 1969)

Materijal	Poroznost (%)
Vapnenac	4,6 - 21,6
Kreda	29,2
Dolomit	0,4 - 27,8
Kamena sol	0,6
Gips	3,8
Granit	0,3
Bazalt	0,8 - 11,4
Sedra	14 – 40
Plavac	87,3
Tektit	0,52
Mramor	0,3
Kvarcit	0,6
Slejt	3,4
Konglomerat	17,3
Pješčenjak	11,2 - 27,4
Silit	9,7
Šejl	5,2 - 21,1
Sediment	
Glina	33,3 - 58,8
Silt	33,7 - 50,0
Pijesak	33,8 - 51,3

2.4.2. Specifično otpuštanje

Kada se voda crpi iz zasićenog materijala pod djelovanjem sile teže, materijal otpušta samo dio ukupnog obujma uskladištenog u porama. Količina vode koju jedinični obujam otvorenog vodonosnika otpusti uslijed gravitacijske drenaže se zove specifično otpuštanje. Prikazuje se kao omjer obujma vode koji stijena gravitacijski otpusti i ukupnog obujma zasićene stijene vodonosnika:

$$S_y = \frac{V_{vd}}{V_b} \quad (2-3)$$

gdje su:

S_y – specifično otpuštanje (%)

V_{vd} – obujam vode koji stijena otpusti (m^3)

2.4.3. Specifična retencija

Određena količina vode ostaje u porama kao posljedica molekularnog privlačenja i kapilarnih sila, odnosno kao posljedica adhezivnih i kohezivnih sila. Količina vode koju jedinični obujam vodonosnika zadržava uslijed pojavljivanja gravitacijske drenaže se zove specifična retencija, te se izražava kao omjer obujma vode koji stijena zadrži unatoč gravitaciji i ukupnog obujma zasićene stijene vodonosnika.

$$S_r = \frac{V_{vr}}{V_b} \quad (2-4)$$

gdje su:

S_r – specifična retencija (%)

V_{vr} – obujam vode koji stijena zadrži (m^3)

Specifična retencija (S_r) i specifično otpuštanje (S_y) zbrojeni jednaki su efektivnoj propusnosti uzorka.

Tablica 2-2. Vrijednost specifičnog otpuštanja geoloških materijala (Lohman, 1979)

Materijal	Specifično otpuštanje (%)
Glina	2
Pješčana glina	7
Silt	18
Fini pijesak	21
Grubi pijesak	27
Fini šljunak	15
Grubi šljunak	22

2.4.4. Skladišni koeficijent

Skladišni koeficijent (S) predstavlja obujam vode koja se uskladišti ili otpusti po jediničnoj površini vodonosnika, pri jediničnoj promjeni razine podzemne vode. U slučaju

otvorenog vodonosnika, specifično otpuštanje je ekvivalentno njegovom skladišnom koeficijentu, te se za otvoreni vodonosnik kreće u rasponu od 0,01 do 0,30. Specifično otpuštanje i skladišni koeficijent za zatvoreni tip vodonosnika se ne mogu odrediti korištenjem standardnih laboratorijskih tehnika zbog toga što materijali vodonosnika nisu odvojili od vode tijekom crpljenja. Skladišni koeficijenti za zatvorene vodonosnike su mnogo manji nego za otvorene i kreću se u rasponu od 0,00001 do 0,001. S je bezdimenzionalna veličina, definirana kao:

$$S = \frac{\Delta V}{A\Delta h} \quad (2-5)$$

gdje su:

ΔV – volumen otpuštene ili uskladištene vode (m^3)

Δh – promjena razine podzemne vode (m^3)

A – površina vodonosnika (m^2)

2.4.5. Propusnost

Propusnost (engl. *permeability*) je svojstvo šupljikavog medija koje određuje njegovu sposobnost (moć) da propušta fluide, odnosno sposobnost fluida da protječu u šupljikavom mediju. Ovu karakteristiku stijene prvi je matematički definirao Henri Darcy, 1856. godine, jednadžbom koja je kasnije nazvana Darcyjev zakon, a koja definira propusnost u funkciji mjerljivih veličina. On je eksperimentalno ustanovio zakonitost protjecanja vode kroz pješčani filter visine l i površine poprečnog presjeka A , koja glasi:

$$q = KA \frac{h_1 - h_2}{l} \quad (2-6)$$

gdje su:

q – obujamski protok vode (m^3/s)

K – konstanta proporcionalnosti, ovisna o karakteristikama pješčanog filtra (m/s)

A – površina poprečnog presjeka pješčanog filtra (m^2)

h_1, h_2 – visine stupca vode u manometrima (m)

l – visina pješčanog filtra (m)

Ako je:

$$I = \frac{h_1 - h_2}{l} = \frac{dh}{dl} \quad (2-7)$$

gdje su:

I – hidraulički gradijent (-)

h – razlika u razinama podzemne vode u mjerenim točkama (m) iz toga slijedi:

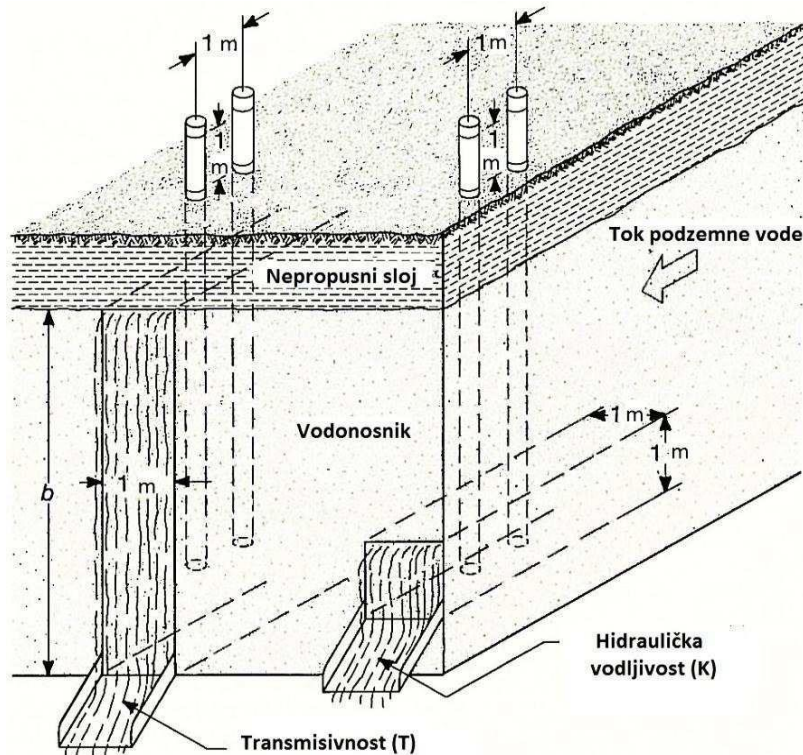
$$q = K \cdot A \cdot I \quad (2-8)$$

2.4.6. Hidraulički gradijent

Hidraulički gradijent (I) je bezdimenzionalna veličina, te označava gubitak energije uzrokovan otporom stijene filtraciji fluida i veći je kod sitnozrnatih nego kod krupnozrnatih klastičnih stijena. U Darcyjevom zakonu dh/dl predstavlja hidraulički gradijent ili promjenu potencijala na promatranom putu. Iz Darcyjeve jednadžbe proizlazi da je brzina toka vode linearno proporcionalna hidrauličkom gradijentu te stoga ovaj zakon nazivamo još i linearni zakon filtracije.

2.4.7. Hidraulička vodljivost

Hidraulička vodljivost je svojstvo vodonosnog geološkog materijala koje se odnosi na njegovu sposobnost da prenosi vodu pri standardnoj temperaturi i gustoći, prikazano na slici 2.3. Termin se koristi umjesto uobičajenog izraza koeficijenta propusnosti ili koeficijenta filtracije i uglavnom se pojavljuje u hidrogeologiji, dok se propusnost kao termin koristi u naftnoj industriji. Hidraulička vodljivost ovisi o veličini i obliku pora, efektivnoj poroznosti, kao i o fizikalnim i kemijskim svojstvima vode koja se nalazi u prostoru, a označava protok podzemne vode (m^3/s) kroz jedinični presjek vodonosnika (m^2) uz jedinični hidraulički gradijent – pad potencijala za 1 m u smjeru tečenja podzemne vode.



Slika 2.3. Hidraulička vodljivost (Driscoll, 1986)

Hidraulička vodljivost se kreće u rasponu od 10^{-9} m/dan za nefrakturirane škriljavce i eruptivne stijene do 10^3 m/dan za šljunke i kavernozone vapnence. Definirana je kao:

$$K = k \cdot \frac{\rho g}{\mu} = cd^2 \cdot \frac{\rho g}{\mu} \quad (2-9)$$

gdje su:

K – hidraulička vodljivost (m/dan)

ρ – gustoća fluida (kg/m^3)

g – gravitacijska konstanta ($9.81 m/s^2$)

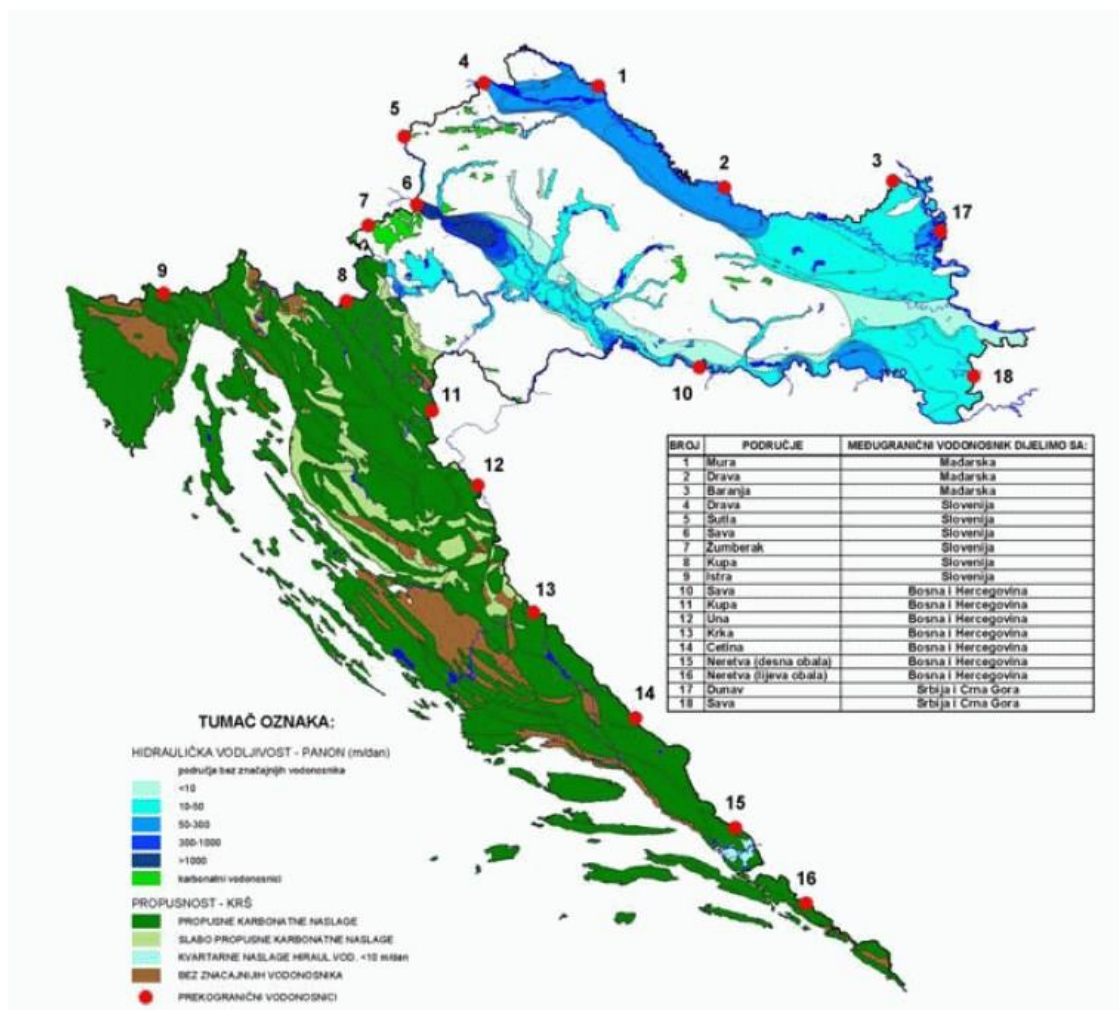
μ – dinamička viskoznost (Pas; g/s/cm)

d – promjer pore kroz koju se filtrira fluid (m)

c – bezdimenzionalni koeficijent koji objedinjuje značajke stijene (-)

Vrijednost K varira ovisno o smjeru i lokaciji, s obzirom na to, postoje heterogeni i homogeni vodonosnici. Na slici 2.4. vidljiva je hidraulička vodljivost i propusnost u RH. U homogenim vodonosnicima, hidraulička vodljivost je konstantna, dok u heterogenim ovisi od lokacije do

lokacije. S druge strane, u izotropnim vodonosnicima K je konstantna u svim smjerovima, dok u anizotropnim je različita u različitim smjerovima.



Slika 2.4. Hidraulička vodljivost i propusnost u RH (Narodne novine 107/95, 150/05)

2.4.8. Transmisivnost

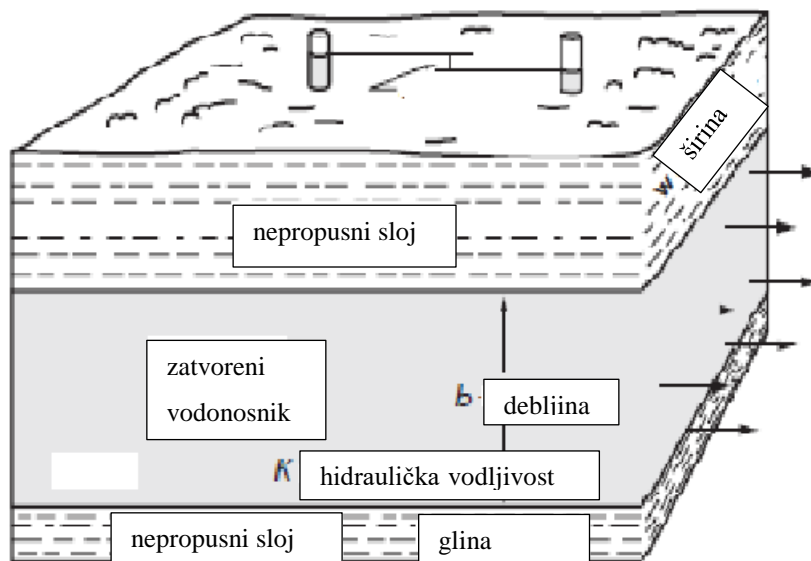
Transmisivnost je mjera koja definira količinu vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosnog sloja, jedinične debljine i širine (m), uz pripadajući jedinični hidraulički gradijent (slika 2.5.). Temperatura koja se pretpostavlja pri određivanju transmisivnosti je pripadajuća temperatura podzemne vode unutar vodonosnika. Označava se simbolom T i izražava u m^2/dan ili m^2/s . Definirana je kao umnožak hidrauličke vodljivosti i debljine sloja:

$$T = K \cdot m \quad (2-10)$$

gdje su:

T – transmisivnost (m^2/dan)

m – debljina vodonosnog sloja (m)



Slika 2.5. Definicija transmisivnosti (Bloetscher, 2014)

Općenito, tri su osnovne metode određivanja transmisivnosti:

- korištenjem podataka prikupljenih tijekom testova provedenih na vodonosniku
- analiziranjem hidrauličkih svojstava vodonosnika
- izrađivanjem kalkulacija na temelju laboratorijskih testova

Prva metoda se temelji na opažanju spuštanja razine podzemne vode na prilikom testiranja. Tu postoji niz jednadžbi koji opisuju tok u blizini bušotine, te daju vrijednost transmisivnosti na temelju pada razine vode u bušotini. Druga metoda uključuje određivanje hidrauličke vodljivosti (K) vodonosnika. Pri tome, vrijednost je određena upotrebom analize veličine zrna uzoraka prikupljenih iz vodonosnika. Treća metoda uključuje analizu uzoraka korištenjem permeametra. Mjerenjima protoka voda kroz permeametar može se odrediti vrijednost hidrauličke vodljivosti. Od prikazane tri metode, točnija vrijednost transmisivnosti se dobije korištenjem prve metode.

2.5. Tok podzemne vode

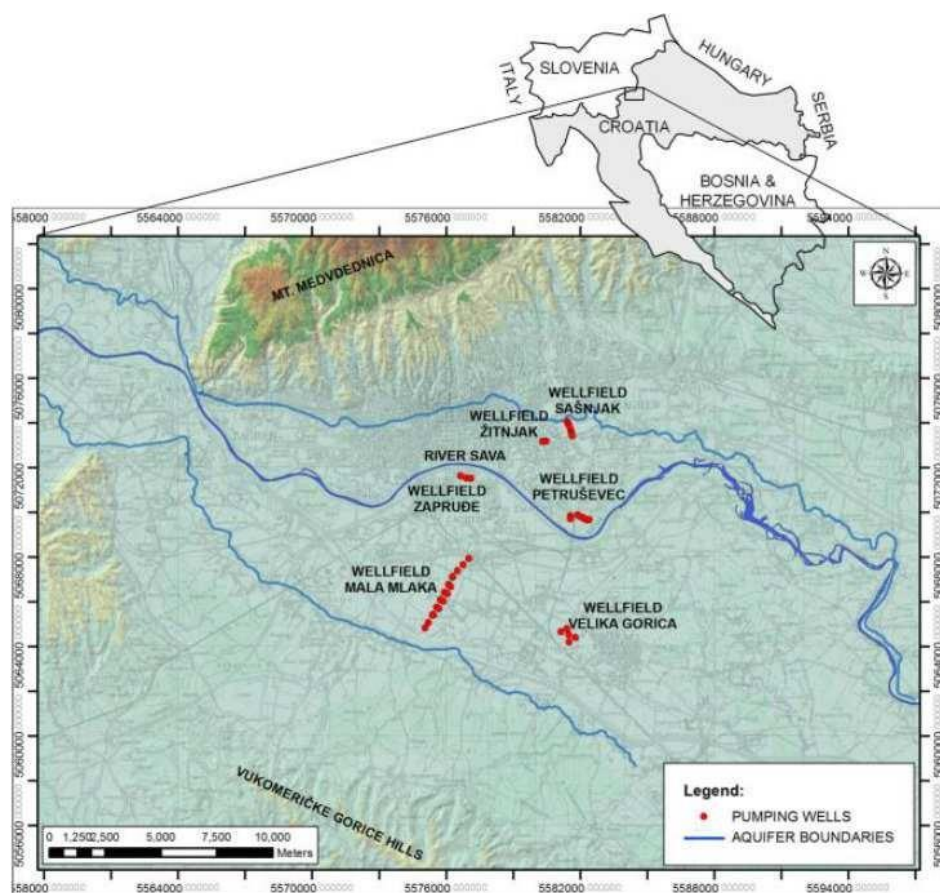
Tok podzemne vode se odvija kao posljedica razlike ukupnog potencijala između dvije točke. Kao što je prethodno rečeno, voda se kreće od lokacije visokog ukupnog potencijala u smjeru lokacije niskog ukupnog potencijala. U vodonosnicima zatvorenog tipa voda se može kretati od područja nižeg tlaka prema području višeg tlaka kao posljedica pretvorbe potencijala u energiju tlaka prilikom kretanja.

Dva su osnovna tipa toka podzemne vode – laminarno i turbulentno. Eksperimentalno je dokazano da je brzina ta o kojoj ovisi koji će režim biti prisutan ovisno o danim uvjetima. Kroz zemlju voda se obično kreće jako sporo pa je tako prisutan laminarni režim. Turbulentni tok se pojavljuje blizu bušotina i na mjestima gdje veliki obujam vode mora proći kroz uske otvore.

3. ZNAČAJKE ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

3.1. Opći podaci o vodonosniku

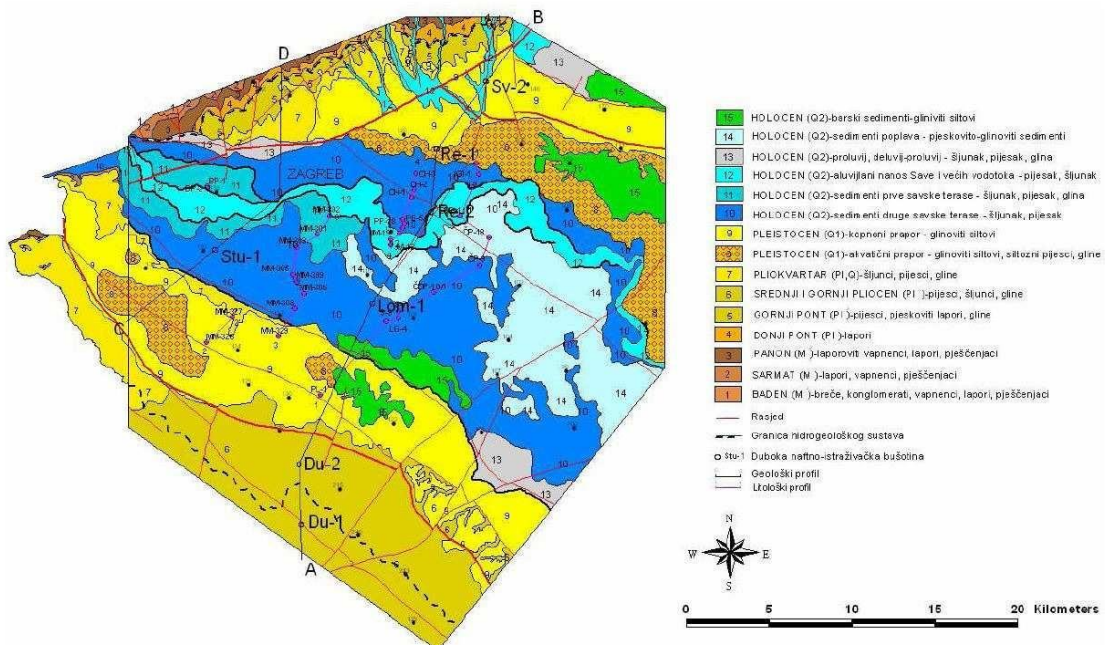
Zagrebački vodonosnik prostire se površinom od oko 350 km², pravcem sjeverozapad-jugoistok u dužini od oko 30 km, gdje dugačka i široka aluvijalna ravnica dominira područjem, s prosječnom širinom od 10 do 15 km i debljinom koja iznosi 5 do 10 m u zapadnim dijelovima pa sve do stotinjak metara u istočnim dijelovima sustava. Područje zagrebačkog vodonosnika nalazi se na zapadnom rubu Panonske zavale, prostirući se prirodno heterogenom regijom kao što je prisavska regija. Središnjim dijelom protječe rijeka Sava koja drenira sustav i dijeli vodonosnik na lijevo i desno zaobalje. Na slici 3.1. vidljivo je da u sklopu sustava postoji šest glavnih crpilišta i nekoliko manjih u slučaju pojave sušnih perioda.



Slika 3.1. Geografski položaj zagrebačkog vodonosnika (Posavec, 2006)

3.2. Geološke značajke

Područjem istraživanja, vidljivo na slici 3.2., dominiraju tri tipa naslaga: pijesci, šljunci i prahovi/prahovite gline, taloženi uglavnom tijekom pleistocena i holocena. Tijekom srednjeg i mlađeg pleistocena taložili su se pijesci, prahovi i gline, a u vrijeme zatopljenja površinski dijelovi tih sedimenata bili su izloženi pedogenetskim procesima (Velić i Saftić, 1991). Za vrijeme starijeg pleistocena taloženi su prahovi/prahovite gline, u kojima se sporadično pojavljuju leće šljunka. Šljunak je bio donasan tekucicama, najčešće bujicama u jezersku plitkovodnu sredinu (Velić i Durn, 1993). Početkom holocena, klimatski i tektonski procesi omogućili su prodor rijeke Save čime je započeo transport materijala s područja Alpa i taloženje debele serije fluvijalnih (deluvijalno-proluvijalnih) sedimenata. Litološki sastav sedimenata u najužoj je vezi sa sastavom stijena koje leže u njihovom neposrednom zaleđu. Bitne karakteristike vodonosnika su njegova anizotropija i heterogenost, te neujednačena debljina naslaga koje su posljedica taloženja u razdoblju čestih klimatskih promjena i tektonskih pokreta (Velić et al, 1999). Na sjeveru se nalaze pretežito glinovite naslage koje prelaze u slabopropusne tercijarne naslage južnog dijela Medvednice. Na istočnom, izlaznom, rubu sustava smanjena je propusnost, pa su protoci ograničeni. Na zapadnom rubu, sustav ima malu kontaktnu površinu sa samoborskim vodonosnikom. Na južnom dijelu zagrebački vodonosnik se naslanja na klastične stijene Stupničke trase.



Slika 3.2. Geološka karta zagrebačkog područja (Bačani i Šparica, 2001)

Nesaturirana zona zagrebačkog vodonosnika nalazi se u vršnom dijelu holocenskih naslaga. Debljina joj vara od 8 metara u sjeverozapadnom dijelu do 2 metra u jugoistočnom dijelu. Na slici 3.3. vidljivo je da se u profilu razlikuju dva vodonosna sloja: prvi s dominantno aluvijalnim naslaga rijeke Save i drugi s dominantno jezersko-barskim naslagama.

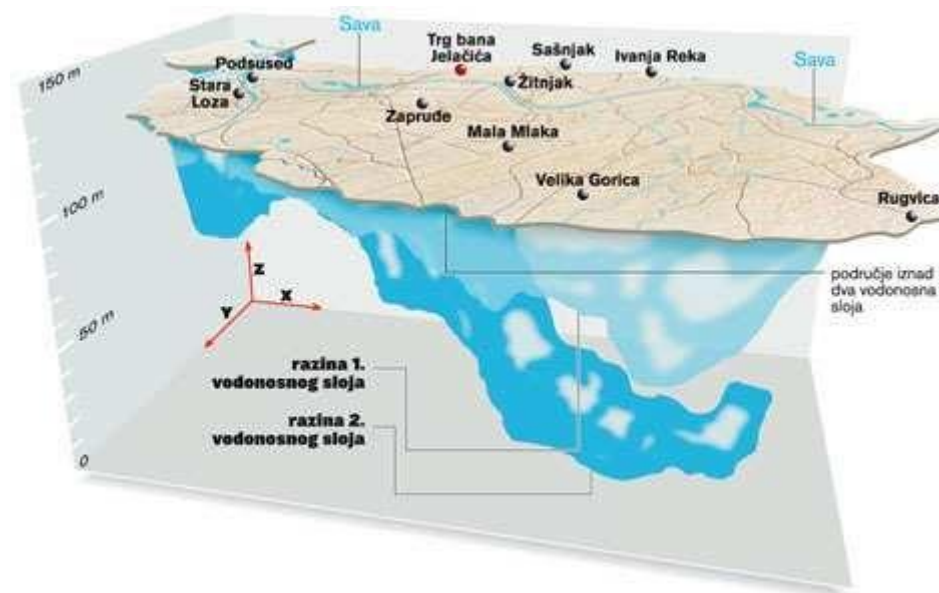


Slika 3.3. Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006)

3.3. Hidrogeološke značajke

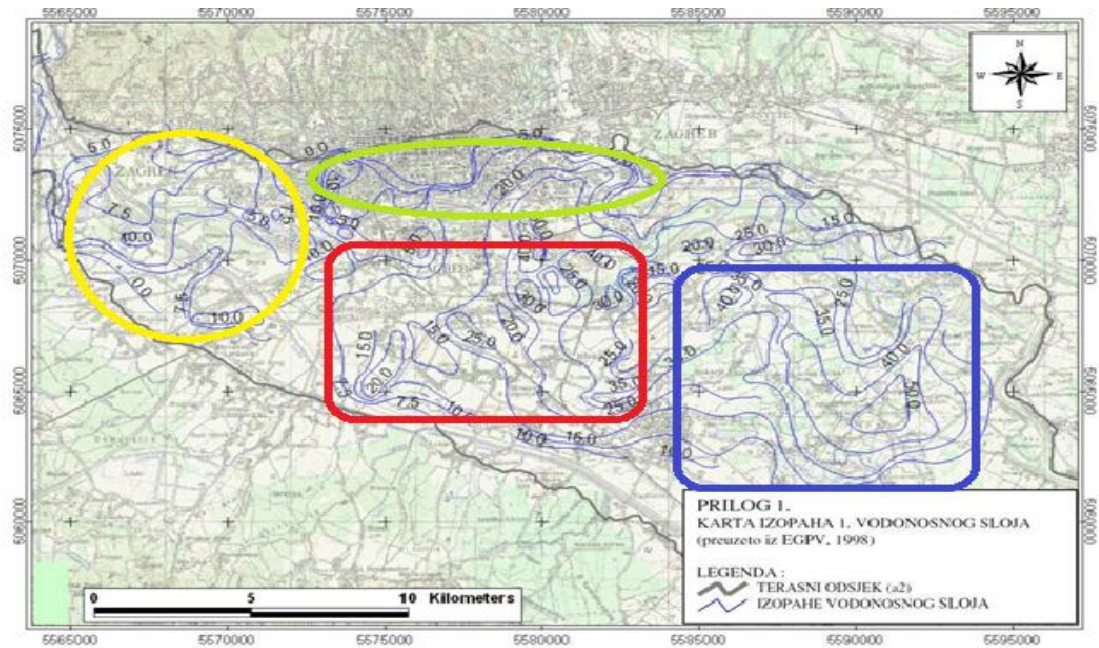
Zagrebački vodonosnik je otvorenog tipa, što znači da mu je gornja granica pod atmosferskim tlakom. Rubne granice čine u hidrauličkom smislu nepropusna granica na sjeveru, granica dotjecanja na zapadu, granica dotjecanja (slabe i ne do kraja poznate propusnosti) na jugu te granica otjecanja na istoku. Krovinu vodonosnika čini vodna ploha koja je u kontaktu s rijekom Savom. Posavec je (2006) analizirajući dotjecanja/otjecanja u, odnosno iz zagrebačkog vodonosnika na osnovu karata ekvipotencijala za godišnje niske, srednje i visoke razine podzemne vode u razdoblju od 1994. do 2003. utvrdio da po južnoj rubnoj granici vodonosnika postoji dotjecanje različitog inteziteta duž granice. Također je utvrdio da rijeka Sava za vrijeme visokih vodostaja napaja vodonosnik duž cijelog toka na području zagrebačkog vodonosnika, dok za vrijeme srednjih i niskih vodostaja na pojedinim dijelovima toka dolazi do dreniranja vodonosnika što nepovoljno utječe na razine podzemne vode, a time i na raspoložive količine za vrijeme dužih suših razdoblja. Napajanje vodonosnika se u najvećoj mjeri ostvaruje: (1) infiltracijom iz rijeke Save; (2) infiltracijom oborina; (3) infiltracijom iz propusne vodoopskrbne i kanalizacijske mreže; (4) dotjecanjem po zapadnoj iz granici susjednog samoborskog vodonosnika; te (5) dotjecanjem po južnoj granici vodonosnika s područja Vukomeričkih Gorica (Posavec 2006). Sava je svojim

koritom usječena u aluvijalne holocenske naslage koje su dominantno zastupljene šljuncima izrazito visoke hidrauličke vodljivosti. U zapadnim predjelima vodonosnika hidraulička vodljivost je vrlo visoka i premašuje 3000 m/dan, dok dalje prema istoku opada pa tako kod Črnkovca iznosi oko 2000 m/dan, a nešto istočnije i manje od 1000 m/dan (Urumović i Mihelčić, 2000). Prvi vodonosni sloj koji se nalazi ispod krovine pretežno je sastavljen od kompaktnog i visoko propusnog šljunka, s udjelom pijeska 20-30% i slita oko 5%. Koeficijent uskladištenja iznosi 0,5 za njegov istočni i granični dio, dok za dio uz riječno korito iznosi 0,15. U podnožju prvog vodonosnog sloja i 30 metarskog sloja slabopropusne gline smješten je drugi vodonosni sloj debljine 20-30 m, vidljivo na slici 3.4. Koeficijent uskladištenja drugog vodonosnog sloja istovjetan je koeficijentu uskladištenja za istočni dio prvog vodonosnog sloja.



Slika 3.4. 3D geološki model Zagrebačkog vodonosnika (Posavec, 2006)

Slabopropusna krovina ili nije prisutna ili pak dostiže debljinu od svega nekoliko metara na većem dijelu vodonosnog sustava, a tek se u jugoistočnom dijelu ili u rubnim predjelima povećava do petnaestak metara. Prirodno tanki pokrov je dodatno devastiran i on više ne predstavlja zaštitu od zagađenja s površine. Podinu vodonosnog sustava čine slabopropusne naslage. Na slici 3.5. su prikazane debljine prvog vodonosnog sloja.

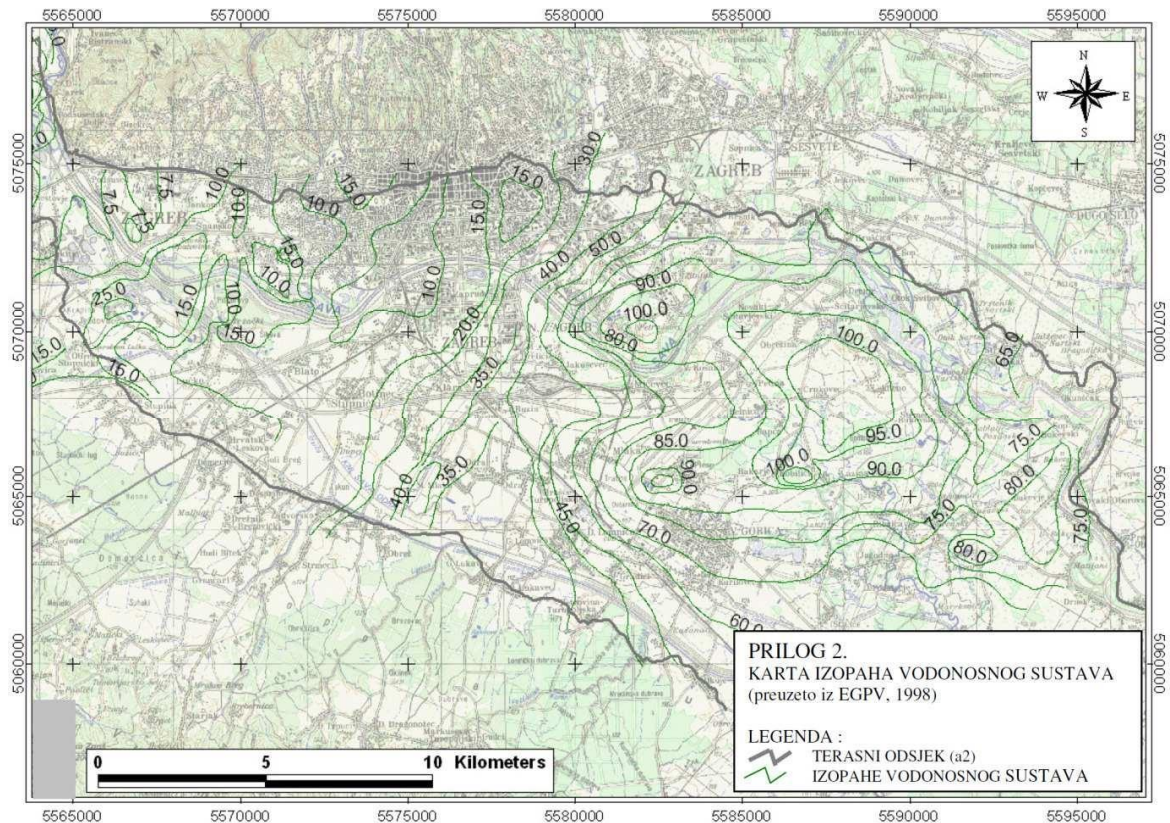


Slika 3.5. Izopahe aluvija (Miletić i Bačani, 1999)

Kao što se vidi, vodonosni sloj na temelju debljine se može podijeliti na 4 dijela, i to:

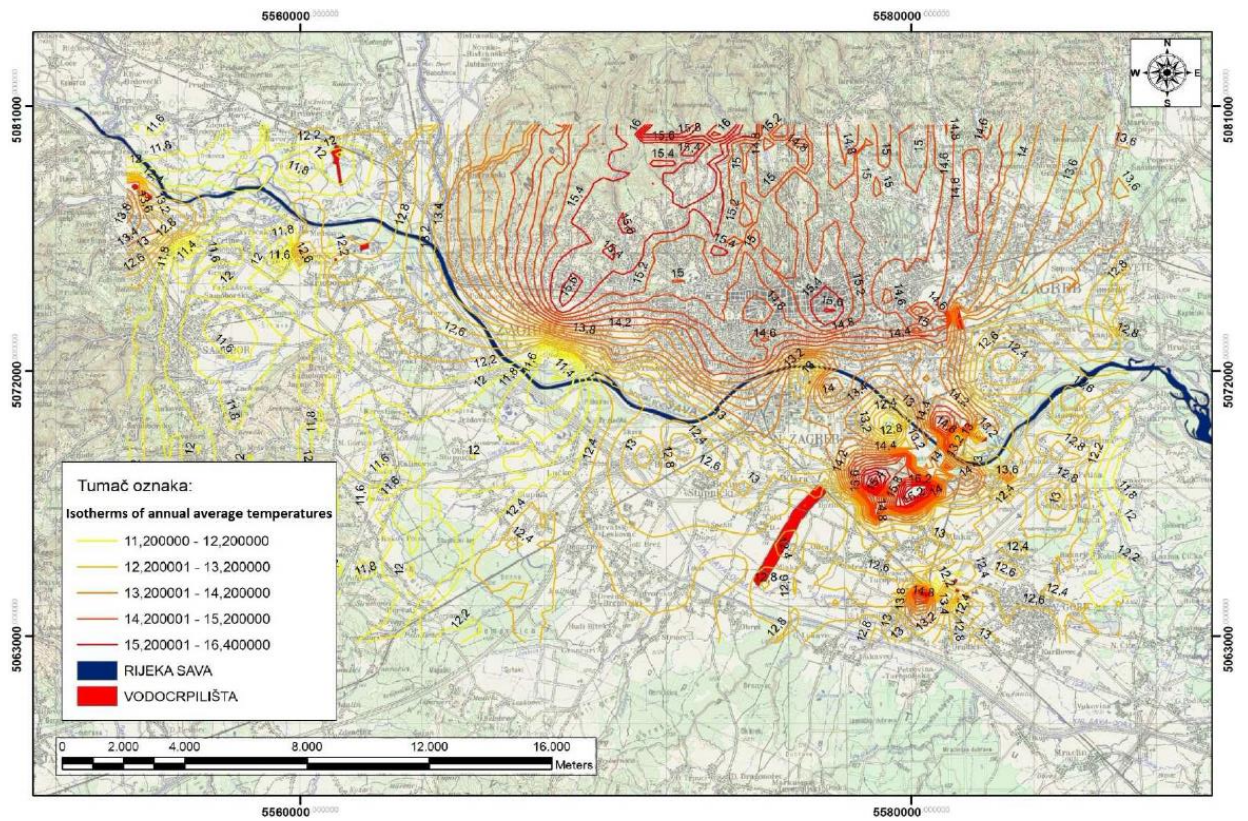
- 1) zapadni dio gdje debljina vodonosnog sloja seže do 10 metara
- 2) dio sjeverno od rijeke Save gdje debljina sloja ne prelazi 20 metara
- 3) dio koji se nalazi južno od rijeke Save gdje je debljina sloja do 35 m
- 4) jugoistočni dio gdje debljina sloja seže čak i do 50 m.

Na slici 3.6. vidljive su izopahe drugog vodonosnog sloja. Na slici je vidljivo da je drugi vodonosni sloj u svim dijelovima vodonosnika značajno deblji od prvog, no međutim jako rijetko se koristi u energetske svrhe.



Slika 3.6. Izopahe vodonosnog sustava (Miletić i Bačani, 1999)

Ukupna crpna količina danas iznosi oko 4700 l/s te se kontinuirano povećavala, s podacima mjerenja koji sežu do 1983. godine kad je iznosila 3300 l/s, preko 1993. godine s količinom od 4000 l/s. Temeljem analiza mjerenja temperatura podzemnih voda od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) i Vodoopskrbe i odvodnje d.o.o. (VIO), utvrđena je relativno stabilna temperatura podzemnih voda u iznosu od 11,5° do 16,5°C. Srednja temperatura podzemnih voda od 13,2°C tijekom godine neovisno o klimatskim parametrima na površini garantira stalan i pouzdan izvor topline. Prostorni prikaz temperatura podzemne vode dan je u prikazan je na slici 3.7. (Kapuralić, 2013).



Slika 3.7. Izoterme prosječnih godišnjih temperatura podzemne vode (Kapuralić, 2013)

4. METODE BUŠENJA PRILIKOM IZRADE ZDENACA

U ovom poglavlju su opisane neke od metoda koje se koriste prilikom bušenja. Različitost metoda omogućuje pristup širokom spektru geoloških situacija koje se pojavljuju, od tvrdih stijena, do nekonsolidiranih sedimenata. Određene bušaće metode su dominantne u određenim područjima jer su efektivne i smanjuju troškove. Nijedna bušaća metoda se ne može deklarirati kao najbolja za sve geološke uvjete, stoga metode i oprema variraju koliko potrebe na terenu to zahtijevaju. Izvedba bušotine može se provesti udarnim, rotacijskim i udarno-rotacijskim metodama. Udarno bušenje se najčešće koristi prilikom izrade plitkih bušotina u nekonsolidiranim sedimentima ili relativno mekim stijenama, rotacijska metoda pak prevlada kod izrade dubokih bušotina, a udarno-rotacijska metoda prilikom bušenja tvrdih stijena.

4.1. Rotacijsko bušenje

Rotacijsko bušenje je razvijeno kako bi povećalo brzinu bušenja i omogućilo bušačima dosezanje velikih dubina u većini formacija, a provodi se jednom od dvije osnovne vrste opreme: vršni pogon (engl. *top drive*) ili vrtači stol. Za bušenje se koristi dlijeto koje je postavljeno na donji kraj bušaćih šipki. Krhotine se iznose konstantnim protokom zraka ili nekog drugog fluida kroz prstenasti prostor između kanala bušotine i bušaćih šipki. Na površini, mehanička oprema omogućuje izdvajanje krhotina, i ponovno cirkuliranje fluida kroz bušotinu. Kad se koristi zrak, krhotine se deponiraju na zemlju, ili u sustav za sakupljanje krhotina, a cirkulirajući zrak odlazi u atmosferu. Kod bušenja pomoću zraka, zrak sam podiže krhotine izvan bušotine. Zrak dobivamo iz kompresora koji je spojen na isplačnu glavu koja se nalazi iznad radne ili bušaće šipke. Isplačna glava je rotacijska jedinica na kojoj visi cijeli bušaći niz, te omogućuje nesmetan protok isplake ili zraka uz nesmetanu rotaciju bušaćeg niza. Prilikom opterećenja na bušaće šipke, zrak prolazi kroz male otvore na dnu dlijeta, pritom hladi dlijeto i iznosi krhotine. Ubrizgavanjem male količine vode ili vode u kombinaciji sa surfaktantom koji skupa daju pjenušavu smjesu u zračni sustav omogućuje kontrolu pijeska, te smanjuje temperaturu zraka. Korištenje zraka je praktično kod polukonsolidiranih i konsolidiranih materijala. Kod rotacijskog bušenja, najčešće se koriste dva tipa dlijeta – lopatasta i žrvanjska dlijeta. Lopatasta dlijeta imaju kratke rezače i čiste se i hlade mlazom bušaćeg fluida. Ova dlijeta su efektivna prilikom bušenja pješčenjaka, gline i mekih formacija. Žrvanjska dlijeta se koriste za bušenja u tvrdim naslagama. Broj zuba na žrvnju ovisi o zahtijevnosti situacije – kako stijena postaje tvrđa, dlijeto bi trebalo imati više zuba na svakom žrvnju. Specijalna vrsta dlijeta, polikristalinska dijamantna dlijeta, na licu imaju sintetičke dijamante. Mogu se koristiti na mjestima koja su

previše mekana ili ljepljiva za konvencionalna dijamantna dlijeta, te za formacije koje su previše tvrde za lopatasta ili žrvanjska dlijeta. Kada je proširenje kanala neophodno, koriste se proširivači kanala bušotine, kako bi osigurali udaljenost stijenke kanala bušotine od bušačeg alata i omogućili nesmetan prolazak krhotina prema površini pri daljnjem bušenju. Konvencionalna bušača postrojenja se sastoje od pogonskih motora, isplačnog bazena, isplačne sisaljke, tornja s koloturnim sustavom za manevriranje nizom bušačih alatki i niza bušačih alatki. Niz bušačih alatki sastoji se od dlijeta, niza teških šipki i niza bušačih šipki. Postrojenje s vrtačim stolom koristi još radnu šipku, za razliku od postrojenja s vršnim pogonom. Bušaće šipke su obično kružnog presjeka, dok radna šipka ima četverokutni ili šesterokutni presjek. Teške šipke osiguravaju osno opterećenje na dlijeto, čineći bušotinu stabilnom i vertikalnom. Oba postrojenja mogu koristiti stabilizatore i proširivače u nizu bušačih alatki. Dubinski bušači sklop alatki ovisi o fizikalnim uvjetima i o geološkom materijalu. Od velike je važnosti postaviti konduktor kolonu kako bi se izbjegla erozija gornjih rastresitih slojeva i pritjecanje potpovršinskih voda u kanal bušotine.

4.2. Bušenje DTH čekićem

Još jedna od metoda bušenja pri kojoj se koristi zrak jest bušenje DTH čekićem (engl. *down the hole drilling hammer*) koji se nalazi na dnu bušotine. Prilikom pneumatskog bušenja, čekić velikom brzinom udara u stijenu, dok se bušaće šipke sporo rotiraju. Čekić je izrađen od legiranog čelika i uložaka teškog volframovog karbida. Rotacija dlijeta osigurava penetraciju i održavanja kanala uspravnim – uključujući i situacije kad se buši ekstremno abrazivne i otporne tipove stijena. To je oblik udarno-rotacijskog bušenja. Penetracija je puno veća pri bušenju tvrdih stijena od drugih bušačih metoda. Najčešće se koriste čekići reda veličine 127 mm i 156 mm, ali veličine sežu i do 608 mm.

4.3. Reverzno bušenje

Kod reverznog bušenja, tok isplake je obrnut, pa tako isplaka skupa s krhotinama ide kroz bušaće šipke do površine, obično u jedan ili više postavljenih bazena. Sisaljka je spojena na radnu i bušaće šipke preko isplačne glave. Centrifugalne sisaljke se često koriste jer mogu obrađivati krhotine bez prekomjernog habanja dijelova sisaljke. Za vodonosne bušotine većih promjera brzine uz kanal bušotine bi trebale biti 45 *m/min* ili veće. Fluid se vraća u bušotinu na temelju gravitacije kroz prstenasti prostor do dna, te ponovno ulazi u bušaće šipke s više prikupljenih krhotina kroz otvore na dlijetu. Prirodna isplaka se obrađuje onog trenutka kada suspendirane čestice gline i silta recirkuliraju kako bušaći proces odmiče

i po potrebi dodaju se polimeri koji smanjuju trenje i kontroliraju gubitak vode ili bubrenje osjetljivih naslaga gline. Vrlo je važno konstantno održavati pozitivan hidrostatski tlak, čak i kad je bušenje privremeno stalo. Reverzno bušenje se obično ne koristi na mjestima gdje je statička razina vode manja od 3 m ispod zemljine površine. Prilikom bušenja propusnih pješčenjaka i šljunaka, značajna količina vode za pripravljanje mora biti dostupna cijelo vrijeme. Brzina cirkulacije obično je 2730 m³/dan ili više. Mnogo postrojenja za reverzno bušenje također sadrži zračni kompresor, te kada bušenje dosegne dovoljnu dubinu za izvođenje operacija zračnog podizanja, otprilike 13,7 do 18,3 m dubine, krhotine se iz kanala bušotine podižu pomoću zraka. Komprimirani zrak se provodi kroz zračnu liniju izrađenu od plastike ili metala, koja prolazi kroz bušaću šipku ili s vanjske strane. Bušaća šipka koja se najčešće koristi ima navoj i spojnicu i promjera je 208 mm, i operativna je na dubinama od 610 m i više. Preporučeno je da reverzni sustav koristi kompresor kojemu je radni tlak 862 kPa. Postrojenja za reverzno bušenje najbolje funkcioniraju koristeći centrifugalne ili klipne sisaljke. Jedna od prednosti metode reverznog bušenja je ekonomičnost pri bušenju kanala velikog promjera u nekonsolidiranim formacijama. Većina zdenaca izbušena ovom metodom ima promjer 508 mm ili veći. Prilikom opremanja bušotine koriste se filteri, prije svega zbog prevelikog promjera kanala bušotine.

4.4. Spiralno bušenje

Spiralno bušenje (engl. *bucket auger*) koji je velikog promjera iskopava se materijal koji se prikuplja u cilindričnu grabilicu koja ima rezače zavojitog tipa na dnu. Grabilica je spojena na donji dio radne šipke koja prolazi kroz veliku prstenastu opremu koja služi kao vrtači stol. Ova bušaća metoda se koristi za bušenje na dubinama većim od 76 m, iako se često koristi i za dubine od 15 m do 45 m. Spiralno bušenje uglavnom se koristi prilikom bušenja glinenih naslaga koje su sklone bubrenju. Bušenje pješenjaka ispod razine podzemne vode je izuzetno zahtjevno, ali nije nemoguće ako bušotina ostaje zapunjena vodom ili isplakom. Glavni nedostatak ove bušaće metode je što je slabo izvediva na plitkim dubinama, odnosno do 30 m, te se ne može koristiti u nekonsolidiranim sedimentima ili slabo cementiranim sedimentnim stijenama.

5. PROJEKTIRANJE ZDENCA

5.1. Opremanje i zaštita zdenaca

Nakon završetka bušenja potrebno je ugraditi zaštitne cijevi i projektirati perforirani dio zdenca. Za zaštitne cijevi i filter najčešće se koriste materijali od čelika (srednje ili nisko-ugljični čelik, nehrđajući i ugljični čelik), plastika (polivinil klorid – PVC, akrilonitril butadienski stiren – ABS, poliolefin) i fiberglas. Od nabrojanih materijala čelik se najčešće koristi prije svega zbog njegove čvrstoće, odnosno otpornosti na gnječenje i rasprskavanje, te se stoga mogu ugraditi do velikih dubina i na mjestima gdje vladaju veliki tlakovi. Zbog takvih karakteristika neophodno ga je koristiti za konduktor kolonu. Za razliku od čelika, plastične cijevi su jeftinije i otporne na koroziju. Uglavnom se koriste kod plitkih zdenaca jer su slabije i lomljivije od čeličnih cijevi. Porastom dubine zdenca, raste i temperatura koja negativno djeluje na plastične cijevi.

Tablica 5-1. Tipične čvrstoće odabranih zaštitnih cijevi (Banks, 2006)

Materijali	Debljina stjenke zaštitnih cijevi (mm)	Čvrstoća na gnječenje (kPa)
Čelik	7,9	5245
PVC	13	790
ABS	13	690
Fiberglas	6	690

Dubina ugradnje je uglavnom oko 100 metara iako postoje primjeri gdje su cijevi od fiberglasa i plastične cijevi ugrađivane i do dubine od 250 m u konsolidiranim vodonosnicima.

Što se tiče načina postavljanja zaštitnih cijevi i filtra, odabir metode ovisi o dubini zdenca, te o raspoloživom postrojenju. Prije svega, bitno je odrediti gornju i donju granicu vodonosnika. Nakon toga, zaštitne cijevi i filter se spajaju na površini do duljine s kojom možemo manipulirati s obzirom na raspoloživo postrojenje. Spajanje može biti zavarivanjem, elektrozavarivanjem ili vijčani spoj. Debljina filtarske sekcije uglavnom jako malo utječe na prolazak pijeska i ostalog materijala u zdenac. Ključni faktor je granulometrijski odnos filtarskog materijala i materijala unutar vodonosnika. Smatra se da debljina bi trebala biti između 5 i 12 cm, a optimalna je oko 7,5 cm. Debljina veća od 12 cm otežava daljnje opremanje zdenca. Nakon toga spoj se spušta u zdenac sve dok filter ne dođe u poziciju naspram vodonosnika. Tada se prstenasti prostor ispuni šljunkom. Ugradnja

filtarske sekcije bez šljunčanog zasipa može biti primijenjena u vodonosnicima izgrađenim od čvrstih i krupnozrnatih nevezanih klastičnih sedimenata. U vodonosnicima izgrađenim od sitnozrnatih nevezanih klastičnih sedimenata, gdje je efektivna veličina zrna manja od 0,25 mm, postavlja se šljunčani zasip koji treba biti takav da sprječava unošenje sitnozrnatog materijala u izrađeni zdenac. Da bi se pravilno pozicionirale zaštitne cijevi i filter, koriste se centralizeri koji su međusobno udaljeni 10 do 20 m. Filter se postavlja kako bi omogućio nesmetan prolazak vode bez pratnje nekih drugih materijala. Nužno ga je postavljati u nekonsolidiranim stijenama, a u konsolidiranim često nema potrebe jer se voda procjeđuje kroz pukotine i šupljine u stijenama. Filtri također mogu biti od različitih materijala kao što su čelik, plastika, beton, ali najčešće se koristi čelik. Odabir materijala, minimalnog promjera se odvija na temelju analize uzorka nekonsolidirane stijene, planiranim količinama vode, načinu eksploatacije. U tablici 5-2. su prikazani minimalni promjeri filtra s obzirom na izdašnost zdenca.

Tablica 5-2. Odabir promjera filtra (Hamil i Bell, 1986)

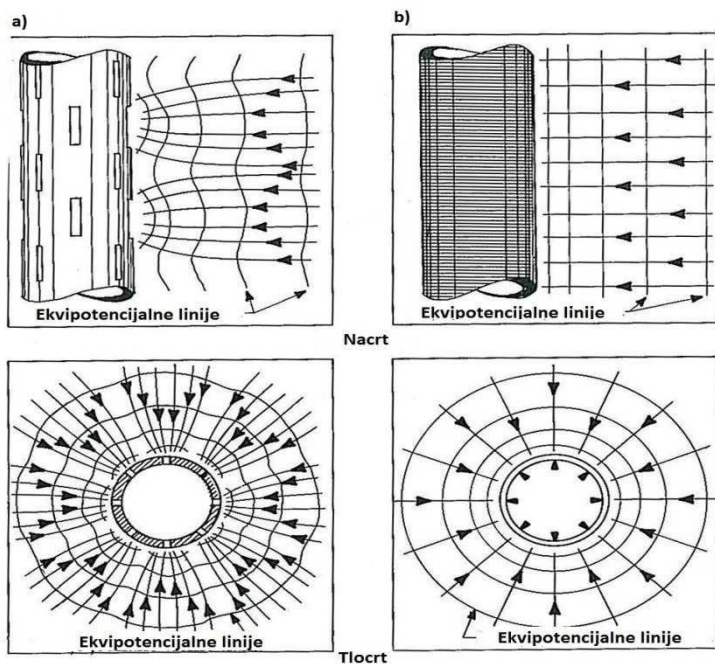
Izdašnost zdenca (l/s)	Minimalni promjer filtra (mm)
do 3,0	50
3 - 8	100
8 - 20	150
20 - 50	200
50 - 90	250
90 - 160	300
160 - 310	350
220 - 310	400
310 - 440	450
440 - 570	500

Postoje razne varijacije filtarskih cijevi koje se koriste, ali najčešće su to cijevi s uzdužnim otvorima (engl. *oblong slotted screen*), PVC filtarske cijevi, spiralni filtri (engl. *spiral screen*), te „mostićasti“ (engl. *bridge slotted screen*). Primjere tih filtara možemo vidjeti na slici 5.1.



Slika 5.1. Izgled filtarskih cijevi: čelične mostićave, čelične spiralne, PVC i čelične s uzdužnim otvorima (<http://www.panceratubi.it>)

Propusnost filtra se definira kao odnos površine perforiranog dijela filtarske cijevi u odnosu na ukupnu površinu filtra. Izražava se u postocima i kreće se u rasponu od 1 do 61 %. Optimalno rješenje se uzima u rasponu od 15 do 25 % da bi se zadovoljili uvjeti što manjeg otpora i potrebne čvrstoće filtarske sekcije. Filtarska konstrukcija je također bitna zbog određivanja ekvipotencijalnih linija tokova podzemne vode uz eksploatacijski dio bušotine (slika 5.2.). Da bi bile određene, važno je znati je li vodonosnik otvorenog ili zatvorenog tipa, te položaj vodoprijemnog dijela bušotine u odnosu na debljinu vodonosnika.



Slika 5.2. Zavisnost položaja ekvipotencijalnih linija o tipu filtra (Driscoll, 1981)

U slučaju zatvorenog vodonosnika, teoretski postoji mogućnost prolaska vode kroz filtarsku sekciju koja potječe iz sedimenata i vodonosnih stijena koje nadliježu vodonosnik, a hidraulički su povezane s filtarskom sekcijom. Obujam vode koji se kreće prema dolje iz pokrovnih vodonosnih stijena može se odrediti pomoću Darcyjeve jednadžbe:

$$Q = K \cdot I \cdot A \quad (5-1)$$

gdje su:

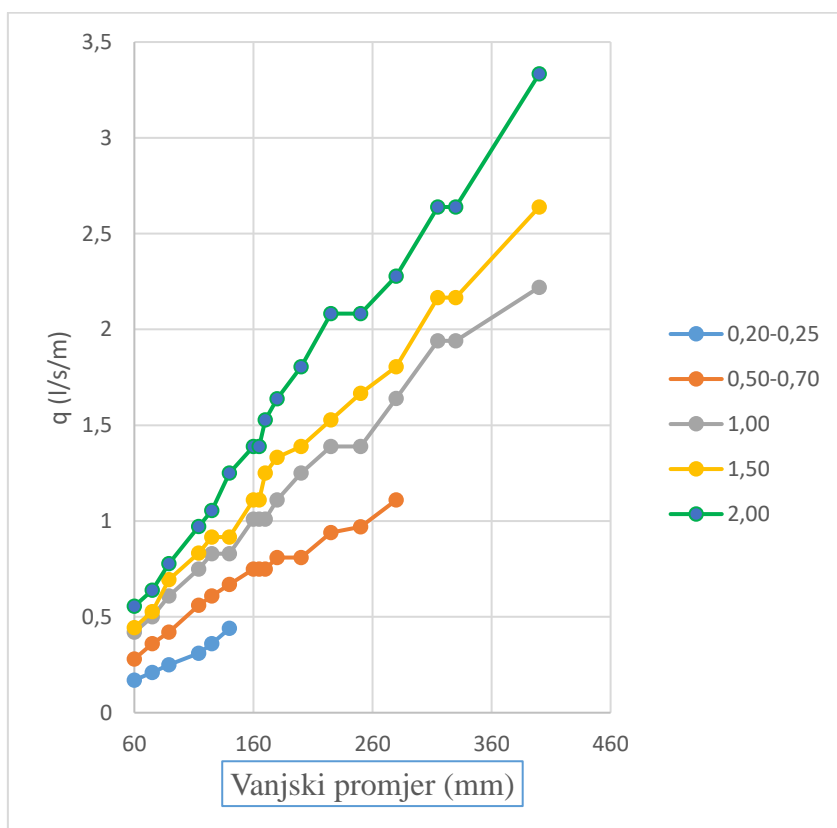
Q – vertikalni protok kroz filtar (dm^3/s)

K – hidraulička vodljivost filtra (cm/s)

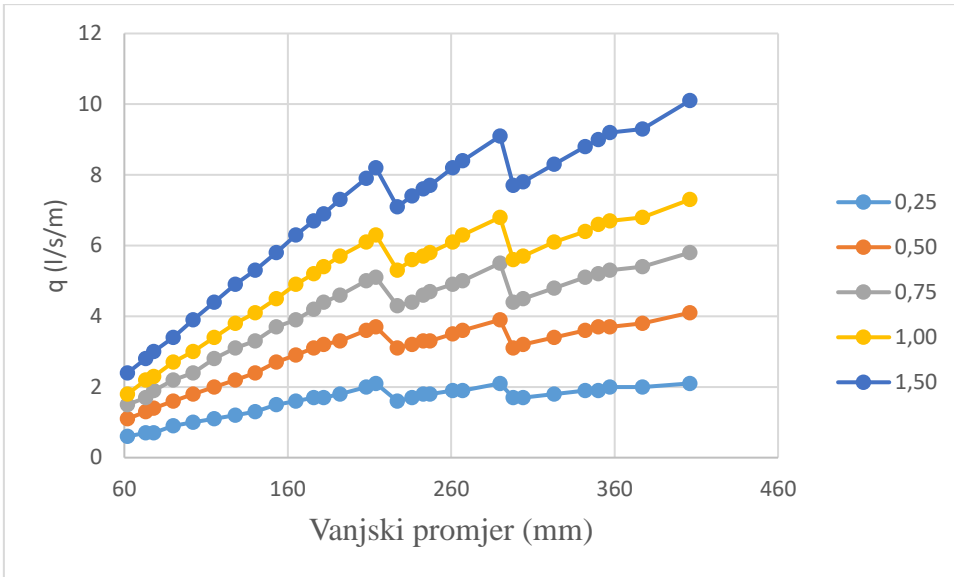
I – hidraulički gradijent filtra (-)

A – površina poprečnog presjeka filtra (cm^2)

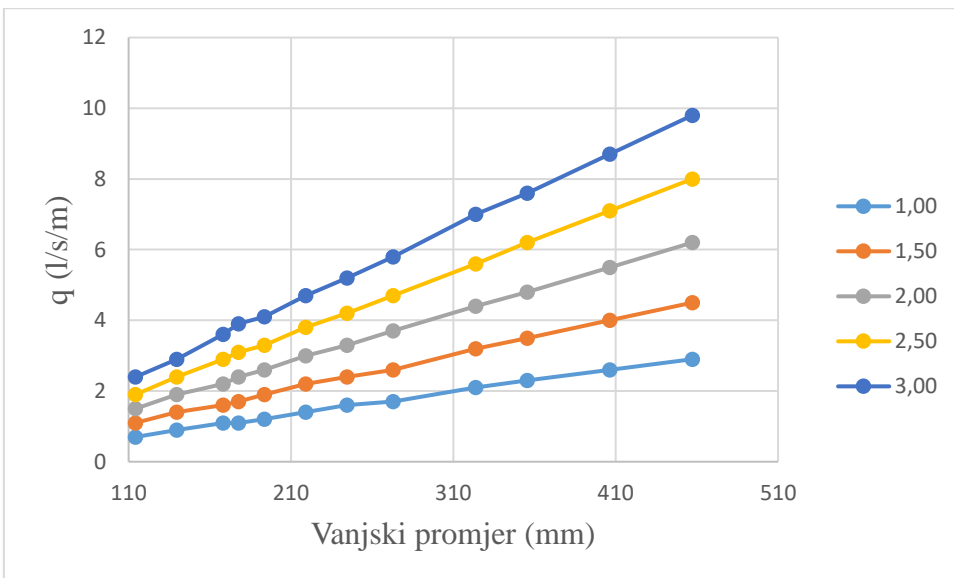
Ispod filtarske sekcije ugrađuje se taložnik koji služi za prihvaćanje sitnozrnatog materijala koji potječe iz vodonosnika, te omogućuje da se u slučaju relativno tankih vodonosnika u njega ugradi pumpa koja služi za eksploataciju. Odnos promjera filtra i protoka vode u l/s/m, za razne veličine otvora, prikazan je slikama (5.3.-5.6.).



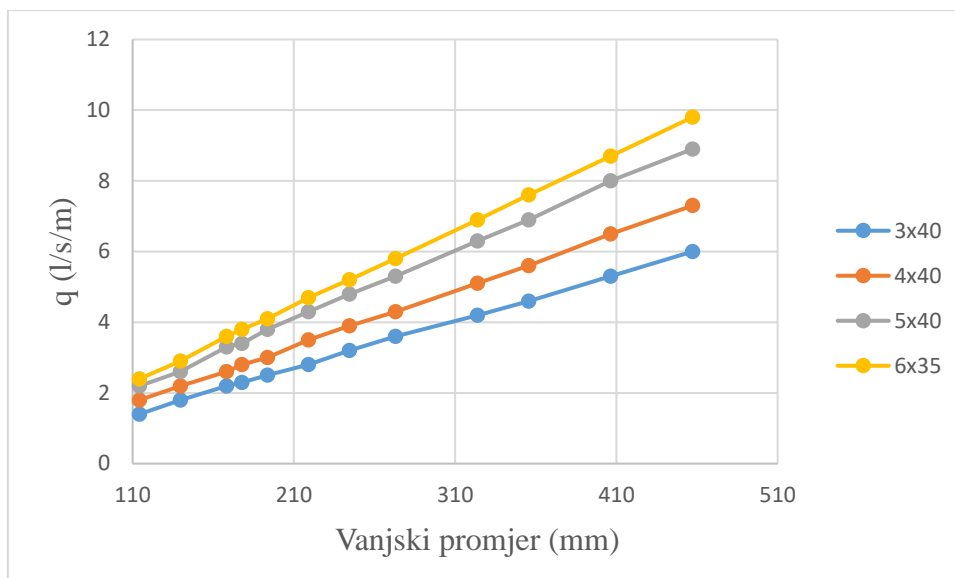
Slika 5.3. PVC filter cijevi (<http://www.panceratubi.it>)



Slika 5.4. Spiralne filter cijevi (<http://panceratubi.it>)



Slika 5.5. Mostićave filter cijevi (<http://panceratubi.it>)



Slika 5.6. Čelične filter cijevi s uzdužnim otvorima (<http://panceratubi.it>)

5.2. Čišćenje i osvajanje zdenaca

Nakon ugradnje zaštitnih cijevi i filter sekcije, zdenac treba očistiti, a vodonosnik uz filter osvojiti. Postoji niz različitih načina osvajanja, ovisno o geografskim regijama koje bilježe određene fizikalne karakteristike pripadajućih vodonosnika. Efektivne metode osvajanja zahtijevaju uklanjanje bušotinskih fluida po završetku instaliranja filtersekcije. Program osvajanja sastoji se od nekoliko koraka:

- Uklanjanje bušotinskih fluida koji se nalaze u vodonosniku, filterskoj sekciji i bušotini
- Mehaničko čišćenje ili čišćenje mlazom vodonosnika, i filtersekcije
- Propuhivanje bušotine zrakom radi uklanjanja sitnozrnatog materijala i postizanja velikih brzina pri protjecanju vode u bušotinu

Razlozi postupka osvajanja su različiti:

- Odstranjivanjem sitnozrnatog materijala iz zasipa, povećava se propusnost vodoprijemnog dijela bušotine i efektivni radijus, a samim time i izdašnost
- Stabilizira se prostor oko filtersekcije, pa će i pri većim ulaznim brzinama kod trajne eksploatacije podzemna voda biti bez sitnih čestica

Početni korak je uklanjanje isplake iz bušotine, filtersekcije i vodonosnika. Ako se uklanjanje obavlja velikom brzinom, postoji mogućnost pojave frakturiranja zaštitnih cijevi, kao posljedica velikog diferencijalnog tlaka. Najčešće metode osvajanja su prekomjernim crpljenjem, hidrauličkim mlazom (engl. *jetting*), klipovanjem te komprimiranim zrakom (engl. *air lift*). Prekomjerno crpljenje podrazumijeva puno veće brzine crpljenja od onih koje

su planirane. Ono nam osigurava daljnje crpljenje bez pojave pijeska i potvrdu odabira veličine opreme za dugoročno crpljenje. U određenim, rijetkim, situacijama prekomjerno crpljenje može izazvati kompakciju sitnozrnatog materijala i pri tome onemogućiti protok vode prema bušotini, čineći bušotinu nedjelotvornom. Prekomjerno crpljenje se najčešće koristi u kompetentnim, nestratificiranim vodonosnim pješčenjacima zbog toga što je tok vode prema bušotini na neki način ujednačen. Klipovanje je metoda koja se često koristi jer se za rad koriste šipke bušaće garniture koju postrojenje posjeduje. Podizanjem i spuštanjem klipa uzrokuje se narušavanje mostića sitnozrnatog materijala u vodonosniku. Time materijal prolazi kroz filter i nastanjuje se u taložniku. Osvajanje komprimiranim zrakom je praktična metoda i daje prihvatljive rezultate i u konsolidiranim i u nekonsolidiranim stijenama. Ako se kao bušotinski fluid koristio zrak, potrebno je manje vremena da se krene u postupak osvajanja bušotine komprimiranim zrakom. Treba uzeti u obzir da mlaznice moraju biti postavljene što bliže stjenki bušotine kako ne bi gubili energiju potrebnu za osvajanje. Glavni nedostatak ove metode je taj što su bušaća postrojenja uglavnom opremljena kompresorom kojima su tlak i kapacitet obujma ograničeni. Kompresor od 862 kPa je efektivan do dubine od 87 m. Također, tlak na dnu bušotine često može biti toliko velik da – iako kompresor može utiskivati zrak – obujam komprimiranog zraka je toliko mali da ne omogućuje osvajanje bušotine. Stoga je na bušaćem postrojenju jako bitno imati dodatni kompresor ukoliko se odluči na ovu metodu osvajanja. Zrak se često miješa s vodom, pa nastala emulzija vrlo lako izbacuje sitne čestice stijene. Osvajanje hidrauličkim mlazom se sastoji od postavljanja horizontalne mlazne alatke blizu stjenke bušotine tako da je mlaz usmjeren na kroz otvore stjenke. Oprema uključuje alatku s dvije ili više mlaznica, visokotlačnu sisaljku i kompresor, cijevi i spojnica i čiste vode potrebne za obavljanje procesa. Mlaz usmjerava vodu kroz otvore stjenke i na taj način izbacuje sitnozrnati materijal koji okružuje stjenku u taložnik. Također isplačni oblog koji se stvorio tijekom bušenja se lako uklanja tlakom mlaza. Ova metoda se često koristi u nekonsolidiranim vodonosnicima. Nakon završetka konstrukcije i osvajanja bušotine, slijedeći korak je omogućivanje podizanja podzemne vode na površinu. Za izvedbu tog zadatka najčešće se koriste pumpe u kombinaciji s motorima. Crpka može biti definirana kao uređaj koji pruža energiju fluidu. U ovom slučaju taj fluid je podzemna voda. Energija koja se prenosi s motora na crpku i na kraju na fluid omogućuje izvođenje operacija kao što je podizanje vode na veću vertikalnu visinu kako bi je pridobili na površini usmjeravajući je na cjevovod koji puni rezervoar. U današnje vrijeme, crpka koja se najčešće koristi je centrifugalna crpka (Sterett, 2007). Osnovni dijelovi svake centrifugalne crpke su kućište (stator) u kojemu je smješteno radno

kolo s lopaticama (rotor), vratilo radnog kola spojeno s pogonskim strojem, ležaj vratila s tlačnom brtvenicom, koja sprječava da tekućina izlazi iz kućišta sisaljke, te brtveni prstenovi između radnog kola i kućišta koji sprječavaju da tekućina prelazi s tlačne na usisnu stranu radnog kola. Razlikuju se tri osnovna tipa crpki: centrifugalne crpke s horizontalnom osovinom, crpke s vertikalnom osovinom i uronjene crpke. Centrifugalne crpke s horizontalnom osovinom se koriste kod eksploatacije plitkih podzemnih voda, relativno visoke razine podzemne vode. S obzirom da se crpka nalazi izvan vode, usisni dio može podizati vodu samo s dubine od 7 m. Vrlo su ekonomične i uglavnom se koriste pri navodnjavanju poljoprivrednih površina. Crpke s vertikalnom osovinom se često koriste i imaju dug vijek trajanja. Nisu uvjetovane statičkom i dinamičkom razinom podzemne vode, te mogu dosegnuti do visokih dubina. Sastoje se od jednog ili više rotora smještenih u jedinici s jednim ili više razina. Svaka razina omogućuje određenu visinu podizanja, što znači dovoljan broj razina zadovoljava potrebe potencijala cijelog sustava. Pri dizajniranju crpke, broj razina je proporcionalan potrebnom potencijalu i konjskoj snazi, pri tome protok ostaje isti. Ova crpka zahtijeva potpunu vertikalnost kanala bušotine u koji se ugrađuje. Uronjene crpke se u današnje vrijeme najčešće koriste. Postoji niz razloga za to, od kojih su najbitniji marketinški pritisak koji zahtijeva smanjenje troškova bušenja korištenjem zaštitnih cijevi manjeg promjera, jednostavnija proizvodnja iz dubokih bušotina, povećana pouzdanost potopljenih motora. Ovaj tip crpki se može koristiti i u bušotinama koje nisu vertikalne, a u heterogenom litološkom sastavu vertikalnost je teško postići. Odabir prikladne crpke je vrlo izazovan postupak i zahtijeva znanje i iskustvo. Pri odabiru crpke, treba paziti na očuvanje kvalitete vode, mehanički integritet, dugoročnu efikasnost kako bi se smanjili operativni troškovi, sigurnost okoline. Također, bitna je činjenica da visina podizanja crpkom neće biti konstantna zbog sezonskih i godišnjih oscilacija razine podzemne vode. Zato je vrlo važno obaviti testiranja na temelju kojih se određuje maksimalna i optimalna količina vode koja se može eksploatirati uz adekvatna sniženja. Na osnovu ovih uvjeta definira se tip crpke i dubina njezine ugradnje.

6. ANALIZA SLUČAJA NA ZAPADNOM DIJELU ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

Kako bi prikazali učinkovitost sustava dizalice topline na sistemu voda-voda, urađena je analiza slučaja na zapadnom dijelu zagrebačkog vodonosnika. Za potrebe grijanja stambene građevine (cca. 350 m²), predviđena je eksploatacijska količina vode od 1,4 l/s za nesmetan rad dizalice topline. Projektirana je izrada dvaju zdenaca. Jedan zdenac bio bi eksploatacijski iz kojeg bi voda prolazila kroz sustav dizalice topline, a drugi bi bio utisni, putem kojeg bi se iskorištena voda vraćala u vodonosnik. Pri tome treba napomenuti da je jedina promjena vode fizikalna, točnije promjena temperature. Prije početka izvedbe radova prije svega je potrebno definirati određene stavke i to:

- 1) Metoda izvedbe bušotina
- 2) Tehničke konstrukcije zdenaca
- 3) Šljunčenje perforirane i vodoprijemne sekcije zdenaca
- 4) Osvajanje – čišćenje zdenaca
- 5) Testiranje zdenaca;

te sve ostale neophodne radnje da se zdenci izvedu i privedu eksploataciji. Odabran je direktan rotacijski način bušenja uz istovremeno utiskivanje zaštitnih kolona. Pri tome je utisni zdenac UZ-1 prvi izrađen, a potom i eksploatacijski zdenac EZ-1. Završna dubina bušenja EZ-1 je 15 metara (završna dubina UZ-1 je 20 metara), i nakon toga se pristupilo ugradnji tehničke konstrukcije kao što je prikazano u tablici.

Tablica 6-1. Tehnička konstrukcija eksploatacijskog zdenca EZ-1

INTERVAL [m]	UGRADBENA KONSTRUKCIJA
+0,50 - -6,00	puna antikorozivno zaštićena čelična cijev Ø140mmx6.5mm
-6,00 - -12,00	INOX spiralno motani filter; Ø140mmx6.5mm
-12,00 - -15,00	antikorozivno zaštićen čelični taložnik Ø140mmx6.5mm

Tehničku konstrukciju zdenca čine INOX cijevi vanjskog promjera Ø140 mm čija je izvedba propisana standardom AISI 304 i 316 L. Odabir otvora filtra određen je prema litološkim karakteristikama vodonosnika, utvrđenom granulometrijskom analizom nabušenog sloja. S obzirom na konstrukciju, projektirani ulazni kapacitet zdenca iznosi:

$$q/m' = d \cdot \pi \cdot v \cdot f \quad (6-1)$$

gdje su:

q/m' – maksimalni kapacitet po dužnom metru, za zadani laminarni uvjet tečenja vode (l/s)

d – promjer ugrađene INOX cijevi ($d=0,140$ m)

v – maksimalna brzina ulaza vode u filter za laminarne uvjete tečenja ($v = 0,030$ m/s)

f – ukupni perforirani dio filtera u postocima ($f = 31,3\%$)

Iz toga slijedi:

$$q/m' = 0,00413 \text{ m}^3/\text{s} = 4,1 \text{ l/s} \quad (6-2)$$

i

$$Q_{uk} = L \cdot q/m' = 24,6 \text{ l/s} \quad (6-3)$$

gdje su:

Q_{uk} – maksimalni projektirani kapacitet prihrane vode u zdenac za laminarni tok (l/s)

L – ukupna duljina ugrađenog filtra ($L=6,0$ m)

Nakon ugradnje, u prstenasti prostor kojeg definiraju promjer bušotine i ugradbena konstrukcija, položen je kvarcni šljunak Ø4-8mm od dna do dva metra iznad filtarske sekcije ugradbene konstrukcije. Nakon toga, pristupilo se čišćenju i osvajanju zdenca. Prilikom čišćenja i osvajanja zdenca voda je bila u potpunosti čista i bez primjesa pijeska. Osvajanje zdenca izvršeno je komprimiranim zrakom (air-lift metodom). Iznad kvarcnog zasipa u prstenasti prostor položen je glineni tampon, kako bi se izolirao utjecaj površinskih voda. Pokusno crpljenje eksploatacijskog zdenca izvršeno je u koracima – „step test“ – i crpljenje sa stalnom količinom – „konstant test“. Crpna količina određivana je obujamski kako je i prikazano u tablici 6-2.

Tablica 6-2. Vrijednosti crpne količine u određenom vremenskom intervalu

Crpna količina [l/s]	Vremenski interval [min]
$Q_1=0,7$	60
$Q_2=1,7$	60
$Q_3=2,3$	60

Litološki opis nabušenih naslaga eksploatacijskog zdenca EZ-1 dan je u tablici 6-3.

Tablica 6-3. Litološki opis nabušenih naslaga eksploatacijskog zdenca EZ-1

INTERVAL [m]	LITOLOŠKI OPIS
0,00 - -1,00	nasuti materijal
-1,00 - -4,00	glina, prahovita, sivo smeđe boje
-4,00 - -12,00	šljunak, srednjezrnati, pjeskovit
-12,00 - -15,00	glina, prahovita, smeđe boje

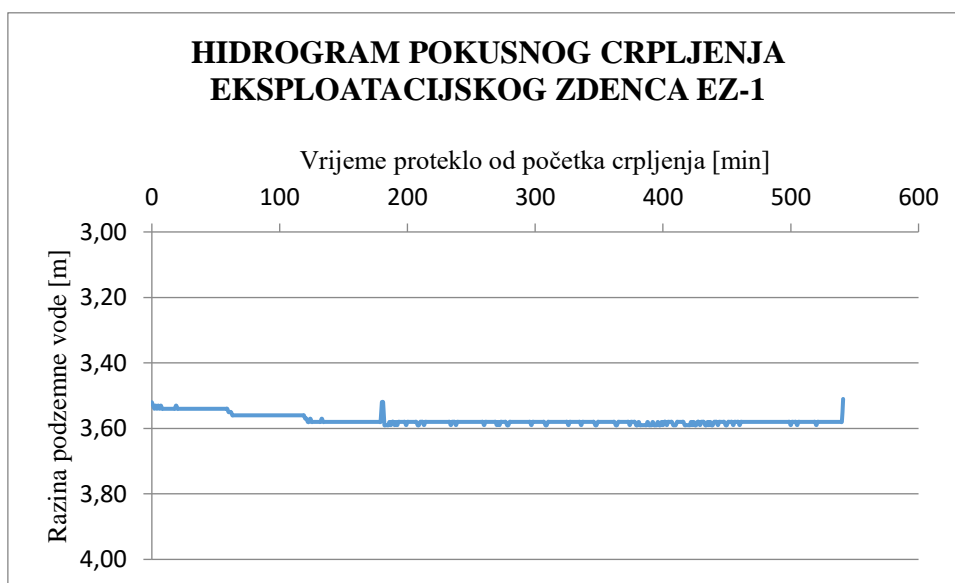
Hidrogram pokusnog crpljenja EZ-1 prikazan je na slici a obradom podataka crpljenja dobivena je jednadžba sniženja prema Cooper – Jacobu koja glasi:

$$s = 24Q + 1375Q^2 \quad (6-4)$$

gdje su:

s – sniženje (m)

Q – crpne količine (m^3/s)



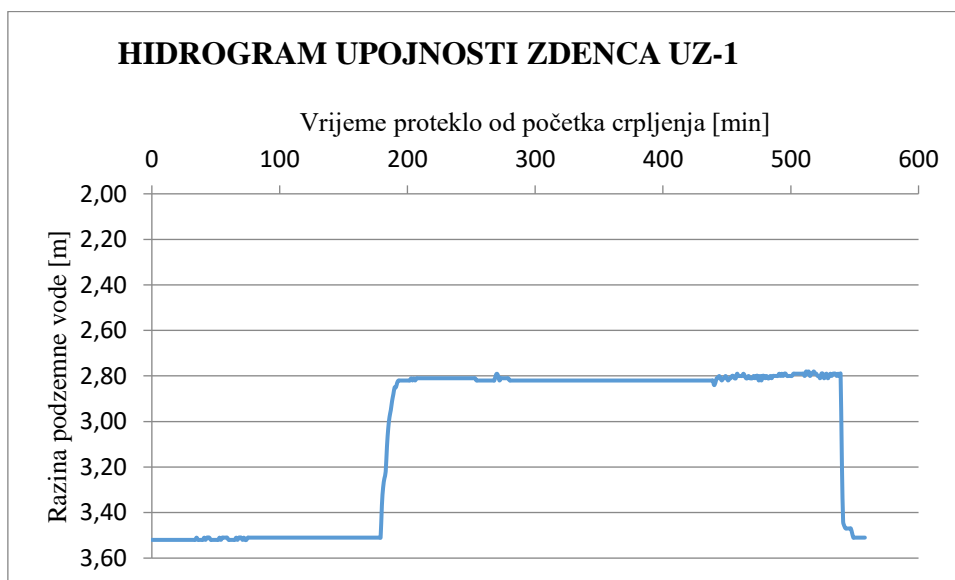
Slika 6.1. Hidrogram pokusnog crpljenja eksploatacijskog zdenca EZ-1

Utisni zdenac UZ-1 karakteriziran je nabušenim naslagama prikazanim u tablici 6-4.

Tablica 6-4. Litološki opis nabušenih naslaga utisnog zdenca UZ-1

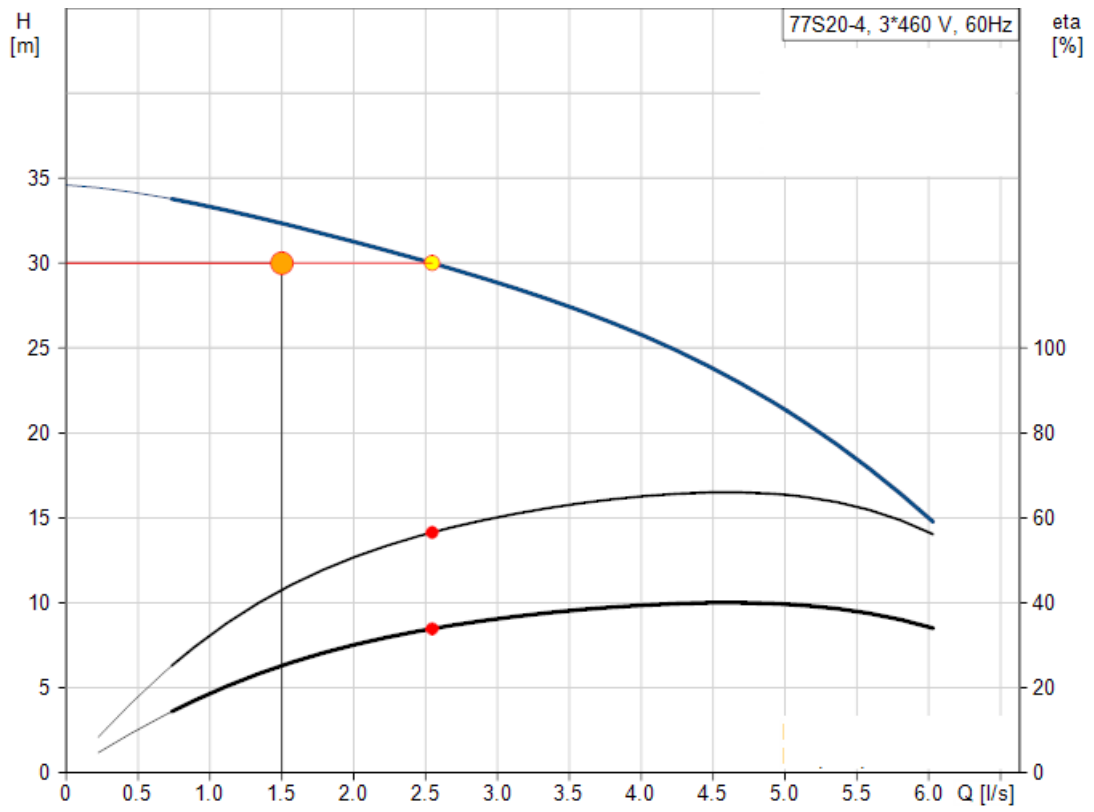
INTERVAL [m]	LITOLOŠKI OPIS
0,00 - -1,00	nasuti materijal
-1,00 - -3,00	glina, prahovita, sivo smeđe boje
-3,00 - -5,50	pijesak, sitnozrnati, sive boje
-5,50 - -7,00	mješavina šljunka i pijeska, jako zbijeno i tvrdo
-7,00 - -9,00	pijesak, srednjezrnati, sive boje
-9,00 - -10,00	mješavina šljunka i pijeska, jako zbijeno i tvrdo
-10,00 – 13,00	pijesak, sitnozrnati, mjestimično zaglinjen
-13,00 - -16,50	šljunak, srednjezrnati, pjeskovit
-16,50 – 20,00	glina, prahovita, sivo smeđe boje

Provjerom upojnosti zdenca dobiven je hidrogram upojnosti koji je prikazan na slici, a ukazuje porast podzemne vode od 73 cm, te time dokazuje da zdenac može prihvatiti projektiranu količinu vode, što je i prikazano na slici 6.2.



Slika 6.2. Hidrogram upojnosti utisnog zdenca UZ-1

Za potrebe podizanja vode na površinu korištena je Grundfos crpka oznake 77S20-4 promjera 0,1016 m. Karakteristike pumpe prikazane su na slici 6.3.



Slika 6.3. Crpna karakteristika crpke (GRUNDFOS, <http://hr.grundfos.com>)

7. ZAKLJUČAK

Kao prikaz učinkovitosti korištenja dizalice topline u obliku klimatizacijskog sustava, za primjer se uzeo slučaj građevine na zapadnom dijelu zagrebačkog vodonosnika, u sistemu voda-voda, odnosno sistem iskorištavanje podzemnih voda. Lokacija se nalazi na 115 m.n.m. Temeljem piezometra određena je visina vodnog lica podzemne vode u iznosu od 109 m.n.m. Da bi opskrbili prostor potrebnom količinom energije (cca. 30 kW) utvrđeno je da potrebna količina vode iznosi 1,4 l/s. Kako bi se zadovoljili svi uvjeti, izbušena su dva zdenca, jedan eksploatacijski oznake EZ-1, te jedan utisni oznake UZ-1.

Radi određivanja optimalnog režima crpljenja i hidroloških parametara odrađena su pokusna crpljenja s tri različita kapaciteta u vremenskom intervalu od 60 min za svako crpljenje. Utvrđeno je također da eksploatacija zdenca nema nikakav negativan utjecaj na vodocrpilište, te da ni u kom obliku ne šteti građevini ni okolini. Također je provjerom upojnosti utisnog zdenca UZ-1 utvrđeno da zdenac može prihvatiti projektiranu količinu vode bez negativnih posljedica. Utvrđen je i maksimalni projektirani kapacitet prihrane vode u zdenac za laminarni tok u iznosu od 24,6 l/s.

Uporaba sustava dizalica topline u energetskej opskrbi je sve više konkurentnija konvencionalnoj energetskej opskrbi, kao ekološki prihvatljiviji i s vremenom ekonomski isplativiji energetskej sustav.

8. LITERATURA

1. BAČANI, A., ŠPARICA, M. 2001. Geology of the Zagreb aquifer system. 9th International Congress of the geological society of Greece. (26.-28. September, 2001.). Proceedings, vol XXXIV, No 5, 1973-1979, Athens.
2. BANKS, D. 2006. Water Wells and Boreholes. Chichester.: John Wiley and Sons Ltd.
3. BLOETSCHER, F. 2014. Manual of water supply practices 4th Edition. Denver: American Water Works Association
4. BUDIN, R.; MIHELIĆ-BOGDANIĆ A. 2002. Osnove tehničke termodinamike 2. Zagreb: Školska Knjiga.
5. DAVIS, N. 1969. Hydrogeology. London: John Wiley and Sons Ltd.
6. DRISCOLL, F. 1981. Water and Power Resources Service. St. Paul Minnesota: Johnson Filtration Systems.
7. DRISCOLL, F. 1986. Groundwater and Wells 2nd Edition. St. Paul Minnesota: Johnson Filtration Systems.
8. HAMIL L., BELL F.G. (1986): Groundwater Resource Development. London: Butterworths.
9. LOHMAN. S. W., 1979. Groundwater hydraulics. U.S.: Geological Survey Professional Paper, 708.
10. KAPURALIĆ, J. 2013. Identifikacija utjecaja temperaturnih oscilacija rijeke Save i geotermalnih anomalija na temperaturene oscilacije podzemne vode zagrebačkog i samoborskog vodonosnika. Zagreb: Diplomski rad, RGN fakultet.
11. KUREVIJA, T. 2010. Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala RH. Zagreb: Disertacija, RGN fakultet.
12. MILETIĆ, P., BAČANI, A. 1999. Izrada bilansa. Knjiga 4. Zagreb: RGN fakultet.
13. NARODNE NOVINE 2008. Voda i upravljanje vodama, (107/95, 150/05).
14. NARODNE NOVINE 2010. Pravilnik o izdavanju vodopravnih akata, (78/10, 82/10).
15. POSAVEC, K. 2006. Identifikacija i prognoza minimalnih razina podzemne vode zagrebačkoga aluvijalnog vodonosnika modelima recesijskih krivulja. Zagreb: Disertacija, RGN fakultet.
16. STERETT, R. J. 2007. Groundwater and wells 3rd Edition. New Brighton Minnesota: Johnson Screens

17. URUMOVIĆ, K., D. MIHELČIĆ 2000. Podzemne vode savskog vodonosnika. Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima zbornik radova. Slavonski Brod: Okrugli stol.
18. VELIĆ, J., SAFTIĆ, B. 1991. Subsurface Spreading and Facies Characteristics of Middle Pleistocene Deposits between Zaprešić and Samobor. Geološki vjesnik, 44, 69-82.
19. VELIĆ, J., DURAN. 1993. Alternating Lacustrine-Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases during Quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia. Geologia Croatica, vol. 46, no. 1, p. 71-90.
20. VELIĆ, J., SAFTIĆ, B., MALVIĆ T. 1999. Lithologic Composition and Stratigraphy of Quaternary Sediments in the Area of the „Jakuševac“ Waste Depository (Zagreb, Northern Croatia). Geologia Croatica, vol 52., no. 2, 119-130
21. GRUNDFOS.
URL:https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?from_suid=148131535914308935644931948972&pumpsystemid=172655472&qcid=181563061 (09.12.2016)
22. L'OBSERVATOIRE DES ENERGIES RENOUVEABLES.
URL: <https://www.eurobserv-er.org/pdf/2015/EurObservER-Heat-Pumps-Barometer-2015-CRO.pdf> (07.12.2016)
23. PANCERA Tubi e Filtri.
URL: http://www.panceratubi.it/nuovo/pdf/catalogo_tubi_e_filtri_eng.pdf (04.12.2016)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad samostalno izradio.

Dario Tomić